

ارزیابی آزمایشگاهی اثربخشی نمک‌های فرمیت در بهبود خواص سیال حفاری پایه آبی

مجید سجادیان*، بهمن پیرمردیان^۱، دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۴/۱۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۴/۱۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۴/۲۱

واژگان کلیدی:

سیال حفاری پایه آبی، نمک‌های فرمیتی، خواص حرکتی، پایداری حرارتی، بازدارندگی شیل

سیالات پایه فرمیتی در بیش از یک صد عملیات چاه‌های چالش‌برانگیز صنعت نفت شامل سازندهای محتوی شیل و چاه‌های دما-فشار زیاد موفقیت‌آمیز بودند. آنها نسبت به سیالات پایه آبی متداول مزایای بیشتری دارند؛ از جمله پایداری خواص افزایشدهنده در دماهای زیاد، احتمال کم گیر لوله، خاصیت بازدارندگی شیل، نرخ خوردگی کم و دوست‌دار محیط زیست بودن. در این مطالعه نمونه‌های سیال حفاری محتوی نمک‌های فرمیتی و افزایشدهنده‌های دیگر با فرمولاسیون خاص خود طراحی شد. بررسی آزمایشگاهی جهت ارزیابی رفتار رئولوژیکی سیالات پایه فرمیتی به صورت تابعی از دما انجام گردید. خواص حرکتی، افت صافی و بازیابی شیل در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بازیابی شیل و پایداری حرارتی سیالات فرمیتی از سایر نمونه‌های سیال حفاری بهتر است. از این رو نمک‌های فرمیتی پایداری حرارتی پلیمرها را در سیال حفاری پایه آبی بهبود می‌دهند.

مقدمه

صنعت نفت در قرن ۲۱ به کار می‌روند. شل نخستین کاربرد میدانی فرمیت سدیم در عملیات حفاری لوله آستری-مغزی را در سال ۱۹۹۳ و در هلند انجام داد. این فرآیند در کمتر از یک‌سال بعد با استفاده میدانی از پتاسیم فرمیت به صورت سیال مخزنی در نروژ ادامه یافت. از آن زمان محلول‌های فرمیت سدیم و پتاسیم به طور موفقیت‌آمیزی به صورت سیالات حفاری^۱، پکر^۲، تکمیل چاه^۳ و برانگیختگی چاه^۴ در بیش از ۴۰۰ چاه در ۱۵ کشور سرتاسر جهان استفاده شدند. پیشرفت نهایی در توسعه محلول فرمیتی فرمیت سزیم بود که در ۱۹۹۸ به طور تجاری ارائه شد. در شش سال گذشته محلول سزیم فرمیت در بیش از ۶۰ عملیات حفاری و تکمیل دما-فشار زیاد در دریای شمال و خلیج مکزیک کاربرد داشته است [۱۰-۶].

۱- نمک‌های فرمیتی

نمک‌های فرمیتی اسید فرمیک انحلال‌پذیری زیادی در آب دارند که منجر به تشکیل محلول‌های متراکم و قلیایی با گرانیروی در محدوده‌ای از خواص مطلوب از قبیل کاهش میزان هیدرولیک و اکسید شدن بسیاری از گرانیروی‌افزاها و عوامل کنترل هرزروی در دماهای زیاد شده و در نتیجه سبب افزایش کارآیی در دماهای زیاد به صورت سیالات حفاری و تکمیل چاه مناسب می‌گردد. نمک‌های فرمیتی تک‌ظرفیتی بسیار کارآمد در صنعت نفت فرمیت سدیم، فرمیت پتاسیم و فرمیت سزیم هستند. این نمک‌ها تجدیدپذیر در محیط زیست هستند، سمیت کمی برای ارگانیسم‌های زنده داشته و تأثیر کمی در خوردگی فلزات دارند. محلول‌های فرمیتی به صورت سیالات حفاری فاقد جامدات برای

