مطالعه و بررسی ویژگی سیالات فرمیت سدیم/پتاسیم در حفاری لایه‌های شیلی مشکل‌زا و لایه مخزنی

مجید ولی‌زاده[۱]، علیرضا نصیری*[۲]، سید علیرضا مرتضوی[۲] و حبیبه شیخ رستم‌آبادی[۲]
۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
۲- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده اکتشاف و تولید، واحد پژوهش حفاری
Nasiriar@ripi.ir

پژوهش نفت
سال بیستم
شماره ۶۴
صفحه ۶۴-۵۳، ۱۳۸۹

چکیده

عملیات حفاری در سازندهای شیلی همواره یکی از مشکلات عمده بوده است. عدم پایداری چاه در لایه‌های شیلی یکی از مهمترین عوامل افزایش زمان و در پی آن هزینه‌های حفاری می‌باشد. از این‌رو انتخاب صحیح سیال حفاری جهت کنترل شیل، باعث کاهش هزینه‌ها، زمان حفاری و همچنین کاهش آسیب سازند می‌گردد. یکی از این سیالات، سیالات فرمیتی به‌ویژه فرمیت پتاسیم و سدیم بوده که در زمره بهترین نوع سیالات پایه آبی پایدار کننده شیل می‌باشد. این سیالات با توجه به خصوصیات ذاتی نمک‌های فرمیتی، پایداری بسیار خوبی در چاه بوجود می‌آورند. با استفاده از نمک‌های فرمیتی می‌توان سیالاتی با دانسیته بالا و با حداقل ذرات جامد جهت حفاری لایه‌های شیلی و لایه‌های مخزنی طراحی کرد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که سیالات فرمیتی خواص رئولوژی خود را بعد از حرارت به خوبی حفظ کرده و همچنین این سیالات بازیابی شیل بسیار خوبی در حد سیالات پایه روغنی دارند. به‌طوری‌که سیالات فرمیتی در مقایسه با انواع سیلیکاتی، گلایکولی و کلرید پتاسیمی، بازیابی شیل بهتری از خود نشان می‌دهند. با توجه به آزمایشات انجام شده پلیمرهای مختلف با سیالات فرمیتی سازگاری خوبی دارند. نتایج آزمایش روانی سیال فرمیتی نشان داد که سیال فرمیتی از روانی خوبی در مقایسه با سایر سیالات پایه آبی برخوردار است و نیازی به اضافه کردن مواد روان کننده ندارد.

واژه‌های کلیدی: سیالات حفاری فرمیتی، سیالات پایه آبی، پایداری شیل، آسیب سازند

مقدمه

ایجاد یک دهانه چاه پایدار، یکی از چالش‌های اصلی حین عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مشکلات پیش‌بینی نشده در رابطه با عدم پایداری چاه موجب وارد شدن هزینه‌ای معادل ۱۰ درصد هزینه کل چاه می‌شود [۱]. کنترل شیل‌های ناپایدار یکی از مهمترین ویژگی‌های سیالات حفاری می‌باشد. تکنولوژی‌های جدید در این عرصه دائماً در حال توسعه بوده و تکنولوژی‌های پیشین نیز مورد اصلاح قرار می‌گیرند.

استفاده از سیالات فرمیتی[1] به تازگی در حفاری رواج یافته است. این سیالات با توجه به ویژگی‌های منحصر به‌فردی که از خود نشان می‌دهند، جایگزین مناسبی برای سیالات رایج[2] در حفاری نواحی شیلی مشکل‌زا، حفاری چاه‌های با دما و فشار بالا[3] و همچنین حفاری لایه‌های مخزنی می‌باشند [۲]. سیالات فرمیتی برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ به عنوان سیال حفاری در عملیات حفاری با لوله مغزی سیار[4] در یک چاه انحرافی مورد استفاده قرار گرفت و تا کنون عملیات حفاری مختلفی در نقاط مختلف جهان توسط سیالات فرمیتی صورت گرفته است [۳]. سیالات فرمیتی اصطلاحی است که توسط صنعت نفت به محلول‌های آبی نمک‌های فلزی قلیایی حاصل از اسید فرمیک گفته می‌شود. سه نمک فرمیتی مورد استفاده در عملیات حفاری و تکمیل چاه شامل فرمیت سدیم، فرمیت پتاسیم و فرمیت سزیم می‌باشد. حلالیت فرمیت سدیم در آب نسبت به سایر نمک‌های فرمیتی کمتر بوده و می‌تواند دانسیته سیال را تا $1/3\ gr/cm^3$ افزایش دهد. نمک فرمیت پتاسیم حلالیت بیشتری نسبت به فرمیت سدیم داشته و سیالی با حداکثر دانسیته $1/6\ gr/cm^3$ را ایجاد می‌کند. فرمیت سزیم بیشترین حلالیت را در آب دارد و با استفاده از آن می توان گل‌هایی با دانسیته $2/3\ gr/cm^3$، با حداقل ذرات مواد جامد وزن افزا به‌دست آورد [٤]. لذا نمک‌های فرمیتی تمامی محدوده وزن گل که به‌طور معمول برای عملیات حفاری و تکمیل مورد نیاز است، را پوشش می‌دهد. مهمترین مزایای استفاده از این نوع گل‌ها در مقایسه با سایر گل‌ها عبارتند از:

– دانسیته بالای سیالات فرمیتی (با حداقل درصد مواد جامد) که باعث بهبود عملیات حفاری در چاه‌های انحرافی و افقی می‌شود.

– به علت فقدان مواد وزن افزا احتمال ته‌نشین شدن آنها از بین می‌رود و همچنین دانسیته معادل چرخشی گل[5] کاهش یافته و در مجموع نرخ چرخش گل مناسب خواهد بود.

– سازگاری بسیار خوب آن با سیال و کانی‌های مخزن باعث آسیب کمتری به مخزن شده و تولید چاه را افزایش می‌دهد.

– با استفاده از سیالات فرمیتی می‌توان جریان هیدرولیک را بهینه کرده و انتقال توان را حداکثر نمود. در نتیجه تمیزکاری افزایش یافته وبه دنبال آن نرخ نفوذ حفاری بالا می‌رود.

– این گل‌ها به‌عنوان پایدار کننده شیل‌ها بوده و پایداری چاه را بهبود می‌بخشند.

–این نوع گل‌ها از سازگاری خوبی با پلیمرها برخوردار هستند. همچنین پایداری آنها را در مقابل حرارت افزایش می‌دهند.

– بهبود کنترل چاه و کاهش ریسک در نتیجه حذف مشکلات ته‌نشینی باریت، تشخیص سریع جریان یافتن سیال مخزن به درون چاه نسبت به سیالات پایه روغنی و دیگر ویژگی‌های این نوع سیالات می‌باشد.

– کاهش مشکلات گیر تفاضلی[6] لوله‌های حفاری به علت تشکیل کیک گل نازک توسط این نوع گل‌ها [۲].

با توجه به این نکته که از این سیال می‌توان در همه مراحل مختلف حفاری استفاده کرد، لذا هزینه‌های تعویض و جایگزینی سیال از بین می‌رود.

