

Experimental Investigation of Hybrid Gel Performance in order to Control Fluid Loss in Fractured Formations

Rasoul Nazemi¹, Siavash Ashoori^{2*} and Jamshid Moghadasi³

Petroleum University of Technology, Ahwaz Faculty of Petroleum Engineering, Iran

ashoori@put.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4870.3174

Received: July/31/2022

Accepted: November/01/2022

Introduction

Lost circulation, defined as the undesirable loss of drilling fluids into the fractures and the voids of the formations, is known to be one of the most challenging problems to be prevented or mitigated during the drilling or cementing [1]. Cross-linking is the linking of two independent polymer chains by cross-linking agents to make a three-dimensional gel structure. Polymeric gel systems consist of a polymer base and cross-linker combined [2]. The advantage of gels is that they can be pump down as a fluid and after a certain time reach to their gel Structure, which can be applied for different purposes such as, water shut off operations and handling loss circulation issues [3, 4]. For hybrid gel (HG), the continuous phase is gelled water and the viscosity being enhanced by the addition an internal phase. The viscosity of the hybrid gel can be adjusted by varying the polymer content in the

aqueous phase and the volume fraction of oil. One of the advantages of HG compared to cross-linked polymer gels is that it reduces the cost by reducing the concentration of polymer and cross-linker, which can diminish the formation damage [5, 6].

Materials and Methods

Cross-linking helps in achieving gels with the required viscosity for lost circulation treatment without increasing polymer loading. For HG, guar gum was used as polymers and borax as cross linking agents. the cross-linking mechanism is based on hydrolysis borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) to $\text{B}(\text{OH})_4^-$ anions. As shown in Figure 1, The monoborate ion can form hydrogen bonds with the cis-hydroxy functionalities of the polysaccharide, thus connecting two strains of polymers [7, 8].

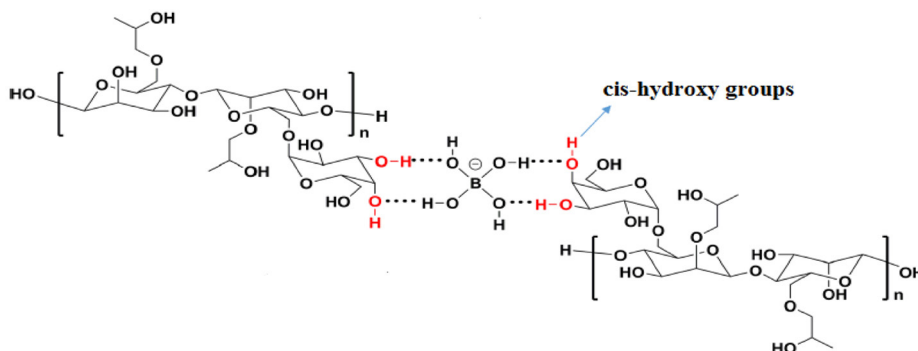


Fig. 1 Cross-linked polymer with borate ion [8].

Results and Discussion

The gel-emulsions are cross-linked with time to obtain a suitable strength. One of the most important issues in designing a hybrid gel is achieving an acceptable final viscosity with a proper initial gelation time and crosslinking rate. In addition to the type of polymer and cross-linker, several factors like pH, temperature and salinity are involved in the final performance of the gel.

Effect of pH on Gelation Behavior

Creating an alkaline environment to release borate ions from borax is essential for cross-linking and gelation [9]. Figure 2 shows the effect of different pH on the gelation of HG. As shown in Figure 2, the crosslinking rate as well as the final viscosity increases by increasing pH from 9 to 12. This is because with an increase in pH, more borate ions are available for crosslinking; the final gel network will be stronger.

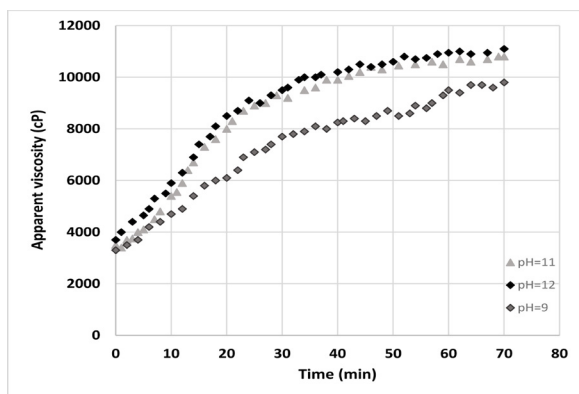


Fig. 2 Effect of pH on gelation behavior of hybrid gel.

Effect of Temperature on Gelation Behavior

Figure 3 shows the effect of temperature on the progress of gelation for hybrid gel. Crosslinking rate is a function of borate ion concentration as well as activation energy of crosslinking. Therefore, at higher temperatures, more borate ions and more energy are available for crosslinking reaction. On the other hand, with an increase in temperature, the viscosity of the polymer decreases, which is due to the polymer degradation at high temperatures. According to Figures 3, with an increase in temperature, the cross-linking rate remains almost constant and the final gelling time becomes shorter.

Effect of Salinity on Gelation Behavior

Cations react with the anionic and natural polymers and cause precipitation in the solution and consequently the viscosity of the solution decreases. This reduction in viscosity is related to the concentration of cations. Whatever the concentration of cation be higher, this reduction of viscosity is greater [10]. To investigate the effect of salinity, different concentrations of CaCl_2 were added to the gel-emulsion combination (Figure 4).

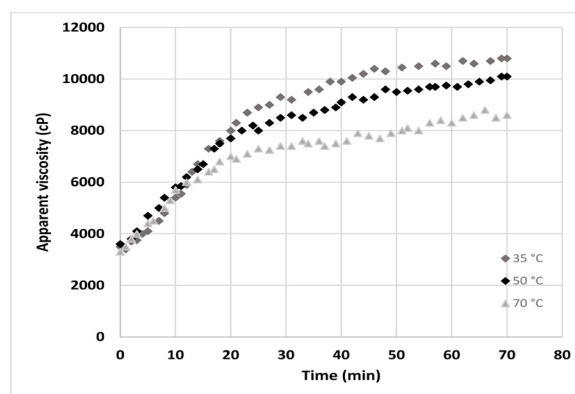


Fig. 3 Effect of temperature on gelation behavior of hybrid gel.

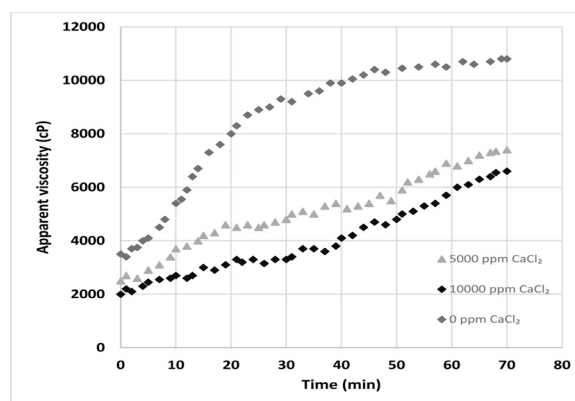


Fig. 4 Effect of CaCl_2 concentration on gelation behavior of hybrid gel.

As shown in Figure 4, by increasing the CaCl_2 concentration, the initial gelation time is delayed, and the crosslinking rate decreases. In addition, the final quality of the gel decreases due to the reduction of crosslinking, and the gelation proceeds more slowly, so the time to reach the final viscosity will be longer.

Gel Degradation

The presence of gel inside the formation or fractures during the well flowing can cause formation damage. Gel breakers are used to reduce the viscosity of gels either by cleaving polymer molecules into smaller fragments or by de-crosslinking the network of the gels [11]. Hydrochloric acid (HCl) is the most often used acid as a breaker [12]. After the degradation treatments being applied, the amount of gel degradation over time needed to be evaluated. There are several properties can be used to evaluate the degradation performance, including viscosity measurement and the residue weights of gels.

Residue Weights of Gels

The weight of the residue was measured and compared with the initial weight to calculate the degradation degree. The steps of measuring the degradation degree

of gels are summarized as follows:

- 1) Mixing the samples (10g) with 30cc acid solution in the glass bottles which were in either room temperature conditions or ovens with design temperatures.
- 2) Measured gel weight according to a designed schedule.

The performances of acid in degrading GE were determined by the value of weight remaining percentage (WRP), which is defined as,

$$\text{WRP} = \frac{W_a}{W_i} \times 100\% \quad (1)$$

where W_a is the weight of gel-emulsion after a certain immersing time, and W_i is the original weight of gel-emulsion [13]. Hydrochloric acid in two volumetric concentrations of 15% and 28% was used to evaluate the degradation degree of gel rupture with time. Figure 5 shows the amount of WPR gels with time in different concentrations of hydrochloric acid. As shown in Figure 5, The results clearly show that by increasing the acid concentration from 15% to 28%, The rupture rate of the gel increases and the time of complete gel rupture is much shorter. The complete rupture time of the gels in 15 and 28% hydrochloric acid solution was measured at about 7 and 11 hours, respectively.

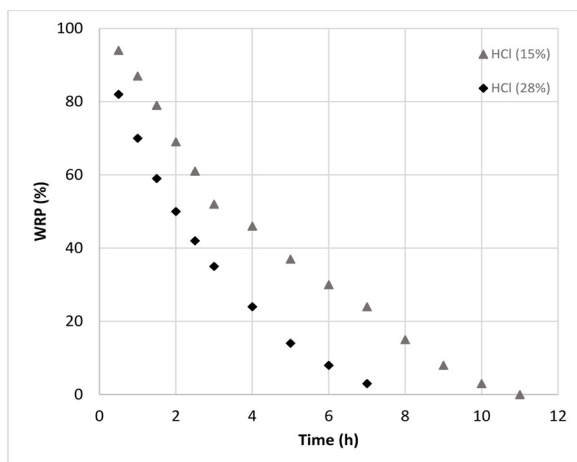


Fig. 5 Weight remaining percentage and gel degradation with time.