سیالات فرمیتی سیالاتی هستند که قابلیت استفاده به عنوان سیالات تکمیل چاه و حفاری فاقد جامد را تا وزن ۱۹/۲ppg دارند. خواص برجسته‌ی این سیالات در بهینه‌سازی هزینه، تولیدپذیری، مدت زمان استفاده و اثرات محیط زیستی مؤثر است. این سیالات در شرایط عملیاتی دما-فشار زیاد، سازندهای رسی حساس به آب و چاه‌های طویل کاربردهای موفقیت‌آمیزی داشته‌اند. امروزه مبنای فن‌آوری نمک‌های فرمیتی توسط محققان مرکز تحقیقات شل^۲ توسعه یافته که منجر به اثربخشی این نمک‌ها در دماهای زیاد بر پایداری پلیمرهای رایج سیال حفاری شده است. این نمک‌ها امکان طراحی سیالات پایه آبی ساده جهت دستیابی به حفاری در شرایط دما-فشار زیاد را دارند. همان‌طور که ذکر شد تقریباً تمامی سیالات آماده شده از نمک‌ها فرمیتی قابلیت کاهش چگالی معادل گردش^۳ حذف مشکلات رسوب باریت^۴ و کاهش احتمال چسبندگی تفاضلی^۵ را دارند [۴-۱]. تحقیقات شل نشان داد که از اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی محلول‌های پایه فرمیتی قابلیت فراهم کردن سیالات با بازدهی زیاد جهت اجرای شیوه‌های حفاری و تکمیل چاه جدید را دارند. شیوه‌های جدید منجر به حفاری حفرات عمیق‌تر شامل انحرافی، افقی و باریک بالوله آستری و مغزی شد. این شیوه‌های حفاری جدید نیازمند سیالاتی فاقد جامدات جهت کمینه کردن چگالی معادل گردش و افت فشار گردش هستند. در پانزده سال گذشته مطالعات آزمایشگاهی به وضوح نشان داد که محلول‌های فرمیتی خواص محیط زیستی مناسب، پایداری شیل‌ها، ممانعت‌کننده از آبدیدگی سازند، کمینه کردن خوردگی، کاهش مشکلات کنترل چاه و کمینه کردن آسیب به سازند را دارند. به طور خلاصه این سیالات برای چالش‌های

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (sajjadianmajid@yahoo.com)

خواص فیلتراسیون ایجاد می‌کنند. استفاده از کربنات کلسیم دانه‌بندی شده به صورت ذرات ریز جامد جهت خاصیت پل‌ساز ضرورت دارد. پلیمرها در آب هیدراته می‌شوند. سپس ترکیب به سیستم سیال اشباع پایه اضافه شده و سیال حفاری پایه جهت مقایسه اثربخشی سیالات پایه فرمیتی انتخاب می‌شود [۱۷].

۲- کارآیی نمک‌های فرمیتی

نمک‌های فرمیتی خصوصیات انحلال‌پذیری، قلیانیت و چگالی زیاد و نقطه‌ی کریستالی شدن کم دارند. با افزایش وزن اتم فلز قلیایی، غلظت و وزن محلول اشباع بیشتر و نقطه‌ی کریستالی شدن کمتر می‌شود. در این مطالعه به جنبه‌های زیر توجه شده است:

■ فرمیت‌ها در پایداری شیل مؤثرند. شیل مشابه با غشای نیمه‌تراوای انتخاب‌گر در سازندهای شیلی کم‌تراوای فاقد ترک عمل می‌کند (تراوایی $\geq 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$). در محلول غلیظ ناشی از فعالیت کم آب، فشار اسمزی قابلیت افزایش حجم آب درون حفرات شیل را دارد. این عمل موجب تعادل در تنش‌های اطراف حفره‌ی چاه می‌شود و در نهایت پایداری دیواره‌ی حفره‌ی چاه افزایش می‌دهد.

■ فرمیت‌ها سازگاری خوبی با پلیمرهای مصرفی متداول در صنعت نفت دارند که قابلیت کاهش نرخ تخریب اکسیداسیون و هیدرولیز بسیاری از کاهنده‌های افت صافی و گرانروی‌افزاها در دما و فشار زیاد را دارند [۱۵ و ۱۶].