مکانیزم‌های ناپایداری شیل[7]

پیش از شناخت چگونگی کنترل شیل توسط سیالات فرمیتی، نیاز به شناخت مکانیزم‌های ناپایداری شیل‌ها و راهکارهای کاهش این عوامل می‌باشد. هنگامی که طبقات زمین به داخل چاه ریزش می‌کنند باید مشکل را جدی فرض نموده و در اسرع وقت به چاره جویی آن اندیشید. مهمترین عامل ریزش طبقات شیلی جذب آب و باد کردن و ریزش آنها به داخل چاه می‌باشد [۵]. این جذب آب به‌علت تفاوت در ترکیب شیمیایی گل‌های پایه آبی و سنگ‌ها صورت می‌گیرد و تا زمانی‌که تعادل شیمیایی بین آنها برقرار گردد، ادامه می‌یابد. جذب آب توسط لایه‌های شیلی به‌واسطه دو نیروی جدا از هم صورت می‌گیرد:

– اختلاف فشار هیدروستاتیک ستون گل و فشار سازند که بستگی به وجود عواملی از جمله: وزن گل، عمق چاه، سرعت گل در فضای حلقوی چاه و فشار سازند دارد.

– وجود خاصیت فشار اسمزی بین سطح برخورد گل و لایه که وابسته به خواص ترکیب شیمیایی گل و سازند و تمایل ایجاد تعادل بین آنها می‌باشد [٦].

1. Formate Fluids
2. Conventional Fluids
3. HT/HP Well
4. Coiled Tubing Operation
5. ECD
6. Differential Sticking
7. Shale Instability Mechanisms

مشکلات ناشی از ناپایداری شیل‌ها در چاه عبارتند از:
- ناپایداری دیواره چاه[1]
- ناپایداری کنده‌های حفاری[2]
- توپی شدن مته[3]

ناپایداری دیواره چاه

دلیل اصلی مشکل ناپایداری دیواره چاه در لایه‌های شیلی، افزایش فشار حاصل از جریان هیدرولیکی صافاب سیال پایه آبی به درون شیل‌ها می‌باشد. برای سازندهای شیلی با میزان تراوایی کمتر انتظار می‌رود که نرخ افزایش فشار منفذی بیشتر از نرخ انتشار یون‌های کاهنده فشار تورمی[4] شیل باشد. بنابراین بازدارنده‌های قدیمی شیل (بازدارنده‌هایی که با توقف تورم شیل عمل می‌کنند) نمی‌توانند از مشکلات ناپایداری شیل ناشی از نفوذ صافاب سیال که منجر به افزایش فشار می‌شود، جلوگیری کنند. مشکلات ناپایداری دیواره چاه ناشی از نفوذ صافاب سیال به درون لایه‌های شیلی را می‌توان با کاهش نفوذ صافاب سیال توسط روش‌های زیر کاهش داد [۱].
- افزایش گرانروی صافاب سیال حفاری.
- القاء یک جریان اسمزی معکوس[5] از آب منفذی سازند به درون سیال حفاری.
- کاهش تراوایی سازند شیلی با مسدود کردن منافذ.

ناپایداری کنده‌های حفاری

ناپایداری کنده‌های شیلی متفاوت از ناپایداری دیواره چاه می‌باشد. بدین صورت که به محض کنده شدن آنها از ماتریکس سنگ، تنش‌های درجا به یک‌باره ازبین رفته و فشار یکنواخت هیدروستاتیک گل جایگزین آن می‌شود. با بالا آمدن کنده‌های حفاری در درون فضای حلقوی، فشار هیدروستاتیکی اطراف آنها کاهش یافته و کمتر از فشار تورمی شیل می‌شود. در نتیجه با جذب آب سیال حفاری، ذرات رس از یکدیگر جدا شده و وارد سیستم گل می‌شوند. مشکلات ناپایداری کنده‌های شیلی را می‌توان با روش‌های زیر کاهش داد [۱]:
- استفاده از یون‌های بازدارنده ازجمله K^+ در ترکیب سیال. و همچنین استفاده از پلیمرهای با وزن ملکولی بالا مانند PHPA (partially-hydrolyzed polyacrylamide) و ایجاد خاصیت ایزوله کردن[6] شیل‌ها.
- کاهش نفوذ صافاب سیال حفاری با افزایش گرانروی آن، القاء جریان اسمزی معکوس و مسدود کردن منافذ.

توپی شدن مته حفاری

پدیده توپی شدن مته در نوع خود یک پدیده کاملاً شناخته شده نبوده و عوامل مختلفی در ارتباط با آن وجود دارد که مرتبط با سیال حفاری نمی‌باشد. توپی شدن مته در اثر آزاد شدن تنش‌ها و فشارها و بلافاصله پس از جدا شدن کنده‌های حفاری رخ می‌دهد. کنده‌های شیلی به محض جدا شدن، آب را از طریق نزدیکترین منابع موجود از جمله سطح مته حفاری و کنده‌های دیگر جذب می‌کنند که این امر باعث چسبیدن کنده‌های حفاری به یکدیگر و به سطح مته می‌شود. یکی از راهکارهای کنترل این پدیده ، طراحی سیال حفاری است که سبب آب زدایی[7] کنده‌های کنده شده گردد [۱].

چگونگی پایدار سازی شیل توسط سیالات فرمیتی

سیالات فرمیتی به‌ویژه نوع سزیم و پتاسیمی، خواص ذاتی منحصر به‌فردی دارند که می‌توانند به پایداری شیل کمک کرده و مشکلات حفاری این لایه‌ها را برطرف نموده یا کاهش دهند. خواص سیالات فرمیتی که در پایدار کردن شیل‌ها موثرند عبارتند از: گرانروی مناسب صافاب سیالات فرمیتی، اثر اسمزی سیالات فرمیتی، وجود کاتیون‌های بازدارنده شیل از جمله K^+ و Cs^+ و وجود آنیون فرمیت ($HCOO^-$).

گرانروی مناسب صافاب سیالات فرمیتی

با محدود کردن جریان صافاب سیال به درون لایه‌های شیلی، نرخ افزایش فشار منفذی در اطراف دهانه چاه کاهش می‌یابد. با توجه به قانون دارسی، نرخ جریان سیال درون یک محیط متخلخل با گرانروی سیال نسبت عکس دارد. لذا افزایش در گرانروی صافاب سیال باعث افزایش پایداری شیل می‌شود. اکثر سیالات پایه آبی تهیه شده توسط نمک‌های با درجه شوری کم مانند KCl، دارای گرانروی نزدیک به گرانروی آب می‌باشند.

1. Borehole Instability
2. Cuttings Instability
3. Bit Balling
4. Swelling Pressure
5. Osmotic Back-Flow
6. Encapsulation
7. Dehydration

سیالات با درصد بیشتر نمک، گرانروی بیشتری دارند. سیالات فرمیتیِ حاوی درصدهای بالایِ نمک فرمیت پتاسیم و فرمیت سزیم دارای گرانروی (۵ تا ۱۲ برابر) بیشتر از آب می‌باشند که این امر تأثیر قابل توجهی در کاهش جریان صافاب سیالات فرمیتی درون لایه‌های شیلی و افزایش پایداری شیل دارد. اهمیت گرانرو بودن صافاب سیال جهت محدود کردن جریان به‌ویژه در شیل‌های حاوی ترک‌های ریز که اثر اسمزی پایدار کننده شیل روی آنها تأثیر ندارد، حائز اهمیت می‌باشد [۷].

