بهبود کیفیت بنتونیت‌های نامرغوب با مواد شیمیایی مناسب برای کاهش مصرف پلیمرها در سیالات حفاری پایه‌آبی

حبیبه شیخ رستم‌آبادی[۱]، علیرضا نصیری*[۱]، سید جمال شیخ ذکریایی[۳] و محمود معماریانی[۲]

۱- پژوهشکده مهندسی نفت، پردیس بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- پژوهشکده علوم زمین، پردیس بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی نفت، واحد علوم وتحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۱۰

چکیده

در حفر چاه‌های نفت و گاز، سیال حفاری نقشی بسیار مهم دارد. یکی از مواد مصرفی در سیالات حفاری، ماده معدنی بنتونیت به همراه آب است که برای کنترل تراویده سیال استفاده می‌شود. تولید بنتونیت با کیفیت مورد نیاز صنعت حفاری در معادن کشور رو به کاهش گذاشته است. از این رو به ارایه روشی جدید برای افزایش کیفیت این ماده در سیالات حفاری نیاز است. معمولا برای جبران عملکرد ضعیف بنتونیت‌های نامرغوب، استفاده از پلیمرها به صورت افزودنی در سیال حفاری، توجه پژوهشگران را بیش‌تر جلب کرده است. اما این مواد عیوبی نیز دارند که از آن جمله می‌توان به آسیب سازند و بالا بودن هزینه تولید اشاره کرد. بنابراین پژوهش‌هایی متفاوت در زمینهٔ استفاده از روش‌های دیگر در حال انجام هستند. در این پژوهش ارتقای کیفیت بنتونیت‌های نامرغوب از راه بهبود قدرت جذب آب و افزایش خصوصیات رئولوژیکی آنها، مدنظر بوده است. بدین منظور ابتدا ۱۲ نوع بنتونیت حفاری با کیفیت مختلف تهیه و خصوصیات آنها بررسی شد. نمونه B-۶ به‌عنوان بنتونیت با کیفیت نسبتا خوب و نمونه B-۹ به‌عنوان بنتونیت با کیفیت بسیار ضعیف انتخاب و سپس مواد شیمیایی با پایه کربناتی و منیزیمی به آنها اضافه و خصوصیات آنها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش هر دو ماده شیمیایی می‌توان بنتونیت‌هایی با کیفیت قابل قبول مطابق با استاندارد API RP 13A به‌دست آورد. به‌صورتی که سیالات بهسازی شده توانستند به‌طور میانگین خصوصیات رئولوژیکی را ۶/۵ برابر بهبود ببخشد و همچنین تراویده سیال در بنتونیت بسیار ضعیف را حدود ۲/۵ برابر کاهش دهند. همچنین نتایج نشان داد که خواص رئولوژیکی این بنتونیت‌ها ۲/۵ تا ۴ برابر پلیمر کربوکسی متیل سلولز و نشاستهٔ حفاری در سیال بنتونیتی است. بنابراین افزودنی‌های شیمیایی ذکرشده می‌توانند برای کنترل خواص رئولوژیکی جایگزین سیالات پلیمری شوند.

کلمات کلیدی: بنتونیت، افزودنی‌های شیمیایی پایه‌منیزیمی و کربناتی، افت صافی، گرانروی، پلیمر، حفاری، به‌سازی رس‌ها، نقطه واروی.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی nasiriar@ripi.ir

مقدمه

از زمان اولین استفاده از سیالات حفاری در چاه‌های اکتشافی و توسعه‌ای تاکنون، این فناوری دستخوش تغییر و تحولات بسیاری شده است. امروزه شرکت‌های سازنده مواد و افزایه‌های حفاری توانسته‌اند مواد شیمیایی بهتر و جدیدتری را برای بالا بردن کیفیت سیال‌های حفاری عرضه کنند و به وسایلی دقیق‌تر برای آزمایش‌های سیال‌های حفاری دست یابند. سیال‌های حفاری را باید مهم‌ترین عامل در استخراج نفت و گاز به شمار آورد، زیرا بدون آنها حفاری و در نهایت استخراج مواد هیدروکربنی ممکن نخواهد بود. سیال حفاری در عملیات حفاری وظایف مهمی دارد. بنابراین وجود خواصی معین و مطلوب در این سیال ضروری است. در مراحل مختلف حفاری ممکن است این خواص تحت تاثیر عوامل تحت‌الارضی تغییر کنند و کیفیت آنها کاهش یابد. بنابراین تحقیقات و مطالعات علمی و عملی باید برای کنترل صحیح خواص رئولوژیکی گل و کاهش اثرات عوامل تحت‌الارضی انجام شوند. نقش سیال‌های حفاری در کیفیت و سرعت حفاری بر کسی پوشیده نیست و از آن جایی که هر گونه خلل در سیال حفاری مستقیما بر فرآیند حفاری موثر است، حفظ و بهبود خواص سیال و ایجاد وضعیتی مناسب برای آن باعث بالا رفتن بازدهی حفاری خواهد شد [۱].