Conclusions

In this paper, the effect of different parameters on the rheological behavior of hybrid gel was studied. the following conclusions can be drawn:

- One of the effective parameters on gel performance is pH. As the pH increases, the viscosity and crosslinking rate increases and the final gelation time decreases.
- As the temperature increases, the crosslinking rate remains almost constant, but the viscosity of the gel emulsion and final gelation time decreases.
- Calcium chloride decreases the initial viscosity and final viscosity. Therefore, it is useful as a retarder for samples with high polymer concentration. As the salt concentration increases, the final viscosity of hybrid gel and crosslinking rate are significantly reduced and the final gelation time is postponed

- Laboratory tests showed that polymer emulsions can be easily removed from formation with hydrochloric acid, which indicates the non-damaging properties of the hybrid gels. The rupture time of the gel decreases significantly with an increase in hydrochloric acid concentration.

References

1. Luzardo J, Oliveira E P, Derks P W J, Nascimento R V, Gramatges A P, Valle R, Inderberg K (2015) Alternative lost circulation material for depleted reservoirs. In OTC Brasil. OnePetro.
2. Hashmat M D, Sultan Abdullah S, Rahman Saifur S, (2016) Crosslinked Polymeric Gels as Loss Circulation Materials: An Experimental Study. Paper presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition.
3. Jia H, Chen H, Guo S (2017) Fluid loss control mechanism of using polymer gel pill based on multi-crosslinking during overbalanced well workover and completion. Fuel, 210: 207-216.
4. Hamza A, Shamlooh M, Hussein I A, Nasser M, Salehi S (2019) Polymeric formulations used for loss circulation materials and wellbore strengthening applications in oil and gas wells: A review. Journal of Petroleum Science and Engineering, 180: 197-214.
5. Kakadjian S, Rauseo O, Marquez R, Gabay R, Tirado Y, & Blanco J (2001) Crosslinked emulsion to be used as fracturing fluids. In SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. OnePetro.
6. Roodhart L P, Davies D R (1987) Polymer emulsion: the revival of a fracturing fluid. In SPE/DOE Joint Symposium on Low Permeability Reservoirs. OnePetro.
7. Gao S, Guo J. and Nishinari K, (2008) Thermoreversible konjac glucomannan gel cross-linked by borax. Carbohydrate Polymers, 72, 2: 315-325.
8. Fan H, Gong Z, Wei Z, Chen H, Fan H, Geng J, Dai C (2017) Understanding the temperature-resistance performance of a borate cross-linked hydroxypropyl guar gum fracturing fluid based on a facile evaluation method. RSC advances, 7, 84: 53290-53300.
9. Harris P C, and Batenburg D V (2000) A Comparison of Freshwater and Seawater-Based Borate Crosslinked Fracturing, Paper SPE 50777 presented at International Symposium of Oilfield Chemistry held in Houston, Texas, USA, 16-19
10. Sedaghatzadeh M, Shahbazi K, Pourafshary P, Razavi SA (2019) The effect of cations on gelation of cross-linked polymers. Petroleum Exploration and Development, 46, 4: 826-832.
11. Al-Muntasheri G A, Li L, Liang F, Gomaa A M,

- (2018) Concepts in cleanup of fracturing fluids used in conventional reservoirs: A literature review. *SPE Prod. Oper.* 2018, 33: 196–213.
12. Almubarak T C, AlKhalidi M, Panda S, Nasr-El-Din H A (2020) Insights on Potential Formation Damage Mechanisms Associated with the Use of Gel Breakers in Hydraulic Fracturing. *Polymers*, 12, 11: 2722.
 13. Zhou E, (2019) Breaker evaluation and formation damage remediation of re-crosslinkable preformed particle gel (RPPG). M.S. in Petroleum Engineering, Geosciences and Geological and Petroleum Engineering. Missouri University of Science and Technology.

مطالعه و بررسی آزمایشگاهی عملکرد ژل هیبریدی به منظور کنترل هرزروی سیالات حفاری در سازندهای شکاف دار

رسول ناظمی، سیاوش عاشوری* و جمشید مقدسی

گروه مهندسی نفت، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰

چکیده

ژلهایی که در ابتدا ویسکوزیته پایینی دارند و بعد از مدتی شبکه سه بعدی مستحکمی تشکیل می دهند، می توانند به صورت موفقیت آمیزی در کنترل هرزروی سیالات حفاری به کار گرفته شوند. ژل هیبریدی، از یک ژل پلیمر کراس لینک شده به عنوان فاز پیوسته و یک سیال پایه روغنی به عنوان فاز داخلی تشکیل می شود. ژل هیبریدی به دلیل استفاده کمتر از پلیمر و کراس لینکر، هزینه کمتری نسبت به ژل پلیمرهای مرسوم دارد و خواص آن به راحتی قابل کنترل می باشد. این مقاله در دو بخش نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی تجربی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی می شود. برای ارزیابی رفتار ژل در شرایط مختلف تعدادی پارامتر شامل زمان شروع تشکیل ژل، زمان نهایی ژل شدن، سرعت تشکیل شبکه ژل تعریف و مقایسه شدند. ابتدا، تأثیر پارامترهایی مانند pH، دما و شوری بر عملکرد ژل و نیز پایداری ژل با زمان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. سپس با تست های پایداری دینامیکی، حداکثر میزان فشاری که ژل در شکاف می تواند تحمل کند تا از هرزروی بیشتر سیال حفاری جلوگیری کند، اندازه گیری شد. در نهایت، برای بررسی آسیب وارده به سازند توسط ژل هیبریدی، میزان گسیختگی ژل با زمان در هیدروکلرید اسید ۱۵ و ۲۸٪ حجمی اندازه گیری شد. نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که ژل های هیبریدی به دلیل انعطاف پذیری بالا در طراحی، استحکام مناسب و عدم آسیب به سازند، می توانند عملکرد مناسبی برای مقابله با هرزروی حین حفاری و تکمیل چاه داشته باشند. از روش سطح پاسخ براساس طراحی Box-Behnken برای پیش بینی ویسکوزیته نهایی ژل هیبریدی به عنوان تابعی از دما، pH و شوری استفاده شد و مدل پیش بینی شده با حل مدل برازش درجه دوم به دست آمد. رابطه پیشنهادی، ویسکوزیته ژل هیبریدی را با دقت ۸۸٪، در محدوده پارامترهای ورودی مورد استفاده پیش بینی می کند.

کلمات کلیدی: هرزروی، سیالات حفاری، ژل هیبریدی، آسیب سازند، روش سطح پاسخ

مقدمه

مهم ترین موضوعات و چالش ها در صنعت حفاری است که به علت از دست رفتن سیالات حفاری و نیز زمان مفید در حین حفاری یا سیمانکاری چاه ها موجب افزایش هزینه های عملیات می شود [۱]. هرزروی گل به دلیل عواملی از قبیل اختلاف فشار

جریان کنترل نشده گل حفاری به داخل یک سازند، هرزروی جریان نامیده می شود. هرزروی از

شکاف‌های بزرگ استفاده کرد و از ژل ضعیف‌تر در سازندهایی با تراوایی کمتر یا شکاف‌های کوچک‌تر استفاده می‌شود [۱۰]. ژل‌های کراس لینک شده می‌توانند در برابر هرزروی در سازندهای ماسه سنگی تخلیه شده، سازندهای غیر متراکم و نیز در مسدود کردن شکستگی‌ها و حفرات غار مانند در سازندهای کربناتی موثر باشند [۱۱ و ۱۲]. از ژل‌هایی با قابلیت انحلال در اسید می‌توان برای مخازن استفاده کرد [۱۳]. مختاری و همکاران، بر روی تأثیر عواملی مانند غلظت پلیمر، کنترل‌کننده pH، زمان اختلاط ژل و shear history، بر رفتار ژل پلیمر ساخته شده با زانتان و بورات مطالعه کردند. آنها مشاهده کردند که افزایش pH و غلظت پلیمر روند ژل شدن را تسریع می‌کند و shear history بر زمان شروع تشکیل ژل تأثیر نمی‌گذارد اما با افزایش زمان مخلوط شدن پلیمر و اتصال‌دهنده عرضی، زمان شروع ژل شدن^۲ کاهش می‌یابد [۱۴]. برای ژل‌های هیبریدی، فاز پیوسته ژل کراس لینک شده است و با افزودن یک فاز داخلی در کسر حجمی بین ۰/۳ تا ۰/۷، ویسکوزیته افزایش می‌یابد. فاز خارجی شامل پلیمر و کراس لینکر است و از گازوئیل، روغن سنتزی یا نفت می‌توان به‌عنوان فاز داخلی استفاده کرد. ویسکوزیته ژل‌های هیبریدی را می‌توان با تغییر مقدار پلیمر و کراس لینکر در فاز آبی و یا تغییر کسر حجمی فاز داخلی به مقدار مطلوب و استحکام مورد نظر رساند. یکی از مزایای ژل هیبریدی در مقایسه با ژل پلیمرها این است که با کاهش غلظت پلیمر و کراس لینکر مورد استفاده در ساخت ژل، میزان آسیب به سازند ناشی از حضور ژل در شکاف‌ها بعد از عملیات حفاری کاهش می‌یابد [۱۵ و ۱۶]. کاکادجیان و همکاران، بر روی ژل‌های امولسیون‌روغن در آب به‌عنوان سیال شکاف‌زنی هیدرولیکی مطالعه کردند.