اثر اسمزی سیالات فرمیتی

اثرات منفی ناشی از جریان سیال به درون لایه‌های شیلی می‌تواند توسط یک جریان اسمزی برعکس (از شیل به درون سیال حفاری) خنثی گردد. شدت و میزان این جریان برگشتی به نوع شیل و میزان فعالیت آب سیال حفاری بستگی دارد. سیالات فرمیتی که حاوی درصد بالایی از نمک‌های فرمیت پتاسیم و فرمیت سزیم و یا مخلوطی از آنها می‌باشند، فعالیت آب خیلی کم (در حدود ۰/۳) دارند. میزان فعالیت آب سیال فرمیت سدیم خیلی پایین نمی‌باشد (حدود ۰/۵) لذا سیالات فرمیت سدیم و به‌ویژه نوع رقیق شده آن، در ایجاد یک جریان اسمزی معکوس به‌صورت مؤثر عمل نخواهد کرد. باتوجه به میزان فعالیت آب سیال حفاری و نوع شیل، جریان اسمزی معکوس می‌تواند موجب تحکیم دیواره چاه به‌وسیله کاهش فشار منفذی و کاهش رطوبت شیل گردد [۷].

وجود کاتیون‌های فلزی K^+ و Cs^+

کاهش تورم نوع معینی از شیل‌ها (حاوی کانی مونت موریلونیت[1]) توسط یون‌های پتاسیم کاملاً به اثبات رسیده است. تأثیر یون پتاسیم در به حداقل رساندن فشار تورمی شیل‌ها به علت میزان کم هیدراسیون این یون ها در آب می‌باشد. سایر یون‌ها از جمله Mg^{2+} و Ca^{2+} قابلیت‌های یون K^+ را در کاهش تورم شیل‌ها دارا نمی‌باشند. یون Cs^+ نیز ویژگی‌های K^+ را در کاهش تورم شیل‌ها از خود نشان می‌دهد. باتوجه به مطالب فوق هردو سیال فرمیت پتاسیم و فرمیت سزیم به‌طور ذاتی خواص بازدارندگی شیل دارند. یون سدیم Na^+ اثرات مشابهی روی فشار تورمی شیل‌ها نداشته و لذا حین حفاری لایه‌های شیلی استفاده از سیال حفاری فرمیت پتاسیم و یا فرمیت سدیم/پتاسیم مخلوط به جای استفاده از فرمیت سدیم به تنهایی توصیه می‌شود [۷].

وجود یون فرمیت ($HCOO^-$)

نتایج آزمایشگاهی و تجربیات میدانی نشان می‌دهد که خود یون فرمیت، در تثبیت شیل‌ها موثر می‌باشد. نتایج آزمایشات انجام شده توسط دان[2] به‌وسیله سیالات مختلف ازجمله کلریدپتاسیم، سولفات پتاسیم و فرمیت پتاسیم با مقدار پتاسیم یکسان در هریک از سیالات نشان داد که وجود یون فرمیت خود تاثیر مثبتی در جلوگیری از تورم شیل دارد [۷].

کاهش آسیب سازند توسط حفاری با سیالات فرمیتی

در استفاده از سیالات حفاری پایه فرمیتی، آسیب سازند خیلی کم و یا در حد صفر است. به‌طوری‌که تولید نفت پس از اتمام عملیات حفاری و بدون نیاز به عملیات تحریک چاه صورت می‌گیرد. فرمیت‌ها قابلیت ایجاد گل حفاری سنگین با درصد مواد جامد بسیار کم را دارا می‌باشند. برای درک بهتر چگونگی کاهش آسیب سازند توسط فرمیت‌ها دلایل مهمی وجود دارد که در ذیل آورده شده است.

سازگاری سیال با سیال

واکنش نامطلوب بین صافاب سیال حفاری یا تکمیل و سیالات درجا (نفت خام یا آب سازند) و در نتیجه آن تشکیل رسوبات نامحلول[3]، آسفالتین و یا امولسیون پایدار دلایل اصلی آسیب دیدگی سازند در استفاده از گل‌های حفاری قدیمی می‌باشد. سیالات فرمیتی حاوی موادی که باعث واکنش با سیالات سازند شود، نیستند. این گل‌ها عاری از مواد فعال‌کننده سطحی[4] و یون‌های چند ظرفیتی می‌باشند لذا تشکیل امولسیون‌ها و رسوبات نامحلول کاهش می‌یابد [۸].

سازگاری سیال با سنگ

واکنش نامطلوب بین صافاب سیال پایه آبی نفوذ کرده با سنگ سازند می‌تواند باعث کاهش تراوایی در اطراف دهانه چاه شود. رس موجود در سازند در صورت تماس با صافاب گل که شوری کمتری نسبت به سیال مخزن دارد، متورم می‌شود [۹]. سیالات فرمیتی با توجه به درجه

1. Montmorillonite
2. Down
3. Scales
4. Surfactant

شوری بالاتر در مقایسه با سیال سازند، توانایی تقلیل تورم شیل‌های مخزن را دارند. این امر باعث پایداری بهتر شیل و همچنین کاهش تولید ذرات ریز و رسوباتی می‌شود که عامل کاهش تراوایی دهانه چاه هستند [۸].

عدم نفوذ ذرات جامد

به‌علت محلول بودن نمک‌های فرمیتی، نفوذ و مسدود کردن حفرات مخزن توسط مواد جامد معلق در سیال حفاری و تکمیل چاه وجود ندارد. گیرکردن دائمی این جامدات در حفرات مخزن می‌تواند شدیداً باعث کاهش تراوایی شود. فرمیت‌ها می‌توانند تمامی محدوده‌های دانسیته لازم برای عملیات تکمیل و حفاری را بدون استفاده از مواد وزن‌افزا مانند باریت تأمین کنند. آسیب سازند ایجاد شده توسط مواد جامد مورد نیاز جهت ایجاد کیک‌گل به عنوان مواد پل‌زننده قابل کنترل بوده و باعث مشکلات جدی نمی‌شود. در گل‌های فرمیتی از کربنات‌کلسیم دانه‌بندی شده به عنوان مواد تولید کننده کیک‌گل استفاده می‌شود [۸].

عدم جذب سطحی مواد شیمیایی و تغییر ترشوندگی

تغییر تراوایی مخزن به هیدروکربن‌ها در نتیجه تغییر در ترشوندگی دیواره حفرات و سطوح گلوگاه‌ها یکی از دلایل آسیب سازند می‌باشد. گل‌های حفاری قدیمی و سیالات تکمیل چاه دارای مواد شیمیایی فعال‌کننده سطحی مانند سورفاکتنت‌ها و مواد جلوگیری‌کننده از خوردگی هستند. جذب سطحی این مواد شیمیایی توسط سنگ مخزن می‌تواند سبب تغییر ترشوندگی و در نتیجه کاهش تراوایی نسبی نفت شود. سیالات پایه فرمیتی عاری از مواد فعال‌کننده سطحی هستند. بنابراین استفاده از آنها باعث تغییر ترشوندگی نمی‌شود [۸].

