

Research article

DOI: 10.22034/IJME.2025.2045718.2027

OPEN ACCESS

## The effect of environmental factors on drilling mud cake properties

Babak Fallah<sup>1</sup>, Hasan Mahdi Mossawi<sup>1</sup>, Mohsen Dehvedar<sup>2\*</sup>, Ali Reza Kazemi<sup>3</sup>, Jalal Fahimpour<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Petroleum and Geoenergy Department, Amirkabir University (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Petroleum and Geoenergy Department, Amirkabir University (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Petroleum and chemical engineering, College of Engineering, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman.

<sup>4</sup> Research Fellow, School of Energy, Geoscience, Infrastructure and Society, Institute for GeoEnergy Engineering, Heriot-Watt, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.

Article info	Abstract
<p>Received: 13 November 2024 Revised: 21 August 2025 Accepted: 25 August 2025</p> <p><b>Keywords</b></p> <p>Mud cake Flow loop Dynamic condition Static condition SEM</p> <p><b>*Corresponding author</b> Mohsen Dehvedar <a href="mailto:Dehvedar@aut.ac.ir">Dehvedar@aut.ac.ir</a></p>	<p>In well drilling, one of the objectives of using drilling fluid is to form a thin, impermeable mud cake. In this study, laboratory flow loop experiments were conducted to compare dynamic and static conditions. Pressure was not a factor in these tests, which focused on measuring thickness, initial filtrate volume, and surface characteristics of the mud cake under different conditions. Variables such as fluid formulation, well angle, fluid temperature, and drill string rotation speed were investigated. The results indicate that drill string rotation and fluid temperature positively affect the increase in mud cake thickness. SEM (scanning electron microscope) images show that the polymer texture formed under dynamic conditions is significantly different from static conditions, although no notable differences were observed in bentonite-based fluids. An increase in temperature leads to greater mud cake thickness and lower fluid viscosity. Drill string rotation under dynamic conditions reduces pore spaces on the mud cake surface. It increases its thickness, making the dynamic mud cake more structured and uniform compared to static mud cakes. Using polymer-based filtration control agents instead of bentonite reduces mud cake thickness, whereas adding them to bentonite mud increases thickness under both static and dynamic conditions.</p>

How to cite this article Fallah, B., Mossawi, H.M., Dehvedar, M., Kazemi, A., Fahimpour, J., 2025, The effect of environmental factors on drilling mud cake properties. Journal of Mining Engineering, 20(2): 1-25. (in Persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22034/IJME.2025.2045718.2027>



©2025 The author(s). Published by [Iranian Society of Mining Engineering](#).

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

## EXTENDED ABSTRACT

### 1. Introduction

The filtrate volume under dynamic conditions is greater than that under static conditions.[1] So far, no specific relationship has been established between static and dynamic filtration; however, experience has shown that if the results of static tests are good, those of dynamic tests under operational conditions in the well will also be favorable. The thickness of the mud cake formed under dynamic conditions is less than that under static conditions. The fluid flow and rotation of the drill string can limit the growth of the mud cake. [2] When the rock surface in the wellbore first contacts the mud, the filtration rate is very high, leading to a rapid increase in the thickness of the mud cake. The equilibrium point of this growth occurs when the mud cake's erosion rate due to fluid flow equals its growth rate. The mud cake's growth rate under static conditions is related to the parameters affecting Darcy's law. However, under dynamic conditions, in addition to the parameters affecting static filtration, the mud cake's erosion rate due to hydrodynamic forces must also be considered. Figure 1 illustrates the stages of dynamic filtration from the initial moment until the thickness of the mud cake stabilizes.

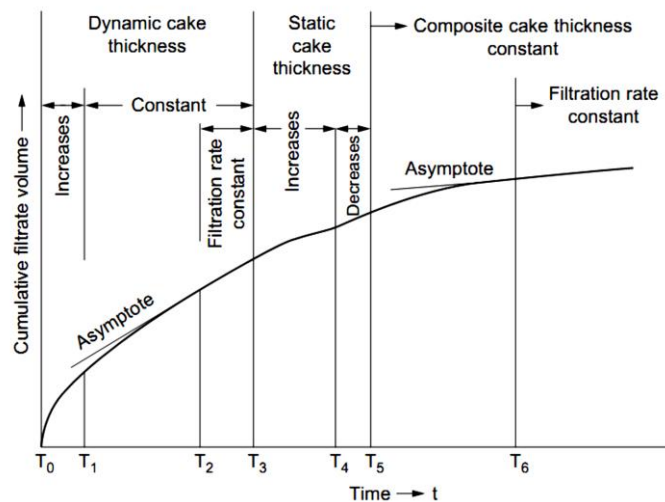


Figure 1: Changes in the thickness of the mud cake and the cumulative volume of the filtrate entering the formation over time [1]

### 2. Methodology

The effects of temperature changes were studied in the experiment series at 25 °C, 50 °C, and 75 °C temperatures. The impact of varying the drill string's rotation speed was also tested at zero and 110 revolutions per minute. The flow loop's angle was altered at 0, 45, and 90 degrees. Furthermore, different fluid formulations were examined, and the cake structure formed under dynamic conditions in the flow loop was ultimately compared with that obtained under static conditions using a standard filter press. PID controllers have been utilized to maintain a constant temperature in this device.

In the dynamic tests, the fluid weight was measured at minute 7, the viscosity at minute 20, and the cake thickness at minute 30. The filter volume and cake thickness were measured in static conditions using a standard filter press.

### 3. Findings and argument

With increasing temperature, the cake thickness increased in both RPM and non-RPM samples. Additionally, viscosity decreases with increasing temperature, showing a downward trend, with a steeper decline from 25 to 50 degrees than from 50 to 75 degrees. The Marsh Funnel and Mud cake thickness are shown in Figure 2.

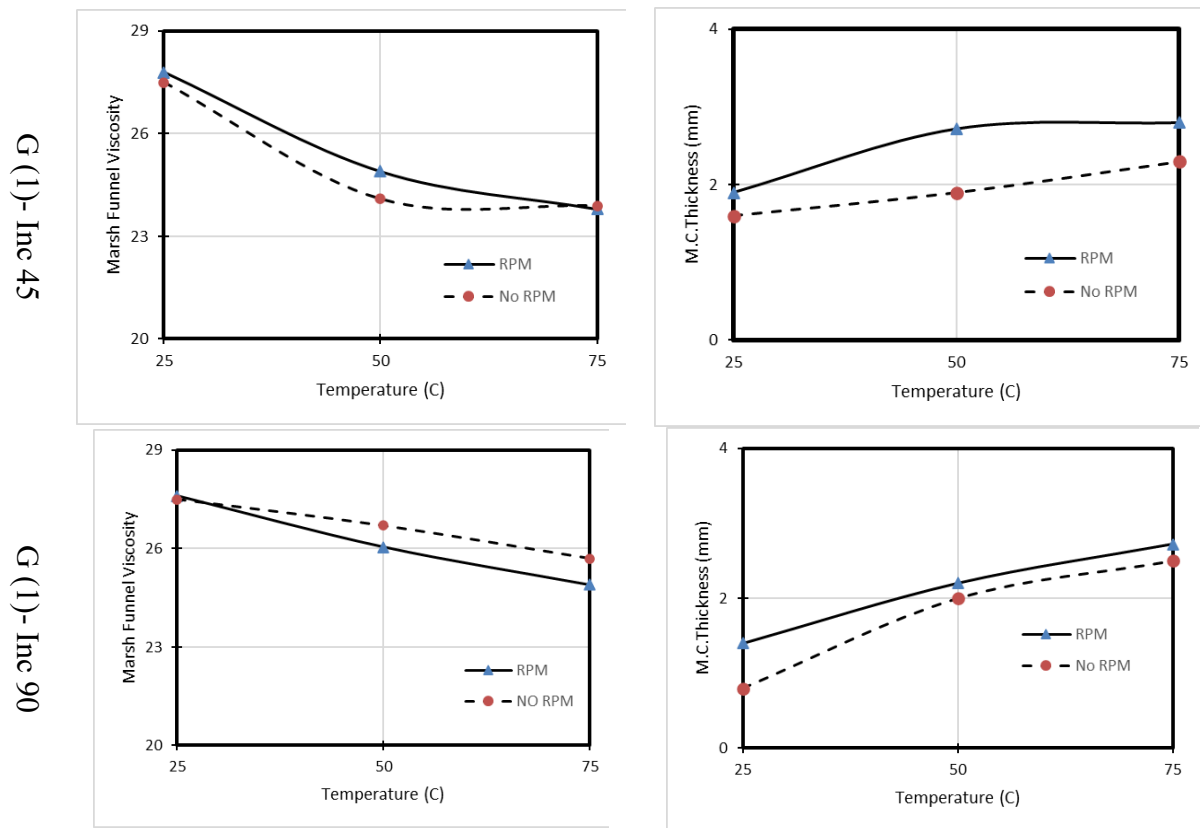


Figure 2: Marsh Funnel and Mud Thickness for Group 1

The distribution of pore sizes at three experimental temperatures, with a flow angle of 45 degrees and no drilling rotation. As the temperature increases, the distribution of pore sizes will change. Although there is the highest frequency in the range of 10 to 20 micrometers when moving from 25 to 50 degrees, a slight increase in the maximum particle size is observed at 50 degrees, and the frequency of particle sizes will take on a more uniform distribution. When moving from 50 to 75 degrees, the frequency of pores in the 20 to 30 micrometer range will reach its maximum, and the uniformity of the distribution between 40 and 70 micrometers will remain consistent.

