Review Article

DOI: 10.22034/ijche.2022.345982.1212

DOR: 20.1001.1.17355400.1402.22.129.1.6

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

Evaluation of the Efficiency of Polymers, Polymeric Nanoparticles and Surfactants Additives in Improving the Rheology and Loss Control of Drilling Fluids: A Review

H. Abbasi[1], A. Hashemizadeh[2*], F. Navaie[3]

1- B. Sc. Student of Petroleum Engineering, Hakim Sabzevari University

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Qom University

3- M. Sc. Student of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology

Email: a.hashemizadeh@hsu.ac.ir

Abstract

The success of drilling hydrocarbon reservoirs is inextricably linked to the efficiency of the drilling fluid. Polymers and nanopolymers as effective additives have great potential to improve the properties of drilling fluids. However, the role of polymeric materials in this field is in its beginnings and had significant progress in recent years. The present study reviews the drilling fluids improved and modified by various polymers and nanopolymers. Also, the effects of new polymers, seawater-based and environmentally friendly polymer systems, cationic and anionic polymer systems, the role of surfactants and nanopolymers in improving the properties of drilling fluids are described and their technical and economic advantages are studied. This research reviews recent advances in the synthesis and applications of polymers and nanopolymers in drilling fluid systems while discussing the role of polymers in modifying rheological properties and controlling drilling fluid loss, mud cake thickness, filtration properties, and thermal stability. The most important findings of this review show that environmentally friendly polymer systems reduce costs by up to 30% and reduce the transport and disposal of drilling fluid waste. The use of cationic and anionic polymer systems neutralizes the rock charge and reduces its electrostatic interaction with water, which prevents water from penetrating the clay and can, like PHPA polymer, reduce the drilling problems of clay layers. As a biopolymer, terminalia mantaly (TM gum) and CMC are desirable additives to increase viscosity. Also, the ability to withstand high pressure and sealing of drilling fluids based on nanopolymers prevents pressure transfer and minimizes the interaction of fluids between the drilling bit and the formation, thus improving the stability of the oil and gas wells.

Received: 7 June 2022
Accepted: 7 September 2022
Page Number: 7-25

Keywords:

Improve Drilling Fluids,
Polymers,
Polymeric Nanoparticles,
Surfactants,
Rheology, Fluid loss Control

Please Cite this Article Using:

Abbasi, H., Hashemizadeh, A., & Navaie, F. (2023). Evaluation of the Efficiency of Polymers, Polymeric Nanoparticles and Surfactants Additives in Improving the Rheology and Loss Control of Drilling Fluids: A Review, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(129), 7-25, [In Persian].

مقـــالـــه مـــروری

DOI: 10.22034/ijche.2022.345982.1212
DOR: 20.1001.1.17355400.1402.22.129.1.6

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

ارزیابی کارایی افزایه‌های پلیمری، نانوذرات پلیمری و مواد فعال سطحی در بهبود رئولوژی و کنترل هرزروی سیالات حفاری: مطالعهٔ مروری

هانیه عباسی[۱]، عباس هاشمی‌زاده[۲*]، فرهود نوائی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی نفت، حکیم سبزواری

۲- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه قم

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

پیام نگار: a.hashemizadeh@hsu.ac.ir

چکیده

موفقیت حفاری مخازن هیدروکربنی به‌طور جدایی‌ناپذیری به کارایی سیال حفاری وابسته است. پلیمرها و نانوذرات پلیمری به‌عنوان افزودنی‌های کارامد، ظرفیت بسیاری برای بهبود خواص سیالات حفاری دارند. با این حال، نقش مواد پلیمری در این زمینه در مراحل ابتدایی است و در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته است. مطالعهٔ حاضر، به مرور جامع و بررسی سیالات حفاری بهبودیافته و اصلاح‌شده به‌وسیلهٔ پلیمرها و نانوذرات پلیمری مختلف می‌پردازد. هم‌چنین اثرات پلیمرهای جدید، سامانه‌های پلیمری مبتنی‌بر آب دریا و سازگار با محیط زیست، سامانه‌های پلیمری کاتیونی و آنیونی، نقش مواد فعال سطحی و نانوذرات پلیمری را در بهبود خواص سیالات حفاری تشریح و برتری‌های فنی و اقتصادی آن‌ها تحلیل کرده است. این پژوهش ضمن بررسی پیشرفت‌های اخیر در سنتز و کاربردهای پلیمرها و نانوذرات پلیمری در سامانهٔ سیالات حفاری، نقش پلیمرها در اصلاح و ارتقای خواص رئولوژی و کنترل هرزروی، ضخامت کیک گل، خواص فیلتراسیون و پایداری حرارتی را به بحث گذاشته است. مرور مقالات نشان می‌دهد که سامانه‌های پلیمری سازگار با محیط زیست تا ۳۰ درصد، هزینه‌ها را کاهش می‌دهند و موجب کاهش حمل و دفع پسماند می‌شوند. استفاده از سامانه‌های پلیمری کاتیونی و آنیونی بار سنگ را خنثی می‌کند و برهمکنش الکترواستاتیک آن با آب را کاهش می‌دهد که مانع از نفوذ آب به‌درون رس می‌شود و می‌تواند مانند پلیمر PHPA (Partially Hydrolyzed Polyacrylamid) مشکلات حفاری لایه‌های رسی را کاهش دهد. پلیمر تراویدهٔ ترمینالیا مانتالی به‌عنوان یک زیست‌پلیمر و پلیمر CMC (Carboxymethyl cellulose) افزایه‌های مطلوبی برای افزایش گران‌روی هستند. هم‌چنین قابلیت تحمل فشار و آب‌بندی بسیار بالای سیالات حفاری مبتنی‌بر نانوذرات پلیمری موجب جلوگیری از انتقال فشار و به حداقل رساندن تعامل سیالات بین مته و سازند می‌شود و پایداری چاه را بهبود می‌بخشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶
شماره صفحات: ۷ تا ۲۵

کلیدواژه‌ها:
بهبود سیالات حفاری،
پلیمر،
نانوذرات پلیمری،
مواد فعال سطحی،
رئولوژی،
کنترل هرزروی

* سبزوار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، گروه مهندسی نفت

استناد به مقاله:
عباسی، هانیه، هاشمی‌زاده، عباس، و نوائی، فرهود. (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی افزایه های پلیمری، نانوذرات پلیمری و مواد فعال سطحی در بهبود رئولوژی و کنترل هرزروی سیالات حفاری: مطالعه مروری. *نشریه مهندسی شیمی ایران*، ۲۲(۱۲۹)، ۲۵-۷.

۱. مقدمه

تولید گاز طبیعی و نفت خام (منابع انرژی اولیهٔ جهانی) افزایش چشم‌گیری داشته است که ناشی از افزایش تقاضای جهانی انرژی و مصرف انرژی است. از این رو فناوری‌های نوین و درحال تحول در تولید نفت مانند حفاری جهت‌دار و شکاف هیدرولیکی افقی به‌سرعت در حال توسعه و ارتقا هستند[۱-۴]. سیالات حفاری نقش مهمی در فرایند حفاری مخازن نفت و گاز دارد و به‌طور گسترده‌ای در عملیات‌های حفاری خشکی و دریایی برای دست‌یابی و تولید هیدروکربن‌های طبیعی استفاده می‌شوند. هم‌چنین به‌دلیل مسائل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، موضوع چالش برانگیزی هستند[۵-۸].

یک سیال حفاری پایه، مخلوطی از آب و رس است و می‌تواند ترکیبی از مواد شیمیایی معدنی و آلی را در برگیرد و هم‌چنین از پلیمرها، امولسیون‌ها، عوامل فعال سطحی، نانوذرات و دیگر مواد به‌عنوان افزودنی برای افزایش کارایی خود استفاده کند[۹-۱۱]. هدف اصلی استفاده از سیالات حفاری، انتقال و جابه‌جایی خرده‌های حفاری و ذرات جامدات چاه، کنترل فشارهای زیرسطحی و به حداقل رساندن آسیب سازند است[۱۲،۱۳]. علاوه‌بر این، سیالات حفاری برای کاهش اصطکاک و خوردگی رشتهٔ حفاری و مته و هم‌چنین ایجاد شناوری و پایداری دیواره چاه استفاده می‌شوند. آخرین و یکی از مهم‌ترین کاربردهای سیالات حفاری، اطلاعات مهمی است که در مورد سازندهای حفاری‌شده ارائه می‌دهد[۱۴،۱۵].

پلیمرها افزودنی‌هایی هستند که در سیال حفاری پایه‌آبی به‌منظور بهبود خاصیت رئولوژیکی مانند گران‌روی ظاهری، گران‌روی پلاستیکی، نقطهٔ واروی یا تسلیم و یا کنترل افت صافاب به‌کار می‌روند[۱۶،۱۷]. از پلیمرهای طبیعی اغلب به‌دلیل وزن مولکولی بالا و سازگاری بیشتر با محیط زیست در فرمول‌بندی سیالات حفاری استفاده می‌شود؛ امّا محدودیت‌هایی در کنترل افت صافاب، اصلاح گران‌روی یا ایجاد مقاومت ژله‌ای مناسب در محیط‌های شور و یا با دما و فشار بالا دارد[۱۵،۱۸،۱۹]. خصوصیات رئولوژیکی برای توصیف رفتار جریان سیالات حفاری استفاده می‌شود؛ این درحالی است که تصحیح خواص سیال حفاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشخصات در افزایش بازده فرایند حفاری همیشه مورد توجّه بوده است[۲۰،۲۱]. با توجّه به بررسی‌های پیشین، بهترین روش بهبود خواص سیالات حفاری، استفاده از پلیمرهای کارامد و جدید در ترکیب سیالات حفاری است.

در مطالعات قبلی، تحقیقات آزمایشگاهی مستقلی برای بهبود خواص سیال حفاری و هم‌چنین مرورهای بر روی هریک از خواص یک سیال حفاری مانند: خواص رئولوژیکی، میزان صافاب، مقاومت در شرایط خاص عملیات حفاری، سازگاری با محیط زیست و غیره، انجام گرفته است و جای بررسی جامع نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و مرور گستردهٔ همهٔ خواص مورد نیاز سیال حفاری، خالی است. در این پژوهش، ضمن مطالعهٔ جامع و بررسی دقیق نقش سیالات حفاری و رئولوژی آن‌ها، آخرین تحقیقات و نتایج آزمایشگاهی منتشرشده، تجزیه و تحلیل شده است. به این منظور، پلیمرها یا سامانه‌های پلیمری و نانوذرات پلیمری مورد استفاده در مطالعات و آزمایش‌های قبلی و مرورهای انجام‌گرفته در حوزهٔ سیالات حفاری، با در نظر گرفتن آخرین یافته‌های آزمایشگاهی و فناوری موجود سیالات حفاری، مرور و جمع‌بندی شده است. در پایان این مقاله، دیدگاه و دورنمای مناسبی برای انتخاب و استفادهٔ سیال حفاری مطلوب و انجام تحقیقات آتی بر روی ترکیبات سیالات حفاری ارائه شده است.