۳- طراحی، فرمولاسیون و ارزیابی سیال حفاری پایه فرمیتی

۳-۱- فرمولاسیون نمونه‌ی سیال پایه و فرمیت پتاسیم

سیستم سیال حفاری پایه فاقد نمک‌های فرمیتی به همراه سه سیستم سیال (مشخص شده به صورت DIF-1، DIF-2، و DIF-3) شامل ۵۰ درصد وزنی فرمیت پتاسیم برای انجام آزمایش‌ها آماده شد. فرمولاسیون سیال شامل پلیمر گرانروی‌افزا، پلیمر کاهنده‌ی افت صافی (نشاسته و پلی آنیون سلولز^۱) و کربنات کلسیم دانه‌بندی شده است (جدول-۲). پلیمر طبیعی گرانروی‌افزا (صمغ زانتان) خاصیت تیکسوتروپی و قابلیت انتقال کنده‌های حفاری را فراهم کرده و پلیمرهای افت صافی خاصیت کنترل

۳-۲- فرمولاسیون نمونه‌ی سیال محتوی فرمیت سدیم و پتاسیم

ترکیب سیستم سیال حفاری پایه فرمیتی محتوی فرمیت سدیم و پتاسیم در جدول-۳ مشخص شده که مشابه اجزای تشکیل دهنده‌ی سیال پایه آبی هستند. نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم به سیستم اضافه شده‌اند تا اثربخشی این نمک‌ها در خواص گل حفاری پایه آبی ارزیابی شود [۱۸].

۳-۳- تجهیزات، دستگاه و روش آزمایش

نمک فرمیت سدیم با حداقل خلوص ۹۹ درصد و وزن مولکولی ۶۸/۰۱ و فرمیت پتاسیم با کمینه‌ی خلوص ۹۹ درصد و وزن مولکولی ۸۴۰/۱۲ در ترکیب گل استفاده شدند. خواص رئولوژیکی سیال با ویسکومتر دوار مدل فن-۳۵ به صورت مستقیم و خواص فیلتراسیون سیالات توسط دستگاه فیلتراسیون چندگانه‌ی مدل فن 12BL اندازه‌گیری شد. برای گرم کردن سیالات تحت شرایط دینامیک در دماهای مختلف از آون غلطان (مدل-فن) استفاده گردید. آزمایش‌های اندازه‌گیری خواص حرکتی در دمای محیط با ویسکومتر فن-۳۵ برای هر نمونه پس از آون حرارتی انجام شده است. متغیرهای رئولوژیکی شامل (گرانروی پلاستیک، گرانروی ظاهری و نقطه‌ی واروی) بر اساس مدل بینگهام پلاستیک با استفاده از روابط ۱- تا ۳ محاسبه شده است:

$$AV = \frac{\theta_{600}}{2} \quad (1)$$

$$P_v = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (2)$$

$$Y_p = \theta_{300} - P_v \quad (3)$$

آزمایش‌های فیلتراسیون در دمای محیط و فشار ۱۰۰ psi با دستگاه

۱ | خواص متداول محلول‌های فرمیتی اشباع

میزان قلیانیت	وزن محلول		غلظت نمک فرمیتی (درصد وزنی)	محلول
	۵۵ (۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد)			
	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	Kg/m^3		
۹/۴	۴۵	۱۳۳۸	۴۵	فرمیت سدیم
۱۰/۶	۷۶	۱۵۹۸	۷۶	فرمیت پتاسیم
۱۲/۹	۸۳	۲۳۶۷	۸۳	فرمیت سزیم