With increasing temperature, the cake thickness increased in both samples with and without drilling string rotation, with significantly greater thickness observed in samples with high string rotation. Compared with cases without rotation, the cake thickness increased at all corresponding temperatures when the drilling string rotated at 110 RPM. The increase in temperature leads to greater cake thickness in both rotating and non-rotating drilling string conditions.

Among the different cases of these tests, the maximum cake thickness occurs when the angle is zero degrees, and the drilling string is rotating at 110 RPM. The minimum cake thickness is observed at a 90-degree angle with no drilling string rotation, as the filter paper is positioned at the top of the pipe. At both zero and 90-degree angles, it is observed that, with increasing temperature, the cake thickness in samples with and without drilling string rotation increases, with significantly greater thickness in samples with high string rotation. At the 90-degree angle in the first group, it is seen that with increasing temperature, the cake thickness in samples with and without drilling string rotation has increased, with significantly greater cake thickness in samples with high string rotation.

#### 4. Conclusions

This study aimed to construct a laboratory device for cake formation under dynamic conditions. In both static and dynamic studies of drilling fluid filtration and cake formation, efforts were made to investigate the effects of parameters such as temperature, drilling string rotation, and angle across four different groups of drilling fluids. The filter paper was placed at the upper part of the wellbore for all tests. Through the examination and analysis of SEM images, cake thickness, the volume of filtrate output in the initial moments, and throughout the conducted tests, the following results were obtained:

- Using polymeric materials to control filtration properties instead of bentonite will reduce the thickness of the mud cake. In contrast, adding polymers to bentonite mud increased the thickness of the mud cake in both static and dynamic conditions.
- The filtrate volume in the bentonite mud tested in this experiment was greater than in other formulations, meaning the damage inflicted on the formation was greater than in others. However, the third formulation initially had the highest volume of entering the formation.
- Based on experimental results, the dynamic condition indicates less formation damage than the static conditions. The filter cake thickness is less in dynamic situations.
- There was no correlation between API static and dynamic filtration under borehole conditions.

#### 5. References

- [1] Caenn, R., Darley, H. C., & Gray, G. R. (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Gulf Professional Publishing.
- [2] Yousefirad, S., Azad, E., Dehvedar, M., & Moarefvand, P. (2019). The effect of lost circulation materials on differential sticking probability: Experimental study of prehydrated bentonite muds and Lignosulfonate muds. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 736-750.



OPEN ACCESS

DOI: 10.22034/IJME.2025.2045718.2027

مقاله پژوهشی

## تأثیر عوامل محیطی بر خواص کیک گل حفاری

بابک فلاح<sup>۱</sup>، حسن مهدی موسوی<sup>۱</sup>، محسن دهودار<sup>۲\*</sup>، علیرضا کاظمی<sup>۳</sup>، جلال فهیم پور<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه سلطان قابوس، عمان  
<sup>۴</sup> پژوهشگر، دانشکده انرژی و علوم زمین، دانشگاه هریوت وات، ایرلند شمالی

چکیده	اطلاعات مقاله
در حفاری چاه‌ها، یکی از اهداف استفاده از سیال حفاری، تشکیل کیک گل ناتراوا و نازک است. بر اساس استانداردهای موجود، خواص کیک گل تحت شرایط استاتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد، اما تأثیر شرایط دینامیکی بر این خواص هنوز به طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق، به منظور مقایسه شرایط دینامیکی و استاتیکی، آزمایش‌هایی با استفاده از حلقه جریان آزمایشگاهی انجام شد که فشار در آنها موثر نبوده و به بررسی ضخامت، حجم فیلترات خروجی در لحظات اولیه و ویژگی‌های سطحی کیک گل تحت شرایط مختلف پرداخت. متغیرهایی همچون فرمولاسیون سیال، زاویه چاه، دمای سیال و سرعت چرخش رشته حفاری در این مطالعه بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهند که چرخش رشته حفاری و دمای سیال تأثیر مثبتی بر افزایش ضخامت کیک گل دارند. تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی نشان می‌دهند که بافت پلیمری تشکیل شده در شرایط دینامیکی بسیار متفاوت از حالت استاتیکی است، هرچند تفاوت‌های قابل توجهی در سیالات بنتونایتی مشاهده نمی‌شود. افزایش دما منجر به افزایش ضخامت کیک گل و کاهش گرانیوی سیال‌ها می‌شود. چرخش رشته حفاری در حالت دینامیکی باعث کاهش خلل و فرج سطح کیک گل و افزایش ضخامت آن می‌گردد، به طوری که سطح کیک گل‌های دینامیکی بسیار منظم‌تر و ساختاریافته‌تر از کیک گل‌های استاتیکی است. استفاده از مواد پلیمری کنترل‌کننده خواص فیلتراسیون به جای بنتونایت، باعث کاهش ضخامت کیک گل می‌شود، در حالی که افزودن این مواد به گل بنتونایتی موجب افزایش ضخامت کیک گل در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی خواهد شد. همچنین، سیال بنتونایتی مخلوط با کربوکسی متیل سلولز کمترین حجم فیلترات خروجی و کمترین آسیب به سازند را نشان داد. تأثیر منفی نمک‌ها بر عملکرد پلیمرهای کنترل‌کننده خواص فیلتراسیون و تخریب آن‌ها در ته‌نشینی مواد وزن‌افزا و پل‌زنده به وضوح مشاهده شد.	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴</p> <p><b>واژه‌های کلیدی</b></p> <p>کیک گل میکروسکوپ الکترونیکی حلقه جریان شرایط دینامیکی شرایط استاتیکی پارامترهای حفاری</p> <p><b>*نویسنده مسئول</b></p> <p>محسن دهودار  <a href="mailto:dehvedar@aut.ac.ir">dehvedar@aut.ac.ir</a></p>

استناد به این مقاله:

فلاح، بابک؛ موسوی، حسن مهدی؛ دهودار، محسن؛ کاظمی، علیرضا؛ فهیم پور، جلال؛ ۱۴۰۴. تأثیر عوامل محیطی بر خواص کیک گل حفاری. نشریه مهندسی معدن. ۲۰(۲): ۱-۲۵. <https://doi.org/10.22034/IJME.2025.2045718.2027>

## ۱- مقدمه

کنترل فیلتراسیون یکی از جنبه‌های اساسی مدیریت سیالات حفاری است که تأثیر مستقیم بر کارایی حفاری و پایداری سازند دارد. هدف اصلی آن تنظیم میزان مایعات از دست رفته به سازند اطراف است تا از نفوذ بیش از حد فیلترات جلوگیری شود، این مسئله می‌تواند باعث تضعیف سازند و ایجاد مشکلاتی مانند ناپایداری دیواره چاه شود. کنترل مناسب فیلتراسیون موجب تشکیل یک کیک گل نازک و ناتراوا شده و از آسیب به سازند و مشکلاتی مانند گردش گل از دست رفته یا چسبیدن دیفرانسیلی جلوگیری می‌کند. از دست دادن بیش از حد فیلترات می‌تواند خواص سیال حفاری را تغییر دهد و بر ویسکوزیته و استحکام ژل آن تأثیر بگذارد که موجب دشواری در تمیز کردن چاه و کاهش عملکرد مته خواهد شد. کنترل فیلتراسیون موجب حفظ پایداری خواص سیال شده و از رسوب بیش از حد مواد جامد ساینده که باعث فرسایش ابزار حفاری می‌شود، جلوگیری می‌کند. بهینه‌سازی کنترل فیلتراسیون میزان اتلاف مایعات و خطرات آلودگی را کاهش داده و مطابقت با مقررات زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد.