با توجه به اهمیت سیال حفاری و نقش کلیدی آن در افزایش بازدهی حفاری در انواع چاه‌ها می‌توان گل یا سیال حفاری را یک سیال پیچیده دانست که به‌طور کلی برای تمیز کردن چاه از کنده‌های حفاری، نگه‌داری و انتقال این کنده‌ها، روان‌سازی سرمته حفاری و مقابله با فشارهای سازندی به کار می‌رود. این سیال‌ها به دو گروه عمدهٔ پایه‌نفتی و پایه‌آبی تقسیم می‌شوند. تقریباً ۹۵/۵ ٪ از چاه‌های نفت با سامانه سیال پایه‌آبی حفاری می‌شوند، زیرا این سامانه ارزان‌تر و از نظر زیست‌محیطی سازگارتر از سیال‌های پایه‌نفتی است [۲].

برای ساخت سیال پایه‌آبی پلیمری، از انواع آب‌ها و پلیمرهای محلول در آب با وزن مولکولی و ساختار شیمیایی متفاوت استفاده می‌شود. به‌طور کلی هدف عمدهٔ استفاده از پلیمر در ساختار سیال حفاری کنترل مقدار تراویده سیال، خواص رئولوژیکی و پایداری دیواره چاه است [۲]. اما به دلیل مشکلات بسیار از جمله آسیب سازند ایجاد شده توسط برخی از پلیمرها، بالا بودن هزینه تهیه و مقاومت سیالات حفاری پلیمری در برابر بهسازی‌های شیمیایی انجام شده برروی آنها، به نظر می‌رسد بهسازی بنتونیت‌ها با مواد شیمیایی جدید در درون سیال می‌تواند رویکردی نوین در افزایش کارایی سیالات حفاری ایجاد کند.

انواع افزودنی‌های سیال حفاری

از مهم‌ترین موادی که به سیال حفاری اضافه می‌شوند می‌توان به مواردی اشاره کرد که به‌صورت جامد به فاز مایع گل حفاری وارد می‌شوند. مواد یا فاز جامد گل حفاری به موادی گفته می‌شود که یا توسط کاربر به فاز مایع اضافه شود یا توسط سازند و در هنگام حفاری وارد سیستم گل حفاری شده باشند. مقدار این مواد در سیال حفاری از ۵ تا ۵۰٪ حجمی فاز مایع متغیر است. این مواد به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. دستهٔ مواد فعال، آنهایی هستند که بر روی سیال حفاری تاثیر فیزیکی و شیمیایی می‌گذارند. از جمله این مواد می‌توان به بنتونیت، نمک‌ها، پلیمرها و نیز هر ماده‌ای اشاره نمود که برای تغییر در گرانروی به گل افزوده شود. مواد غیرفعال به موادی گفته می‌شوند که فقط تاثیر فیزیکی بر گل حفاری دارند، مانند باریت، فروبار و پودر سنگ آهک که فقط وزن گل را بالا می‌برند [۳].

این مواد (فعال و غیرفعال) اگر از سازند وارد گل حفاری شوند، ممکن است تغییراتی نامطلوب در گل حفاری ایجاد کنند که اصطلاحا به آنها مواد مضر هم گفته می‌شود. از جمله این مواد می‌توان به شن و ماسه اشاره کرد. برعکس، اگر این مواد تاثیر مثبت بر گل حفاری داشته باشند، به آنها مواد مفید می‌گویند که رس‌ها در گل‌های سبک از جمله این مواد هستند.

کاربرد بنتونیت در سیالات حفاری

در ایران، حفاری ابتدا با گل‌های پایه‌آبی یا آب آغاز و با تغییر شرایط چاه از دیگر انواع گل‌ها نیز استفاده شده است.

برای مثال در حفاری لایه‌های بالایی، با تغییر شرایط چاه از گل‌های بنتونیتی استفاده می‌شود که به دلیل پراکنده شدن بنتونیت در آب و ایجاد نقطه واروی[1] مناسب قادر به حمل کنده‌های حفاری به سطح می‌باشد. بنتونیت یک نوع خاک رس به رنگ زرد روشن تا خاکستری است که بیش‌ترین درصد ساختمانی آن را یک کانی رسی به نام مونت موریلونایت با فرمول $Al_2 Si_4 O_{24} H_{42}. nH_2O$ تشکیل می‌دهد. این ماده هنگامی‌که در معرض آب قرار می‌گیرد چسبنده می‌شود و قابلیت شکل‌گیری در قالب را به‌دست می‌آورد. بنتونیت به دلیل شکل ویژه مولکول‌هایش خواص کلوییدی، تکسوتروپیک و اندودگری دارد. بنتونیت در اثر جذب آب معمولا تا ده برابر حجم اصلی خود می‌تواند متورم شود. این ماده برای استفاده در صنعت حفاری باید با استانداردهای مطرح نفتی، که از جمله مهم‌ترین آنها API-13A است، مطابقت داشته باشد [۴].