نتیجه گیری

در این مطالعه اثربخشی کارآیی نمک‌های فرمیتی جهت بهبود خواص سیال پایه آبی در دماهای مختلف ارزیابی شد. بدین منظور تمامی نمونه‌های مورد آزمایش به مدت ۱۶ ساعت در دماهای (۱۶۰، ۱۵۰، ۱۳۰ و ۱۲۰°C) در آون غلطان قرار گرفتند. خواص حرکتی تمامی نمونه‌ی سیالات مورد آزمایش در این مطالعه در جدول ۴ قابل مشاهده است. در شکل ۱- گرانروی پلاستیک تمامی نمونه‌ی سیالات حفاری در دماهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود گرانروی پلاستیک با افزایش دما کاهش می‌یابد. اگرچه کاهش گرانروی پلاستیک در گل پایه فرمیتی محتوی نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم کمتر از نمونه‌های گل دیگر است اما نمونه‌ی گل پایه فرمیتی محتوی نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم ناشی از عملکرد برجسته‌ی نمک‌های فرمیتی قابلیت تثبیت گرانروی پلاستیک تا دمای ۱۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را دارد (کاهش خاصیت مورد نظر سیال حفاری کمتر از ۵۰ درصد مقدار اولیه است). شکل ۲- نشان‌دهنده‌ی نقطه‌ی واروی تمامی نمونه‌های گل در دماهای مختلف است. مطابق شکل ۲- کاهش خاصیت نقطه‌ی واروی در گل‌های فاقد نمک‌های فرمیت بیشتر از گل‌های محتوی نمک‌های فرمیتی است. یکی از متغیرهای مهم در ارزیابی کارآیی سیالات پایه آبی میزان افت صافی است. در شکل ۳- میزان افت صافی تمامی نمونه‌های گل در دمای محیط مشاهده می‌شود. مقدار افت صافی گل فاقد نمک‌های فرمیتی در دماهای مختلف بیشتر از نمونه‌ی گل محتوی نمک‌های فرمیتی است. از این رو می‌توان به قابلیت مناسب نمک‌های فرمیتی در افزایش بازدهی پلیمرها برای کاهش افت صافی تا دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اطمینان حاصل کرد. در شکل ۴- اطلاعات آزمایش‌های افت صافی API، ضخامت کیک فیلتراسیون و ضریب سایش نمونه‌ی گل‌های پایه آبی و محتوی نمک

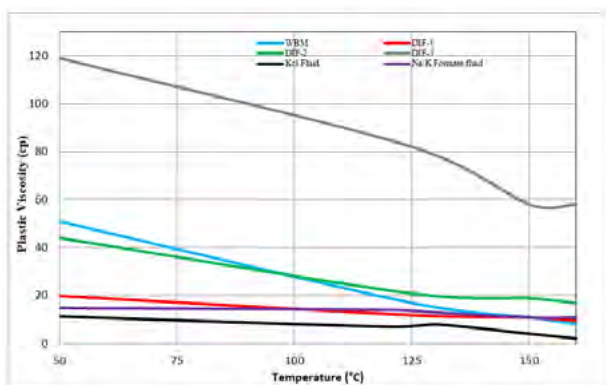
فیلتراسیون چندگانه (مدل فن 12BL) و حجم فیلتراسیون جمع‌آوری شده در ۳۰ دقیقه به صورت افت صافی سیال انجام می‌شود. آزمایش بازیابی شیل توسط روش انستیتو نفت آمریکا (API RP 13I) انجام گردید. این آزمایش شبیه‌سازی شرایط کنده‌های حفاری در معرض سیال حفاری حین انتقال به سطح در فضای حلقوی حفاری چاه است. نمونه‌ی شیل حفاری شده آسیاب شده و با دو توری ۴ میلی‌متری (مش-۵) و ۲ میلی‌متری (مش-۱۰) الک شد. ذرات ریز شیل که از توری ۴ میلی‌متری عبور کرده اما روی توری ۲ میلی‌متری باقیمانده و برای آزمایش استفاده شده است. میزان ۲۰ گرم نمونه‌ی شیل دانه‌بندی شده به محفظه‌ی محتوی ۳۵۰ میلی‌لیتر هر نمونه‌ی سیال افزوده شد. محفظه‌ی محتوی نمونه‌ی شیل و سیال در آون حرارت برای مدت زمان ۱۵ ساعت در دماهای مختلف قرار گرفت. پس از سپری شدن مدت زمان آزمایش، محفظه در دمای اتاق خنک شد. ترکیبی از ۱۵ پوند بر بشکه محلول کلرید پتاسیم و آب نمک به عنوان محلول شستشو آماده شد. ترکیب درون محفظه‌ی آزمایش روی توری ۵۰۰ میکرومتر (مش-۳۵) ریخته شد. محتویات درون محفظه با استفاده از محلول شستشو روی توری ۵۰۰ میکرومتر ریخته شد. این عمل تا تخلیه‌ی کامل محتویات محفظه‌ی آزمایش تکرار شد. سپس نمونه‌ی شیل جمع‌آوری شده روی توری ۵۰۰ میکرومتر به ترتیب با محلول کلرید پتاسیم و آب شور شستشو گردید. ذرات شیل در آون دمای ۲۵۰ درجه‌ی فارنهایت خشک شد و نمونه‌ی شیل توزین گردید. درصد بازیابی شیل توسط رابطه‌ی ۴- تعیین شد [۱۹]:

