



Investigating the synergistic effect of Hybrid-NanoFluids (HNFs) dispersed in smart water, modified with green surfactant on solution stability, viscosity and interfacial tension in contact with crude oil of a southwestern field of Iran

Azin Khajeh kulaki¹, Seyed Mojtaba Hosseini-Nasab^{2*} and Faramarz Hormozi³

1. Faculty of Petroleum Engineering, University of Semnan Iran.

2. School of Chemical & Petroleum and Gas Engineering, University of Science & Technology Iran.

3. Faculty of Chemical & Petroleum and Gas Engineering, University of Semnan Iran

hosseininasab@iust.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2024.5376.3393

Received: February 5, 2024

Accepted: October 16, 2024

Introduction

Many of the proposed applications of nanotechnology in oilfields could be categorized into the areas of imaging, enhanced oil recovery, drilling, completion, gas mobility control and use in naturally fractured reservoirs [1]. Many studies have been conducted to use nanoparticles to improve oil recovery, as they have the ability to alter wettability towards water wet, reduce water-oil interfacial tension, and increase efficiency by improving viscosity [1-6]. The main mechanism responsible for the effectiveness of smart water in improving oil recovery is the change in the wettability of the rock towards water-wet, which causes the separation of oil layers from the rock surface. The injection of surfactants reduces the interfacial tension (IFT) of crude oil and brine, alters the wettability of the rock and reduces the capillary forces that trap oil in the porous medium. Therefore, the combination of low-saline water and surfactant could be an efficient approach by combining the destabilizing effect of the oil layer by low-saline water and the reduction of interfacial tension by the surfactant. This combined method provides more oil recovery than either method alone [7].

Experimental

Materials and Equipment

SiO₂ nanoparticles with 99.5 % purity, 15-20 nm in diameter and γ - Al₂O₃ nanoparticles with 99% purity, 20 nm in diameter were purchased from US Research Nano-Materials. The mass fraction ratio of γ -Al₂O₃ to SiO₂ NPs was set at 10:90, 30:70 and 50:50. The brine was prepared by dissolving different salts (NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaCl₂.2H₂O and MgCl₂.6H₂O). The brine concentrations were prepared by dissolving in water with total dissolved solids (TDS) nearby 4071, 8142, 20400 and 40710 ppm. Gum Arabic was applied as a surfactant to aid disperse the nanoparticles and improve the stability of the nanofluids. Crude oil with 31.47° (API) and a viscosity of 25.93 (CST) was used from the oilfield in Iran. The formed droplets were analysed for measure IFT by professional drop shape analysis software (Apex DSA) based on pendant drop methods. A Brookfield DV3T digital viscometer was used at different temperatures to measure the viscosity of the NFs.

Designing Experiments

The experimental design was applied by the Taguchi

method nanofluids stability as response and low salinity water ppm, the mass fraction $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ wt% and surfactant concentration (ppm) as operating variables. Taguchi method, based on five levels and three factors, was applied to design experiments.

Preparation of Nanofluids

A concentration of 0.1 Wt% was applied to prepare nanofluids. In the first step, salts were added, then nanoparticles and surfactant were added to the solution at the same time. Finally, the nanofluids were placed on a magnetic stirrer for 15 min and then homogenized for one hour with an ultrasonic homogenizer at 70 watts.

Stability Test

All stability tests were performed at ambient temperature and pressure. After preparing the nanofluids, they were placed in test tubes with caps and away from sunlight and heat. Many researchers have recommended pH changes, surfactants, and ultrasonic homogenization to eliminate nanoparticle aggregation and produce a stable mixture [8-12]. All of these techniques modify the properties of nanoparticles and break the cluster structure of nanoparticles to create a stable suspension [11]. In this study, surfactants and ultrasonic homogenization were used to create stable nanosolutions. In Fig. 1, photos of the stabilities of the different NFs are shown. (a) Two hours after preparation. (b) 48 hours after preparation.

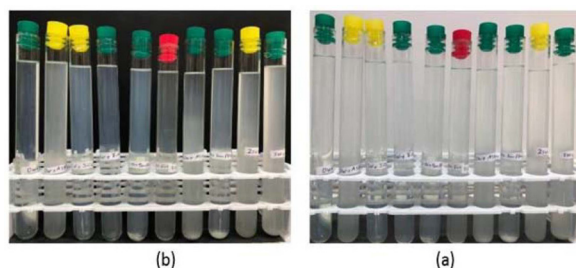


Fig. 1 Photographs of NFs showing the stability for (a) two hours, (b) 2nd day.

Results and Discussion

The results of Fig. 2 show that nanohybrids with mass ratios of 10:90 and 30:70 modified with gum arabic at 25 °C have lower viscosity than silica and gamma-alumina nanoparticles. In this study, by increasing temperature was reported a decreasing trend in viscosity. Viscosity of combinations of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ were higher than that of silica and gamma-alumina nanoparticles. Although, other studies have acknowledged that the viscosity of hybrid nanofluids depends on the selected nanoparticles and their composition [13]. In general, the viscosity of hybrid nanofluids is higher than that of ordinary fluids and single nanoparticles [13- 14]. Nanohybrid with mass ratio of 50:50 modified with 750 ppm gum arabic has

lower viscosity than that of single silica and gamma-alumina nanoparticles with increasing temperature. Among all nanofluids prepared, the combination of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ with a mass ratio of 50:50 modified with 750 ppm gum arabic at a temperature of 55 °C showed the lowest viscosity generation.

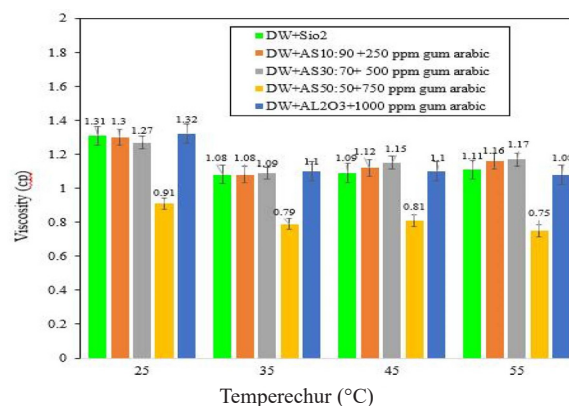


Fig. 2 The effect of increasing temperature on the viscosity of NFs dispersed in deionized water.

Fig. 3 shows the IFT of the nanofluids dispersed in brine with a concentration of 4071 ppm at ambient temperature and 60 °C. The NFs dispersed in brine with a concentration of 4071 ppm at 25 °C had a lower IFT than did the nanofluids dispersed in deionized water. This could be due to the reduction in IFT at low salt concentrations. The combination of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ with a mass fraction of 50:50 modified with GA dispersed in brine with a concentration of 4071 ppm had the minimum IFT of 0.99 mN/m in 60 °C compared to that of the other nanofluids.

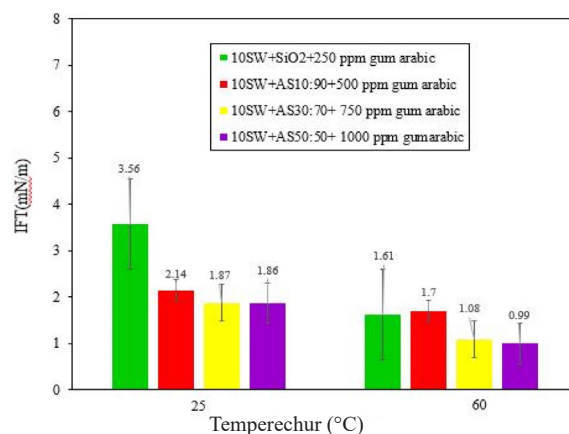


Fig. 3 The effect of temperature on the IFT of nanofluids dispersed in brine with a concentration of 4071 (ppm). At ambient and 60 °C.

Conclusion

In this study, the stability, IFT and viscosity of individual nanoparticles and nanohybrids dispersed in deionized water and waters with different salinities that were stabilized with the help of a green surfactant were investigated. Some of the results obtained from

this research are as follows:

- Among the base fluid salinity factor, the mass ratio of gamma-alumina nanoparticles to silica, and the concentration of gum arabic, the most influential factor for investigating the stability of nanosolutions was the mass ratio of nanogamma-alumina to silica.
- Nanofluids dispersed in brine with a concentration of 4071 (ppm) showed the lowest IFT. The lowest IFT was reported for the nanohybrid with a mass ratio of gamma-alumina to silica of 50:50.
- Temperature and salinity of the base fluid have a significant effect on the viscosity of nanofluids. The lowest viscosity was reported for nanofluids dispersed in deionized water.

Nomenclatures

HNFs: Hybrid NanoFluids

IFT: Interfacial Tension

NPs: Nanoparticles

TDS: Total Dissolved Solids

EOR; Enhanced Oil Recovery

References

- [1]. Lau, H. C., Yu, M., & Nguyen, Q. P. (2017). Nanotechnology for oilfield applications: Challenges and impact. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 1160-1169. doi.org/10.1016/j.petrol.2017.07.062. Petroleum Research,
- Rahman, M. M., Haroun, M., Al Kobaisi, M., Kim, M., Suboyin, A., Somra, B., Ponnambathayil, J.A. & Punjabi, S. (2022). Insights into nanoparticles, electrokinetics and hybrid techniques on improving oil recovered in carbonate reservoirs. *Energies*, 15(15): 5502. doi.org/10.3390/en15155502.
- Nowrouzi, I., Manshad, A. K., & Mohammadi, A. H. (2019). Effects of TiO_2 , MgO , and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano-particles in carbonated water on water-oil interfacial tension (IFT) reduction in chemical enhanced oil recovery (CEOR) process. *Journal of Molecular Liquids*, 292, 111348. doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111348.
- Adil, M., Lee, K. C., Zaid, H. M., & Manaka, T. (2020). Role of phase-dependent dielectric properties of alumina nanoparticles in electromagnetic-assisted enhanced oil recovery. *Nanomaterials*, 10(10), 1975. doi.org/10.3390/nano10101975.
- Mahmoudpour, M., & Pourafshary, P. (2021). Investigation of the effect of engineered water/nanofluid hybrid injection on enhanced oil recovery mechanisms in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107662. doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107662.
- Hu, Y., Zhao, Z., Dong, H., Vladimirovna Mikhailova, M., & Davarpanah, A. (2021). RETRACTED: Hybrid Application of Nanoparticles and Polymer in Enhanced Oil Recovery Processes. *Polymers*, 13(9), 1414. doi.org/10.3390/polym13091414.
- Pourafshary, P., & Moradpour, N. (2019). Hybrid EOR methods utilizing low-salinity water. *Enhanc. Oil Recovery Process. New Technol*, 8, 25.
- Yu, W., & Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of nanomaterials*, 2012(1), 435873. doi.org/10.1155/2012/435873.
- Sidik, N. A. C., Jamil, M. M., Japar, W. M. A. A., & Adamu, I. M. (2017). A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1112-1122. doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.221.
- Anushree, C., & Philip, J. (2016). Assessment of long term stability of aqueous nanofluids using different experimental techniques. *Journal of Molecular Liquids*, 222, 350-358. doi.org/10.1016/j.molliq.2016.07.051.
- Eshgarf, H., Kalbasi, R., Maleki, A., Shadloo, M. S., & Karimipour, A. (2021). A review on the properties, preparation, models and stability of hybrid nanofluids to optimize energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 1959-1983.
- Kumar, D. D., & Arasu, A. V. (2018). A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1669-1689. doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.257.
- Babar, H., Sajid, M. U., & Ali, H. M. (2019). Viscosity of hybrid nanofluids: a critical review. *Thermal Science*, 23(3 Part B), 1713-1754. doi.org/10.2298/TSCI181128015B.
- Hashemzadeh, S., & Hormozi, F. (2020). An experimental study on hydraulic and thermal performances of hybrid nanofluids in mini-channel: A new correlation for viscosity of hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140, 891-903.

