

Investigating the effect of carbon nanotubes and shale on the rheological properties of water-based drilling fluid

Ahmad Mousaei¹, Morteza Ehsani^{2,*}

1- Department of Polymer Engineering, Technical and Engineering Faculty, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

Abstract

Currently, one of the significant challenges in High-Pressure High-Temperature (HPHT) well drilling operations is the reduction in the rheological properties of water-based drilling fluids. This issue relates to the degradation of the structure of viscosifying polymer additives due to temperature increase, leading to decreased viscosity, deterioration of drilling fluid properties, and increased filtration volume, ultimately resulting in serious drilling operation disturbances. In this study, the simultaneous effect of powdered shale and Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes (FMWCNTs) with OH and COOH functional groups on the rheological properties of water-based drilling fluid suitable for drilling surface layers with a weight of 63 pcf has been investigated. The construction of a base fluid and six fluids containing nanotubes (three samples with OH and three samples with COOH) at different concentrations was carried out under laboratory conditions and simulated downhole conditions, and the rheological properties and filtration amounts were measured.

The results showed the best effectiveness for a concentration of 0.05% of the COOH functional group, leading to a significant improvement in rheological properties and a reduction in filtration amounts. Additionally, by adding 20 gr of powdered shale to the fluid and using the optimal concentration of 0.05% COOH-functionalized nanotubes under AHR conditions, a remarkable improvement in apparent viscosity by 37.5% and filtration control by 67.8% was achieved. This study demonstrates that the use of nanotubes and powdered shale can significantly improve drilling fluid properties and provide better filtration control. Nanotubes with a concentration of 0.05% COOH-functionalized nanotubes, by dispersing in the water-based drilling fluid, increase viscosity and enhance the drilling fluid's ability to retain drilling cuttings. The addition of shale powders has significantly enhanced these properties and provides considerable filtration control.

Keywords

carbon nanotube, shale, hydroxyl group, carboxyl group, rheological properties, thermal stability

Article history:

Received: 06-11-2024

Accepted: 07-06-2025

Corresponding author:

*m.ehsani@ippi.ac.ir

بررسی کاربرد نانولوله‌های کربنی و شیل بر خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری

احمد موسایی^۱، مرتضی احسانی^{۲*}

۱- گروه مهندسی پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- ساختمان فرآورش پلیمر، پژوهشگاه پتروشیمی و پلیمر ایران، تهران، ایران

کجکده

در حال حاضر، یکی از چالش‌های مهم در عملیات حفاری چاه‌های عمیق با فشار و دمای بالا (HPHT)، کاهش خواص رئولوژیکی سیالات پایه آبی می‌باشد. این مسئله به تخریب ساختار افزودنی‌های پلیمری ویسکوزیفایر ناشی از افزایش دما برمی‌گردد، که به کاهش ویسکوزیته، افت خصوصیات سیال حفاری، و افزایش مقادیر فیلتراسیون منجر شده که در نهایت منجر به اختلالات جدی در عملیات حفاری می‌شود. در این تحقیق، به بررسی تأثیر همزمان کنده‌های شیل پودر شده سر دکل به همراه نانولوله‌های کربنی FMWCNT با گروه‌های عاملی OH و COOH بر خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه آبی مناسب حفاری لایه‌های سطحی با وزن ۶۳ pcf پرداخته شده است. ساخت یک سیال پایه و شش سیال حاوی نانو لوله (سه نمونه با OH و سه نمونه با COOH) با غلظت‌های مختلف در شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده ته چاه، و اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی و مقادیر فیلتراسیون صورت گرفته است.

نتایج بهترین اثر بخشی را برای غلظت ۰/۰۵٪ از گروه عاملی COOH نشان داده است که منجر به بهبود قابل توجهی در خواص رئولوژیکی و کاهش مقادیر فیلتراسیون می‌شود. همچنین، با افزودن ۲۰ گرم شیل پودر شده به سیال و استفاده از غلظت بهینه ۰/۰۵٪ نانولوله با گروه عاملی COOH در شرایط AHR، بهبود چشمگیری در ویسکوزیته ظاهری به میزان ۳۷/۵٪ و کنترل فیلتراسیون به میزان ۶۷/۸٪ به دست آمده است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از نانولوله‌ها و شیل پودر شده می‌تواند بهبود قابل توجهی در خواص سیال حفاری و کنترل بهتری بر فیلتراسیون ایجاد کند. نانوتیوب‌ها با تنیده شدن در سیال حفاری، ویسکوزیته را افزایش داده و توانایی سیال حفاری در نگهداری کنده‌های حفاری را بهبود بخشیده است. اضافه کردن پودر حاصل از کنده‌های شیلی باعث ارتقاء چشمگیر این خواص شده است و کنترل فیلتراسیون قابل توجهی ایجاد می‌شود.

نانولوله کربنی، شیل، گروه هیدروکسیل، گروه کربوکسیل، خواص رئولوژیکی، پایداری حرارتی

واژگان کلیدی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۸/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۱۷

۱- مقدمه

برای به دست آوردن منابع بیشتری از گاز و نفت، نیاز به حفر چاه‌هایی با عمق بیشتر احساس می‌شود. به دلیل گرایان حرارتی با افزایش عمق حفاری، دما نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع باعث می‌شود شرایط حفاری دشوارتر شود. به همین دلیل، محققان در تلاش هستند تا افزایش‌دهنده‌هایی را بکار گیرند که توانایی تحمل حرارت بالا را داشته باشند و بتوانند به‌طور موثری در فرایند خنک‌سازی مته با استفاده از سیال حفاری عمل کنند [۱-۳].

یکی از افزایش‌دهنده‌هایی که می‌تواند در این زمینه موثر باشد، استفاده از نانومواد است. نانومواد به دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند افزایش سطح ویژه و انتقال حرارت بهتر، به عنوان افزایش‌دهنده‌های موثر در سیالات حفاری شناخته شده‌اند. این نانومواد می‌توانند در فرایند خنک‌سازی سیال حفاری و مته به‌طور موثری عمل کرده و کارایی عملیات حفاری را افزایش دهند. به علاوه، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های خنک‌کننده با انرژی کم، می‌تواند به بهبود شرایط حفاری در عمق‌های بیشتر کمک کند. این اقدامات نه تنها به بهره‌وری منابع طبیعی کمک می‌کنند، بلکه هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای عملیات حفاری را هم کاهش می‌دهند. به طور کلی، بکارگیری فناوری نانو در صنعت نفت و گاز منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌های مختلف شده است. می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

• بازیابی نفت:

استفاده از نانومواد در فرآیندهای بازیابی نفت مانند تزریق آب، تزریق گاز، و تزریق پلیمرها به منظور افزایش بهره‌وری بازیابی نفت مورد توجه قرار گرفته است. به طور مثال، نانومواد می‌توانند به عنوان افزودنی‌هایی برای بهبود ویسکوزیته و پایداری فیزیکی مواد تزریقی استفاده شوند [۴-۷].

• فرمولاسیون گل حفاری:

نانومواد می‌توانند به عنوان افزودنی‌هایی در فرمولاسیون گل حفاری مورد استفاده قرار گیرند تا خواص رئولوژیکی گل حفاری را بهبود دهند. این افزودنی‌ها می‌توانند به عنوان عامل‌های پایداری، و یا بهبود دهنده خواص رئولوژیکی گل حفاری عمل کنند [۸-۱۱].

• فیلتراسیون گل حفاری:

استفاده از نانومواد در سیستم‌های فیلتراسیون گل حفاری می‌تواند کمک کننده در بهبود عملکرد این سیستم‌ها باشد. افزودنی‌های نانومواد می‌توانند به عنوان عواملی برای افزایش ویسکوزیته ظاهری یا پلاستیکی، کارایی فیلتراسیون گل حفاری ارتقا دهند.

• خنک‌سازی مته:

با توجه به افزایش عمق حفاری و در نتیجه افزایش دما، نیاز

به فناوری‌های بهبود خنک‌سازی سیال حفاری و مته احساس می‌شود. استفاده از نانومواد در سیستم‌های سیال حفاری می‌تواند باعث بهبود کارایی و کاهش مشکلات ناشی از افزایش دما شود. به طور مثال، نانومواد می‌توانند به عنوان عوامل تبادل حرارتی فعال عمل کنند و باعث افزایش بازده خنک‌سازی شوند

• کاهش آسیب سازندی:

استفاده از نانومواد می‌تواند در کاهش آسیب‌های سازندی ناشی از عملیات حفاری مؤثر باشد. به عنوان مثال، استفاده از نانومواد در سیالات حفاری می‌تواند باعث کاهش فشار منفذی سازندها و در نتیجه حفظ پایداری سازندی شود. این موارد نشان می‌دهد که بکارگیری فناوری نانو در صنعت نفت و گاز به عنوان یک رویکرد نوین، می‌تواند به بهبود عملکرد و بهره‌وری این صنعت‌ها کمک کند و همچنین در کاهش آسیب‌های محیط زیستی ناشی از عملیات حفاری نیز تأثیرگذار باشد [۱۲-۱۷].