کیک گل و صاف آب ماحصل فرآیند فیلتراسیون سیال در دو حالت استاتیکی و دینامیکی در دیواره چاه هستند. در عملیات حفاری فراتعادلی، تشکیل کیک گل نازک و ناتراوا، امری مطلوب است چرا که موجب حفظ خواص رئولوژیکی سیال حفاری شده و از نفوذ سیال به سازندهای تراوا ممانعت می‌کند. در صورتی که به هر دلیلی ضخامت کیک گل افزایش یابد، مشکلاتی چون گیر رشته حفاری، مکش<sup>۱</sup>، کوبش<sup>۲</sup> و سیمانکاری نامناسب در حین عملیات دیده خواهد شد. مشکلاتی از قبیل تغییر ترشوندگی، خطا در تفسیرهای مرتبط با چاه‌پیمایی و حتی باد کردن رس‌های درون سازندی به دلیل نفوذ فیلترات به داخل سازند، به وجود خواهد آمد.

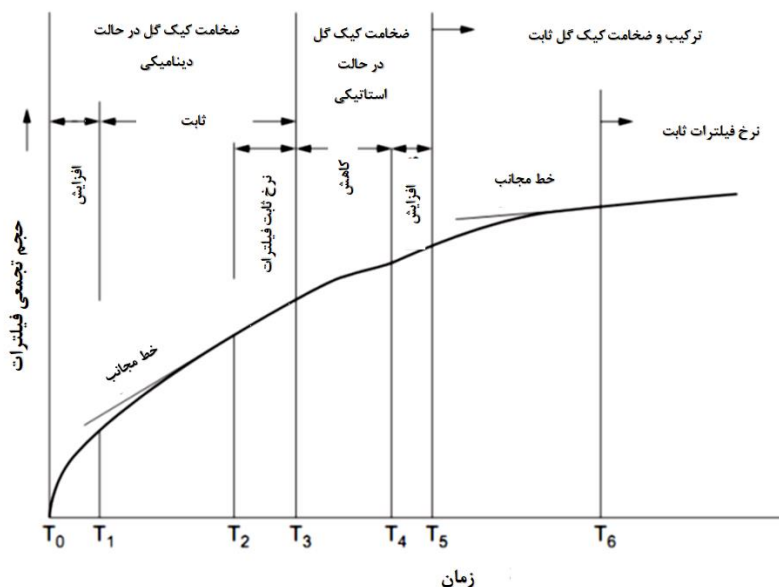
فرآیند فیلتراسیون در زیر سرتمه، در هنگام گردش گل و در زمان توقف پمپاژ بسیار متفاوت است. علیرغم اینکه فیلتراسیون سیال حفاری در زیر سرتمه و در زمان گردش گل، به صورت دینامیکی است، در آزمایشگاه، این خواص به صورت استاتیکی اندازه‌گیری می‌شوند. بنا به توصیه API اندازه‌گیری خواص فرآیند فیلتراسیون سیال حفاری در شرایط استاتیکی، در

دو حالت استاندارد و دما بالا-فشار بالا انجام می‌شود. حجم فیلترات در شرایط دینامیکی بیشتر از استاتیکی است. تاکنون رابطه مشخصی بین فیلتراسیون استاتیکی و دینامیکی ارائه نشده است اما تجربه نشان داده در صورتی که نتایج حاصل از آزمایش‌های استاتیکی خوب باشند، نتایج حاصل از آزمایش‌های دینامیکی در شرایط عملیاتی چاه نیز خوب خواهد بود. ضخامت کیک گل‌های تشکیل شده در شرایط دینامیکی کمتر از حالت استاتیکی است. چراکه حضور جریان سیال و چرخش رشته حفاری می‌تواند عامل محدود کننده‌ای برای رشد ارتفاع کیک گل باشد. هنگامی که سطح سنگ در دیواره چاه برای اولین بار در تماس با گل قرار می‌گیرد، سرعت فیلتراسیون بسیار بالا است و در نتیجه ضخامت کیک گل به سرعت رشد می‌کند. نقطه تعادل این رشد زمانی است که سرعت از بین رفتن کیک گل در اثر جریان سیال با سرعت رشد کیک گل برابر شود. سرعت رشد کیک گل در شرایط استاتیکی به پارامترهای موثر در قانون دارسی ارتباط دارد. اما در شرایط دینامیکی علاوه بر پارامترهای موثر در فیلتراسیون استاتیکی به سرعت ساینده شدن کیک گل در اثر نیروهای هیدرودینامیکی نیز باید توجه شود. در فیلتراسیون استاتیکی اندازه‌گیری ضخامت کیک گل به صورت دقیق دشوار است. چراکه نمی‌توان به راحتی مرزی را میان گل و سطح بالایی کیک گل مشخص نمود. اما در فیلتراسیون دینامیکی لایه نرم سطحی در کیک گل وجود ندارد و در عمل به دلیل ساینده شدن مرتب کیک گل لایه سطحی دارای استحکام خاصی در برابر نیروهای هیدرودینامیکی گل می‌باشد. در شکل ۱ مراحل فیلتراسیون دینامیکی از لحظه ابتدایی تا زمانی که ضخامت کیک گل ثابت می‌ماند، نشان داده شده است. تحقیقات در زمینه تفاوت شرایط دینامیکی و استاتیکی به دو بخش عمده تقسیم می‌شوند. بخش عمده‌ای از آنها در ابتدا به صورت آزمایشگاهی بود. چاپ‌من از اولین افرادی بود که اهمیت دیواره سازی جهت رفع مشکلات مرتبط با دیواره سازی در سال ۱۸۸۷ میلادی را با استفاده از رس، سبوس گندم و سیمان پیشنهاد داد. توصیه شد که می‌توان با کم کردن ضخامت کیک گل، مشکلات عملیاتی را به شدت کاهش داد. در سال ۱۹۳۷، طرح دستگاه فیلتر پرس استاندارد امروزی ارائه شد [۱]. اولین مطالعات در زمینه فیلتراسیون دینامیکی توسط ویلیامز در سال ۱۹۴۰ با استفاده از یک مدل چاه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار

<sup>2</sup> Swab<sup>1</sup> surge

فیلتراسیون، ثابت ماندن ضخامت فیلتر کیک است. وی هم چنین نشان داد هرچه سرعت چرخش گل بیشتر باشد، نرخ فیلتراسیون نیز بیشتر است [۲].

گرفت وی نشان داد نرخ فیلتراسیون که تابعی از اختلاف فشار، دبی و مشخصات گل است، پس از گذشت مدت زمان کوتاهی به مقدار ثابتی می رسد. او نتیجه گرفت که دلیل نرخ ثابت



شکل ۱- تغییرات ضخامت کیک گل و حجم تجمعی فیلترات وارده به سازند در طول زمان [1]

Fig 1- Mud cake thickness changes and cumulative filtrate volume across time [1]

ذرات، احتمال رسوب و در نتیجه ضخامت رشد کیک کاهش می یابد [۵]. لیو و گو نتیجه گرفتند پایداری دیواره چاه، تمیز کردن چاه، سرعت حفاری و آسیب به سازندها با استفاده از افزودنی های پلیمری بهبود می یابند [۶]. مجید سالاریه و خراط نتیجه گرفتند که پلی آنبویونک سلولز، افزودنی مناسبی برای بهبود گرانروی، نقطه تسلیم و استحکام ژل است. این ماده ضخامت کیک گل را به شدت کاهش می دهد. افزایش غلظت بنتونایت در گل حفاری در محدوده غلظتی، تأثیر چندانی در خاصیت دیواره سازی گل ندارد [۷]. وکیلی و زراسوندنیا دریافتند مخلوط پلیمر با مواد فعال سطحی در مقایسه با سیالاتی که فقط حاوی بیوپلیمرها هستند، کنترل صاف آب بهتری داشته و افزایش زمان، حجم صاف آب در دماهای بالا و فشار بالا را با سرعت بیشتری نسبت به حالت دما و فشار پایین افزایش می دهد [۸]. یوسفی راد و همکارانش تأثیر افزایش های کنترل هرزروی را بر خواص مکانیکی کیک گل مورد مطالعه قرار دادند. آن ها مقاومت پیچشی کیک گل های حاصله را مشخص نمودند تا از این طریق به صورت کیفی احتمال بروز گیر اختلاف فشاری در هنگام عملیات حفاری را نشان دهند [۹].

