

بررسی اثر نانولوله‌های کربنی با عامل‌های قطبی بر خواص رئولوژی سیال حفاری پایه آبی

احمد موسایی^۱، مرتضی احسانی^{۲*}

۱- دانشگاه آزاد، واحد تهران جنوب

۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

یکی از چالش‌های اصلی حفاری، تخریب حرارتی افزودنی‌های پلیمری در حفر چاه‌های عمیق است که منجر به کاهش خواص رئولوژیکی و افزایش مقادیر فیلتراسیون خواهد شد. ورود مقادیر زیاد فیلتره به درون سازند شیلی سبب افزایش فشار منفذی و ناپایداری شیل و ایجاد مشکلات متعددی می‌گردد. لذا در این تحقیق بر آن شدیم که اثر نانولوله کربنی (FMWCNT) با دو گروه عاملی قطبی OH و COOH بر خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه آبی سبک با وزن ۶۳ pcf بررسی کنیم.

در این مطالعه یک نمونه سیال به عنوان پایه و ۶ نمونه سیال حاوی نانولوله (۳ نمونه عامل دار با OH و ۳ نمونه عامل دار با COOH) با غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ (w/w) درصد ساخته شده و در شرایط دمایی محیط آزمایشگاهی (BHR: 77 °F) و گردش گل در دمای شبیه‌سازی شده ته چاه (AHR: 250 °F) خواص رئولوژیکی و سپس مقادیر فیلتراسیون (FL) نیز اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داده است از میان غلظت‌های بکارگرفته شده بهترین اثر بخشی بر خواص رئولوژی در غلظت ۰/۰۵٪ برای گروه عاملی COOH مشاهده شده که تمامی خواص رئولوژیکی را در هر دو شرایط BHR و AHR افزایش و مقادیر FL را نیز کاهش داده است.

چکیده

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۶/۰۸

نانولوله کربنی، گروه کربوکسیل، عامل هیدروکسید، خواص رئولوژیکی، پایداری حرارتی

واژگان کلیدی

Investigating the effect of carbon nanotubes containing carboxyl and hydroxyl functional groups on the rheological properties of water-based drilling fluid

Ahmad Mousaei¹, Morteza Ehsani^{2*}

1- Islamic Azad University South Tehran Branch

2- Iran Polymer and Petrochemical Institute

Abstract

Nowadays, with the advancement of nano technology, several researches have been done on using Nano additives to solve the existing problems of the oil industry. One of the main challenges of drilling is thermal degradation of polymer additives in well drilling, which will lead to a decrease in rheological properties, increase in filtration values. Entering large amounts of filtrate into the shale formation will increase pore pressure, shale instability, cause many problems. Solving this problem by using high temperature polymers or carbon materials with high thermal conductivity can prevent thermal degradation of polymers and also block the nanometer pores of shale. In this research, we decided to investigate the effect of carbon nanotubes (FMWCNT) with two polar functional groups, OH and COOH, on rheological properties of light weight water base drilling fluid with a weight of 63 pcf. In this study, a base fluid sample and 6 fluid samples containing nanotubes (3 samples with OH agent and 3 samples with COOH agent) with concentrations (w/w) of 0.01, and 0.05 and 0.1% were made and under the conditions of laboratory environment temperature. (BHR:77 °F) and mud circulation at the simulated bottom hole temperature (AHR:250 °F) Rheological properties and then filtration values (FL) have also been measured. The results have shown that among the concentrations used, the best effect on the rheological properties was observed at a concentration of 0.05% for the COOH functional group, which increased all rheological properties in both BHR and AHR conditions and also decreased the FL values.

Keywords

Carbon nanotube, carboxyl group, hydroxide group, rheological properties, thermal stability

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی نیاز صنعت به انرژی روز به روز در حال افزایش است. یکی از منابع مهم جهت تامین انرژی، منابع فسیلی می‌باشد. تامین انرژی از این منبع سوختی در مقایسه با سایر منابع نظیر انرژی‌های بادی، خورشیدی، و انرژی هسته‌ای و .. ارزان قیمت‌تر است [۱-۳]

جهت دستیابی به منابع بیشتر گاز و نفت نیاز به حفر چاهایی با عمق بیشتر وجود دارد [۴-۵]. با افزایش عمق حفاری، دما نیز مطابق با گرادیان حرارتی افزایش خواهد یافت و شرایط برای عملیات حفاری دشوار خواهد شد به همین منظور دانشمندان در تلاش هستند افزایش‌هایی بکارگیرند که توان تحمل حرارت بالا را داشته و بتوانند در فرایند خنک‌سازی مته توسط سیال حفاری به شکل موثری عمل کنند [۶].

بکارگیری فناوری نانو در صنعت نفت و گاز منجر به پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌های بازیابی نفت و فرمولاسیون گل حفاری شده است [۷-۹]. گل‌های حفاری که می‌توان آن را «خون» در صنعت حفاری نامید، نقش عمده‌ای در عملیات حفاری ایفا می‌کند. نانو ذرات با خواص منحصر به فرد مانند رسانایی حرارتی بالا و سطح تماس زیاد می‌توانند چالش‌های سیال حفاری را حل کنند و برای توسعه افزودنی‌های سیال حفاری استفاده شوند، نانومواد با موفقیت توسط محققان مختلف به عنوان افزودنی برای بهبود خواص رئولوژیکی و همچنین بهبود فیلتراسیون و روانکاری گل حفاری استفاده شده است [۱۰-۱۲ و ۴۱-۴۲] علاوه بر این، از نانومواد برای بهبود پایداری حرارتی گل، انتقال حرارت و خنک‌سازی مته، تمیز کردن چاه، کاهش گشتاور و به حداقل رساندن گیر لوله‌ها، حفظ پایداری چاه، کاهش آسیب‌سازندی و پایداری شیل، استفاده شده است [۱۳-۱۸].

قابلیت نانوذرات از یک طرف و مواد پلیمری از طرف دیگر با کاربردهای مختلف در سیال حفاری در زیر آورده شده است. پلیمرهای موجود در سیالات حفاری از دهه ۱۹۳۰، زمانی که نشاسته ذرت به عنوان یک افزودنی کنترل هرزروی سیال حفاری معرفی شد، پلیمرها در سیالات حفاری مورد استفاده قرار گرفتند. احتمال تغییرات ساختاری از جمله نوع مونومر یا مونومرها، وزن مولکولی، تغییرات شیمیایی روی پلیمر و تعداد شاخه‌ها یا پیوند شیمیایی در زنجیره پلیمر بر عملکرد پلیمرها تأثیر می‌گذارد. پلیمرها می‌توانند در موارد زیر باعث ایجاد ویسکوزیته در محلول شوند:

• فعل و انفعالات بین زنجیره‌های پلیمری - افزایش طول زنجیره‌ها

- جذب آب، افزایش موثر اندازه پلیمر
- برهمکنش با مواد جامد در گل برای تشکیل یک شبکه بهم پیوسته (مثلاً جامدات حفر شده با خاک رس فعال و پلی‌آکریل آمیدهای با وزن مولکولی بالا).
- طبقه بندی پلیمرها بر اساس شیمی پلیمرها:
- آنیونیک
- نانونیونیک
- طبقه بندی پلیمرها بر اساس عملکرد پلیمرها:
- ویسکوفایر
- افزودنی کنترل فیلتریشن
- طبقه بندی پلیمرها بر اساس منشا پلیمرها:
- پلیمرهای طبیعی مانند صمغ زانتان
- پلیمرهای طبیعی اصلاح شده مانند سلولز پلی‌آیونیک
- پلیمرهای مصنوعی مانند پلی‌آکریل آمید هیدرولیز شده (PHPA)

که این مواد پلیمری باعث تأثیر شگرفی در سیال حفاری شدند. تمام افزایش‌های حفاری، عملکرد آنها و مواد، ترکیبات استفاده شده در هر کدام از منابع مختلف علمی و تجاری استخراج شده تا بتوانیم سیال حفاری را بهتر بشناسیم.