شیل‌ها در گروه سنگ‌های رسوبی و دانه ریز تخریبی طبقه بندی می‌شوند که از سیلت و ذراتی در ابعاد رس (کمتر از ۴ میکرومتر) تشکیل شده‌اند. واژه شیل اغلب به تمام سنگ‌های تخریبی دانه ریز اطلاق می‌شود، اما بسیاری از زمین شناسان این واژه را به معنی محدودتری به کار می‌برند. در این حالت شیل در امتداد سطوح معینی خاصیت تورق دارد. اگر خاصیت تورق نداشته باشد و به صورت تکه یا قطعه خرد شود به آن گلسنگ می‌گویند.

شیل‌ها یکی از مهم‌ترین نوع سنگ‌های رسوبی هستند که بیشترین فراوانی را در سازندهای زمینی دارند. این سنگ‌ها از گل‌های رسوبی متراکم شده‌اند که اکثراً از ذرات خیلی ریز شناخته می‌شوند. اندازه بسیار کوچک این ذرات، تحت تاثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی زمین‌شناسی، به سرعت متمایل به فرسایش می‌شوند (جدول ۱). در اثر فشردگی و فشارهای زیاد در زمین، ذرات شیل‌ها به هم چسبیده و متراکم شده‌اند که باعث ایجاد ساختاری فشرده و متماسک در این سنگ می‌شود. به علت این ساختار فشرده، عبور مایعات محتوی سیمان از خلال آنها به سختی انجام می‌شود، به همین دلیل شیل‌ها عموماً سیمان محکمی نداشته و به آسانی خرد می‌شوند. از لحاظ ترکیب شیمیایی، شیل‌ها اغلب دارای ترکیباتی مانند سیلیکات، آلومینا، اکسید آهن و سایر عناصر هستند. این ترکیبات به دلیل پایداری شیمیایی و ویژگی‌های ساختاری، شیل‌ها را به عنوان یکی از مهم‌ترین مخازن مواد معدنی و سنگ‌های رسوبی، تبدیل به منبعی ارزشمند در صنایع نفت و گاز، کشاورزی و محیط زیست می‌کند. در کل، شیل‌ها به دلیل ساختار فیزیکی و شیمیایی خاص خود، علاوه بر اینکه نقش مهمی در تشکیل ساختار زمینی دارند، در بسیاری از صنایع و فرآیندهای صنعتی

نقش اساسی دارند.

معمولاً بیش از ۵۰ درصد کانی‌های یک سنگ شیلی از نوع کانی‌های رسی (Clay) است به علت ریزی ذرات رس مطالعه آنها مشکل است و در نتیجه این کانی‌ها به درستی شناخته نشده‌اند. رس‌ها به علت سطح ویژه بالا و باردار بودن بسیار فعال‌اند. این کانی‌ها به دلیل شرایط ساختمانی خاص و وجود بارهای الکتریکی منفی روی سطوح لایه‌ها ویژگی‌هایی متفاوت مثل قابلیت پراکندگی در محیط‌های آبی، کاتیون‌های قابل تعویض را دارند. رس‌های متداول در شیل‌ها شامل ایلایت، کلرایت، اسمکتیت، کائولینیت و مونتموریلونایت هستند. بنتونایت یکی از افزودنی‌های تجاری ویسکوزیفایر در صنعت نفت و گاز است که در صنعت با نام «Base Clay» نیز شناخته می‌شود که حاوی رس مونتموریلونایت می‌باشد. بنتونایت به دلیل خواص خاص خود، از جمله توانایی افزایش ویسکوزیته، پایداری کلوئیدی، و کاهش تراوایی و نفوذپذیری، به عنوان یکی از افزودنی‌های مهم در سیال حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار کلی اکثر کانی‌های رسی بلورین از لایه‌های اکسید سیلیسیوم (SiO_2) و اکسید آلومینیم (Al_2O_3) تشکیل شده است بارهای منفی روی سطوح ورقه‌های رس تا حدودی با جذب یون‌های مثبت (کاتیون‌ها) بین ورقه‌ها خنثی می‌شوند. وقتی که بار منفی در لایه آلومینیومی به وجود می‌آید، لایه‌های سیلیسی به صورت موانع فیزیکی مانع از خنثی شدن کامل بار مثبت کاتیون‌ها و بار منفی روی سطوح لایه‌های رس می‌شوند. به وجود آمدن این سیستم متعادل بین یون‌های مثبت و سطوح ورقه‌های رس نیروهای بسیار قوی جاذبه برای مولکول‌های قطبی آب به وجود می‌آورد که به سادگی بین لایه‌ها نفوذ می‌کنند. نفوذ آب باعث انبساط لایه‌ها می‌شود تا جایی که نیروهای نگه دارنده نمی‌توانند لایه رس را نگه دارند. قابلیت پراکندگی در آب ویژگی منحصر به فرد رس‌ها می‌باشد. کانی‌های مختلف رسی به صورت ورقه‌های بسیار نازک و تا قطر ۱۰ انگسترم دیده می‌شوند. این شکل کانی‌ها باعث می‌شود که سطح ویژه کانی‌های رسی بسیار زیاد باشد که باعث تاثیراتی مهم بر خصوصیات فیزیکی این کانی‌ها می‌شود. شیل‌ها به واسطه وجود مقادیر بالای رس‌هایی که حاوی سیلیکا در ساختار خود هستند می‌تواند رفتاری مشابه به میکروسیلیس داشته باشند. از آنجا که در تحقیقات گذشته به مراتب عنوان شده که موادی از جنس سیلیکا در ابعاد میکرو تا نانو توانسته‌اند خصوصیات سیال حفاری پایه آبی را ارتقا دهند فرض اینکه شیل نیز بتواند خصوصیتی مشابه ایجاد کند به دور از محال نیست. با این تفاوت که خرده‌های شیل ایجاد شده از حفاری سازندهای شیلی در مناطق عملیات

حفاری به عنوان مواد پسماند مشکلات بسیاری ایجاد کرده است [۲۳-۱۹]. مقالات متعدد نشان داد که موادی از جنس نانولوله‌های کربنی (CNT) علاوه بر بهبود خواص رئولوژیکی سیالات حفاری و می‌تواند از بهم چسبیدن صفحات رسی جلوگیری کرده و مشکلات به وجود آمده از حاصل از چسبندگی شیل را برطرف کند [۲۴، ۲۵]. وجه تمایز این مطالعه نسبت به سایر تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته این است که گروه‌های عاملی قطبی متفاوت از جنس نانولوله به همراه شیل بر روی سیالاتی با وزن سبک که مناسب حفاری لایه‌های سطحی می‌باشند مورد ارزیابی قرار داده است.

۲- مروری بر ادبیات

ما و همکاران در سال (۲۰۲۰) عنوان کردند با توجه به شرایط دمایی و فشاری بالای ته چاهی، پراکندگی نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) در غلظت‌های بالای نمک ضعیف بوده که این سبب شده است کاربرد آنها را در صنعت نفت و گاز به شدت محدود گردد. لذا برای رفع این مشکل MWCNTs (قطر ۲۰-۳۰ nm، طول ۱۰-۳۰ μm) را با یک پلیمر آنیونی (SPMA)^۱ عامل‌دار کرده و به بررسی خواص آن پرداخته‌اند. آنها عنوان کرده‌اند که گروه‌های سولفونیک با بارهای منفی زیاد پس از عامل دار شدن با پلیمر آنیونی p(SPMA) روی سطح MWCNT‌ها تثبیت میشوند، که منجر به دافعه‌های الکترواستاتیک و فضایی کافی برای تثبیت MWCNT‌ها در الکترولیت‌ها در دمای بالا برای مدت طولانی خواهد شد. دو نانوکامپوزیت به نام‌های MWCNTs-g-SPMA-1 و MWCNTs-g-SPMA-2 با تغییر نسبت مونومر و آغازگر در این مطالعه سنتز شده است. نتایج نشان داده که هر دو نانوکامپوزیت به خوبی در آب نمک اشباع NaCl و آب نمک استاندارد API (۸٪ وزنی NaCl + ۲٪ CaCl_2 به مدت ۶۰ روز در دمای اتاق به صورت پراکنده باقی میمانند. با این وجود میزان پایداری کلوئیدی MWCNTs-g-SPMA-2 در آب نمک اشباع در مقایسه با MWCNTs-g-SPMA-1 نتایج بهتری را نشان داده است. بنابراین، عملکرد مسدودسازی MWCNTs-g-SPMA-2 در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. تست ارزیابی مسدودسازی منافذ با استفاده از نانوکامپوزیت MWCNTs-g-SPMA-2 بر روی فیلترکیک‌هایی با منافذی در مقیاس میکرو و نانو انجام شده است. نتایج نشان داده که با افزودن مقادیری اندک ۳٪ وزنی، MWCNTs-g-SPMA-2 راندمان مسدودسازی به ۵۰/۹۶٪

1- sulfopropylmethacrylate

جدول ۱. قرارگیری شیل‌ها در طبقه بندی سنگ های تخریبی بر اساس اندازه دانه‌ها [۱۸].