پروکاپ در سال ۱۹۵۲، برای هر دو حالت دینامیکی و استاتیکی آزمایش هایی انجام داد. او مکانیزم های حاکم بر تشکیل کیک گل را بررسی کرد و نتیجه گرفت که از عوامل عمده کنترل کننده تشکیل کیک در سیستم گردش گل باید به نرخ رسوب ذرات جامد، نیروی فرسایشی اعمال شده از طرف جریان گل بر کیک و فرسایش پذیری توجه نمود. مشاهدات وی نشان داد که گل هایی که نرخ فیلتراسیون بالایی دارند علیرغم سرعت فرسایش بالا، کیک گل ضخیمی بر جای می گذارند. کیک گل های ته نشین شده در شرایط فیلتراسیون استاتیکی و دینامیکی خصوصیات متفاوتی در بخش های نفوذ پذیری، ضخامت و فرسایش پذیری دارا می باشند [۳]. نتایج فرگوسن و کلوتز نشان می دهد که تقریباً ۹۵ درصد نفوذ صاف آب در شرایط دینامیکی صورت می گیرد و بقیه آن در شرایط استاتیکی رخ می دهد. علاوه بر حجم صاف آب، نرخ فیلتراسیون نیز در حالت دینامیکی به مراتب از حالت استاتیکی بیشتر است [۴]. استاماتاکیس و تین، مدلی را برای فیلتراسیون جریان و تشکیل فیلتر کیک بر حسب احتمال رسوب ذره در سطح کیک ارائه دادند. آن ها نشان دادند که با افزایش سرعت جریان و قطر

فشارهای بالا در فرآیند تشکیل کیک گل دینامیکی صرف نظر شده است. در مطالعات پیشین نقش تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی به وضوح دیده نشده است. ما در این مطالعه نتایج را با مقایسه اینگونه تصاویر صحنه گذاری نموده و چالش های کار با اینگونه تصاویر را نشان داده ایم.

## ۲- مواد و روش آزمایش

### ۲-۱- پارامترهای موثر در فیلتراسیون استاتیکی

بنا به توصیه API اندازه گیری خواص فرآیند فیلتراسیون سیال حفاری استاتیکی، در دوحالت استاندارد و دما بالا-فشار بالا انجام می شود. در روش استاندارد، سیال حفاری به مدت ۳۰ دقیقه، در معرض اختلاف فشار 100<sup>3</sup> پام قرار می گیرد. در روش دما بالا-فشار بالا، سیال حفاری به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه فارانهایت و یا در دمائی نزدیک به دمای سازند قرار خواهد گرفت. تغییرات دما بر جواب نهایی آزمایش تاثیرگذار است و به همین دلیل بهتر است بازه تغییرات دما را ثابت نگه داریم. به ازای هر ۱۵ درجه فارانهایت افزایش دما ۱۰٪ بر میزان حجم فیلترت افزوده خواهد شد. حجم صاف آب خروجی بر حسب سانتی مترمکعب و ضخامت کیک گل بر حسب  $\frac{1}{32}$  اینچ بیان می شود. مساحت کاغذ صافی در روش دما بالا-فشار بالا نصف روش استاندارد است. به همین دلیل در پایان مدت ۳۰ دقیقه مربوط به این آزمایش، حجم فیلترت به دست آمده، دو برابر خواهد شد. فیلترت خروجی از این دستگاه باید به گونه ای نگهداری شود که به بخار تبدیل نشود. در این روش اگر دمای مورد نظر ۳۰۰ درجه فارانهایت و یا کمتر باشد از دو عدد ۱۰۰ و ۶۰۰ جهت ایجاد اختلاف فشار استفاده می شود. اما اگر دمای آزمایش بالای ۳۰۰ درجه فارانهایت باشد فشار پایینی را بایستی بر اساس فشار بخار آب در آن دما محاسبه گردد. در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه فارانهایت به جای کاغذ فیلترت از دیسک های فولادی استفاده می شود. چراکه کاغذهای فیلترت در دماهای نزدیک به ۴۰۰ درجه فارانهایت می سوزند.

### ۲-۲- تئوری فیلتراسیون استاتیک

اگر یک واحد حجمی از یک سوسپانسیون پایدار از جامد از یک لایه ی تراوا عبور کند و X را حجم فیلترت در نظر بگیریم، آنگاه 1-X حجم کیک ( ذرات جامد به همراه مایع ) روی لایه رسوب

البته پاره ای از تحقیقات به صورت حل معادلات عددی و شبیه سازی آنها مربوط بوده است. اوتمنس معادلات موجود در مکانیسم تشکیل کیک گل در حالت استاتیکی و دینامیکی را ساده سازی نمود و به صورت تحلیلی حل و سپس با نتایج تجربی مقایسه کرد [۱۰]. اشراقی و حل اوتمن را به روش عددی بدست آوردند [۱۱]. سیوان مدل هایی برای پیشبینی ضخامت کیک گل غیر قابل تراکم، حجم صاف آب و میزان فیلتراسیون خطی و شعاعی در شرایط دینامیکی و استاتیکی ارائه داد. او مدل های کاربردی و دیفرانسیل معمولی بهبود یافته ای برای تشکیل کیک گل در شرایط استاتیکی و دینامیکی توسعه داد [۱۲]. نئی و همکاران مدل سازی تشکیل رسوب در اطراف یک چاه نفت را در فرآیند تزریق مجدد آب تولیدی از مخازن نفتی به زیر زمین را در دو حالت پایدار و ناپایدار انجام داده اند. آن ها نشان دادند که با افزایش شعاع ذرات، سرعت نفوذ صاف آب به درون سازند افزایش می یابد [۱۳]. زیکبیر و گومو با استفاده از نرم افزار فلوننت، فرآیند تشکیل فیلتر کیک را در حالت حفاری عمیق و غیر عمیق شبیه سازی کردند. نتایج کارشان نشان داد با افزایش عمق یا بزرگ شدن ذرات، ضخامت کیک گل افزایش می یابد [۱۴].

در این مطالعات نقش دما در یک حلقه جریان جریانی دیده نشده است. این موضوع با ترکیب شدن با مباحث فیلتراسیون دینامیکی کار شاخصی را پدید خواهد آورد. هدف از این مطالعه، شبیه سازی آزمایشگاهی تشکیل کیک گل در شرایط دینامیکی با استفاده از یک حلقه جریان آزمایشگاهی و مقایسه نتایج با حالت استاتیکی آزمایش استاندارد بوده است. اصولاً ترکیب مطالعات جریانی در حلقه جریان ها در کنار پدیده فیلتراسیون از نظر علمی به دلیل کوپل معادلات می تواند جذاب باشد. شاید در ادامه اینگونه مطالعات کلید راهگشایی جهت ارتباط هرچه بهتر روابط استاتیکی و دینامیکی باشد. در این مطالعه تلاش شد تا اثر پارامترهایی چون دما، چرخش رشته حفاری و زاویه در چهار گروه مختلف سیال حفاری مورد بررسی قرار گیرد. محل قرار گیری کاغذ صافی در تمام آزمایش ها، ثابت و در قسمت بالایی دیواره چاه بوده است. عکس های میکروسکوپ الکترونیکی، ضخامت کیک گل، حجم صاف آب خروجی در لحظات اولیه و در طول آزمایش های انجام شده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. به دلیل محدودیت های حلقه جریان از نقش

در رابطه های فوق،  $A$ : سطح مقطع کیک گل،  $k$ : تراوایی کیک گل در واحد دارسی،  $P$ : اختلاف فشار اعمالی بر حسب اتمسفر،  $\mu$ : ویسکوزیته سیال بر حسب سنتی پویز،  $Q_w$ : حجم فیلترات بر حسب سانتیمتر مکعب و  $Q_c$ : حجم کیک گل بر حسب سانتیمتر مکعب است.

همانگونه‌ای که در رابطه بالا مشاهده می‌شود حجم فیلترات با ریشه درجه دوم زمان رابطه مستقیمی دارد.

$$(V_F)\alpha\sqrt{t} \quad (9)$$

از آنجاکه طول آزمایش فیلتراسیون ۳۰ دقیقه است در بعضی از موارد از فرمول فوق استفاده کرده و با دو برابر کردن حجم فیلترات تجمع یافته در زمان ۷/۵ دقیقه حجم نهایی فیلترات تخمین زده خواهد شد. در صورتی که حجم تخلیه شده اولیه زیاد باشد محاسبه حجم نهایی فیلترات کمی بیشتر از مقدار واقعی خواهد بود. و اگر این حجم کم باشد حجم نهایی فیلترات اندکی کمتر از مقدار واقعی گزارش خواهد شد. باید توجه داشت که در آزمایش‌های دما بالا فشار بالا نمی‌توان از روش فوق استفاده نمود، چراکه افزایش دما باعث بزرگتر شدن سل شده و دیگر نمی‌توان به داده‌های ۷/۵ دقیقه اکتفا نمود.