بررسی اثر هم افزایی نانوسیالات هیبریدی پراکنده در آب هوشمند اصلاح شده با ماده فعال سطحی سبز بر پایداری، ویسکوزیته و کشش بین سطحی در تماس با نفت میدان جنوب غرب ایران

آذین خواجه کولکی^۱، سید مجتبی حسینی نسب^{۲*} و فرامرز هرمزی^۳

۱- گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

چکیده

هنگامی که ترکیب آب نمک، مواد فعال سطحی و نانوذرات به صورت همزمان استفاده می شود، کشش بین سطحی می تواند به کمترین مقدار خود برسد و متعاقباً بازیافت نفت افزایش یابد. در این مقاله از روش ترکیبی نانوذرات اکسیدفلزی اصلاح شده با ماده فعال سطحی دوست دار محیط زیست پراکنده شده در سیالات پایه با شوری متفاوت، استفاده شد. از نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا و نانوهیبریدهای آنها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ استفاده شد. همچنین آب مقطر و آب های هوشمند با شوری ppm ۴۰۷۱، ۸۱۴۲، ۴۰۷۱۰ و ۴۰۷۱۰ به عنوان سیالات پایه در نظر گرفته شدند. وجود یون های کلسیم و منیزیم در آب نمک باعث ایجاد خواص دوخصلتی در نانوسیالات می شود که بشدت باعث ناپایداری نانومواد در مجاورت با آب نمک می گردد. از این رو به منظور پایداری بیشتر از صمغ عربی به عنوان یک ماده فعال سطحی سبز استفاده شد. پس از ارزیابی مدت زمان پایداری نانوسیالات هیبرید، آزمون بررسی کشش بین سطحی در دماهای ۲۵ °C و ۶۰ °C و ویسکوزیته در دماهای ۲۵ °C، ۳۵ °C و ۵۵ °C انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد در نانوسیالات هیبریدی که از صمغ عربی استفاده نشد حدوداً تا دو ساعت پایداری خود را حفظ کردند. از طرفی دیگر نتایج نشان داد که افزایش دما می تواند منجر به کاهش کشش بین سطحی و ویسکوزیته برای نانوسیالات ها شود. کمترین کشش بین سطحی در دمای ۶۰ °C برای نانوهیبرید با نسبت جرمی گاما-آلومینا و سیلیکا ۵۰:۵۰ در آب هوشمند با شوری ppm ۴۰۷۱ به دست آمد. کمترین ویسکوزیته در دمای ۵۵ °C برای نانوهیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ در آب مقطر گزارش شد. به حداقل رسیدن کشش بین سطحی و بهبود رفتار رئولوژی نانوسیالات بهینه به سمت یک سیستم آب دوست قوی می تواند یک راه حل امیدوارکننده در کاربردهای ازدیاد و برداشت نفت در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: نانوسیال، پایداری، کشش بین سطحی، ویسکوزیته، گرادیان دما.

*مسئول مکاتبات

hosseininasab@iust.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2024.5376.3393)

مقدمه

نانوسیال‌های مبتنی بر اکسیدفلزی برای هدایت حرارتی و بهبود انتقال حرارت استفاده می‌شوند درحالی‌که نانوسیال‌های مبتنی بر سیلیکات دوستدار محیط زیست هستند، زیرا اجزای اصلی آن‌ها ماسه‌سنگ است [۱]. بسیاری از کاربردهای پیشنهادی نانوتکنولوژی در میادین نفتی را می‌توان در حوضه‌های تصویربرداری، ازدیاد و برداشت نفت، حفاری و تکمیل، کنترل تحرک گاز و استفاده در مخازن شکافدار طبیعی تقسیم‌بندی کرد [۲]. نانوذرات به دلیل کوچک بودن قطرشان، این توانایی را دارند تا از کوچکترین حفرات بدون اینکه به حفرات آسیب بزنند عبور کنند، به علاوه آنان سطح مخصوص بالایی دارند و بالا بودن سطح مخصوص سبب افزایش انرژی سطحی آنان می‌شود تا کارایی برهم کنششان را هنگام پراکندگی در حلال‌ها افزایش یابد [۳ و ۴]. تحقیقات بسیاری برای استفاده نانوذرات در بهبود بازیافت نفت بر این فرض صورت گرفته است که آنان قابلیت تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوستی، کاهش کشش‌بین‌سطحی آب-نفت و افزایش راندمان با بهبود ویسکوزیته را دارا هستند [۲ و ۳ و ۵-۸].

داردان و همکاران [۹] به بررسی رفتار رئولوژیکی روغن موتور (SAE40) حاوی مقادیر مختلف نانو هیبرید لوله‌ای کربنی چندجداره و آلومینا (Al_2O_3 -MWCNT) در محدوده‌ی دمایی $25^\circ C$ تا $50^\circ C$ پرداختند. اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته نشان داد که نانوسیال‌های هیبرید رفتار نیوتونی در تمام نسبت‌های حجمی را نشان می‌دهند، همچنین ویسکوزیته نانوسیال هیبرید با افزایش غلظت نانوافزودنی‌ها و کاهش دما، افزایش می‌یابد. در مطالعاتی دیگر [۱۰] از نانوذره آلفا-آلومینا با غلظت‌های ۰/۵ wt% تا ۱ برای بررسی تغییر ترشوندگی سنگ‌های کربناته و زاویه تماس استفاده شد. نتایج نشان داد که نانوذره آلفا-آلومینا با غلظت ۰/۵ wt% قادر به کاهش زاویه تماس و تغییر ترشوندگی سنگ از حالت نفت‌دوست

به آب‌دوست می‌باشد. نخعی و همکاران [۱۱] از نانوذرات آلومینا، سیلیکا و منیزیم‌دی‌اکسید برای کنترل مهاجرت ذرات دانه‌ریز در طول سیلاب‌زنی آب کم‌شور استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد که نانوذرات سیلیکا با غلظت ۰/۱ wt% بهترین عملکرد را برای کنترل مهاجرت ریزدانه‌ها در طول سیلاب‌زنی آب کم‌شور دارد. در تحقیقی دیگر از مواد فعال سطحی ستیل تری‌متیل آمونیوم برومید (CTAB) و سدیم‌دودسیل‌بنزن‌سولفونات (SDBS) به منظور ایجاد پایداری در نانوذرات آلومینا پراکنده‌شده در آب مقطر استفاده شد. در این مطالعه اثرات مواد فعال سطحی، غلظت آنان بر روی پتانسیل‌زتا و قطره‌ایدرولیکی در مقادیر مختلف PH به عنوان شاخصی از پایداری نانوسیالات مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت ۰/۰۶۴ wt% از SDBS بهترین شرایط پراکندگی را با توجه به مقادیر پتانسیل‌زتا ارائه می‌کند [۱۲]. بتانکور و همکاران [۱۳] به ارزیابی نحوه آماده‌سازی نانوسیالات براساس برهمکنش‌های بین مواد فعال سطحی، نانوذرات و آب نمک به منظور بررسی کشش‌بین‌سطحی برای نانوذرات آلومینا، سیلیکا و نانوذره آهن با روکش کربن پرداختند. نتایج آنان نشان داد که ترتیب افزودن نمک‌ها، مواد فعال سطحی و نانوذرات باعث کاهش کشش‌بین‌سطحی می‌شود و کمترین کشش‌بین‌سطحی برای نانوذره آلومینا گزارش شد. در تحقیقی دیگر از آب هوشمند و نانوسیال ترکیبی مبتنی بر سیلیکا با مواد فعال سطحی آنیونی و پلیمری برای بررسی بازیافت نهایی در مخازن با نفوذپذیری کم استفاده شد. نتایج نشان داد بازیافت نفت به دلیل حضور نانوسیالات هیبرید به طور قابل توجهی بالاتر از آب کم‌شور و آب مقطر است [۱۴].

از نانوذره سیلیکا بر روی نمونه مغزه‌های ماسه‌سنگی، کربناته، آهکی و شیلی به صورت گسترده توسط محققین به منظور بهبود بازیافت نهایی نفت استفاده شده است [۱۵-۲۰]. هنگام

کاهش می‌دهد. بنابراین ترکیب آب کم‌شور و ماده‌فعال‌سطحی می‌تواند یک رویکرد کارآمد با ترکیب اثر بی‌ثباتی لایه نفت توسط آب کم‌شور و کاهش کشش‌بین‌سطحی توسط ماده‌فعال‌سطحی باشد. این روش ترکیبی بازیافت‌نفت بیشتری را نسبت به هردو روش مستقل فراهم می‌آورد [۲۴]. مطالعات زیادی ارزش بازیابی‌ثالثیه نفت را با تزریق ماده‌فعال‌سطحی و آب کم‌شور گزارش داده‌اند [۱۳، ۲۵-۲۹].

احمدی و همکاران [۲۸] از یک ماده‌فعال‌سطحی مشتق‌شده از گیاهی بنام *Zyzphus spina Christi* با مقادیر مختلف شوری برای بررسی تغییر ترشوندگی و کشش‌بین‌سطحی در مخازن نفتی کربناته استفاده کردند. آزمون سیلاب‌زنی برای مطالعه اثر ماده‌فعال‌سطحی/شوری برای فاکتور بازیابی و نفوذپذیری نسبی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت ماده‌فعال‌سطحی منجر به افزایش قابل توجهی در نفوذپذیری نسبی و در نتیجه بازیافت‌نفت می‌شود. در پژوهشی دیگر ترکیبی از آب کم‌شور و دو ماده‌فعال‌سطحی طبیعی و غیریونی بنام *Gemini* و *Tribulus Terrestris* استفاده گردید. نتایج نشان داد که ماده‌فعال‌سطحی *Gemini* در شوری ۱۰۰۰ ppm است مقادیر بیشتری از کشش‌بین‌سطحی را کاهش دهد و نتایج مطلوب‌تری را برای کشش‌بین‌سطحی ارائه کند [۲۶]. مرادی و همکاران [۲۷] از آب هوشمند و ماده‌فعال‌سطحی پایه گیاهی به منظور تولید نفت در مخازن کربناته استفاده کردند. نتایج نشان داد ترکیب آب هوشمند و ماده‌فعال‌سطحی باعث افزایش بازیافت نفت تا ۷۲٪ می‌شود.

در سال‌های اخیر، بررسی نانوهیبریدها و موادفعال‌سطحی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. با این حال پایداری نانوسیال‌ها در شرایط مخزن مانند دما و شوری بالا نیازمند به تحقیقات گسترده و درک عمیق‌تری دارد، تا

بررسی اثر نانوذره سیلیکا پراکنده در آب‌نمک حاوی سدیم کلرید بر روی نمونه مغزه‌های کربناته مشخص شد که یون‌های سدیم موجود در آب‌نمک این امکان را برای نانوذرات سیلیکا فراهم می‌آورند تا نانوذرات به مولکول‌های اسیدپالمیتیک دسترسی پیدا کنند و جایگزین آنان شوند و بدین صورت باعث تغییر ترشوندگی مخازن کربناته از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست می‌شوند [۱۷]. از طرف دیگر نتایج از بهبود بازیافت‌نهایی نفت هنگام تزریق نانوذرات سیلیکا به نمونه مغزه‌های مخازن ماسه‌سنگی نشان داد، هنگام تزریق نانوذرات تغییر ترشوندگی قابل قبولی در مخازن ماسه‌سنگی مشاهده می‌شود [۱۵]. نانوذرات گاما-آلومینا بر روی نمونه مغزه‌های کربناته و ماسه‌سنگی به منظور بهبود بازیافت نهایی نفت مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۱-۲۳]. با بررسی اثر نانوذره گاما-آلومینا بر روی نمونه مغزه‌های کربناته مشاهده شد این نانوذره می‌تواند ترشوندگی سطوح کربناته را از حالت نفت‌دوست به حالت آب‌دوست تغییر دهد و سبب بهبود بازیافت‌نهایی نفت شوند [۲۲]. همچنین نتایج ارزیابی تاثیر نانوذره گاما-آلومینا بر روی نمونه مغزه‌های ماسه‌سنگی نشان داد که نانوذره گاما-آلومینا می‌تواند پیوندهای هیدروژنی Al-O را با سطح ماسه‌سنگ‌ها ایجاد کند که این فعل‌وانفعالات می‌توانند باعث کاهش کشش‌بین‌سطحی هیدروکربن‌های نفتی و ماسه‌سنگ‌ها گردد تا در نهایت مقادیر نفت بیشتری از نفت باقی‌مانده را جاروب کند [۲۳].

مکانیسم اصلی که مسئول اثر بخشی آب هوشمند در بهبود بازیافت نفت می‌باشد تغییر ترشوندگی سنگ به سمت آب‌دوستی است، که باعث جداشدن لایه‌های نفتی از سطح سنگ می‌گردد. تزریق مواد فعال سطحی کشش‌بین‌سطحی نفت‌خام و آب‌نمک را کاهش می‌دهد و ترشوندگی سنگ را تغییر می‌دهد و نیروهای موئینگی که نفت را در محیط متخلخل به دام انداخته‌اند، را

به‌خاطر اقتصادی بودن ماده‌فعال‌سطحی از آن برای بهبود پایداری نانوسیالات استفاده شد [۳۳، ۳۴]. ماده‌فعال‌سطحی صمغ‌عربی یک ترکیب پیچیده است که تقریباً ۹۸ wt% آن پلی‌ساکاریدها و ۲ wt% آن را پپتیدی‌ها تشکیل می‌دهد. پپتیدی‌ها بخش آب‌گریز و پلی‌ساکاریدها بخش آب‌دوست صمغ‌عربی را تشکیل می‌دهند، بنابراین پپتیدی‌ها بر روی سطح نفت جذب می‌شوند و پلی‌ساکاریدها به عنوان قسمت اعظم آب‌دوست صمغ‌عربی قطرات نفت با بار منفی کربوکسیلات‌ها را تثبیت می‌کنند.