ستون سیال حفاری داخل چاه و فشار سیال داخل سازند، وجود شکاف‌ها در سازند و سازندهایی با تراوایی بالا رخ می‌دهد [۲]. مشکل هرزروی در ۷۵٪ از چاه‌های حفاری شده رخ می‌دهد و مشکلاتی از قبیل پایداری و کنترل چاه، تمیزکاری چاه و گیرکردن لوله‌ها برخی از حوادث پیش‌بینی شده ناشی از هرزروی هستند [۳ و ۴].

به‌طور کلی، شدت هرزروی را می‌توان به سه گروه هرزروی ناچیز (کمتر از ۲۵ bbl/h)، هرزروی متوسط (بین ۲۵ bbl/h تا ۱۰۰ bbl/h) و هرزروی شدید (بیشتر از ۱۰۰ bbl/h) تقسیم‌بندی کرد [۵]. مواد مرسوم کنترل‌کننده هرزروی^۱ در سه دسته ذرات دانه‌ای (پوست گردو، لایمستون و پوست صدف)، ذرات ورقه‌ای (میکا و ساقه نیشکر) و فیبرها قرار می‌گیرند. علاوه بر این مواد از ژل پلیمرها، سیمان، گانک پیل (بنتونایت و گازوئیل) و مواد شکل‌پذیر مانند لاستیک و رابرها در کنترل هرزروی سیال حفاری به داخل سازندها استفاده می‌شود [۶]. ژل پلیمرها از یک پلیمر و یک اتصال‌دهنده عرضی (کراس لینکر) تشکیل می‌شود. عمل کراس لینکینگ به پیوند و اتصال شاخه‌های پلیمرها به هم توسط اتصال‌دهنده عرضی گفته می‌شود که موجب تشکیل یک ژل با شبکه سه‌بعدی می‌شود. ژل پلیمرها در ابتدا ویسکوزیته پایینی دارند و بعد از مدتی یک ژل با ساختار سه‌بعدی مستحکم تشکیل می‌دهند [۷]. مزیت این ژل‌ها این است که می‌تواند برای اهدافی مانند مسدود کردن سازندهای آبی و ناحیه‌های مختلف، عملیات شکاف‌زنی و تحریک چاه، استحکام و پایداری چاه و کنترل هرزروی مورد استفاده قرار گیرد. مزیت دیگر این ژل‌ها این است که می‌توان از آنها برای جلوگیری از هرزروی در گل‌های پایه آبی و پایه روغنی استفاده کرد [۸ و ۹]. انتخاب ژل پلیمر مناسب برای مقابله با هرزروی مهم است و به‌طور مستقیم بر نتیجه عملیات تأثیر می‌گذارد. ژل‌هایی با استحکام بیشتر را می‌توان در مخازنی با

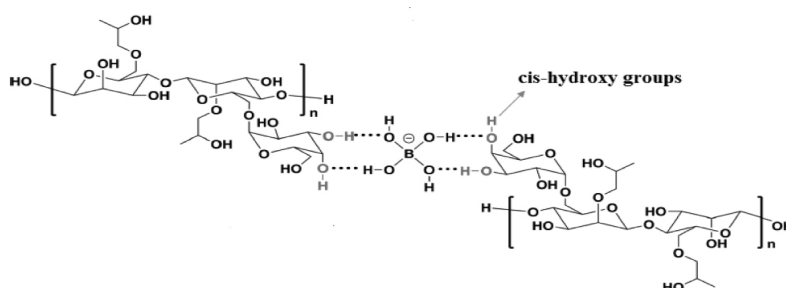
1. Conventional lost Circulation Materials

2. Gelation Time

دما، شوری (کلسیم کلرید) و pH بر عملکرد ژل مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از روش سطح پاسخ بر مبنای طراحی Box-Behnken، مدل سازی برای پیش بینی ویسکوزیته نهایی ژل هیبریدی انجام شد. برای بررسی عملکرد ژل در کنترل هرزروی از تست های پایداری دینامیکی استفاده شد. در این تست حداکثر فشار قابل تحمل ژل برای جلوگیری از هرزروی سیال حفاری در شکاف ها اندازه گیری شد. در ادامه پایداری ژل با زمان، شیب سازی رفتار ژل حین پمپاژ و نیز میزان گسیختگی ژل با زمان در هیدروکلرید اسید برای بررسی آسیب وارده به سازند توسط ژل، اندازه گیری و ارزیابی شد.

مواد

ایجاد اتصال عرضی بین پلیمرها منجر به تشکیل ژل هایی با ویسکوزیته دلخواه و نیز کاهش مقدار پلیمر مصرفی شود. برای ساخت ژل هیبریدی از گوار به عنوان پلیمر و بوراکس به عنوان کراس لینکر استفاده شد. سازوکار و تشکیل اتصال عرضی بین پلیمرها بر اساس هیدرولیز بوراکس ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) به آنیون های $\text{B}(\text{OH})_4^-$ است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یون مونوبورات می تواند پیوندهای هیدروژنی با عامل های cis-hydroxy پلیمر گوار تشکیل دهد و بنابراین باعث اتصال پلیمرها و تشکیل یک شبکه ژل شود [۱۹]. مزیت ژل های کراس لینک شده با بورات، سرعت کراس لینکینگ قابل کنترل و پایداری حرارتی مناسب برای استفاده در مخازن است [۲۰].



شکل ۱ پلیمر اتصال عرضی شده با یون بورات [۱۸].

در این مطالعه از پلیمر پلی ساکارید بدون کراس لینکر به عنوان عامل ویسکوزیته دهنده فاز خارجی استفاده شد و نسبت های مختلف محلول پلیمر به روغن ۵۰/۵۰، ۶۰/۴۰ و ۷۰/۳۰ را بررسی کردند. آنها نشان دادند که تأثیر غلظت پلیمر بر افزایش ویسکوزیته امولسیون بیشتر از افزودن درصد روغن به عنوان فاز داخلی است و نیز ساختار ژل با استفاده از اکسید کننده های معمولی شکسته می شود که این منجر به کاهش آسیب به سازند می شود [۱۵]. سایکيا و همکاران، بر روی ژل پلیمر امولسیون شده در کنترل لایه های آبد به منظور ازدیاد برداشت از مخازن مطالعه کردند. ژل امولسیونی از پلی آکریل آمید و پلی اتیلن آمین به عنوان فاز آبی و دیزل به عنوان فاز روغنی استفاده شد. ژل پلیمر امولسیون شده، به صورت امولسیون آب در روغن بود که در شرایط دمای مخزن، ژل مستحکمی تشکیل می داد. آنها نشان دادند که ژل پلیمر امولسیون شده برای کنترل لایه های آبد مؤثر است و می تواند در مخازن با درجه حرارت بالا استفاده شود [۱۷ و ۱۸]. به طور کلی افزودن فاز داخلی پایه روغنی مانند گازوئیل به ژل موجب کاهش هزینه (کاهش مقدار پلیمر و کراس لینکر مصرف شده برای رسیدن به ویسکوزیته مطلوب) و افزایش ماندگاری ژل (عدم تخریب پلیمر توسط باکتری ها) می شود و از طرفی بعد از عملیات حفاری حذف ژل از داخل شکاف های سازند آسان تر است. همه این موارد از مزیت های ژل امولسیونی نسبت به ژل پلیمرهای مرسوم است. در این مقاله، کاربرد ژل هیبریدی برای کنترل و کاهش هرزروی و تأثیر پارامترهای مختلف شامل

ویسکومتر دوار ۳۵ Fann استفاده شد. در این روش، ویسکوزیته ظاهری^۴ (AV) ژل در ۳ rpm در فواصل زمانی مشخص ثبت می‌شود و رفتار ژل با زمان بررسی می‌شود. برای بررسی عملکرد ژل در شرایط مختلف، تأثیر پارامترهای دما، شوری و pH مورد بررسی قرار گرفت. محدوده‌های مورد مطالعه برای این پارامترها در **جدول ۱** نشان داده شده است. در این مقاله از گوار با درصد وزنی ۱/۷۵ و بوراکس با درصد وزنی ۰/۷۵ فاز پیوسته استفاده شده است. دانسیته ژل هیبریدی طراحی شده توسط دستگاه mud balance مقدار ۷/۹ lb/bbl اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

پلیمرها توسط کراس لینکر با گذشت زمان به‌صورت عرضی پیوند می‌خورند تا ژل با استحکام مناسبی به‌دست آید. یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی ژل هیبریدی دست‌یابی به ویسکوزیته نهایی قابل قبول با یک زمان شروع ژل شدگی و سرعت کراس لینکینگ مناسب است. **شکل ۲** ژل هیبریدی در مرحله کراس لینکینگ و تصویر میکروسکوپی آن را نشان می‌دهد.