کاهش آسیب‌های سازندی و هزینه کلی سیال حفاری، کنترل هرزروی و کیک گل، حذف مواد خطرناک، بهبود انتقال حرارت، روانکاری و خواص رئولوژیکی مانند ویسکوزیته، از مزایای اصلی استفاده از نانوذرات و مواد پلیمری در سیالات حفاری است.

نانومواد و مواد پلیمری توانایی زیادی در کاهش مقاومت اصطکاکی بین لوله‌های حفاری و بهبود گشتاور و کشش دارند. علاوه بر این، نانوذرات با مواد پلیمری دارای قابلیت‌های گسترده حفاری در فشار بالا و دمای بالا (HPHT) هستند. عملکرد انتقال حرارت سیالات حفاری معمولی را می‌توان برای کنترل بهتر خنک‌سازی ابزارهای حفاری جهت جلوگیری از احتمال تخریب ابزارهای حفاری در شرایط HPHT تغییر داد، این بهبود با نانو ذرات دارای سطح تماس زیاد که باعث افزایش هدایت حرارتی سیال حفاری و در نتیجه بهبود انتقال حرارت در ابزارهای حفاری ایجاد می‌شود.

پایداری دیواره چاه مشکل دیگری است که با استفاده از نانوذرات و پلیمر به عنوان مواد افزودنی در سیال حفاری بهبود یافته است. همچنین نانوذرات و مواد پلیمری با کاهش میزان مواد شیمیایی و جامدات می‌توانند هزینه کلی سیالات حفاری را کاهش دهند. نانوذرات می‌توانند خطرات زیست‌محیطی را کاهش دهند و نگرانی‌های مربوط به خطرات اکولوژیکی سیال حفاری را کاهش دهند.

جدول ۱. افزایش‌های معدنی، شیمیایی و پلیمری سیال حفاری [۴۳، ۴۵-۴۸، ۵۰-۵۲، ۵۴]

نوع افزایش	عملکرد	ترکیبات افزایش
افزایش کنترل قلیایی / اسیدی	تنظیم مقدار PH	آهک، هیدروکسید سدیم، کربنات سدیم، بی کربنات سدیم، نمک
باپوساید	حذف باکتری	آلدئیدها، فنل ها
کاهش دهنده کلسیم	کاهش دهنده Ca^{2+}	هیدروکسیدسدیم، کربنات سدیم، بی کربنات سدیم، پلی فسفات ها
بازدارنده خوردگی	محافظت از تجهیزات در برابر خوردگی	محصولات آمین یا ارگانوفسفات، جاذب اکسیژن
دفاکولانت (رقیق کننده)	کاهش ویسکوزیته، جلوگیری از لخته شدن	پلیمرهای آنیونی با وزن مولکولی پایین، تانن ها، پلی فسفات ها، لیگنیت، لیگنوسولفونات
کف زدا	حذف هوا و گاز محبوس شده از سیستم سیال حفاری	کف زدا بر پایه الکل، کف زدا بر پایه آب نمک، کف زدا بر پایه اسید چرب، کف زدا بر پایه امولسیون سیلیکونی
امولسیفایرها	تشکیل امولسیون دو مایع نامحلول	مواد شوینده، صابون ها، اسیدهای آلی، اسیدهای چرب، آمیدهای اسید چرب متشکل از زنجیره های پلی اتر نرمال الکیله شده
کاهنده‌های فیلتراسیون	کاهش نفوذ فاز مایع سیال حفاری از طریق یک فیلتر به داخل سازند	خاک رس بنتونیتی، لیگنیت، کربوکسی متیل سلولز (CMC)، پلی آکریلات، نشاسته، پلی آنیونیک سلولز (PAC)
فلوکولانت ها	باعث لخته شدن ذرات کلئیدی	آهک هیدراته، گچ، کربنات سدیم، بی کربنات سدیم، سدیم تترا فسفات، پلیمرهای پایه آکریل آمید
عوامل کف کننده	عوامل فعال سطحی برای ایجاد کف در آب	سورفکتانت های غیر یونی حاوی مواد پلیمری
مواد هرزروی	پل زدن برای کنترل هرزروی	مواد غلیظ کننده شیمیایی به شکل لیاف، پرک، گرانول، کولیمبر سوکسینیمید، پلی آکریلات سدیم، پوسته آجیل، میکا، فیبر نیشکر، کاغذ خرد شده
کنترل کننده هرزروی	کنترل هرزروی	گیلسونایت، سدیم آسفالت سولفونات، آسفالت سولفونات، لیگنیت ارگانوفیلیک، پلی آنیونیک سلولز (PAC)، نشاسته کربوکسی متیل، نشاسته هیدروکسی پروپیل، کربوکسی متیل سلولز (CMC) و پلی آکریلات سدیم.
روان کننده‌ها	کاهش ضریب اصطکاک سیالات برای به حداقل رساندن گشتاور و درگ	روغن ها، مایعات سنتتیک، گرافیت، سورفکتانت ها، گلیکول ها، گلیسیرین
باز دارنده شیل	کاهش هیدراسیون شیل	کلسیم یا پتاسیم محلول، نمک های معدنی، ترکیبات آلی، مایعات پایه پلی اول حاوی گلیکول یا گلیسرول، سیلیکات سدیم یا پتاسیم
کپسوله سازی شیل		PHPA
پایداری شیل		گلیکول، استات پتاسیم، آسفالت، KCl
سورفکتانت ها	کاهش کشش سطحی و تغییر حالت کلئیدی خاک رس	امولسیفایرها، دمولسیفایرها، عوامل مرطوب کننده، لخته سازها، دفلوکولانت ها
ویسکو فایرها	افزایش ویسکوزیته، بهبود قابلیت تمیز کردن سوراخ و قابلیت تعلیق مواد جامد	ویسکوفایرهای بر پایه خاک رس (بنتونیت)، بنتونیت ارگانوفیلیک، ویسکوفایرهای پلیمری و باپولیمری، خاک رس ارگانوفیلیک، صمغ زانتان، صمغ ولان، صمغ گوار
عوامل وزن افزا	افزایش دانسیته سیال حفاری	باریت، هماتیت، گالن، کربنات کلسیم، سولفات باریم

های عاملی قطبی متفاوت را بر روی سیالاتی با وزن سبک که مناسب حفاری لایه‌های سطحی شیل می‌باشند مورد ارزیابی قرار داده شده است.

کاربردهای عمده پلیمرها در گل حفاری

ویسکوزیته- زنجیر طولانی تر ویسکوزیته بیشتر

گسترش بنتونیت- اتصال عرضی ذرات بنتونیت برای افزایش تعامل فیزیکی بین ذرات

فلوکولاسیون- مشخص نمودن آنیونی با وزن مولکولی بالا که پلیمر را قادر می‌سازد از ذره ای به ذره دیگر پل بزند.

دفلوکولانت- جذب بر روی لبه های ذرات خاک رس منجر به بار منفی کلی

کنترل فیلتراسیون- دفلوکولانت، ویسکوزیته فیلتریت و ذرات کلوئیدی

تثبیت شیل- اتصال پلیمر به مکان های دارای بار مثبت در لبه ذرات رس در شیل ها. این اتصال نفوذ آب به ذرات رس را به حداقل می‌رساند و هیدراسیون و پراکندگی را کاهش می‌دهد.