جلوگیری از فعالیت‌های باکتری‌ها

کاهش تراوایی سازند نسبت به هیدروکربن‌ها در نتیجه فعالیت میکروبی ناشی از عملیات حفاری و تکمیل چاه از دیگر دلایل آسیب سازند می‌باشد. سیالات حفاری رایج مورد استفاده شامل مواد مغذی بوده که باعث افزایش فعالیت میکروارگانیزم‌های موجود در سیال حفاری یا موجود در مخزن می‌شود. و متعاقباً با رشد این میکروارگانیزم‌ها تراوایی کاهش خواهد یافت. سیالات فرمیتی فعالیت آبی کمی دارند و به طور طبیعی در چگالی‌های بیشتر از $1/05\ gr/cm^3$ فعالیت زیستی ندارند[1]. لذا فرمیت‌ها باعث تجزیه زیستی و یا باعث رشد میکروارگانیزم‌ها نمی‌شوند [۸].

بررسی‌های آزمایشگاهی

با توجه به موارد ذکر شده، به‌منظور بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی و میزان بازیافت شیل در سیالات فرمیتی (سدیمی/پتاسیمی) و مقایسه آن با سایر سیالاتِ مطرح در کنترل پایداری دیواره چاه و همچنین کارائی این نوع سیالات در حضور پلیمرهای مختلف و نهایتاً خاصیت روانی آنها، آزمایشات متعددی در آزمایشگاه صورت پذیرفت که به شرح آن می‌پردازیم.

روش کار

مواد مورد استفاده

– فرمیت سدیم و فرمیت پتاسیم: جهت افزایش دانسیته سیال، خواص بازدارندگی شیل، افزایش پایداری حرارتی.

– کربنات کلسیم: به‌منظور کاهش افت صافی سیال و ایجاد خاصیت پل زنندگی. کربنات کلسیم مورد استفاده در این آزمایشات مخلوطی از هشت نوع دانه‌بندی مختلف (مش ۱۵۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۵۰۰و ۳۵۰۰) می‌باشد.

– کربنات سدیم: کاربرد اولیه آن کنترل سختی سیستم می‌باشد. همچنین جهت تهیه آب دریای دارای املاح به گل اضافه می شود..

– بیوپلیمر زانتان با نام تجاری Duo-Tec محصول شرکت MI: ایجاد خواص گرانروی سیال.

– پلیمر PHPA: جهت ایجاد خاصیت پوششی[2] شیل‌ها.

– انواع پلیمرهای مورد استفاده جهت کاهش افت صافی سیال شامل: پلی دریل[3]، پلی تین[4]، پلی آنیونیک سلولز[5]، نشاسته[6]، کربوکسی متیل سلولز[7]، نشاسته سیب زمینی[8]

– نمونه شیل، با درصد بالای مواد رسی و قابلیت جذب آب زیاد که از نوع شیل‌های مشکل‌زا در عملیات حفاری چاه می‌باشد.

1. Biostatic
2. Encapsulation
3. Polydrill
4. Polythin
5. Poly Anionic Cellulose (PAC)
6. Starch
7. CMC
8. Poly-Sal

تجهیزات مورد استفاده

- دستگاه ویسکومتر fann VG مدل ۳۵ شرکت بارويد.
- دستگاه فیلترپرس[1] API
- pH سنج دیجیتال
- دستگاه ارزیابی روانی گل (EP)
- آون گردان[2]

آزمایش‌ها و روش‌های ارزیابی

کلیه آزمایش‌های ساخت سیال حفاری و ارزیابی آن‌ها در پژوهشگاه صنعت نفت انجام شده است. هدف از این مطالعه بررسی خواص رئولوژی و پایداری شیل سیالات فرمیتی در شرایط مختلف می‌باشد. بدین منظور سیالات فرمیتی با فرمولاسیون‌های متفاوت توسط پلیمرهای مختلفی که به‌صورت پیش هیدراته[3] به سیال اضافه می‌شوند، ساخته شد و خواص رئولوژی سیال، افت صافی، میزان pH آن قبل و بعد از حرارت دادن تحت دمای ۱۲۱°C پس از ۱۶ ساعت نگهداری، اندازه‌گیری شد. تعیین میزان پایداری شیل از طریق آزمایش استاندارد API 13-I انجام شده است. بدین صورت که به هریک از نمونه‌ها به میزان ۲۰ گرم از نمونه شیل دانه‌بندی شده در ابعاد مشخص اضافه گردید. سپس هریک از نمونه‌ها را درون سل‌های[4] مجزا و مخصوصی ریخته و به مدت ۱۶ ساعت تحت درجه حرارت ۱۲۱°C درون آون گردان قرار می‌دهیم. پس از حرارت دادن نمونه‌ها، آنها را خارج کرده و دانه‌های شیلی درون گل را با عبور دادن گل‌ها از الک با مِش ۳۵ (۵۰۰ میکرون) از گل جدا کرده و آنها را توسط آب اشباع از نمک مطابق با آنچه در استاندارد API 13-I آمده است، شستشو می‌داده و سپس در خشک کن قرار می‌دهیم. پس از خشک شدن شیل‌ها آنها را وزن کرده و از روی آن میزان بازیابی شیل را بدست می‌آوریم.

$$\%R = \frac{w}{w_o} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

R میزان بازیافت و w و w_o وزن شیل بعد و قبل از آزمایش می‌باشد. افزایش R حاکی از پایداری بیشتر شیل می‌باشد.

همچنین با تهیه گل‌های مختلف و مقایسه آن با گل فرمیتی در دستگاه EP میزان خاصیت روانی سیالات با هم مقایسه گردید.

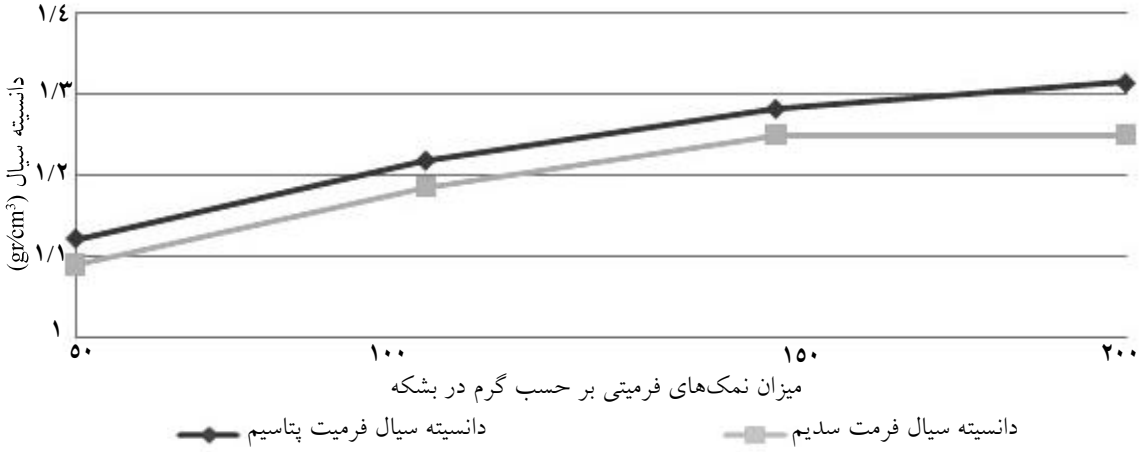
نتایج و بحث

تأثیر میزان نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم بر خواص رئولوژی سیال و میزان پایداری شیل