در این مطالعه از گازوئیل و یا روغن سنتزی به‌عنوان فاز داخلی ژل هیبریدی و برای تشکیل امولسیون از امولسیفایر DME استفاده شد. علاوه‌بر نوع پلیمر و کراس لینکر، عوامل متعددی مانند pH، دما، شوری در عملکرد نهایی ژل تأثیرگذار هستند. برای بررسی دقیق رفتار ژل، پارامترهایی مانند زمان شروع و تشکیل ژل^۱ (IGT)، زمان نهایی ژل شدن^۲ (FGT)، سرعت کراس لینکینگ و تشکیل شبکه ژل^۳ (CR) به شرح زیر تعریف می‌شود:

- زمان شروع ژل شدن (IGT): زمانی است که افزایش سریع در ویسکوزیته ژل مشاهده می‌شود. قبل از IGT، تغییرات ویسکوزیته کم است
 - زمان نهایی ژل شدن (FGT)، زمانی است که ویسکوزیته ژل به مقدار نهایی خود نزدیک می‌شود و تغییر میزان ویسکوزیته به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری این زمان دشوار بوده و دقیق نیست.
 - سرعت کراس لینکینگ (CR)، به نرخ افزایش ویسکوزیته و روند منحنی بین IGT و FGT گفته می‌شود.
- برای اندازه‌گیری ویسکوزیته ژل هیبریدی از

جدول ۱ ترکیب امولسیون ژل برای تست‌های مختلف

پارامتر مورد بررسی	پلیمر و کراس لینکر (%wt)	نسبت فاز آب به گازوئیل	pH	غلظت کلسیم کلرید (ppm)	دما (°C)
pH	۲/۲۵	۵۰/۵۰	۹	۰	۳۵
			۱۱		
			۱۲		
دما	۲/۲۵	۵۰/۵۰	۱۱	۰	۳۵
					۵۰
					۷۰
شوری	۲/۲۵	۵۰/۵۰	۱۱	۰	۳۵
				۵۰۰۰	
				۱۰۰۰۰	

1. Initial Gelation Time
 2. Final Gelation Time
 3. Crosslinking Rate
 4. Apparent Viscosity



شکل ۲ الف تصویر میکروسکوپی ژل هیبریدی و ب) ژل هیبریدی در مرحله کراس لینکینگ

تأثیر pH بر رفتار و عملکرد ژل

ویسکوزیته نهایی ژل نشان‌دهنده کیفیت ژل تشکیل شده است. ایجاد یک محیط قلیایی برای آزادسازی یون‌های بورات از بوراکس برای اتصال عرضی بین پلیمرها و تشکیل ژل ضروری است [۲۱]. بنابراین کراس لینکینگ پلیمرها با بوراکس وابسته به pH است و بدون افزودن کنترل‌کننده pH به نمونه‌ها، شبکه ژل تشکیل نمی‌شود [۱۴].

شکل ۳ تأثیر pH‌های مختلف بر روی رفتار ژل هیبریدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش pH از ۹ به ۱۲ سرعت کراس لینکینگ و همچنین ویسکوزیته نهایی افزایش می‌یابد. این بدان دلیل است که با افزایش pH، یون‌های بورات بیشتری برای اتصال پلیمرها در دسترس است و شبکه نهایی ژل قوی‌تر می‌شود. تفاوت نسبتاً کمی بین ویسکوزیته نهایی در pH ۱۱ و ۱۲ به این دلیل است که حداکثر مقدار بورات مورد نیاز برای اتصال عرضی در دسترس است و یون‌های بورات بیشتر فقط سرعت کراس لینکینگ را بهبود می‌بخشد.

تأثیر دما بر رفتار و عملکرد ژل

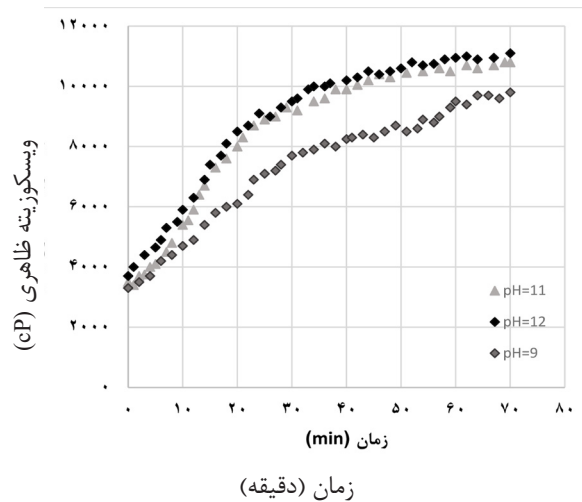
تأثیر دما بر کراس لینکینگ نسبتاً پیچیده است. با توجه به مطالعه انجام شده توسط کروجف و همکاران روی تعادل یون بورات، نتیجه گرفتند یون‌های بورات بیشتری در دمای بالاتر و در یک pH ثابت موجود است [۲۲]، که با نتایج به دست آمده توسط هریس و همکاران در تضاد است [۲۳].

شکل ۴ تأثیر دما بر رفتار ژل هیبریدی ساخته

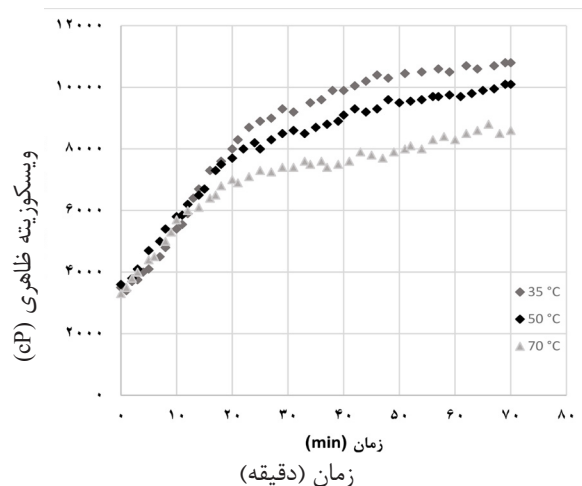
شده با پلیمر گوار را نشان می‌دهد. سرعت کراس لینکینگ تابعی از غلظت یون بورات و همچنین انرژی فعال‌سازی برای تشکیل پیوند است. بنابراین، در دماهای بالاتر، یون‌های بورات بیشتر و انرژی بیشتری برای واکنش اتصال عرضی پلیمرها در دسترس است [۱۴]. از سوی دیگر، با افزایش دما، ویسکوزیته پلیمر کاهش می‌یابد، که به دلیل تخریب پلیمر در دماهای بالا است. البته دما بر ویسکوزیته فاز داخلی (گازوئیل) تأثیر می‌گذارد اما این تغییرات ویسکوزیته فاز داخلی تأثیر کمی بر ویسکوزیته ژل هیبریدی دارد. با توجه به شکل ۴، با افزایش دما ویسکوزیته نهایی ژل به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و سرعت کراس لینکینگ تقریباً ثابت می‌ماند اما زمان رسیدن ژل به ویسکوزیته نهایی کوتاه‌تر می‌شود.

تأثیر کلسیم کلرید بر رفتار و عملکرد ژل

کاتیون‌ها می‌توانند با پلیمرهای آنیونی و طبیعی واکنش داده و با رسوب پلیمر در محلول باعث کاهش ویسکوزیته ژل شود. این کاهش ویسکوزیته با غلظت کاتیون‌ها رابطه مستقیم دارد و هر چه غلظت کاتیون‌ها بیشتر باشد، این کاهش ویسکوزیته بیشتر است [۲۴]. از طرف دیگر، یون‌های دو ظرفیتی موجود در آب تمایل دارند که در شرایط pH بالا با یون‌های هیدروکسید (OH) واکنش داده و با تشکیل رسوب، pH سیال را کاهش دهند.



شکل ۳ تأثیر pH بر روی رفتار ژل هیبریدی



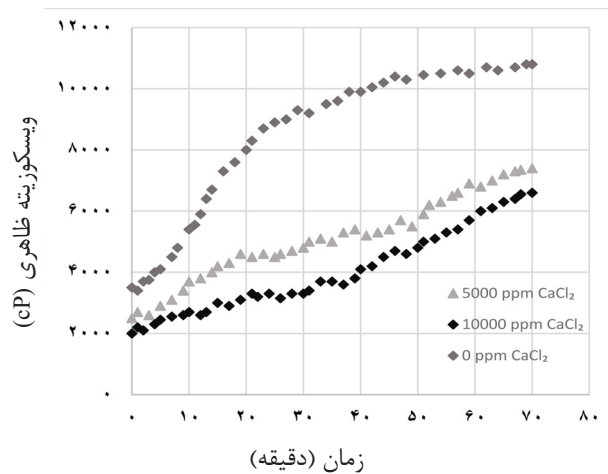
شکل ۴ تأثیر دما بر رفتار ژل هیبریدی

شروع تشکیل ژل به تأخیر می‌افتد و نرخ کراس لینکینگ به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از آنجایی که ویسکوزیته اولیه ژل تابعی از ویسکوزیته پلیمر است با حمله کاتیون‌ها به این پلیمرهای زیستی، ویسکوزیته اولیه ژل هیبریدی کاهش می‌یابد. علاوه‌بر این، کیفیت نهایی ژل به‌دلیل کاهش میزان کراس لینکینگ کاهش می‌یابد و ژل با سرعت کمتری تشکیل می‌شود، بنابراین زمان رسیدن به ویسکوزیته نهایی طولانی‌تر خواهد بود.

تأثیر نوع فاز داخلی بر ویسکوزیته ژل

از دیزل و روغن سنتزی برای بررسی تأثیر ویسکوزیته فاز داخلی بر رفتار ژل استفاده شد.