فیلتراسیون دینامیکی زمانی اتفاق می‌افتد که رشته حفاری در حال گردش است و جریان سیال حفاری درون چاه فعال است. این شرایط باعث تغییر در ساختار کیک گل، کاهش خلل و فرج سطحی، و افزایش یکنواختی آن می‌شود. همچنین، چرخش رشته حفاری باعث توزیع بهتر مواد پلیمری و تأثیرگذاری بیشتر آنها در کنترل فیلتراسیون می‌گردد. ساختار سطحی کیک گل در فیلتراسیون دینامیکی منظم‌تر و یکنواخت‌تر است، در حالی که در حالت استاتیکی ممکن است دارای خلل و فرج بیشتری باشد. افزایش دمای سیال و حرکت رشته حفاری در شرایط دینامیکی تأثیرات مثبتی بر کاهش نفوذ فیلترات و بهبود استحکام کیک گل دارند. استفاده از مواد پلیمری در حالت دینامیکی تأثیر بیشتری نسبت به حالت استاتیکی دارد، زیرا گردش سیال موجب بهبود توزیع پلیمرها و کاهش حجم فیلترات خروجی می‌شود.

خواهد کرد. بنابراین اگر  $Q_c$  حجم کیک باشد و  $Q_w$  حجم فیلترات:

$$\frac{Q_c}{Q_w} = \frac{1-x}{x} \quad (1)$$

و ضخامت کیک  $h$  بر واحد سطح کیک در واحد زمان برابر خواهد بود با:

$$h = \frac{1-x}{x} Q_w \quad (2)$$

قانون دارسی:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{kP}{\mu h} \quad (3)$$

در این رابطه  $k$  تراوایی بر حسب دارسی،  $P$  اختلاف فشار بر حسب اتمسفر،  $h$  ضخامت بر حسب سانتی متر از سطح مقطع،  $q$  حجم فیلترات بر حسب سانتی متر مکعب،  $t$  زمان بر حسب ثانیه و  $\mu$  ویسکوزیته بر حسب سنتی پویز است. بنابراین:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{kP}{\mu Q_w} \times \frac{x}{1-x} \quad (4)$$

پس از انتگرال گیری:

$$Q_w^2 = \frac{2kP}{\mu} \times \frac{x}{1-x} t = \frac{2kP}{\mu} \times \frac{Q_w}{Q_c} t \quad (5)$$

اگر سطح کیک گل برابر  $A$  باشد:

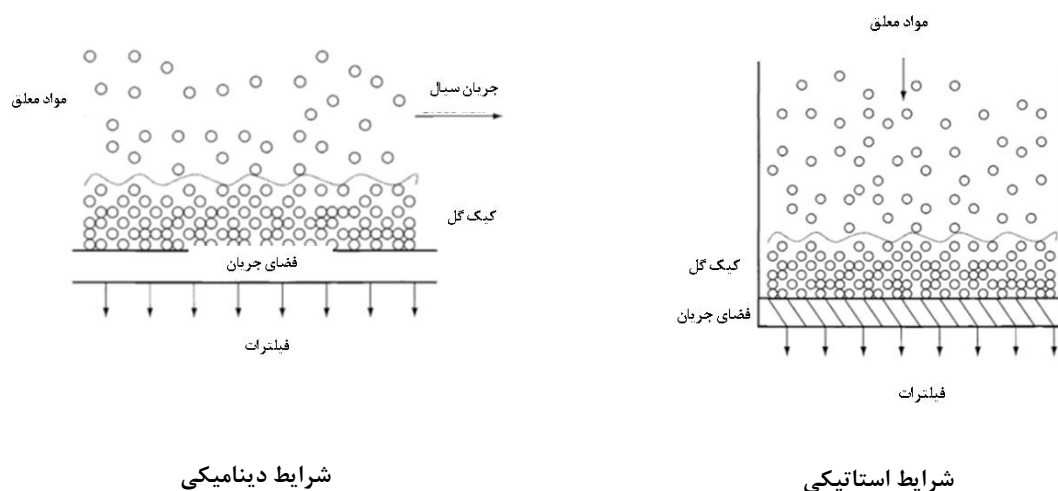
$$Q_w^2 = \frac{2kPA^2}{\mu} \times \frac{Q_w}{Q_c} t \quad (6)$$

آقای لارسن [1] با انجام آزمایش‌های متعدد آزمایشگاهی رابطه ۱ را ارائه داد:

$$Q_w - q_0 = A\sqrt{(C \times t)} \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $t$ : زمان بر حسب ثانیه،  $q_0$  نشان‌دهنده حجم تخلیه شده در زمان صفر است که منظور میزان حجمی از فیلترات است که بلافاصله پس از اعمال اختلاف فشار از داخل دستگاه فیلترپرس بیرون می‌ریزد و  $C$  ثابتی است که از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$C = \frac{2(kp)}{\mu} \frac{Q_w}{Q_c} \quad (8)$$



شکل ۲- فرآیند تشکیل کیک گل

Fig2- Mud cake formation process

چرخش، برای چرخاندن رشته درونی فضای حلقوی در نظر گرفته شده است. با توجه به ساختار دستگاه رشته حفاری برای تمام آزمایشات هم‌مرکز بوده و قابلیت جابجایی را ندارد. سیال از طریق منفذ تعبیه شده در انتهای فضای دالیزی وارد شده و پس از طی مسیر خود از طریق منفذ خروجی، خارج خواهد شد. سیال برگشتی به تانک گل ۱۷۰ لیتری برگشته و پس از رسیدن به دمای مطلوب آماده تزریق مجدد خواهد شد. جهت اطمینان از یکنواختی دمای سیال، یک همزن مکانیکی سیال را در تمام طول هم خواهد زد. (شکل ۳)

در طول تمام آزمایش‌ها، فرآیند فیلتراسیون در نقطه ای خاص از دستگاه، انجام خواهد شد. مساحت این قسمت ۳۱ سانتی متر مربع، اندکی کوچکتر از مساحت کاغذ فیلترپرس استاندارد، در نظر گرفته شد. بعد از قرار گیری کاغذ صافی، یک توری استاندارد با مش ۲۰۰ به روی کاغذ قرار گرفته و این مجموعه به کمک اتصالات در جای خود محکم می‌گردد.

در سری آزمایش‌های انجام شده، اثرات تغییر دما در سه دمای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درجه سانتیگراد، تغییر دور رشته حفاری در دو دور صفر و ۱۱۰ دور بر دقیقه، تغییر زاویه حلقه جریان در سه زاویه صفر، نود و ۴۵ درجه و همچنین تغییر فرمولاسیون سیال مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت ساختار کیک گل‌های شکل گرفته در شرایط دینامیکی با حلقه جریان با کیک گل‌های حاصل از شرایط استاتیکی دستگاه فیلترپرس استاندارد مقایسه شدند. در این دستگاه برای ثابت نگه داشتن دما، از کنترلرهای PID استفاده شده است (جدول ۱).

در ادامه فرآیند تشکیل کیک گل دینامیکی از طریق حلقه جریان توضیح داده شده است.

### ۳-۲- پارامترهای موثر در فیلتراسیون دینامیکی

به دلیل ضرورت انجام مطالعات حفاری، محققان در طی سالیان گذشته تلاش‌های زیادی را جهت ساخت شبیه سازهای آزمایشگاهی عملیات حفاری به کار گرفته اند. در دستگاه مورد استفاده در این آزمایش و سایر دستگاه‌های مشابه، تلاش شده تا رفتار رئولوژیکی سیال با در نظر گرفتن اثرات دما به واقعیت نزدیک شود. اکثر حلقه جریان‌ها در شرایط فشار و دما پایین قادر به فعالیت هستند و نمی‌توانند فشاری بالغ بر ۸ پام و دمایی بالاتر از ۸۵ درجه سانتیگراد را تحمل کنند.