لیو و همکاران در سال (۲۰۲۲) مطالعه‌ای انجام داده‌اند که در آن بیان شده در هنگام حفاری مخازن عمیق با درجه حرارت بالا و

غلظت نمک بالا، سیالات حفاری کارایی خود را از دست می‌دهند. علاوه بر آن دما و غلظت نمک بالا مقادیر بار منفی روی سطح

افزاینده بنتونیت موجود در سیال حفاری را کاهش داده و منجر به بهم پیوستگی صفحات بنتونیتی می‌گردد. با تجمع ذرات بنتونیت،

ساختار لایه‌ای آن که دارای سطح ویژه بالایی می‌باشد را غیر فعال کرده که این موضوع باعث کاهش خواص رئولوژیکی، خواص

فیلتراسیون و کاهش توانایی حمل کنده‌های حفاری خواهد شد. با افزودن پلیمر، گل حفاری را می‌توان به گونه ای طراحی کرد که

ویسکوزیته انتخابی با مقادیر متفاوت بنتونیت داشته باشد. در این مطالعه برای حل مشکلات بیان شده از نانولوله‌های کربنی

(CNT⁴) استفاده کرده‌اند به این نحو که ۰/۰۵ درصد وزنی CNT به سیال حفاری پایه آبی حاوی ۴% wt بنتونیت اضافه گردیده

و تحت شرایط غلظت ۱۰% wt نمک NaCl و دمای ۱۸۰ oC اثر آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارائه شده نشان داده

که عملکرد CNT به این نحو است که با جذب بر روی سطوح بنتونیت فضای بین صفحات بنتونیتی را افزایش داده و مانع

فضایی ایجاد می‌کند که این عملکرد از به هم پیوستگی صفحات و تجمع در محیط‌هایی با دمای بالا و نمک زیاد، جلوگیری به عمل

خواهد آورد. بنابراین توزیع اندازه صفحات کوچک بنتونیتی را حفظ کرده و از ساختار بنتونیتی در سیال حفاری پشتیبانی می‌کند.

فراوانترین سنگ‌های رسوبی شیل‌ها هستند، شیل‌ها به دلیل سرعت رسوب گذاری بالا دارای تخلخل و تراوایی پایینی می‌باشد

و جامدات سیال حفاری به راحتی نمی‌توانند به درون سازندهای شیلی نفوذ کنند. عدم نفوذ جامدات سیال حفاری به درون سازند

سبب عدم تشکیل کیک گل و یا تشکیل کیک ضعیف در دیواره سازندهای شیلی می‌شود. از سوی دیگر در حفاری فراتعدلی

به دلیل اختلاف فشار ایجاد شده ستون هیدروستاتیکی گل و سازند موجب نفوذ سیال حفاری به درون شیل گردیده و فشار منفذی

را به شدت افزایش داده که موجب پدیده ناپایداری در سازندهای شیلی می‌گردد [۱۹-۲۱، ۳۸ و ۴۰].

در فرآیند حفاری، شیل‌ها مسئول ۹۰ درصد مشکلات ناپایداری دیواره چاه هستند به طوری که مشکلات ناپایداری دیواره چاه در

لایه‌های شیلی به عنوان یکی از دلایل اصلی هزینه‌های بیش از حد عملیات حفاری شناخته شده است که به طور میانگین، مشکلات

ناپایداری حفره چاه در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد هزینه کل حفر یک چاه را شامل می‌شود، بررسی‌های آماری نشان دهنده این هست

که مشکلات مربوط به سازندهای شیلی باعث هزینه‌ای سالانه در حدود یک میلیارد دلار در صنعت نفت گاز می‌باشد [۲۲-۲۳].

استفاده از گل‌های پایه روغنی (OBM¹) یکی از روش‌های جلوگیری از نفوذ سیال به درون سازندهای شیلی می‌باشد. چرا

که سایز کوچک منافذ شیلی که در حدود بین ۳ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد فشار موئینگی^۲ بسیار زیادی ایجاد می‌کند که به سیال

امکان نفوذ به درون منافذ را نخواهد داد. از جمله معایب استفاده از گل‌های پایه روغنی می‌توان به مشکلات زیست محیطی، پایین

آوردن ایمنی عملیات حفاری و هزینه بالای ساخت آن را عنوان کرد. بنابراین محققین بر این کرده است تا خصوصیات سیال پایه

آبی (WBM³) در حفاری های متداول خشکی و دریایی را ارتقا داده تا بتوانند از مشکلات ناپایداری به وجود آمده به وسیله تماس

بین سیال پایه آبی و سازند شیلی جلوگیری کنند. یکی از خواص ارتقا داده شده در سیال پایه آبی استفاده از موادی است که بتواند

میزان تراویده سیال حفاری و تراوایی شیل را کاهش دهد و از نفوذ صافاب سیال حفاری به درون منافذ شیلی جلوگیری کند استفاده

از نانو ذرات برای کاهش مقادیر صافاب و تراوایی راه حلی مناسب است [۲۴]. مقالات متعدد نشان داد که موادی از جنس نانولوله‌های

کربنی (CNT) برای بهبود خواص رئولوژیکی سیالات حفاری و پایداری شیل اثر بخش است [۲۵]. وجه تمایز این مطالعه نسبت به

سایر تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته این است که گروه

1-Oil Base Mud

2- capillary pressure

3- Water Base Mud

4- Carbon Nanotube

۱۶/۶۷٪ کاهش خواهد یافت [۲۸].

۲- تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق، نانوتیوب‌های چند دیواره با خلوص بالای ۹۵٪ حاوی گروه عاملی هیدروکسیل (OH: 3.06 %wt) و گروه عاملی کربوکسیل (COOH: 2.00% wt) از شرکت US-Nano Re- search به ترتیب با کد محصول US4304 و US4308 انتخاب و خریداری شده است. مواد دیگر استفاده شده، سود سوزآور (NaOH=98%)، کاستیک سودا (Na₂CO₃=98%)، از شرکت مرک (آلمان) تهیه شده است. سایر مواد استفاده شده دارای گرید آزمایشگاهی و بدون خلص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- روش کار

اولین قدم ساخت گل پایه جهت اضافه کردن نانولوله‌ها به آن می‌باشد به همین منظور از فرمولاسیون گل سبک ۶۳ pcf ارائه شده در جدول شماره (۲) به عنوان گل پایه استفاده گردید است.

جدول ۲. فرمولاسیون گل سبک ۶۳ pcf

No.	Additive	Composition
1	FW	350 mL
2	Soda Ash (Na ₂ CO ₃)	0.5 gr
3	Cauſtic Soda (NaOH)	0.2 gr
4	Starch LV	4 gr
5	PAC LV	10 gr
6	Base clay	5 gr

در ابتدا ۷ ظرف ۳۵۰ cc مطابق با جدول شماره (۲) به عنوان گل پایه ساخته و سپس یکی را جهت مقایسه به عنوان پایه نگه داشته و به ۶ ظرف دیگر نانو لوله‌هایی با غلظت (وزنی- حجمی) 0.01%، 0.05% و 0.1% با دو عامل OH و COOH اضافه کرده تا تغییر خواص ایجاد شده در نتیجه اضافه کردن نانو لوله‌ها بررسی شود.

به منظور تهیه نمونه مایع حفاری پایه، ۰/۵ گرم سدیم کربنات به ۳۵۰ میلی لیتر آب شرب اضافه شد تا سختی و یون‌های کلسیم

در نتیجه توانایی حمل‌کننده‌های سیال حفاری را به میزان ۸۵/۱٪ افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کیک گل تشکیل شده از تجمع ذرات بنتونیتی با سایز کوچک، متراکم بوده که این عامل میزان فیلتراسیون سیال حفاری بنتونیتی را تا ۳۰/۲٪ کاهش خواهد داد [۳۶، ۳۷ و ۳۹].