این ویژگی صمغ‌عربی که دارای یک سر آب‌دوست و یک قسمت آب‌گریز است این توانایی را به آن می‌دهد تا به عنوان یک پل رابط بین نانوذرات و سیال پایه عمل کند [۳۵ و ۳۶]؛ صمغ‌عربی یک ماکرومولکول بیولوژیکی است و از گیاهی بنام اقاقای سنگالی به‌دست می‌آید که به عنوان تثبیت‌کننده سبز برای ایجاد پراکندگی نانوذرات در فاز آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۶ و ۳۷]. به‌خاطر زیست تخریب‌پذیر بودن صمغ‌عربی به‌صورت گسترده در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان داده‌اند که صمغ‌عربی یک تثبیت‌کننده خوب برای امولسیون‌های نفت در آب است و پایداری خوبی را در محیط اسیدی-بازی، قدرت‌یونی بالا و دمای بالا نشان می‌دهد. این ماده‌فعال‌سطحی به دلیل تفکیک گروه‌های کربوکسیل در زنجیره مولکولی خود دارای بار منفی است [۳۸]. در این پژوهش صمغ‌عربی از شرکت مرک آلمان مورد استفاده قرار گرفت. از نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا شرکت یواس‌ریسرچ‌متریالز^۱ استفاده شد. ویژگی این نانوذرات در جدول ۱ نشان داده شده است. نانوذرات سیلیکا و آلومینا در کلاس‌بندی نانومواد در گروه اکسیدهای فلزی قرار دارند. نانوذرات اکسیدفلزی پایداری و تحمل حرارتی بالایی را در حضور یون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی آب‌نمک نشان می‌دهند [۳۹ و ۴۰].

کارایی آنان در شرایط عملیاتی مورد بررسی قرار گیرد. علاوه‌بر این هزینه اقتصادی استفاده از ترکیب آب‌نمک، ماده‌فعال‌سطحی و نانوذرات در مقایسه با سایر روش‌های ازدیادبرداشتی که خارج از محدوده‌ی این مقاله است نیاز به ارزیابی دارد. استفاده از موادفعال‌سطحی سازگار با محیط‌زیست برای استفاده در مکانیسم‌های اصلی ازدیادبرداشت بسیار ضروری است. در این کار ترکیبی از نانوذره-آب شور و ماده فعال‌سطحی سبز استفاده شد. ترکیب‌های متفاوتی از نسبت جرمی نانوذرات، آب شور و ماده فعال‌سطحی مورد بررسی قرار گرفت. تا در نهایت بتوان پس از بررسی پایداری محلول‌ها، نانوسیالات با پایداری قابل قبول شناسایی شوند و نانومواد مناسب‌تر برای آزمون‌های بعدی انتخاب شوند.

همچنین در ادامه برای آزمون‌های کشش‌بین سطحی و ویسکوزیته روند افزایش دما بر روی نانومحلول‌های بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت. توسعه‌ی نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده با موادفعال‌سطحی سبز و پراکنده در آب سازندی و دمای مخزنی برای اثرگذاری بهتر مکانیسم‌های تولید نفت امری اجتناب‌ناپذیر است که باید با دقت در مطالعات آتی مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد. هدف اصلی این مقاله بررسی اثر بالقوه نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا اصلاح‌شده با ماده‌فعال‌سطحی سبز صمغ‌عربی بر روی مکانیسم کاهش کشش‌بین‌سطحی و کنترل ویسکوزیته است که بتواند در نهایت به افزایش بازیافت نفت منجر شود.

مواد و روش‌ها

مواد

صمغ‌عربی دارای ظرفیت کاهش کشش‌بین‌سطحی آب‌نمک و نفت است [۳۰]، که این توانایی بخاطر مهاجرت آن به سطح مشترک نفت و آب است و توانایی بهبود بازیافت نفت را دارد [۳۱ و ۳۲]. اما از آنجایی که نانوذرات در حضور کاتیون‌های موجود در آب‌نمک مدت زمان پایداری‌شان کاهش می‌یابد،

جدول ۱ ویژگی نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا

نام نانوذره	اندازه ذره (nm)	درصد خلوص %	چگالی ظاهری ^۱ (g/cm ^۳)	چگالی حقیقی ^۲ (kg/m ^۳)
سیلیکا	۲۰-۱۵	۹۹/۵	<۰/۱۰	۲۴۰۰
گاما-آلومینا	۲۰	۹۹	۱/۲۳	۳۸۹۰

از نمک‌های سدیم کلرید، منیزیم کلرید شش‌آبه، کلسیم کلرید دوآبه، سدیم سولفات، سدیم بی‌کربنات که از شرکت مرک آلمان خریداری شده بودند، استفاده شد. ترکیب نمک‌های مورد استفاده، در **جدول ۳** نشان داده شده است. علاوه بر آب مقطر از آب‌هایی که شوری مشابه و رقیق‌تر شده نسبت به آب دریا داشتند به عنوان سیالات پایه استفاده شد. آب دریا مصنوعی با شوری ۴۰۷۱۰ ppm، آب دوبار رقیق‌شده با شوری ۲۰۴۰۰ ppm، آب پنج‌بار رقیق‌شده با شوری ۸۱۴۲ ppm و آب ده‌بار رقیق‌شده با شوری ۴۰۷۱ ppm به‌عنوان سیالات پایه در آزمایشگاه به‌صورت مصنوعی سنتز شدند. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات از رئومتر بروکفیلد مدل DV3T استفاده شد. رئومتر مورد استفاده در این پژوهش از نوع برشی‌استاتیک است. این رئومتر برای هر محدوده‌ای از ویسکوزیته یک اسپیندل مخصوص دارد و براساس گشتاور دریافتی از اصطکاک بین محلول و اسپیندل کار می‌کند. تغییرات ویسکوزیته بر حسب دما در چهار دمای ۲۵ °C، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ صورت پذیرفته است. دما به وسیله یک سنسور به‌صورت پیوسته و مداوم اندازه‌گیری و کنترل شد. از Spindle ULA که برای اندازه‌گیری ویسکوزیته پایین مناسب است، استفاده شد. پس از انتخاب نانوسیالات بهینه ۱۶ ml از محلول ۰/۱ wt٪ نانوسیالات به منظور بررسی ویسکوزیته با نرخ برشی ثابت و برابر با ۷۳ (I/S) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای به‌دست آمدن کمترین خطا از سرعت ۶۰ 1h/min دور بر دقیقه برای این نوع اسپیندل باید استفاده می‌شد که این سرعت نرخ‌برشی حدود ۷۳/۳ (I/S) را ایجاد می‌کرد که دلیل استفاده از این نرخ‌برشی به همین خاطر است.

از نظر شیمیایی مولکول‌هایی که اختلاف الکترونگاتیوی بالایی دارند آب‌دوست هستند که اکسیدهای فلزی معمولاً مولکول‌هایی بسیار آب‌دوست هستند و این ویژگی سبب شده است که در صنعت نفت بویژه فعالیت‌های ازدیادبرداشتی کارآیی بالایی داشته باشند [۴۱].

فاز نفتی به‌کار رفته، از میدان نفتی واقع در جنوب‌غربی ایران تهیه شده است که جرم‌مولکولی برابر با ۲۵۴ (gr/mol) و وزن مخصوص نفت در دمای ۲۵ °F برابر با ۰/۸۶۸۳ گزارش شد، اجزای تشکیل‌دهنده فاز نفتی در **جدول ۲** نشان داده شده‌اند. از بین گازهای موجود در مخازن نفتی درصد گاز متان (CH₄) یکی از بالاترین مقادیر را دارد، بخاطر همین مطلب در این مطالعه از نفت زنده استفاده شده است [۴۲]. از دیگر خصوصیات فاز نفتی مورد مطالعه API آن برابر با ۳۱/۴۷ و ویسکوزیته آن در دمای ۴۰ °C برابر با ۸/۴۸ cp گزارش شد.

جدول ۲ اجزای تشکیل‌دهنده فاز نفتی واقع در میدان جنوب‌غربی ایران

اجزا	مول (%)
CO ₂	۱/۰۰۵
H ₂ S	۰/۴۰۶
C ₁	۳۶/۲۹
C ₂	۶/۵۲۳
C ₃	۵/۲۵۵
iC ₄	۱/۰۷
nC ₄	۳/۱۲
iC ₅	۱/۴۰۱
nC ₅	۱/۸۰۵
C ₆	۲/۸۹۶
C ₇ ⁺	۴۰/۳۱

1. Bulk Density

2. True Density

جدول ۳ غلظت نمک‌های مورد استفاده قرار گرفته بر حسب (ppm)

آب دریا ده‌بار رقیق شده	آب دریا پنج‌بار رقیق شده	آب دریا دوبار رقیق شده	آب دریا	نمک‌ها / آب‌های هوشمند
۲۸۴۰	۵۶۸۰	۱۴۲۰۰	۲۸۴۰۰	سدیم کلرید
۶۳۴	۱۲۶۸	۳۲۱۵	۶۳۴۰	منیزیم کلرید شش‌آبه
۱۳۸	۲۷۶	۶۹۰	۱۳۸۰	کلسیم کلرید دو‌آبه
۴۴۹	۸۹۸	۲۲۴۵	۴۴۹۰	سدیم سولفات
۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰	سدیم بی‌کربنات
۴۰۷۱	۸۱۴۲	۲۰۴۰۰	۴۰۷۱۰	کل نمک حل شده

قبل از اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات از آب مقطر برای کالیبره کردن دستگاه و کاهش خطای اندازه‌گیری استفاده شد. دقت خطای اندازه‌گیری دستگاه در حدود $\pm 1\%$ پیش‌بینی شده است.

اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی برای نفت‌خام و نانوسیال‌های پراکنده شده در فاز آبی با استفاده از روش قطره‌آویزان و در دماهای 25°C و 60°C انجام شد. این سیستم مجهز به یک دوربین CCD و یک لنز ماکرو کامپیوتری بود. قطرات تشکیل شده توسط نرم‌افزار حرفه‌ای آنالیز شکل قطره (Apex DSA) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در شکل ۱ دستگاه اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی نشان داده شده است. پس از هر آزمایش محفظه اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی نفت‌خام و نانوسیال با آب و تولوئن شست‌وشو داده شد.

طراحی، تخمین تعداد آزمایش‌ها و انتخاب مشخصه کیفی برای تحلیل نتایج آزمون پایداری با استفاده از نرم‌افزار Minitab و روش Taguchi

در گام اول طراحی آزمایش صورت پذیرفت. طراحی آزمایش‌ها بر مبنای ۵ سطح و سه فاکتور صورت گرفت. از نرم‌افزار Minitab و روش Taguchi استفاده شد. روش Taguchi با استفاده از طراحی آزمایش‌ها^۱ یکی از مهم‌ترین ابزارهای آماری^۲ برای طراحی سیستم‌های با کیفیت بالا و هزینه کم است. روش Taguchi روشی کارآمد و سیستماتیک برای بهینه‌سازی طرح، عملکرد، کیفیت و هزینه می‌باشد [۴۳]. فاکتورها به ترتیب غلظت شوری، نسبت جرمی

سیلیکا به گاما-آلومینا و غلظت صمغ عربی در نظر گرفته شدند.

سطوح برای فاکتور شوری و صمغ عربی از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار بصورت کمی در نرم‌افزار تعریف شد (شوری سیال پایه از مقدار عددی یک تا 40710 ppm و غلظت صمغ عربی از مقدار عددی صفر تا 1000 ppm در نظر گرفته شد. از طرفی دیگر سطوح اول تا پنجم برای نسبت جرمی سیلیکا به گاما-آلومینا [سطح اول سیلیکا، سطوح دوم تا چهارم نانوهیبرید گاما-آلومینا به سیلیکا با نسبت جرمی $10:90$ ، $30:70$ و $50:50$ همچنین سطح پنجم گاما-آلومینا] به صورت کیفی در نظر گرفته شد. در جدول ۴ فاکتورها و سطوحی وارد شده به نرم‌افزار Minitab برای طراحی آزمایش‌ها نشان داده شده است.

پس از تعیین فاکتورها و سطوح‌هایشان آرایش متعامد^۳ L_{25} برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد و تعداد آزمایش‌ها ۲۵ آزمایش تخمین زده شد. مدت زمانی که نانوسیالات پایداری قابل قبولی داشتند به عنوان پاسخ^۴ در نظر گرفته شد. به خاطر تفاوت‌هایی که در مدت زمان پایداری نانوسیالات مشاهده شد (از چند ماه تا چند دقیقه)، تمامی داده وارد شده به عنوان پاسخ به نرم‌افزار Minitab براساس دقیقه (min) گزارش شد.