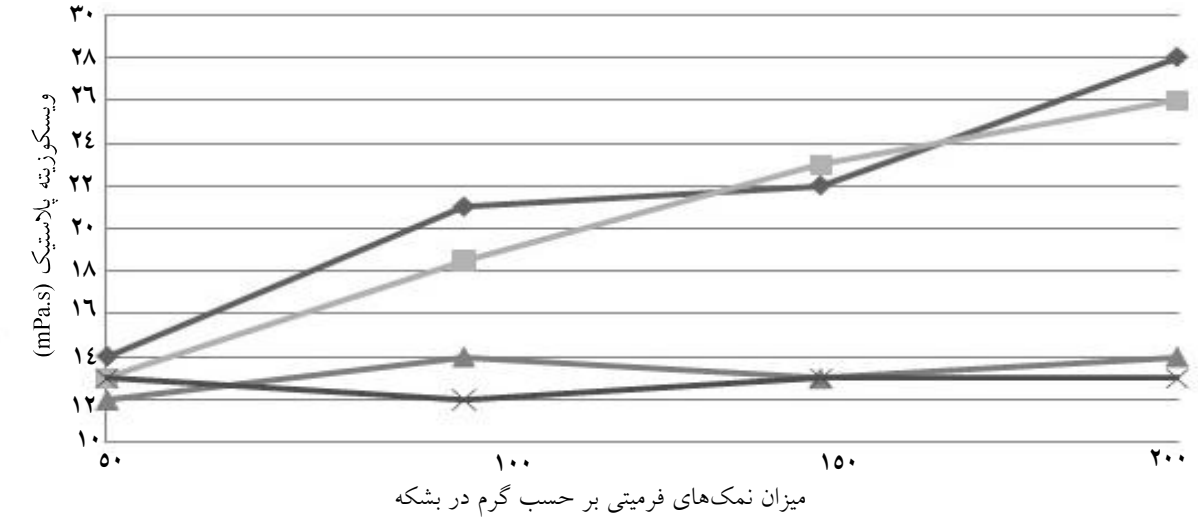
در این مرحله از آزمایشات، جهت ارزیابی تأثیر میزان نمک‌های فرمیتی بر خواص رئولوژی، افت صافی و میزان بازیابی شیل، نمونه گل‌هایی با مقادیر متفاوتی از نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم با فرمولاسیون یکسان از لحاظ سایر مواد و پلیمرهای مورد استفاده در ترکیب گل، تهیه می‌شود و خواص رئولوژی سیال از جمله گرانروی ظاهری (Av)، پلاستیک (Pv) و نقطه واروی (Yp) قبل و بعد از حرارت اندازه‌گیری می‌شود. همچنین میزان بازیابی شیل نیز مطابق با استاندارد API 13-I برای هریک از نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. شکل-۱ دانسیته سیال فرمیت سدیم و سیال فرمیت پتاسیم را در غلظت‌های مختلفی از نمک‌های فرمیتی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در غلظت‌های بالا از نمک‌های فرمیتی، به دلیل حلالیت بیشتر نمک فرمیت پتاسیم در مقایسه با فرمیت سدیم، میزان دانسیته سیال فرمیت پتاسیمی بیشتر از سیال فرمیت سدیمی است (در غلظت‌های یکسان از نمک فرمیتی).

شکل۲ تغییرات گرانروی سیال قبل و بعد از حرارت در غلظت‌های مختلفی از نمک فرمیت سدیم و پتاسیم را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل، میزان گرانروی پلاستیک برای سیال فرمیت سدیم با افزایش غلظت نمک فرمیت سدیم افزایش می‌یابد ولی برای سیالات فرمیت پتاسیم، تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود. با توجه به این نکته که میزان حلالیت نمک فرمیت سدیم در آب کمتر از فرمیت پتاسیم می‌باشد، می‌توان دلیل تاثیر کمتر فرمیت پتاسیم بر گرانروی سیال را حلالیت بیشتر آن در آب و تاثیر کمتر آن بر گرانروی دانست. از دیگر دلایل افزایش خواص رئولوژی بعد از حرارت در سیالات حاوی نمک فرمیت سدیم، پراکنده شدن شیل درون سیال به دلیل خاصیت ضعیف فرمیت سدیم در پایداری شیل نسبت به فرمیت پتاسیم و در نتیجه افزایش گرانروی سیال می‌باشد.

1. Filter Press
2. Rolling Aven
3. Pre-Hydrated
4. Cell



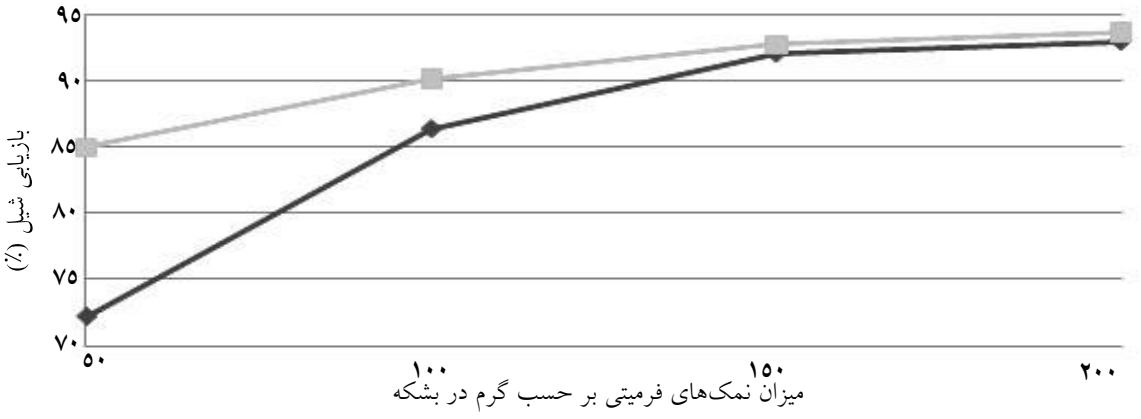
شکل۱- تأثیر میزان نمک‌های فرمیتی سدیم و پتاسیم بر دانسیته سیال



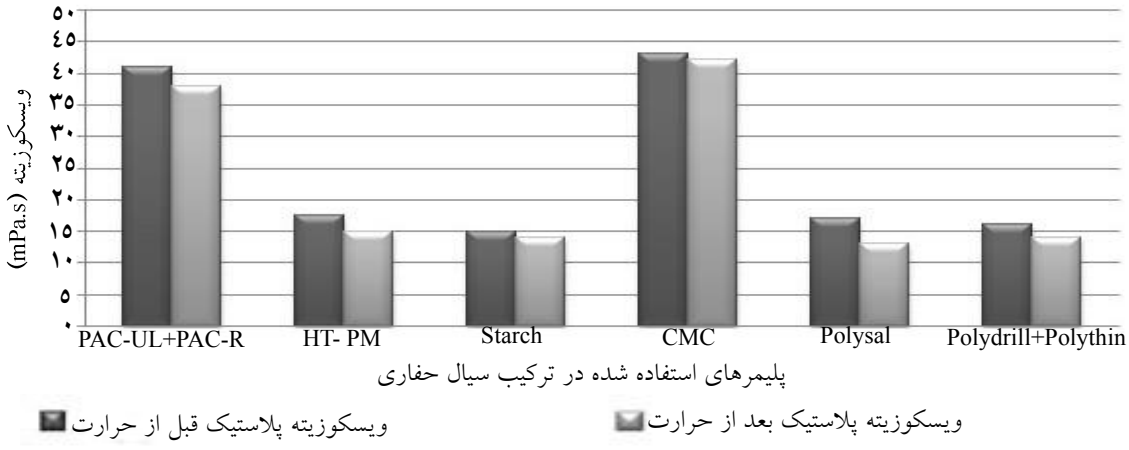
شکل۲- تأثیر مقادیر مختلف نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم بر گرانروی پلاستیک سیال قبل و بعد از حرارت دادن در دمای ۱۲۱ °C به مدت ۱٦ ساعت

بدین صورت که با توجه به پایداری کمتر، مقدار بیشتری شیل وارد سیستم گل شده و باعث افزایش درصد جامدات گل و در نتیجه افزایش خواص رئولوژی از جمله گرانروی گل می‌شود.