در این مقاله از دستگاه حلقه جریان دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر با اندکی تغییر در فضای دالیزی استفاده شده است. قسمت دالیزی مورد بررسی در آزمایش یک لوله پلکسی به طول ۲ متر و قطر داخلی ۹ سانتی‌متر می‌باشد. لوله داخلی آن که به‌عنوان رشته حفاری عمل می‌کند دارای قطر خارجی ۴/۳ سانتی‌متر است و از سال ۱۳۹۷ تا کنون با آن تاکنون مقالات متعددی کار شده است. [15, 16, 17, 18] نکته مهم این است که ابعاد به‌کاررفته در ساخت این دستگاه را می‌توان مشابه حفاری لاینر ۳/۵ اینچ با لوله ماکارونی به ضخامت ۱/۹ اینچ در نظر گرفت که حفاری با این ابعاد در مناطق نفت‌خیز جنوب مرسوم است. این سیستم می‌تواند فشاری را حدود ۱۰ بار تحمل کند. لذا یک شیر اطمینان جهت جلوگیری از افزایش احتمالی فشار در این دستگاه تعبیه شده است که در انتهای خط لوله قرار دارد. یک موتور الکتریکی با قابلیت تغییر سرعت



شکل ۳- شمای کلی دستگاه و نحوه آماده سازی آزمایش (محدوده دمایی دستگاه قابل تنظیم تا ۹۰ درجه سانتیگراد، ظرفیت پمپاژ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه، جنس فضا از لوله پولیکا، ابعاد دیسک‌های فیلتر مطابق استاندارد استاتیکی و سرعت موتور چرخشی تا ۱۱۰ دور بر دقیقه)

Fig 3- Setup schematics and test preparation (Temperature limitation until 90 C, pump rate limitation until 30 Lit/min, rotation speed limitation until 110 rpm based on API filter press disk and paper)

#### جدول ۱- طراحی آزمایش

Table 1- Design of experiment

نقش	زمان اختلاط (دقیقه)	حجم	ماده	گروه بندی
فاز پیوسته	-	۱۲۰ lit	آب	۱
کنترل سختی	۵	۲۰ g	سدیم کربنات	
ویسکاسیفایر	۲۰	۵۰۰ g	بنتونیت	
فاز پیوسته	-	۱۲۰ lit	آب	۲
کنترل سختی	۵	۲۰ g	سدیم کربنات	
ویسکاسیفایر	۲۰	۵۵۰۰ g	بنتونیت	
کنترل فیلترات	۲۰	۱۰۰۰ g	CMC LV	
فاز پیوسته	-	۱۲۰ lit	آب	۳
کنترل سختی	۵	۲۰ g	سودا اش	
افزایش گرانروی و کنترل صاف آب	۲۰	۳۱۶۰ g	Poly Pac + My-lo-GEL	
پلزن	۳۰	۲۵۰۰ g	کلسیم کربنات	
وزن افزا	۳۰	۳۰۰۰ g	باریت	
-	-	۱۲۰ lit	آب	۴
کنترل سختی	۵	۲۰ g	سودا اش	
افزایش گرانروی و کنترل صاف آب	۲۰	۳۱۶۰ g	Poly Pac + My-lo-GEL	
پلزن	۳۰	۲۵۰۰ g	کلسیم کربنات	
وزن افزا	۳۰	۳۰۰۰ g	باریت	
آلاینده سیال	۳۰	۳۰۰۰ g	نمک	

پلیمری باشند. شکل، اندازه و توزیع اندازه ذرات نقش موثری در خواص کیک گل و حجم فیلترت دارد. از دیگر پارامترهای مهم در این زمینه نسبت جامدات فعال و غیر فعال و مکانیزم عملکرد شیمیایی آن‌هاست. در صورتی که در داخل سیال از انواع رس‌ها استفاده می‌شود پخش‌شدگی رس‌ها و نجسبیدن آن‌ها به هم در کنترل فیلتراسیون بسیار مهم است. باید توجه داشت که استفاده از مواد وزن افزا تأثیر چندانی در کنترل خواص فیلتراسیون و یا کیک گل ندارد. اما توصیه می‌شود که تا جای ممکن از افزایش‌هایی با وزن بالاتر استفاده نمود، تا با کاهش تعداد ذرات جامد کیفیت کیک گل بالا رفت. نکته بسیار مهمی که نباید فراموش شود این است که، در هنگام انجام آزمایش فیلتراسیون برای گل‌های سنگین ممکن است ته‌نشینی مواد وزن افزا اتفاق افتد و نتایج آزمایش واقعی نباشند، که این امر در زمان استفاده از دستگاه فیلتراسیون در دمای بالا و فشار بالا بیشتر محتمل است [۱].

### ۳- ارائه نتایج و تحلیل آنها

به طور کلی می‌توان کیک گل‌های تشکیل شده در فیلتراسیون دینامیکی را به دو گروه عمده تقسیم کرد، در گروه اول عامل ایجاد کننده کیک گل نیروهای الکترواستاتیکی ناشی از ذرات رس نقش کلیدی را ایفا می‌کند. اما در گروه دوم شبکه‌های به هم پیوسته پلیمری عامل به وجود آورنده کیک گل هستند. به دلیل ماهیت نیروهای الکترواستاتیکی موجود در ذرات رس گروه اول کیک گل ضخیم‌تر و چسبنده‌تری را دارند. اما در گروه دوم به دلیل خنثی شدن بار الکتریکی شبکه پلیمری تمایل چندانی به افزایش ضخامت کیک گل وجود ندارد. افزایش ضخامت کیک گل بسیار مشکل آفرین است و می‌تواند باعث مشکلات فراوانی در عملیات حفاری شوند. این در حالی است که در انجام آزمایش‌های استاتیکی گل‌های بنتونایتی یکی از باریک‌ترین ضخامت‌ها را در کیک گل و کمترین حجم فیلترت را از خود نشان می‌دهد و عدم توجه به تفاوت میان فیلتراسیون استاتیکی و دینامیکی ممکن است موجب تصمیم نادرست شود.

هرچند ضخامت کیک گل این نوع سیالات بالا است و تراوایی کمی دارد ولی در زمان تشکیل کیک گل ۸۵٪ حجم کیک گل را آب تشکیل می‌دهد. به همین دلیل با خشک شدن کیک گل ضخامت کیک گل خشک شده به مراتب کمتر از کیک گل اولیه است (شکل ۴).

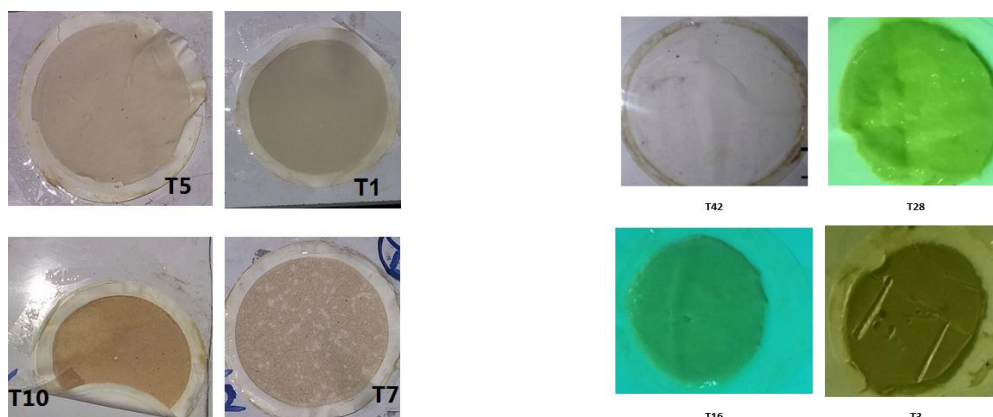
در آزمایش‌های دینامیکی، اندازه‌گیری وزن سیال در دقیقه هفت، اندازه‌گیری ویسکوزیته در دقیقه ۲۰ و در نهایت در اتمام آزمایش یعنی در دقیقه ۳۰، اندازه‌گیری ضخامت کیک گل انجام می‌شد. در شرایط استاتیکی، اندازه‌گیری حجم فیلترت و ضخامت کیک گل، توسط دستگاه فیلتر پرس استاندارد انجام شد. به منظور بررسی مورفولوژی سطحی ذرات، تخلخل‌های موجود در سیستم و همچنین بررسی ساختار شبکه‌ای کیک گل، از آزمون SEM استفاده شده است.

میزان اختلاف فشار وارد بر کیک گل در صورتی که سایر پارامترهای موثر ثابت باشند، همانگونه که در رابطه بالا اشاره شده است. حجم فیلترت خارج شده با ریشه دوام اختلاف فشار وارده رابطه مستقیمی دارد. ولی بایستی توجه داشت که افزایش فشار می‌تواند باعث کاهش تراوایی کیک گل شود. و همین امر موجب محدود شدن حجم فیلترت و ضخامت کیک گل خواهد شد. در بحث اعمال فشار خاصیت تراکم‌پذیری کیک گل نیز بایستی مورد غفلت قرار گیرد. بنتونایت در صورتی که به طور کامل هیدراته شود تراکم‌پذیری خوبی را به کیک گل خواهد داد.

