



Imam Khomeini International University

Vol. 8, No. 1, Spring 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

## Research Paper

# Evaluation of the Effect of Metal Oxide Nanoparticles in Combination with Polyacrylamide on Improving the Filtration and Rheological Properties of Drilling Fluids

Hajipour M.<sup>1\*</sup>, Movahedi H.<sup>2</sup>, Jamshidi S.<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Petroleum Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Ph.D Student, Dept. of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Dept. of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: 07 Jul. 2021

Accepted: 27 Jul. 2022

**Abstract:** Drilling fluid properties and determination of its appropriate formulation are very important for the success of drilling operations. In this study, the effect of hydrophilic silicon oxide nanoparticles and iron oxide in combination with polyacrylamide on the rheological and filtration properties of water-based drilling mud was investigated. Silica and iron oxide have been used as nanomaterials due to their abundance and economical advantages. Material characterization was performed using X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscope (SEM), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Rheological properties including plastic viscosity and gel strength were measured at different concentrations of polymer and nanoparticles. Moreover, the effect of additives on the mud filtrate and mud cake quality was evaluated. The results showed that the presence of silicon oxide nanoparticles can improve the rheology of drilling mud up to 15% at a concentration of 1 wt %. The viscosity increased due to the separation and dispersion of clay plates. Furthermore, the results indicated that the addition of iron oxide nanoparticles did not have a significant effect on rheology. On the other hand, the addition of polymer caused a significant increase in viscosity and gel strength of drilling mud. The obtained results showed that due to the interaction of clay plates with silica nanoparticles, the gelatinous properties of drilling mud decrease at low concentrations of nanoparticles. The results of the filtration test showed that the addition of polymer and nanoparticles to the drilling mud causes a further decrease in the filtration rate at lower concentrations of the polymer. This effect is due to the clogging of mud cake pores by nanoparticles in the presence of polymer, so that with the simultaneous addition of nanoparticles and polymer, the mud filtrate was decreased from 128 cc to 14 cc.

**Keywords:** Drilling mud, Nanoparticles, Rheological properties, Filtration control.

### How to cite this article

Hajipour, M., Movahedi, H., and Jamshidi, S. (2023). "Evaluation of the effect of metal oxide nanoparticles in combination with polyacrylamide on improving the filtration and rheological properties of drilling fluids". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(1): 1-16.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.15808.1531](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.15808.1531)

\*Corresponding Author Email: [m.hajipour@srbiau.ac.ir](mailto:m.hajipour@srbiau.ac.ir)

COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## INTRODUCTION

The proper selection of drilling fluids plays an important role in determining and completing the efficiency of any drilling operation. With the increase in the number of ultra-deep wells that have been drilled, the behaviour of inexpensive water-based drilling fluids with less potential for pollution in high temperature conditions should be investigated more accurately [1]. The rheology of drilling mud is one of the most important parameters in controlling the pressure drop, cleaning the well, optimizing the drilling hydraulics, and cooling and lubricating the drill string. Drilling mud filtration are other important properties that control the penetration of the mud filtrate into the formations and are affected by the rheology of the drilling mud [2-5]. The formulation of drilling mud should be determined in such a way that the filtration properties are enhanced in order to reduce the formation damage. Also, the thickness of the mud cake formed on the wellbore wall should be kept at a minimum value in order to avoid the drill pipe stuck. In this research, the development of a polymeric fluid containing nanoparticles as a drilling mud was investigated. The presence of nanoparticles in the drilling mud causes a decrease in filtration loss by using the pore blocking mechanism and reducing the internal permeability of mud cake. In addition, as drilling mud is mainly composed of clay particles, the presence of nanoparticles with different surface charges causes changes in filtration properties. The clays in drilling mud are mainly aluminosilicates such as bentonite, which react with nanoparticles due to their surface charges. This may have negative or positive effects on the filtration properties, which can be achieved by controlling the surface properties of nanoparticles such as changing the surface charge or making the particles hydrophobic [6-8]. Hassani et al. investigated the modified drilling fluid properties by adding nanoparticles to the drilling mud. They showed that nanoparticles cause better rheological properties at higher pressure and temperature. The tested nanoparticles have higher thermal conductivity and also, due to the repulsive force between the clay particles in the drilling mud, they cause better rheology control. The results of their studies showed that the use of nanotechnology improves the performance of drilling fluids [9]. Abdo and Haneef modified drilling fluids using clay nanoparticles for drilling deep hydrocarbon wells [10]. Fazelabdolabadi et al. synthesized hybrid carbon nanotubes/multilayers to investigate the thermal conductivity of related nanomaterials. They reported the effects of nanoparticle concentration on increasing the effective thermal conductivity of nanofluids [11].

## METHODS

In this study, the bentonite clay sample was prepared from a drilling platform in one of the fields in southern Iran. The XRD analysis was used to determine the number of different compounds in the bentonite sample and to identify the bentonite crystal structure. Silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ ), iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), and polyacrylamide were obtained from Sigma Aldrich. SEM imaging was implemented to determine the size and morphology of nanoparticles. In order to determine the structure and type of molecular bonds on the surface of nanostructures, FTIR analysis was used. At first, the base drilling fluid was prepared as a reference to compare the effect of different additives. To prepare the base fluid, a certain amount of bentonite was added to the water so that the fluid contains 10 wt% of bentonite. Then, the rheology and filtration properties of the based mud were measured. After that, polymer additives and nanoparticles were added in certain concentrations to the base fluid and the changes in its characteristics were investigated. Table 1 shows the formulation of different mud samples.

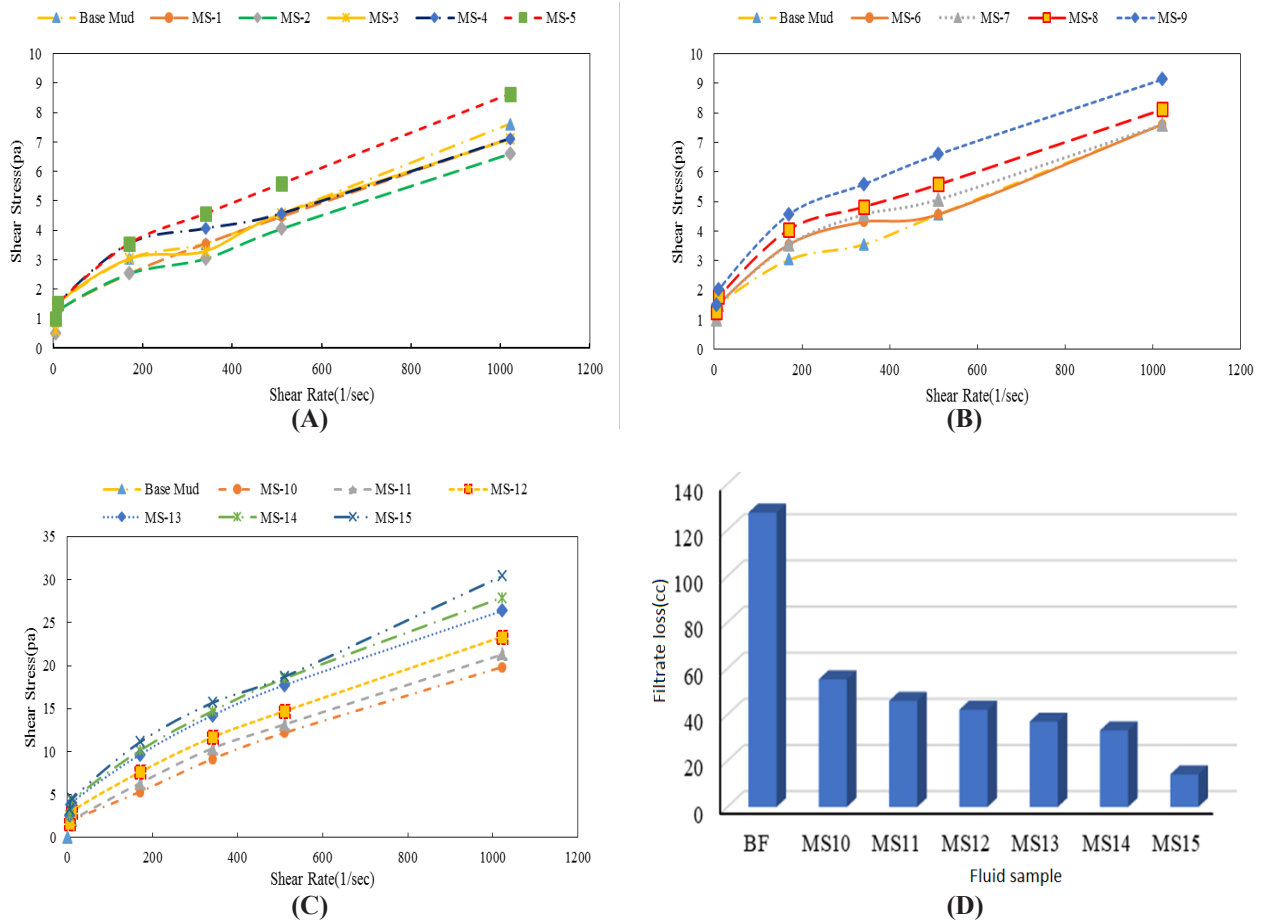
Fann viscometer was used to investigate the effects of nanoparticles and polymer on the rheology of different mud samples. API standard filtration device at 100 psi pressure and ambient temperature was also used to determine the filtration properties of drilling mud such as total mud filtrate loss and mud cake thickness.