۲. سیالات حفاری

کارایی و ایمنی فرایند حفاری به رفتار سیالات حفاری بستگی دارد. وظایف اولیهٔ سیال حفاری به عملیات مکانیکی حفاری چاه و برهمکنش آن با سازندها مربوط می‌شود. سیال حفاری که اغلب به‌عنوان گل حفاری شناخته می‌شود، درواقع یک سامانهٔ سیال ترکیبی همگن است که معمولاً از مایعات، جامدات و اجزای شیمیایی تشکیل شده است[۹،۲۲]. این سامانه‌های سیال، وظایف متعددی مانند انتقال خرده‌های حفاری به خارج چاه، خنک‌کردن، تمیزکردن و روان‌کاری مته و رشتهٔ حفاری[۲۳،۲۴]، حفظ پایداری دیوارهٔ چاه، کنترل فشارهای زیرسطحی، تحمل بخشی از وزن رشتهٔ حفاری با ایجاد نیروی شناوری[۲۵]، بهبود سرعت نفوذ، جلوگیری از اتلاف سیال با تشکیل کیک گل و جداسازی سازند و درنهایت ارائهٔ اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی سازندهای حفاری‌شده از راه خرده‌های حفاری را به‌عهده دارند[۴،۸،۱۴]. بنا بر عمل‌کرد

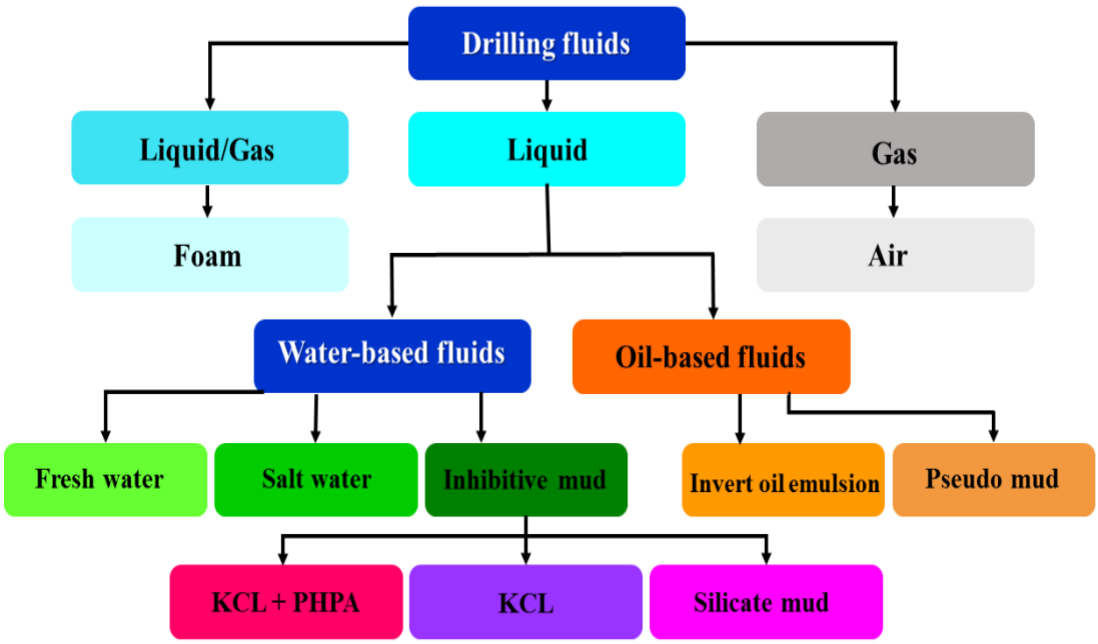
چندوظیفه‌ای سیال حفاری، ترکیب و فرمول‌بندی سامانه‌های پیچیده به‌منظور مقابله با نیاز محیط‌های مختلف سازندی، مهم و ضروری است.

چنان‌که در شکل (۱) قابل مشاهده است، سیالات حفاری بسته‌به سیال پایه، به انواع مختلفی مانند سامانه‌های گاز/مایع، مایع و گازی طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب سیال پایه به سطح عمل‌کرد، هزینه و البته عوامل و مقررات زیست‌محیطی بستگی دارد. هم‌چنین می‌توان سیالات حفاری را بر اساس میزان خاصیت قلیایی فاز سیال، نوع مواد افزودنی و پراکندگی آن‌ها تقسیم‌بندی کرد[۲۶،۲۷]. برای انتخاب ترکیب سیال حفاری، به درنظرگرفتن اطلاعات زمین‌شناسی و سازندهای میدان نفتی، داده‌های پتروفیزیکی، داده‌های حفاری فعالیت‌های میادین قبلی در منطقه و هم‌چنین نحوه و امکان دفع سیالات و پسماند حفاری نیاز است[۹،۲۸،۲۹].

در سامانهٔ سیالات مبتنی‌بر گاز یا هوا، وسیلهٔ انتقال خرده‌های حفاری جریانی با سرعت بالا از هوا، نیتروژن یا گاز طبیعی است.

استفاده از گاز در عملیات حفاری، منجر می‌شود که هرزروی گردش سیال به حداقل برسد و هم‌چنین عمر مته به‌دلیل راندمان بالای خنک‌کاری آن بیشتر شود و خرده‌های حفاری را به‌سرعت از پایین چاه به سطح منتقل می‌کند؛ امّا برای اطمینان از مدیریت ایمن و بازگشت خرده‌ها و سیالات تشکیل‌شده در مسیر چاه به سطح، نیازمند تجهیزات تخصصی است. هم‌چنین مخازن، کمپرسورها، خطوط لوله و شیرهای مخصوص گاز برای ایجاد جریان مناسب سیال حفاری گازی یا فوم لازم است[۳۰].

سامانهٔ سیالات مبتنی‌بر آب[1]، متشکل از ذرات جامد معلق در سیال پایه هستند که می‌تواند آب شیرین، آب دریا، نمک اشباع یا آب نمک سنتزی باشد[۱۹،۳۰]. این سیالات حفاری کم هزینه، سازگار با محیط زیست و پرمصرف‌ترین سیال حفاری در خشکی و فراساحل هستند[۳۱]. تقریباً ۸۰ درصد از کل چاه‌های نفت و گاز با استفاده از این سیالات حفر می‌شوند[۳۲].



شکل ۱. تقسیم‌بندی سیالات حفاری.

Figure 1. Classification of drilling fluids.

1. Water Based Fluids (WBFs)

سامانهٔ سیالات مبتنی‌بر نفت[1] که امروزه به‌کار می‌روند، به‌طور عمده از دیزل یا روغن معدنی تشکیل شده است. در این سیالات حفاری ذرات جامد معلق در روغن، فاز پیوسته را تشکیل می‌دهد؛ در حالی که آب یا آب نمک در روغن امولسیون می‌شود. برتری اصلی سیالات حفاری مبتنی‌بر نفت، این است که دارای خواص بازدارندگی[2] هستند و در جایی که مقاطع شیل‌های حساس به آب باید حفاری شوند، پایداری حرارتی و رئولوژیکی مناسبی دارند[۸،۳۰،۳۳]. در سامانهٔ سیالات پایه‌مصنوعی، فاز پیوستهٔ سیال از ترکیبات آلی غیرمحلول در آب تشکیل شده است و هیچ‌کدام از سیال پایه و یا مواد افزودنی، منشأ آلی ندارند[۳۴]. در جدول (۱) خلاصه‌ای از سیالات حفاری برحسب اجزای افزوده شده، مشاهده می‌شود.

انتخاب سیال حفاری مناسب برای هریک از شرایط مختلف حفاری امری پیچیده است که شامل تعیین ویژگی‌های سیال حفاری برای انجام وظایفی است که پیش‌تر توضیح داده شد و هم‌چنین مطابقت با طراحی چاه، مقررات زیست‌محیطی، امکانات و محدودیت‌های مالی است[۹]. در مقابل، برخی از خواص سیال حفاری محدود نیستند و بلکه قابل تنظیم و تغییر هستند؛ مانند چگالی، گران‌روی، تنش برشی، خاصیت قلیایی، فیلتراسیون، میزان محتوای جامدات و خواص شیمیایی[۸،۳۰،۳۵].

۳. رئولوژی سیالات حفاری

توانایی سیالات حفاری برای انجام عمل‌کرد چندگانهٔ خود تا حد زیادی به خواص رئولوژیکی آن‌ها بستگی دارد[۳۶]. سیالات به‌طورکلی بر اساس رفتار رئولوژیکی خود به سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم می‌شوند. نیوتنی‌بودن سیال مشخص می‌کند که تنش برشی آن به‌طور مستقیم با نرخ برشی متناسب است و می‌توان آن را از رابطهٔ زیر حساب کرد:

$$\tau = \mu.\dot{\gamma} \qquad (۱)$$

جدول ۱. تقسیم بندی سیالات حفاری برحسب اجزا.

Table 1. Classification of drilling fluids according to components.

Gas	Water	Oil	Synthetic
Dry gas: Air, nitrogen, natural gas, exhaust gas, combustion gas	Fresh water	Oil: Diesel or crude	Synthetic-based fluids: Synthetic hydrocarbons, ethers, esters, and acetals.
Mist: Droplets of water or mud carried in the air stream	Solution: including heterogeneous solid particles, Solids ,Surfactant ,colloids and polymers	Oil mud: A sable oil-base drilling fluid contains: Water-emulsifying agents; Suspending agents; Filtration-control agents; Contains cuttings from the formation drilled; May contain barite to raise density	
Foam: Air bubbles surrounded by a film of water containing a foam-stabilizing surfactant	Emulsion: An oily liquid maintained in small droplets in water by an emulsifying agent		
Stable foam: Foam containing film-strengthening materials, such as organic polymers and bentonite	Mud: A suspension of solids (clays, barite, small cuttings) in any of the above liquids		

1. Oil Based Fluids (OBFs)

2. Inhibiting Properties

که در آن τ تنش برشی، $\dot{\gamma}$ سرعت برش و μ گران‌روی است[۳۷]. آب، نفت سبک و گلیسیرین نمونه‌هایی از سیالات نیوتنی هستند. در سیالات حاوی رس یا ذرات کلوئیدی، تنش برشی به نسبت مستقیم با سرعت برش افزایش نمی‌یابد و سیال غیرنیوتنی نامیده می‌شود. چنین سیالی باعث افزایش راندمان جابه‌جایی سیالات دیگر می‌شود و هم‌چنین توانایی حمل بسیار خوب ذرات را دارد[۳۸]. درنتیجه، بیشتر سیالات حفاری از سیالات غیرنیوتنی و از نوع تیکسوتروپیک هستند[۳۹]. مدل‌های ریاضی مختلفی وجود دارد که رئولوژی سیالات غیرنیوتنی را توصیف می‌کند؛ شناخته‌شده‌ترین و رایج‌ترین آن‌ها در مهندسی سیالات حفاری عبارت است از[۵۷]:

$$\tau = k.\dot{\gamma}^{n} \qquad (۲)$$

که در آن n شاخص بدون بعد رفتار جریان سیال است که تمایل یک سیال به نازک‌شدن برشی[1] را نشان می‌دهد. هم‌چنین k شاخص پایداری سامانه و τ تنش برشی با واحد $lb/100\ ft^2$ است. محدودیت‌های مشخصات $k>0$ و $0<n<1$ هستند[۵۷].

رابطهٔ (۳) مدل پلاستیک بینگهام را نشان می‌دهد که در آن τ تنش برشی، τ_o نقطهٔ تسلیم یا تنش تسلیم است که با واحد Pa اندازه‌گیری می‌شوند. هم‌چنین μ_p گران‌روی پلاستیک با واحد cp $(dyne.s/cm^2)$ و $\dot{\gamma}$ نرخ برشی با واحد S^{-1} است. این مدل اغلب برای توصیف خواص رئولوژیکی سیالات حفاری استفاده می‌شود[۴۰،۵۷].

$$\tau = \tau_o + \mu_p.\dot{\gamma} \qquad (۳)$$

رابطهٔ (۴) مدل هرشل- باکلی را نشان می‌دهد که مدل‌های پاور لا[2] و بینگهام- باکلی را ترکیب می‌کند. محدودیت‌های مشخصات $k>0$، $\tau\dot{\gamma}\geq 0$ و $0<n<1$ هستند[۲۰].

$$\tau = \tau\dot{\gamma} + k.\dot{\gamma}^{n} \qquad (۴)$$

رابطهٔ (۵) مدل کَسُون را نشان می‌دهد که جریان سیالات ویسکوالاستیک را با انتقال تدریجی‌تر از ناحیهٔ نیوتنی به ناحیهٔ غیرنیوتنی توصیف می‌کند. استفاده از این مدل‌ها مستلزم اندازه‌گیری تنش برشی در دو یا چند نرخ برشی است و با کمک این اندازه‌گیری‌ها می‌توان تنش برشی را در هر نرخ برشی دیگری حساب کرد[۳۰،۴۱].