Table 1. Placement of shales in the classification of igneous rocks based on grain size [18].

Particle Size in Clastic Sedimentary Rocks			
Sedimentary Rocks	Sediment name	Particle Type	Diameter(mm)
Conglomerate	Gravel	Boulder	More than 256
		Cobble	64 to 256
		Pebble	4 to 64
		Granule	2 to 4
Sandstone	Sand	Sand	1/16 to 2
Shale & Mudstone	Mud	Silt	1/256 to 1/16
		Clay	Less than 1/256

پلاستیکی (PV) تقریباً پایدار است چرا که پلیمرهای موجود در سیال حفاری در حضور MWCNT دچار تخریب نشده‌اند [۲۵]. تکلو در سال (۲۰۱۸) به بررسی اثر نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNT) در حضور پلیمر پلی اتیلن گلیکول (PEG) در سیالات پایه آبی و بررسی اثر آن بر پایداری شیل پرداخته‌اند. آنها بیان کردند که اضافه کردن MWCNT و PEG به صورت جداگانه و یا ترکیب با یکدیگر اثراتی متفاوتی بر خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه آبی دارند.

آنها بیان کردند که خواص رئولوژیکی WBM با اضافه کردن MWCNT تقریباً بهبود خواهد یافت، در حالی که با اضافه کردن PEG به صورت تنها، خواص رئولوژیکی گل پایه کاهش یافته است. در ادامه بیان شده است که با اضافه کردن همزمان MWCNT و PEG به گل پایه خواص ویسکوزیته و نقطه تسلیم کاهش می‌یابد. علی‌رغم این کاهش ویسکوزیته و نقطه تسلیم مقادیر آن از نمونه‌هایی که تنها از PEG استفاده شده بالاتر است. سایر نتایج ارائه شده توسط نویسندگان به این صورت است که با افزایش طول و قطر MWCNT، ویسکوزیته، pH و نقطه تسلیم سیال حفاری پایه آبی افزایش یافته و یکپارچگی شیل را بهبود بخشیده و مانع جدایش ساختار شیل خواهد شد. حضور PEG در کنار MWCNT با وجود کاهش خواص رئولوژیکی سبب بهبود خواص بازیافتی شیل شده است [۲۴].

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 افزایش‌دهنده بنتونایت موجود در سیال حفاری را کاهش داده و منجر به بهم پیوستگی صفحات بنتونایتی می‌گردد. با تجمع ذرات بنتونایت، ساختار لایه‌ای آن که دارای سطح ویژه بالایی می‌باشد را غیر فعال کرده که این موضوع باعث کاهش خواص رئولوژیکی، خواص

رسیده است و مکانیزم مسدودسازی به این صورت است که نانولوله‌های کربنی در ورودی منافذ پل زده و روی هم چیده میشوند و منجر به بسته شدن منافذ میشوند یا با قرارگیری در گلوگاه‌های منفذی ایجاد سد خواهند کرد [۲۶].

تکلو در سال (۲۰۱۸) به بررسی اثر نانولوله‌های کربنی مختلف در حضور پلیمر پلی اتیلن گلیکول (PEG) در سیالات پایه آبی پرداخته است. آنها بیان کردند که در مقایسه پارامترهای رئولوژیکی CNT فاقد گروه عاملی (PCNT) و دارای گروه عاملی (FCNT) در غیاب PEG، PCNT می‌تواند در حضور سورفکتانت ضخم عربی مقادیر فیلتراسیون کمتری داشته باشد. در حالی که FCNT در مقایسه با PCNT در حضور PEG، ویسکوزیته پلاستیکی و نقطه تسلیم (YP) را افزایش می‌دهد. در مقایسه عملکرد این دو نانولوله در غیاب PEG در تست بازیابی شیل نتایج FCN به مراتب اثر بخش‌تر بوده است. عملکرد مناسب FCNT به این نحو استنباط شده که به دلیل داشتن گروه‌های عاملی قطبی کربوکسیلیک (COOH)، توسط سطح شیل با باری منفی جذب گردیده و مانع از جدایش ذرات شده که این عامل افزایش نرخ بازیافت شیل را به دنبال داشته است. و اثر PEG بر عملکرد FCNT در فرآیند بازیابی شیل مخرب بوده چرا که FCNT به دلیل داشتن گروه‌های COOH و PEG نیز به دلیل داشتن گروه‌های OH یکدیگر را جذب کرده و سطح شیل را کمتر می‌پوشانند. در بررسی اثر نانولوله‌های چند دیواره (MWCNT) بر پارامترهای رئولوژیکی با و بدون PEG نتایج متفاوتی گزارش شده است. PEG به تنهایی خواص رئولوژیکی گل پایه را کاهش داده، در حالی که MWCNT به تنهایی تقریباً خواص رئولوژیکی WBM را بهبود می‌دهد. علاوه بر این، افزودن همزمان PEG و MWCNT منجر به کاهش ویسکوزیته گل می‌شود. نتایج نشان داده که پس از گذشت ۱۶ ساعت پیری (aging) خواص رئولوژی سیال حفاری در حضور MWCNT تغییرات فاحشی نداشته و نقطه تسلیم (Yp) و ویسکوزیته

واروی (YP) با افزایش غلظت MWCNT به صورت تدریجی افزایش یافته است. با این حال، غلظت بهینه برای WBM، ۲ ppb و برای OBM، ۲,۵ ppb گزارش شده است. نتایج تست فیلتراسیون بر روی گل‌های OBM، نشان داده که غلظت‌های MWCNT پایین ۰,۵ ppb منجر به افزایش ۱۵ cc در مقادیر فیلتراسیون گردیده، اما افزایش غلظت MWCNT تا ۲,۵ ppb سبب کاهش مقادیر فیلتره تا ۵۲٪ (۷ cc) نسبت به مقادیر اولیه و تا ۵۰٪ نسبت به نمونه استاندارد شده است [۲۹].

کانجیراکات و همکاران در سال (۲۰۲۰) به بررسی اثر CNT بر مقادیر صافاب سیال حفاری پایه آبی (WBM) با وزن ۱۲,۳ ppg در دمای ۲۵۰ °C و فشار ۱۲۰۰ psi پرداخته‌اند. غلظت CNT بکارگرفته شده در این مطالعه ۱ wt % است دیسک‌های سرامیکی بکارگرفته شده منافذی با ابعاد ۵ و ۱۰ μm و به ترتیب با تراوایی‌های ۷۵۰ میلی‌داری و ۲ داری جهت شبیه‌سازی منافذ سازند استفاده شده است.

نتایج این بررسی نشان داده که برای آزمایش‌های انجام شده با استفاده از دیسک ۵ μm، نمونه ۱٪ CNT در مقایسه با نمونه ۲٪ حجم کمتری از فیلتر را در مدت زمان ۱۵ دقیقه داشته در حالی که در مدت ۳۰ دقیقه، حجم فیلتره بالاتری را نسبت به نمونه ۲٪ ایجاد کرده است. برای آزمایش‌ها با دیسک ۱۰ μm نمونه‌های پایه و نمونه‌های حاوی نانولوله تا ۱۵ دقیقه مقادیر مشابهی از حجم فیلتراسیون را داشته‌اند و در مدت زمان ۳۰ دقیقه، مشابه با دیسک با منافذ ۵ μm، حجم فیلتره کاهش قابل توجهی را در هنگام استفاده از CNT با غلظت ۲٪ نشان داده است. تصاویر یک ارئه شده در این تحقیق نشان داده که گل پایه در حین عبور از هر دو دیسک فیلتریک یک‌نواختی ایجاد کرده است. برای نمونه گل حاوی ۱٪ CNT، فیلتریک به صورت متخلخل و ناهموار تشکیل شده و ذرات CNT به صورت آگلومره و پراکنده در سطح فیلتریک مشاهده می‌شود و ضخامت فیلتریک نیز بزرگتر از ضخامت ایجاد شده توسط نمونه پایه و نمونه ۲٪ است. برای نمونه ۲٪، فیلتریک تشکیل شده روی هر دو دیسک همراه با ترک پدیدار گشته و در نمونه دیسک ۵ ضخامت آن کمتر از نمونه پایه و نمونه ۱٪ نانولوله گزارش شده است. در حالی که در نمونه دیسک ۱۰ ضخامت فیلتریک آن از گل پایه نیز بیشتر شده است. در آخر نویسندگان مقاله غلظت ۱٪ را با توجه فیلتریک ایجاد کرده غلظت مناسب برای شرایط عملیات حفاری واقعی پیشنهاد داده‌اند [۳۰].