$$(4) \quad \text{بازیابی شیل} (\%) = \frac{\text{وزن شیل حفاری شده نمونه‌ی شیل اولیه}}{100} \times 100$$

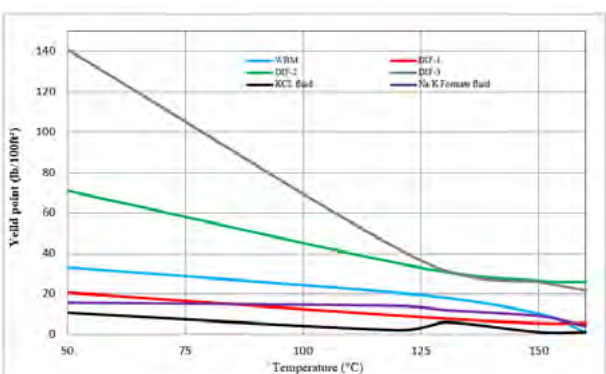
۲ | ترکیب نمونه‌ی سیالات حفاری پایه و فرمیت پتاسیم

سیال پایه فرمیت سدیم و پتاسیم			سیال پایه آبی (WBF)	واحد	فرمولاسیون
سیال فرمیتی-۳ (DIF-3)	سیال فرمیتی-۲ (DIF-2)	سیال فرمیتی-۱ (DIF-1)			
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	میلی لیتر	آب
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۰	میلی لیتر	نمک فرمیت پتاسیم
۴	۴	۴	۴	گرم بر لیتر	صمغ زانتان
۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	گرم بر لیتر	نشاسته
۲۰	۱۰	۰	۲۰	گرم بر لیتر	پلی آنیون سلولز
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	گرم بر لیتر	کربنات کلسیم
مقدار مورد نیاز					ضد کف

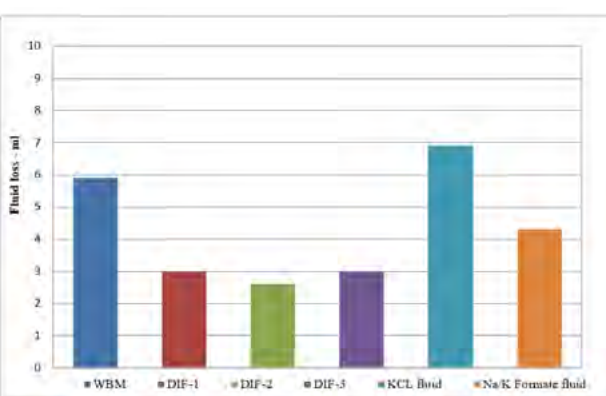
برای سیال حفاری متداول در عملیات حفاری چاه‌های دما-فشار زیاد و سازندهای محتوی شیل هستند. این سیالات حفاری همچنین دوست‌دار محیط زیست هستند و قابلیت تجدیدپذیری در محیط زیست را دارند.