رعنا و همکاران در سال (۲۰۲۰) به بررسی اثر نانوکامپوزیت SWCNTs/PVP که حاصل از قرارگیری نانولوله‌های تک دیواره کربن (SWCNTs¹) در ساختار پلیمر پلی وینیل پیرولیدون (PVP) است بر کنترل شیل و مقادیر صافاب سیال حفاری پایه آبی پرداخته‌اند. میانگین طول و قطر SWCNT های استفاده شده در این مطالعه به ترتیب ۲۰ μm و ۱۵-۲۰ nm گزارش شده است. در این مطالعه دو غلظت SWCNTs بکارگرفته شده عبارتند از ۱٪ و ۵٪ که به ترتیب ۱-SWCNTs/PVP و ۵-SWCNTs/PVP نام‌گذاری شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که SWCNTs/PVP می‌تواند منافذ شیلی را مسدود و مانع از نفوذ مولکول‌های آب به سطح شیل شود. از دیگر ویژگی‌های نانوکامپوزیت ساخته شده این عنوان شده است که با قرارگیری بر روی سطوح شیلی ویژگی آبدوستی (Hydrophilic) سطح شیل را به آبریزی (Hydrophobic) تغییر داده که این موضوع سبب پایداری هرچه بیشتر شیل خواهد شد. در میان غلظت‌های بکارگرفته شده، سیال حفاری پایه آبی حاوی مقادیر نانولوله ۵-SWCNTs/PVP بالاترین بازیابی شیل در حدود ۸۹/۵٪ را داشته است. علاوه بر این ۵-SWCNTs/PVP قادر است تورم شیل را به ترتیب ۷۵، ۶۵، ۴۸ و ۴۲٪ در مقایسه با آب، گل بدون بازدارنده، گل حاوی KCl و بازدارنده شیل تجاری کاهش دهد [۲۷].

در سال (۲۰۱۵) فاضل‌عبدالآبادی و همکاران مقاله‌ای ارائه کردند که در آن به بررسی اثر MWCNT دارای گروه عاملی آبدوست و فاقد گروه عاملی بر خواص WBM و OBM پرداخته‌اند. آنها بیان کردند که نتایج آنالیزهای هدایت حرارتی نشان داده که با اضافه کردن ۱٪ حجمی از MWCNT عاملدار شده به WBM در دمای محیط به میزان ۲۳/۳٪ و در دمایی بالاتر از ۵۰ °C به میزان ۳۱/۸٪ باعث ارتقا آن خواهد شد. و با اضافه کردن ۱٪ حجمی از MWCNT فاقد گروه عاملی به OBM به میزان ۴۰/۳٪ و دارای گروه عاملی به میزان ۴۳/۱٪ باعث بهبود هدایت حرارتی خواهد شد. در خصوص تاثیر MWCNT بر روی خواص رئولوژیکی عنوان شده که با اضافه شدن ۱٪ حجمی به OBM، مقادیر فیلتراسیون در دمای ۱۳۸ °C و فشار ۵۰۰ psi به میزان

1- Single Walled Carbon Nanotubes

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

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (3)$$

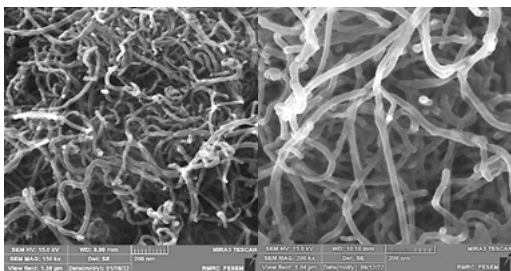
تست‌های اندازه‌گیری مقاومت ژله‌ای با سرعت برشی ۳ دور در دقیقه برای اندازه‌گیری تنش‌های برشی گل پس از ۱۰ ثانیه و ۱۰ دقیقه استراحت انجام شد. این فرآیند طبق روال استانداردهای API انجام می‌شود [۳۱].

تست اتلاف فیلتره^۳ در دمای ۷۷ درجه فارنهایت (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و ۱۰۰ psi با استفاده از یک دستگاه فیلترپرس فشار پایین و دمای پایین مدل Fann انجام شد. حجم فیلتراسیون گل در ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. برای تعیین اسیدیته گل در دمای محیط از pH متر مدل WTW 323 استفاده شد [۳۲-۳۳].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تست FESEM^۴

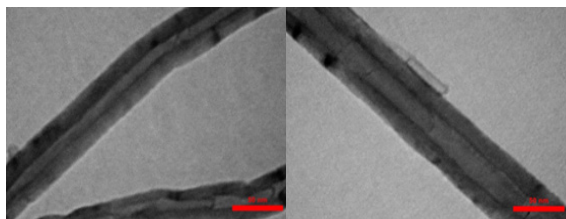
با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3-TESCAN-XMU اقدام به عکسبرداری از سطح پودر نانولوله‌ها گردیده و در شکل‌های شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱. نانولوله با گروه عاملی OH شکل ۲. نانولوله با گروه عاملی COOH

۳-۲- نتایج تست TEM^۵

در پژوهش‌های مربوط به خواص مواد نانو ساختار یکی از مهمترین و پرکاربردترین دستگاه‌هایی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد در این دستگاه تصاویر بزرگ نمایی شده از نمونه را با استفاده از پرتو الکترونی عبوری ایجاد می‌شود. جهت تفکیک هرچه بهتر نانولوله‌های کربنی ابتدا توسط دستگاه اولتراسونیک پودرها درون آب پخش شده تا جداسازی ذرات از یکدیگر صورت بگیرد و سپس اقدام به گرفتن عکس‌برداری شده است که در شکل‌های شماره (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر نانولوله حاوی گروه عاملی OH

شکل ۴. تصویر نانولوله حاوی گروه عاملی COOH

آب را کاهش دهد. پس از آن، ۰.۲ گرم سود اضافه شد تا pH گل را در محدوده مناسب تنظیم کند. در ادامه، نمونه‌ها توسط یک مولتی- میکسر (۵-spindle) در ۱۱۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. در پایان ۵ دقیقه، نانولوله‌ها اضافه و سیال به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط می‌شود تا کاملاً در گل پراکنده شوند [۲۹-۳۰]. سپس ۴ گرم نشاسته LV اضافه شد و به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شد تا ویسکوزیته افزایش یابد. علاوه بر این، برای تقویت فیلتراسیون و خصوصیات رئولوژیکی گل آماده شده در دماهای بالاتر، ۱۰ گرم PAC-LV به آرامی اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه دیگر مخلوط شد. در نهایت، ۵ گرم رس بنتونایت به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شد تا کیک گل مناسبی ایجاد و مقادیر فیلتراسیون کنترل شود. چگالی گل آماده شده به ۶۳ پوند در هر فوت مکعب رسیده است.