1. Design of Experiments (DOE)

2. Total Quality Management (TQM)

3. Orthogonal Array

4. Response



شکل ۱ دستگاه اندازه‌گیری کشش بین سطحی نفت و نانوسیالات با روش قطره‌آویزان

جدول ۴ فاکتورها و تعداد سطح‌های داده شده به نرم‌افزار Minitab برای طراحی آزمایش

فاکتور	واحد	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم	سطح پنجم
غلظت شوری	ppm	۱	۴۰۷۱	۸۱۴۲	۲۰۴۰۰	۴۰۷۱۰
نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا	wt. %	سیلیکا	AS _{10:90}	AS _{30:70}	AS _{50:50}	گاما-آلومینا
غلظت صمغ عربی	ppm	۰	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰

میانگین آن‌ها به عنوان پاسخ کلی به نرم‌افزار Minitab وارد شد.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log(MSD) \quad (۱)$$

$$MSD = \left(\frac{\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \frac{1}{Y_3^2} + \dots + \frac{1}{Y_N^2}}{N} \right) \quad (۲)$$

آماده‌سازی نانوسیالات

در این پژوهش ابتدا نمک‌ها به آب مقطر افزوده شدند و به مدت ۳۰ min در دمای ۵۵ °C بر روی همزن مغناطیسی همگن شدند. سپس به صورت همزمان نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا با غلظت wt. % ۰/۱ همراه با صمغ عربی به محلول آب نمک افزوده شدند. در نهایت نانوسیالات به مدت ۱۵ min بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفتند سپس به مدت یک ساعت با دستگاه همزنایزر التراسونیک در توان ۷۰ وات همگن شدند. همگن‌سازی نانوسیالات با دستگاه همزنایزر التراسونیک به صورت دوباره زمانی ۳۰ min صورت گرفت که در این فاصله وقفه زمانی ۱۵ min

بر اساس این که بیشترین مدت زمان پایداری مد نظر بود لذا شاخص کفیت هرچه بیشتر-بهرتر در نظر گرفته شد. تحلیل نتایج با کمک نمودار سیگنال به نویز صورت پذیرفت که نرخ سیگنال به نویز (S/N) از روی میانگین مربعات انحراف معیار MSD محاسبه شد که در آن نتایج حاصل مدت زمان پایداری نانومحلول‌ها بر حسب min است و N تعداد تکرار آزمایش‌ها می‌باشد [۴۴ و ۴۵]. نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به پارامترهای اثرگذار و اغتشاشی در یک فرآیند کنترل شده است. در هر آزمایش، برای ایجاد بهترین شرایط همواره بزرگترین مقدار عددی نسبت سیگنال به نویز مطلوب است [۴۶]. مقدار سیگنال به نویز بالا نشان‌دهنده این است که تاثیر پارامترهای موثر بیشتر از پارامترهای اغتشاشی است. یکی از مزایای روش سیگنال به نویز تاثیر امکان تعیین سطوح بهینه و میزان تاثیرگذاری هر پارامتر است. در این پژوهش آزمایش‌های مربوط به پایداری ۲ مرتبه تکرار شدند و مقدار

صورت پذیرفت.

بررسی پایداری نانوسیالات

پایداری یک عامل مهم است که بر عملکرد نانوسیالات تأثیرگذار است. عدم پایداری خوب می‌تواند خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبرید را تغییر دهد و تأثیر ویژه‌ای بر کارآمدی آن داشته باشد. روش‌های مختلفی برای بررسی تجزیه و تحلیل پایداری ایجاد شده است که از جمله آن می‌توان به روش سانتیفریوژ، روش رسوب‌گذاری، آنالیز پتانسیل زتا، روش آنالیز طیفی، میکروسکوپ الکترونی و... اشاره کرد [۴۷]. نانوسیالات پس از آماده‌سازی در لوله‌های آزمایشگاهی و در جایی دور از نور و گرمای خورشیدی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌های آماده شده برای آزمون پایداری در شرایط فشار و دمای محیط صورت پذیرفت و مشابه کار برخی از محققان آزمون پایداری به صورت چشمی انجام شد [۴۸-۵۱]. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است هنگامی که رسوب نانوذرات در انتهای لوله آزمایشگاهی قرار گرفت به معنای ناپایداری نانوسیال‌ها تلافی گردید. نانوذرات بدلیل فعالیت‌های سطحی بیش از حد تمایل به تجمع دارند، تجمع نانوذرات باعث ایجاد رسوب و در نتیجه کاهش پایداری می‌شود [۵۲]. محققین بسیاری برای حذف تجمع نانوذرات و تولید یک مخلوط پایدار تغییرات PH، به‌کاربردن مواد فعال سطحی و استفاده از دستگاه هموژنایزر

اولتراسونیک را توصیه کرده‌اند [۳۳، ۴۷، ۴۹، ۵۲، ۵۳]. همه این تکنیک‌ها باعث اصلاح ویژگی نانوذرات و شکستن ساختار خوشه‌ای^۱ نانوذرات برای ایجاد یک سوسپانسیون پایدار می‌شوند [۵۲]. در این پژوهش از ماده فعال سطحی و دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک برای ایجاد نانومحلول‌های پایدار استفاده شد.

غربال‌گری نانوسیالات برای آزمون ویسکوزیته و کشش بین سطحی

از میان نانوسیالات تهیه شده نانوسیالاتی که مدت زمان طولانی‌تر پایدار بودند به عنوان نانوسیالات بهینه انتخاب شده و آزمون ویسکوزیته و کشش بین سطحی بر روی آنها صورت گرفت. ساخت یک نانوسیال پایدار برای بهینه‌سازی ویژگی آن الزامی است. آماده‌سازی نانوسیال از طریق یک مسیر پایدار، به دلیل نیروهای قدرتمند واندروالسی در میان نانوذرات و تمایل آنها به ساخت خوشه یک کار فنی است. بدیهی است که کمبود تعادل باعث ایجاد تشدید در تشکیل خوشه‌ها و سرعت رسوب می‌گردد [۵۲]. از طرفی دیگر در مقیاس عملیاتی تشکیل رسوب در اطراف چاه تزریقی باعث آسیب سازندی، گرفتگی گلوگاه‌ها، کاهش تراوایی محیط متخلخل و در نهایت مقدار بهره‌دهی نفت را به شدت کاهش می‌دهد [۵۴]. مهم‌ترین دلیل بهینه‌سازی نانوسیال‌ها براساس مدت زمان پایداری به‌خاطر جلوگیری از تشکیل رسوب است.



(ب)



(الف)

شکل ۲ بررسی رسوب نانوذرات در انتهای لوله آزمایشگاهی. (الف). بررسی پایداری نانوسیالات پس از دو ساعت. (ب). بررسی پایداری نانوسیالات پس از دو روز.

بحث و نتایج

پایداری نانوسیالات

پس از تخمین تعداد آزمایش‌ها و آماده‌سازی نانوسیالات مدت زمان پایداری آنها به صورت چشمی در جای دور از نورخورشید و گرما مورد مطالعه قرار گرفت. از میان ۲۵ نانوسیال آماده شده ۱۵ نانوسیال پایداری مناسبی داشتند که در جدول ۵ با علامت (*) مشخص شده‌اند و ۱۰ نانوسیال به شدت مدت زمان پایدار کوتاهی داشتند. نتایج به دست آمده از آزمون پایداری چشمی به وضوح نشان داد که با افزایش شوری سیال پایه و تشدید شدن حضور یون‌های دوظرفیتی در آب نمک به شدت از پایداری نانوسیالات کاسته می‌شود.

بر طبق مطالعات متین و همکاران [۵۵] سه مرحله مجزا از تجمع نانوذرات در حضور نمک رخ می‌دهد. پراکندگی شفاف، کدورت و تشکیل دوفاز جداگانه. این در صورتی است که تجمع نانوذرات ممکن است بصورت چشمی در مراحل اولیه مشاهده نشود. در این پژوهش هنگامی که تجمع نانوذرات در انتهای لوله آزمایشگاهی قرار گرفت و جدایش دو فازی قابل رویت گردید بازه زمانی ناپایداری نانوسیالات در نظر گرفته شد. بر اساس تئوری^۱ DLVO وقتی ذرات کلوئیدی در آب معلق می‌شوند براساس پروفایل‌های انرژی تعاملات صورت می‌گیرد، هنگامی که پروفایل‌های انرژی به شدت دافعه باشند ذرات یکدیگر را دفع می‌کنند و یک تعلیق پایدار تشکیل می‌شود و هنگامی که پروفایل‌های انرژی جاذب باشند ذرات به یکدیگر نزدیک می‌شوند و به یکدیگر می‌چسبند و همان‌طور که تجمع ادامه می‌یابد ذرات لخته‌های بزرگتر را تشکیل می‌دهند و با بزرگتر شدن لخته‌ها رسوب ایجاد می‌گردد و سوسپانسیون شفاف می‌شود که در این شرایط تعلیق ناپایدار گشته است [۵۶]. نظریه DLVO بیان می‌کند که پایداری دو ذره در مجاورت نزدیک به انرژی کل بر هم کنش آن‌ها بستگی دارد. این

نظریه نیروهای جاذبه و دافعه بین نانوذرات، سنگ و سیال مانند جاذبه واندروالسی^۲، نیروی لایه دوگانه^۳، نیروی دافعه، برهمکنش اسید و باز^۴ و نیروهای هیدرودینامیکی^۵ را در نظر می‌گیرد [۵۷].

نتایج نشان داد تمامی نانوسیالات که در آب مقطر پراکنده شده، پایداری قابل قبولی دارند. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که نانوذره گاما-آلومینا اصلاح شده با صمغ عربی تغییرات کمی در میانگین شعاع هیدرولیکی دارد، این در حالی است که شعاع هیدرودینامیکی نانوذرات گاما-آلومینا اصلاح نشده با صمغ عربی با افزایش زمان بیشتر شده است که این موضوع نشان‌دهنده توانایی صمغ عربی در بهبود پایداری نانوذرات گاما-آلومینا است [۵۸]. افزودن موادفعال سطحی، تکنیک‌های اصلاح سطح، ساز و کارهای مانند دافعه فضایی و دفع الکترواستاتیک از جمله روش‌هایی برای پایداری نانوسیالات هستند اما افزودن موادفعال سطحی که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شد یک روش آسان و اقتصادی برای پایداری نانوسیالات است [۵۳].

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است نانوهیبریدهای گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت‌های جرمی ۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ پراکنده در آب مقطر مدت زمانی پایداری طولانی‌تری نسبت به آب‌های شور دارند. دلیل این امر می‌تواند به خاطر حضور کاتیون‌های مثل سدیم، کلسیم و منیزیم موجود در آب نمک باشد. این کاتیون‌ها باعث کاهش بارهای سطحی نانوذرات می‌شوند و نیروی جاذبه واندروالسی بین ذرات نانوسیال افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث ناپایداری محلول می‌گردد.

1- Derjaguin, Landua, Verwey and Overbeek (DLVO) Theory

2- Van Der Waals Attraction

3- Electric Double Layer (EDL)

4- Acid-Base Interactions

5- Hydrodynamic Forces

جدول ۵ داده‌های به‌دست آمده برای مدت زمان پایداری با آزمون چشمی

شماره آزمایش	غلظت شوری (ppm)	نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا	غلظت صمغ عربی (ppm)	مدت زمان پایداری بر حسب (min)	نانوسیالات با مدت زمان پایداری قابل قبول
۱	۱	سیلیکا	۰	۸۹۲۸۰	*
۲	۱	۱۰:۹۰	۲۵۰	۳۰۲۵	*
۳	۱	۳۰:۷۰	۵۰۰	۱۵۴۰	*
۴	۱	۵۰:۵۰	۷۵۰	۱۳۰۵	*
۵	۱	گاما-آلومینا	۱۰۰۰	۱۰۰۲	*
۶	۴۰۷۱	سیلیکا	۲۵۰	۴۰۵۷۴	*
۷	۴۰۷۱	۱۰:۹۰	۵۰۰	۲۱۳۰	*
۸	۴۰۷۱	۳۰:۷۰	۷۵۰	۳۷۷	*
۹	۴۰۷۱	۵۰:۵۰	۱۰۰۰	۲۹۰	*
۱۰	۴۰۷۱	گاما-آلومینا	۰	۱۰	
۱۱	۸۱۴۲	سیلیکا	۵۰۰	۲۱۲۶۷	*
۱۲	۸۱۴۲	۱۰:۹۰	۷۵۰	۱۲۳۵	*
۱۳	۸۱۴۲	۳۰:۷۰	۱۰۰۰	۲۷۰	*
۱۴	۸۱۴۲	۵۰:۵۰	۰	۲	
۱۵	۸۱۴۲	گاما-آلومینا	۲۵۰	۱۴۱	
۱۶	۲۰۴۰۰	سیلیکا	۷۵۰	۴۱۲۵	*
۱۷	۲۰۴۰۰	۱۰:۹۰	۱۰۰۰	۴۸۵	*
۱۸	۲۰۴۰۰	۳۰:۷۰	۰	۱۷	
۱۹	۲۰۴۰۰	۵۰:۵۰	۲۵۰	۶۰	
۲۰	۲۰۴۰۰	گاما-آلومینا	۵۰۰	۵۵	
۲۱	۴۰۷۱۰	سیلیکا	۱۰۰۰	۳۹۲۳	*
۲۲	۴۰۷۱۰	۱۰:۹۰	۰	۱۴۰	
۲۳	۴۰۷۱۰	۳۰:۷۰	۲۵۰	۱۱۷	
۲۴	۴۰۷۱۰	۵۰:۵۰	۵۰۰	۲۵	
۲۵	۴۰۷۱۰	گاما-آلومینا	۷۵۰	۶۳	

در جدول ۵ نشان داده شده است با افزایش شوری سیال پایه از آب مقطر به آب ده‌برابر رقیق شده ppm ۴۰۷۱ نانوذره گاما-آلومینا تحت تأثیر حضور یون‌های موجود در آب‌نمک قرار می‌گیرد و ناپایدار می‌گردد. همچنین نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شوری سیال پایه نانوهیبرید با نسبت‌های جرمی گاما-آلومینا بیشتر نسبت به سیلیکا سریعتر پایداری خود را از دست می‌دهند.