آنوپ و همکاران در سال (۲۰۱۹) مطالعه‌ای انجام دادند که در آن به بررسی اثر CNT بر روی ویسکوزیته ظاهری (AV) سیال

فیلتراسیون و کاهش توانایی حمل‌کننده‌های حفاری خواهد شد. در این مطالعه برای حل مشکلات بیان شده از نانولوله‌های کربنی (CNT) استفاده کرده‌اند به این نحو که ۰/۰۵ درصد وزنی CNT به سیال حفاری پایه آبی حاوی ۴ wt % بنتونایت اضافه گردیده و تحت شرایط غلظت ۱۰ wt % نمک NaCl و دمای ۱۸۰ °C 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 بنتونایت فضای بین صفحات بنتونایتی 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 بنتونایتی را حفظ کرده و از ساختار بنتونایتی در سیال حفاری پشتیبانی می‌کند. در نتیجه توانایی حمل‌کننده‌های سیال حفاری را به میزان ۸۵/۱٪ افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کیک گل تشکیل شده از تجمع ذرات بنتونایتی با سایز کوچک، متراکم بوده که این عامل میزان فیلتراسیون سیال حفاری بنتونایتی را تا ۳۰/۲٪ کاهش خواهد داد [۲۷].

رعنا و همکاران در سال (۲۰۲۰) به بررسی اثر نانوکامپوزیت SWCNTs/PVP که حاصل از قرارگیری نانولوله‌های تک دیواره کربن (SWCNTs) 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 1-SWCNTs/PVP و 5-SWCNTs/PVP نام‌گذاری شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که SWCNTs/PVP می‌تواند با قرارگیری بر روی سطوح شیلی و ویژگی آبدوستی (Hydrophilic) سطح شیل را به آبگریزی (Hydrophobic) تغییر داده که این موضوع سبب پایداری هرچه بیشتر شیل خواهد شد [۲۸].

اوکورو و همکاران در سال (۲۰۲۰) بیان کردند که اکثر مطالعات در خصوص بررسی اثر MWCNT بر خواص رئولوژی سیالات حفاری در گذشته دامنه تحقیقات خود را به غلظت‌های پایین بین ۰/۰۱ و ۱ پوند در هر بشکه (ppb) محدود کرده‌اند. به همین منظور به بررسی عملکرد غلظت‌های بالای MWCNT (۰/۰۱ و ۱ ppb) به‌عنوان افزودنی‌های کنترل‌کننده فیلتراسیون در سیالات حفاری پایه آبی (WBM) و پایه نفتی (OBM) قابل استفاده در عملیات میدانی پرداخته‌اند.

نتایج این مطالعه نشان داده که در نمونه‌های ساخته شده WBM و OBM، مقاومت زله‌ای (Ge)، ویسکوزیته پلاستیک (PV) و نقطه

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 OBم 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 ۲۳/۲٪ 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 OBم 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 OBم، مقادیر فیلتراسیون در دمای ۱۳۸ °C و فشار ۵۰۰ psi به میزان ۱۶/۶۷٪ کاهش خواهد یافت [۳۳].

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، نمونه‌های شیل مورد استفاده از یکی از میدین نفتی جنوب ایران به دست آمد. نانوتیوب‌های چند دیواره با خلوص بالای ۹۵٪ گروه عاملی کربوکسیل (COOH: ۲/۰۰ wt %؛ OH: ۳/۰۶ wt %) از شرکت و حاوی گروه عاملی هیدروکسیل (OH: ۳/۰۶ wt %) از شرکت US4304 US-Nano Research به ترتیب با کد محصول US4308 و US4304 انتخاب و خریداری شده است. مواد دیگر استفاده شده، کاستیک سودا (Na₂CO₃: ۹۸٪) و سود سوزآور (NaOH: ۹۸٪)، از شرکت مرک (آلمان) تهیه شده است. سایر مواد استفاده شده دارای گرید آزمایشگاهی و بدون خلص سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- تست‌های انجام شده بر روی نانوتیوب‌ها

۴-۱- تست FESEM

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3-TESCAN-XMU [۳۴] اقدام به عکسبرداری از سطح پودر نانولوله‌ها گردیده و در تصاویر شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱. نانولوله با گروه عاملی COOH.

Figure 1. Nanotube with COOH functional group.

حفاری پایه آبی در نرخ‌های برشی ۵، ۱۰، ۵۱، ۱۰۲، ۱۷۰، ۳۴۰، ۵۱۱ و ۱۰۲۱ بر حسب (S) و تحت دماها و فشارهای مختلف پرداخته شده است. در این مطالعه غلظت‌های مورد استفاده CNT عبارتند از ۰/۰۲۷، ۰/۰۵۶، ۰/۱۱ و ۰/۲۲ بر حسب درصد وزنی و در دمای محیطی ۲۶ °C و دماهای ۳۷، ۶۶، ۹۳، ۱۲۱، ۱۵۰ و ۱۷۶ °C و فشارهای ۳۳، ۶۸، ۱۰۳، ۱۳۸ و ۱۷۱ Mpa مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که در شرایط فشار ثابت ۱۷۱ مگاپاسکالی و افزایش دما از ۳۷ تا ۱۷۶ در تمامی غلظت‌ها افزایش AV نسبت به حالت پایه مشاهده شده است. در بین غلظت‌های به کار گرفته شده CNT در دماهای ۳۷ و ۳۶ °C بیشترین اثر بخشی در غلظت ۰/۲۲٪ و در دماهای ۹۳، ۱۲۱ و ۱۵۰ °C بیشترین اثر بخشی در غلظت ۰/۰۲۷٪ و در دمای ۱۷۱ °C مجدداً غلظت ۰/۲۲٪ گزارش شده است. در شرایط ثابت دمای محیطی ۲۶ °C و افزایش فشار نیز در تمامی غلظت‌ها افزایش ویسکوزیته ظاهری نسبت به حالت پایه مشاهده شده است. در میان غلظت‌های CNT به کار گرفته شده با افزایش فشار غلظت ۰/۲۲٪ بیشترین افزایش ویسکوزیته را در تمامی نرخ‌های برشی ذکر شده نشان داده است [۳۱].

اسماعیل و همکاران در سال (۲۰۱۶) بیان کردند که خواص رئولوژیکی سیالات حفاری در هنگام حفاری چاه‌های عمیق به ویژه در هنگامی حفاری مخازن تحت دما و فشار بالا تغییر خواهد کرد. لذا اقدام به بررسی اثر غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ گرم MWCNT بر خواص رئولوژیکی چندین سیال حفاری مبتنی بر سنتز (ساراپار^۱ و سارالین^۲) در شرایط دمای بالا پرداخته‌اند. در این مطالعه خواص رئولوژیکی سیال حفاری پس از ۱۶ ساعت aginig در دمای ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه فارنهایت مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج این مطالعه نشان داده است که افزودن MWCNT به سیال حفاری قادر است که استحکام ژل ۱۰ ثانیه‌ای را به میزان ۳۳٪ بهبود بخشد و مقادیر فیلتراسیون را در دمای ۲۵۰ °F در سیال حفاری سارالین ۱۰٪ کاهش دهد. MWCNT حجم فیلتراسیون ساراپار نیز پس از ۱۶ ساعت aginig در دمای ۲۵۰ °F به میزان ۱۹٪ کاهش داده است. علاوه بر این، ویسکوزیته پلاستیک سیال حفاری سارالین و ساراپار به ترتیب به میزان ۶٪ و ۲۷٪ در دمای ۳۵۰ °F افزایش یافته است. نتایج این مطالعه نشان داده است که غلظت ۰/۰۱٪ از MWCNT توانسته در مجموع عملکرد بهتری را در هر سه شرایط دمایی؛ دمای محیط (۸۰ °F)، ۲۵۰ °F و ۳۵۰ °F نسبت به سایر غلظت‌ها داشته باشد و با توجه به مقادیر کمی که دارد به عنوان غلظت بهینه انتخاب شود [۳۲].

1- Sarapar

2- Saraline

و (TEM) گرفته شده است. این دو دستگاه میکروسکوپی با تفاوت‌هایی در روش عملکرد و قابلیت‌های تصویربرداری برخوردار هستند که می‌توانیم آنها را بررسی کنیم.

در، SEM یک پرتو الکترونی با انرژی بالا بر روی نمونه تابیده میشود و پس از برخورد با نمونه، الکترون‌های پرتوبندی (SE) و الکترون‌های پرتوی (BSE) تولید می‌شوند. تصاویر SEM به صورت سطحی از سطح نمونه ارائه می‌شوند و برای مطالعه‌ی ساختار، ابعاد و ویژگی‌های سطحی نمونه مناسب بوده‌اند. با SEM، می‌توان مقیاس بزرگی از نمونه‌ها را مشاهده کرد و جزئیات دقیق سطحی را به خوبی مشاهده کرد. در TEM، پرتو الکترونی به طور مستقیم از طریق نمونه عبور میکند و پس از عبور از نمونه، تصویر تشکیل میشود. تصاویر TEM به صورت برشی از داخل نمونه ارائه می‌شوند و اطلاعاتی در مورد ساختار داخلی و میکروسکوپی نمونه فراهم می‌کنند. با استفاده از TEM، می‌توان جزئیات بسیار دقیقی از ساختار داخلی نمونه، از جمله اندازه و شکل نانولوله‌ها و توزیع گروه‌های عاملی روی سطح آنها، را مشاهده کرد. با دقت بر روی تصاویر TEM نقاط دایره مانند مشکی رنگی بروی غلاف نانولوله‌ها دیده می‌شود که این نقاط بیانگر گروه‌های عاملی متصل به آن است.