شکل ۱ | گرانیوی پلاستیک تمامی نمونه‌ی سیالات حفاری در دماهای مختلف



شکل ۲ | نقطه‌ی واری تمامی نمونه‌های گل در دماهای مختلف



شکل ۳ | میزان افت صافی تمامی نمونه‌های گل در دمای محیط

فرمیت پتاسیم (WBM, BIF-1, BIF-2, BIF-3) مشخص شده است. سیالات پایه پتاسیم فرمیت مقادیر اندازه‌گیری شده افت صافی و ضریب سایش کمتری نشان می‌دهند و محتوی ۱۰ گرم بر لیتر PAC، میزان کمتری افت صافی، ضریب سایش و کیک حاصل از فیلتراسیون نازک‌تر نسبت به نمونه‌ی سیال پایه هستند. به‌طور کلی سیالات پایه پتاسیم فرمیت، در آزمایش افت صافی API، کیک حاصل از فیلتراسیون کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر ایجاد می‌کند [۱۷ و ۱۸].

مقادیر بازیابی شیل نمونه‌های سیال حفاری پایه کلرید پتاسیم و فرمیت در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در جدول ۵- مشخص شده است. بازیابی شیل گل پایه فرمیتی از نمونه‌ی گل کلرید پتاسیم در دماهای بالاتر بیشتر است.

جمع‌بندی

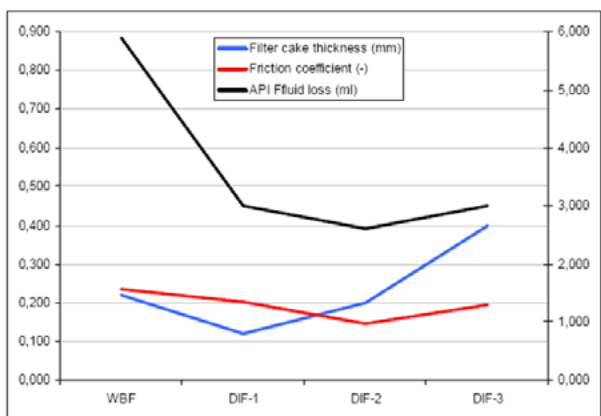
در این مطالعه تأثیر نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم بر پایداری حرارتی خواص سیال حفاری پایه آبی شامل خواص حرکتی و افت صافی در مقایسه با سیستم پایه آبی کلرید پتاسیم متداول و گل پایه آبی فاقد نمک‌های فرمیتی به‌صورت آزمایشگاهی ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده‌ی خواص بهتر فیلتراسیون و حرکتی سیال حفاری محتوی نمک‌های فرمیتی نسبت به سیال پایه آبی به‌ویژه در دماهای بیشتر است. مطابق نتایج آزمایش بازیابی شیل، نمک‌های فرمیتی خواص بازدارندگی بهتری فراهم می‌کنند و از این‌رو جایگزین مناسبی

شکل ۴ | فرمولاسیون متداول سیالات پایه فرمیت سدیم و پتاسیم

ترکیب نمونه‌ی سیال حفاری	واحد	سیال کلرید پتاسیم	سیال پایه فرمیت سدیم و پتاسیم
آب دریا	میلی‌لیتر	۳۵۰	۳۵۰
سودا اش	گرم	۰/۳	۰/۳
نشاسته	گرم	۴	۴
PHPA	گرم	۱	۱
صمغ زانتان	گرم	۱	۱
کلرید پتاسیم	گرم	۱۲۱	۲۱
فرمیت سدیم	گرم	-	۵۰
فرمیت پتاسیم	گرم	-	۵۰
پودر آهک	گرم	۵۰	۵۰