شکل-۳ نمودارهای میزان بازیابی شیل در حضور سیالات فرمیت سدیم و پتاسیم در غلظت‌های مختلفی از نمک‌های فرمیتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، باتوجه به خاصیت بازدارندگی بهتر فرمیت پتاسیم نسبت به فرمیت سدیم، میزان بازیابی شیل برای سیال فرمیت پتاسیم بیش از فرمیت سدیم می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نمک‌های فرمیتی، میزان بازیابی شیل افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش، در می‌یابیم که میزان بازیابی شیل در حضور سیالات فرمیتی بالا می‌باشد. با توجه به هزینه‌های بالای نمک فرمیت پتاسیم نسبت به نمک فرمیت سدیم و از طرفی به‌منظور حفظ خواص سیالات فرمیتی از ترکیبی از دو نمک فرمیت سدیم و پتاسیم هریک به میزان ۵۰ گرم در ادامه آزمایشات استفاده شده است.



شکل ۳- تاثیر مقادیر مختلف نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم بر میزان بازیابی شیل سیال

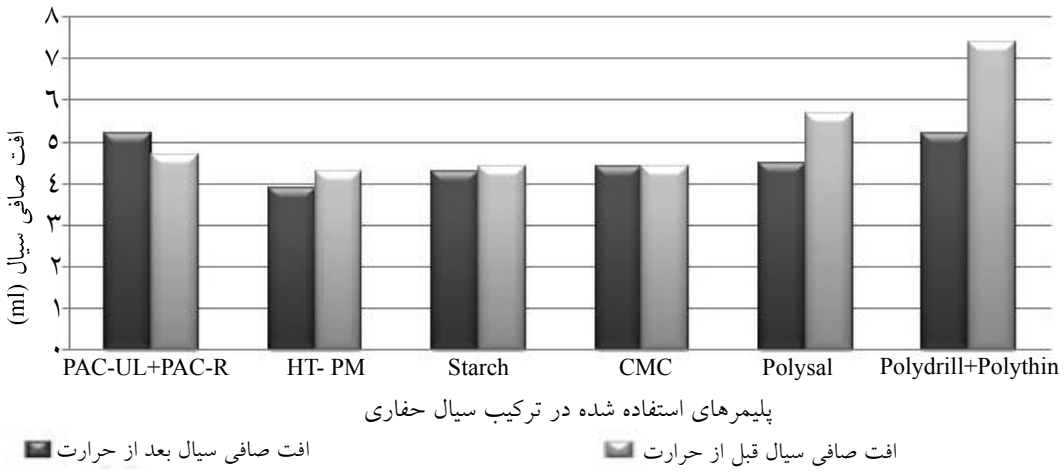


شکل ٤- گرانروی پلاستیک قبل و بعد از حرارت برای سیال فرمیت سدیم/پتاسیمی در حضور پلیمرهای مختلف

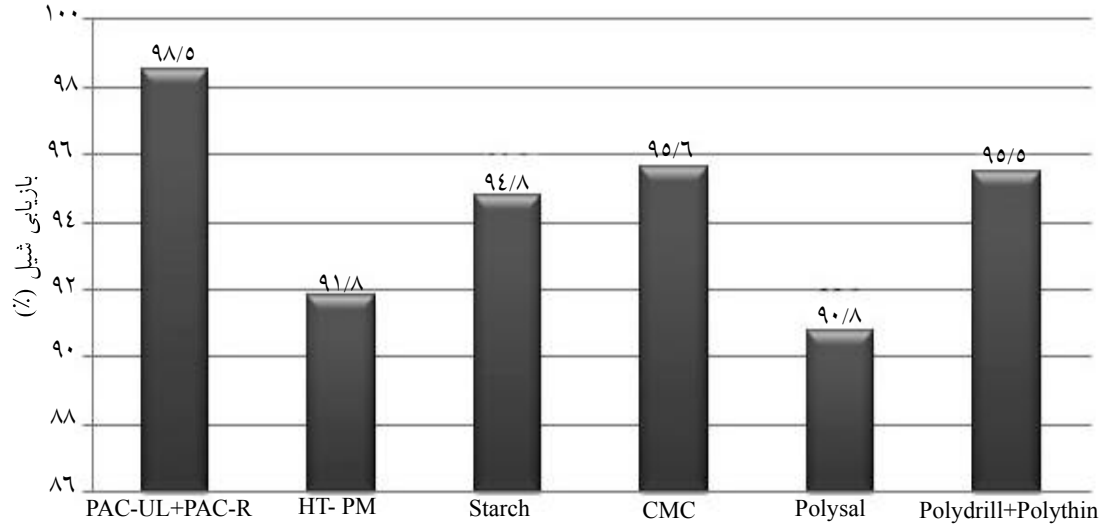
ارزیابی سازگاری پلیمرهای مختلف با سیال فرمیت سدیم/ پتاسیم

در این مرحله از آزمایشات، سازگاری پلیمرهای مختلف با سیالات حاوی نمک‌های فرمیت سدیم و پتاسیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. باتوجه به این نکته که پلیمرها هنگامی که در معرض حرارت بالا قرار می‌گیرند خواص خود را از دست می‌دهند، این آزمایشات در شرایط حرارت بالا (۱۲۱ °C) و به مدت ۱٦ ساعت انجام گرفت. فرمولاسیون تمامی نمونه‌ها از نظر نوع و میزان آب به‌کار رفته در تهیه سیال و مقدار نمک‌های مورد استفاده یکسان می‌باشد و تفاوت آنها تنها در نوع پلیمرهای مصرفی می‌باشد. شکل ٤ میزان گرانروی پلاستیک سیال فرمیتی را قبل و بعد از حرارت در حضور پلیمرهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رئولوژی سیالات فرمیتی بعد از حرارت افت چندانی ندارد و این ناشی از خاصیت فرمیت‌ها در افزایش پایداری حرارتی پلیمرها می‌باشد.

شکل ۵ افت صافی (FL) سیال را برای پلیمرهای مختلف در ترکیب با سیال فرمیت سدیم/پتاسیم، قبل و بعد از حرارت نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج آزمایش مشخص شد که میزان افت صافی سیال بعد از حرارت افزایش زیادی ندارد. یکی از بیوپلیمرهای کنترل کننده افت صافی مورد استفاده در این آزمایش نشاسته می‌باشد که در شرایط عادی، پایداری حرارتی کمی داشته ولی در این آزمایش در حضور نمک‌های فرمیتی خواص خود را تا دمای ۱۲۱°C حفظ کرده است. شکل٦ میزان بازیابی شیل را برای سیالات فرمیتی در حضور پلیمرهای مختلف نشان می‌دهد.