## FINDINGS AND ARGUMENT

Figure 1A shows the variations of shear stress in terms of shear rate for the mud sample containing silicon oxide nanoparticles. As shown, for low concentrations of nanoparticles (SM1 to SM3), the rheology is lower than the base fluid, while for higher concentrations, it is higher than the base fluid, which means the improvement of rheology properties at high concentrations of nanoparticles. Figure 1B shows the variations in the rheological properties of mud containing iron oxide nanoparticles. As can be seen, in different concentrations of iron oxide, the rheology does not change significantly compared to the base fluid. Finally,

**Table 1.** Formulation of different mud samples

Sample	Formulation
BF	Water+10%wt Bentonite+%0.4wt Salt
MS1	BF+0.2%wt nano silica
MS2	BF+0.4%wt nano silica
MS3	BF+0.6%wt nano silica
MS4	BF+0.8%wt nano silica
MS5	BF+1%wt nano silica
MS6	BF+0.5%wt nano iron oxide
MS7	BF+1%wt nano iron oxide
MS8	BF+1.5%wt nano iron oxide
MS9	BF+2%wt nano iron oxide
MS10	BF+0.1%wt PAM
MS11	BF+0.2%wt PAM
MS12	BF+0.3%wt PAM
MS13	BF+0.4%wt PAM
MS14	MS5+0.4%wt PAM
MS15	MS9+0.4%wt PAM



**Figure 1. A:** Rheological behavior of drilling mud containing silicon oxide nanoparticles at different concentrations, **B:** rheological behavior of drilling mud containing iron oxide nanoparticles at different concentrations, **C:** rheological behavior of drilling mud containing polymer and nanoparticles at different concentrations, **D:** total filtrate loss for different fluid samples with nanoparticles and polymer

the variation in the rheological properties of drilling mud containing polymer and different nanoparticles are shown in Figure 1C. As can be seen, the rheology of the samples containing polymer has increased considerably compared to the base fluid, and the addition of nanoparticles causes it to increase further. Figure 1D shows the variations in the filtration properties of mud samples containing nanoparticles with polymer compared to the base fluid under static conditions. As can be seen, the addition of polymer increases the viscosity and thus decreases the filtration behavior, which in combination with iron has shown the minimum amount of filtration.

## CONCLUSIONS

In this study, the effect of hydrophilic silicon oxide and iron oxide nanoparticles in combination with polyacrylamide in the water-based drilling mud were investigated in order to control filtration and rheological properties. The results showed that the presence of silica nanoparticles can increase the rheological properties of drilling mud at a concentration higher than 1wt% where an increase in mud viscosity was observed up to 15%. The results showed that adding iron oxide nanoparticles to the water-based drilling fluid has a low effect on the rheological properties. Moreover, adding polymer to water-based drilling fluid caused a significant increase in its viscosity and gelatinization. Also, the obtained results showed that the gelatinous properties of drilling mud decrease in low concentrations of silica nanoparticles, which can be due to the interference of surface charges of clay plates with nanoparticles. The results of filtration showed that the use of silicon and iron oxide nanoparticles in combination with polymer has the ability to reduce the filtration rate more than the use of polymers itself where the mud filtrate loss decreased from 128 cc to 14 cc. The SEM images of the surface of the mud cake samples showed that the presence of polymer in combination with nanoparticles well blocks and covers the pores in the mud cake surface and reduces its permeability. Using the formulation presented in this research for water-based drilling muds can reduce formation damage and improve hole cleaning properties with minimum cost.

## REFERENCES

- [1] He, W., Gomez, S. L., Leonard, R. S., and Li, D. T. (2014). "Shale-fluid interactions and drilling fluid designs". In IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference, European Association of Geoscientists & Engineers, January, pp. cp-395.
- [2] Mahto, V., and Sharma, V. P. (2004). "Rheological study of a water based oil well drilling fluid". Journal of Petroleum Science and Engineering, 45(1-2): 123-128.
- [3] Movahedi, H., Farahani, M. V., and Jamshidi, S. (2017). "Application of Hydrated Basil Seeds (HBS) as the herbal fiber on hole cleaning and filtration control". Journal of Petroleum Science and Engineering, 152: 212-228.
- [4] de Oliveira, V. A. V., dos Santos Alves, K., da Silva-Junior, A. A., Araújo, R. M., Balaban, R. C., and Hilliou, L. (2020). "Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application". Journal of Molecular Liquids, 299: 112139.
- [5] Gudarzifar, H., Sabbaghi, S., Rezvani, A., and Saboori, R. (2020). "Experimental investigation of rheological & filtration properties and thermal conductivity of water-based drilling fluid enhanced". Powder Technology, 368: 323-341.
- [6] Samnejad, M., Gharib Shirangi, M., and Etehadi, R. (2020). "A digital twin of drilling fluids rheology for real-time rig operations". In Offshore Technology Conference, OnePetro, May.
- [7] Huang, Y., Zheng, W., Zhang, D., and Xi, Y. (2020). "A modified Herschel-Bulkley model for rheological properties with temperature response characteristics of poly-sulfonated drilling fluid". Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42(12): 1464-1475.
- [8] Moraveji, M. K., Ghaffarkhah, A., Agin, F., Talebkeikhah, M., Jahanshahi, A., Kalantar, A., and Arjmand, M. (2020). "Application of amorphous silica nanoparticles in improving the rheological properties, filtration and shale stability of glycol-based drilling fluids". International Communications in Heat and Mass Transfer, 115: 104625.
- [9] Hassani, S. S., Amrollahi, A., Rashidi, A., Soleymani, M., and Rayatdoost, S. (2016). "The effect of nanoparticles on the heat transfer properties of drilling fluids". Journal of Petroleum Science and Engineering, 146: 183-190.

- [10] Abdo, J., and Haneef, M. D. (2013). "*Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells*". *Applied Clay Science*, 86: 76-82.
- [11] Fazlabdolabadi, B., Khodadadi, A. A., and Sedaghatzadeh, M. (2015). "*Thermal and rheological properties improvement of drilling fluids using functionalized carbon nanotubes*". *Applied Nanoscience*, 5(6): 651-659.



## ارزیابی اثر نانو ذرات اکسید فلزی در ترکیب با پلی اکریل آمید بر بهبود خواص فیلتراسیون و رئولوژی سیالات حفاری

مستانه حاجی پور<sup>۱</sup>، حامد موحدی<sup>۲</sup>، سعید جمشیدی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶

### چکیده

تنظیم خواص سیال حفاری با استفاده از افزایش راندمان عملیات حفاری اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه، اثر نانوذرات اکسید سیلیسیم و اکسید آهن در ترکیب با پلی اکریل آمید بر خصوصیات رئولوژیکی و فیلتراسیون سیال حفاری پایه آبی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌یابی مواد با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) انجام شد. خواص رئولوژی شامل تغییرات تنش برشی، گرانشی پلاستیک و مقاومت ژله‌ای برای نمونه‌های سیال حفاری با غلظت‌های مختلف از افزایش پلیمری و نانوذرات اندازه‌گیری شد. همچنین اثر افزایش‌های مختلف بر میزان فیلتراسیون سیال حفاری و کیفیت کیک گل ارزیابی و مقایسه شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید سیلیسیم تا ۱٪ وزنی موجب ۱۵٪ افزایش در گرانشی سیال حفاری می‌شود، اما افزودن نانوذرات اکسید آهن تاثیر قابل توجهی بر خواص رئولوژی سیال حفاری ندارد. تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش نشان داد که بهترین مدل رئولوژی برای نمونه‌های سیال حفاری حاوی نانوذرات مدل هرشل باکلی است. نتایج به دست آمده نشان داد که به دلیل برهمکنش صفحات رس با نانوذرات سیلیکا، خواص ژله‌ای و تنش تسلیم سیال حفاری در غلظت‌های پایین نانوذرات کاهش می‌یابد. نتایج تست فیلتراسیون نشان داد که افزودن نانوذرات و پلیمر به سیال حفاری، موجب کاهش بیشتر نرخ فیلتراسیون در غلظت‌های کمتر پلیمر می‌شود. این اثر به علت انسداد حفرات کیک گل به وسیله نانوذرات در حضور پلیمر است، به طوری که با افزودن همزمان نانوذرات و پلیمر، میزان فیلتراسیون سیال حفاری از ۱۲۸ cc به ۱۴ cc کاهش یافت.