در تست‌های مرحله اول (شرایط^۱ BHR)، خواص گل پس از اضافه کردن نانولوله‌ها و قبل از عملیات حرارتی (Rolling) اندازه‌گیری شده است. در تست‌های مرحله دوم (شرایط^۲ AHR)، خواص گل پس از عملیات حرارتی آنها درون آون گردان (Rolling Oven) به مدت ۴ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت به گردش درآمده تا شرایط دمای ته چاهی در حین حفاری شبیه‌سازی شود سپس از دستگاه خارج و در حمام آب سرد قرار داده تا به دمای ۱۴۰ درجه فارنهایت برسند سپس اندازه‌گیری شد تا پارامترهای مورد نظر در این دما خوانده شوند چرا که پارامترهای اندازه‌گیری شده در دماهای مختلف مقادیر متفاوتی نشان می‌دهند (طبق دستور العمل مناطق نفت خیز جنوب). خصوصیات اصلی رئولوژیکی نمونه‌های گل، از جمله تنش برشی در مقابل نرخ برشی، ویسکوزیته ظاهری (AV)، ویسکوزیته پلاستیکی (PV)، نقطه واروی (YP) و مقاومت ژله‌ای (GS) با استفاده از یک رئومتر مدل Fann-۳۵ به دست آمده است. تنش‌های برشی (dyne/cm²) نمونه‌های گل با استفاده از ویسکومتر در نرخ‌های برشی ۳، ۶، ۱۰، ۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور در دقیقه (rpm) اندازه‌گیری شده است. با توجه به باب و روتور ویسکومتر که R1-B1 است، ثابت سرعت برشی ویسکومتر برابر با ۱,۷۰۲۳ (sec⁻¹/rpm) است. بنابراین نرخ‌های برشی با توجه به دوره‌های ذکر شده به ترتیب ۵,۱۱، ۱۰,۲۱، ۱۷,۰۲۳، ۳۴,۰۰۵، ۵۱,۰۰۷، ۱۰۲,۱۴، ۱۰۲,۱۴ به دست آمده و در جدول شماره (۴) گزارش شده است. سایر پارامترها نظیر PV، AV و YP با استفاده از معادلات (۱) تا (۳) محاسبه شده است.

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

- 3- Filtrate loss
- 4- Field Emission Scanning Electron Microscope
- 5- Transmission Electron Microscope

- 1- Before Hot Rolling
- 2- After Hot Rolling

۳-۳- نتایج تست EDX^۱

با انجام آنالیز عنصری بر روی مواد، می‌توان ترکیب شیمیایی و درصد وزنی هر عنصر در نمونه مورد نظر را تعیین کرد. آنالیز طیف سنجی پرتو ایکس پراکنده انرژی (EDX) نانولوله‌های حاوی گروه OH و COOH به ترتیب در جدول شماره (۳) و (۴) ذکر شده است.

جدول ۳. آنالیز EDX نانولوله حاوی عامل OH

Components	Weight%
C	99.8
Cl	0.2

جدول ۴. آنالیز EDX نانولوله حاوی عامل COOH

Components	Weight%
C	98.86
Fe	0.43
Ni	0.5
Cl	0.09
S	0.12

در شکل ۱ و ۲، تصاویر SEM از نانولوله‌های MWCNT-OH، نشان دهنده طول ۱۰-۳۰ میکرومتری و تصاویر TEM از نانوذرات در شکل ۲ و ۳ نشان دهنده قطر داخلی ۵-۱۰ نانومتر، که توسط سازنده نیز ارائه شده است. همچنین MWCNT-OH دارای ۳,۰۶ درصد وزنی -OH و MWCNT-COOH دارای ۲ درصد وزنی -COOH است.

پس از بررسی جدول شماره (۴) می‌توان فهمید که بعد از اضافه کردن نانولوله‌ها به گل پایه و حرارت دادن گل‌ها، باعث افزایش پایداری حرارتی^۲ سیال پایه شده است. چرا که در تمامی موارد غلظت‌های بکارگرفته شده از هر دو گروه عاملی استفاده شده مقادیر ویسکوزیته ظاهری (AV) پس از حرارت دیدن روند افزایشی داشته است (نمودار شماره ۱). مکانیزم اثر نانولوله‌ها به این نحو می‌تواند باشد که با خواص هدایت حرارتی بالایی که دارند از رسیدن سایر پلیمرهای موجود در گل به دمای آستانه تخریب حرارتی خود ممانعت به عمل آورده است و این موضوع موجب شده که علاوه بر حفظ ویسکوزیته سبب ارتقا آن نیز شود. از دلایل دیگر این افزایش ویسکوزیته ظاهری می‌توان به دلیل فعالیت شیمیایی گروه‌های عاملی قرار گرفته بر روی ساختار نانولوله‌ها

عنوان کرد. گروه‌های عاملی باعث پیوند مناسب پلیمرها از طریق نیروهای کلئیدی می‌شوند که باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری گل حفاری شده است. حفظ ویسکوزیته گل تحت شرایط دمایی بالا باعث می‌شود میزان صافاب سیال حفاری به درون سازند در حال حفاری کاهش یافته که این عمل در حفاری سازندهای شیلی باعث افزایش پایداری دیواره چاه خواهد شد.

همانطور که در جدول شماره ۵ مشاهده می‌شود مقاومت ژله‌ای گل پایه و گل‌های حاوی نانولوله پس از حرارت دیدن کاهش یافته است که این به دلیل تخریب ساختار پلیمرهای بکار رفته در نتیجه حرارت است. نتایج نشان می‌دهد که در میان گروه‌های عاملی بکار رفته با غلظت‌های مختلف، عامل COOH در غلظت ۰/۰۱٪ بهترین اثر بخشی را در افزایش مقاومت ژله‌ای گل‌های ساخته شده پس از حرارت دیدن نشان داده است. این افزایش در استحکام ژل به دلیل نیروی جاذبه بین نانولوله‌ها است که با ایجاد ارتباط بین نانولوله‌ها و سیال پایه در مدت زمان ۱۰ ثانیه و ۱۰ دقیقه، ساختار محکمی را تشکیل می‌دهد.

نقطه واروی در واقع مقاومت سیال در برابر جریان در مدل پلاستیکی بینگام است که ناشی از نیروهای الکتروشمیایی بین ذرات در شرایط جریان است. این نیروهای الکتروشمیایی نتیجه بارهای قرار گرفته بر روی سطح نانولوله‌ها و سایر افزایشنده‌ها است که در فاز سیال پراکنده می‌شوند.

در ارزیابی نقطه واروی داده‌ها بیانگر این است که قبل از حرارت دیدن نانولوله‌ها منجر به کاهش خواص شده‌اند که این به دلیل تجمع نانولوله‌ها در کنار یکدیگر می‌باشد که موجب شده اثر معکوس بر روی رئولوژی داشته باشد در حالی که پس از حرارت دیدن در اغلب غلظت‌ها افزایش خواص دیده شده است (به جز در غلظت ۰/۱٪ گروه OH که اندکی خواص را کاهش داده است) که این موضوع بیانگر باز شدن رشته‌های بهم پیوسته نانو و ایجاد پایداری حرارتی برای پلیمرهای موجود در گل می‌باشد.

در سیالات حفاری، ویسکوزیته پلاستیک یکی دیگر از اجزای مقاومت سیال در برابر جریان است. ویسکوزیته پلاستیکی مقاومت در برابر جریان ناشی از اصطکاک مکانیکی بین فاز جامد و مایع تفسیر می‌شود. پارامتر ویسکوزیته پلاستیکی (PV) نیز روند افزایش خواص داشته است جز در غلظت ۰/۰۵٪ گروه عاملی OH که پس از حرارت دیدن اندکی کاهش خواص دیده شده است. مواد نانو نسبت به سایر مواد با اندازه میکرو و ماکرو سطح ویژه بیشتری دارند. مساحت سطح نانوذرات می‌تواند به عنوان مکانی برای پیوند با گروه‌های عاملی سایر افزایشنده‌ها عمل کند و طیف گسترده‌ای از خواص را در سیال ایجاد کند. بنابراین، سیال پایه و