بنابراین، کاهش یون‌های هیدروکسید محلول باعث می‌شود یون‌های بورات کمتری برای کراس لینکینگ در دسترس باشد. با توجه به کاهش ویسکوزیته پلیمرها در حضور نمک‌ها و رقابت بین کراس لینکرها و کاتیون‌های دو ظرفیتی مانند یون‌های کلسیم برای کراس لینکینگ با زنجیره‌های پلیمری، ارزیابی عملکرد ژل در حضور کاتیون‌های دو ظرفیتی بسیار مهم است [۲۵ و ۲۶]. برای بررسی اثرات شوری، از غلظت‌های مختلف کلسیم کلرید در ترکیب ژل هیبریدی استفاده شد و سپس ویسکوزیته بر حسب زمان برای هر غلظت به‌منظور بررسی عملکرد ژل اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت شوری، زمان



شکل ۵ تأثیر غلظت کلسیم کلرید بر رفتار ژل هیبریدی

عوامل مورد بررسی و (cp) تعداد تکرار آزمایش برای نقطه مرکزی است. برای بررسی سه پارامتر در سه سطح، طراحی Box-Behnken حداکثر کارایی را در تحلیل و پیش‌بینی پاسخ دارد. بعلاوه، تعداد آزمایش‌های انجام شده در این مورد در مقایسه با دیگر طرح‌ها بسیار کمتر است. طرح پیشنهادی Box-Behnken برای مدل‌سازی سطح پاسخ با سه پارامتر نیاز به ۱۵ آزمایش دارد [۲۷ و ۲۸ و ۲۹]. در مطالعه حاضر، طراحی Box-Behnken با سه پارامتر، pH، دما و غلظت کلسیم کلرید به‌عنوان متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی ویسکوزیته نهایی ژل هیبریدی در شرایط مختلف، مورد مطالعه قرار گرفت. محدوده و سطوح سه متغیر مستقل در جدول ۲ ارائه شده است.

برازش رابطه چند جمله‌ای مرتبه دوم

برای پیش‌بینی رابطه بین نتایج آزمایشگاهی براساس مدل طراحی آزمایشگاهی Box-Behnken و متغیرهای ورودی از مدل روابط چند جمله‌ای مرتبه دوم استفاده شد رابطه شماره ۱ برای پیش‌بینی ویسکوزیته ژل هیبریدی در بازه تعیین شده برای پارامترهای ورودی است:

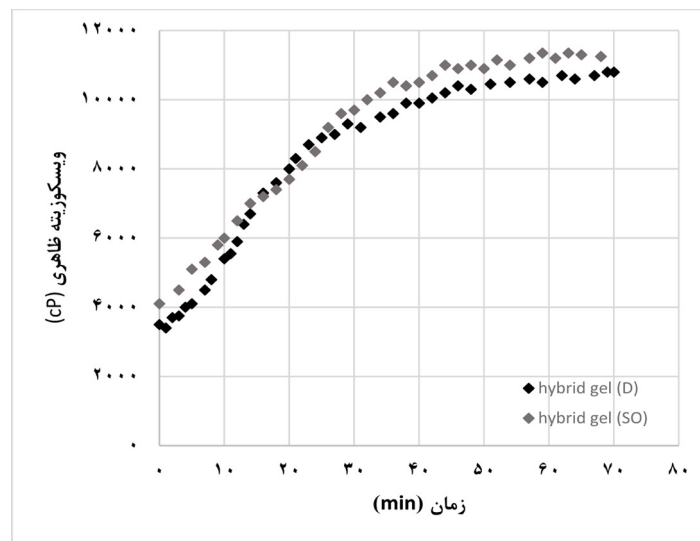
ویسکوزیته دیزل (D) و روغن سنتزی^۱ (SO) در دما و فشار محیط، به ترتیب ۴ و ۳۱ اندازه‌گیری شد. شکل ۶ تأثیر تغییر نوع فاز داخلی بر عملکرد ژل هیبریدی ساخته شده با پلیمر گوار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، ویسکوزیته ژل تابعی مستقیم از ویسکوزیته فاز داخلی نیست و تغییر نوع فاز داخلی تنها می‌تواند ویسکوزیته نهایی ژل را تغییر دهد. ترکیب سیال فاز داخلی و نیز وجود سورفکتانت طبیعی در آن می‌تواند بر پایداری ژل امولسیونی تأثیر بگذارد.

مدل ریاضی

روش سطح پاسخ^۲ (RSM) شامل تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مطالعه ارتباط بین پاسخ و متغیرهای ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائل مهندسی مفید است. مزیت اصلی استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی تأثیر پارامترهای متعدد و فعل و انفعالات آنها با یکدیگر در تولید پاسخ‌ها است. طرح آزمایش Box-Behnken به‌طور عمومی برای مدل‌های سطح پاسخ مرتبه دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طراحی Box-Behnken با توجه به تعداد پارامترهای مورد بررسی، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز (N) از رابطه $N=k^2+k+cp$ به دست می‌آید، که (k) تعداد

1. Synthetic Oil

2. Response Surface Methodology



شکل ۶ تاثیر نوع فاز داخلی بر رفتار ژل هیبریدی

جدول ۲ سطوح مورد بررسی پارامترهای ورودی

سطح بالا	سطح پایین	پارامتر
۷۰	۳۰	دما (°C)
۱۲	۹	pH
۱۰۰۰۰	۰	غلظت کلسیم کلرید (ppm)

و تأثیر شرایط ترکیبی برهم کنش پارامترها استفاده می‌شود. ضرایب با مقادیر P-value کوچکتر از ۰/۰۵ تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دارند. نتایج ANOVA برای مدل درجه دوم سطح پاسخ در جدول ۳ ارائه شده است. عواملی با P-value بالای ۰/۰۵ می‌توانند بدون تأثیر بر پیش‌بینی مدل حذف شوند. با توجه به جدول ۳، مقدار P-value برای مدل کمتر از سطح معنی دار ۰/۰۵ است، که نشان می‌دهد مدل توسعه یافته قابل قبول است. از طرفی مقدار P-value برای lack of fit مقدار ۰/۱۲۱ است که نشان می‌دهد تاحدودی عدم تناسب غیر قابل توجهی در سطح معنی دار ۰/۰۵ وجود ندارد و مدل پیش‌بینی شده مورد قبول است. دقت مدل با مقایسه ضرایب همبستگی^۱ (R^2) و مقادیر ضریب همبستگی تعدیل شده^۲ ($adj R^2$) و تجزیه و تحلیل می‌شود. این معیارها برای بررسی میزان نزدیک بودن مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده هستند.

1. R-Squared
2. Adjusted R-Squared

$$\sqrt{\text{Final viscosity}}(\text{cP}) = 33/98672 + 9/43282 \times \text{pH} + 0/57517 \times \text{Temperature}(\text{°C}) - 5/07331 \times 10^{-3} \times \text{Ca-Cl}_2 \text{ concentration}(\text{ppm}) - 0/047445 \times \text{pH} \times \text{Temperature}(\text{°C}) + 6/7480 \times 10^{-5} \times \text{pH} \times \text{CaCl}_2 \text{ concentration}(\text{ppm}) + 2/17274 \times 10^{-5} \times \text{Temperature}(\text{°C}) \times \text{CaCl}_2 \text{ concentration}(\text{ppm}) - 0/26541 \times \text{pH}^2 - 3/16218 \times 10^{-3} \times \text{Temperature}^2(\text{°C}) + 8/4647 \times 10^{-8} \times \text{CaCl}_2 \text{ concentration}^2(\text{ppm})$$

نتایج ANOVA و مدل رگرسیون

این که آیا یک مدل درجه دوم معنی دار است یا خیر را می‌توان از طریق نتایج ANOVA تعیین کرد. مطالعه ANOVA تجزیه و تحلیل مفصلی مانند اهمیت و سهم پارامترهای ورودی در پاسخ خروجی را ارائه می‌دهد. همچنین اثرات دو فاکتور بر هم، مربع یک فاکتور و میزان خطا را بر پاسخ‌های خروجی ارائه می‌دهد. برای بررسی معنادار بودن مدل، مقدار P-value و lack of fit برای مدل بررسی می‌شود. مقدار P-value برای تعیین اهمیت ضرایب

جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس برای مدل درجه دو

P-value	F-value	Mean Square	Sum of Squares	Source
۰/۰۰۰۱	۱۵۹/۸۲	۱۵۰/۱۲	۱۳۵۱/۰۵	مدل
۰/۰۰۰۸	۶۳/۶۳	۵۹/۹۱	۵۹/۹۱	pH :A
۰/۰۰۱۴	۵۸۴/۱	۵۴/۴۰	۵۴/۵۶	دما :B
۰/۰۰۰۱	۱۲۵۹/۰۳	۱۷۱۲/۴۶	۱۱۸۲/۴۶	C: غلظت کلسیم کلرید
۰/۰۳۲۴	۸/۶۷	۸/۱۰۲	۸/۱۰۲	AB
۰/۳۴۴۱	۱/۰۶۷	۱/۰۲۱	۱/۰۲۱	AC
۰/۰۰۵۶	۱/۲۶۰	۱۸/۸۶	۱۸/۸۶	BC
۰/۲۸۹۶	۱/۴۵	۱/۳۲	۱/۳۲	A ²
۰/۰۵۴۰	۶/۲۹	۵/۱۹	۵/۹۱	B ²
۰/۰۰۸۵	۱۷/۶۹	۱۵/۴۴	۱۶/۵۳	C ²
-	-	۰/۹۷	۴/۸۷	Residual
۰/۱۲۱	۳/۹۰	۱/۳۴	۴/۱۶	Lack of Fit
-	-	۰/۳۲	۰/۶۱	Pure Error

۷ تا ۹ نشان داده شده است، نمودارهای سطح پاسخ با ترسیم دو فاکتور در محدوده مربوط به خود رسم شده‌اند، درحالی‌که فاکتور سوم در مقدار متوسط ثابت نگه داشته می‌شود (۱۰/۵ برای pH، ۵۰ C°، برای دما یا ۵۰۰۰ ppm برای غلظت کلسیم کلرید).