۴-۳- تست EDX

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 COOH و OH به ترتیب در جدول شماره (۲) و (۳) ذکر شده است.

جدول ۲. آنالیز EDX نانولوله حاوی عامل COOH.

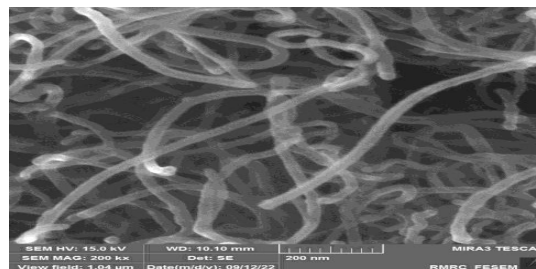
Table 2. EDX analysis of nanotubes containing the COOH functional group.

Components	Weight%
C	99.8
O	0.2

جدول ۳. آنالیز EDX نانولوله حاوی عامل OH.

Table 3. EDX analysis of nanotubes containing the COOH functional group.

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

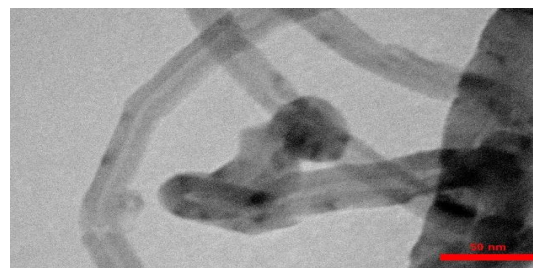


شکل ۲. نانولوله با گروه عاملی OH.

Figure 2. Nanotube with OH functional group.

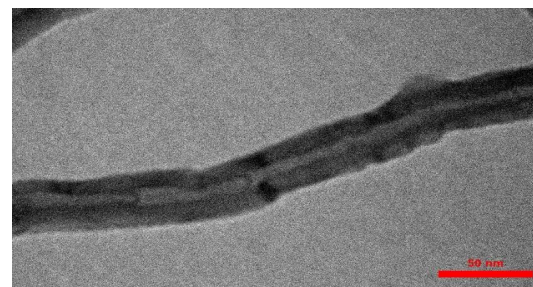
۴-۲- تست TEM

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) 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. در این مطالعه از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل Zeiss LEO 906-Germany و شبکه‌های Holey Carbon جهت عکسبرداری استفاده شده است [۴]. جهت تفکیک هرچه بهتر نانولوله‌های کربنی ابتدا توسط دستگاه اولتراسونیک نانوصفحات درون آب پخش شده تا جداسازی ذرات از یکدیگر صورت بگیرد و سپس اقدام به گرفتن عکس شده است که در تصاویر شماره (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. نانولوله حاوی گروه OH.

Figure 3. Nanotube containing the OH functional group.



شکل ۴. نانولوله حاوی گروه COOH.

Figure 4. Nanotube containing the COOH functional group.

تصاویر میکروسکوپی توسط دو دستگاه مختلف، (SEM)

۵- ارزیابی ویژگی‌های شیل

۵-۱- آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF

نتیجه حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه شیلی به وسیله دستگاه XRF و استاندارد مرجع آزمون (E621 A ۲۰۱۳) براساس درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل دهنده در جدول (۴) ارائه شده است آنالیز بصورت نیمه کمی Semi Quantitative انجام شده است I.O.L نمونه در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است.

جدول ۴. نتیجه آزمایش XRF بر روی نمونه شیل.

Table 4. XRF test result on shale sample.

Composition	Weight%
SiO ₂	70.1
Al ₂ O ₃	10.3
MgO	2.4
Na ₂ O	1.2
Fe ₂ O ₃	2.0
K ₂ O	0.5
CaO	3.1
TiO ₂	0.3
L.O. I	10.1

۵-۲- آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRD

به منظور مشخص کردن نوع رس‌های تشکیل دهنده نمونه شیلی از آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRD استفاده شده است. شرایط آزمون به این صورت است که نوع لامپ Cu، ولتاژ ۴۰ KV، جریان ۳۰ mA و زاویه ۲θ بین ۵ تا ۹۰° در نظر گرفته شده است. تست بر اساس استاندارد مرجع آزمون (BS EN 13925-2) و دستگاه مورد استفاده GNR Explorer ساخت کشور ایتالیا می‌باشد. نتایج این ارزیابی در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. نتیجه آزمایش XRD بر روی نمونه شیل.

Table 5. XRD test results on shale sample.

Mineral	Chemical Formula
Quartz	SiO ₂
Cristobalite	SiO ₂
Calcite	CaCO ₃
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Smectite Clay mineral	Na _{0.3} (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ 6H ₂ O

۶- بکارگیری نانولوله‌ها در سیال حفاری

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 (۶) به عنوان گل پایه استفاده گردیده است.

در ابتدا ۷ ظرف ۳۵۰ cc مطابق با جدول (۶) به عنوان گل پایه در دمای ۷۷ درجه فارنهایت (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و فشار محیط ساخته و سپس یکی را جهت مقایسه به عنوان پایه نگه داشته و به ۶ ظرف دیگر نانو لوله‌هایی با غلظت (وزنی-وزنی) ۰/۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۱٪ با دو عامل OH و COOH اضافه کرده تا تغییر

جدول ۶. فرمولاسیون گل سبک ۶۳ pcf.

Table 6. PCF 63 light clay formulation.

Additive	Composition
FW	350 mL
Soda Ash (Na ₂ CO ₃)	0.5 gr
Caustic Soda (NaOH)	0.2 gr
Starch LV	4 gr
PAC LV	10 gr
Base clay	5 gr

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 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 آخر نانولوله‌ها اضافه و به مدت ۵ دقیقه سیال مخلوط می‌شود تا کاملاً در گل پراکنده شوند [۳۶، ۳۷]. 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.

۶-۱- گرفتن خواص از گل‌های ساخته شده

در تست‌های مرحله اول (شرایط BHR)، خواص گل پس از اضافه کردن نانولوله‌ها و قبل از حرارت دیدن (Hot rolle) اندازه‌گیری شده است. در تست‌های مرحله دوم (شرایط AHR)، خواص گل پس از Hot rolle 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 اندازه‌گیره 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، ۳۰ 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، ۱۷۰/۰۲۳، ۳۴۰/۰۵، ۵۱۰/۰۷، ۱۰۲۱/۱۴، بر حسب واحد sec⁻¹ به دست آمده است. سایر پارامترها نظیر PV، AV و YP با استفاده از معادلات (۱)، (۲) و (۳) محاسبه شده است.

این دما خوانده شوند چرا که پارامترهای اندازه‌گیره 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، ۳۰ 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، ۱۷۰/۰۲۳، ۳۴۰/۰۵، ۵۱۰/۰۷، ۱۰۲۱/۱۴، بر حسب واحد sec⁻¹ به دست آمده است. سایر پارامترها نظیر PV، AV و YP با استفاده از معادلات (۱)، (۲) و (۳) محاسبه شده است.

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

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

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

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 [۳۸].

تست اتلاف فیلتره در دمای ۷۷ درجه فارنهایت (۲۵ درجه

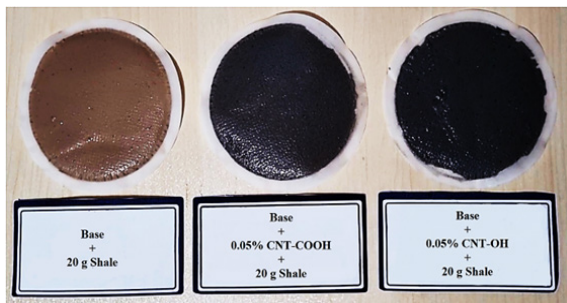
۶-۲- اثر نانولوله‌های کربنی به همراه شیل بر سیال پایه

ابتدا جهت تعیین غلظت بهینه ۷ ظرف ۳۵۰ cc مطابق با جدول (۶) 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- وزنی) ۰/۰۱٪، ۰/۰۵٪ و ۱٪ با دو عامل OH و COOH اضافه شد تا از میان آنها غلظت بهینه مشخص شود. همانطور که در جدول (۷) مشاهده شده است. غلظت ۰/۰۵٪ نانو ذره با کاهش مقادیر فیلتریشن عملکرد مناسبی نسبت به سایر غلظت‌ها داشته است و به عنوان غلظت بهینه می‌توان آن را در نظر گرفت. با مشخص شدن غلظت بهینه به منظور بررسی عملکرد نانولوله‌های حاوی ۲ گروه عاملی قطبی بکار گرفته شده به همراه پودر شیل بر سیال حفاری، آزمایش دیگری طراحی شده است. بدین صورت که ۳ ظرف حاوی گل پایه مطابق جدول (۶) ساخته شده تا یک نمونه به عنوان نمونه شاهد و به ۲ ظرف دیگر هر کدام به میزان ۲۰ g شیل پودر شده و ۰/۰۵ w/w نانو لوله با گروه عاملی OH و

جدول ۷. نتایج تست‌های رئولوژی [۴۱].