تحقیقات نشان داده است که نانوذره آلومینا تمایل بالایی به تجمع دارد که این امر به علت نسبت زیاد سطح به حجم باشد. در آب با شوری ۵ برابر رقیق شده ppm ۸۱۴۲ علاوه بر نانوذره گاما-آلومینا نانوهیبرید گاما-آلومینا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ به دلیل افزوده نشدن صمغ عربی و بالا بودن نسبت نانوذره گاما-آلومینا تنها دو دقیقه پس از آماده‌سازی پایدار گزارش شد. با افزودن شوری سیال به

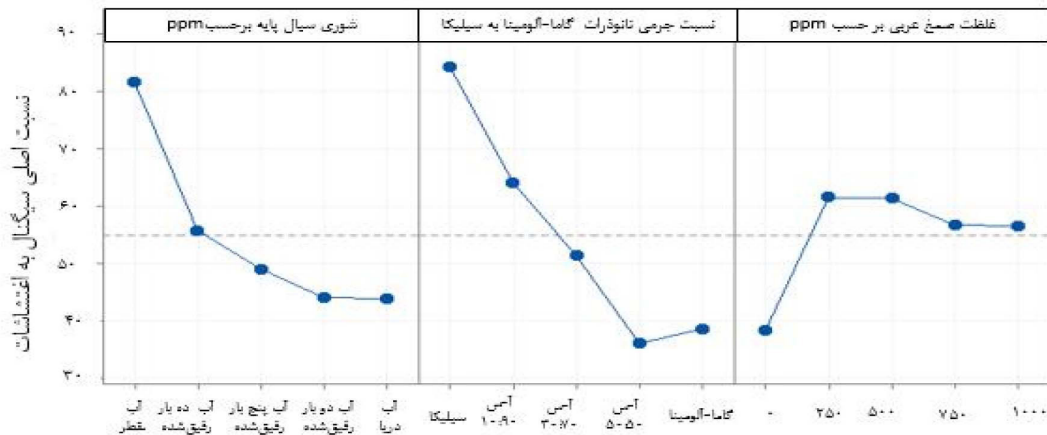
در **جدول ۶** مقادیر سطوح برای پارامترهای (شوری سیال پایه، نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا و غلظت صمغ عربی) توسط نرم افزار Minitab و روش Taguchi پس از وارد کردن داده های مربوط به آزمون پایداری به دست آمد. از آنجایی که شاخص کیفی هرچه بیشتر بهتر انتخاب شد لذا بیشترین مقدار سطح به دست آمده مطلوب ترین حالت برای داده ها تلقی می شود. در فاکتور بررسی شوری سیال پایه سطح اول که آب مقطر است بیشترین مقدار را دارد و داده ها نشان می دهند که با افزایش شوری سیال پایه مدت زمان پایداری کاهش می یابد. در فاکتور نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا مشاهده شد بیشترین مدت زمان پایداری را نانوسیلیکا سپس نانو هیبریدها با نسبت های کمتر گاما-آلومینا و در نهایت نانوذره گاما-آلومینا دارد. مناسب ترین سطح برای غلظت صمغ عربی سطح دوم که برابر با ۲۵۰ ppm به دست آمد. همچنین داده ها نشان دادند که از میان فاکتورها نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا سپس شوری سیال پایه و در نهایت غلظت صمغ عربی بیشترین تأثیرگذاری را بر روی افزایش مدت زمان پایداری نانوسیالات دارند. **شکل ۳** سطوح بهینه هر فاکتور برای افزایش مدت زمان پایداری نانوسیالات براساس ۳ پارامتر شوری سیال پایه بر حسب (ppm)، نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا و غلظت صمغ عربی بر حسب (ppm) مشخص می کند.

آب ۲ برابر رقیق شده ۲۰۴۰۰ ppm علاوه بر نانوذره گاما-آلومینا نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۳۰:۷۰) و ۵۰:۵۰) بشدت از مدت زمان پایداریشان کاسته می شود. به طوری که هر یک از این نانو سیال ها کمتر از یک ساعت پایدار هستند. همچنین با افزایش شوری سیال پایه به ۴۰۷۱۰ ppm تنها نانوذره سیلیکا پایدار می باشد، نانوذره گاما-آلومینا و نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰) به شدت ناپایدار هستند.

همان طور که در **جدول ۵** نشان داده شده است، در سطرهای (۱-۱۰-۱۴-۱۸-۲۲) برای تهیه نانوسیالات از ماده فعال سطحی استفاده نشده است و به جز در سطر یک که فقط نانوذره سیلیکا است و پایداری قابل قبولی دارد سایر نانوسیالاتی که بدون صمغ عربی تهیه شدند مدت زمان پایداریشان به شدت کم است. مواد فعال سطحی این قابلیت را دارا هستند که بر ویژگی های سطح یک سیستم در مقادیر کم تاثیر بسزایی بگذارند. مواد فعال سطحی دارای یک قسمت آب گریز و یک سر قطبی آب دوست هستند که برای افزایش تماس دو ماده کارایی دارند [۵۳]. نانوذرات سیلیکا دارای بار منفی هستند و اکسیژن های موجود در آب باعث می شوند تا نیروی دافعه الکترواستاتیک بر نیروی جاذبه غلبه کرد و به همین دلیل است که نانوذره سیلیکا پایداری خوبی در آب مقطر دارد [۵۹]. نانوذره سیلیکا پراکنده در آب مقطر بدون ماده فعال سطحی صمغ عربی تا ۶۳ روز پایدار گزارش گردید.

جدول ۶ تأثیرگذاری فاکتورها و مقادیر سطوح به دست آمده برای هر فاکتور با استفاده از داده های آزمون پایداری به نرم افزار Minitab

غلظت صمغ عربی (ppm)	کسر جرمی نانو هیبرید آلومینا-سیلیکا	شوری (ppm)	سطح
۳۸/۵۱	۸۴/۳۸	۸۱/۷۸	۱
۶۱/۶۵	۶۴/۲۵	۵۵/۹۰	۲
۶۱/۴۵	۵۱/۵۰	۴۲/۲۰	۳
۵۶/۷۹	۳۶/۲۲	۴۴/۰۲	۴
۵۶/۷۰	۳۸/۷۶	۳۷/۷۶	۵
۳	۱	۲	تأثیرگذاری



تمودار اثرات اصلی برای نسبت سیگنال به اغتشاشات

شکل ۳ سطوح بهینه هر فاکتور برای افزایش مدت زمان پایداری

شوری سیال پایه و غلظت صمغ عربی بر واریانس کل نتایج برای سطح معنی‌دار ۰/۰۵٪ در نظر گرفته شد، همان‌طور که در **جدول ۷** مشاهده می‌شود مقادیر p به ترتیب (۰، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱۲) برای نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا، شوری سیال پایه و غلظت صمغ عربی به‌دست آمد.

ویسکوزیته نانوسیالات

نتایج رئولوژیکی برگرفته از دستگاه رئومتر در **اشکال ۴** آمده است. نانوذرات با چهار ساز و کار اصلی در فرآیندهای ازدیاد و برداشت دخیل می‌شوند که شامل فشار از هم‌گسیختگی، تغییر ترشوندگی، کاهش کشش بین‌سطحی و کنترل ویسکوزیته می‌باشد [۱۸، ۵۱، ۶۰، ۶۱]. رفتار نانوذره آلومینا در نرخ‌های برشی (s^{-1}) ۱۰۰۰ - ۰/۱ رفتاری شبه‌پلاستیکی دارد، اما در نرخ‌های برشی (s^{-1}) ۱۰ - ۱۰۰ رفتاری کاملاً نیوتنی دارد [۶۲]. با توجه به اینکه نرخ برشی ثابت و برابر با $73/3 (s^{-1})$ در نظر گرفته شده است پس نانوذره آلومینا رفتاری نیوتنی دارد.

از مزایایی دیگر روش سیگنال به نویز محاسبه میزان تاثیرگذاری هر فاکتور در خروجی مد نظر است. بدین منظور از نتایج حاصل از تحلیل واریانس^۱ برای بررسی داده‌های مدت زمان پایداری استفاده شد. همان‌طور که در **جدول ۷** مشاهده می‌شود درجه آزادی^۲ برای هریک از پارامترها به‌صورت مجزا تعریف می‌شود. درجه آزادی کل برابر با تعداد آزمایش‌ها منهای یک و درجه آزادی برای هر سطح برابر با تعداد سطوح آن منهای یک می‌باشد. مجموع مربعات^۳ نسبت سیگنال به نویز برای هر فاکتور است و مجموع این مقادیر معادل مجموع مربعات^۴ کل است. از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی مورد نظر میانگین مربعات^۵ آن فاکتور به‌دست می‌آید. درصد مشارکت، نسبت مجموع مربعات اثر یک فاکتور به مجموع کل تغییرات تعریف می‌گردد. از آنجایی که F نشان‌دهنده موثر بودن یا عدم اثرگذاری پارامترهای مورد نظر را بررسی می‌کند. با توجه به داده‌های **جدول ۷** بیشترین اثر را بر روی مدت زمان پایداری نانوسیالات نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا دارد، بعد از آن نسبت شوری سیال پایه و صمغ عربی کمترین تاثیر را بر روی مدت زمان پایداری نانوسیالات دارند. از طرفی دیگر تاثیر نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا،

1- Analysis of Variance (ANOVA)

2-Degree of Freedom (DOF)

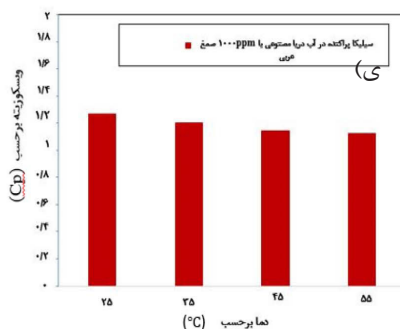
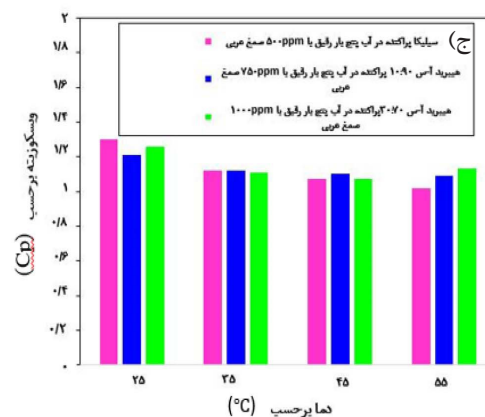
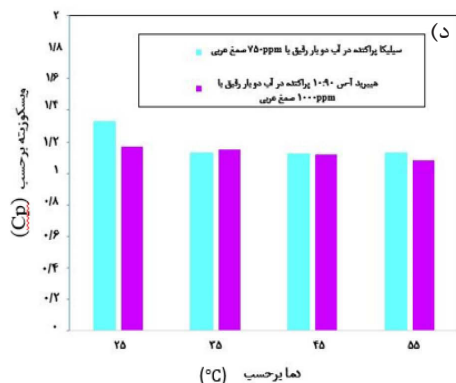
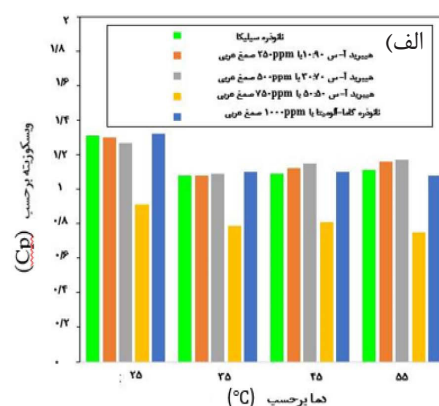
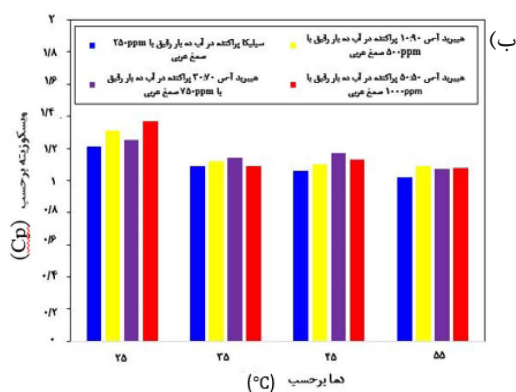
3-Sum of Square

4- Total Sum of Square

5-Mean Square

جدول ۷ تحلیل داده‌های آنالیز واریانس برای نسبت‌های سیگنال به نویز

منبع داده	درجه آزادی (DOF)	مجموع مربعات (Seq SS)	Adj SS	Adj MS	F	P	درصد مشارکت
شوری سیال پایه	۴	۲۵۱۳/۴	۲۵۱۳/۴	۶۲۸/۳۶	۱۰/۰۲	۰/۰۰۱	۲۰/۳۹
نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا	۴	۷۷۶۸/۳	۷۷۶۸/۳	۱۹۴۲/۰۷	۳۰/۹۶	۰/۰۰۰	۶۰/۰۴
غلظت صمغ عربی	۴	۱۲۸۷/۶	۱۲۸۷/۶	۳۲۱/۹۰	۵/۱۳	۰/۰۱۲	۱۰/۴۴
خطای باقیمانده	۱۲	۷۵۲/۸	۷۵۲/۸	۶۲/۷۳			
مجموع	۲۴	۱۲۳۲۲/۱					



شکل ۴ (الف) بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب مقطر، (ب). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب پنج‌برابر رقیق شده، (ج) بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دو برابر رقیق شده، (د). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دریا

و گاما-آلومینا بیشتر است. با این حال تحقیقات دیگری به این موضوع اذعان داشته‌اند که ویسکوزیته نانوسیالات هیبرید به نانوذرات انتخابی و ترکیب آن‌ها وابستگی دارد [۶۶]. به صورت کلی ویسکوزیته نانوسیالات هیبرید نسبت به سیالات معمولی و نانوذرات منفرد بالاتر است [۶۵ و ۶۶]. نانوهیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ همراه با ۷۵۰ ppm صمغ عربی در روند افزایش دما ویسکوزیته آن نسبت به نانوذره مفرد سیلیکا و گاما-آلومینا کمتر است. در میان تمام نانوسیالات پراکنده در آب شور و آب مقطر نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ همراه با ۷۵۰ ppm در دمای ۵۵ °C کمترین ویسکوزیته و برابر با ۰/۷۵ cP را دارد.