1- Energy Dispersive X-Ray spectroscopy

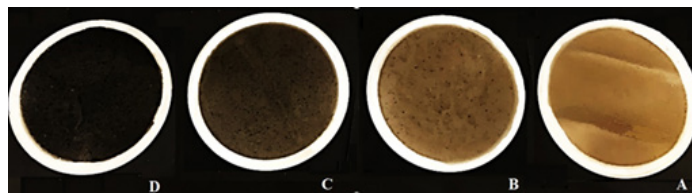
2- Thermal stability

جدول ۵. نتایج تست‌های رئولوژی

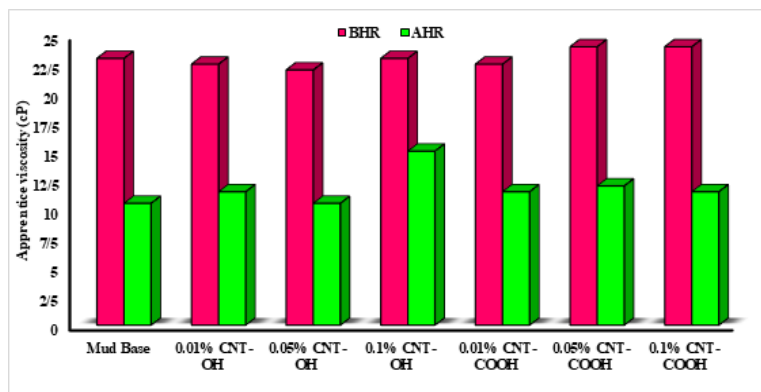
	unit	GE						L $\frac{10 \text{ sec}}{10 \text{ min}}$	AV	P V	YP	T	FL	pH
		0 3	0 6	0 100	0 200	0 300	0 600							
Mud Base (MB)	BHR	3	5	19	27	32	46	3/5	23	14	18	77	5	11.99
	AHR	1	1	8	12	14	21	1	10.5	7	7	140	5.9	10.71
MB + CNT-OH 0.01% W/W	BHR	3	5	18	24	30	45	3/5	22.5	15	15	77	5.3	11.65
	AHR	1	1	9	13	15	23	1/2	11.5	8	7	140	6.3	10.65
MB + CNT-OH 0.05% W/W	BHR	3	5	17	23	30	44	3/5	22	14	16	77	4.9	11.45
	AHR	1	1	7	11	15	21	1	10.5	6	9	140	6.8	10.68
MB + CNT-OH 0.1% W/W	BHR	3	5	18	25	31	46	3/5	23	15	16	77	5.4	11.5
	AHR	1	2	9	13	17	30	1/2	15	13	4	140	6.9	10.65
MB + CNT-COOH 0.01% W/W	BHR	3	5	19	25	31	45	3/5	22.5	14	17	77	5.2	11.54
	AHR	2	1	9	13	16	23	2	11.5	7	9	140	6	10.56
MB + CNT-COOH 0.05% W/W	BHR	3	5	17	24	31	48	3/5	24	17	14	77	4.2	11.76
	AHR	1	1	8	12	16	24	1	12	8	8	140	5.3	10.79
MB + CNT-COOH 0.1% W/W	BHR	4	5	18	25	31	48	4/5	24	17	14	77	5.6	11.65
	AHR	2	1	8	12	16	23	2	11.5	7	9	140	6.1	10.51

کیک‌های گل بعد از حرارت دیدن گل به مدت ۴ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه گل حاوی ۰/۵٪ وزنی نانولوله حاوی گروه عاملی COOH کاملاً همگن و نازک و بدون شکاف در مقایسه با سایر غلظت‌ها و نمونه پایه می‌باشد. نمودار شماره (۲) مقادیر تنش برشی بر حسب نرخ برشی سیال پایه

نانولوله‌ها ممکن است مستقیماً یا از طریق پیوندهای شیمیایی میانی خاصی با یکدیگر پیوند ایجاد کنند تا ویسکوزیته پلاستیکی سیال حفاری پایه آبی را بهتر کند. هنگامی که نانولوله‌ها در غلظت‌های بهینه استفاده می‌شود، ایجاد یک کیک گل همگن با کمترین نفوذپذیری موجب می‌شود که مقادیر فیلتراسیون گل حرارت دیده کاهش یابد. شکل (۵) تصویر

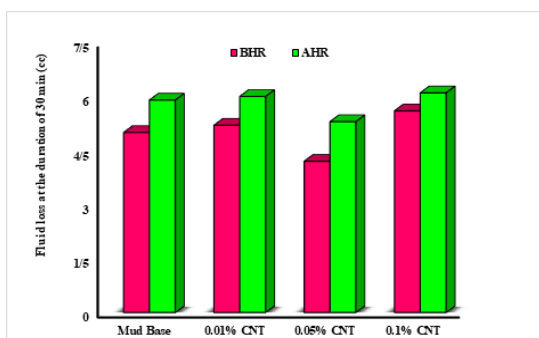


شکل ۵. کیک گل حاوی عامل COOH: از راست به چپ: (A) گل پایه (B) ۰/۰۱% (C) ۰/۰۵% (D) ۰/۱%



نمودار ۱. ویسکوزیته ظاهری گل‌های حاوی نانولوله قبل و بعد از حرارت دیدن

شرایط قبل و بعد از رول نسبت به سایر غلظت‌ها و گل پایه می‌باشد.

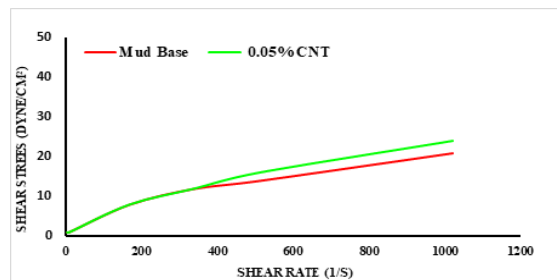


نمودار ۳. مقایسه مقادیر فیلتراسیون سیال پایه و حاوی نانولوله با عامل COOH

کاهش حجم فیلتراسیون برای CNT با غلظت ۰/۰۵ % گروه عاملی COOH نسبت به سایر گل‌های ساخته شده به این دلیل است که CNT پراکنده شده در نمونه‌های گل می‌تواند به عنوان سیمان بین ذرات عمل کرده و کیک گلی با نفوذپذیری کمتر ایجاد کرده که کاهش مقادیر فیلتراسیون را در بر داشته است. اتلاف فیلتره سیال حفاری باید در حین عملیات حفاری کمترین مقدار را داشته باشد تا از آسیب‌سازندی، تنگ‌شدگی چاه و یا از چسبیدن لوله‌ها به دیواره چاه جلوگیری شود.

باید این موضوع را در نظر گرفت که برای واقعی بودن گل ساخته شده با شرایط عملیات حفاری از آب شرب (دارای سختی) استفاده شده و هیچ گونه مواد فعال‌کننده سطحی (سرفکتانت) یا دستگاه اولتراسونیک برای پراکندگی نانولوله‌ها استفاده نشده است.

و غلظت بهینه ۰/۰۵% نانولوله با عامل COOH پس از حرارت دادن گل در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت به مدت ۴ ساعت می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود نانوله در نرخ‌های برشی پایین اثری بر مقادیر تنش برشی نداشته است و رفتاری مشابه با گل پایه از خود نشان داده است با افزایش سرعت برشی مقادیر تنش وارد به سیال بیشتر شده که این میزان جذب تنش در سیال حاوی نانولوله به واسطه وجود رشته‌هایی در مقیاس نانو با سطح ویژه‌ای بالا به مراتب بیشتر از سیال پایه بوده منجر به افزایش خواص رئولوژی شده است. این فرضیه وجود دارد که در سرعت‌های برشی بالا (θ_{600}) میزان پراکندگی نانولوله‌ها افزایش یافته که این موضوع منجر به نمایان شدن افزایش خواص شده است.