Table 7. Rheology test results [41].

		θ 3	θ 6	θ 100	θ 200	θ 300	θ 600	GEL	AV	PV	YP	T	FL	pH
		unit	-	-	-	-	-	-	10sec/10min	cP	cP	Ib _f /100f	°F	mL
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	4.8	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



شکل ۶. کیک گل‌های حاوی CNT با گروه عاملی مختلف به همراه پودر شیل پس از Hot rolle.

Figure 6. Clay cake containing CNTs with different functional groups along with shale powder after hot rolling.

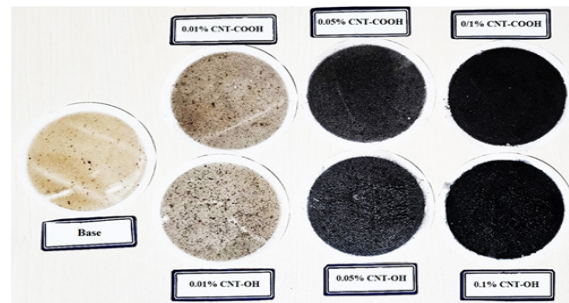
۰.۵٪/۰.۵ نانولوله با عامل OH و COOH در دمای ۷۷ °F در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان داده که نانوله با عامل OH و COOH در نرخ‌های برشی پایین اثری بر مقادیر تنش برشی در شرایط دمای آزمایشگاهی نداشته است. در حالی که با افزایش سرعت برشی مقادیر تنش وارد به سیال بیشتر شده و میزان جذب تنش در سیال حاوی نانولوله حاوی گروه COOH بیشتر از گروه OH و سیال پایه بوده که منجر به افزایش ناچیز خواص رئولوژی شده است.

مقادیر تنش برشی بر حسب نرخ برشی سیال پایه و غلظت بهینه ۰.۵٪/۰.۵ نانولوله با عامل OH و COOH پس از Hot rolle در دمای ۲۵۰ °F به مدت ۴ ساعت در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نانوله در نرخ‌های برشی پایین مطابق شرایط BHR 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 حاوی گروه COOH بیشتر از گروه OH و سیال پایه بوده که منجر به افزایش خواص رئولوژی شده است.

جدول ۸. نتایج تست‌های رئولوژی در حضور CNT و پودر شیل.

Table 8. Results of rheology tests in the presence of CNT and shale powder.

		θ 3	θ 6	θ 100	θ 200	θ 300	θ 600	GEL 10sec/10min	AV	PV	YP	T	FL	pH
		unit	-	-	-	-	-	-	lb _f /100ft ²	cP	cP	lb _f /100f	°F	mL
Mud Base (MB)	BHR	3	5	19	27	32	46	3/5	23	14	18	77	5	11.99
	AHR + Shale	6	8	27	36	48	59	1	29.5	11	37	140	4.5	9.76
MB+CNT-OH 0.05% W/W	BHR	3	5	17	23	30	44	3/5	22	14	16	77	4.8	11.45
	AHR+ Shale	6	8	27	35	43	58	1	29	15	28	140	4.7	9.98
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- Shale	6	8	27	36	44	60	1	30	16	28	140	4	9.98



شکل ۵. کیک گل‌های حاوی CNT با گروه عاملی مختلف و غلظت‌های مختلف پس از حرارت دیدن.

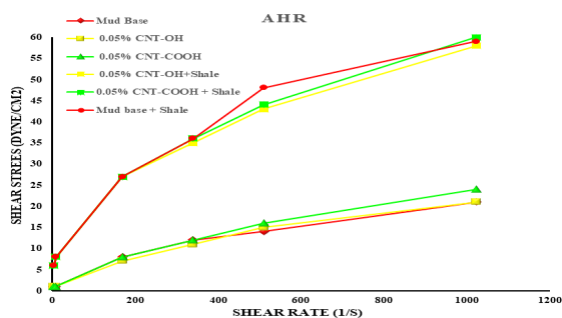
Figure 5. Clay cakes containing CNTs with different functional groups and different concentrations after heating.

COOH اضافه گردیده است. به منظور شبیه‌سازی شرایط گردش گل درون چاه ۳ ظرف ساخته شده در مرحله قبل را در دستگاه رولینگ آون مدل فن به مدت ۸ ساعت در دمای ۲۵۰ °F به گردش درآورده، سپس نمونه‌ها خارج و در حمام آب با دمای ۱۴۰ درجه قرار داده شد. پس از رسیدن دما به ۱۴۰ °F سیال حفاری از درون سل خارج و از الک شماره ۱۰ عبور داده و سپس به میزان ۱۰ دقیقه زیر میکسر قرار گرفته و بعد از آن اقدام به گرفتن خواص رئولوژی شده است. خواص به دست آمده در جدول (۸) گزارش شده است. به منظور ارزیابی مادیک و مقادیر فیلتریشن به وسیله دستگاه LPLT مدل فن در دمای ۷۷ °F مطابق استاندارد API تست انجام شده است. خواص به دست آمده به همراه مقادیر فیلتریشن در جدول (۸) و تصویر کیک گل‌های به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است.

۷- تجزیه تحلیل داده‌ها

۷-۱- مقادیر تنش برشی بر حسب نرخ برشی

مقادیر تنش برشی بر حسب نرخ برشی سیال پایه و غلظت بهینه



شکل ۹. مقایسه اثر پودر شیل بر خواص سیال حاوی نانولوله در غلظت ۰.۰۵٪ پس از Hot rolle.

Figure 9. Comparison of the effect of shale powder on the properties of fluid containing nanotubes at a concentration of 0.05% after hot rolling.

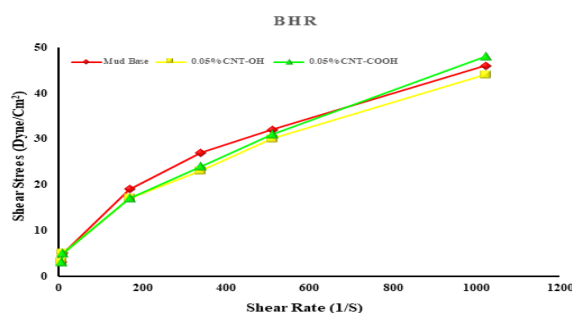
۷-۲- ویسکوزیته ظاهری

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که بعد از اضافه کردن نانو لوله‌ها به گل پایه و Hot rolle، افزایش پایداری حرارتی در سیال پایه ایجاد شده است. چرا که در تمامی موارد غلظت‌های بکارگرفته شده از هر دو گروه عاملی استفاده شده پس از حرارت دیدن مقادیر ویسکوزیته ظاهری (AV) روند افزایشی داشته است (شکل ۱۰). 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 که این موضوع موجب شده 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 کلوئیدی 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 و یک‌گل با ضخامت مناسب تشکیل شود.

با اضافه کردن پودر شیل به گل پایه و گل حاوی CNT مقادیر AV پس از حرارت دیدن برخلاف گل‌های ساخته شده در مرحله قبل به طور قابل توجهی افزایش یافته است (جدول ۷)، که مشابه گل‌های ساخته شده در مرحله قبل بیشترین افزایش در گل حاوی عامل COOH دیده شده است (شکل ۱۱).

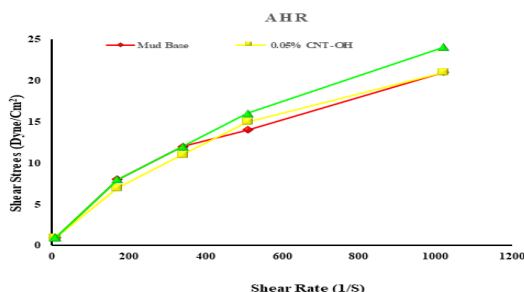
۷-۳- نقطه واروی

در ارزیابی نقطه واروی داده‌ها بیانگر این است که قبل از حرارت دیدن نانولوله‌ها منجر به کاهش نقطه واروی شده‌اند که این



شکل ۷. خواص رئولوژی سیال پایه و حاوی نانولوله با عامل OH و COOH در غلظت ۰.۰۵٪.

Figure 7. Rheological properties of the base fluid and the fluid containing nanotubes with OH and COOH functional groups at a concentration of 0.05%.