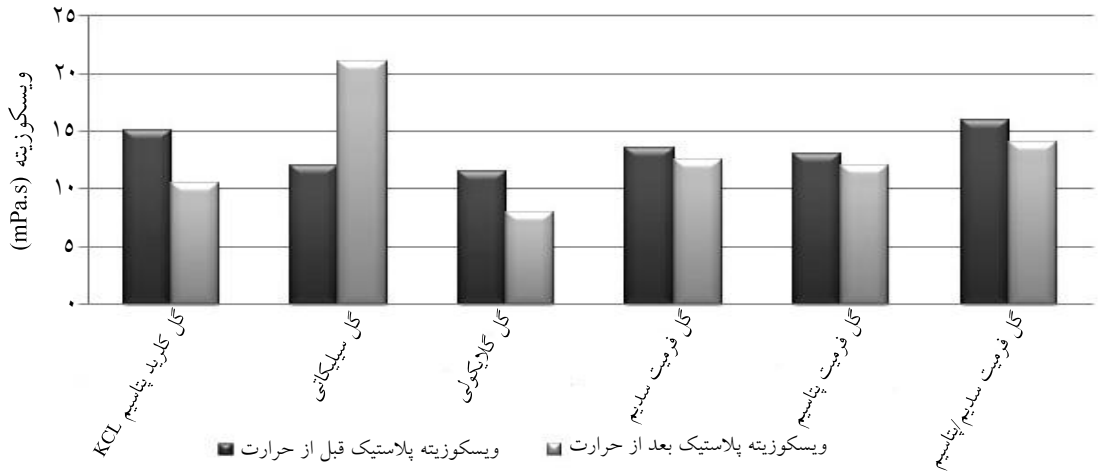
شکل۵- افت صافی گل قبل و بعد از حرارت برای سیال فرمیت سدیم/پتاسیمی در حضور پلیمرهای مختلف



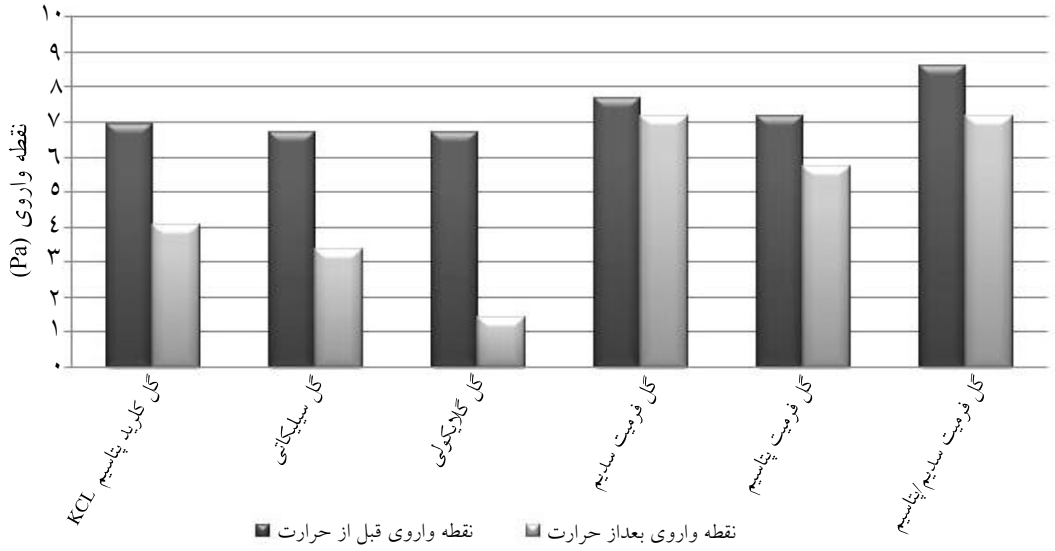
شکل٦- میزان بازیابی شیل برای سیال فرمیت سدیم/پتاسیمی در حضور پلیمرهای مختلف

آزمایش مقایسه خواص رئولوژی و بازیابی شیل سیالات فرمیتی با سیالات سیلیکاتی، گلایکولی و کلرید پتاسیمی

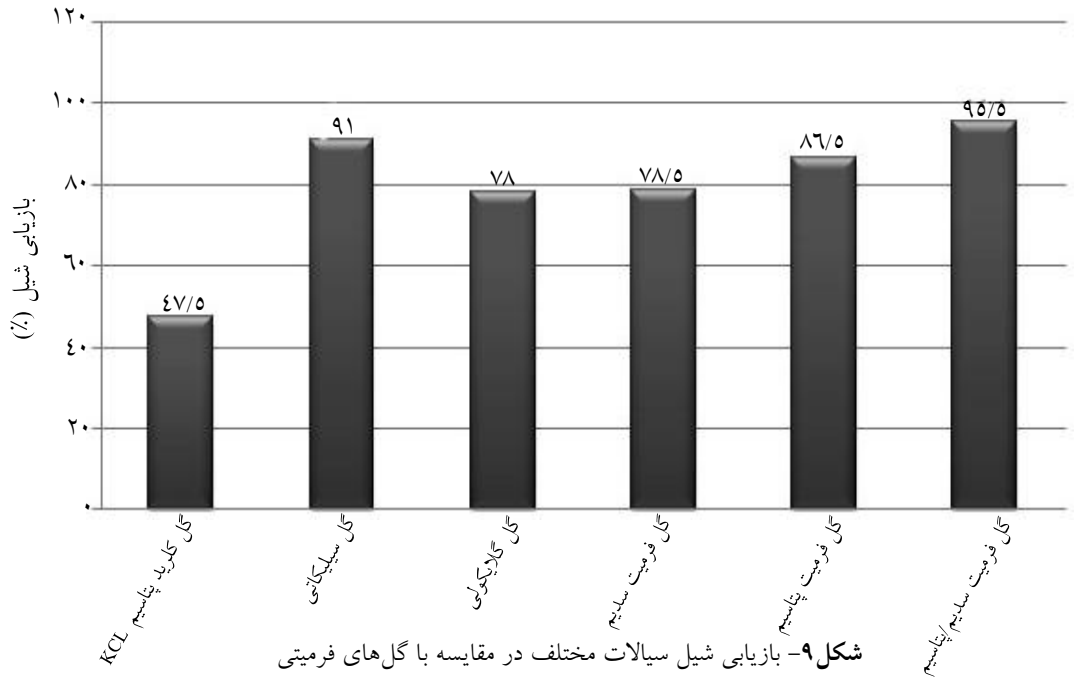
در این مرحله از آزمایشات سه نوع سیال گلایکولی، سیلیکاتی و کلرید پتاسیمی را با سیالات فرمیت سدیم، فرمیت پتاسیم و فرمیت سدیم/پتاسیم مقایسه می‌کنیم. جهت انجام آزمایش در شرایط یکسان، فرمولاسیون تمامی نمونه‌ها از لحاظ پلیمرهای مورد استفاده یکسان می‌باشد. شکل‌های ۷ و۸ گرانروی پلاستیک و نقطه واروی را برای سیالات مختلف قبل و بعد از حرارت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیالات فرمیتی کمترین میزان تغییر گرانروی و نقطه واروی را بعد از حرارت در مقایسه با سایر سیالات از خود نشان می‌دهند. شکل۹ نتایج آزمایش بازیابی شیل را برای سیالات مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، میزان بازیابی شیل سیال فرمیت سدیم/پتاسیم بیشتر از سایر سیالات می‌باشد. میزان بازیابی شیل سیال فرمیت سدیمی نیز که نسبت به سایر سیالات فرمیتی کمتر است، بیش از سیال گلایکولی و کلرید پتاسیمی می‌باشد. هزینه سیالات فرمیتی به ازای هر بشکه در حدود دو تا سه برابر سایر سیالات بازدارنده شیل می‌باشد ولی با توجه به مزایای سیالات فرمیتی در مقایسه با سایر سیالات و کاهش هزینه‌های کلِ حفاری حین استفاده از آنها، استفاده از سیالات فرمیتی در صنعت حفاری اقتصادی می‌باشد.