نمودار ۲. خواص رئولوژی پس از رولینگ برای سیال پایه و حاوی

نانولوله با عامل COOH در غلظت ۰/۰۵ %

نمودار شماره (۳) مقادیر صافاب گل پایه در مقایسه با غلظت‌های مختلف نانولوله گروه COOH قبل و بعد از عملیات حرارتی نمونه‌های گل ساخته شده را نشان می‌دهد که بیانگر عملکرد مناسب غلظت ۰/۰۵% در کاهش مقادیر فیلتراسیون در هر دو

۵- مراجع

- [1] J. O. Oseh, M. N. A. Mohd Norddin, I. Ismail, A. O. Gbadamosi, A. Agi, and H. N. Mohammed, "A novel approach to enhance rheological and filtration properties of water-based mud using polypropylene-silica nanocomposite," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 181, p. 106264, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2019.106264.
- [2] K. Karakošta, A. C. Mitropoulos, and G. Z. Kyzas, "A review in nanopolymers for drilling fluids applications," *J. Mol. Struct.*, vol. 1227, p. 129702, 2021, doi: 10.1016/j.molstruc.2020.129702.
- [3] B. Dhinesh and M. Annamalai, "A study on performance, combustion and emission behaviour of diesel engine powered by novel nano nerium oleander biofuel," *J. Clean. Prod.*, vol. 196, pp. 74–83, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.002.
- [4] K. Nanthagopal, B. Ashok, R. S. Garnepudi, K. R. Tarun, and B. Dhinesh, "Investigation on diethyl ether as an additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine application," *Energy Convers. Manag.*, vol. 179, no. x, pp. 104–113, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.064.
- [5] M. Annamalai et al., "An assessment on performance, combustion and emission behavior of a diesel engine powered by ceria nanoparticle blended emulsified biofuel," *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 372–380, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.06.062.
- [6] M. Bizhani, F. E. Rodriguez Corredor, and E. Kuru, "Quantitative evaluation of critical conditions required for effective hole cleaning in coiled-tubing drilling of horizontal wells," *SPE Drill. Complet.*, vol. 31, no. 03, pp. 188–199, 2016.
- [7] S. Harati, A. Esfandiyari Bayat, and M. T. Sarvestani, "Assessing the effects of different gas types on stability of SiO₂ nanoparticle foam for enhanced oil recovery purpose," *J. Mol. Liq.*, vol. 313, p. 113521, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.113521.
- [8] R. Singh, S. Tong, K. Panthi, and K. K. Mohanty, "Nanoparticle-encapsulated acids for stimulation of calcite-rich shales," *SPE/AAPG/SEG Unconv. Resour. Technol. Conf. 2018, URTC 2018, 2018*, doi: 10.15530/urtec-2018-2897114.
- [9] A. K. Patidar, S. Ghosh, N. K. Thakur, A. Sharma, and A. Baliyan, "A review and comparative analysis of effectively functionalized eco-friendly and biodegradable nanoparticle based additives for drilling muds," *Mater. Today Proc.*, vol. 2021, no.

بکارگیری ۲ فاکتور مهم اولتراسونیک و سرفکتانت که اساس ساخت گل‌های حاوی نانو می‌باشد نتایج به طور چشمگیری ارتقا خواهند یافت.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی افزایش خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه آبی با استفاده از فناوری نانو می‌پردازد. در این تحقیق نانولوله‌های کربنی با دو گروه عاملی قطبی OH و COOH با خلوص بالا و سطح مناسب در سیال حفاری سبک با وزن ۶۳ pcf بکار گرفته شده است.

نتایج نشان داد که استفاده از نانولوله‌ها در گل‌های تهیه شده سبب افزایش پایداری حرارتی شده است. از میان دو گروه عاملی بکارگرفته شده گروه COOH بیشترین اثر بخشی را در غلظت ۰/۰۵٪ داشته است که تمامی خواص رئولوژیکی را افزایش و مقادیر صافاب نیز کاهش داده است.

کاهش مقادیر صافاب در هنگام عملیات حفاری لایه‌های سطحی شیل که دانسیته ای در حدود دانسیته آب نیاز است (حدوداً ۶۳ pcf) باعث می‌شود که از افزایش فشار منقذی شیل جلوگیری به عمل آورده که این موضوع از ایجاد ناپایداری در این نوع سازندها جلوگیری به عمل خواهد آورد.

در آخر می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب نانولوله حاوی گروه عاملی که سازگار با سایر افزایشنده‌های موجود در فرمولاسیون گل ساخته شده باشند عاملی بسیار موثر و تاثیرگذار بر نسبت ویسکوزیته و پارامترهای رئولوژیکی در شرایط AHR و BHR بوده و کمک شایانتری در درک اختلاف خواص خواهد کرد.

- xxxx, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.176.
- [10] V. Zarei and A. Nasiri, "Stabilizing Asmari Formation interlayer shales using water-based mud containing biogenic silica oxide nanoparticles synthesized," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 91, no. February, p. 103928, 2021, doi: 10.1016/j.jngse.2021.103928.
- [11] R. Rafati, S. R. Smith, A. Sharifi Haddad, R. Novara, and H. Hamidi, "Effect of nanoparticles on the modifications of drilling fluids properties: A review of recent advances," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 161, pp. 61–76, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2017.11.067.
- [12] J. O. Oseh et al., "Enhanced cuttings transport efficiency of water-based muds using (3-Aminopropyl) triethoxysilane on polypropylene-nanosilica composite," *Arab. J. Chem.*, vol. 13, no. 8, pp. 6904–6920, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.arabjc.2020.07.004.
- [13] M. Mirzaasadi, V. Zarei, M. Elveny, S. M. Alizadeh, V. Alizadeh, and A. Khan, "Improving the rheological properties and thermal stability of water-based drilling fluid using biogenic silica nanoparticles," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6162–6171, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.130.
- [14] H. Mao, Z. Qiu, Z. Shen, and W. Huang, "Hydrophobic associated polymer based silica nanoparticles composite with core-shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at ultra-high temperature," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 129, pp. 1–14, May 2015, doi: 10.1016/j.petrol.2015.03.003.
- [15] R. Jain, V. Mahto, and V. P. Sharma, "Evaluation of polyacrylamide-grafted-polyethylene glycol/silica nanocomposite as potential additive in water based drilling mud for reactive shale formation," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 26, pp. 526–537, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.jngse.2015.06.051.
- [16] J. Xu, Z. Qiu, X. Zhao, H. Zhong, G. Li, and W. Huang, "Synthesis and characterization of shale stabilizer based on polyethylene glycol grafted nanosilica composite in water-based drilling fluids," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 163, pp. 371–377, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2018.01.007.
- [17] N. Shojaei and M. H. Ghazanfari, "Reduction of formation damage in horizontal wellbores by application of nano-enhanced drilling fluids: Experimental and modeling study," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 210, no. December 2021, p. 110075, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.110075.
- [18] A. K. Abbas, M. T. Alsaba, and M. F. Al Dushaishi, "Improving hole cleaning in horizontal wells by using nanocomposite water-based mud," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 203, no. September 2020, p. 108619, 2021, doi: 10.1016/j.petrol.2021.108619.
- [19] K. P. Hoelscher, G. De Stefano, M. Riley, and S. Young, "Application of nanotechnology in drilling fluids," in *SPE international oilfield nanotechnology conference and exhibition*, 2012, no. June, pp. 297–303. doi: 10.2118/157031-ms.
- [20] J. Zhang, J. C. Rojas, and D. E. Clark, "Stressed-Shale Drilling Strategy--Water-Activity Design Improves Drilling Performance," *SPE Drill. Complet.*, vol. 23, no. 04, pp. 385–393, 2008, doi: 10.2118/102498-PA.
- [21] Y. Zhang, Z. Qiu, G. Li, H. Zhong, and X. Zhao, "Analysis of interactions between water and shale by water activity," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 80, no. October 2019, p. 103372, 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103372.
- [22] M. Amanullah, M. K. Al-Arfaj, and Z. Al-Abdulatif, "Preliminary test results of nano-based drilling fluids for oil and gas field application," 2011.
- [23] J. K. Mitchell, K. Soga, and S. Indah, *Fundamentals of soil behavior*, vol. 3, no. 4. John Wiley & Sons New York, 2005.
- [24] V. Zarei, A. Emamzadeh, and A. Nasiri, "Synthesis of Amorphous Silica Nanoparticles from Natural Materials Applied in Drilling Fluid for Stabilizing Shale Layers," *J. Pet. Res.*, vol. 27, no. 96–6, pp. 18–31, 2018, doi: 10.22078/pr.2017.2683.2232.
- [25] K. Tookaloo, J. Heidarian, M. Soleymani, A. Rashidi, and M. Nazarisaram, "Analyzing Effects of Multi-Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) & Polyethylene Glycol (PEG) on Performance of Water Base Mud (WBM) in Shale Formation," *Open Pet. Eng. J.*, vol. 11, no. 1, 2018.
- [26] J.-P. Liu et al., "Carbon nanotube enhanced water-based drilling fluid for high temperature and high salinity deep resource development," *Pet. Sci.*, vol. 19, no. 2, pp. 916–926, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.petsci.2021.09.045.
- [27] A. Rana, I. Khan, S. Ali, T. A. Saleh, and S. A. Khan, "Controlling Shale Swelling and Fluid Loss Properties of Water-Based Drilling Mud via Ultrasonic Impregnated SWCNTs/PVP Nanocomposites," *Energy & Fuels*, vol. 34, no. 8, pp. 9515–9523, Aug. 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c01718.
- [28] B. Fazelabdolabadi, A. A. Khodadadi, and M. Sedaghatzadeh, "Thermal and rheological properties improvement of drilling fluids using functionalized carbon nanotubes," *Appl. Nanosci.*, vol. 5, no. 6, pp. 651–659, 2015.
- [29] A. L. Barroso et al., "New generation nano technology drilling fluids application associated to geomechanic best practices: Field trial record in Bahia-Brazil," in *Offshore technology conference*,