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{\dot{\gamma}}} + \sqrt{\mu_p \times \dot{\gamma}} \qquad (۵)$$

ترکیب افزودنی‌های مخصوص در سیالات حفاری، فرایندی رایج برای اصلاح و بهبود خواص انواع سیالات حفاری است. مواد افزودنی برای کنترل چگالی که مواد وزن‌افزا نام دارند و رایج‌ترین آن‌ها باریت، هماتیت، کربنات کلسیم و پلیمرها هستند[۴۲]. چگالی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که انتخاب نوع سیال حفاری را تعیین می‌کند و کمترین مقدار آن ممکن است برابر با چگالی هوا باشد و حداکثر مقدار آن می‌تواند دو و نیم برابر چگالی آب در شرایط استاندارد باشد. مخلوط‌کردن باریت با آب می‌تواند گل‌های حفاری را با محدودهٔ چگالی ppg ۹ تا ۱۹ تشکیل دهد[۹،۳۰]. همان‌طورکه در جدول (۲) قابل مشاهده است، چگالی اجزا و افزودنی‌های پرکاربرد در سیالات و گل‌های حفاری در واحدهای مختلف و میدانی درج شده است.

جدول ۲. چگالی اجزای رایج سیالات حفاری.

Table 2. Density of common components of drilling fluids.

Material	*Unit*				
	g/cm^3	lb/gal	lb/ft^3	lb/bbl	Kg/m^3
Water	1	8.33	62.4	350	1000
Oil	0.8	6.66	50	280	800
Barite	4.3	35.8	268	1500	4300
Cl_2	2.5	20.8	156	874	2500

گران‌روی یکی دیگر از ویژگی‌های سیالات حفاری است که باید کنترل شود که بدین منظور از رس‌های تجاری استفاده می‌شود. عوامل کنترل گران‌روی به‌نام ویسکوزیفایر[3] به سیالات حفاری اضافه می‌شود تا ظرفیت حذف خرده‌های حفاری از پایین مته را بهبود بدهد و توانایی آن‌ها را در معلق‌کردن خرده‌ها و مواد وزنی، زمانی‌که گردش گل متوقف شده است افزایش دهد[۴۳،۴۴]. رایج‌ترین مواد کاربردی به‌عنوان ویسکوزیفایر رس، پلیمرهای طبیعی یا مصنوعی

1. Shear Thinning
2. Power Law
3. Viscosifiers

هستند. شناخته‌شده‌ترین این مواد بنتونایت (آلومینوسیلیکات سدیم یا کلسیم)، سپیولیت[1] (سیلیکات منیزیم آبدار)، آتاپولژیت[2] (آلومینیوم سیلیکات منیزیم آبدار) و رس‌های آلی‌دوست هستند[۸،۴۵]. در ادامه به بررسی پلیمرها یا سامانه‌های پلیمری کارا در سیالات حفاری پرداخته شده است.

۴. پلیمرهای بهبوددهندهٔ خواص سیالات حفاری

۴-۱ سامانهٔ پلیمری مبتنی‌بر آب دریا و سازگار با محیط زیست

حفاری چاه‌های عمیق در محیط دریایی، حساس و پیرو قوانین سخت‌گیرانهٔ حفاظت از محیط زیست و مقررات مربوط به آن است که نظارت و دقت ویژه‌ای را برای اتخاذ سیالات حفاری می‌طلبد. یک سامانهٔ پلیمری پایه‌آبی جدید و سازگار با محیط زیست برای برنامه‌های حفاری با مقاومت دمایی تا ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس و میزان سمیت بیولوژیکی LC_{50} بیش از ۱۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ایجاد شده است. چنان‌که در جدول (۳) ارائه شده است، این سامانهٔ جدید، متشکل از دو جزء اصلی پلیمری برای حفظ خواص گران‌روی و کنترل فیلتراسیون (صافاب) دما بالای به‌همراه یک عامل اتصال نانو[3] مخصوص، بازدارندهٔ شیلی گلایکول، روان‌کنندهٔ فشار بالا و مواد وزنی ازجمله باریت یا فرمات پتاسیم است که عمل‌کرد عالی را برای انواع محیط‌های حفاری نشان می‌دهد[۴۶]. این سامانه که شامل دوغاب پایه دارای رنگی روشن و غیرسمی برای محیط دریایی است، می‌تواند یکراست در دریا تخلیه شود. ویژگی سازگاری با محیط‌زیست یک برتری قابل توجّه نسبت به سایر سامانه‌های سیالات حفاری حرارت بالا مانند سیال حفاری سولفوناته و سیالات حفاری پایه‌نفتی است که به‌طور معمول نیاز به استفاده از تعداد زیادی مواد افزودنی سمی دارند[۴۷].

سامانهٔ پلیمری سنتزی به‌منظور عمل‌کرد مناسب در آب‌های عمیق نیز توسعه داده شده است که متشکل از دو مادهٔ پلیمری مصنوعی با دمای بالا، همراه با یک مادهٔ مخصوص نانوپلاگ‌کننده، بازدارندهٔ شیل گلایکول، روان‌کنندهٔ فشار شدید و مواد وزنی مانند باریت و فرمات است[۴۸]. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که سیال حفاری دارای ویژگی‌های فنی چون مقاومت دمایی ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس، زمان پایداری حرارتی برابر با ۷۲ ساعت در برابر دمای ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس، افت صافاب HPHT برابر با ۱۵ الی ۲۵ میلی‌لیتر، میزان سمیت بیولوژیکی آبزی LC_{50} بالاتر از ۱۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، باکتری‌های درخشان EC_{50} بالاتر از ۳۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است [۴۹،۵۰]. نتایج آزمایش از یک چاه عمیق در دمای بالا در میدان نفتی Bohai با عمق چاه ۶۰۶۶ متری و دمای ته‌چاهی ۲۰۴ درجهٔ سلسیوس نیز ارائه شده است [۴۸].

جدول۳. میزان عوامل بهبوددهندهٔ خواص گل حفاری پیشنهادی[۴۶].

Table 3. The amount of factors that improve the properties of the proposed drilling mud [46].

Name of treatment agent	Dosage	Function
Polymer filtrate loss agent BDF-100S	0.5-2.0%	Resistance temperature up to 200 °C, reduce water loss and improve the quality of mud cake
Polymer viscosifier HVIS	0.2-1.0%	Resistance temperature up to 200°C, increase viscosity and yield point
Nano plugging agent PNF	0.5-2.0%	Reduce water loss, block micro pores and improve mud cake quality
Extreme pressure lubricant HGRH-1	1.0-3.0%	Vegetable oil lubricants, improve lubrication performance
Shale inhibitor Glycol	1.0-3.0%	Alcohols with cloud point to improve the anti collapse performance
High temperature stabilizer BDTS-1	0.2-0.5%	Organic zirconium salts to slow down the thermal degradation of polymers at high temperature

1. Sepiolite
2. Attapulgite
3. Nano-Plugging

۲-۴ پلیمر گل حفاری کاتیونی و آنیونی

سامانه‌های سیالات حفاری حاوی پلیمرهای کاتیونی و آنیونی را می‌توان از دو بعد اصلی بررسی کرد:

(۱) با توجّه به خاصیت بازدارندگی کم رس، منبسط، پراکنده و به‌داخل سیالات حفاری وارد می‌شود و باعث افزایش محتوای کلوئیدی و جامد آن می‌شود، میزان ناپایداری خواص رئولوژیکی ساختار را به حداکثر می‌رساند و به ناپایداری چاه می‌افزاید که این امر بر روند حفاری تأثیر منفی می‌گذارد[۵۱]. وجود رس انبساطی و پراکنده به رقیق‌سازی دوره‌ای گل نیاز دارد؛ زیرا تجهیزات تصفیه ناکارامد می‌شوند. رقیق‌سازی دوره‌ای باعث مصرف بیش از حد مواد شیمیایی و حجم اضافی گل مورد استفاده و کاستی‌های دیگر می‌شود[۵۲].

اساس بازدارندگی رس با پلیمرهای کاتیونی و آنیونی تفاوت دارد؛ طبیعت رس این است که مناطق مثبت و منفی در سطح ذرات وجود دارند و به‌طور فعال با مولکول‌های آب درگیر هستند. کاتیون‌ها و یا آنیون‌ها در مناطق فعال جذب می‌شوند و این منجربه خنثی‌سازی بار و به حداقل رساندن برهم‌کنش بین رس و آب می‌شود. تماس سنگ‌های رسی با سیال عملیاتی مبتنی‌بر پلیمر آنیونی منجربه اثر متقابل الکترواستاتیک منطقهٔ رسی کاتیونی با پلیمر آنیونی می‌شود که به جذب ضعیف آب در سطح باردار می‌انجامد. از آنجایی که مناطق آنیونی در سطح خاک رس غالب هستند، آب از راه این مناطق، فعالانه به‌درون سنگ نفوذ می‌کند[۵۳،۵۴].

(۲) هنگامی‌که گل حفاری با رس تماس پیدا می‌کند، رس آبدار تولید می‌شود. بدین صورت که مولکول‌های آب به‌درون فضای متخلخل ذرات رس نفوذ می‌کنند. برهم‌کنش مولکول‌های نفوذیافتهٔ آب با مواد معدنی رسی، رفتار رس را کنترل می‌کند[۵۵]. اگر صافاب نفوذیافته با عناصر ساختاری رس، اثر متقابل داشته باشد و پیوند پایدار را حفظ کند، پایداری چاه در شرایط وجود رس حفظ می‌شود. به‌دلیل خواص بازدارندگی انبساط رس و پراکندگی صافاب رس حفاری‌شده به حداقل می‌رسد که اجازه می‌دهد تا ضریب رئولوژیکی ساختار پایدار حفظ شود و حجم گل اضافی، هزینه‌های تصفیه و مواد شیمیایی را کاهش دهد. بسیاری از محققان و متخصصان بر این عقیده هستند که افزایش خاصیت بازدارندگی گل باعث افزایش پایداری چاه می‌شود. در عمل اگر پایداری رس از بین برود، تثبیت چاه با گل بازدارنده، به رفتار و چگونگی تخریب رس بستگی ندارد[۷،۵۶]. هم‌چنین تغییر شکل و تخریب سنگ‌های رس از دو راه پلاستیکی (رس) یا شکننده (شیل، آرگیلیت) مشخص شده است[۵۳].

۳-۴ پلیمر تراویدهٔ ترمینالیا مانتالی

از پلیمرهای طبیعی به‌دلیل وزن مولکولی زیاد و سازگاری با محیط‌زیست در فرمول‌بندی سیالات حفاری استفاده شده است؛ اما محدودیت‌هایی مانند کنترل از دست‌رفتگی مایعات، اصلاح گران‌روی یا قدرت ژل کافی در محیط‌های شور و حرارتی دارند[۱۵،۱۹]. در این قسمت به بررسی مادهٔ تراویدهٔ ترمینالیا مانتالی[1] به‌عنوان عامل ویسکوزیفایر در فرمول‌بندی سیال حفاری پرداخته شده است. مطالعات نشان داده‌اند که ساختار مولکولی این تراویده، حاوی پلی‌ساکاریدهای بسیار شاخه‌ای متشکل از اسیدهای گالاکتورونیک، گلوکورونیک و متیل گلوکورنیک و هم‌چنین گالاکتوز، آرابینوز، رامنز، مانوز و گزیلوز است؛ امّا قندهای طبیعی و اورونیک اسید می‌تواند متناسب با نوع صمغ ترمینالیا متفاوت باشد[۵۷] و این ارتباط تراویدهٔ ترمینالیا مانتالی، آن را به‌عنوان عامل ویسکوزیفایر در گل حفاری نشان دهد که در جدول (۴) این خصوصیات و ویژگی‌ها به‌تفصیل بیان شده است.