در شکل ۴ (ب) ویسکوزیته نانوذره سیلیکا و نانوهیبریدها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ با ۲۵۰ ppm، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ صمغ عربی در آب ده‌برابر رقیق شده نسبت به آب دریا بر حسب افزایش دما نشان داده شده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که نانوهیبریدها با نسبت جرمی متفاوت در دماهای ۲۵ °C، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ ویسکوزیته بیشتری نسبت به نانوذره سیلیکا دارند و کمترین ویسکوزیته برای نانوذره سیلیکا در دمای ۵۵ °C و برابر با ۱/۰۲ cp به دست آمد. در میان نانوهیبریدها پراکنده در آب ده‌بار رقیق شده نانوهیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ در دمای ۲۵ °C ویسکوزیته بیشتری نسبت به سایر نانوهیبریدها دارد اما با افزایش دما تا ۵۵ °C اختلاف ویسکوزیته اندازه‌گیری شده در بین دمای ۲۵ °C و ۵۵ برابر با ۰/۲۹ cp است که این اختلاف ویسکوزیته بیشتر از نانوهیبریدها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰ گزارش شد. در شکل ۴ (ج) مشاهده می‌شود که نانوذره سیلیکا پراکنده در آب پنج‌برابر رقیق شده نسبت به آب دریا با ۵۰۰ ppm صمغ عربی در دمای ۲۵ °C ویسکوزیته بیشتری نسبت به نانوهیبریدها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰ همراه با ۷۵۰ ppm و ۱۰۰۰ صمغ عربی دارد، اما با افزایش دما به ۳۵ °C ویسکوزیته نانوذره سیلیکا و نانوهیبریدها تا

همچنین رفتار رئولوژیکی محلول ۲۰ wt% صمغ عربی در نرخ‌برشی (s^{-1}) ۱۰-۱۰۰ حاکی از این است که صمغ عربی در این بازه از تنش برشی رفتاری نیوتنی دارد، در این مطالعه از غلظت‌های کمتر صمغ عربی استفاده شده است، لذا صمغ عربی رفتاری نیوتنی دارد [۶۳]. رفتار نانوذره سیلیکا با اندازه ۵۰ °C در دمای ۵۰-۰ در بازه نرخ‌برشی (s^{-1}) ۲۵۰-۵۰ به وضوح نشان داد نانوذره سیلیکا دارای رفتار نیوتنی است [۶۴]. ویسکوزیته نانوسیالات بهینه در آب مقطر و آب شور در دماهای ۲۵ °C، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ °C مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است نانوسیالات آب مقطر ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوسیالات آب شور دارند. نتایج هرمزی و همکاران [۶۵] نشان داد که نانوذره آلومینا و سیلیکا دارای ویسکوزیته نسبتاً یکسانی در بازه‌ی دمایی ۱۰-۵۵ °C هستند. از طرفی دیگر شکل ۴ (الف) نشان می‌دهد که نانوذره گاما-آلومینا دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به نانوذره سیلیکا است اما با افزایش دما ویسکوزیته گاما-آلومینا نسبت به سیلیکا کاهش قابل توجهی دارد که دلیل این امر می‌تواند بخاطر حضور صمغ عربی باشد که همراه با نانوذره گاما-آلومینا پراکنده در آب مقطر به نسبت جرمی ۱:۱ مورد استفاده قرار گرفته است اما هیچ‌گونه ماده فعال سطحی همراه با نانوذره سیلیکا بکار برده نشد. نتایج به دست آمده از اشکال ۴ نشان می‌دهد که ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش دما کاهش می‌یابد که این کاهش ویسکوزیته تا حد زیادی به دلیل تضعیف اثرات بین مولکولی یا افزایش فاصله بین مولکولی نانوذرات است [۶۵].

نتایج شکل ۴ (الف) نشان می‌دهد که نانوهیبریدها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰ همراه با ۲۵۰ و ۵۰۰ صمغ عربی در دمای ۲۵ °C ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا و گاما-آلومینا دارند اما با افزایش دما با اینکه روندی کاهشی در ویسکوزیته دارند، ویسکوزیته آن‌ها نسبت به نانوذره سیلیکا

از دفع موادفعال سطحی از سطوح می‌شوند و در این حالت کاهش کشش بین سطحی بهتر حفظ می‌گردد [۶۱].

در شکل ۵ (الف) کشش بین سطحی نانوسیالات پراکنده در آب مقطر در دمای محیط و دمای 60°C نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نانوهیبریدها با نسبت جرمی متفاوت کشش بین سطحی کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا دارند، با این حال کشش بین سطحی آنان از نانوذره گاما-آلومینا اصلاح شده با 1000 ppm صمغ عربی بیشتر است. بر طبق نتایج نوروزی و همکاران [۵] نانوذره گاما-آلومینا بخاطر کاهش کشش بین سطحی و ویسکوزیته می‌تواند باعث بهبودی بازیافت نفت شود. همچنین نتایج به خوبی با نتایج بدست آمده از تحقیقات زرگر و همکاران [۶۷] انطباق دارد که با افزایش دما کشش بین سطحی کم می‌شود، که دلیل این امر می‌تواند بخاطر افزایش حرکت براونی نانوذرات یا برهمکنش ضعیف بین مولکولی باشد.

نانوذره سیلیکا با افزایش دما کشش بین سطحی آن از $9/97\text{ mN/m}$ به $6/67\text{ mN/m}$ کاهش یابد. نانوهیبریدها با نسبت جرمی $10:90$ ، $30:70$ و $50:50$ اصلاح شده با 500 ، 250 و 750 ppm صمغ عربی از $1/47$ ، $5/71$ و $2/44$ به $1/85$ و $2/32$ ، $1/7$ و $1/47\text{ mN/m}$ کاهش کشش بین سطحی را نشان دادند. از طرفی دیگر در میان نانوسیالات پراکنده در آب مقطر کمترین کشش بین سطحی مربوط به نانوذره گاما-آلومینا گزارش شد که با افزایش دما کشش بین سطحی آن از $1/57\text{ mN/m}$ به $1/07\text{ mN/m}$ کاهش یافت. حضور نانوذرات اصلاح شده با ماده فعال سطحی می‌تواند باعث کاهش کشش بین سطحی بین نفت خام و سیالات جابه‌جاکننده گردد.

جذب نانوذرات اصلاح شده با صمغ عربی در سطح مشترک نفت و آب نمک بخاطر گروه‌های عاملی آب دوست و آب گریز نانوذرات اصلاح شده صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که نانوذرات اصلاح شده

حدودی برابر می‌شود. در دماهای بالا ویسکوزیته نانوهیبریدها از ویسکوزیته نانو ذره سیلیکا بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که نانوذره سیلیکا و نانوهیبرید با نسبت جرمی $10:90$ یک روند کاهشی با افزایش دما را نشان دادند در صورتی که کمترین ویسکوزیته برای نانوهیبرید با نسبت جرمی $30:70$ در دمای 45°C گزارش شد.

در شکل ۴ (د) دیده شد که نانوهیبرید با نسبت جرمی $10:90$ با 1000 ppm صمغ عربی پراکنده در آب دوبرابر رقیق شده نسبت به آب دریا در دمای 25°C و 55°C ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا با 1000 ppm صمغ عربی دارد و در دمای 35°C و 45°C ویسکوزیته نانوهیبرید گاما-آلومینا به سیلیکا با نسبت جرمی $10:90$ و نانو ذره سیلیکا با هم برابر هستند. این در حالی است که نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دوبرابر رقیق شده روندی کاهشی در مقادیر ویسکوزیته دارند. در شکل ۴ (ی) نانوذره سیلیکا پراکنده در آب مصنوعی دریا با افزایش دما روندی کاهشی در ویسکوزیته را نشان می‌دهد.

کشش بین سطحی نانوسیالات

در ازدیاد و برداشت نانوموادفعال سطحی، نانوذرات می‌توانند به افزایش جابه‌جایی موثر نفت از طریق تغییر ترشوندگی و کاهش کشش بین سطحی کمک کنند. نسبت کم ماده فعال سطحی به نانوذره منجر به نسبت کمی از نانوذرات پوشش داده شده با ماده فعال سطحی می‌گردد. علاوه بر این نسبت بالای ماده فعال سطحی به نانوذره باعث تشکیل دو لایه ماده فعال سطحی در سطح نانوذرات می‌شود که در نهایت منجر به بهبود عملکرد نانوذرات اصلاح شده با ماده فعال سطحی می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که سطح نانوذرات پس از جذب ماده فعال سطحی آب‌گریز می‌شوند. نانوذرات، موادفعال سطحی را به سطح مشترک نفت-آب منتقل می‌کنند و به صورت معمول در سیلاب‌زنی موادفعال سطحی مولکول‌های آنان در سطح مشترک نفت-آب جذب می‌شوند نانوذرات باعث جلوگیری

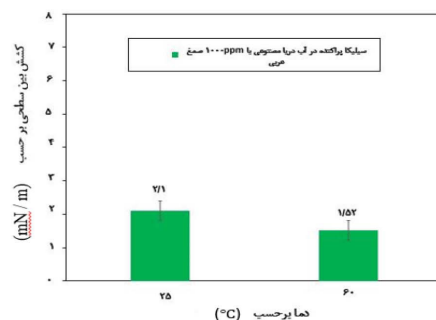
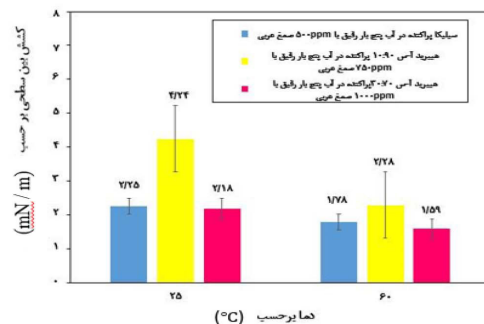
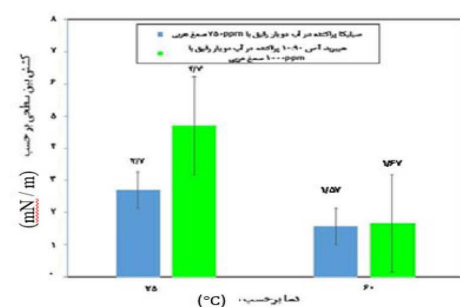
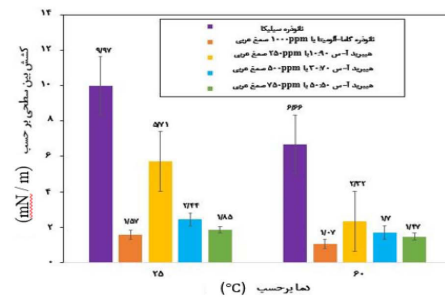
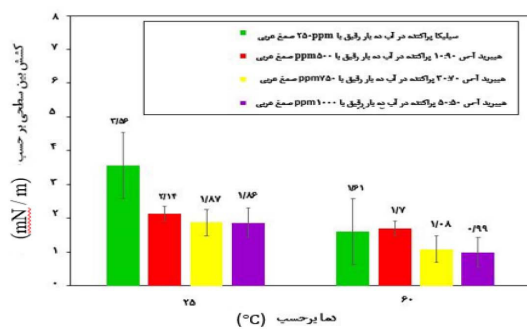
مورفولوژی‌های شش ضلعی و پوسته‌مانند افزایش جزئی در انرژی سطحی دارند. قطبیت سیال پایه می‌تواند بر کشش سطحی نانوذرات با توجه به لایه دوگانه تشکیل شده در سطح مشترک ذره-سیال تأثیر بگذارد. یک منطقه چندفازی شامل نانوذرات جامد، سیال پایه و سطح مشترک است و انرژی سطحی به نانوذرات، سیال پایه و ناحیه‌ی اطراف سیال بستگی دارد. ماهیت آبدوست یا آب‌گریز ذرات نیروی محرکه‌ای است که میل ذرات را نسبت به هریک از فازها مشخص می‌کند [۵۷].

در شکل ۵ (ب) کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه در آب با ده‌برابر رقیق شده نسبت به آب دریا در دمای محیط و 60°C نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است نانوسیالات پراکنده در آب ده‌بار رقیق شده در دمای 25°C کشش بین سطحی کمتری نسبت به نانوسیالات پراکنده در آب مقطر دارند. همچنین نتایج به وضوح نشان می‌دهند که افزایش دما باعث کم شدن کشش بین سطحی می‌گردد. در میان تمام نانوسیالات بهینه نانوهمپیرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی $50:50$ با 1000 ppm صمغ‌عربی کمترین کشش بین سطحی را در دمای 60°C دارد. نانوذره سیلیکا و نانوهمپیریدها با نسبت جرمی $(90:10)$ و $(70:30)$ همراه با 250 ppm ، 500 و 750 صمغ‌عربی به ترتیب با افزایش دما کشش بین سطحی برابر با $(1/57, 1/7)$ و $1/8$ نشان دادند. همچنین نتایج بیان می‌کند که در بین نانوسیالاتی که مدت زمان طولانی‌تر پایدار بودند، نانوسیالات پراکنده در آب ده‌بار رقیق شده کمترین کشش بین سطحی را گزارش دادند.