کاربرد پلیمرها در سیالات حفاری

از سال ۱۹۳۰ انواع مختلف پلیمرها به همراه گل‌های حفاری استفاده شده‌اند، که از آن جمله می‌توان به نشاسته گندم[2] به‌عنوان یک پلیمر طبیعی و عامل کنترل کنندهٔ تراویده در سیالات حفاری اشاره کرد. پلیمر یک مولکول بزرگ شامل واحدهای تکرارشونده یکسان و کوچک است که مونومر[3] نامیده می‌شوند. در پلیمریزاسیون، مونومرها به همدیگر متصل می‌شوند تا مولکول پلیمر بزرگ را تشکیل دهند. ساختار پلیمر می‌تواند خطی، شاخه‌دار یا مشبک باشد. امروزه طیفی وسیع از پلیمرها در دسترس هستند [۵] که می‌توان آنها را به چند گروه دسته‌بندی کرد:

- پلیمرهای طبیعی
- پلیمرهای طبیعی تغییریافته
- پلیمرهای مصنوعی

سوابق و تجربیات قبلی

با توجه به بررسی‌های پیشین می‌توان گفت که کشف معادن دارای بنتونیت با کیفیت خوب، نه تنها در ایران که در سراسر دنیا آسان نیست. با توجه به این که معادن از آن دسته ذخایری زیرزمینی هستند که طی سالیان متمادی و در اثر شرایط خاص فیزیکی و شیمیایی زمان‌های مختلف تولید شده و توسعه یافته‌اند، بعد از استفاده طولانی، بازسازی و تولید مجدد آنها در کوتاه‌مدت ممکن نیست. لذا با توجه به نیاز گسترده صنعت، به‌ویژه در زمینه حفاری، تهیه و به‌دست آوردن یکی از شاخص‌ترین مواد، که بدنه اصلی سیالات حفاری را تشکیل می‌دهد، از نکات قابل اهمیت در صنعت نفت است. پژوهش‌هایی گسترده درباره این ماده مهم و بهبود کیفیت آن مطابق با شرایط مورد نیاز استاندارد انجام شده‌اند.

به‌طور معمول در صنعت حفاری کیفیت سیال به کمک پلیمرهایی افزایش می‌یابد که عامل اصلی در آسیب سازندهای[4] مخازن کشور هستند. از این رو اگر بتوان با حذف حداکثری پلیمرها و استفاده از مواد غیرسنتزی، کیفیت سیال حفاری را بالا برد، می‌توان گفت که تحولی جدید در صنعت حفاری کشور رخ داده است. به دلیل برخی کمبودها در صنعت حفاری، از جمله کاهش معادن بنتونیت مرغوب، ارایه راه‌کاری مناسب برای جایگزینی و تقویت نمونه‌های ضعیف بنتونیت به صنعت بسیار کمک خواهد کرد. ارتقای کیفیت بنتونیت در سیال با مواد شیمیایی پایه‌کربناتی و منیزیومی، مقایسه سیالات بنتونیتی بهسازی شده با پلیمرهای مصرفی و نیز جایگزینی سیالات بنتونیتی بهسازی شده از جمله اهداف بررسی‌شده در این پژوهش هستند.

1. Yield Point
2. Wheat Starch
3. Monomer
4. Formation Damage

تهیه سیال بنتونیتی بهسازی شده با مشخصات مطلوب را می‌توان به‌عنوان یک راه حل آسان، سریع، با صرفه اقتصادی و حافظ شرایط زیست‌محیطی مطرح کرد. در ادامه می‌توان با در دست داشتن اطلاعاتی درباره نمونه‌های بنتونیت مرغوب و نامرغوب، شاخص‌ها و استانداردهای جهانی و شرایط کاربردی میدان‌های داخل کشور و نیز فراهم بودن مواد شیمیایی و دستگاه‌های لازم برای ارزیابی نمونه‌ها، رفتار سیال بنتونیتی بهسازی شده را مطالعه کرد. برای ارایه و طراحی ترکیب مناسب، ابتدا مشکلات ناشی از نامرغوب بودن بنتونیت‌های در حال استفاده در صنعت و در گام بعدی، استانداردهای معتبر جهانی و دستورالعمل‌های عملیاتی مطالعه و بررسی شدند. سپس نمونه‌های مختلف بنتونیت با هم مقایسه شدند و رفتار آنها با شاخص استاندارد موردمطالعه و با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های اولیه ترکیب شیمیایی پایه‌کربناتی و منیزیومی انتخاب شد. تمام آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه سیالات حفاری پژوهشگاه صنعت نفت انجام شده‌است.

به‌طور کلی در این پژوهش اهداف زیر دنبال شده‌است:

- بهبود شاخص‌های مختلف خواص سیالات پایه بنتونیتی ضعیف با استفاده از مواد شیمیایی
- افزایش پایداری حرارتی سیالات بنتونیتی بهسازی شده
- جایگزینی سیالات بنتونیتی بهسازی‌شده برای کاهش مصرف پلیمرهای حفاری
- کاهش صدمات ناشی از استفاده پلیمرها بر مخازن
- به‌کارگیری بنتونیت‌های نامرغوب در صنعت حفاری برای بالا بردن بهره‌وری

روش کار

در این پژوهش ۱۲ نمونه بنتونیت آزمایش شد. از بین تمام نمونه‌ها، با توجه به شرایط لازم در استاندارد (API 13A SPEC 2010)، نمونه‌های دارای کارایی لازم انتخاب و آزمایش‌های طراحی‌شده روی آنها انجام شد. از دیگر مواد شیمیایی مختلف استفاده شده در این پژوهش که نقش اصلی را در بهبود کارایی نمونه‌های بنتونیت به عهده داشتند می‌توان به ترکیب شیمیایی پایه منیزیومی و پایه‌کربناتی ساخت کارخانه مِرک[1] کشور آلمان اشاره کرد. به جز این مواد، می‌توان از نمونه‌های نمک سدیم کلراید، آهک و آب مقطر نیز به‌عنوان مواد اولیه برای ساخت گل و یا سیال پایه نام برد.