جدول ۴. خواص شیمیایی و فیزیکی تراویدهٔ ترمینالیا مانتالی[۵۷].

Table 4. Chemical and physical properties of Terminalia Mantaly gum [57].

Specifications	Particle diameter (µm)	Angle of repose(°)	Particle density	Bulk density	Increased bulk density	Hausner ratio	Carr index	Water absorption capacity
Terminalia Mantaly	263.10	57.80	1.32	0.090	0.139	1.54	35	10.71

1. Terminalia Mantaly (TM gum)

اثرات غلظت پلیمر، دما، pH و شوری بر خصوصیات رئولوژیکی این زیست‌پلیمر جدید، بررسی شده و نتایج گویای آن است که با افزایش غلظت پلیمر ۱ و ۲/۵ درصد وزنی، خصوصیات رئولوژیکی (گران‌روی آشکار، گران‌روی پلاستیکی و نقطهٔ تسلیم) زیست‌پلیمر افزایش می‌یابد. در غلظت‌های پلیمری بررسی‌شده، افزایش دما (۸۰ تا ۱۵۰ درجهٔ فارنهایت)، منجربه کاهش جزئی خصوصیات رئولوژیکی پلیمر می‌شود. در غلظت ۲ درصد وزنی پلیمر، افزایش شوری منجربه کاهش جزئی خصوصیات رئولوژیکی آن شد؛ درحالی‌که در غلظت ۱/۵ درصد وزنی پلیمر، افزایش pH (۴-۱۰) تغییر معناداری در خصوصیات رئولوژیکی نشان نمی‌دهد. تنش برشی با افزایش نرخ برش افزایش می‌یابد و از مدل پلاستیکی بینگهام تبعیت می‌کند[۵۷]. نتایج نشان می‌دهد که این پلیمر دارای مقاومت قلیایی خوبی در pH بالاتر از ۷ و خصوصیات رئولوژیکی پایدار در افزایش شوری و دما است. این امر به‌دلیل پایداری نیروهای دافعهٔ پایدار پلی‌الکترولیت با بار منفی پلیمر به‌هنگام افزایش شوری است[۵۷،۵۸].

۴-۴ سامانه‌های پلیمری - مواد فعال سطحی[1]

در عملیات حفاری، استفاده از سامانه‌هایی که پایهٔ آنها مواد فعال سطحی است، به‌دلیل ایجاد مشکلاتی مثل هرزروی سیال حفاری و صافاب و ظرفیت بسیار کم در حمل و انتقال خرده‌های حفاری، استفادهٔ محدود و کمی دارند. باتوجّه به سامانه‌های پلیمری-مواد فعال سطحی، یک مولکول مادهٔ فعال سطحی به‌سمت مولکول پلیمر می‌رود، جذب می‌شود و میسل به‌وجود می‌آید. نیروهای اصلی در جذب، آب‌گریز هستند و وجود ذرات با بار مخالف برهم‌کنش‌ها را افزایش می‌دهد[۵۹].

مطالعات بر روی اثرات صمغ زانتان در کاهش هرزروی سیالات حفاری نشان داده که این ماده با افزایش گران‌روی، باعث کاهش‌دادن هرزروی سیالات حفاری می‌شود. هم‌چنین، بهترین ترکیب کنترل‌کنندهٔ سیال حفاری، ترکیبی دارای کلسیم کربنات و پلیمرهایی مانند نشاسته و صمغ زانتان است که علاوه‌بر ایجاد کیک گل مناسب و کاهش‌دادن هرزروی سیالات حفاری درون سازند، سبب افزایش سرعت حفاری و کاهش هزینه‌ها می‌شود[۶۰].

وجود مولکول‌های پلیمری، باعث ایجاد تغییراتی در محلول و خواص فصل مشترک مادهٔ فعال سطحی در مقایسه با سامانه‌های بدون پلیمر می‌شود. یکی از فواید افزودن مواد فعال سطحی به سیال حفاری پلیمری، افزایش خاصیت روان‌کاری سیال حفاری پلیمری است که آزمایش‌ها نشان داده افزودن مادهٔ فعال سطحی می‌تواند خاصیت روغن‌کاری و روان‌کاری سیال حفاری را به‌اندازهٔ مناسبی افزایش و ضریب اصطکاک را کاهش دهد و از به‌وجود آمدن مشکلات رایج عملیات‌های حفاری مثل برخورد لوله‌های حفاری با دیوارهٔ چاه جلوگیری کند[۶۱]. در آزمایش‌های سایر محققان نیز آمده که برای به‌دست آوردن مقاومت حرارتی مناسب و کنترل مقدار صافاب گل، به‌میزان بسیار کمی مواد فعال سطحی نیاز است و میزان استفادهٔ زیست‌پلیمر را هم به‌شدت کاهش می‌دهد[۶۲].

صمغ زانتان یک پلی‌ساکارید خارج سلولی با پایداری حرارتی ۲۵۰ درجهٔ فارنهایت است. این ماده، خصوصیات رئولوژیکی ویژه‌ای دارد و به‌عنوان پایدارکننده، امولسیون‌کننده، سوسپانسیون‌کننده و قوام‌دهنده کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف دارد[۶۳] هم‌چنین از پرکاربردترین پلیمرها در سیالات حفاری است[۶۴]. مادهٔ فعال سطحی تالوآمین پلی‌اتیلن گلایکول به‌منظور افزایش غلظت و افزایش گران‌روی و خصوصیات ژلی سیال حفاری به‌کار می‌رود. تالوآمین، ماده‌ای غیریونی است که همانند بقیهٔ مواد فعال سطحی غیریونی، ترکیبی با تعداد متفاوت واحدهای اتیلن‌اکساید است و زمانی‌که غلظت مادهٔ فعال سطحی از ۵ درصد وزنی بیشتر شود، تمایل به جدایی فازها به‌ویژه در محلول‌های نمکی بیشتر خواهد شد[۱۱]. استفاده از مادهٔ فعال سطحی کاتیونی ستیل تری-متیل آمونیوم بروماید[2] در ترکیب با زانتان، ظرفیت نگهداری و حمل سیال حفاری را بدون تأثیر منفی بر خواص سیال حفاری در پی داشت. این مادهٔ فعال سطحی علاوه‌بر سازگاری با سایر مواد افزودنی سیال حفاری، نشان داد که در سیالات غنی از اکسیژن به‌خوبی می‌تواند از تخریب زیستی زیست‌پلیمرها جلوگیری کند و از آسیب به سیال حفاری جلوگیری کند. در شوری‌ها و دماهای بالا نیز مقاومت خوبی را در سامانه‌های سیالات حفاری پلیمری نشان داد[۶۵].

۴-۵ پلیمر پلی‌آکریل آمید آبکافت‌شدهٔ جزئی (PHPA)

یون منیزیم، کلسیم و سدیم و نمک سدیم‌کلرید جاذب آب هستند

1. Surfactants

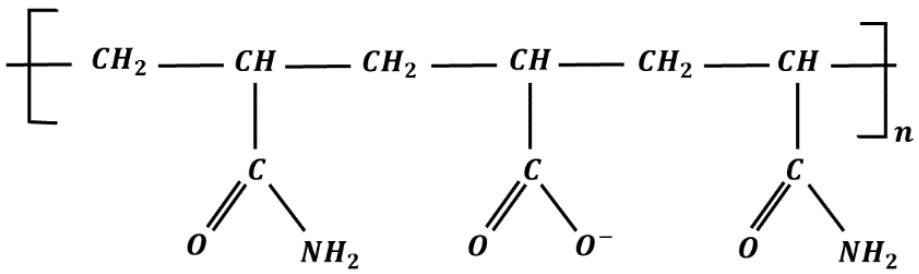
2. Cetyltrimethylammoniumbromide (CTAB)

و از ترکیب پلیمر و آب جلوگیری می‌کنند و تغییرات pH از مهم‌ترین تغییراتی است که سیالات حفاری به‌دست داده‌اند. یون‌های کلسیم و منیزیم به‌دلیل داشتن ظرفیت اتمی بیشتر، توانایی جذب آب را بیشتر از بقیهٔ یون‌ها دارند؛ از همین رو جذب آب پلیمر در کنار آن‌ها بیشتر از سایر موارد رخ می‌دهد[۶۶]. پلی‌آکریل آمید آبکافت‌شدهٔ جزئی[1] (PHPA)، ازجمله مواد افزوده‌شده در سیالات حفاری حاوی بنتونایت است که برای پایدارکردن شیل‌ها توصیه شده است. چنان‌که در شکل (۲) ساختار مولکولی پیداست، پلی‌آکریل آمید آبکافت‌شدهٔ جزئی (PHPA) متشکل از ۶۵ تا ۷۰٪ آکریل آمید و مابقی آکریلات که در محدودهٔ پلیمرهای با وزن مولکولی سنگین دسته‌بندی می‌شود و به‌عنوان پلیمر پایدارکنندهٔ شیل‌ها با خاصیت کپسول‌کنندگی ذرات جامد در سامانه‌های آب شیرین و آب شور استفاده می‌شود[۶۷،۶۸].

محصول نهایی PHPA همان پلیمری است که از بَسپارش آریل‌آمید- آکریلات حاصل می‌شود. خاصیت‌های PHPA متأثر از وزن مولکولی و نسبت گروه کربوکسیل به گروه آمید است. لازم است آکریل‌آمید با سدیم آکریلات کوپلیمر شود تا توانایی انحلال در آب را داشته باشد. کوپلیمر شدن با سدیم‌اکریلات، پلی‌آکریل آمیدی را خلق می‌کند که آنیونی است و قابلیت حل‌شدن در آب را دارد. با توجّه به پیوند کربن-کربن، پلیمر توانایی تحمل حرارت بسیار بالایی دارد و در مقابل باکتری‌ها نیز دارای مقاوت بالایی است[۶۹].

۶-۴ پلیمر کربوکسی متیل سلولز

کربوکسی‌متیل سلولز[2] (CMC) از مشتقات سلولز و نتیجهٔ استری یا اتری‌شدن گروه‌های هیدروکسیل موجود در زنجیرهای سلولز است[۷۰]. برای پایدارسازی شیل پلیمرهای سلولزی کاتیونی که دارای گروه‌های آمونیوم چهار بار مثبت‌اند، مؤثرتر از مشتقات سلولزی آنیونی یا غیریونی هستند. علت آن را در کاتیون‌هایی که توانایی بی‌اثر کردن بارهای منفی موجود در سطح شیل را دارند، می‌توان جست‌وجو کرد که نتیجهٔ آن پایداری بیشتر شیل است[۷۱]. هم‌چنین گروه‌های کاتیونی به‌موجب تمایلی که به واکنش با سطح با بار منفی دارند، در سطح شیل جذب می‌شوند و فیلمی را در سطح شیل به‌وجود می‌آورند که مانع از نفوذ آب به‌درون سازند شیلی می‌شود. هم‌چنین به‌منظور جلوگیری از واکنش پلیمرهای کاتیونی با سایر افزودنی‌های سیالات حفاری می‌توان از پلیمرهای دوخصلتی محلول در آب که هر دو گروه کاتیون و آنیونی را دارا هستند، بهره برد (شکل (۳)) که با پیوندزدن کومونومرهای کاتیونی برروی کربوکسی‌متیل سلولز ایجاد می‌شود[۷۲].