### کلمات کلیدی

گل حفاری، نانوذرات، خواص رئولوژی، کنترل فیلتراسیون، آسیب سازند.

### استناد به این مقاله

حاجی پور، م.، موحدی، ح.، جمشیدی، س.؛ ۱۴۰۲؛ "ارزیابی اثر نانو ذرات اکسید فلزی در ترکیب با پلی اکریل آمید بر بهبود خواص فیلتراسیون و رئولوژی سیالات حفاری". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۱، ص ۱۶-۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.15808.1531



## ۱- مقدمه

حفاری دارد. در نظر گرفتن این فاکتورها در بهینه کردن فرمولاسیون سیال حفاری و تنظیم خواص آن و همچنین تعیین نرخ جریان لازم برای تمیز کردن چاه و توان هیدرولیکی مناسب برای گردش و نفوذ مته و رسیدن به کمترین هزینه‌ها حایز اهمیت است [۹-۱۱].

اصلی‌ترین ویژگی‌های گل حفاری، خواص فیلتراسیون و رئولوژی گل حفاری است. رئولوژی گل حفاری یکی از مهم‌ترین پارامترها در کنترل افت فشار سیال حفاری، تمیزسازی چاه، بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری و خنک‌کاری و روانکاری مته است. فیلتراسیون گل حفاری از دیگر خواص مهم سیال حفاری بوده که نفوذ فیلترات سیال به درون سازند حفاری شده را کنترل می‌کند و متاثر از رئولوژی گل حفاری است [۱۲-۱۵]. به طور کلی افزایش گرانیوی و رئولوژی گل حفاری سبب افزایش خاصیت تمیزسازی چاه و روانکاری رشته حفاری و کاهش فیلتراسیون گل حفاری به درون سازند می‌شود. از طرفی افزایش گرانیوی گل حفاری افزایش افت فشار پمپ‌های حفاری و اعمال فشار بر تجهیزات سطحی و شکست سازند را در پی خواهد داشت، بنابراین انتخاب مناسب ترکیب سیال حفاری که بتواند هم مخاطرات محیط زیستی و هم مشکلات فنی مربوط به سیستم گل حفاری را بهبود دهد اهمیت بالایی دارد [۱۶، ۱۵].

فرمولاسیون گل حفاری باید به گونه‌ای تعیین شود که خواص فیلتراسیون گل حفاری کاهش یافته و در نتیجه میزان آسیب به سازند حفاری شده کاهش یابد. همچنین میزان اندود یا کیک گل تشکیل شده بر روی دیواره چاه باید حداقل ممکن باشد تا گیر رشته حفاری اتفاق نیفتد. در این تحقیق، توسعه سیستم پلیمری به همراه نانوذرات به عنوان سیال حفاری بررسی شد. وجود نانوذرات در گل حفاری سبب کاهش فیلتراسیون گل حفاری با استفاده از مکانیزم کاهش تراوایی کیک گل حفاری می‌شود. علاوه بر این به علت اینکه گل حفاری عمدتاً از ذرات رس تشکیل شده است وجود نانوذرات با بارهای سطحی مختلف سبب تغییرات خواص فیلتراسیون می‌شود. رس‌های موجود در گل حفاری عمدتاً آلومینوسیلیکات‌هایی مانند بنتونایت هستند که به علت وجود بار سطحی در مجاورت نانوذرات واکنش می‌دهند. این واکنش صفحات رس، ممکن است بر خواص فیلتراسیون اثرات منفی یا مثبت داشته باشند که با کنترل خواص سطحی نانوذرات مانند تغییر بار سطحی و یا آب‌گریز کردن ذرات می‌توان به بهبود

انتخاب مناسب سیالات حفاری نقش مهمی در تعیین و تکمیل کارآمدی عملیات حفاری ایفا می‌کند. با افزایش تعداد چاه‌های فوق‌العاده عمیق که حفر شده و با توجه به مقررات محیط زیستی و ایمنی، رفتار سیالات حفاری پایه آبی ارزان‌تر و با آلاینده‌گی کمتر در شرایط دما بالا باید دقیق‌تر بررسی شود [۱]. نرم‌افزارهای مهندسی حفاری شامل لندمارک و دریل آفیس ماژول‌های جداگانه‌ای برای بررسی و کنترل خواص سیالات حفاری دارند. به طور کلی برای تعیین خواص گل حفاری میزان افت فشار گل درون چاه، قابلیت حمل‌کننده‌های حفاری و همچنین میزان ظرفیت انتقال حرارتی آن به وسیله نرم‌افزارها تحلیل می‌شود. سیالات حفاری بخشی جدایی‌ناپذیر از عملیات حفاری‌اند و کیفیت این سیالات موفقیت عملیات حفاری را تعیین می‌کند. معیار تعیین‌کننده کیفیت سیال حفاری میزان ثبات خواص رئولوژی، فیلتراسیون و وزن سیال ورودی و خروجی به چاه است. در دهه‌های اخیر کاربرد فناوری نانو نتایج اثربخشی در بهبود خواص سیال حفاری و افزایش بازیافت نفت نشان داده است. با این وجود کاربرد فناوری نانو هنوز به طور کامل بررسی نشده است [۲-۴].

سیال حفاری باید کنده‌های چاه را به سطح زمین منتقل کند، اصطکاک بین رشته حفاری و دیواره چاه را به نحو مطلوبی پایین آورد، در زمان توقف عملیات حفاری، کنده‌ها را معلق نگه دارد و از ریزش آن‌ها به ته چاه جلوگیری کند، خاصیت پایدارسازی رس‌های موجود در دیواره چاه را داشته باشد و از تورم لایه‌های شیل جلوگیری کند. علاوه بر این گل حفاری باید افت صافاب کمی داشته باشد که این امر نشانگر نازک بودن کیک گل در دیواره چاه است. افزایش ضخامت کیک گل حفاری و سخت شدن آن موجب گیر رشته حفاری شده و به دنبال آن مشکلات زیادی در عملیات حفاری چاه به وجود می‌آید. طراحی و تعیین ترکیب مناسب سیال حفاری برای کاربرد در دما و فشار بالای چاه‌های عمیق اهمیت زیادی دارد [۵-۸].

نتایج تحقیقات مختلف نشان داده که نرخ نفوذ مته<sup>۱</sup> (ROP) به وزن روی مته<sup>۲</sup> (WOB) و سرعت گردش گل و قدرت هیدرولیکی مته بستگی زیادی دارد. با توجه به اینکه جریان گل حفاری باعث افت فشار سیستم و این افت فشار باعث توان هیدرولیکی در سرتاسر مته می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که سیال حفاری نقش مهمی در محاسبات هزینه‌های

خواص گل دست یافت [۱۹-۱۷].

از طرف دیگر لازم است مواد شیمیایی و روانکارها به گل حفاری افزوده شود تا افت فشار اصطکاکی گردش سیال و همچنین خواص تمیزسازی آن افزایش داده شود. به طور کلی مواد شیمیایی پلیمری و نانوذرات با هدف کنترل خواص فیلتراسیون، رئولوژی و بهبود انتقال حرارت به گل حفاری اضافه می‌شوند و وزن گل حفاری با مواد وزن‌افزای دارای دانسیته بالا کنترل می‌شود. در صنعت حفاری معمولاً از پلیمرهای مختلف به عنوان افزایه‌های سیال حفاری استفاده می‌شود. استفاده از پلیمرهای طبیعی و بیوپلیمرها همچون گوارگام و زانتان‌گام به عنوان جایگزین صنعتی آن‌ها از لحاظ محیط زیستی مورد توجه است. پلیمرهای محلول در آب یکی از افزودنی‌های رایج در سیال حفاری پایه آبی هستند که به واسطه حجم هیدرودینامیکی بالایی که ایجاد می‌کنند، باعث افزایش گرانروی و جلوگیری از ژل شدن سیال در دمای بالا می‌شوند. پلی‌اکریل آمید با قابلیت انحلال در آب و وزن مولکولی بالا قادر است تا به محض قرارگیری در آب، به راحتی زنجیرهای خود را از هم باز کند و باعث افزایش موثر گرانروی شود. در دهه‌های گذشته، فناوری نانو با تأثیر بر خواص رئولوژیکی و فیلتراسیون، سیالات حفاری را بهبود داده است. کاربردهای موفق نانوذرات در گل حفاری به علت اندازه، شکل و تعامل شیمیایی این ذرات و گل است که خواص مطلوب و عملکرد خوب سیال حفاری را ایجاد می‌کند [۲۲-۲۰].