براساس نسخهٔ سال ۲۰۱۰ استاندارد API 13A، تمام نمونه‌های بنتونیت ابتدا در شرایط این استاندارد آزمایش و براساس کیفیت به سه رده خوب، نسبتا خوب و ضعیف دسته‌بندی شدند. جدول ۱ براساس شرایط این استاندارد تهیه شده که شاخص‌های لازم برای هر پارامتر در آن ذکر شده‌اند.

مواد و تجهیزات استفاده‌شده

تجهیزات مهم استفاده‌شده

- ویسکومتر دوار مدل ۳۵

از گرانروی‌سنج دوار برای اندازه‌گیری مشخصه‌های زیر استفاده شد [۱۱]:

الف) اندازهٔ تنش برشی که مستقیما متناسب است با درج خوانده شده[2]

ب) اندازهٔ شدت برشی که مستقیما متناسب است با سرعت چرخشی محور دوار (برحسب RPM)

پ) اندازه‌گیری گرانروی ظاهری، گرانروی پلاستیکی، نقطه واروی و مقاومت ژله‌ای

جدول ۱- ارزیابی خواص لازم در استاندارد (API API13 A-2010)

ردیف	خواص	واحد	مشخصات لازم
۱	دور ۶۰۰ ویسکومتر	-	حداقل ۳۰
۲	نقطه واروی/ ویسکوزیته پلاستیکی	-	حداکثر ۶
۳	میزان تراویده سیال	(cc) سانتی مترمکعب	حداکثر ۱۵
۴	ذرات بزرگ‌تر از ۷۵ µm	(wt./) درصد وزنی	حداکثر ۴
۵	رطوبت	(wt./) درصد وزنی	حداکثر ۱۰

1. Merck
2. Dial Reading

- دستگاه فیلتر پرس[1]

میزان تراویده سیال در شرایط فشار ۶۹۰ kPa (معادل ۱۰۰ psi) و دمای اتاق در طی مدت ۳۰ min اندازه‌گیری شد. کاغذ صافی قابل‌استفاده در این آزمایش واتمن ۵۰، یا معادل آن ۵۷۶ اس اند اس[2]، است. اندازه‌گیری با دستگاه فیلتر پرس‌ساخت کارخانهٔ فن[3] انجام شد که به‌صورت شش‌شاخه و یا تک‌شاخه تولید شده است [۱۱].

- دستگاه همزن الکتریکی سیال حفاری[4]

میکسر استفاده‌شده در این آزمایش‌ها ساخت کارخانه فن، تک‌پره و با سرعت حدود ۱۱۵۰۰ rpm بود و تمام سیالات بنتونیتی با این دستگاه مخلوط شدند. این دستگاه از ۵ تیغه تشکیل شده است که هر کدام یک پره دارد. تمام تیغه‌ها با سرعت ثابت فوق گردش می‌کنند و در پایین یک پایه برای نگه داشتن منبع یا بشکه آزمایشگاهی حاوی سیال یا گل حفاری دارند. تجهیزات دیگر استفاده‌شده در آزمایش‌ها به‌اختصار در ادامه آمده‌اند:

- ترازوی الکترونیکی دو رقم اعشار
- همزن مغناطیسی[5]
- کورهٔ گردان[6]
- بورت دیجیتال[7]
- دماسنج
- دستگاه اندازه‌گیری خاصیت اسیدی و بازی (pH meter)
- آون خشک‌کن

مواد استفاده‌شده در آزمایش‌ها

- بنتونیت با کیفیت نسبتا خوب و کیفیت ضعیف
- ترکیب شیمیایی پایه‌منیزیم (MBC)
- ترکیب شیمیایی پایه‌کربنات (CBC)
- پلیمر نشاسته کم‌قوام (STARCH-LV)
- پلیمر کربوکسی متیل سلولز کم‌قوام (CMC-LV)
- آب مقطر

نتایج و بحث

تعیین مشخصه‌های اندازه‌گیری‌شده در تمام آزمایش‌ها

مشخصه‌هایی که در آزمایش‌های این پژوهش اندازه‌گیری شده‌اند عبارت‌اند از:

۱- اندازه‌گیری انحراف عقربهٔ ویسکومتر برای سرعت‌های ۳، ۶، ۳۰۰ و ۶۰۰ rpm قبل و بعد از زمان دادن به نمونه و محاسبهٔ گرانروی ظاهری[8]، گرانروی پلاستیکی[9] و نقطه واروی[10]

۲- اندازه‌گیری استحکام یا مقاومت ژله‌ای گل با دستگاه ویسکومتر

۳- اندازه‌گیری pH گل با دستگاه pH متر دیجیتال

۴- اندازه‌گیری میزان تراویده API سیال در مدت ۳۰ min برحسب ml

۵- اندازه‌گیری دمای سیال

طراحی آزمایش

برای به‌دست آوردن داده‌های لازم از مواد اولیه و افزودنی‌های استفاده‌شده در این تحقیق، آزمایش‌هایی به‌صورت زیر دسته‌بندی و با فرمول‌های پیشنهادی بررسی شدند.