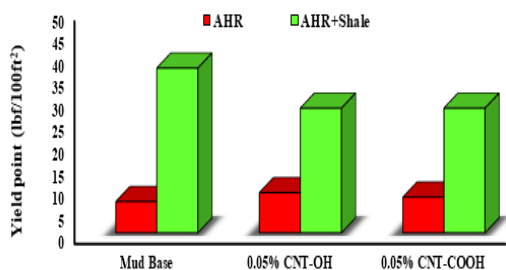


شکل ۸. خواص رئولوژی سیال پایه و حاوی نانولوله با عامل OH و COOH در غلظت ۰.۰۵٪ پس از ۴ ساعت Hot rolle.

Figure 8. Rheological properties of the base fluid and the fluid containing nanotubes with OH and COOH functional groups at a concentration of 0.05% after 4 hours of hot rolling.

مقادیر تنش برشی بر حسب نرخ برشی سیال پایه و غلظت بهینه ۰.۰۵٪ نانولوله با عامل OH و COOH به همراه پودر شیل در دمای ۲۵۰ °F به مدت ۸ ساعت در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پودر شیل اثر قابل توجهی بر روی خواص رئولوژیکی سیال پایه و سیال حاوی نانو لوله‌ها داشته است. به دلیل مقادیر بالای SiO₂ با مقیاس نانو و میکرو در ترکیب شیل این انتظار میرفت که بتوان با خرده‌های حفاری شده سازند شیلی به این چنین خواصی دست یافت چرا که در تحقیقات گذشته به مراتب به قابلیت سیلیکا در افزایش خواص رئولوژیکی سیالات پایه آبی اشاره شده است.

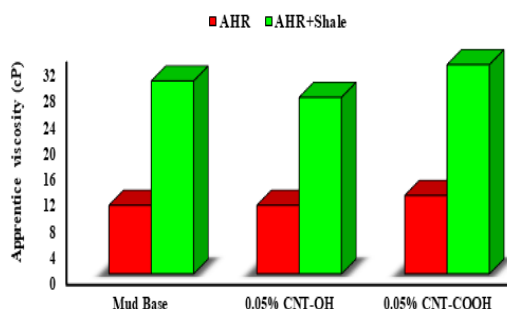
همانند تست‌های گذشته نانولوله‌ها در نرخ‌های برشی پایین اثری بر مقادیر تنش برشی نداشته است و رفتاری مشابه با گل پایه از خود نشان داده است و با افزایش سرعت برشی مقادیر تنش وارد به سیال بیشتر شده که این میزان جذب تنش در سیال حاوی نانولوله با گروه COOH در کنار شیل بیشتر از گروه OH و سیال پایه به همراه شیل بوده است.



شکل ۱۲. نقطه واروی گل‌پایه و گل‌های حاوی نانولوله به همراه پودر شیل بعد از Hot rolle.

Figure 12. Softening point of base clay and clay containing nanotubes with shale powder after hot rolling.

مقادیر محتوای ذرات جامد در گل میزان اصطحکاک بین ذرات جامد افزایش خواهد یافت که در نتیجه پارامتر مشخصه آن یعنی ویسکوزیته پلاستیکی نیز افزایش می‌یابد. با اضافه کردن پودر شیل به گل پایه و نانولوله‌ها در غلظت بهینه ۰/۰۵٪ نتایج نشان داده است (جدول ۷)، که مقادیر آن به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بیشترین مقدار ویسکوزیته پلاستیکی در گل حاوی گروه COOH نمایان شده است (شکل ۱۳).



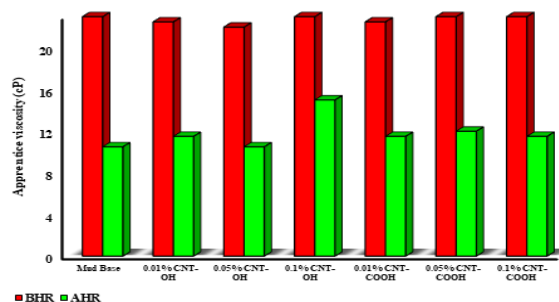
شکل ۱۳. ویسکوزیته پلاستیکی گل‌پایه و گل‌های حاوی نانولوله به همراه پودر شیل بعد از Hot rolle.

Figure 13. Plastic viscosity of base clay and clay containing nanotubes along with shale powder after hot rolling.

۷-۵- فیلتریشن

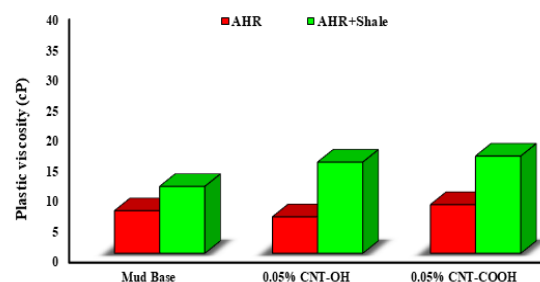
مقادیر صافاب گل پایه در مقایسه با غلظت‌های مختلف نانولوله گروه COOH قبل و بعد از Hot rolle در دمای ۲۵۰ °F به مدت ۴ ساعت به دقت مورد بررسی قرار داده شده که نتایج در شکل (۱۴) به تصویر کشیده شده است همانطور که مشاهده می‌شود غلظت بهینه ۰/۰۵٪ در تست فیلتراسیون نیز عملکرد مناسبی داشته و کاهش مقادیر فیلتراسیون در هر دو شرایط قبل و بعد از Hot rolle را ایجاد کرده است.

در شرایط شبیه‌سازی شده گردش گل درون چاه به واسطه حرارت دیدن، زنجیره‌های پلیمری شکسته شده و منجر به کاهش ویسکوزیته سیال و افت رئولوژی و به دنبال آن افزایش مقادیر



شکل ۱۰. ویسکوزیته ظاهری گل‌پایه و گل‌های حاوی نانولوله در شرایط BHR.

Figure 10. Apparent viscosity of base clay and clay containing nanotubes under condition BHR.



شکل ۱۱. ویسکوزیته ظاهری گل‌پایه و گل‌های حاوی نانولوله به همراه پودر شیل بعد از Hot rolle.

Figure 11. Apparent viscosity of base clay and clay containing nanotubes with shale powder after hot rolling.

می‌تواند به دلیل خواص روان کنندگی کربن باشد که این عامل با تجمع نانولوله‌ها در کنار یکدیگر افزایش می‌باشد. پس از حرارت دیدن در اغلب غلظت‌ها افزایش نقطه واروی دیده شده است (جز در غلظت ۰/۱٪ گروه OH) که این موضوع بیانگر باز شدن رشته‌های بهم پیوسته نانو و ایجاد پایداری حرارتی برای پلیمرهای موجود در گل می‌باشد.

با اضافه کردن پودر شیل به گل پایه و نانولوله‌ها در غلظت بهینه ۰/۰۵٪ نتایج نشان داده است (جدول ۷)، که مقادیر آن به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بیشترین مقدار نقطه واروی در گل پایه مشاهده شده است. افزایش بیش از حد نقطه واروی سبب می‌شود که در هنگام به گردش درآوردن گل در حالت استاتیک، فشاری بیش از حد به پمپ‌ها و تجهیزات سرچاهی وارد شود. بنابراین می‌توان گروه عاملی COOH را که نسبت به گل پایه و گل حاوی CNT با گروه OH کمترین مقدار را دارا می‌باشد به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفت (شکل ۱۲).

۷-۴- ویسکوزیته پلاستیکی

پارامتر ویسکوزیته پلاستیکی (PV) طبق جدول (۵) نیز روند افزایش خواص داشته است جز در غلظت ۰/۰۵٪ (OH) که پس از حرارت دیدن اندکی کاهش خواص دیده شده است. با افزایش

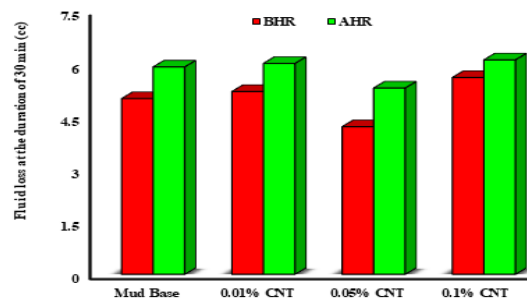
خواص رئولوژیکی و کاهش مقادیر صافاب می‌شود. با جمع آوری شیل از روی شیکر سر دکل در هنگام حفاری سازند شیلی یکی از مناطق نفت خیز جنوب کشور ایران و تبدیل آن به پودر با استفاده از دستگاه آسیاب سیاره‌ای، پودر شیلی به دست آمده و به سیال حاوی CNT-COOH در غلظت بهینه ۰/۰۵٪ اضافه شده است. نتایج نشان دهنده این است که تمامی خواص رئولوژیکی گل پایه پس از Hot rolle به مدت ۸ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت به طور قابل توجهی ارتقا یافته به نحوی که مقادیر فیلتراسیون گرفته شده آن نسبت به فیلتراسیون گرفته شده در دمای محیط آزمایشگاهی کمتر می‌باشد.