حسنی و همکاران، سیال حفاری اصلاح شده با افزودن نانوذرات را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نانوذرات موجب ایجاد خواص رئولوژیکی بهتر در فشار و دمای بالاتر می‌شوند. نانوذرات مورد آزمایش هدایت گرمایی بالاتری داشته و همچنین به علت تغییر در نیروی دافعه بین ذرات رس موجود در گل حفاری سبب کنترل بهتر رئولوژی می‌شوند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که استفاده از فناوری نانو موجب ارتقای عملکرد سیالات حفاری می‌شود [۲۳]. عبدو و هانیف سیالات حفاری را با استفاده از نانوذرات رس برای حفاری چاه‌های هیدروکربنی عمیق اصلاح کردند [۲۴]. فاضل عبدالابادی و همکاران هیبرید نانولوله‌های کربنی/چندلایه را برای بررسی هدایت حرارتی سنتز کردند. آن‌ها اثرات غلظت نانوذرات بر افزایش هدایت حرارتی موثر نانوسیالات را گزارش کردند [۲۵].

حسن‌زاده و همکاران به دلیل مشخصات منحصر به

فرد نانوذرات آلومینا، اثرات آن بر پایداری شیل را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل نمونه‌های شیل بازیافت شده نشان داد که میانگین اندازه نانوذرات آلفا آلومینای پوشش‌دهنده سطح شیل بین ۲۵ تا ۳۵ نانومتر است که توانایی انسداد حفرات سطح شیل را به خوبی دارد و سبب کاهش نفوذ سیال حفاری به درون لایه‌های شیلی و افزایش پایداری آنها می‌شود [۲۶]. حاجی آبادی و همکاران تأثیر نانوذرات اکسید سیلیسیم عامل‌دار شده بر خواص گل حفاری را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ذرات سنتز شده قابلیت بهبود خواص رئولوژیکی گل حفاری را دارند. همچنین با استفاده از آنالیز SEM نشان دادند که میزان آسیب سازند در اثر نفوذ گل حفاری به داخل سازند متخلخل با افزودن نانوذرات سنتز شده کاهش می‌یابد [۲۷]. مروجی و همکاران تأثیر نانوذرات اکسید سیلیسیم آبدوست را بر بهبود خواص فیلتراسیون و پایداری شیل در سیالات پایه گلاکولی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نانوذرات سیلیس باعث بهبود خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه گلاکولی می‌شود. این بهبود تابعی از غلظت و اندازه نانوذرات گزارش شده است. افزودن نانوذرات سیلیس همچنین باعث کاهش فیلترات و افزایش ثبات حرارتی سیال حفاری می‌شود. علاوه بر این، نانوذرات سیلیس منافذ بسیار ریز شیل را به طور موثر مسدود می‌کنند و در نتیجه باعث کاهش میزان نفوذ سیال حفاری گلاکولی به نمونه‌های شیل می‌شوند [۲۸]. ویسی و همکاران با بررسی اثر نانوذرات اکسید آلومینیم و اکسید مس به عنوان افزایه‌های گل حفاری نشان دادند که افزودن نانوذرات در حالی که تأثیر چندانی بر ضخامت کیک گل ندارند موجب کاهش قابل توجه فیلتراسیون می‌شوند [۲۹].

در این مطالعه خواص رئولوژیکی و فیلتراسیون گل حفاری پایه آبی با افزودن نانوذرات اکسید سیلیسیم و اکسید آهن و در ترکیب با پلی‌اکریل آمید (PAM) مورد بررسی قرار گرفت. برای مشخصه‌یابی مواد مورد استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. خواص رئولوژی شامل تغییرات نرخ برشی، ویسکوزیته پلاستیک و مقاومت ژله‌ای برای نمونه‌های سیال حفاری با غلظت‌های مختلف از افزایه پلیمری و نانوذرات اندازه‌گیری شد. همچنین اثر افزایه‌های مختلف بر میزان فیلترات گل حفاری و کیفیت کیک گل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.



## ۲- مواد و روش ها

جدول ۱: فرمولاسیون انواع سیالات مورد بررسی در این مطالعه

نمونه سیال	فرمولاسیون
BF	Water+10%wt Bentonite+%0.4wt Salt
MS1	BF+0.2%wt nano silica
MS2	BF+0.4%wt nano silica
MS3	BF+0.6%wt nano silica
MS4	BF+0.8%wt nano silica
MS5	BF+1%wt nano silica
MS6	BF+0.5%wt nano iron oxide
MS7	BF+1%wt nano iron oxide
MS8	BF+1.5%wt nano iron oxide
MS9	BF+2%wt nano iron oxide
MS10	BF+0.1%wt PAM
MS11	BF+0.2%wt PAM
MS12	BF+0.3%wt PAM
MS13	BF+0.4%wt PAM
MS14	MS5+0.4%wt PAM
MS15	MS9+0.4%wt PAM

## ۱-۱- مواد

رس مونتموریلونیت با نام تجاری بنتونایت به عنوان یکی از مهم‌ترین افزودنی‌های گل حفاری مطرح است. افزودن آب به این رس سبب هیدراسیون و متورم شدن آن به علت جذب آب به سطح لایه‌های رس شده و موجب افزایش گرانشی می‌شود. همچنین به علت ریز بودن ذرات رس خاصیت فیلتراسیونی مناسبی دارد. در این مطالعه از یک نمونه رس تهیه شده از سکوی حفاری یکی از میداین جنوب ایران استفاده و برای تعیین میزان ترکیبات مختلف موجود در این نمونه آنالیز XRD به کار برده شد و ساختار بلوری بنتونایت شناسایی شد.

نانوذرات اکسید سیلیسیم ( $\text{SiO}_2$ ) و اکسید آهن ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) و پلی‌اکریل آمید خنثی از شرکت سیگما آلدریج تهیه شدند. تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مشخص کردن اندازه و مورفولوژی نانوذرات انجام گرفت. برای تعیین ساختار و نوع پیوندهای مولکولی در سطح نانوساختارها از آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. طیف‌سنجی مادون قرمز بر اساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی انجام می‌گیرد. این روش برای تعیین ساختار و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی به کار می‌رود. از کلسیم کلرید به عنوان نمک در ترکیب گل حفاری استفاده شد.

## ۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

در ابتدا سیال حفاری پایه به عنوان مرجعی برای مقایسه اثر افزایش‌های مختلف تهیه شد. سیال پایه، یک سیال مرسوم و معمول حفاری است که در اغلب عملیات‌های حفاری از آن استفاده می‌شود. برای تهیه سیال پایه، مقدار مشخصی بنتونایت به آب اضافه شد، به گونه‌ای که سیال حاوی ۱۰٪ وزنی بنتونایت باشد، سپس وزن، خواص رئولوژی و فیلتراسیون آن اندازه‌گیری شده و مدل‌های مختلف برای توصیف آن با داده‌های آزمایشگاهی انطباق داده شد. پس از آن افزایش پلیمری و نانوذرات در غلظت‌های معینی به سیال پایه اضافه شده و تغییرات ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ فرمولاسیون و نحوه ساخت انواع سیالات مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

در این قسمت طراحی آزمایش‌های لازم برای بررسی تاثیر نانوذرات سیلیس آبدوست و نانوذرات اکسید آهن به همراه پلیمر در کنترل فیلتراسیون ارائه می‌شود. نانوسیلیس شامل مجموعه‌ای از ذرات کوچک  $\text{SiO}_2$  است که از طریق پیوندهای شیمیایی به یکدیگر متصل شده و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. در این مطالعه از نانوسیلیس آبدوست استفاده شد که به خوبی در آب پخش شده و می‌تواند پایداری خوبی در آب داشته باشد.

## ۲-۳- اندازه‌گیری خواص رئولوژی

برای بررسی تاثیر افزودن نانوذرات و پلیمر بر رئولوژی نمونه‌های مختلف گل حفاری از دستگاه گرانشی سنج مدل Fann35 استفاده شد. برای تعیین رفتار رئولوژیکی سیال حفاری، تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی اندازه‌گیری و ثبت شد. همچنین گرانشی ظاهری و مقاومت ژلاتینه گل حفاری نیز اندازه‌گیری شد. برای محاسبه خواص مختلف سیال حفاری با استفاده از داده‌های به دست آمده از گرانشی‌سنج، روابط ۱ تا ۵ به کار برده شد:

$$GS = \theta_3 \times 1.067 \times 0.44 \times CF \quad (1)$$

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



شکل ۱: تصویر گرانروی سنج

انجام می‌شود. یکی از معروف‌ترین این روش‌ها استفاده از دستگاه فیلترپرس استاندارد است که در حالت استاتیک فیلتراسیون گل حفاری را اندازه‌گیری می‌کند. حالت استاتیک به معنی عدم جریان سیال حفاری است و در طی این تست سیال حفاری در حالت سکون قرار دارد. در دستگاه فیلترپرس از یک محفظه و یا سل برای نگهداری سیال حفاری استفاده می‌شود. سیال حفاری در درون این محفظه ریخته شده و سپس با بستن درپوش محفظه فشار ۱۰۰ psi درون محفظه اعمال می‌شود. تامین فشار از طریق یک سیلندر حاوی گاز نیتروژن فشار بالا انجام می‌گیرد. درپوش پایینی محفظه حاوی یک توری است که روی این توری یک کاغذ صافی با تخلخل مشخص قرار داده می‌شود. این کاغذ صافی نقش سازندی که سیال حفاری در واقعیت با آن در تماس است را دارد. با عبور سیال از کاغذ صافی تحت فشار محفظه، میزان فیلترات گل برای مدت زمان ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. هر چقدر حجم فیلترات سیال حفاری کمتر باشد، سیال مورد نظر کیفیت بهتری برای استفاده در حفاری چاه دارد. شکل ۲ شماتیک دستگاه فیلترپرس به همراه اجزای آن را نشان می‌دهد. پس از انجام آزمایش، محفظه دستگاه باز شد و مواد جامد ته‌نشین شده بر سطح کاغذ صافی به عنوان کیک گل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین کیفیت و مورفولوژی سطحی کیک گل نمونه‌های مختلف سیال حفاری حاوی نانوذرات از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

$$SR = 1.72 \times rpm \quad (3)$$

$$SS = \theta \times 1.067 \times 0.44 \times CF \quad (4)$$

$$YP = (2\theta_{300} - \theta_{600}) \times 1.067 \times 0.44 \times CF \quad (5)$$