آزمایش‌های مرحله اول

آزمایش‌های اولیه بر روی ۱۲ نمونه انتخابی طبق شرایط استاندارد API 13A انجام شد که این نمونه‌ها با کدهای B-۱ تا B-۱۲ شماره‌گذاری شده بودند و کیفیت نمونه‌ها نیز با یکدیگر مقایسه شد. انجام آزمایش کنترل کیفی به ادامه روند آزمایش‌ها بسیار کمک کرده و در دسته‌بندی نمونه‌ها موثر بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲، می‌توان نمونه‌هایی را انتخاب کرد که از لحاظ شاخص‌های استاندارد کیفیت بهتری دارند تا ضمن کوچک‌تر کردن جامعهٔ آماری، برای انجام آزمایش‌های تکمیلی درجه‌بندی شوند.

1. Filter Press
2. S&S
3. Fann Instrument Company
4. Multi Mixer
5. Magnetic Stirrer
6. Rolling Oven
7. Digital Burette
8. Apparent Viscosity (AV)
9. Plastic Viscosity (PV)
10. Yield Point (YP)

جدول ۲- ارزیابی خواص نمونه‌های بنتونیت انتخابی براساس استاندارد API

ردیف	خواص	واحد	مشخصات لازم	نتیجه انواع بنتونیت										
				B-۱	B-۲	B-۳	B-۴	B-۵	B-۶	B-۷	B-۸	B-۹	B-۱۰	B-۱۱	B-۱۲
۱	دور ۶۰۰ ویسکومتر	-	حداقل ۳۰	۸	۴	۷	۳۵	۵	۲۶	۴۴	۷	۸	۶	۱۱	۲۰/۵
۲	نقطه واروی/ ویسکوزیته پلاستیکی	-	حداکثر ۶	۰/۶	۰	۰/۳	۵	۱/۳	۲/۳	۰/۹	۰/۳۳	۰/۶	۱	۱/۶	۳/۸
۳	میزان تراویده سیال	سانتی‌متر مکعب	حداکثر ۱۵	۳۳/۲	۲۲۰	۳۳/۶	۱۸	۱۶/۸	۱۷/۲	۱۲/۴	۴۷	۴۹/۶	۶۴	۲۸	۲۸
۴	ذرات بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون	درصد وزنی	حداکثر ۴	۱/۴	۱/۱	۱۳/۹	۰/۹	۸/۷	۸/۷	۲/۵	۰/۷	۰/۹	۱	۰/۶	۱۰/۶
۵	رطوبت	درصد وزنی	حداکثر ۱۰	۹/۲	۲/۳	۳/۶	۸/۱	۳/۳	۶/۹	۶/۳	۸/۵	۸/۶	۸/۶	۸/۶	۶/۴

مشخص شد که گرانروی نمونه‌های B-۴، B-۶، B-۷ و B-۱۲ از نمونه‌های دیگر مناسب‌تر است و نمونه‌های B-۷ و B-۴ با شاخص لازم در استاندارد مطابقت داشتند و دو نمونه دیگر را می‌توان با کمی اختلاف در دسته‌بندی نسبتا خوب قرار داد.

از نظر دیگر مشخصهٔ مهم استاندارد، که حجم تراویده سیالات بنتونیتی است نیز می‌توان نمونه‌های B-۴، B-۵، B-۶ و B-۷ را انتخاب کرد که البته تنها نمونه B-۷ دقیقا مطابق با شاخص موردنیاز استاندارد بود و باقی نمونه‌ها با کمی اختلاف در دسته‌بندی نسبتا خوب قرار گرفتند. دربارهٔ اندازهٔ ذرات بزرگ‌تر از ۷۵ mμ می‌توان گفت که به‌غیر از نمونه‌های B-۳، B-۵، B-۶ و B-۱۲، باقی نمونه‌ها با شاخص استاندارد مطابقت و اندازهٔ مناسبی داشتند. مقدار رطوبت و نیز نقطه واروی/ گرانروی پلاستیکی تمام نمونه‌های انتخاب شده با مشخصات موردنیاز استاندارد مطابقت داشتند و هیچ‌کدام بالاتر از شاخص ذکرشده نبودند. از این رو می‌توان به‌صورت کلی نمونه‌های انتخابی را از لحاظ کیفیت به دو گروه ضعیف و قوی دسته‌بندی کرد، (نمونه‌های B-۴، B-۶، B-۷ و B-۱۲ در دسته نمونه‌های خوب و قوی و بقیه در دسته نمونه‌های نسبتا خوب یا ضعیف).