۴ | خواص حرکتی تمامی نمونه‌ی سیالات مورد آزمایش

Mud Type	WBF				DIF-1			
Properties	Pv (cp)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (10 Sec.)	Gel (10 Min.)	Pv (cp)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (10 Sec.)	Gel (10 Min.)
Temperature °C								
۵۰	۵۱	۳۳/۱	۱۵/۹۵	۱۷/۱۲	۲۰	۲۰/۵	۷/۴۵	۷/۷۵
۱۲۵	۱۷	۱۹/۴	۱۸/۶۴	۲۱/۷۱	۱۲	۸/۵۲	۰/۸۱	۱/۷
۱۵۰	۱۱	۱۰/۱	۰/۸۱	۱۵/۱۴	۱۱	۵/۴	۰	۰/۵
۱۶۰	۸/۱۸	۰/۷۳	۰	۰	۹/۷۶	۵/۵۸	۰	۰
Mud Type	DIF-2				DIF-3			
Properties	Pv (cp)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (10 Sec.)	Gel (10 Min.)	Pv (cp)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (10 Sec.)	Gel (10 Min.)
Temperature °C								
۵۰	۵۱	۳۳/۱	۴۷/۲۷	۴۸/۱۷	۲۰	۲۰/۵	۳۶/۸۱	۸/۲۳
۱۲۵	۱۷	۱۹/۴	۳۳/۱۳	۱۴/۱۳	۱۲	۸/۵۲	۳۲/۰۹	۴/۳
۱۵۰	۱۱	۱۰/۱	۲۸/۴۲	۱۱/۰۶	۱۱	۵/۴	۲۹/۹۸	۱۱/۲
۱۶۰	۸.۱۸	۰/۷۳	۲۹/۴۴	۳/۶۵	۹/۷۶	۵/۵۸	۲۹/۳۶	۱۰/۶۹
Mud Type	KCL fluid				Na/K Formate fluid			
Properties	Pv (cp)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (10 Sec.)	Gel (10 Min.)	Pv (cp)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (10 Sec.)	Gel (10 Min.)
Temperature °C								
۲۵	۱۳	۱۴	۳	۴	۱۵	۱۶	۳/۵	۴/۵
۱۲۰	۷	۲	۱/۵	۲/۵	۱۴	۱۴	۳	۴
۱۳۰	۸	۶	۲	۳	۱۳	۱۲	۲	۳
۱۵۰	۴	۱	۰/۵	۱	۱۱	۹	۲	۳
۱۶۰	۲/۵	۲	۰	۰	۱۱	۴	۱/۵	۲



۴ | افت صافی API، ضخامت کیک فیلتراسیون و ضریب سایش
شکل
نمونه‌ی سیال حفاری WBF, BIF-1, BIF-2, BIF-3

۵ | مقادیر بازیابی شیل نمونه‌های سیال حفاری پایه کلرید پتاسیم و فرمیت در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد [۱۸]

سیال پایه کلرید پتاسیم	سیال پایه کلرید پتاسیم	دمای سیال (سانتی‌گراد)
۰/۹۵	۰/۸۸	۱۲۰
۰/۹۲	۰/۸۷	۱۵۰
۰/۹۲	۰/۸۴	۱۷۵

- | | | |
|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| 1. b.pirmoradian@gmail.com | 5. Differential sticking | 9. Well Stimulation |
| 2. Shell Research Center | 6. Drilling Fluid | 10. Work Over |
| 3. ECD | 7. Packer Fluid | 11. PAC |
| 4. Barite Sag | 8. Completion Fluid | |