که در این روابط:

GS : مقاومت ژله‌ای سیال حفاری (Gel Strength) بر

حسب پاسکال

AV : میزان گرانروی ظاهری (Apparent Viscosity) بر

حسب سانتی‌پواز (cp)

PV : گرانروی پلاستیک (Plastic Viscosity) بر حسب

سانتی‌پواز

SR : نرخ برشی سیال بر حسب ( $S^{-1}$ )

SS : تنش برشی

YP : میزان تنش تسلیم بر حسب پاسکال

مقدار CF : ضریب کالیبراسیونی دستگاه

ضریب  $1/0.67 \times 0.44$  : تبدیل کننده واحد ( $lb/100ft^2$ )

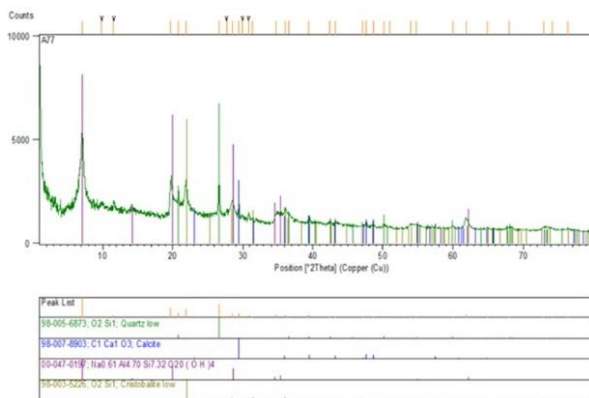
به پاسکال (Pa) است.

علاوه بر روابط بالا که به صورت مستقیم از دستگاه گرفته می‌شود، رسم داده‌های تنش برشی بر حسب نرخ برشی و تعیین مقدار پارامترهای رئولوژی با برازش منحنی روش دقیق‌تری است. به عنوان مثال چنانچه داده‌ها با خط راستی با شیب ثابت که عرض از مبدا آن صفر باشد برازش شوند، سیال نیوتنی بوده و شیب خط مقدار گرانروی سیال را نشان می‌دهد. همچنین گرانروی پلاستیک از روی شیب خط نمودار برای مواقعی که عرض از مبدا داده‌ها صفر نیست به دست می‌آید. در این حالت مقدار عرض از مبدا تنش تسلیم را نشان می‌دهد. میزان خاصیت ژله‌ای گل حفاری ناشی از اندرکنش‌های الکترواستاتیکی بین ذرات باردار رس در حالت بدون جریان است که باعث می‌شود برای جریان یافتن گل حفاری یک حداقل تنش مورد نیاز باشد. تنش واروی یا تسلیم گل حفاری همان حداقل تنش مورد نیاز جهت جریان گل است که از وجود ذرات جامد در سیال حفاری و اصطکاک بین آنها ناشی می‌شود. شکل ۱ دستگاه گرانروی سنج مورد استفاده را نشان می‌دهد.

## ۲-۴- اندازه‌گیری فیلتراسیون

بررسی کیفیت کیک گل و کنترل فیلتراسیون حین عملیات حفاری، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مختلفی

شکل ۵ آنالیز XRD نمونه بنتونایت را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۲ درصد وزنی کانی‌های موجود در پودر بنتونایت آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نمونه بنتونایت مورد استفاده عمدتاً حاوی مونتموریلونایت است که در آب خاصیت متورم‌شوندگی بالایی دارد. دانسیته بنتونایت مورد استفاده برابر با  $2.210 \text{ (g/cc)}$  اندازه‌گیری شد.



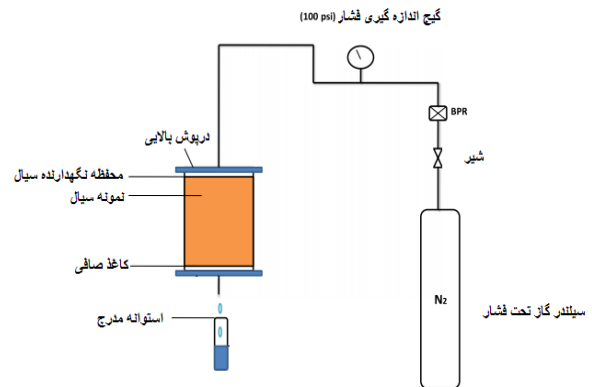
شکل ۵: آنالیز XRD بنتونایت

جدول ۲: درصد وزنی ترکیبات بنتونایت

ترکیب	Kaolin	Quartz	Montmorillonite	Cristobalite
درصد وزنی	۱۰٫۳	۴	۶۵٫۹	۱۹٫۷

شکل ۶ آنالیز FTIR برای نانوذرات اکسید آهن و همچنین نمونه بنتونایت را نشان می‌دهد. وجود ترکیب  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  به وسیله جذب کششی قوی در  $579 \text{ cm}^{-1}$  که مربوط به پیوند Fe-O است مشخص می‌شود. در شکل ۶-الف برای نانوذرات اکسید آهن، وجود پیک در  $558 \text{ cm}^{-1}$  در طیف حاصل حضور نانوذرات آهن را تایید می‌کند. همچنین شکل ۶-ب طیف مربوط به ذرات رس بنتونایت را نشان می‌دهد که به خوبی با آنالیزهای مربوطه مطابقت دارد.

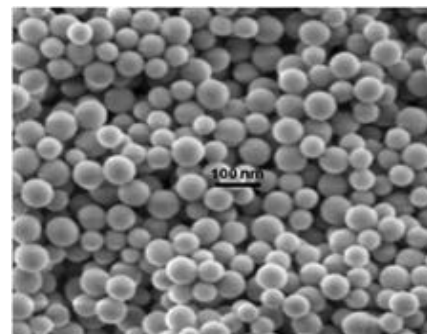
شکل ۶-ج طیف نانو اکسید سیلیسیم را نشان می‌دهد. وجود پیک در در  $3474 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه‌های هیدروکسیل (Si-OH) و قله دیگر در در  $1103 \text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده وجود ترکیبات Si-O-Si است.



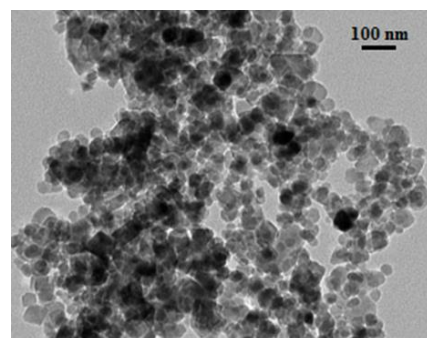
شکل ۲: شماتیک دستگاه فیلتر پرس

### ۳- نتایج و بحث

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تصاویر SEM نانوذرات اکسید سیلیسیم و اکسید آهن را به همراه مقیاس اندازه ذرات نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که اندازه نانوذرات مورد استفاده کمتر از  $100 \text{ nm}$  نانومتر است. نانوذرات اکسید سیلیسیم ( $\text{SiO}_2$ ) به علت وجود بار سطحی منفی در آب قابل حل و نانوذرات اکسید آهن از نوع  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  است.