تأثیر Shear history بر رفتار ژل

به‌منظور شبیه‌سازی رفتار ژل حین پمپاژ و پایین رفتن داخل لوله حفاری در عملیات کنترل هرزروی، نمونه به‌مدت ۱۰ min در دور ۲۰۰ RPM تحت shear قرار گرفت. سپس ویسکوزیته با زمان در نرخ برشی ۳ RPM اندازه‌گیری شد تا وضعیت ژل در داخل سازند شبیه‌سازی شود. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که shear history ایجاد شده برای شبیه‌سازی حرکت ژل در حین پمپاژ، سرعت کراس لینکینگ و ویسکوزیته نهایی را افزایش می‌دهد و زمان رسیدن به ویسکوزیته نهایی را کاهش می‌دهد.

پایداری ژل با زمان

برای کنترل موفقیت‌آمیز هرزروی گل، پایداری و استحکام ژل در داخل شکاف برای یک دوره زمانی خاص مهم است.

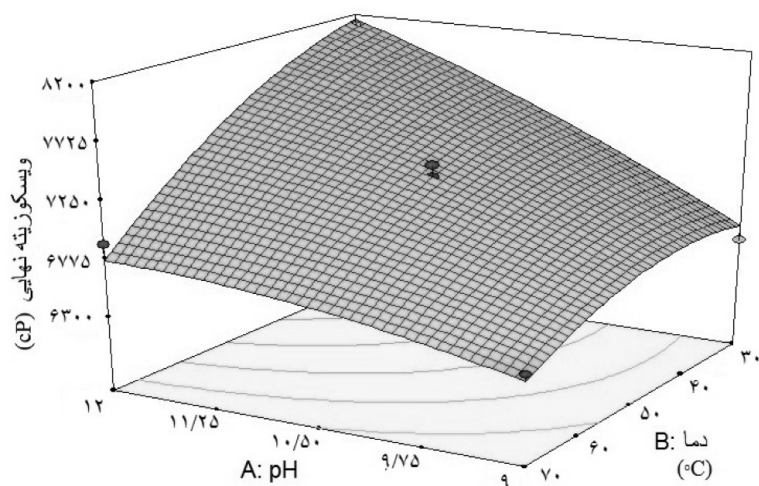
مقدار یک برای R² نشان دهنده ارتباط قوی بین متغیرهای مستقل و وابسته است. وقتی این دو مقادیر نزدیک به یکدیگر و نیز به مقدار یک نزدیک باشند، مدل از نظر آماری معنی‌دار است. در جدول ۴ ضرایب همبستگی برای رابطه درجه دو آورده شده است. در مدل ارائه شده مقدار R² و adj R² نزدیک به ۱ است که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل برای پیش‌بینی ویسکوزیته ژل هیبریدی است.

جدول ۴ ضرایب همبستگی مدل درجه دو

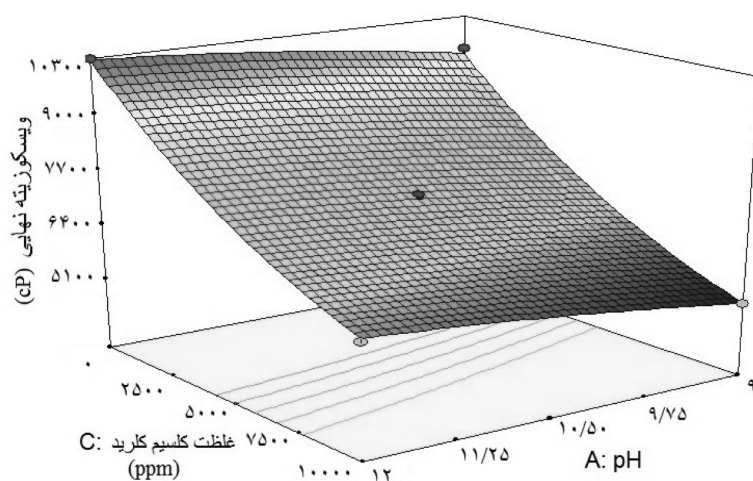
Predicted R-Squared	Adjusted R-Squared	R-Squared	مدل
۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹۱	Quadratic

سطوح پاسخ سه‌بعدی

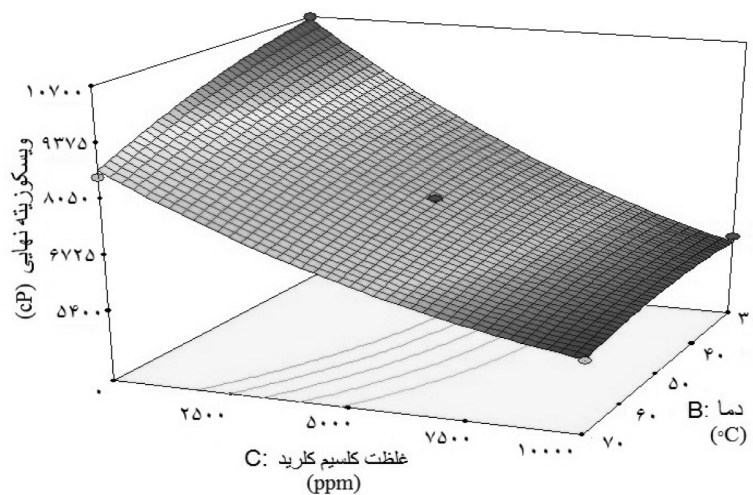
نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی به‌صورت تابعی از دو پارامتر متفاوت و ثابت نگه داشتن پارامتر سوم در سطحی مشخص، در درک تأثیر پارامترهای اصلی و برهم‌کنش بین دو پارامتر مفید هستند. بنابراین، به‌منظور درک بهتر نتایج، نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی برای مدل پیش‌بینی شده در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های



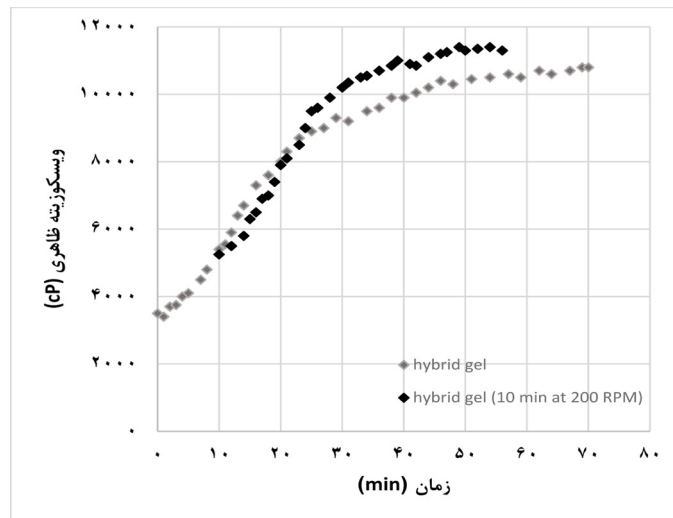
شکل ۷ منحنی سه بعدی تأثیر هم‌زمان دما و pH روی ویسکوزیته نهایی ژل هیبریدی در غلظت کلسیم کلرید ۵۰۰۰ ppm



شکل ۸ منحنی سه بعدی تأثیر هم‌زمان غلظت کلسیم کلرید و pH روی ویسکوزیته نهایی ژل هیبریدی در دمای ۵۰ °C



شکل ۹ منحنی سه بعدی تأثیر هم‌زمان غلظت کلسیم کلرید و دما روی ویسکوزیته نهایی ژل هیبریدی در pH برابر با ۱۰/۵



شکل ۱۰ تأثیر shear history بر روی رفتار ژل هیبریدی

به داخل شکاف تزریق می‌شود و استحکام ژل با اندازه‌گیری فشار در ورودی شکاف تجزیه و تحلیل می‌شود تا حداکثر فشاری را که ژل می‌تواند در برابر هرزروی تحمل کند، به دست آید. شکل ۱۳ پروفایل فشار و ماکزیمم فشار سیل‌بندی شکاف را برای ژل هیبریدی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳، وجود کلسیم کلرید در آب مورد نیاز برای ساخت ژل هیبریدی باعث کاهش استحکام ژل می‌شود و بنابراین حداکثر فشار قابل تحمل ژل درون شکاف به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

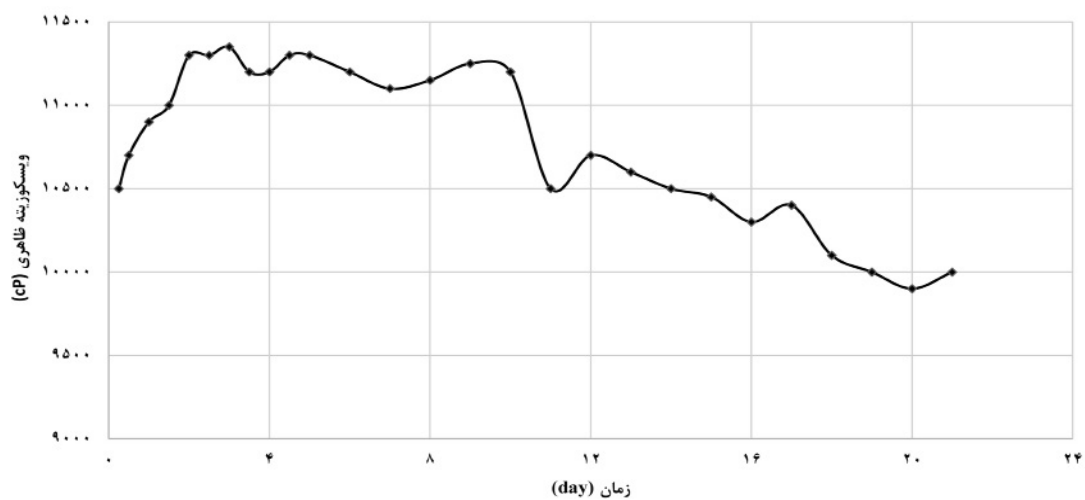
آسیب سازند

وجود ژل در داخل سازند یا شکاف در حین جریان دادن چاه می‌تواند باعث آسیب سازند شود. مواد مختلفی برای از بین بردن شبکه ژل با تقسیم مولکول‌های پلیمری به قطعات کوچکتر و یا جدایش اتصال عرضی بین ساختار ژل، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۰]. هیدروکلریک اسید (HCl) پرکاربردترین اسید برای گسیختگی شبکه ژل و حذف آن از داخل سازند و شکاف‌ها است [۳۱]. از هیدروکلریک اسید در دو غلظت ۱۵ و ۲۸٪ حجمی برای ارزیابی میزان گسیختگی ژل با زمان استفاده شد.