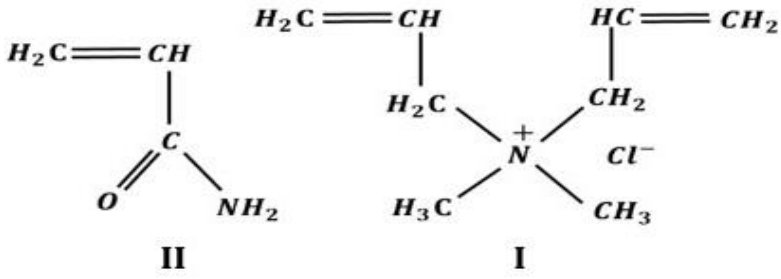


شکل ۲. ساختار مولکولی پلی‌آکریل آمید آبکافت‌شدهٔ جزئی (PHPA) [۶۷،۶۸].

Figure 2. Molecular structure of partially Hydrolyzed Polyacrylamid [67,68].

1. Partially Hydrolyzed Polyacrylamide (PHPA)

2. Carboxymethyl Cellulose (CMC)



شکل ۳. ساختار (*I*) مونومر دی‌آلیل دی‌متیل آمونیوم‌کلرید - ساختار (*II*) مونومر آکریل آمید[۷۲].

Figure 2. Diallyldimethyl ammonium chloride (*I*) - Acrylamide monomer (*II*) [72].

۴-۷ پلیمر نشاسته

نشاسته، پودری سفید، نرم و بی‌مزه است که تمام گیاهان سبز، آن را تولید می‌کنند و ازنظر شیمیایی ترکیب آلی پیچیده‌ای است و از لحاظ زیست‌شیمی، یک پلی‌ساکارید متشکل از دو نوع پلیمر کربوهیدرات به‌نام آمیلوز و آمیلوپکتین است. معمولاً فقط نشاستهٔ سیب زمینی و گندم از بین تمام نشاسته‌های موجود- به‌دلیل اصلاح و ایجاد خواص مطلوب- در سیالات حفاری پایه‌آبی استفاده می‌شود و بقیهٔ نشاسته‌ها استفادهٔ کمتری دارند. در مواقعی که هرزروی سیال حفاری اهمیت دارد، مانند چاه‌های عمیق و چاه‌هایی که در آن‌ها باید از سیال حفاری سنگین استفاده شود و هم‌چنین هنگامی‌که نقطهٔ تسلیم اهمیت چندانی ندارد، از نشاستهٔ سیب‌زمینی استفاده می‌شود و در مقابل، در مواقعی‌که کنترل هرزروی سیال چندان مهم نیست، مانند حفاری‌های سطحی و کم‌عمق، می‌توان از نشاستهٔ گندم بهره گرفت[۷۳].

نشاستهٔ طبیعی، انحلال‌پذیری بسیار کم، مقاومت باکتریایی و تحمل دمایی پایینی دارد که می‌توان از کوپلیمرهای پیوندی نشاسته به‌عنوان کنترل‌کنندهٔ هرزروی سیال حفاری، غلظت‌دهنده و بازدارندهٔ شیل در سیالات حفاری استفاده کرد. مطالعات نشان داده است که می‌توان از مونومرهای آکریل آمید و مخلوط آن با لیگنوسولفونات، آکریل اسید، پروپان سولفونیک اسید و ایتاکونیک اسید به‌عنوان مونومر پیوندی استفاده کرد[۷۴].

۴-۸ سامانهٔ پلیمری برای کاهش رس آلی‌دوست در سیالات حفاری پایه‌نفتی- معدنی

رس‌های آلی‌دوست به‌طور گسترده به‌عنوان مادهٔ اولیه برای افزایش گران‌روی در سیالات حفاری پایه‌نفتی و سیالات حفاری سنتزی، استفاده می‌شود. این مواد شیمیایی، مستعد لایه‌بندی در شرایط خاص، زمان واکنش شیمیایی آرام، گردش‌های فشار بالا و چگالی‌های گردش معادل بالا[1] هستند. این سامانه‌های گل، هم‌چنین محدودیت‌های دمایی دارند. در دماهای بالا رقیق‌شدگی و افت انرژی حرارتی با تخریب کلوئیدها، همواره توانایی گران‌رو کردن آن‌ها را از بین می‌برد. در دماهای پایین، گران‌روی بیش از حد و به‌سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین یک سیال حفاری قابل قبول باید قدرت ژل بالاتری تولید کند و هم‌چنین پاسخ ثابتی نسبت به دما در طول یک چرخهٔ دمایی در عملیات حفاری داشته باشد. رس‌های آلی‌دوست مخلوط‌شده در سیالات حفاری پایه‌نفتی، گران‌روی یک‌نواخت و یا ویژگی‌های سوسپانسیون مناسبی ندارند. عمل‌کرد مشابه رس‌های آلی‌دوست در سیالات حفاری پایه‌آبی نیز به‌دلیل برهمکنش الکتریکی حداقلی بین ذرات است که باعث کاهش گران‌روی و قدرت ژلی سیال حفاری تحت شرایط فشار بالا و دمای بالا می‌شود.

۴-۹ سامانه‌های سیالات حفاری مبتنی‌بر نانوذرات پلیمری

استفاده از نانوذرات در فناوری سیالات حفاری یکی از پیشرفت‌های اخیر در صنایع نفت و حفاری است. نانوذرات با خواص منحصر به‌فرد مانند هدایت حرارتی بالا و سطح وسیع، می‌توانند چالش‌های سیالات حفاری را حل کنند. کاهش آسیب سازند و هزینهٔ کلی سیال حفاری، کنترل هرزروی سیال و کیک گل، حذف مواد خطرناک، بهبود انتقال حرارت، روان‌کاری و ارتقای خواص رئولوژیکی مانند گران‌روی، از برتری‌های اصلی استفاده از نانوذرات

1. Equivalent Circulating Density (ECD)

در سیالات حفاری است[۷۵،۷۶]. رایج‌ترین ترکیبات برای تولید نانوچندسازه‌ها مواد پلیمری هستند که بسته‌به ساختار نانوذره، از پلیمرهای مصنوعی یا طبیعی استفاده می‌شود. نانوذرات‌پلیمری در زمینه‌های مختلف علم و صنعت، ازجمله پزشکی و داروسازی، مواد رسانا، هوا و فضا، حسگرها، انرژی و نفت و گاز کاربرد دارند[۷۶].

۵. بحث و بررسی

به‌منظور پاسخ‌گویی به الزامات و حساسیت عملیات حفاری چاه‌های عمیق با دمای بالا و محافظت از محیط زیست در مناطق دریایی حساس، سامانهٔ پلیمری جدید متشکل از دو جزء اصلی پلیمری برای حفظ خواص گران‌روی و کنترل فیلتراسیون (صافاب) در دمای بالا به‌همراه یک عامل اتصال نانو مخصوص، بازدارندهٔ شیلی گلایکول، روان‌کنندهٔ فشار بالا و مواد وزنی است که سازگاری قابل قبولی برای شرایط ویژهٔ عملیات‌های حفاری دارد[۴۶،۴۸]. این سامانهٔ سیال حفاری پلیمری مبتنی‌بر آب دریا از پایداری حرارتی دمای بالا و عمل‌کرد بالای بازدارندگی شیل برخوردار است،که با توجّه به استفاده از افزودنی‌های غیرسمی، با محیط زیست سازگار است و می‌تواند مستقیم به دریا تخلیه شود. از سایر ویژگی‌های یگانهٔ این سامانهٔ سیال حفاری، می‌توان به مقاومت در برابر آلودگی سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید و روان‌کاری و بازدارندگی فوق‌العادهٔ آن نسبت‌به سیالات حفاری پایه‌نفتی اشاره کرد که در صورت استفاده از این روش می‌توان بیش از ۳۰٪ هزینهٔ کل سیال حفاری، ازجمله هزینهٔ آب شیرین، حمل و نقل و دفع پس‌ماند سیالات حفاری را کاهش داد[۴۸]. هم‌چنین در استفادهٔ عملیاتی نیز نتایج خوبی در میدان نفتی دریایی در Bohai حاصل شده است که عمیق‌ترین چاه ۶۰۶۶ متر و بالاترین دمای ته‌چاهی ۲۰۴ درجهٔ سلسیوس بود[۴۶].

با توجّه به غلبهٔ آنیونی در سطح رس، پلیمرهای کاتیونی در سطح آنیونی رس بهتر جذب می‌شوند؛ زیرا پلیمر کاتیونی توزیع‌شده به‌طور مساوی‌تری جذب می‌شود و فاز پایدار آب در نزدیک سطح رس به‌وجود می‌آید. جذب پلیمر کاتیونی، بار سنگ را خنثی می‌کند و برهم‌کنش الکترواستاتیک آن را با آب کاهش می‌دهد. لایهٔ آب، ساختاری پایدار تشکیل می‌دهد و پایشی را ایجاد می‌کند که مانع از نفوذ آب به‌درون رس می‌شود. تزریق الکترولیت‌های مختلف، لایهٔ آب ساختاریافته را تخریب نمی‌کند و بر پایداری آن می‌افزاید؛ بنابراین در سامانه‌های کاتیونی اثر بازدارندگی بهتری مشاهده می‌شود. همان‌طورکه در توصیف پلیمرهای آنیونی-کاتیونی اشاره شد، می‌توان نتیجه گرفت که حداقل شاخص انبساط رس به‌وسیلهٔ بازدارنده‌های انبساط و حداکثر آن به‌وسیلهٔ پلیمرها ارائه می‌شود. پایداری حداکثری رس می‌تواند با پیوند هیدروژنی بین ذره‌ای پایدار، حاصل شود؛ به‌شرط آن‌که فاصلهٔ بین ذرات حداقل باشد و ترکیب پلیمرها و بازدارنده‌ها می‌تواند امکان دست‌یابی به چنین حالتی را امکان‌پذیر کند.

بعضی افزودنی‌های شیمیایی غیرضروری هنگام به‌کارگیری پلیمرهای کاتیونی یا آنیونی شامل استات‌سدیم، نمک سدیم پلی‌آکریلیک اسید، سلولز چندآنیونی و تنظیم‌کننده‌های Remacid و pH هستند. لازم به ذکر است که استفاده از سولفات‌آلومینیوم و سدیم‌هیدرات برای تکمیل سیال حفاری و کنترل ضریب رئولوژیکی ساختار مفید نشان داده شده است[۵۳،۵۴].

خواص رئولوژیکی ترمینالیا مانتالی با افزایش غلظت زیست‌پلیمر افزایش می‌یابد و از مدل پلاستیکی بینگهام پیروی می‌کند. در غلظت‌های بالاتر زیست‌پلیمر افزایش دما تأثیر بسیار کمی را نشان داد. pH این زیست‌پلیمر در محدودهٔ قلیایی پایدار است[۵۷]. با توجّه به افزایش شوری در محلول، خواص رئولوژیکی این زیست‌پلیمر دافعهٔ الکترواستاتیک خوبی بروز داد که نشان می‌دهد می‌توان آن را به‌عنوان یک ویسکوزیفایر مناسب در موقعیت خاص عملیات‌های حفاری برای ترکیب در سیالات حفاری معرفی کرد.

بررسی ترکیب مادهٔ فعال سطحی و پلیمر نشان داد که خواص رئولوژیکی، تغییرات خطی بهتری در نرخ برشی بالا نسبت به مادهٔ فعال سطحی تنها دارد[۶۲-۶۴]. در نمونه‌هایی که غلظت مادهٔ فعال سطحی آن‌ها بالاست میزان صافاب بیشتری نسبت به سامانه‌های ترکیبی و سامانهٔ پلیمری دیده می‌شود و این سامانهٔ ترکیبی، کنترل صافاب بهتری را در اختیار می‌گذارد.