آزمایش‌های مرحله دوم

بعد از آزمایش‌های انجام شده در زمینهٔ افزایش ترکیبی مناسب شامل ۲۲/۵ gr بنتونیت، ۰/۵ gr ترکیب شیمیایی پایه‌کربناتی و ۲ gr ترکیب شیمیایی پایه منیزیومی و نیز مقایسهٔ آنها با حالت پایه بدون افزودنی‌های شیمیایی، رفتار دو نمونه از بنتونیت‌های نسبتا خوب و ضعیف در شرایط حرارت و در کنار پلیمرها بررسی شد. به دلیل انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه بنتونیت‌ها در حضور پلیمرهایی مانند زانتان گام یا پلی اکریل آمید، در این بخش از پژوهش رفتار دو نمونه بنتونیت انتخابی در کنار دو پلیمر کربوکسی متیل سلولز قوام و نشاسته قوام مطالعه و مقایسه شد. این آزمایش در حضور دو پلیمر نام‌برده به مدت ۴ hr و در دمای ۱۴۰°F طراحی شد. خواص سیالات بعد از حرارت دیدن در دمای ۸۰°F ارزیابی شد. در این آزمایش سعی شد مقدار پلیمرهای استفاده‌شده تقریبا معادل افزودنی‌های شیمیایی باشد (جدول ۳). سپس نتایج حاصل از تاثیر افزودن پلیمرها و افزودنی‌های شیمیایی بر سیالات بنتونیتی قبل و بعد از حرارت دیدن بررسی شدند. نکتهٔ مهم آن است که بنتونیت به دلیل رفتاری که در کنار آب نشان می‌دهد و کلوییدی شدن، در دمای بالا نمی‌تواند پایدار بماند و به حالت ژل در می‌آید. با در نظر داشتن پایداری حرارتی پایین بنتونیت و نیز محدود بودن شرایط زمانی و دمایی برای آزمایش و ارزیابی آن، پلیمرهای فوق انتخاب شدند. برای بررسی بهتر، نتایج در جدول‌های ۴، ۵ و شکل‌های ۱ تا ۴ به‌صورت نمودار، ارایه شده‌اند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۱، با افزودن مواد شیمیایی قبل از حرارت دیدن، می‌توان افزایش چشم‌گیر خواص رئولوژیکی، نسبت به حالت پایه، را مشاهده کرد. در سیالات پلیمری، به‌خصوص نمونه نشاسته قوام، این افزایش مشاهده نمی‌شود. البته میزان تراویده در سیالات حاوی پلیمر بسیار کاهش یافته است.

جدول ۳- فرمول افزودن پلمیرها و افزودنی‌های شیمیایی به نمونه‌های انتخابی به همراه حرارت دادن

شماره فرمول	روش ساخت
Base	350 cc DW +22.5 g bent./30 min mix 24 hr. age 5 min mix/4 hr. roll 140°F
F1	350 cc DW +22.5 g bent.15 min mix0.5g C.B.C10 min mix2+g M.B.C/10 min mix/4 hr. roll 140°F
F2	350 cc DW +22.5 g bent.15 min mix+2.5g CMC-LV15 min mix/4 hr. roll 140°F
F3	350 cc DW +22.5 g bent.20 min mix+2.5g Starch-LV15 min mix/4 hr. roll 140°F

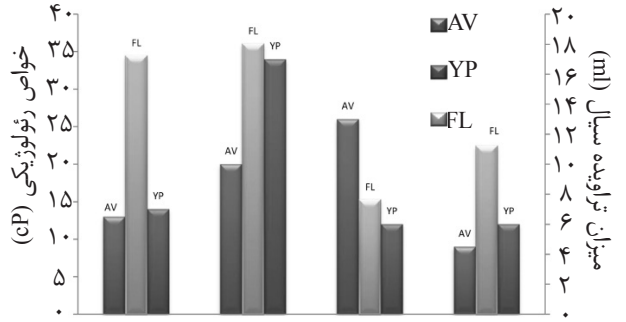
جدول ۴- نتایج حضور پلیمرها و افزودنی‌های شیمیایی در سیالات بنتونیتی قبل از حرارت دادن

کد نمونه	AV (cP)				Yp (Lbs/100ft²)				FL (ml)				pH			
	Base	F1	F2	F3	Base	F1	F2	F3	Base	F1	F2	F3	Base	F1	F2	F3
B-۶	۱۳	۲۰	۲۶	۹	۱۴	۳۴	۱۲	۱۲	۱۷/۲	۱۸	۷/۶	۱۱/۲	۸/۸	۹/۲	۸/۵	۸/۹
B-۹	۴	۲۶/۵	۱۱	۲۵	۲	۴۳	۲	۸	۴۹/۶	۱۸/۴	۸	۱۵/۲	۸/۷	۹/۰۱	۸/۱۳	۸/۲

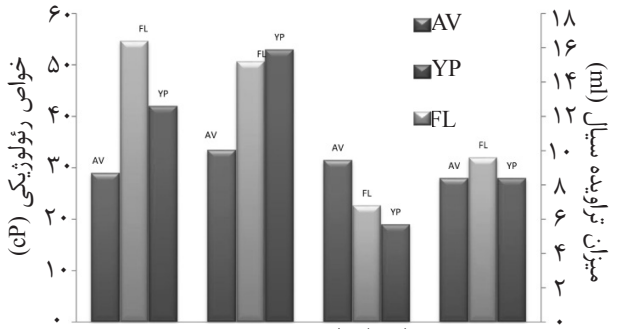
جدول ۵- نتایج حضور پلیمرها و افزودنی‌های شیمیایی در سیالات بنتونیتی بعد از حرارت دادن