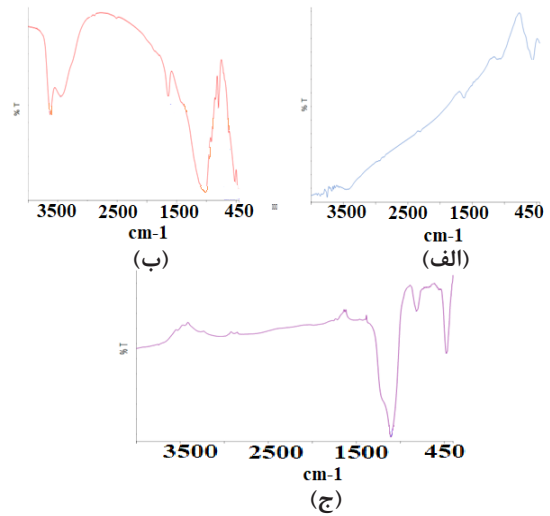
شکل ۳: تصویر SEM نانوذرات سیلیکا



شکل ۴: تصویر SEM نانوذرات اکسید آهن

جدول ۳: داده‌های رئولوژی نمونه‌های سیال حفاری

نرخ برشی (1/s)	تنش برشی (Pa)					
	۵٫۱	۱۰٫۲	۱۷۰٫۳	۳۴۰٫۶	۵۱۰٫۹	۱۰۲۱٫۸
BF	۱٫۰۱	۱٫۵۲	۳٫۰۴	۳٫۵۳	۴٫۵۶	۷٫۶۱
MS1	۰٫۵۰	۱٫۲۶	۲٫۵۳	۳٫۵۵	۴٫۴۶	۷٫۱۰
MS2	۰٫۵۰	۱٫۲۶	۲٫۵۳	۳٫۰۴۵	۴٫۰۶	۶٫۵۹
MS3	۰٫۶۰	۱٫۵۲	۳٫۰۴	۳٫۲۹	۴٫۵۶	۷٫۱۰
MS4	۱٫۰۱	۱٫۵۲	۳٫۵۵	۴٫۰۰	۴٫۵۶	۷٫۱۰
MS5	۱٫۰۱	۱٫۵۲	۳٫۵۵	۴٫۵۸	۵٫۵۸	۸٫۶۲
MS6	۱٫۰۱۵	۱٫۵۲	۳٫۵۵	۴٫۳۴	۴٫۵۶	۷٫۶۱
MS7	۱٫۰۱۵	۱٫۵۲	۳٫۵۵	۴٫۵۸	۵٫۰۷	۷٫۶۱
MS8	۱٫۲۶	۱٫۷۷	۴٫۰۶	۴٫۸۲	۵٫۵۸	۸٫۱۲
MS9	۱٫۵۲۲	۲٫۰۳	۴٫۵۸	۵٫۵۳	۶٫۵۹	۹٫۱۳
MS10	۲٫۹۴	۵٫۱۷	۹٫۶۴	۱۲٫۸۸	۱۵٫۹۸	۲۴٫۳۶
MS11	۲٫۷۹	۴٫۸۲	۹٫۸۹	۱۲٫۹۲	۱۵٫۳۷	۲۳٫۸۵
MS12	۲٫۹۴	۵٫۱۷	۹٫۶۴	۱۲٫۶۸	۱۶٫۴۴	۲۵٫۵۲
MS13	۳٫۲۴	۵٫۳۲	۱۰٫۳۵	۱۳٫۰۵	۱۷٫۷۶	۲۷٫۱۵
MS14	۲٫۵۳۷	۴٫۳۱	۱۰٫۱۵	۱۴٫۷۸	۱۸٫۵۲	۲۷٫۹۱
MS15	۳٫۲۹	۴٫۵۶	۱۱٫۱۶	۱۵٫۷۳	۱۸٫۷۷	۳۰٫۴۵



شکل ۶: آنالیز FTIR؛ الف) نانوذرات اکسید آهن، ب) ذرات رس بنتونایت و ج) نانوذرات اکسید سیلیکا

### ۳-۱- خواص رئولوژی

برای بررسی اثرات پلیمر و نانوذرات بر خواص رئولوژیکی گل حفاری یک نمونه سیال پایه به عنوان مرجع مقایسه‌ای در نظر گرفته شد. گل حفاری پایه آبی حاوی رس بنتونایت ساده‌ترین شکل سیال حفاری است که به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفت. خواص سایر نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید سیلیسیم و اکسید آهن به همراه پلیمر با سیال پایه مقایسه و اثر هر کدام از افزایش‌ها بررسی شد.

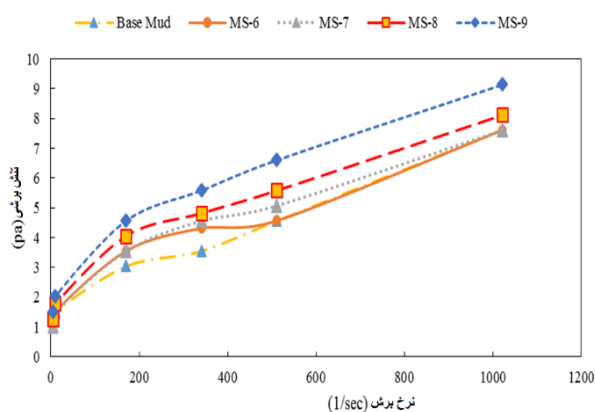
پس از تهیه سیال پایه در ابتدا با اضافه کردن نانوذرات اکسید سیلیسیم در غلظت‌های مختلف (نمونه‌های MS1-MS5) خواص رئولوژی نانوسیال حفاری بررسی و اندازه‌گیری شد، سپس اندازه‌گیری خواص رئولوژی گل حاوی نانوذرات اکسید آهن (نمونه‌های MS6-MS9) انجام شد. در مرحله بعد خواص رئولوژیکی گل حفاری حاوی پلیمر (نمونه‌های MS10-MS13) مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت خواص گل حاوی پلیمر به همراه ۱ درصد وزنی نانوذرات سیلیس و ۲ درصد وزنی نانوذرات اکسید آهن (نمونه‌های MS13-MS15) اندازه‌گیری و مقایسه شد. جدول ۳ داده‌های رئولوژی این سیالات را نشان می‌دهد.

جدول ۴ میزان مقاومت ژله‌ای، تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک نمونه سیالات مختلف را نشان می‌دهد (داده‌های گرانروی پلاستیک از برازش منحنی به دست آمده‌اند). همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس به سیال پایه در ابتدا و در غلظت‌های کمتر از ۰٫۶ wt% میزان خواص رئولوژی از جمله تنش تسلیم و ژلاتینه کاهش می‌یابد ولی در

جدول ۴: خواص رئولوژیکی نمونه‌های مختلف سیال حفاری

نمونه سیال	مقاومت ژله‌ای (Pa)	تنش تسلیم (Pa)	گرانروی پلاستیک (cp)
BF	۱٫۰۱۶	۱٫۵۲۳	۷٫۸
MS1	۱٫۰۱۵	۱٫۸۲۷	۷٫۲
MS2	۰٫۶۰۹	۱٫۵۲۲	۶٫۵
MS3	۰٫۵۰۷	۲٫۰۳۱	۷٫۱
MS4	۰٫۸۱۲	۲٫۰۳۱	۷٫۴
MS5	۱٫۰۱۸	۲٫۵۳۸	۸٫۵
MS6	۱٫۲۶۸	۱٫۵۲۳	۷٫۵
MS7	۱٫۰۱۵	۲٫۵۳۷	۷٫۹
MS8	۱٫۰۱۵	۳٫۰۴۵	۸٫۳
MS9	۱٫۰۱۵	۴٫۰۶	۹٫۵
MS10	۲٫۷۹۲	۷٫۶۱۲	۲۴٫۱
MS11	۲٫۸۶۷	۶٫۹۰۲	۲۴٫۵
MS12	۲٫۹۴۵	۷٫۳۵۹	۲۵٫۱
MS13	۳٫۲۴۳	۸٫۳۷۵	۲۶٫۶
MS14	۲٫۵۳۸	۹٫۱۳۶	۲۷٫۵
MS15	۳٫۳۹۴	۷٫۱۰۶	۳۰٫۴

شکل ۸ نمودار تغییرات خواص رئولوژی گل حفاری حاوی نانوذرات اکسید آهن را نشان می‌دهد. مدل رئولوژی این نوع سیال نیز مشابه با مدل هرشل باکلی است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید آهن نمودار رئولوژی نسبت به سیال پایه تغییرات زیادی ندارد. علت این امر حجم کم نانوذرات اکسید آهن با توجه به دانسیته بالای آن بوده و اینکه بار سطحی زیادی برای تاثیر بر ذرات رس ندارند.



شکل ۸: رفتار رئولوژیکی گل حفاری حاوی نانوذرات اکسید آهن در غلظت‌های مختلف

تغییرات خواص رئولوژی گل حفاری حاوی پلیمر و نانوذرات مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود رئولوژی نمونه‌های سیال حفاری حاوی پلیمر نسبت به سیال پایه افزایش زیادی داشته و همچنین افزودن نانوذرات موجب افزایش بیشتر آن می‌شود. رفتار رئولوژیکی این نمونه‌های سیال حفاری نیز همانند دو نوع قبلی مشابه با مدل هرشل باکلی است. دیده می‌شود که استفاده از نانوذرات اکسید آهن به همراه درصد کمتری از پلیمر تاثیر بسزایی بر افزایش خواص رئولوژی گل‌های حفاری پایه آبی دارد که سبب بهبود خاصیت تمیزسازی چاه‌های حفاری و انتقال خرده‌های حفاری شده به سطح زمین می‌شود.