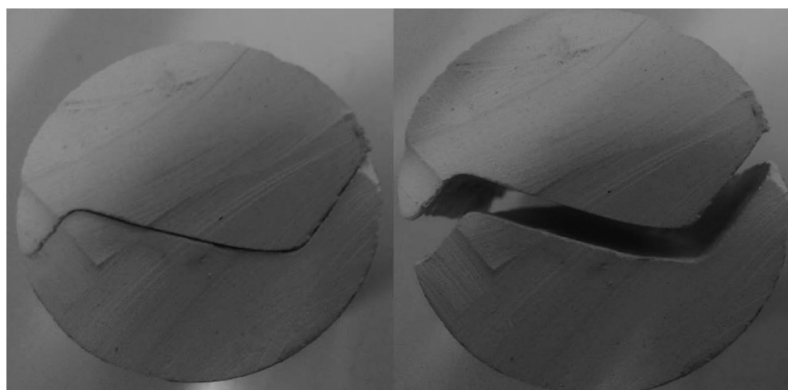
برای ارزیابی دوام و پایداری ژل در سازند، ویسکوزیته ژل به مدت ۲۱ روز در شرایط محیط اندازه‌گیری شد. شکل ۱۱ تغییرات ویسکوزیته ژل هیبریدی در طول ۲۱ روز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲، تغییرات ویسکوزیته با گذشت زمان کم است و ژل از پایداری و استحکام کافی در این دوره برخوردار است.

پایداری دینامیک ژل در سازندهای شکاف‌دار

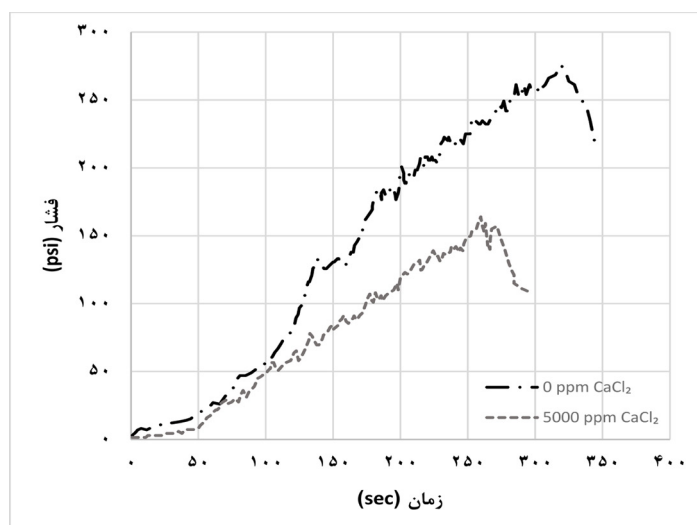
هدف از آزمایش پایداری دینامیک ژل، ارزیابی میزان اختلاف فشاری است که ژل‌ها در شکاف می‌توانند تحمل کنند تا از هرزروی بیشتر سیال جلوگیری شود. به عبارت دیگر، مقاومت ژل در برابر فشار سیال حفاری است. به دلیل اینکه به دست آوردن مغزه‌های طبیعی حاصل از حفاری چاه‌ها هزینه بالایی دارد، برای شبیه‌سازی سازندهای شکاف‌دار و بررسی عملکرد ژل درون شکاف، مغزه شکاف‌دار طراحی و ساخته شد. هدف از ساخت مغزه‌های کربناته در آزمایشگاه، امکان آزمایش در شرایط نزدیک به ایده آل و شبیه‌سازی ماتریس سنگ کربناته طبیعی است. شکل ۱۲ مغزه شکاف‌دار کربناته ساخته شده با عرض شکاف یک میلی‌متری در وسط را نشان می‌دهد. ژل پس از رسیدن به ویسکوزیته نهایی



شکل ۱۱ پایداری ژل با زمان



شکل ۱۲ مغزه شکافدار کربناته ساخته شده با عرض شکاف ۱ mm



شکل ۱۳ استحکام ژل در برابر فشار داخل شکاف

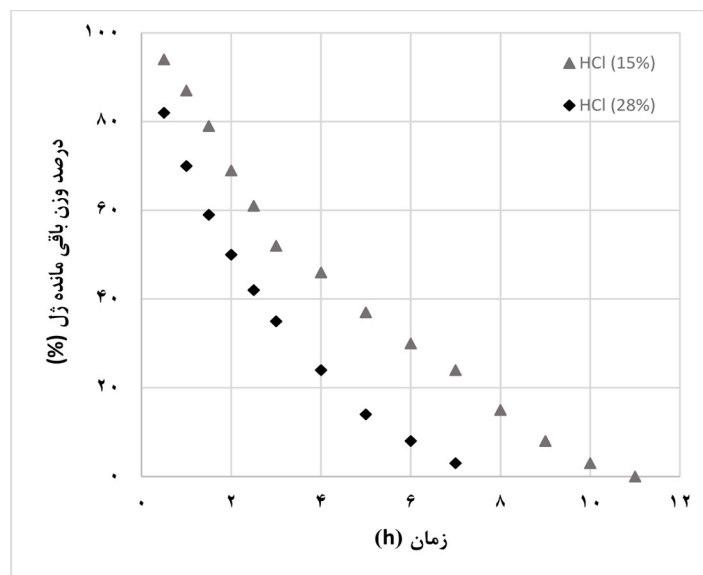
مراحل اندازه‌گیری درجه تخریب ژل‌ها به شرح زیر است:

ابتدا ۱۰ گرم ژل در ۳۰ سی سی محلول اسید در غظت مورد نظر در بطری‌های شیشه‌ای نگه‌داری می‌شود و سپس وزن ژل باقی‌مانده براساس برنامه زمان بندی شده اندازه‌گیری می‌شود و میزان گسیختگی ژل با محاسبه درصد وزن باقی‌مانده^۱ (WRP) از فرمول شماره ۲ تعیین می‌شود [۳۲].

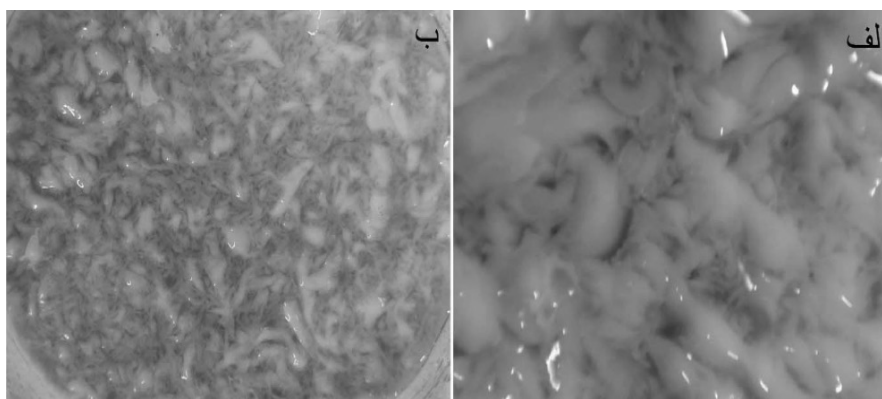
$$WRP = (W_a) / (W_i) \times 100\% \quad (2)$$

Wa وزن اندازه‌گیری شده ژل پس از زمان مشخص و Wi وزن اولیه ژل هیبریدی است. شکل ۱۴ میزان

ژل هیبریدی در هیدروکلریک اسید ۱۵ و ۲۸٪ حجمی را با زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، با افزایش غظت اسید از ۱۵ به ۲۸، نرخ گسیختگی ژل افزایش و زمان تجزیه کامل ژل کوتاه‌تر می‌شود. زمان گسیختگی کامل ژل‌ها در اسید ۲۸ و ۱۵٪ حجمی به ترتیب در حدود ۷ و ۱۱ ساعت اندازه‌گیری شد. انحلال و گسیختگی کامل ژل هیبریدی در اسید نشان‌دهنده عدم آسیب سازند ناشی از حضور ژل است. شکل ۱۵ تصویر ژل گسیخته شده در هیدروکلریک اسید ۱۵ و ۲۸٪ حجمی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ مقدار گسیختگی ژل با زمان در هیدروکلریک اسید



شکل ۱۵ الف) ژل گسیخته شده در هیدروکلریک اسید ۱۵٪ حجمی؛ ب) ژل گسیخته شده در هیدروکلریک اسید ۲۸٪ حجمی

نتیجه گیری

ژلهایی با غلظت بالای پلیمر استفاده شود.