کد نمونه	*AV (cP)				*Yp (Lbs/100ft²)				*FL (ml)				pH			
	Base	F1	F2	F3	Base	F1	F2	F3	Base	F1	F2	F3	Base	F1	F2	F3
B-۶	۲۹	۳۳/۵	۳۱/۵	۲۸	۴۲	۵۳	۱۹	۲۸	۱۶/۴	۱۵/۲	۶/۸	۹/۶	۸/۷	۹/۸	۸/۷	۹/۳
B-۹	۳/۵	۳۳/۵	۱۲/۵	۷/۵	۳	۵۱	۳	۵	۳۰/۴	۱۶/۸	۸	۱۲	۸/۱	۹/۷	۸/۶	۸/۸

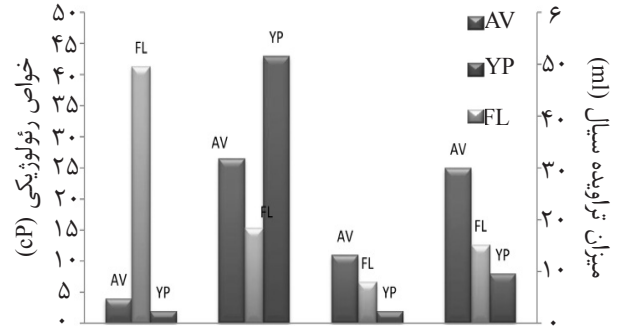
(*FL=Fluid Loss و *Y.P=Yield Point ،*AV=Appearance Viscosity)



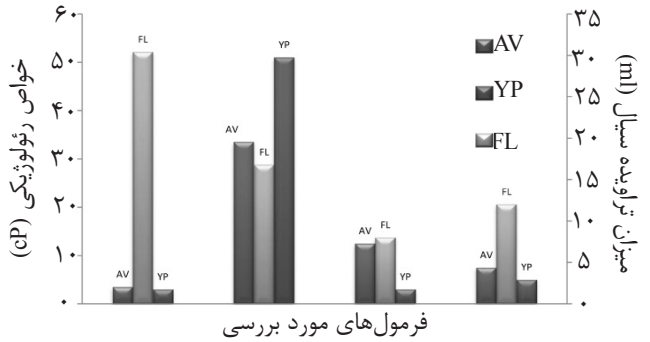
شکل ۱- نمودار مقایسهٔ خواص رئولوژیکی و میزان آب از دست دادگی مربوط به سیال بنتونیتی B-۶ در حضور پلیمرها و افزودنی‌ها قبل از حرارت دیدن



شکل ۲- نمودار مقایسهٔ خواص رئولوژیکی و میزان آب از دست‌دادگی سیال بنتونیتی B-۶ در حضور پلیمرها و افزودنی‌ها بعد از حرارت دیدن



شکل ۳- نمودار مقایسهٔ خواص رئولوژیکی و میزان آب از دست‌دادگی سیال بنتونیتی B-۹ در حضور پلیمرها و افزودنی‌ها قبل از حرارت دادن



شکل ۴- نمودار مقایسهٔ خواص رئولوژیکی و میزان آب از دست دادگی سیال بنتونیتی B-۹ در حضور پلیمرها و افزودنی‌ها بعد از حرارت دیدن.

نتایج حاصل از شکل ۲ نشان می‌دهند که بعد از حرارت دادن، خواص رئولوژیکی سیال با نمونه بنتونیت B-۶ در حالت پایه افزایش و میزان تراویده سیال نیز کاهش یافته است. این روند در زمان استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، بخصوص با افزایش نقطه واروی سیال، قابل مشاهده است. در زمان استفاده از سیال حاوی کربوکسی متیل سلولز کم‌قوام، گرانروی ظاهری نسبت به حالت پایه افزایش و میزان تراویده سیال تا حد زیادی کاهش یافته است. در سیال حاوی نشاسته، تغییرات رئولوژیکی محسوس نبودند، ولی میزان تراویده کم شده است.

با توجه به نتایج شکل می‌توان گفت که در نمونه B-۹، که کیفیتی ضعیف داشت، تغییرات بعد از افزودن مواد شیمیایی به سیال بسیار زیاد بوده‌اند. میزان تراویده سیال بسیار کاهش یافته و به شرایط مورد نیاز استاندارد نزدیک شده است. در سیالات حاوی پلیمر در حضور کربوکسی متیل سلولز کم‌قوام، خواص رئولوژیکی افزایش و مقدار تراویده به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. در سیال پلیمری نشاسته‌ای، افزایش خواص رئولوژیکی بیش از کاهش میزان تراویده مشخص است.

نتایج حاصل از شکل ۴ نشان می‌دهند که بعد از حرارت دادن، افزایش خواص رئولوژیکی سیال با نمونه بنتونیت B-۹، در حالت پایه و در مقایسه با قبل از حرارت دادن، با کاهش قابل توجه میزان تراویده سیال همراه است. سیال حاوی افزودنی‌های شیمیایی افزایش خواص رئولوژیکی و کاهش نسبی میزان تراویده را به همراه دارد. خواص رئولوژیکی هر دو سیال پلیمری بسیار کم افزایش داشته و با کاهش چشمگیر میزان تراویده همراه بوده‌اند.

با در نظر گرفتن تمام آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش و نتایج حاصل از آنها، نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهاد موثر برای بهبود خواص شیمیایی نمونه‌های بنتونیت ممکن خواهد بود.

نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از انتخاب غلظت‌های مناسب از ترکیب‌های پایه‌کربناتی و منیزیمی و افزایش همزمان این مقادیر به سیالات بنتونیتی بهبود خواص رئولوژیکی و نیز کنترل میزان تراویده در اکثر نمونه‌های آزمایش‌شده را نشان می‌دهد، به طوری که خواص رئولوژیکی نمونه‌های ضعیف ۵ تا ۷ برابر افزایش و میزان تراویده آن حدود ۲ تا ۳ برابر کاهش یافته است.
- نتایج حاصل از آزمایش حرارتی سیالات بنتونیتی پایه و بهسازی شده نشان دادند که این سیالات بعد از حرارت دادن پایداری خوبی به‌دست می‌آورند و میزان تراویده هر دو نمونه حدود ۱ تا ۱/۲ برابر کاهش و خواص رئولوژیکی آنها حدود ۱/۵ برابر بهبود می‌یابد.
- نتایج حاصل از آزمایش حرارتی سیالات بنتونیتی بهسازی شده، در مقایسه با سیالات حاوی پلیمر، نشان دادند که خواص رئولوژیکی این سیالات،

به‌خصوص نمونه دارای بنتونیت بسیار ضعیف، بعد از حرارت دیدن حدود ۲/۵ تا ۴ برابر بهبود یافته‌اند و میزان تراویده سیال در نمونه‌های B-۶ و B-۹ بیش از سیالات پلیمری بوده است.

- مقایسه نتایج آزمایش سیالات بنتونیتی در حضور پلیمرها و افزودنی‌های شیمیایی با غلظت مناسب نشان داد که به دلیل بالا بودن خواص رئولوژیکی سیالات بنتونیتی بهسازی شده و مناسب بودن میزان تراویده آنها و نزدیکی آنها با شرایط استاندارد، می‌توان آنها را جایگزینی برای پلیمرهای مصرفی دانست.

پیشنهادها

استفاده از سیالات بنتونیتی بهسازی شده به جای برخی از پلیمرها و یا به همراه غلظتی کم‌تر از آنها در سیالات حفاری برای ارتقای کیفیت سیال حفاری.

استفاده از سیالات بنتونیتی بهسازی شده به دلیل پایدار بودن خواص رئولوژیکی و کنترل میزان تراویده آنها در دماهای بالاتر از ۱۴۰°F.

افزودن مستقیم ترکیب شیمیایی پایه‌کربناتی و منیزیمی به سیال بنتونیتی برای ارتقای کیفیت سیال.

مراجع

[1]. Drilling Fluids Manual, 2004, Amoco Production Company USA,1995.

[۲]. صعودی م، عطاران ب و نصیری ع، مرتضوی س ع، "کارائی زانتان تولید شده از سویه‌های بومی برای کاربرد در سیال‌های حفاری"، پژوهش نفت، شماره ۶۵، صفحات۵۸ تا۷۰، ۱۳۹۰.

[3]. Fink J. K., *"Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids," Elsevier Science*, 2012.

[4]. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M.E. and Young F. S, *Applied Drilling Engineering,* 1991, SPE,1986.

[۵]. نصیری ع و ولی‌زاده م، "بررسی عملکرد و تأثیر پلی اکریل آمید هیدرولیز شده جزئی درسیالات حفاری پایه آبی"، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، شماره ۱۲۳، صفحات۴ تا۱۳، ۱۳۹۲.

[۶]. سالاریه م. و خراط ر.، "کارائی زانتان تولید شده از سویه‌های بومی برای کاربرد درسیال‌های بررسی میزان تأثیر بیوپلیمر بر رفتار شبه پلاستیک گل حفاری، فصل‌نامه تحقیق"، شماره ۳۱، صفحات۵۴ تا ۶۸، ۱۳۷۷.

[۷]. مجتهدی س. م، "اثر حرارت برروی تعلیق‌های بنتونیتی"، فصل‌نامه تحقیق، شماره ۴، صفحات ۳۹ تا ۵۴، ۱۳۷۱.

[۸]. سلطانیان ح.، موحدی‌نیا ع، "تاثیر دما روی گل بنتونیتی و گل پلیمری PHPA، XC درشرایط واقعی چاه"، یازدهمین همایش نفت، گاز و پتروشیمی ویژه صنایع بالادستی، سالن اجلاس سران کشورهای اسلامی، تهران ایران، ۱۳۸۱.

[9]. Karaguzel C.,Cetinel T., Boylu F., Cinku K., and Celik M. S., *"Activation of (Na, Ca)- bentonite with Soda and MgO and theirutilization as drilling mud," Elsevier,* Vol., 48, pp. 398-405, 2010.

[10]. YILDIZ N. And Calimli A., *"Alteration of three Turkish Bentonites by treatment with Na_2CO_3 and H_2SO_4," Turkish Journal of Chemistry*, pp. 393-401, 2002.

[۱۱]. نصیری ع.، عطاران ب.، "کارائی زانتان تولید شده از سویه‌های بومی برای کاربرد درسیال‌های حفاری"، پژوهش نفت، شماره ۶۵، صفحات ۵۸ تا۷۰، ۱۳۹۰.

[12]. API Standard 13 A, American Petroleum Institute, 2010.