کاهش مقادیر صافاب در هنگام عملیات حفاری لایه‌های سطحی که دانسیته ای در حدود دانسیته آب نیاز است (حدوداً ۶۳ pcf) باعث می‌شود که کیک گل تشکیل شده ضخامت مناسب داشته باشد و از مشکلات به وجود آمده حاصل از افزایش ضخامت دیواره چاه نظیر انحراف چاه و گیرلوله‌ها و... جلوگیری شود.

یکی از موارد مهمی که در این تحقیق در نظر گرفته شده است طراحی گل به نحوی باشد که قابلیت استفاده در شرایط عملیات حفاری واقعی را داشته باشد. از این رو برای بکارگیری نانولوله‌ها در ساخت سیال حفاری از آب شرب استفاده شده است نه آب مقطر، چرا که میزان سختی بر عملکرد نانولوله‌ها موثر است و هرچند آب فاقد سختی نتایج این مطالعه را بهبود می‌بخشیده ولی به دلیل دور شدن نحوه ساخت گل نسبت به سر دکل حفاری از این موضوع صرف نظر شده است.

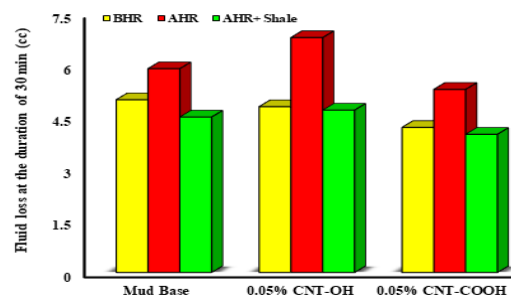
مورد بعدی که این مطالعه را نسبت به سایر مطالعات در حوضه استفاده از نانولوله‌ها در سیال حفاری متمایز می‌کند این است که از سیستم اولتراسونیک و یا مواد فعال کننده سطحی (سرفکتانت) جهت ساخت گل مورد نظر استفاده نشده است هر چند بهره‌گیری از این دستگاه یا افزایش نتایج این مطالعه را به مراتب ارتقا می‌بخشیده ولی به دلیل جلوگیری از افزایش هزینه‌های ساخت سیال حفاری از این موارد صرف نظر شده است.

در آخر باید به این نکته اشاره کرد که فرموله کردن گل پایه با ویژگی تاب‌آوری در دمای بالا تنها با ۲ افزودنی CNT با گروه COOH در مقادیر ناچیزه ۰/۰۵٪ و پودر شیل که جزء یک ماده زائد هست، از دید صنعتی کاربردی و دستاوردی بزرگ برای فرموله کردن سیالات حفاری در شرایط عملیات حفاری واقعی می‌باشد.



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر فیلتراسیون سیال پایه و حاوی نانولوله با عامل COOH. Figure 14. Comparison of filtration values of base fluid and fluid containing nanotubes with COOH functional group.

فیلتریشن خواهد شد. در شکل (۱۵) نمودار با رنگ قرمز نشان دهنده افزایش فیلتریشن بعد از ۴ ساعت Rolling نمونه‌های گل در دمای ۲۵۰ °F را نشان می‌دهد در حالی که نمودار سبز رنگ نشان دهنده کاهش فیلتریشن بعد از ۸ ساعت Rolling نمونه‌های گل در دمای ۲۵۰ °F است که این به واسطه افزایش پودر شیل به CNT صورت گرفته است. بیشترین اثر بخشی در گروه COOH مشاهده شده که مقادیر فیلتریشن را نسبت به شرایط دمای محیطی BHR نیز کمتر کرده است.



شکل ۱۵. مقایسه مقادیر فیلتراسیون سیال پایه و حاوی نانولوله به همراه پودر شیل. Figure 15. Comparison of filtration values of base fluid and fluid containing nanotubes with shale powder.

۸- نتیجه گیری

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

نتایج نشان داده که استفاده از نانولوله با گروه عاملی COOH در گل پایه آبی فرموله شده در این مطالعه می‌تواند سبب افزایش پایداری حرارتی شود. بیشترین اثر بخشی CNT-COOH در غلظت ۰/۰۵٪ مشاهده خواهد شد که منجر به افزایش تمامی

۹- مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] S. Harati, A. Esfandyari 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.
- [5] 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.
- [6] 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. xxxx, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.176.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] V. Zarei, H. Yavari, A. Nasiri, M. Mirzaasadi, and A. Davarpanah, "Implementation of Amorphous Mesoporous Silica Nanoparticles to formulate a novel water-based drilling fluid," *Arab. J. Chem.*, vol. 16, no. 8, p. 104818, 2023, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104818.
- [12] 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.egyrs.2021.08.130.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

- [16] 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.
- [17] A. K. Abbas, M. T. Alsaba, and M. F. Al Dushaihi, "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.
- [18] E. J. Tarbuck and F. K. Lutgens, *An Introduction to Physical Geology*, 12th ed. Pearson, 2016.
- [19] V. Zarei, M. Mirzaasadi, A. Davarpanah, A. Nasiri, M. Valizadeh, and M. J. S. Hosseini, "Environmental method for synthesizing amorphous silica oxide nanoparticles from a natural material," *Processes*, vol. 9, no. 2, p. 334, 2021, doi: 10.3390/pr9020334.
- [20] A. H. Salih, T. A. Elshehabi, and H. I. Bilgesu, "Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids," *SPE East. Reg. Meet.*, vol. 2016-Janua, 2016, doi: 10.2118/184067-MS.
- [21] E. I. Mikhienkova, S. V. Lysakov, A. L. Neverov, V. A. Zhigarev, A. V. Minakov, and V. Y. Rudyak, "Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 208, no. PB, p. 109452, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109452.
- [22] A. Katende et al., "Improving the performance of oil based mud and water based mud in a high temperature hole using nanosilica nanoparticles," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 577, pp. 645–673, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.088.
- [23] G. Cheraghian, S. S. Khalili Nezhad, M. Kamari, M. Hemmati, M. Masihi, and S. Bazgir, "Effect of nanoclay on improved rheology properties of polyacrylamide solutions used in enhanced oil recovery," *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 189–196, Jun. 2015, doi: 10.1007/s13202-014-0125-y.
- [24] 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.
- [25] K. Tookaloo, "Analyzing Effects of Various Kinds of Multi-Wall Carbo Nanotubes (MWCNT) on Performance of Water Base Mud (WBM)," *COJ Rev. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–11, Jun. 2018, doi: 10.31031/COJRR.2018.01.000509.
- [26] L. Ma, P. Luo, Y. He, L. Zhang, Y. Fan, and Z. Jiang, "Improving the stability of multi-walled carbon nano-tubes in extremely environments: Applications as nano-plugging additives in drilling fluids," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 74, p. 103082, 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2019.103082.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] E. E. Okoro, A. A. Zuokumor, I. S. Okafor, K. C. Igwilo, and K. B. Orodu, "Determining the optimum concentration of multiwalled carbon nanotubes as filtrate loss additive in field-applicable mud systems," *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 429–438, 2020.
- [30] A. Kanjirakat, A. Carvero, R. Sadr, M. Amani, M. E. Program, and P. E. Program, "INFLUENCE OF CNT-NANOPARTICLES IN THE FILTRATE CHARACTERISTICS AND FILTER CAKE FORMATION OF A WATER-BASED DRILLING FLUID," in *ASTFE Digital Library*, 2020, pp. 247–252.
- [31] K. Anoop, R. Sadr, R. Yrac, and M. Amani, "Viscosity measurement dataset for a water-based drilling mud-carbon nanotube suspension at high-pressure

and high-temperature,” *Data Br.*, vol. 24, p. 103816, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.dib.2019.103816.

[32] A. R. Ismail, W. Sulaiman, M. Z. Jaafar, A. Aftab, A. Razi, and Z. Ibupoto, “The application of MW-CNT to enhance the rheological behavior of drilling fluids at high temperature,” *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 95–98, 2016.

[33] 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.

[34] Y. Feng, V. Zarei, and N. Mousavipour, “Provision and assessment properties of nanoliposomes containing macroalgae extracts of *Sargassum boveanume* and *Padina pavonica*,” *Lwt*, vol. 175, no. July 2022, p. 114194, 2023, doi: 10.1016/j.lwt.2022.114194.

[35] V. Zarei, “Reinforcement of mechanical properties in unsaturated polyester resin with nanosheet,” *Adv. Nano Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 81–90, 2024, [Online]. Available: <http://www.techno-press.org/?page=search2>

[36] 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>

[37] 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.

[38] 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.

[39] 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 Physico-*

chem. Eng. Asp., vol. 582, no. July, p. 123930, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123930.

[40] 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.

[41] A. Mousaei and M. Ehsani, “Investigating the effect of carbon nanotubes containing carboxyl and hydroxyl functional groups on the rheological properties of water-based drilling fluid,” *Adv. Mater. New Coatings*, vol. 11, no. 44, pp. 3182–3195, 2023, doi: 10.22034/amnc.2023.404866.1242.