- 2018, pp. 1–12. [Online]. Available: <https://onepetro.org/OTCONF/proceedings/18OTC/4-18OTC/D041S056R002/179696>
- [30] A. Addagalla, I. Maley, L. Moroni, and M. Khafagy, "Nano-Technology Based Bridging System Helps Drilling Success in Highly Depleted Mature Fields," Nov. 2018. doi: 10.2118/193153-MS.
- [31] API RP 13B-1, "Recommended practice for field testing water-based drilling fluids," in API Recommendation 13B-1, ISO 10414: 2001, vol. 2008, no. March, 2009, p. 121.
- [32] E. Pakdaman, S. Osfouri, R. Azin, K. Niknam, and A. Roohi, "Improving the rheology, lubricity, and differential sticking properties of water-based drilling muds at high temperatures using hydrophilic Gilsonite nanoparticles," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 582, no. July, p. 123930, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123930.
- [33] R. Novara, R. Rafati, and A. Sharifi Haddad, "Rheological and filtration property evaluations of the nano-based muds for drilling applications in low temperature environments," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 622, no. January, p. 126632, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.126632.
- [39] Goshtasp Cheraghian, "Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art," *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 13, July–August 2021, Pages 737-753
- [40] Tianle Liu, Leusheva E. L., Morenov V. A., Lixia Li, Guosheng Jiang, Changliang Fang, Ling Zhang, Shaojun Zheng and Yinfei Yu, "Influence of Polymer Reagents in the Drilling Fluids on the Efficiency of Deviated and Horizontal Wells Drilling," *Energies* 2020, 13, 4704; doi:10.3390/en13184704
- [41] Hasan A. Abbood, Ibtehal K. Shakir, "Improved Water-Based Mud Rheological Properties and Shale Inhibition Behavior by Using Aluminum Oxide and Iron Oxide Nanoparticles," *Engineering and Technology Journal* 40 (09) (2022)1171- 1178
- [42] Mohammad Jamal Awl, Barham Sabir Mahmood, Pshtiwan Tahsin Mohammed, Hardi Fakhradin Mohammed, Ali Mhedin Hamad, Ahmad Hussien Abdulqadir, Mardin Omer Abdalqadi, "Performance Evaluation of the New Environmentally Friendly Additive for Enhanced Fluid Loss and Rheological Properties of Drilling Fluid," *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2023, 57(1): 189- 202.
- [43] Nachiket Bhupat Parate, "A REVIEW ARTICLE ON DRILLING FLUIDS , TYPES , PROPERTIES AND CRITERION FOR SELECTION," *JETIR* September 2021, Volume 8, Issue 9.
- [44] Ahmed Salih Mohammed, "Characterization and Modling of Polymer -Treated and Nano Particle Modified Sulfate Contaminated Soils, Drilling Muds, and Hydraulic Fracturing Fluids under Groundwater," A Dissertation Presented to the Faculty of the Department of Civil and Environmental Engineering University of Houston, 2014.
- [45] MOHD RAZMI ZIQRI BIN AHMAD SHUKRI, "Drilling Fluid Study: Evaluating the Quantitative Determination Method of Partially-Hydrolyzed Polyacrylamide (PHPA) Polymer in Drilling Fluid," A Dissertation Presented to the Faculty of the Department of Petroleum Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, 2012.
- [46] Jitendra K. Pandey, Hitoshi Takagi, Antonio Norio Nakagaito, Hyun-Joong Kim, "Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application," Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.
- [47] BAROID, "Basic Drilling Fluids, HDD Applications," Cebo Holland B.V., 2017.
- [48] Mansoor Ali Khan¹ , Hikmat Said Al-Salim^{1,*} , Leila Niloofar Arsanjani, "Development of High Temperature High Pressure (HTHP) Water Based Drilling Mud using Synthetic Polymers, and Nanoparticles," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 45, Issue 1 (2018) 99-108.
- [49] NITIN SANKAR, MAMILLA NAGARJUN REDDY and R KRISHNA PRASAD, "Carbon nanotubes dispersed polymer nanocomposites: mechanical, electrical, thermal properties and surface morphology," *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 39, No. 1, February 2016, pp. 47–55.
- [50] Dr. Vikas Mittal, "Polymers in Oil and Gas Industry," ISBN (e-book): 978-0-6482205-0-3, 2018.
- [51] V.C. Kelessidis, V. Chatzistamou, E. Repouskou, M. Zografou, M. Karimi, "Use of PHPA Polymer for Modification of Rheological and Filtration Properties of Water based Drilling Fluids used for Conventional and Casing Drilling," *AGH DRILLING OIL GAS*, Vol. 29, No. 1, 2012.
- [52] Hu, Z, Haruna, M, Gao, H et al., "Rheological Properties of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide Seeded by Nanoparticles," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56 (12). pp. 3456-3463. ISSN 0888-5885, 2017.
- [53] Carlos Lam, Peter J. Martin, and Stephan A. Jefferis, "Rheological Properties of PHPA Polymer Support Fluids," *Journal of Materials in Civil Engi-*

neering, © ASCE, ISSN 0899-1561/04015021(9), 2015.

[54] MUKARRAM BEG, "Design of Water Based Drilling Fluids for Fluid Loss Reduction and Shale Stabilization," RAJIV GANDHI INSTITUTE OF PETROLEUM TECHNOLOGY JAIS, INDIA – 229304, 2021.