- [1]. Bungert, D., Maikranz, S., Sundermann, R, Downs, J., Benton, W., Dick, M.A. (2000.): The Evolution and Application of Formate Brines in High-Temperature/High-Pressure Operations; SPE 59191, presented at 2000 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 23-25 February.
- [2]. Bungert, D., Maikranz, S., Sundermann, R, Downs, J., Benton, W., Dick, M.A. (2000.): The Evolution and Application of Formate Brines in High-Temperature/High-Pressure Operations; SPE 59191, presented at 2000 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 23-25 February.
- [3]. Downs, J.D., (1992.): Formate Brines: New Solutions to Deep Slim- Hole Drilling Fluid Design Problems; paper SPE 24973, presented at the European Petroleum Conference, Cannes, France, 16-18 November.
- [4]. Downs, J.D., (1993): Formate Brines: Novel Drilling and Completion Fluids for Demanding Environments; paper SPE 25177, presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, New Orleans, LA, USA, 2-5 March.
- [5]. Downs, J.D., Killie, S., Whale, G.F., Inglesfield, C., (1994.): Development of Environmentally Benign Formate-Based Drilling and Completion Fluids; paper SPE 27143, presented at the Second International Conference on Health, Safety & Environment in Oil & Gas Exploration & Production, Jakarta, Indonesia, 25-27 January.
- [6]. Downs J.D., Howard S.K., Carnegie A. (2005.): Improving Hydrocarbon Production Rate Through the Use of Formate Fluids - A Review; SPE 97694, presented at International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia, 5-6 December.
- [7]. Downs, J.D., Blaszczynski, M., Turner, J., Harris, M., (2006.): Drilling and Completing Difficult HP/HT Wells With the Aid of Cesium Formate Brines - A Performance Review; paper IADC/SPE 99068, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida; USA; 21-23 February.
- [8]. Hallman, J.H., Mackey, R., and Swartz, K.: "Enhanced Shale Stabilization With Very Low Concentration Potassium Formate/Polymer Additives," SPE 73731, SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, 20-21 February 2002.
- [9]. Mackey, R. and Hallman, J.: "Low Concentration Formate Fluids Improve Drilling in Water-Based Muds in Difficult Shale Environments in Western Canada," IV SEFLU (Seminarion de Fluidos de Perforacion y Terminacion de Pozos), Isla de Margarita, Venezuela, 5-8 June 2001.
- [10]. Hallman, J. and Bellinger, C.: "Potassium Formate Improves Shale Stability and Productivity in Underbalanced Drilling Operations," CADE/CAODC Drilling Conference, Calgary, 20-22 October 2003.
- [11]. Messler, D., Kippie, D., Broach, M. and Benson, D.: "A Potassium Formate Milling Fluids Breaks the 400° Fahrenheit Barrier in the Deep Tuscaloosa Coiled Tubing Clean-out," SPE 86503, SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, 18-20 February 2004.
- [12]. Leth-Olsen, H.: "CO2 Corrosion of Steel in Formate Brines for Well Applications," NACE 04357, 2004.
- [13]. Scoppio, L., Nice, P.I., Nødland, S. and LoPiccolo, E.: "Corrosion and Environmental Cracking Testing of a High-Density Brine for HPHT Field Application," NACE 04113, 2004.
- [14]. Chenevert, M.E.: "Drilling Fluid Optimization in Shales. Swelling Pressure and Compressive Strength of Shale, Topical Report," Prepared for Gas Research Institute, Contract No. 5093-210-2898, December 1998.
- [15]. Gao, P. and Towler, B. (2010) Strategies for evaluation of the CO2 miscible flooding process. SPE-138786, Conference of 2010 Abu Dhabi International Petroleum Exhibition, Abu Dhabi, 1-4 November 2010, 10 p.
- [16]. Gao, P. and Yin, D. (2006) Simulation study on the conditions of converting injection wells to production wells in low permeability reservoirs. Journal of Daqing Petroleum Institute, 6, 12-22.
- [17]. Gaurina-Menimurec, B. Pašić, K. Simon, D. Matanović, M. Malnar.: "FORMATE-BASED FLUIDS: FORMULATION AND APPLICATION", Rud.-geol.-naft. zb., Vol. 20, 2008.
- [18]. M. Valizadeh and A. R. Nasiri, "Improving Thermal Stability of Starch in Formate Fluids for Drilling High Temperature Shales", Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 2, No. 1, 2012, 61-64
- [19]. API RP 13I, Recommended practice for laboratory testing of drilling fluids, - 6th edition, MAY 2000.