شکل۷- گرانروی پلاستیک سیالات مختلف در مقایسه با گل های فرمیتی قبل و بعد از حرارت



شکل۸- نقطه واروی سیالات مختلف در مقایسه با گل‌های فرمیتی قبل و بعد از حرارت



شکل۹- بازیابی شیل سیالات مختلف در مقایسه با گل‌های فرمیتی

جدول۱- نتایج آزمایش ارزیابی روانی گل توسط دستگاه EP

نوع سیال	گشتاور (Kg)	شدت جریان (A)	عرض شکاف (cm)	فشار (Kg/cm^2)
سیال پایه (Base)	۱۱۳/٤۰	۳/٤	۰/٦٦۰٤	۳٦۰/۲
Base + 1 gr Lubricant	۹۰/۷۲	۳/۷	۰/۳٦٥۷	٥۲۰/۳
Base + 2 gr Lubricant	۲۱۳/۱۹	۳/۸	۰/۳۳٥۲	۱۳۳٤/۱
Base + 3 gr Lubricant	۲۷۲/۱٦	۳/۹	۰/۲٥٤۰	۲۲٤۸/۱
سیال فرمیتی	۲۷۲/۱٦	٤	۰/۲٥٤۰	۲۲٤۸/۱

آزمایش ارزیابی روانی سیال فرمیت سدیم / پتاسیم

این تست استحکام سیال مورد آزمایش را با اعمال یک نیروی اندازه‌گیری شده به یک یاتاقان حساس به گشتاور، به‌وسیله بازوی گشتاوری نشان می‌دهد. در این آزمایش میزان روانی سیال فرمیت سدیم / پتاسیم در مقایسه با روانی چند نمونه سیال پایه با مقادیر متفاوتی از مواد روان کننده، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج این آزمایش در جدول۱ آورده شده است. باتوجه به جدول-۱ مشاهده می‌شود که میزان روانی سیال فرمیتی برابر با روانی سیال پایه به همراه ۳ گرم مواد روان کننده می‌باشد. بدین ترتیب، سیال فرمیتی نیازی به اضافه کردن مواد روان کننده نداشته و از خاصیت روانکاری خوبی برخورداراست.

نتیجه‌گیری

- سیالات فرمیتی با توجه به اینکه دارای حداقل درصد مواد جامد می‌باشند، مشکلات ناشی از ته نشین شدن مواد جامد وزن افزا را ندارند. همچنین میزان گرانروی پلاستیک کم این نوع گل‌ها به هیدرولیک بهتر چاه کمک می‌کند و در نتیجه نرخ نفوذ حفاری را افزایش می‌دهد.
- با استفاده از مقادیر مختلفی از نمک‌های فرمیتی می‌توان بدون استفاده از مواد جامد (که معمولاً به لحاظ هزینه و صدماتی که به مخزن می‌زنند مشکل‌ساز هستند)، دانسیته‌های تا $1/35\ gr/cm^3$ ایجاد نمود.
- گل‌های فرمیتی سدیم و پتاسیم خواص رئولوژیکی تقریباً ثابتی دارند. به‌طوری‌که تغییر دما تا ۱۲۱ °C تأثیر چندانی بر خواص رئولوژیکی آنها نمی‌گذارد. لازم به ذکر است که نمک فرمیت پتاسیم علی رغم ایجاد دانسیته بالاتر و کنترل شیل بهتر، سطح خواص رئولوژیکی کمتری نسبت به سیالات فرمیت سدیم ارائه می‌نماید.
- سیالات فرمیتی سازگاری مناسبی با انواع پلیمرها دارند، به گونه‌ای که پلیمرها بعد از حرارت در حضور این نمک‌ها، تغییرات بسیار کمی در میزان افت صافی و خواص رئولوژی از خود نشان داده و در بازیافت شیل نیز موثر می‌باشند.
- نقطه واروی سیالات فرمیتی نسبت به گرانروی آنها بالاتر است که این مسأله به انتقال بهتر کنده‌های حفاری و تمیزکاری چاه کمک می‌کند.
- نتایج آزمایش مقایسه‌ای سیالات مختلف از جمله سیالات سیلیکاتی، گلایکولی و کلرید پتاسیمی با سیال فرمیتی نشان داد که سیالات فرمیتی خواص رئولوژی و افت صافی را بعد از حرارت بسیار بهتر از سایر سیالات حفظ می‌کنند و پایداری حرارتی این گل ها تا دمای ۱۲۱°C به مدت ۱٦ ساعت، نسبت به سیالات گلایکولی، سیلیکاتی و کلرید پتاسیمی بالاتر است. همچنین خواص بازیابی شیل سیالات فرمیتی بیشتر از سیال گلایکولی، سیلیکاتی و کلریدپتاسیمی می‌باشد.
- گل فرمیتی طراحی شده آزمایشگاهی، معادل یک گل حاوی ۳ گرم مواد روان کننده کارائی داشته و می‌توان گفت که سیالات فرمیتی خود به روان شدن و کاهش اصطکاک سیال حفاری کمک می‌نماید.

علائم و نشانه‌ها

Av: گرانروی ظاهری

Pv: گرانروی پلاستیک

Yp: نقطه واروی

FL: افت صافی

ECD: دانسیته معادل گردشی گل

منابع

[1] Van Oort E., "*On the physical and chemical stability of shales"*, Journal of Petroleum Science and Engineering, 38, pp. 213–235, 2003.

[2] Down J., *high-performance formate brines for drilling and completion*, *Cabot specialty fluids inc,* www.cabot-corp.com/csf.

[3] Lord D., et al ,"*Shell expro's first application of coiled tubing drilling"*, World Oil, pp. 119. (June 1997).

[4] Down J, *Formate technical manual,* Part A, Chemical & Physical Properties*, SectionA2*: *"Brine Density,"* www. formatebrines.com/technicalinformation/formatetechnicalmanual, by Cabot Specialty Fluid, Sep 2008.

[5] Preston L. Moore, *Drilling practices manual*, Pennwell Bks, US 1986

[6] Chenvert M., Williams F. & Hekimian A., *Applied drilling engineering manual,* Illustrated edition, Gulf Publishing Co, 1983.

[7] Down J., *Formate technical manual*, Part B, Compatibilities and Interactions, SectionB11,: "Compatibility with Shale," www.formatebrines.com/technicalinformation/formatetechnicalmanual, by Cabot Specialty Fluid, Sep 2008.

[8] Down J., Howard S.K., & Carnegie A., *"Improving hydrocarbon production rates through the use of formate fluids"*, SPE 97964, Presented at SPE International Improving Oil Recovery conference in Asia Pacific, Kuala Lampur, Malaysia, 5-6, Dec 2005.