### ۳-۲- فیلتراسیون

نتایج فیلتراسیون نمونه‌های مختلف سیال حفاری در جدول ۵ نشان داده شده است. میزان فیلتراسیون کلی در بازه زمانی ۳۰ دقیقه برای همه سیالات اندازه‌گیری شده است.

غلظت‌های بالا این پارامترها شروع به افزایش می‌کنند. دلیل این امر وجود بار سطحی نانوذرات و برهمکنش آنها با ذرات رس است که موجب پخش‌شدگی صفحات رسی شده و در نتیجه خواص رئولوژی گل حفاری کاهش می‌یابد، اما در غلظت‌های بالای نانوذرات این مواد به عنوان ذرات جامد به گل اضافه شده‌اند و در نتیجه به عنوان یک افزاینده جامد در گل حفاری عمل می‌کنند و موجب افزایش خواص رئولوژی می‌شوند. با افزودن پلیمر به سیال حفاری خواص رئولوژی افزایش قابل توجهی می‌یابد.

شکل ۷ نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی برای نمونه گل حفاری حاوی نانوذرات اکسید سیلیسیم را نشان می‌دهد. دیده می‌شود مدل رئولوژی این نوع سیال مشابه با مدل هرشل باکلی است. مدل هرشل باکلی مطابق با رابطه ۶ دارای عرض از مبدا و رفتار توانی است.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (6)$$

که در آن:

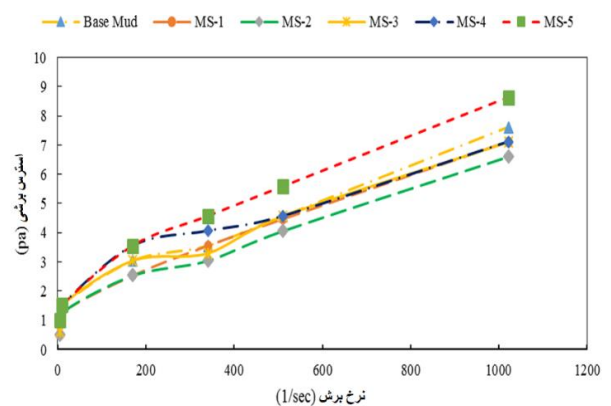
$T_0$ : تنش تسلیم

$k$ : میزان ثابت مقاومت سیال

$\gamma$ : نرخ برشی اعمالی

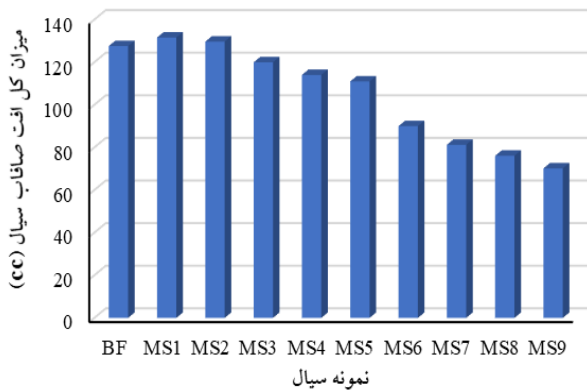
$n$ : شاخص رفتاری سیال است.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است برای غلظت‌های کم نانوذرات (SM1 تا SM3) نمودار رئولوژی پایین‌تر از سیال پایه قرار می‌گیرد ولی برای غلظت‌های بالاتر این نمودار بالاتر از سیال پایه قرار می‌گیرد که به معنی بهبود خواص رئولوژی در غلظت‌های بالای نانوذرات است.

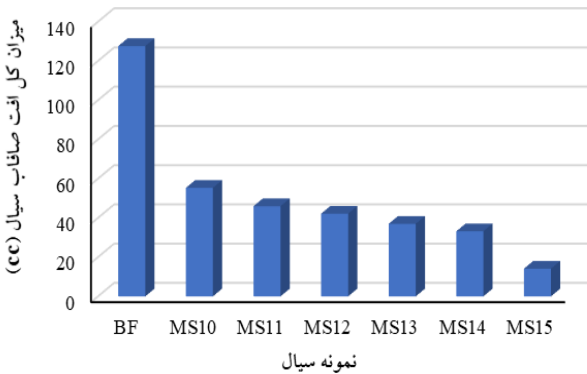


شکل ۷: رفتار رئولوژیکی گل حفاری حاوی نانوذرات اکسید سیلیسیم در غلظت‌های مختلف

به علت سنگین تر بودن ذرات و ریزتر بودن آن‌ها و تشکیل کیک گل با تراوایی کمتر است. شکل ۱۱ تغییرات فیلتراسیون سیالات حفاری حاوی نانوذرات به همراه پلیمر در مقایسه با سیال پایه در حالت استاتیک را نشان می‌دهد. افزودن پلیمر باعث افزایش گرانروی و در نتیجه کاهش رفتار فیلتراسیونی شده که در ترکیب با نانوذرات اکسید آهن حداقل مقدار فیلتراسیون را نشان داده است.

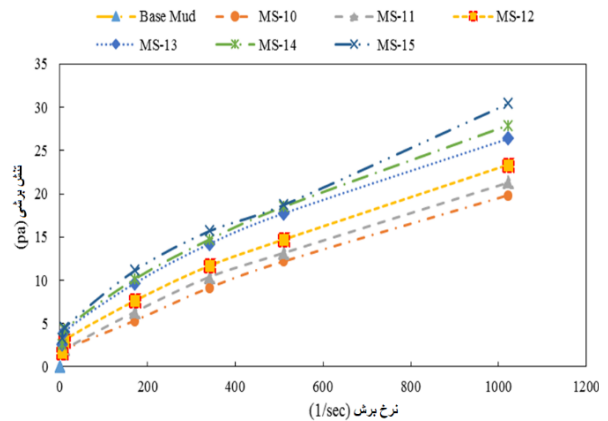


شکل ۱۰: میزان افت صافاب برای نمونه‌های مختلف سیال حاوی نانوذرات



شکل ۱۱: میزان افت صافاب برای نمونه‌های مختلف سیال حاوی نانوذرات و پلیمر

در شکل ۱۲ تصاویر SEM کیک گل برای نمونه‌های مختلف سیال حفاری که کمترین افت صافاب را با هر یک از افزایه‌های مورد استفاده داشته‌اند نشان داده شده است. نمونه MS15 در مقایسه با سایر نمونه‌ها مورفولوژی یکنواخت دارد و حفرات سطح کیک گل به خوبی بسته شده‌اند. این امر



شکل ۹: رفتار رئولوژیکی گل حفاری حاوی پلیمر و نانوذرات در غلظت‌های مختلف

جدول ۵: افت صافاب نمونه‌های مختلف سیال حفاری

کد نمونه سیال	میزان افت کلی صافاب (cc)
BF	۱۲۷٫۶
MS1	۱۳۱٫۶
MS2	۱۲۹٫۷
MS3	۱۱۹٫۹
MS4	۱۱۴٫۰
MS5	۱۱۱٫۰
MS6	۹۰٫۰
MS7	۸۱٫۲
MS8	۷۶٫۱
MS9	۷۰٫۲
MS10	۵۵٫۳
MS11	۴۵٫۹
MS12	۴۲٫۱
MS13	۳۷٫۰
MS14	۳۳٫۲
MS15	۱۴٫۱

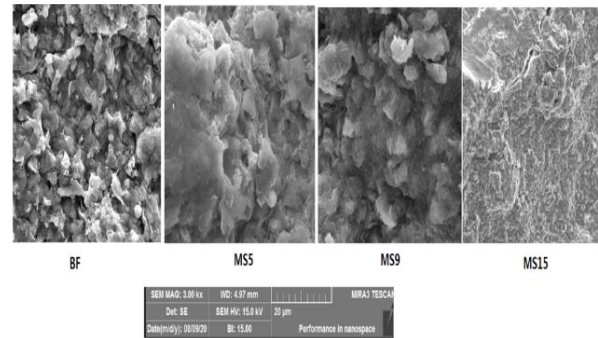
شکل ۱۰ تغییرات فیلتراسیون سیالات حفاری حاوی نانوذرات در مقایسه با سیال پایه در حالت استاتیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود غلظت کم نانوسیلیکا تاثیر منفی بر رفتار فیلتراسیونی داشته است، در حالی که غلظت بالای این نانوذرات باعث بهبود عملکرد فیلتراسیون گل حفاری شده است. همچنین نانوذرات اکسید آهن از غلظت‌های کم تاثیر بسیار بیشتری بر کاهش فیلتراسیون داشته که این امر

سبب کاهش تراوایی کیک گل حفاری شده و در نتیجه میزان فیلترات گل کاهش می‌یابد.