مولکول‌های پلیمر هیدراته که دارای اندازه‌های هیدرودینامیکی بسیار بزرگ‌تر و ترکیبات پلیمری مناسب هستند، با مولکول‌های آب و سطوح شیل برهمکنش دارند و شیل‌ها را از راه جذب پل- لخته‌سازی تثبیت می‌کنند. این سازوکار علت اثر جنبشی آب‌رسانی شیل در حضور تثبیت‌کننده‌های پلیمری شیل است که اغلب در مهار تورم شیل مؤثراند.

پلیمر PHPA باعث تقویت خواص رئولوژیکی (گران‌روی ظاهری، گران‌روی پلاستیک و نقطهٔ تسلیم) گل حفاری می‌شود. PHPA در برابر نمک NaCl تا حد مطلوبی خواص رئولوژیکی خود را حفظ می‌کند؛ امّا درمقابل غلظت بالای کاتیون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم‌کلرید و منیزیم‌کلرید کارایی و خواص رئولوژیکی اولیهٔ خود را تا حد زیادی از دست می‌دهد. هنگام بالا رفتن pH کارایی این پلیمر افزایش می‌یابد و خواص رئولوژی بهتری نشان می‌دهد. پلیمر PHPA توانایی تحمل دما تا ۱۵۰ درجهٔ سلسیوس را داراست[۶۷،۶۹]. PHPA به‌دلیل خاصیت کپسول‌کنندگی و افزایش گران‌روی تا حد خوبی از هرزروی سیالات حفاری درون سازند جلوگیری می‌کند و خاصیت بازدارندگی گل حفاری را نیز بالا می‌برد و می‌تواند به‌خوبی از پخش‌شدن خرده‌های حفاری، به‌خصوص در شیل‌ها به‌درون سیال حفاری، جلوگیری و به حفظ کیفیت خواص سیال حفاری کمک کند. بررسی ساختارهای شیمیایی تثبیت‌کننده‌های پلیمری شیل، نشان داده است که گروه‌های عاملی غالب آمید، الکل، اتوکسی اتر، پروپوکسی اتر، کربوکسیلات، استات و سولفونات هستند [۶۸]. به‌تازگی توجّه‌ها بر پلی (وینیل الکل)[1] معطوف شده است؛ زیرا یک پلیمر ارزان قیمت است و گروه‌های الکلی پلی (وینیل الکل) از توانایی بالایی در ایجاد پیوند هیدروژنی برخوردار هستند. پلی (وینیل الکل) با آبکافتِ استرهای پلی‌وینیل، مانند پلی‌وینیل استات یا با حذف گروه آلکیل از پلی‌وینیل آلکیل اترها ساخته می‌شود که در صورت استفاده به‌تنهایی در غلظت‌های پایین یا در ترکیب با کلرید پتاسیم، ۳۰٪ از PHPA در تثبیت شیل‌ها عمل‌کرد بهتری دارد[۲۱].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کوپلیمرهای پیوندی کربوکسی‌متیل سلولز، قابلیت پایدارسازی شیل بیشتری نسبت‌به نشاستهٔ خام و کربوکسی‌متیل سلولز اولیه دارند. از میان کوپلیمرهای پیوندی کربوکسی‌متیل سلولز، نمونهٔ اتصال کربوکسی‌متیل سلولوز و دی‌آلیل دی‌متیل آمونیوم‌کلرید بهترین کارایی را نشان می‌دهد به‌نحوی‌که علاوه‌بر کنترل هرزروی سیال، آبی را که از راه گل از دست می‌رود نیز کنترل می‌کند. این کوپلیمرها به‌شدت با سطح شیل واکنش می‌دهند و از آبدار شدن و درنتیجه تورم شیل، به‌خوبی جلوگیری و شیل را به‌خوبی پایدار می‌کنند. در مطالعات بعدی برای بررسی تأثیر کیک گل بر هرزروی سیال و آسیب سازند از مونومر آکریل‌آمید و کربوکسیل متیل سلولز استفاده شد که مونومر آکریل آمید با افزایش غلظت پلیمر، کاهش هرزروی سیال بیشتری را می‌دهد و هم‌چنین با افزایش دما و فشار مقادیر صافاب کمتری دارد. نتایج نشان می‌دهد که مونومر آکریل‌آمید هرزروی سیال را بهتر از کربوکسیل متیل سلولز کاهش می‌دهد و ضخامت کیک گل کمتری دارد. با افزایش غلظت کربوکسیل متیل سلولز، افزایش رفتار تیکسوتروپیک سیال حفاری رخ می‌دهد[۷۷]. در سامانه‌های پلیمری حاوی نشاسته با افزودن آنیون و نمک‌های دوظرفیتی مانند منیزیم و کلسیم، پیوندزنی کومونومرهایی مانند پروپان سولفونیک-اسید و ایتاکونیک‌اسید، بیشترین پایداری گران‌روی را با افزودن نمک‌ها ضمن حفظ پایداری حرارتی، نشان دادند که باعث کاهش هرزروی سیال و درنتیجه کاهش آلودگی محیط زیست می‌شود.

با تغییر از یک سیال حفاری پایه‌نفتی استاندارد، حاوی مواد افزودنی رس آلی‌دوست به یک سیال حفاری پایه‌نفتی بدون رس، عملیات حفاری از یک سیال حفاری بهره‌مند می‌شود که می‌تواند تحت شرایط برنامه‌ریزی‌شده و به‌طور مطلوب عمل کند، حجم سیال و مواد مورد نیاز را کاهش دهد، نرخ تولید بالاتر را به‌دلیل چگالی گردش معادل پایین‌تر رقم زند و یک کیک فیلتر نازک‌تر را که به عمل پاک‌سازی پرهزینه و زمان‌بر نیاز ندارد، تشکیل دهد[۷۸]. دو شاخص عمل‌کردی کلیدی برای سیالات حفاری پلیمری در درجهٔ حرارت‌های بالا وجود دارد؛ در ابتدا میزان پایداری گران‌روی سیال حفاری و میزان افت گران‌روی بعد از تحمل حرارت‌های بالا که به‌دلیل تأثیر در ته‌نشینی مواد وزنی، حساسیت عملیاتی خاصی را ایجاد می‌کند و دوم این‌که افت صافاب در فشارهای کم تا متوسط و افت صافاب در فشار و دمای زیاد برای اطمینان از کیفیت کیک گل دارای اهمیت است که میزان آن در فشارهای کم تا متوسط باید در محدودهٔ ۲ تا ۶ میلی‌لیتر باشد و در فشار و دمای بالا باید در بازه ۱۵ الی ۲۵ میلی‌لیتر باشد[۱۹،۲۶]. این شاخصه‌های اساسی از ملاک‌های بررسی سامانه‌های پلیمری مورد بحث و هم‌چنین بررسی نقش نانوذرات پلیمری در بهبود خواص سیالات حفاری بودند.

باوجود گسترش سیالات حفاری مصنوعی سازگار با محیط زیست، لزوم پایداری بیشتر و بهبود عمل‌کرد سیال حفاری در سازندهای بسیار عمیق و فشار بالا- دما بالا هم‌چنان پابرجاست؛ درحالی‌که یک‌پارچگی سازند، تغییر ترشوندگی، تشکیل ژل و کنترل خوردگی

1. Polyvinyl Alcohol

چالش‌هایی هستند که سیالات حفاری با آن مواجه هستند[۷۶،۷۹]. نانو سیالات با افزودن ذرات با ابعاد نانو در نسبت‌های حجمی کم به سیال پایه، به‌دلیل ساختار متمایز و جهت‌گیری شکلی، تأثیر زیادی بر خواص سیالات حفاری مانند خواص فیزیکی، شیمیایی، هیدرودینامیکی، حرارتی و الکتریکی دارند[۸۰]. افزودن و معلق‌شدن نانوذرات به‌درون سیال حفاری، برتری‌های متعددی را برای اصلاح خواص آن ازجمله خواص رئولوژیکی، حرارتی، رسوبی، مکانیکی، الکتریکی، نوری و مغناطیسی ایجاد می‌کند که به این ترتیب عمل‌کرد آن را افزایش می‌دهد[۶،۵۰،۷۶،۸۱].

مطالعهٔ رفتار نانوچندسازه‌ها در سیالات حفاری نشان می‌دهد که این مواد، از نانوذراتی که از یک کره تشکیل شده‌اند، بهتر رفتار می‌کنند. نانوچندسازه‌هایی مانند پلی‌آکریل‌آمید- پلی‌اتیلن-گلیکول- سیلیس پیوندی، کامپوزیت نانوسیلیکا بر پایهٔ پلیمر پیوندی آب‌گریز و پلی‌آکریل‌آمید-رس در سیال حفاری منجربه افزایش خواص رئولوژیکی و بازدارندگی شیل آن شدند[۵۴،۸۲،۸۳]. نانواکسید روی نیز ضمن خواص سطحی مناسب، پایداری شیل قابل قبولی را از خود نشان داده است[۸۴]. افزودن نانوچندسازهٔ TiO_2- پلی‌آکریل‌آمید و یا PAM–TiO_2 به سیال حفاری خواص رئولوژیکی آن را افزایش می‌دهد، هرزروی سیال را کاهش می‌دهد و ضخامت کیک فیلتر را کم می‌کند؛ درحالی‌که یک کیک فیلتر نازک نفوذناپذیر با افزودن نانوذرات دوده به سیال حفاری، ایجاد می‌شود[۶،۳۲،۸۵]. هم‌چنین افزودن گرافن اصلاح‌شده با اتیلن دی‌آمین[1] در سیال حفاری، تورم رس را مهار می‌کند و توانایی مسدودکردن نانومنافذ سازنده‌های شیلی را نیز داراست[۵۰،۷۶].

جدول (۵) خلاصه‌ای از نانوذرات‌پلیمری کارامد بررسی‌شده به‌منظور ارتقای خواص سیالات حفاری است.

۶. چالش‌های سیالات حفاری مبتنی‌بر پلیمرها

اگرچه استفاده از پلیمرها می‌تواند برتری‌های فنی چشم‌گیری را به‌همراه داشته باشد؛ اما نمی‌توان از چالش‌های پلیمرها در سیالات حفاری چشم‌پوشی کرد. هزینهٔ پلیمرها و نانوذرات پلیمری یک مشکل مهم است که باید قبل از شروع عملیات حفاری در نظر گرفته شود. به‌طور کلی تهیهٔ مواد اولیه، سنتز و فرایند تولید پلیمر و نانوذرات پلیمری می‌تواند هزینه‌زا باشد و در عملیات حفاری باید مقدار بسیار زیادی مصرف شود. شرایط مختلف و خواص یگانهٔ هر میدان و چاه نفت و سازگاری سامانه‌های پلیمری و نانوسیالات و نانوذرات با آن‌ها از دیگر نکات مهم به هنگام تولید و استفادهٔ آن‌هاست. دمای بالا، فشار بالا، تغییرات شیمیایی و شوری در برخی سازندها می‌تواند عامل مخرب ساختار پلیمر و نانوذرات پلیمری باشد. موضوع دیگر مربوط به ناشناخته بودن خطرات ایمنی و محیط زیستی سامانه‌های پلیمری و نانوذرات‌پلیمری است. سامانهٔ پلیمری مبتنی‌بر آب دریا و پلیمر، زیست‌پلیمرها (کربوکسی‌متیل سلولز و غیره) صرفهٔ اقتصادی مناسبی دارد و سازگار با محیط زیست است. هم‌چنین برای عمل‌کرد مناسب در شرایط ویژهٔ عملیات‌های حفاری ازجمله شرایط دما و فشاری و هم‌چنین سازندها خاص، مانند شیل‌های ناپایدار سامانه‌های پلیمری سنتزی، مواد فعال سطحی و نانوذرات پلیمری می‌توانند به‌خوبی پاسخ‌گوی نیازهای یک سیال حفاری کامل و کارامد باشند.