تراوایی کیک گل، باعث ایجاد محدودیت در میزان نفوذ به داخل سازند می‌شود. از جمله مهمترین پارامترهای اثرگذار بر تراوایی اندازه، شکل و قابلیت تغییر شکل ذرات در فشارهای بالاست. با کاهش تراوایی ضخامت کیک گل و حجم فیلترت نیز کاهش می‌یابد. تراوایی یک کیک گل خوب تقریباً هزار مرتبه کمتر از یک سازند تراوا است. در صورتی که تراوایی سازند بسیار بالا باشد مهندس گل شناس بایستی با بهره‌گیری از ذرات پل زننده شرایطی را فراهم آورد تا امکان تشکیل کیک گل فراهم آید. از جمله مهمترین ذرات پل زننده کربنات کلسیم است. شایان ذکر است که در اینگونه موارد استفاده از افزایش‌های کنترل کننده فیلتراسیون که عملکرد شبیه گلسونایت دارند، می‌توانند موجب کاهش تراوایی شوند.

گرانروی در صورتی که سایر پارامترهای موثر ثابت بمانند حجم فیلترت نهایی با عکس ریشه دوام گرانروی رابطه مستقیمی دارد. به عبارتی دیگر با افزایش گرانروی حجم فیلترت و ارتفاع کیک گل کاهش خواهد یافت. بایستی توجه داشت که افزایش دما گرانروی را کاهش می‌دهد. لذا افزایش دما موجب افزایش ضخامت کیک گل و افزایش حجم فیلترت خواهد شد.

ترکیب مواد جامد گل ذرات جامد موجود در گل می‌تواند خواص متفاوتی داشته باشند. ذرات جامد می‌توانند فعال، غیرفعال و یا



شرایط استاتیکی

شرایط دینامیکی

شکل ۴: کیک های تشکیل شده در شرایط استاتیکی و دینامیکی

Fig 4- Mud cake in static and dynamic conditions

از استفاده در عملیات حفاری در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرند. پلیمرها می‌توانند از سه طریق حجم فیلترات را کاهش دهند. ابتدا با مسدود کردن منافذ کیک گل اجازه عبور صاف آب را نمی‌دهند، یا از طریق کپسوله کردن ذرات تشکیل دهنده کیک گل تراوایی را کاهش می‌دهند. و در نهایت با افزایش گرانیروی سیال و درگیر کردن مایعات آزاد در گل حجم صاف آب را کاهش می‌دهند. در ادامه قصد داریم تا با بررسی نتایج حاصله، تاثیر پارامترهایی چون دما، چرخش رشته حفاری، فرمولاسیون و زاویه چاه را مورد بحث و بررسی قرار دهیم (جدول ۲).

بیشتر پلیمرهای کنترل کننده هرزروی نه تنها گرانیروی را افزایش می‌دهند بلکه در صورتی که در غلظت‌های مناسب استفاده شوند، می‌توانند با چسبیدن به سطح جامدات موجود در سیال حفاری نقش کپسول کننده را ایفا کنند. این خاصیت بیشتر برای کنترل شیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل در هنگام اضافه کردن پلیمرها به سیال حفاری در سیستم‌هایی که ذرات رس در آنها وجود ندارد، بایستی اثرات مخرب این جذب مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل توصیه می‌شود با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی عملکرد پلیمرها قبل

جدول ۲- خلاصه ای از نتایج حاصله در آزمایش‌های دینامیکی

Table 2- Dynamic tests results

ردیف	نام آزمایش واحد	گروه	دمای سیال °C	زاویه فلولوپ	سرعت چرخش rpm	ضخامت کیک گل mm	وزن گل g/cc	گرانیروی سیال sec/cc
۱	T01-G1-25-rpm000-INC00	۱	۲۵	۰	۰	۱.۸۰	۱.۰۱۷	۲۸.۰۰
۲	T02-G1-25- rpm 110-INC00	۱	۲۵	۰	۱۱۰	۱.۸۸	۱.۰۰۷	۲۸.۲۰
۳	T03-G1-50- rpm 000-INC00	۱	۵۰	۰	۰	۱.۵۸	۱.۰۲۱	۲۴.۱۰
۴	T04-G1-50- rpm 110-INC00	۱	۵۰	۰	۱۱۰	۲.۷۶	۱.۰۲۷	۲۴.۵۰
۵	T05-G1-75- rpm 000-INC00	۱	۷۵	۰	۰	۳	۱.۰۱۸	۲۳.۷۰
۶	T06-G1-75- rpm 110-INC00	۱	۷۵	۰	۱۱۰	۳.۷۶	۱.۰۲۱	۲۳.۹۰
۷	T07-G1-25- rpm 000-INC90	۱	۲۵	۹۰	۰	۰.۸	۱.۰۲۴	۲۷.۵۰
۸	T08-G1-25- rpm 110-INC90	۱	۲۵	۹۰	۱۱۰	۱.۴۰	۱.۰۳۰	۲۷.۶۰
۹	T09-G1-50- rpm 000-INC90	۱	۵۰	۹۰	۰	۲.۰	۱.۰۲۰	۲۶.۷۰
۱۰	T10-G1-50- rpm 110-INC90	۱	۵۰	۹۰	۱۱۰	۲.۲	۱.۰۱۹	۲۶.۰۵
۱۱	T11-G1-75- rpm 000-INC90	۱	۷۵	۹۰	۰	۲.۵	۱.۰۱۷	۲۵.۷۰
۱۲	T12-G1-75- rpm 110-INC90	۱	۷۵	۹۰	۱۱۰	۲.۷۲	۱.۰۱۲	۲۴.۹۰

ردیف	نام آزمایش	گروه	دمای سیال °C	زاویه فلولوپ	سرعت چرخش rpm	ضخامت کیک گل mm	وزن گل g/cc	گرانروی سیال sec/cc
۱۳	T13-G1-25- rpm 000-INC45	۱	۲۵	۴۵	۰	۱.۶	۱.۰۱۸	۲۷.۵۰
۱۴	T14-G1-25- rpm 110-INC45	۱	۲۵	۴۵	۱۱۰	۱.۹	۱.۰۱۸	۲۷.۸۰
۱۵	T15-G1-50- rpm 000-INC45	۱	۵۰	۴۵	۰	۱.۹	۱.۰۱۸	۲۴.۱۰
۱۶	T16-G1-50- rpm 110-INC45	۱	۵۰	۴۵	۱۱۰	۲.۷۲	۱.۰۲۱	۲۴.۹۰
۱۷	T17-G1-75- rpm 000-INC45	۱	۷۵	۴۵	۰	۲.۳۰	۱.۰۲۳	۲۳.۹۰
۱۸	T18-G1-75- rpm 110-INC45	۱	۷۵	۴۵	۱۱۰	۲.۸۰	۱.۰۲۲	۲۳.۸۰
۱۹	T19-G2-25- rpm 000-INC00	۲	۲۵	۰	۰	۳.۴۰	۱.۰۳۰	۱۵۷
۲۰	T20-G2-25- rpm 110-INC00	۲	۲۵	۰	۱۱۰	۳.۵۰	۱.۰۳۲	۱۵۹
۲۱	T21-G2-50- rpm 000-INC00	۲	۵۰	۰	۰	۴.۲۰	۱.۰۳۶	۱۵۶
۲۲	T22-G2-50- rpm 110-INC00	۲	۵۰	۰	۱۱۰	۴.۱۰	۱.۰۳۵	۱۵۶
۲۳	T23-G2-75- rpm 000-INC00	۲	۷۵	۰	۰	۴.۳۰	۱.۰۳۵	۱۵۴
۲۴	T25-G2-25- rpm 000-INC90	۲	۲۵	۹۰	۰	۲.۵۴	۱.۰۳۳	۷۰۰
۲۵	T26-G2-25- rpm 110-INC90	۲	۲۵	۹۰	۱۱۰	۲.۷۰	۱.۰۳۴	۷۲۰
۲۶	T27-G2-50- rpm 000-INC90	۲	۵۰	۹۰	۰	۲.۷۰	۱.۰۲۴	۶۰۰
۲۷	T28-G2-50- rpm 110-INC90	۲	۵۰	۹۰	۱۱۰	۲.۸۰	۱.۰۲۶	۵۸۰
۲۸	T29-G2-75- rpm 000-INC90	۲	۷۵	۹۰	۰	۲.۸۷	۱.۰۳۷	۵۶۰
۲۹	T30-G2-75- rpm 110-INC90	۲	۷۵	۹۰	۱۱۰	۲.۹۳	۱.۰۳۹	۵۶۵
۳۰	T35-G3-25- rpm 000-INC90	۳	۲۵	۹۰	۰	۰.۱<	۱.۰۰۸	۲۵.۸۷
۳۱	T38-G3-50- rpm 000-INC90	۳	۵۰	۹۰	۰	۰.۱<	۱.۰۱۰	۲۲.۳۰
۳۲	T39-G3-75- rpm 000-INC90	۳	۷۵	۹۰	۰	۰.۱<	۱.۰۰۲	۱۹.۳۵
۳۳	T33-G3-25- rpm 000-INC45	۳	۲۵	۴۵	۰	۰.۱<	۱.۰۰۳	۲۵.۱۰
۳۴	T36-G3-50- rpm 000-INC45	۳	۵۰	۴۵	۰	۰.۱<	۱.۰۱۰	۲۲.۰۰
۳۵	T40-G3-75- rpm 000-INC45	۳	۷۵	۴۵	۰	۰.۱<	۱.۰۰۲	۱۹.۷۰
۳۶	T42-G4-75- rpm 000-INC90	۴	۷۵	۹۰	۰	۰.۱<	۱.۰۱۰	۱۹.۲۰
۳۷	T43-G4-75- rpm 000-INC45	۴	۷۵	۴۵	۰	۰.۱<	۱.۰۱۲	۱۹.۲۳