شده و در نتیجه سبب کاهش میزان فیلترات می‌شود. استفاده از فرمولاسیون ارائه شده در این تحقیق برای سیالات حفاری پایه آبی موجب کاهش آسیب سازندهای نفتی و بهبود خواص تمیزسازی چاه با حداقل هزینه می‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1] He, W., Gomez, S. L., Leonard, R. S., and Li, D. T. (2014). "Shale-fluid interactions and drilling fluid designs". In IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference, European Association of Geoscientists & Engineers, January, pp. cp-395.
- [2] Fritz, B., and Jarrett, M. (2012). "Potassium silicate-treated water-based fluid: An effective barrier to instability in the Fayetteville shale". In: IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, OnePetro, March.
- [3] Alford, S. E., Asko, A., Campbell, M., Aston, M. S., and Kvalvaag, E. (2005). "Silicate-based fluid, mud recovery system combine to stabilize surface formations of Azeri Wells". In: SPE/IADC Drilling Conference, OnePetro, February.
- [4] Van Oort, E. (1997). "Physico-chemical stabilization of shales". In: International Symposium on Oilfield Chemistry, OnePetro, February.
- [5] Samaei, S. M., and Tahmasbi, K. (2007). "The possibility of replacing oil-based mud with the environmentally acceptable water-based glycol drilling mud for the Iranian fields". In: E&P Environmental and Safety Conference, OnePetro, March.
- [6] Stowe, C., Halliday, W., Xiang, T., Clapper, D., Morton, K., and Hartman, S. (2001). "Laboratory pore pressure transmission testing of shale". In: AADE National Drilling Technical Conference, March, 1-10.
- [7] Zhang, J., Rojas, J. C., and Clark, D. E. (2008). "Stressed-Shale Drilling Strategy--Water-Activity Design Improves Drilling Performance". SPE Drilling & Completion, 23(04): 385-393.
- [8] Fakoya, M. F., and Shah, S. N. (2013). "Rheological properties of surfactant-based and polymeric nano-fluids". In: SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, OnePetro, March.
- [9] Davison, J. M., Clary, S., Saasen, A., Allouche, M., Bodin, D., and Nguyen, V. A. (1999). "Rheology of various drilling fluid systems under deepwater drilling conditions and the importance of accurate predictions of downhole fluid hydraulics". In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro, October.



شکل ۱۲: تصاویر SEM از سطح کیک گل نمونه‌های مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر افزایه نانوذرات اکسید سیلیسیم آبدوست و اکسید آهن در ترکیب با پلی اکریل آمید در گل حفاری پایه آبی برای کنترل فیلتراسیون و رئولوژی در عملیات حفاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود نانوذرات سیلیسیم سبب افزایش خواص رئولوژی گل حفاری شد، به طوری که در غلظت حداکثر ۱ درصد وزنی افزایش گرانروی گل تا حداکثر ۱۵ درصد مشاهده شد. در واقع میزان گرانروی به علت جدایش و پراکندگی صفحات رس در اثر ورود نانوذرات به درون آنها افزایش یافته است. نتایج حاصل از افزودن نانوذرات اکسید آهن به سیال حفاری پایه آبی تاثیر کمی بر خواص رئولوژی نشان داد. افزودن پلیمر به سیال حفاری پایه آبی موجب افزایش قابل توجه گرانروی و ژلاتینه شدن آن شد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که خواص ژله‌ای گل حفاری در غلظت‌های کم نانوذرات سیلیسیم کاهش می‌یابد که ممکن است به علت تداخل بارهای سطح صفحات رس با نانوذرات باشد. نتایج فیلتراسیون نشان داد که استفاده از نانوذرات اکسید سیلیسیم و آهن در ترکیب با پلیمر توان کاهش بیشتر نرخ فیلتراسیون نسبت به استفاده از پلیمرها به تنهایی را دارد، به طوری که میزان فیلترات گل از ۱۲۸ سانتی مترمکعب به حدود ۱۴ سانتی مترمکعب کاهش یافت. تصاویر SEM از سطح نمونه‌های کیک گل نشان داد که وجود پلیمر در ترکیب با نانوذرات به خوبی موجب مسدود کردن و پوشش حفرات سطح کیک گل و کاهش تراوایی آن

- [21] Blinov, P. A., and Dvoynikov, M. V. (2018). "Rheological and Filtration Parameters of the Polymer Salt Drilling Fluids". *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(14): 5661-5664.
- [22] Movahedi, H., Jamshidi, S., and Hajipour, M. (2021). "New Insight into the Filtration Control of Drilling Fluids Using a Graphene-Based Nanocomposite under Static and Dynamic Conditions". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(38): 12844-12857.
- [23] Hassani, S. S., Amrollahi, A., Rashidi, A., Soleymani, M., and Rayatdoost, S. (2016). "The effect of nanoparticles on the heat transfer properties of drilling fluids". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146: 183-190.
- [24] Abdo, J., and Haneef, M. D. (2013). "Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells". *Applied Clay Science*, 86: 76-82.
- [25] Fazelabdolabadi, B., Khodadadi, A. A., and Sedaghatzadeh, M. (2015). "Thermal and rheological properties improvement of drilling fluids using functionalized carbon nanotubes". *Applied Nanoscience*, 5(6): 651-659.
- [26] Hassanzadeh, A., Alihosseini, A., Monajjemi, M., and Nazari-Sarem, M. (2020). "Nano-alumina based (Alpha and gamma) drilling fluid system to stabilize high reactive shales". *Petroleum*.
- [27] Hajiabadi, S. H., Bedrikovetsky, P., Mahani, H., Khoshsima, A., Aghaei, H., Kalateh-Aghamohammadi, M., and Habibi, S. (2020). "Effects of surface modified nanosilica on drilling fluid and formation damage". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 194: 107559.
- [28] Moraveji, M. K., Ghaffarkhah, A., Agin, F., Talebkeikhah, M., Jahanshahi, A., Kalantar, A., and Arjmand, M. (2020). "Application of amorphous silica nanoparticles in improving the rheological properties, filtration and shale stability of glycol-based drilling fluids". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 115: 104625.
- [29] Veisi, E., Hajipour, M., and Biniiaz Delijani, E. (2020). "Experimental study on thermal, rheological and filtration control characteristics of drilling fluids: effect of nanoadditives". *Oil & Gas Science and Technology—Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 75: 36. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst/2020033>.
- [10] Ochoa, M. V. (2006). "Analysis of drilling fluid rheology and tool joint effect to reduce errors in hydraulics calculations". Texas A&M University.
- [11] Vajargah, A. K., and van Oort, E. (2015). "Determination of drilling fluid rheology under downhole conditions by using real-time distributed pressure data". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24: 400-411.
- [12] Mahto, V., and Sharma, V. P. (2004). "Rheological study of a water based oil well drilling fluid". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 45(1-2): 123-128.
- [13] Movahedi, H., Farahani, M. V., and Jamshidi, S. (2017). "Application of Hydrated Basil Seeds (HBS) as the herbal fiber on hole cleaning and filtration control". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152: 212-228.
- [14] de Oliveira, V. A. V., dos Santos Alves, K., da Silva-Junior, A. A., Araújo, R. M., Balaban, R. C., and Hilliou, L. (2020). "Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application". *Journal of Molecular Liquids*, 299: 112139.
- [15] Gudarzifar, H., Sabbaghi, S., Rezvani, A., and Saboori, R. (2020). "Experimental investigation of rheological & filtration properties and thermal conductivity of water-based drilling fluid enhanced". *Powder Technology*, 368: 323-341.
- [16] Gowida, A., Elkatatny, S., Abdelgawad, K., and Gajbhiye, R. (2020). "Newly developed correlations to predict the rheological parameters of high-bentonite drilling fluid using neural networks". *Sensors*, 20(10): 2787.
- [17] Samnejad, M., Gharib Shirangi, M., and Ettehad, R. (2020). "A digital twin of drilling fluids rheology for real-time rig operations". In *Offshore Technology Conference, OnePetro*, May.
- [18] Huang, Y., Zheng, W., Zhang, D., and Xi, Y. (2020). "A modified Herschel-Bulkley model for rheological properties with temperature response characteristics of poly-sulfonated drilling fluid". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(12): 1464-1475.
- [19] Moraveji, M. K., Ghaffarkhah, A., Agin, F., Talebkeikhah, M., Jahanshahi, A., Kalantar, A., and Arjmand, M. (2020). "Application of amorphous silica nanoparticles in improving the rheological properties, filtration and shale stability of glycol-based drilling fluids". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 115: 104625.
- [20] Liu, X., Yuan, Z., Wang, A., Wang, C., Qu, J., Chen, B., and Wen, Y. (2020). "Cellulose nanofibril-polymer hybrids for protecting drilling fluid at high salinity and high temperature". *Carbohydrate Polymers*, 229: 115465.

<sup>1</sup> Rate of Penetration<sup>2</sup> Weight on Bit