جدول ۵. خواص بهبود یافتهٔ سیال حفاری برحسب نانوذرات پلیمر استفاده شده.

Table 5. Improved properties of the drilling fluid in terms of the used polymer nanoparticles.

Nanopolymer	Propertiesoptimization
Polyacrylamide grafted polyglycol-clay nanocomposite [86]	Provides better shale encapsulation than PHPA
Acrylamide polymer based nanosilica hybrid [87]	Stabilizes rheological properties and shale inhibition
TiO_2 -polyacrylamide hybrid or PAM [85,32,6]	Prevents filtration loss and improved the mud viscosity
Organic-inorganic gel hybrid [76]	Prevents loss of circulation
Multi Walled Carbon Nanotube (MWNT)-polymer hybrid [88]	Improves the sealing system for formation evaluation
Ethylenediamine-modified graphene (EDA-G) [76,50]	Inhibition of clay swelling and shale pores

1. Ethylenediamine-Modified Graphene (EDA-G)

۷. نتیجه‌گیری

مطالعهٔ حاضر آخرین دستاوردها و شرایط استفاده از پلیمرها و نانوذرات پلیمری را در سیالات حفاری بررسی کرده و سامانه‌های پلیمری مختلف، خواص هریک، موارد استفاده، کارکرد و ویژگی‌های آن را در سیالات حفاری ارائه کرده است. سامانه‌های پلیمری سازگار با محیط زیست، سمّیت بیولوژیکی پایینی دارند که در راستای حفظ پروتکل‌های زیست‌محیطی بسیار ارزشمند است و هم‌چنین تا ۳۰ درصد هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و موجب کاهش حمل و نقل و دفع پسماند سیالات حفاری می‌شود که در سهولت انجام عملیات حفاری نقش به‌سزایی دارد. از طرفی سامانه‌های پلیمری کاتیونی و آنیونی بار سنگ را خنثی می‌کند و برهمکنش الکترواستاتیک آن با آب را کاهش می‌دهد. لایهٔ آب، ساختاری پایدار تشکیل می‌دهد و پایشی را ایجاد می‌کند که مانع از نفوذ آب به‌درون رس می‌شود و از خاصیت بازدارندگی خوبی برخوردار است. هم‌چنین پلیمر تراویدهٔ ترمینالیا مانتالی به‌عنوان یک زیست‌پلیمر، ظرفیت بالایی به‌عنوان یک عامل افزایندهٔ گران‌روی در سیال حفاری دارد. بررسی اثر افزودن مواد فعال سطحی بر پلیمرها، به‌خصوص یکی از رایج‌ترین پلیمرها در سیالات حفاری، صمغ زانتان، نشان می‌دهد که علاوه‌بر تولید کیک گل و کاهش هرزروی سیال حفاری درون سازند، سبب افزایش سرعت حفاری می‌شود. پلیمر PHPA برای پایدارکردن شیل‌ها و پلیمرCMC برای افزایش گران‌روی و کنترل هرزروی سیال حفاری نتایج خوبی به‌همراه داشت. در محیط‌های حساس حفاری مانند دما بالا-فشار بالا، سیال‌های حفاری مبتنی‌بر نانوذرات پلیمری، خواص رئولوژیکی بهبودیافته‌ای در مقایسه با سیالات حفاری معمولی نشان می‌دهند. علاوه‌بر این، توانایی آب‌بندی عالی نانوسیال‌ها با مسدود کردن انتقال فشار باتوجّه به قابلیت تحمل فشار و به حداقل رساندن تعامل سیالات بین مته و سازند، از مخزن هیدروکربنی محافظت می‌کند و پایداری چاه را بهبود می‌بخشد.

مراجع

[1] Tour, J. M., Kittrell, C., & Colvin, V. L. (2010). Green carbon as a bridge to renewable energy. *Nature materials*, 9(11), 871-874.

[2] Bilgen, S. E. L. Ç. U. K. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 890-902.

[3] Chang, Y., Li, G., Yao, Y., Zhang, L., & Yu, C. (2016). Quantifying the water-energy-food nexus: Current status and trends. *Energies*, 9(2), 65.

[4] Yan, X., Ariaratnam, S. T., Dong, S., & Zeng, C. (2018). Horizontal directional drilling: State-of-the-art review of theory and applications. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 162-173.

[5] Leusheva, E., Brovkina, N., & Morenov, V. (2021). Investigation of Non-Linear Rheological Charac-teristics of Barite-Free Drilling Fluids. *Fluids*, 6(9), 327.

[6] Ali, M., Jarni, H. H., Aftab, A., Ismail, A. R., Saady, N. M. C., Sahito, M. F., ... & Sarmadivaleh, M. (2020). Nanomaterial-based drilling fluids for exploitation of unconventional reservoirs: a review. *Energies*, 13(13), 3417.

[7] Amanullah, M., Al-Arfaj, M. K., & Al-Abdullatif, Z. (2011, March). Preliminary test results of nano-based drilling fluids for oil and gas field application. In SPE/IADC drilling conference and exhibition (pp. SPE-139534). SPE.

[8] Apaleke, A. S., Al-Majed, A., & Hossain, M. E. (2012, February). Drilling fluid: state of the art and future trend. In SPE North Africa Technical Conference and Exhibition (pp. SPE-149555). SPE.

[9] Khodja, M., Khodja-Saber, M., Canselier, J. P., Cohaut, N., & Bergaya, F. (2010). Drilling fluid technology: performances and environmental considerations. Products and services; from R&D to final solutions, 227-256.

[10] Chu, Q., Lin, L., & Su, J. (2020). Amidocyanogen silanol as a high-temperature-resistant shale inhibitor in water-based drilling fluid. *Applied Clay Science*, 184, 105396.

[11] Vakili, M. H., & Zarasvandnia, S. (2016). The Study of the Biopolymer-Surfactant Mixture Effect on Performance of Water Based Drilling Mud. *Journal of Petroleum Research*, 26(95-2), 177-186.

[12] Davarpanah, A. (2019). The feasible visual laboratory investigation of formate fluids on the rheological properties of a shale formation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(8), 4783-4792.

[13] Hajiabadi, S. H., Aghaei, H., Kalateh-Aghamohammadi, M., Sanati, A., Kazemi-Beydokhti, A., & Esmaeilzadeh, F. (2019). A comprehensive empirical, analytical and tomographic investigation on rheology and formation damage behavior of a novel nano-modified invert emulsion drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, 106257.

[14] Erge, O., Sakaoglu, K., Sonmez, A., Bagatir, G., Dogan, H. A., Ay, A., & Gucuyener, I. H. (2020). Overview and design principles of drilling fluids systems for geothermal Wells in Turkey. *Geothermics*, 88, 101897.

[15] Hamed, S. B., & Belhadri, M. (2009). Rheological properties of biopolymers drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 67(3-4), 84-90.

[16] Wan, T., Yao, J., Zishun, S., Li, W., & Juan, W. (2011). Solution and drilling fluid properties of water soluble AM–AA–SSS copolymers by inverse microemulsion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(2), 334-337.

[17] Elkatatny, S., Kamal, M. S., Alakbari, F., & Mahmoud, M. (2018). Optimizing the rheological properties of water-based drilling fluid using clays and nanoparticles for drilling horizontal and multi-lateral wells. *Applied Rheology*, 28(4), 201843606.

[18] Akpan, E. U., Enyi, G. C., Nasr, G., Yahaya, A. A., Ahmadu, A. A., & Saidu, B. (2019). Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 1028-1038.

[19] Akpan, E. U., Enyi, G. C., Nasr, G. G., & Yahaya, A. A. (2018). Stabilizing biopolymers in water-based drilling fluids at high temperature using antioxidants, a formate salt, and polyglycol. *Journal of Engineering Technology*, 7(2).

[20] Ahmad, H. M., Kamal, M. S., Murtaza, M., & Al-Harthi, M. A. (2017, April). Improving the drilling fluid properties using nanoparticles and water-soluble polymers. In SPE Kingdom of Saudi Arabia annual technical symposium and exhibition. OnePetro.

[21] Nasiri, A., Shahrabi, M. J. A., Nik, M. A. S., Heidari, H., & Valizadeh, M. (2018). Influence of monoethanolamine on thermal stability of starch in water based drilling fluid system. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1), 167-171.

[22] Sajjadian, M., Sajjadian, V. A., & Rashidi, A. (2020). Experimental evaluation of nanomaterials to improve drilling fluid properties of water-based muds HP/HT applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190, 107006.

[23] Al-Yasiri, M. S., & Al-Sallami, W. T. (2015). How the drilling fluids can be made more efficient by using nanomaterials. *American Journal of Nano Research and Applications*, 3(3), 41-45.

[24] Boyou, N. V., Ismail, I., Sulaiman, W. R. W., Haddad, A. S., Husein, N., Hui, H. T., & Nadaraja, K. (2019). Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176, 220-231.

[25] David Ytrehus, J., Taghipour, A., Golchin, A., Saasen, A., & Prakash, B. (2017). The effect of different drilling fluids on mechanical friction. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(3), 034502.

[26] Alcheikh, I. M., & Ghosh, B. (2017). A comprehensive review on the advancement of non-damaging drilling fluids. Int. J. Petrochem. Res, 1(1), 61-72.

[27] Jacob, N. C. G., Frank, O., Ebube, O. F., & Hezekiah-Braye, O. (2021). Effect of Microbes on Drilling Fluid Formulation. *International Journal of Advanced Engineering Research & Science*, 8(6), 491-498.

[28] Gaurina-Međimurec, N., Pašić, B., Mijić, P., & Medved, I. (2020). Deep underground injection of waste from drilling activities—An overview. *Minerals*, 10(4), 303.

[29] Basu, S., Cross, T., & Skvortsov, S. (2019). Salt water disposal modeling of dakota sand, williston basin, to drive drilling decisions. In SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference (p. D033S057R004). URTEC.

[30] Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (1988). Composition and properties of drilling fluids. Houston: Gulf Publishing, 1-643.

[31] Onuh, C. Y., Dosunmu, A., Anawe, P. A. L., Efeovbokhan, V., & Adebisi, A. (2017). Transesterification of non-edible vegetable oil for lubricant applications in water-based mud: a review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(18), 7397-7401.

[32] Sadeghalvaad, M., & Sabbaghi, S. (2015). The effect of the TiO_2/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties. *Powder Technology*, 272, 113-119.

[33] Rana, A., Khan, I., & Saleh, T. A. (2021). Advances in carbon nanostructures and nanocellulose as additives for efficient drilling fluids: trends and future perspective—a review. *Energy & Fuels*, 35(9), 7319-7339.

[34] Dardir, M. M., Ibrahime, S., Soliman, M., Desouky, S. D., & Hafiz, A. A. (2014). Preparation and evaluation of some esteramides as synthetic based drilling fluids. *Egyptian Journal of Petroleum*, 23(1), 35-43.

[35] Falode, O. A., Ehinola, O. A., & Nebeife, P. C. (2008). Evaluation of local bentonitic clay as oil well drilling fluids in Nigeria. *Applied Clay Science*, 39(1-2), 19-27.

[36] Ali, J. A., Kalhury, A. M., Sabir, A. N., Ahmed, R. N., Ali, N. H., & Abdullah, A. D. (2020). A state-of-the-art review of the application of nanotechnology in the oil and gas industry with a focus on drilling engineering. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 191, 107118.

[37] Zahid, A. A., Ur Rehman, S. R., Rushd, S., Hasan, A., & Rahman, M. A. (2020). Experimental investigation of multiphase flow behavior in drilling annuli using high speed visualization technique. *Frontiers in Energy*, 14, 635-643.

[38] Urbissinova, T. S., Trivedi, J., & Kuru, E. (2010). Effect of elasticity during viscoelastic polymer flooding: a possible mechanism of increasing the sweep efficiency. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49(12), 49-56.