در شکل ۵ (ج) کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه در آب پنج‌بار رقیق شده نسبت به آب دریا در دمای محیط و دمای 60°C نشان داده شده است.

مانند یک ماده فعال سطحی دوخصلتی عمل کنند. در نهایت گروه‌های عاملی نانوذرات اصلاح شده یک لایه اضافی در سطح مشترک آب-نمک و نفت ایجاد می‌کنند تا کشش بین سطحی کاهش یابد [۶۸]. تأثیر نمک بر مقادیر کشش بین سطحی در سیستم‌های حاوی آب-نمک پیچیده است. امولسیون آب در نفت در حضور ماده فعال سطحی در غلظت‌های کم نمک تشکیل می‌شود. در این سیستم افزایش میزان نمک باعث کاهش کشش بین سطحی می‌شود. جذب کاتیون‌ها در سطح مشترک به دلیل برهمکنش بین کاتیون‌ها و فاز هیدروکربنی اتفاق خواهد افتاد. در غلظت کم آب-نمک فصل مشترک به دلیل قرار گرفتن کاتیون‌ها در سطح مشترک مثبت یا افزایش می‌یابد. در نتیجه کشش بین سطحی در غلظت کم آب-نمک کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در غلظت‌های بالای نمک، امولسیون نفت در آب ایجاد می‌شود و با افزایش غلظت نمک، کشش بین سطحی افزایش می‌یابد. در غلظت‌های بالای آب-نمک، کاتیون‌ها توسط مولکول‌های آب احاطه می‌شوند بنابراین کاتیون‌ها تمایل کمتری برای انتقال به سطح مشترک دارند. جداسازی کاتیون‌ها از سطح مشترک می‌تواند بار مثبت سطح مشترک را کاهش دهد و در نتیجه در غلظت‌های بالا آب-نمک کشش بین سطحی افزایش می‌یابد [۶۹ و ۷۰].

کشش بین سطحی برای تعیین حرکت نانوسیالات در محیط متخلخل استفاده می‌شود. تئوری مکانیسم عملکرد کشش بین سطحی بر روی نانوذرات هنوز مورد بحث است، اما نظریه‌های تقریب پواسون-بولتزمن و DLVO برای عملکرد بین نانوذرات، سنگ و سیال تاکنون استفاده شده‌اند. به هر حال برای درک بهتر نیروهای موجود باید اندازه ذرات و نیروهای جاذبه بین ذرات در نظر گرفته شوند. مورفولوژی ذرات و همچنین نسبت مساحت به حجم برای برهمکنش‌های بین ذرات و مولکول‌های سیال ویژگی مهمی است که بر کشش سطحی یک سیال پیچیده حاکم است. مورفولوژی‌های نزدیک به کروی در مقایسه با



شکل ۵ (الف). بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب مقطر. در دمای محیط و دمای ۶۰ °C. بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب ده برابر رقیق شده نسبت به آب دریا (ج). بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب پنج برابر رقیق شده نسبت به آب دریا (د). بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دو برابر رقیق شده نسبت به آب دریا (ی). بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب با شوری دریا مصنوعی.

که این افزایش کشش بین سطحی در آب دو برابر رقیق شده می تواند بخاطر غلظت بالای نمک باشد. بطوری که نانوذره سیلیکا و نانوهیبرید با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ پراکنده در شوری ۸۱۴۲ ppm در دمای محیط کشش بین سطحی برابر با (mN/m) (۴/۲۴ و ۲/۲۵) بدست آمد، اما با افزایش شوری به ۲۰۴۰۰ ppm به ترتیب کشش بین سطحی آنان به (mN/m) (۲/۷ و ۴/۷) در همین دما ارتقا پیدا کرد که این اعداد بخوبی اثر افزایش شوری در افزایش کشش بین سطحی را نمایش می دهند. از طرفی دیگر با افزایش دما مشاهده می شود که مقادیر کشش بین سطحی برای نانوسیالات بهینه

نانوذره سیلیکا و نانوهیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) با ppm (۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰) صمغ عربی کشش بین سطحی آنان در دمای ۲۵ °C به ترتیب از (mN/m) (۲/۲۵، ۴/۲۴ و ۲/۱۸) به مقادیر (mN/m) (۱/۷۸، ۲/۲۸ و ۱/۵۹) در دمای ۶۰ °C کاهش یافته است.

در **شکل ۵ (د)** نشان داده شده است که با افزایش شوری سیال پایه کشش بین سطحی نانوذره سیلیکا و نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا در دمای محیط نسبت به زمانی که در آب با شوری ۵ برابر رقیق شده، افزایش یافته است

است و باعث کاهش کشش بین‌سطحی نانوسیالات می‌گردد به طوری که تمامی نانوسیالات با افزایش دما با روند کاهش کشش بین‌سطحی مواجه شدند. اما با بررسی اثر شوری بر روی رفتار نانوسیالات مشاهده شد ممکن است با افزایش شوری کشش بین‌سطحی افزایش پیدا کند بطوری که در این پژوهش در شوری ۲۰۴۰۰ ppm، افزایش کشش بین‌سطحی مشاهده شد. اما نانوسیالات در شوری ۴۰۷۱ ppm کمترین کشش بین‌سطحی را نشان دادند و کمترین کشش بین‌سطحی برای نانوهیبرید با نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا ۵۰:۵۰ گزارش شد.

• دما و شوری سیال پایه تأثیر بسیار زیادی بر روی ویسکوزیته نانوسیالات دارند. کمترین ویسکوزیته برای نانوسیالات پراکنده در آب مقطر گزارش شد. به طوری که برای نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ ویسکوزیته‌ای برابر با (cp) ۰/۷۵ به دست آمد. بررسی ویسکوزیته نانوهیبریدها در آب مقطر تا حدود زیادی به نسبت جرمی گاما-آلومینا و سیلیکا بستگی دارد. بصورتی که نانوهیبریدها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰ در دمای پایین ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا داشتند اما با افزایش دما ویسکوزیته آنها نسبت به نانوذرات منفرد افزایش یافت. نانوهیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوسیالات منفرد داشت و این روند را در تمام دماهای اندازه‌گیری شده نشان داد. بررسی ویسکوزیته نانوسیالات در شوری ۴۰۷۱ ppm و ۸۱۴۲ نشان می‌دهد که با افزایش دما ویسکوزیته نانوهیبریدها نسبت به نانوذره سیلیکا بیشتر است این در حالی است که در شوری ۲۰۴۰۰ ppm تنها نانوهیبرید پایدار در این شوری ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا دارد.

در آب دوبرابر رقیق شده کاهش یافته است. همچنین در شکل ۵ (ی) کشش بین‌سطحی برای نانوذره سیلیکا پراکنده در آب مصنوعی دریا با ۱۰۰۰ ppm صمغ عربی در دمای محیط و دمای ۶۰ °C به ترتیب برابر با (mN/m) (۲/۱ و ۱/۵۲) گزارش شد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پایداری، کشش بین‌سطحی و ویسکوزیته نانوذرات منفرد و نانوهیبریدها پراکنده در آب مقطر و آب‌هایی با شوری مختلف که با کمک ماده فعال سطحی سبز به ثبات رسیده بودند، پرداخته شد. در ادامه برخی از مهمترین نتایجی که از این پژوهش به دست آمد به شرح زیر بیان می‌گردد:

• در میان فاکتور شوری سیال پایه، نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا و غلظت صمغ عربی تأثیرگذارترین فاکتور برای بررسی پایداری نانومحلول‌ها نسبت جرمی نانوگاما-آلومینا به سیلیکا معرفی شد. در میان نانوذرات منفرد نانوذره سیلیکا پایدارتر از نانوذره گاما-آلومینا است. از طرفی نانوهیبرید با نسبت جرمی کمتر گاما-آلومینا مدت طولانی‌تر پایدار است. پس از نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا، شوری سیال پایه دومین پارامتر اثرگذار بر پایداری نانومحلول‌ها معرفی شد. به گونه‌ای که هرچه حضور کاتیون‌های موجود در آب کمتر باشد نانومحلول‌ها پایدارتر هستند. غلظت صمغ عربی تعیین‌کننده پایداری نانوسیالات معرفی شد. نتایج به وضوح نشان دادند که به جز نانوذره سیلیکا که در عدم حضور صمغ عربی پایداری قابل قبولی دارد نانومحلول‌هایی که از صمغ عربی برای تهیه‌شان استفاده نشد در کمتر از ۲ ساعت ناپایدار می‌شوند.

• اثر دما بر روی کشش بین‌سطحی نانوسیالات موثر

مراجع

- [1]. Bahari, N. M., Che Mohamed Hussein, S. N., & Othman, N. H. (2021). Synthesis of Al_2O_3 - SiO_2 /water hybrid nanofluids and effects of surfactant toward dispersion and stability. *Particulate Science and Technology*, 39(7), 844-858. doi.org/10.1080/02726351.2020.1838015.
- [2]. Lau, H. C., Yu, M., & Nguyen, Q. P. (2017). Nanotechnology for oilfield applications: Challenges and impact. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 1160-1169. doi.org/10.1016/j.petrol.2017.07.062.
- [3]. Rahman, M. M., Haroun, M., Al Kobaisi, M., Kim, M., Suboyin, A., Somra, B., Ponnambathayil, J.A. and & Punjabi, S. (2022). Insights into nanoparticles, electrokinetics and hybrid techniques on improving oil recovered in carbonate reservoirs. *Energies*, 15(15), 5502. doi.org/10.3390/en15155502.
- [4]. El-Diaſty, A. I., & Aly, A. M. (2015, September). Understanding the mechanism of nanoparticles applications in enhanced oil recovery. In *SPE North Africa technical conference and exhibition* (p. D021S009R004). SPE. doi.org/10.2118/175806-MS.
- [5]. Nowrouzi, I., Manshad, A. K., & Mohammadi, A. H. (2019). Effects of TiO_2 , MgO , and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles in carbonated water on water-oil interfacial tension (IFT) reduction in chemical enhanced oil recovery (CEOR) process. *Journal of Molecular Liquids*, 292, 111348. doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111348.
- [6]. Adil, M., Lee, K. C., Zaid, H. M., & Manaka, T. (2020). Role of phase-dependent dielectric properties of alumina nanoparticles in electromagnetic-assisted enhanced oil recovery. *Nanomaterials*, 10(10), 1975. doi.org/10.3390/nano10101975.
- [7]. Mahmoudpour, M., & Pourafshary, P. (2021). Investigation of the effect of engineered water/nanofluid hybrid injection on enhanced oil recovery mechanisms in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107662. doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107662.
- [8]. Hu, Y., Zhao, Z., Dong, H., Vladimirovna Mikhailova, M., & Davarpanah, A. (2021). Retracted: hybrid application of nanoparticles and polymer in enhanced oil recovery processes. *Polymers*, 13(9), 1414. doi.org/10.3390/polym13091414.
- [9]. Dardan, E., Afrand, M., & Isfahani, A. M. (2016). Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power. *Applied Thermal Engineering*, 109, 524-534. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.103.
- [10]. Ansari, H., Riazi, M., & Sabbaghi, S. (2018). An experimental investigation of wettability alteration of carbonated rock using alpha-alumina nanofluid. *Journal of Petroleum Research*, 28(97-5), 47-58. doi: 10.22078/pr.2018.3098.2460.
- [11]. Mansouri, M., Nakhaee, A., & Pourafshary, P. (2019). Effect of SiO_2 nanoparticles on fines stabilization during low salinity water flooding in sandstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 637-648. doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.066.
- [12]. Cacuaa K. Ordoñezb F. Zapatab C. Herrera B. Pabóna E. Buitrago-Sierra R. (2019). Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 583. doi: 10.22078/pr.2024.5376.3393.
- [13]. Betancur, S., Giraldo, L. J., Carrasco-Marín, F., Riazi, M., Manrique, E. J., Quintero, H., García, H.A., Franco-Ariza, C.A. & Cortés, F. B. (2019). Importance of the nanofluid preparation for ultra-low interfacial tension in enhanced oil recovery based on surfactant–nanoparticle–brine system interaction. *ACS omega*, 4(14), 16171-16180. doi.org/10.1021/acsomega.9b02372.
- [14]. Behera, U. S., & Sangwai, J. S. (2021). Nanofluids of silica nanoparticles in low salinity water with surfactant and polymer (SMART LowSal) for enhanced oil recovery. *Journal of Molecular Liquids*, 342, 117388. doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117388.
- [15]. Al-Anssari, S., Nwider, L. N., Ali, M., Sangwai, J. S., Wang, S., Barifcani, A., & Iglaier, S. (2017). Retention of silica nanoparticles in limestone porous media. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition* (p. D021S009R006). SPE. doi.org/10.2118/186253-MS.
- [16]. Hendraningrat, L., Li, S., & Torsæter, O. (2013). Effect of some parameters influencing enhanced oil recovery process using silica nanoparticles: an experimental investigation. In *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition* (pp. SPE-165955). SPE. doi.org/10.2118/165955-MS.
- [17]. Zallaghi, M., Kharrat, R., & Hashemi, A. (2018). Improving the microscopic sweep efficiency of water flooding using silica nanoparticles. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8, 259-269.
- [18]. Hou, B., Jia, R., Fu, M., Wang, Y., Jiang, C., Yang, B., & Huang, Y. (2019). Wettability alteration of oil-wet carbonate surface induced by self-dispersing silica nanoparticles: Mechanism and monovalent metal ion's effect. *Journal of Molecular Liquids*, 294, 111601. doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111601.
- [19]. Nazari Moghaddam, R., Bahramian, A., Fakhroucian, Z., Karimi, A., & Arya, S. (2015). Comparative study of using nanoparticles for enhanced oil recovery: wettability alteration of carbonate rocks. *Energy & Fuels*, 29(4),

2111-2119. doi.org/10.1021/ef5024719.