- با افزایش غلظت کلسیم کلرید، عملکرد ژل امولسیون و استحکام ژل در کنترل هرزروی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و نیز زمان رسیدن ژل به استحکام نهایی به تعویق می افتد.
- نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ژل هیبریدی را می توان به راحتی با هیدروکلریک اسید از سازند حذف کرد که نشان دهنده خواص غیر مخرب ژل امولسیونی است.
- ویسکوزیته فاز داخلی تأثیر کمی بر ویسکوزیته نهایی ژل دارد و از مواد پایه روغنی مختلفی می توان به عنوان فاز داخلی ژل امولسیونی استفاده کرد.

برای پیش بینی ویسکوزیته نهایی ژل روش سطح پاسخ Box- Behnken مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدل می تواند داده های آزمایشگاهی را با دقت مناسبی پوشش دهد و مقادیر بالای ضریب همبستگی (R^2) و ضریب همبستگی تعدیل شده ($adj R^2$) نشان دهنده ارتباط قوی بین مقادیر پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی است.

افزودن فاز داخلی پایه روغنی مانند گازوئیل به ژل موجب کاهش هزینه تمام شده و افزایش ماندگاری ژل به دلیل عدم تخریب پلیمرها توسط باکتری ها می شود که از مزیت های ژل هیبریدی نسبت به ژل پلیمرها است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی ژل هیبریدی به منظور کنترل هرزروی گل حفاری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- یکی از پارامترهای موثر بر عملکرد ژل، pH است. با افزایش pH، ویسکوزیته و نرخ کراس لینکینگ افزایش می یابد و زمان رسیدن ژل به ویسکوزیته نهایی کاهش می یابد.
- با افزایش دما، نرخ کراس لینکینگ تقریباً ثابت می ماند اما ویسکوزیته ژل و زمان رسیدن ژل به ویسکوزیته نهایی کاهش می یابد.
- حضور کلسیم کلرید ویسکوزیته اولیه ژل، سرعت کراس لینکینگ و ویسکوزیته نهایی ژل را کاهش می دهد. بنابراین کلسیم کلرید می تواند به عنوان یک عامل تأخیردهنده در کراس لینکینگ برای

مراجع

- [1]. Luzardo J, Oliveira E P, Derks P W J, Nascimento R V, Gramatges A P, Valle R, Inderberg K (2015) Alternative lost circulation material for depleted reservoirs, In OTC Brasil, OnePetro, doi.org/10.4043/26188-MS.
- [2]. Zhong H, Shen G, Yang P, Qiu Z, Jin J, Xing X (2018) Mitigation of lost circulation in oil-based drilling fluids using oil absorbent polymers, Materials, 11, 10: 2020.
- [3]. Al Menhali S, Abdul Halim A O, Al Menhali S (2014) Curing losses while drilling and cementing, Society of Petroleum Engineers.
- [4]. Nasiri A, Ameri Shahrabi M, Keshavarz Moraveji M (2018) Experimental investigation of the performance of different lost circulation materials and introducing a new type of eco-friendly lost circulation additive, Petroleum Research, 28, 97-3: 47-58, 10.22078/PR.2018.2874.2334.
- [5]. Alsaba M, Nygaard R, Hareland G (2014) Review of lost circulation materials and treatments with an updated classification, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, 15-16
- [6]. Ashoori S, Bahari Moghadam M, Nazemi R, Nooripoor V, Ahmadabadi M (2022) Dynamically evaluating the performance of naturally occurring additives to control lost circulation: on the effect of lost circulation material type, Particle-Size Distribution, and Fracture Width. SPE Journal, 1-23.
- [7]. Hashmat M D, Sultan Abdullah S, Saifur R, Hussain S M (2016) Crosslinked polymeric gels as loss circulation materials: an experimental study, Paper presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition.
- [8]. Jia H, Chen H, Guo S (2017) Fluid loss control mechanism of using polymer gel pill based on multi-cross-linking during overbalanced well workover and completion, Fuel, 210: 207-216.
- [9]. Hamza A, Shamlooh M, Hussein I A, Nasser M, Salehi S (2019) Polymeric formulations used for loss circulation materials and wellbore strengthening applications in oil and gas wells: A review, Journal of Petroleum Science and Engineering, 180: 197-214.
- [10]. Ay A, Gucuyener I H, Kök M V (2014) An experimental study of silicate-polymer gel systems to seal

- shallow water flow and lost circulation zones in top hole drilling, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122: 690-699
- [11]. Wang H, Sweatman R, Engelman B, Deeg W, Whitfill D, Soliman M (2008) Best practice in understanding and managing lost circulation challenges, *SPE Drill Completion*, 23, 2: 168e75.
- [12]. Jiang G, Deng Z, He Y, Li Z, Ni X (2019) Cross-linked polyacrylamide gel as loss circulation materials for combating lost circulation in high temperature well drilling operation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181: 106250.
- [13]. Malmir P, Hashemi A, Soltani Soulgani B (2019) Experimental study of polymer injection on enhanced oil recovery from heavy oil reservoirs and determination of optimum injection concentration, *Journal of Petroleum Research*, 29, 98-3: 120-130, doi: 10.22078/pr.2019.3503.2602.
- [14]. Mokhtari M, Ozbayoglu M E (2010) Laboratory Investigation on gelation behavior of xanthan cross-linked with borate intended to combat lost circulation, In *SPE Production and Operations Conference and Exhibition, OnePetro*, <https://doi.org/10.2118/136094-MS>.
- [15]. Kakadjian S, Rauseo O, Marquez R, Gabay R, Tirado Y, Blanco J (2001) Crosslinked emulsion to be used as fracturing fluids, In *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, OnePetro*, <https://doi.org/10.2118/65038-MS>.
- [16]. Roodhart L P, Davies D R (1987) Polymer emulsion: the revival of a fracturing fluid, In *SPE/DOE Joint Symposium on Low Permeability Reservoirs, OnePetro*, <https://doi.org/10.2118/16413-MS>.
- [17]. Saikia T, Sultan A, Barri A, Shamsan A (2020) Emulsified polymer gel pickering emulsion for conformance control: emulsion formulation, stability and coreflooding investigation, In *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, OnePetro*, <https://doi.org/10.2118/199237-MS>.
- [18]. Saikia T, Sultan A, Barri A A, Khamidy N I, Shamsan A A, Almohsin A, Bataweel M (2020) Development of pickering emulsified polymeric gel system for conformance control in high temperature reservoirs, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184: 106596, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106596>.
- [19]. Gao S, Guo J, Nishinari K (2008) Thermoreversible konjac glucomannan gel cross-linked by borax, *Carbohydrate Polymers*, 72, 2: 315-325, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.015>.
- [20]. Fan H, Gong Z, Wei Z, Chen H, Fan H, Geng J Dai C (2017) Understanding the temperature-resistance performance of a borate cross-linked hydroxypropyl guar gum fracturing fluid based on a facile evaluation method, *RSC advances*, 7, 84: 53290-53300, <https://doi.org/10.1039/C7RA11687J>.
- [21]. Harris P C, Batenburg D V (2000) A comparison of freshwater and seawater-based borate crosslinked fracturing, Paper SPE 50777 presented at International Symposium of Oilfield Chemistry held in Houston, Texas, USA, 16-19, <https://doi.org/10.2118/50777-MS>.
- [22]. Kruijff A S, Roodhart L P, Davies D R (1993). Relation between chemistry and flow mechanics of borate-crosslinked fracturing fluids, *SPE Journal of Production and Facilities*, <https://doi.org/10.2118/25206-PA>.
- [23]. Harris P C (1993) Chemistry and rheology of borate-crosslinked fluids at temperatures to 300°F", *Journal of Petroleum Technology*, 45, 03: 264-269, <https://doi.org/10.2118/24339-PA>.
- [24]. Sedaghatzadeh M, Shahbazi K, Pourafshary P, Razavi S A (2019) The effect of cations on gelation of cross-linked polymers, *Petroleum Exploration and Development*, 46, 4: 826-832, [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60241-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60241-7).
- [25]. Esmailirad N, White S, Terry C, Prior A, Carlson K (2016) Influence of inorganic ions in recycled produced water on gel-based hydraulic fracturing fluid viscosity, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139: 104-111, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.12.021>.
- [26]. Li L, Al-Muntasheri G A, Liang F (2016) A review of crosslinked fracturing fluids prepared with produced water, *Petroleum*, 2, 4: 313-323, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.10.001>.
- [27]. Ferreira S C, Bruns R E, Ferreira H S, Matos G D, David J M, Brandão G C, Dos Santos W N L (2007) Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica chimica acta*, 597, 2: 179-186, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>.
- [28]. Khuri A I, Mukhopadhyay S (2010) Response surface methodology, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2, 2: 128-149, doi: <https://doi.org/10.1002/wics.73>.
- [29]. Montgomery D C (2017) Design and analysis of experiments, John Wiley and sons.
- [30]. Al-Muntasheri G A, Li L, Liang F, Gomaa, A.M. **Concepts in cleanup of fracturing fluids used unconventional reservoirs: A literature review**, *SPE Production and Operations*, 33, 02: 196-213, <https://doi.org/10.2118/186112-PA>.
- [31]. Almubarak T, Ng J H C, AlKhalidi M, Panda S, Nasr-El-Din H A (2020) Insights on potential formation damage mechanisms associated with the use of gel breakers in hydraulic fracturing, *Polymers*, 12, 11: 2722, <https://doi.org/10.3390/polym12112722>.
- [32]. Zhou E (2019) Breaker evaluation and formation damage remediation of re-crosslinkable preformed particle gel (RPPG). M.S. in *Petroleum Engineering, Geosciences and Geological and Petroleum Engineering*. Missouri University of Science and Technology.