[39] Santos, N. B. C., Fagundes, F. M., de Oliveira Arouca, F., & Damasceno, J. J. R. (2018). Sedimentation of solids in drilling fluids used in oil well drilling operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 162, 137-142.

[40] Khamehchi, E., Tabibzadeh, S., & Alizadeh, A. (2016). Rheological properties of Aphron based drilling fluids. *Petroleum Exploration and Development*, 43(6), 1076-1081.

[41] Zhong, H., Li, Y., Zhang, W., Yin, H., Lu, J., & Guo, D. (2018). Microflow mechanism of oil displacement by viscoelastic hydrophobically associating water-soluble polymers in enhanced oil recovery. *Polymers*, 10(6), 628.

[42] Murtaza, M., Tariq, Z., Mahmoud, M., Kamal, M. S., & Al-Shehri, D. (2021). Anhydrite (calcium sulfate) mineral as a novel weighting material in drilling fluids. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(2), 023002.

[43] Gbadamosi, A. O., Junin, R., Oseh, J. O., Agi, A., Yekeen, N., Abdalla, Y., ... & Yusuff, A. S. (2018, August). Improving hole cleaning efficiency using nanosilica in water-based drilling mud. In SPE Nigeria annual international conference and exhibition. OnePetro.

[44] Mahmoud, H., Hamza, A., Nasser, M. S., Hussein, I. A., Ahmed, R., & Karami, H. (2020). Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive review. *Journal of petroleum science and engineering*, 186, 106748.

[45] Deville, J. P. (2022). Drilling fluids, In Fluid Chemistry, Drilling and Completion. (pp. 115-185). Gulf Professional Publishing.

[46] Liu, X., Xie, B., Gao, Y., Gu, H., Ma, Y., Zhang, Y., ... & Li, Q. (2018, August). Development of low toxicity and high temperature polymer drilling fluid for environmentally sensitive offshore drilling. In IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, (p. D022S003R005). SPE.

[47] Hossain, M. E., & Wajheeuddin, M. (2016). The use of grass as an environmentally friendly additive in water-based drilling fluids. Petroleum Science, 13, 292-303.

[48] Liu, X., Gao, Y., Hou, W., Ma, Y., & Zhang, Y. (2019). Non-toxic high temperature polymer drilling fluid significantly improving marine environmental acceptabiiity and reducing cost for offshore drilling. International Petroleum Technology Conference (p. D031S062R005). IPTC.

[49] Razali, S. Z., Yunus, R., Rashid, S. A., Lim, H. N., & Jan, B. M. (2018). Review of biodegradable synthetic-based drilling fluid: Progression, performance and future prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 171-186.

[50] Saleh, T. A., & Ibrahim, M. A. (2019). Advances in functionalized Nanoparticles based drilling inhibitors for oil production. Energy Reports, 5, 1293-1304.

[51] Jia, H., Huang, P., Wang, Q., Han, Y., Wang, S., Dai, J., ... & Lv, K. (2020). Study of a gemini surface active ionic liquid 1, 2-bis (3-hexylimidazolium-1-yl) ethane bromide as a high performance shale inhibitor and inhibition mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 301, 112401.

[52] Nweke, O. M., Igwe, E. O., & Nnabo, P. N. (2015). Comparative evaluation of clays from Abakaliki Formation with commercial bentonite clays for use as drilling mud. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9(6), 508-518.

[53] Anderson, R. L., Ratcliffe, I., Greenwell, H. C., Williams, P. A., Cliffe, S., & Coveney, P. V. (2010). Clay swelling—a challenge in the oilfield. *Earth-Science Reviews*, 98(3-4), 201-216.

[54] Rana, A., Arfaj, M. K., & Saleh, T. A. (2019). Advanced developments in shale inhibitors for oil production with low environmental footprints–A review. *Fuel*, 247, 237-249.

[55] Yi, H., Jia, F., Zhao, Y., Wang, W., Song, S., Li, H., & Liu, C. (2018). Surface wettability of montmorillonite (0 0 1) surface as affected by surface charge and exchangeable cations: a molecular dynamic study. *Applied Surface Science*, 459, 148-154.

[56] Arfaj, M. K., Rana, A., & Saleh, T. A. (2020, November). Highly efficient modified activated carbon as shale inhibitor for water based drilling mud modification. In Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. OnePetro.

[57] Inemugha, O., Chukwuma, F., Akaranta, O., & Ajienka, J. A. (2019, August). Rheological Properties of Terminalia Mantaly Exudate as Drilling Mud Additive. In SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. OnePetro.

[58] Odeniyi, M. A., Oyedokun, B. M., & Bamiro, O. A. (2017). Native and microwave-modified Terminalia mantaly gums as sustained-release and bioadhesive excipients in naproxen matrix tablet formulations. *Polim Med*, 47(1), 35-42.

[59] Srivatsa, J. T., & Ziaja, M. B. (2011, November). An experimental investigation on use of nanoparticles as fluid loss additives in a surfactant-polymer based drilling fluids. In International petroleum technology conference (pp. IPTC-14952). IPTC.

[60] Navarrete, R. C., Dearing, H. L., Constien, V. G., Marsaglia, K. M., Seheult, J. M., & Rodgers, P. E. (2000, September). Experiments in fluid loss and formation damage with Xanthan-Based fluids while drilling. In IADC/SPE Asia Pacific drilling technology. OnePetro.

[61] González, J. M., Quintero, F., Arellano, J. E., Márquez, R. L., Sánchez, C., & Pernía, D. (2011). Effects of interactions between solids and surfactants on the tribological properties of water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 391(1-3), 216-223.

[62] Ogugbue, C. C., Rathan, M., & Shah, S. N. (2010, January). Experimental investigation of biopolymer and surfactant based fluid blends as reservoir drill-in fluids. In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. OnePetro.

[63] Chaturvedi, S., Kulshrestha, S., Bhardwaj, K., & Jangir, R. (2021). A review on properties and applications of xanthan gum. Microbial Polymers: Applications and Ecological Perspectives, 87-107.

[64] Petri, D. F. (2015). Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(23).

[65] Shettigar, R. R., Misra, N. M., & Patel, K. (2018). Cationic surfactant (CTAB) a multipurpose additive in polymer-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8, 597-606.

[66] Sosa-Fernandez, P. A., Miedema, S. J., Bruning, H., Leermakers, F. A. M., Rijnaarts, H. H. M., & Post, J. W. (2019). Influence of solution composition on fouling of anion exchange membranes desalinating polymer-flooding produced water. *Journal of colloid and interface science*, 557, 381-394.

[67] Tessarolli, F. G., Souza, S. T., Gomes, A. S., & Mansur, C. R. (2019). Influence of polymer structure on the gelation kinetics and gel strength of acrylamide-based copolymers, bentonite and polyethylenimine systems for conformance control of oil reservoirs. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(22), 47556.

[68] Biazar, H., Abdollahi, M., & Nasiri, A. (2019). Synthesis and Characterization of Acrylamide-based Homo-and Copolymers and their Application in Water-Based Drilling Fluid. *Journal of Petroleum Research*, 29(98-4), 152-164.

[69] Ejezie, J. O., Jefferis, S. A., Lam, C., Sedighi, M., & Ahmad, S. M. (2021). Permeation behaviour of PHPA polymer fluids in sand. *Géotechnique*, 71(7), 561-570.

[70] Panahirad, S., Dadpour, M., Peighambardoust, S. H., Soltanzadeh, M., Gullón, B., Alirezalu, K., & Lorenzo, J. M. (2021). Applications of carboxymethyl cellulose-and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 663-673.

[71] Freitas, E. D., Moura Jr, C. F., Kerwald, J., & Beppu, M. M. (2020). An overview of current knowledge on the properties, synthesis and applications of quaternary chitosan derivatives. *Polymers*, 12(12), 2878.

[72] Abdollahi, M., Varamesh, A., Rekabdar, F., & Nasiri, A. R. (2010). Synthesis and Use of Amphoteric Carboxymethylcellulose Graft Copolymers in the Environmentally-acceptable Water-based Drilling Fluids as a Water-sensitive Shale Stabilizer. *Science and Technology*, 22(6), 483-493.

[73] Ali, I., Ahmad, M., & Ganat, T. (2022). Biopolymeric formulations for filtrate control applications in water-based drilling muds: A review. Journal of Petroleum Science and Engineering, 210, 110021.

[74] Abdollahi, M., Pourmahdi, M., & Nasiri, A. R. (2018). Synthesis and characterization of lignosulfonate/acrylamide graft copolymers and their application in environmentally friendly water-based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 484-494.

[75] Al Ruqeishi, M. S., Al Salmi, Y., & Mohiuddin, T. (2018). Nanoparticles as drilling fluids rheological properties modifiers. *Progress in Petrochemical Science*, 1(5), 97-103.

[76] Cheraghian, G. (2021). Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art. *Journal of materials research and technology*, 13, 737-753.

[77] Adeyemi, G., Fadairo, A., Ogunkunle, T., Oladepo, A., Oredeko, O., Vitoria, O., ... & ICHI, E. (2020, August). Effect of Polymer Additives on the Rheology and Fluid Loss of Water Based Muds. In SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. OnePetro.

[78] Borah, B., & Das, B. M. (2022). A review on applications of bio-products employed in drilling fluids to minimize environmental footprint. *Environmental Challenges*, 6, 100411.

[79] Zarei, V., Emamzadeh, A., & Nasiri, A. (2017). Synthesis of amorphous silica nanoparticles from natural materials applied in drilling fluid for stabilizing shale layers, *Petroleum research*, 27(6), 6-96, 18-13.

[80] Said, Z., Sundar, L. S., Tiwari, A. K., Ali, H. M., Sheikholeslami, M., Bellos, E., & Babar, H. (2022). Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. Physics Reports, 946, 1-94.

[81] Aramendiz, J., Imqam, A. H., & Fakher, S. M. (2019, March). Design and evaluation of a water-based drilling fluid formulation using SiO and graphene oxide nanoparticles for unconventional shales. In International petroleum technology conference (p. D031S062R003). IPTC.

[82] Mohamadian, N., Ghorbani, H., Wood, D. A., & Khoshmardan, M. A. (2019). A hybrid nanocomposite of poly (styrene-methyl methacrylate-acrylic acid)/clay as a novel rheology-improvement additive for drilling fluids. *Journal of Polymer Research*, 26, 1-14.

[83] Jia, X., Zhao, X., Chen, B., Egwu, S. B., & Huang, Z. (2022). Polyanionic cellulose/hydrophilic monomer copolymer grafted silica nanocomposites as HTHP drilling fluid-loss control agent for water-based drilling fluids. *Applied Surface Science*, 578, 152089.

[84] Pourkhalil, H., Nakhaee, A., Nasiri, A., & Valizadeh, M. (2017). In Vitro Evaluation of the Impact of Nano Zinc Oxide on Stabilization of Shale Formations. *Journal of Petroleum Research*, 26(95-5), 4-14.

[85] Vryzas, Z., & Kelessidis, V. C. (2017). Nano-based drilling fluids: A review. *Energies*, 10(4), 540.

[86] Aftab, A. A. R. I., Ismail, A. R., Ibupoto, Z. H., Akeiber, H., & Malghani, M. G. K. (2017). Nanoparticles based drilling muds a solution to drill elevated temperature wells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1301-1313.

[87] Ma, J., An, Y., & Yu, P. (2019). Core–shell structure acrylamide copolymer grafted on nano-silica surface as an anti-calcium and anti-temperature fluid loss agent. *Journal of Materials Science*, 54, 5927-5941.

[88] Aftab, A. A. R. I., Ismail, A. R., & Ibupoto, Z. H. (2017). Enhancing the rheological properties and shale inhibition behavior of water-based mud using nanosilica, multi-walled carbon nanotube, and graphene nanoplatelet. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(2), 291-299.