[20]. Yekeen, N., Padmanabhan, E., Idris, A. K., & Ibad, S. M. (2019). Surfactant adsorption behaviors onto shale from Malaysian formations: Influence of silicon dioxide nanoparticles, surfactant type, temperature, salinity and shale lithology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179, 841-854. doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.096.

[21]. Keykhosravi, A., & Simjoo, M. (2020). Enhancement of capillary imbibition by Gamma-Alumina nanoparticles in carbonate rocks: Underlying mechanisms and scaling analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106802. doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106802.

[22]. Seid Mohammadi, M., Moghadasi, J., & Naseri, S. (2014). An experimental investigation of wettability alteration in carbonate reservoir using γ -Al₂O₃ nanoparticles. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 3(2), 18-26. doi.org/10.22050/ijogst.2014.6034.

[23]. Kiani, S., Mansouri Zadeh, M., Khodabakhshi, S., Rashidi, A., & Moghadasi, J. (2016). Newly prepared Nano gamma alumina and its application in enhanced oil recovery: an approach to low-salinity waterflooding. *Energy & Fuels*, 30(5), 3791-3797. doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b03008.

[24]. Pourafshary, P., & Moradpour, N. (2019). Hybrid EOR methods utilizing low-salinity water. *Enhanc. Oil Recovery Process. New Technol*, 8, 25.

[25]. Mofrad, S. K., & Dehaghani, A. H. S. (2020). An experimental investigation into enhancing oil recovery using smart water combined with anionic and cationic surfactants in carbonate reservoir. *Energy Reports*, 6, 543-549. doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.034.

[26]. Dabiri, A., & Honarvar, B. (2020). Synergic impacts of two non-ionic natural surfactants and low salinity water on interfacial tension reduction, wettability alteration and oil recovery: Experimental study on oil wet carbonate core samples. *Natural Resources Research*, 29(6), 4003-4016.

[27]. Moradi, S., Isari, A. A., Bachari, Z., & Mahmoodi, H. (2019). Combination of a new natural surfactant and smart water injection for enhanced oil recovery in carbonate rock: Synergic impacts of active ions and natural surfactant concentration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176, 1-10. doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.043.

[28]. Ahmadi, M. A., & Shadizadeh, S. R. (2018). Spotlight on the new natural surfactant flooding in carbonate rock samples in low salinity condition. *Scientific Reports*, 8(1), 10985.

[29]. Madani, M., Zargar, G., Takassi, M. A., Daryasafar, A., Wood, D. A., & Zhang, Z. (2019). Fundamental investigation of an environmentally-friendly surfactant agent for chemical enhanced oil recovery. *Fuel*, 238, 186-197. doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.105.

[30]. Mahmoudi, S., Jafari, A., & Javadian, S. (2019). Temperature effect on performance of nanoparticle/surfactant flooding in enhanced heavy oil recovery. *Petroleum Science*, 16, 1387-1402.

[31]. Orodu O, D. Orodu K, B. Alfolabi R, O. Dafe E, A. (2018). "Dataset on experimental investigation of gum arabic coated alumina nanoparticles for enhanced recovery of nigerian medium crude oil". *Data in brief*, 2018. 19: p. 475-480. doi.org/10.1016/j.dib.2018.05.046.

[32]. Sowunmi, A. O., Efeovbokhan, V. E., Orodu, O. D., & Oni, B. A. (2022). Polyelectrolyte-nanocomposite for enhanced oil recovery: influence of nanoparticle on rheology, oil recovery and formation damage. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(2), 493-506.

[33]. Yu, W., & Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012(1), 435873. doi.org/10.1155/2012/435873.

[34]. Mukherjee, S., & Paria, S. (2013). Preparation and stability of nanofluids-a review. *IOSR Journal of Mechanical and civil engineering*, 9(2), 63-69. e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X.

[35]. Isobe, N., Sagawa, N., Ono, Y., Fujisawa, S., Kimura, S., Kinoshita, K., Miuchi, T., Iwata, T., Isogai, A., Nishino, M. & Deguchi, S. (2020). Primary structure of gum arabic and its dynamics at oil/water interface. *Carbohydrate Polymers*, 249, 116843. doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116843.

[36]. Dror, Y., Cohen, Y., & Yerushalmi-Rozen, R. (2006). Structure of gum arabic in aqueous solution. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(22), 3265-3271. doi.org/10.1002/polb.20970.

[37]. Shao, H., Cao, Y., Chen, Z., Ding, W., Yin, X., Chen, Y., Ying Liu, & Yang, W. (2023). Gum arabic-assisted polyaniline nanofillers for improving anticorrosion performance of waterborne epoxy coatings. *ACS Applied Nano Materials*, 6(14), 13270-13283. doi.org/10.1021/acsanm.3c01990.

[38]. Han, J., Chen, F., Gao, C., Zhang, Y., & Tang, X. (2020). Environmental stability and curcumin release properties of Pickering emulsion stabilized by chitosan/gum arabic nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 157, 202-211. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.177.

[39]. Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., & Choi, S. U. (2008). Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transfer Engineering*, 29(5), 432-460. doi.org/10.1080/01457630701850851.

- [40]. Morrow, L., Potter, D. K., & Barron, A. R. (2015). Detection of magnetic nanoparticles against proppant and shale reservoir rocks. *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(13), 1028-1041. doi.org/10.1080/17458080.2014.951412.
- [41]. Arain, Z. U. A. (2020). Influence of silica nanoparticles on the surface properties of carbonate reservoirs (Doctoral dissertation, Curtin University). hdl.handle.net/20.500.11937/81266.
- [42]. Golkaria A. Riazi M. (2018). "Comparative study of oil spreading characteristics for water and carbonated water systems using live and dead oils". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.034.
- [43]. Unal, R., & Dean, E. B. (1990, January). Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview. In 1991 Annual conference of the international society of parametric analysts.
- [44]. Daneshvar, N., Khataee, A. R., Rasoulifard, M. H., & Pourhassan, M. (2007). Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: Optimization of effective parameters using Taguchi method. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1-2), 214-219. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.016.
- [45]. Kackar, R. N. (1985). Off-line quality control, parameter design, and the Taguchi method. *Journal of Quality Technology*, 17(4), 176-188. doi.org/10.1080/00224065.1985.11978964.
- [46]. M. Azadi Moghaddam, F.K., M.Andalib .(2012). Application of grey relational analysis and simulated annealing algorithm for modeling and optimization of EDM parameters on 40CrMnMoS86 hot worked steel. 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2012 16-18 May, 2012.
- [47]. Sidik, N. A. C., Jamil, M. M., Japar, W. M. A. A., & Adamu, I. M. (2017). A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1112-1122. doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.221.
- [48]. Witharana, S., Palabiyik, I., Musina, Z., & Ding, Y. (2013). Stability of glycol nanofluids—the theory and experiment. *Powder technology*, 239, 72-77. doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.039.
- [49]. Anushree, C., & Philip, J. (2016). Assessment of long term stability of aqueous nanofluids using different experimental techniques. *Journal of Molecular Liquids*, 222, 350-358. doi.org/10.1016/j.molliq.2016.07.051.
- [50]. Hendraningrat, L., & Torsaeter, O. (2014, March). Unlocking the potential of metal oxides nanoparticles to enhance the oil recovery. In *Offshore Technology Conference Asia* (pp. OTC-24696). OTC. doi.org/10.4043/24696-MS.
- [51]. Roštami, P., Sharifi, M., Aminshahidy, B., & Fahimpour, J. (2020). Enhanced oil recovery using silica nanoparticles in the presence of salts for wettability alteration. *Journal of Dispersion Science and Technology*. doi.org/10.1080/01932691.2019.1583575.
- [52]. Eshgarf, H., Kalbasi, R., Maleki, A., Shadloo, M. S., & Karimipour, A. (2021). A review on the properties, preparation, models and stability of hybrid nanofluids to optimize energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 1959-1983.
- [53]. Kumar, D. D., & Arasu, A. V. (2018). A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1669-1689. doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.257.
- [54]. Mahpishanian, A. M., Shahverdi, H., Simjoo, M., & Zaeri, M. R. (2021). Experimental investigation of nano silica on wettability alteration and enhanced oil recovery from carbonate reservoir using low salinity water. *Journal of Petroleum Research*, 30(99-6), 3-20. doi: 10.22078/pr.2020.4187.2897.
- [55]. Metin, C. O., Lake, L. W., Miranda, C. R., & Nguyen, Q. P. (2011). Stability of aqueous silica nanoparticle dispersions. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 839-850.
- [56]. Trefalt G and Borkovec M. "Overview of DLVO Theory". 2014.
- [57]. Agi, A., Junin, R., & Gbadamosi, A. (2018). Mechanism governing nanoparticle flow behaviour in porous media: insight for enhanced oil recovery applications. *International Nano Letters*, 8, 49-77.
- [58]. Zhang, H., Shan, G., Liu, H., & Xing, J. (2007). Surface modification of γ - Al_2O_3 nano-particles with gum arabic and its applications in adsorption and biodesulfurization. *Surface and Coatings Technology*, 201(16-17), 6917-6921. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.043.
- [59]. Habibi, S., Jafari, A., & Fakhroueian, Z. (2020). Wettability alteration analysis of smart water/novel functionalized nanocomposites for enhanced oil recovery. *Petroleum Science*, 17, 1318-1328.
- [60]. Peng, B., Zhang, L., Luo, J., Wang, P., Ding, B., Zeng, M., & Cheng, Z. (2017). A review of nanomaterials for nanofluid enhanced oil recovery. *RSC advances*, 7(51), 32246-32254. DOI: 10.1039/C7RA05592G.
- [61]. El-Masry, J. F., Bou-Hamdan, K. F., Abbas, A. H., & Martyushev, D. A. (2023). A comprehensive review on utilizing nanomaterials in enhanced oil recovery applications. *Energies*, 16(2), 691.
- [62]. Sharifi, L., Ghanbarnezhad, S., Ghofrani, S., & Mirhosseini, S. H. (2014). High porous alumina bodies: production and properties via gel-casting technique. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 65, 59-70. dx.doi.org/10.14257/ijast.2014.65.05.

- [63]. Jones, K. L., Hu, B., Li, W., Fang, Y., & Yang, J. (2022). Investigation of rheological behaviors of aqueous gum Arabic in the presence of crystalline nanocellulose. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4, 100243. doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100243.
- [64]. Namburu, P. K., Kulkarni, D. P., Dandekar, A., & Das, D. K. (2007). Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. *Micro & Nano Letters*, 2(3), 67-71. doi.org/10.1049/mnl:20070037.
- [65]. Hashemzadeh, S., & Hormozi, F. (2020). An experimental study on hydraulic and thermal performances of hybrid nanofluids in mini-channel: A new correlation for viscosity of hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140, 891-903.
- [66]. Babar, H., Sajid, M. U., & Ali, H. M. (2019). Viscosity of hybrid nanofluids: a critical review. *Thermal Science*, 23(3 Part B), 1713-1754. doi.org/10.2298/TSCI181128015B.
- [67]. Zargar Gh. Arabpoura T. Khaksar Manshada A. Ali J, A. Sajadi S, M. Keshavarzf A. and Mohammadig A, H. (2020). Experimental investigation of the effect of green TiO₂/Quartz nanocomposite on interfacial tension reduction, wettability alteration, and oil recovery improvement, *Fuel*. 263. doi: 10.22078/pr.2024.5376.3393.
- [68]. Hamdi, S. S., Al-Kayiem, H. H., & Muhsan, A. S. (2020). Natural polymer non-covalently grafted graphene nanoplatelets for improved oil recovery process: A micromodel evaluation. *Journal of Molecular Liquids*, 310, 113076. doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113076.
- [69]. Al-Sahhaf, T., Elkamel, A., Suttar Ahmed, A., & Khan, A. R. (2005). The influence of temperature, pressure, salinity, and surfactant concentration on the interfacial tension of the n-octane-water system. *Chemical Engineering Communications*, 192(5), 667-684. doi.org/10.1080/009864490510644.
- [70]. Divandari H. Hemmati-Sarapardeha A. Scha-ea M. Ranjbar M. (2020). “ Integrating functionalized magnetite nanoparticles with low salinity water and surfactant solution: Interfacial tension study”. *Fuel*. 281.