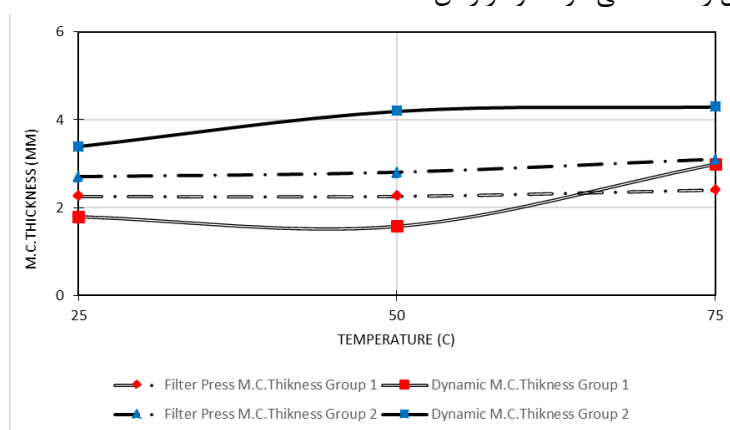
در جدول فوق، بعد از ذکر اسم هر آزمایش، نام گروه که از یک تا چهار می باشد، ذکر شده است. عبارت سوم نشان دهنده دمای آزمایش، عبارت چهارم، سرعت چرخش رشته حفاری و عبارت پنجم زاویه چاه می باشد. زاویه چاه در حالت قائم، صفر و در حالت افقی، نود درجه در نظر گرفته شده است. در جدول زیر نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده با فیلترپرس استاندارد ذکر شده‌اند. در کنار هر آزمایش استاندارد معادل آزمایش دینامیکی آن نیز قرار گرفته است. لازم به ذکر است که از سیال مورد استفاده در آزمایش‌های استاندارد، از سیال آزمایش شده در آزمایش دینامیکی معادل بوده است. در طول این تحقیق توضیح داده شد که شرایط عملیات حفاری به فیلتراسیون دینامیکی نزدیکتر است تا استاتیکی. در عملیات کیک گل ضخیم می تواند منجر به انواع مشکلات مانند گیر اختلاف فشاری شود و حتی با از دست دادن فیلترات بیش از حد خود، علاوه بر تغییر خواص رئولوژیکی سیال منجر به فشار بیش از به پمپ خواهد شد.

در جدول فوق، بعد از ذکر اسم هر آزمایش، نام گروه که از یک تا چهار می باشد، ذکر شده است. عبارت سوم نشان دهنده دمای آزمایش، عبارت چهارم، سرعت چرخش رشته حفاری و عبارت پنجم زاویه چاه می باشد. زاویه چاه در حالت قائم، صفر و در حالت افقی، نود درجه در نظر گرفته شده است. در جدول زیر نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده با فیلترپرس استاندارد ذکر شده‌اند. در کنار هر آزمایش استاندارد معادل آزمایش دینامیکی آن نیز قرار گرفته است. لازم به ذکر است که

## ۳-۱- تغییرات در شرایط دینامیکی و استاتیکی

در آزمایش فیلترپرس استاندارد، سیال خروجی از فلولوپ دینامیکی مستقیماً به داخل دستگاه هدایت شد و تحت اختلاف فشار ۱۰۰ psi قرار گرفت. روند افزایش ضخامت کیک گل حاصله از دستگاه فیلترپرس استاندارد به صورت آرام و با شیبی ملایم از ۲۵° تا ۷۵° افزایشی بوده است، این درحالیست که در فلولوپ دینامیکی تغییرات ضخامت کیک گل برای گروه‌های اول و دوم به صورت یک منحنی مطابق شکل بوده است (شکل ۵). ضخامت کیک گل در شرایط دینامیکی می‌تواند کمتر و یا بزرگتر از حالت استاتیکی باشد البته این که چه ضخامتی از کیک گل را به عنوان معیار در نظر بگیریم خیلی مهم است، چرا که گل‌های بنتونایتی انباشته‌ای از صفحات رسی روی هم قرار گرفته که تشخیص مرز کیک گل و خود گل را سخت می‌کردند و در زمان

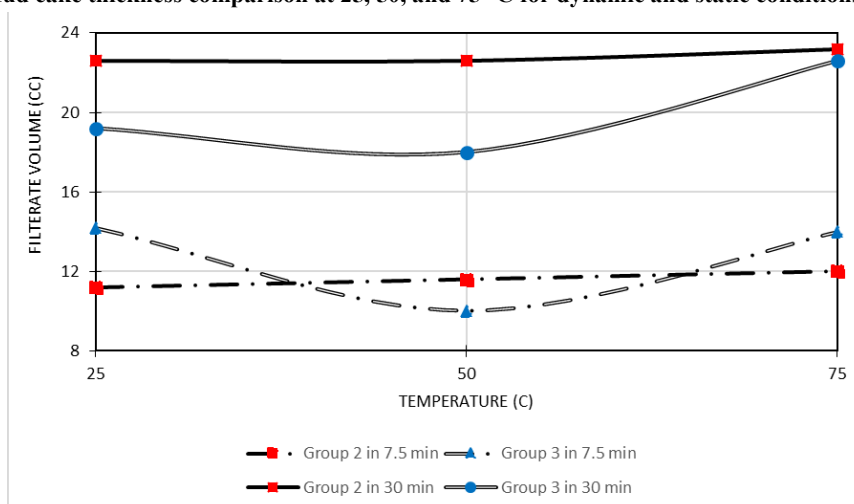
شست‌وشو نیز جاه‌هایی از آن خیلی راحت و جاه‌هایی نیز به صورت ناپیوسته شسته می‌شدند. اما در هر حال افزایش ضخامت کیک گل با افزایش دما می‌تواند روندی افزایشی، کاهش‌ی و یا خطی داشته باشد. روند کلی در آزمایش‌های استاتیکی خطی است ولی در آزمایش‌های دینامیکی با افزایش دما نمودار به صورت منحنی ظاهر شده است. افزایش دما در برخی آزمایش‌ها باعث کاهش ضخامت کیک گل شده ولی در برخی دیگر باعث افزایش آن شده است. علت این امر را می‌توان در تأثیر درجه حرارت‌های میانی در عملکرد بهتر سیال از نظر خواص دانست. همچنین این نمودار نشان داده است که افزودن مواد پلیمری به گل بنتونایتی موجب افزایش ضخامت کیک گل در دو حالت استاتیکی و دینامیکی خواهد شد (شکل ۶).



شکل ۵: مقایسه ضخامت کیک گل گروه‌های آزمایشگاهی اول و دوم در دماهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درجه سانتیگراد در فلولوپ دینامیکی و

فیلترپرس استاندارد

Fig 5- Mud cake thickness comparison at 25, 50, and 75 °C for dynamic and static conditions in series 1 and 2.

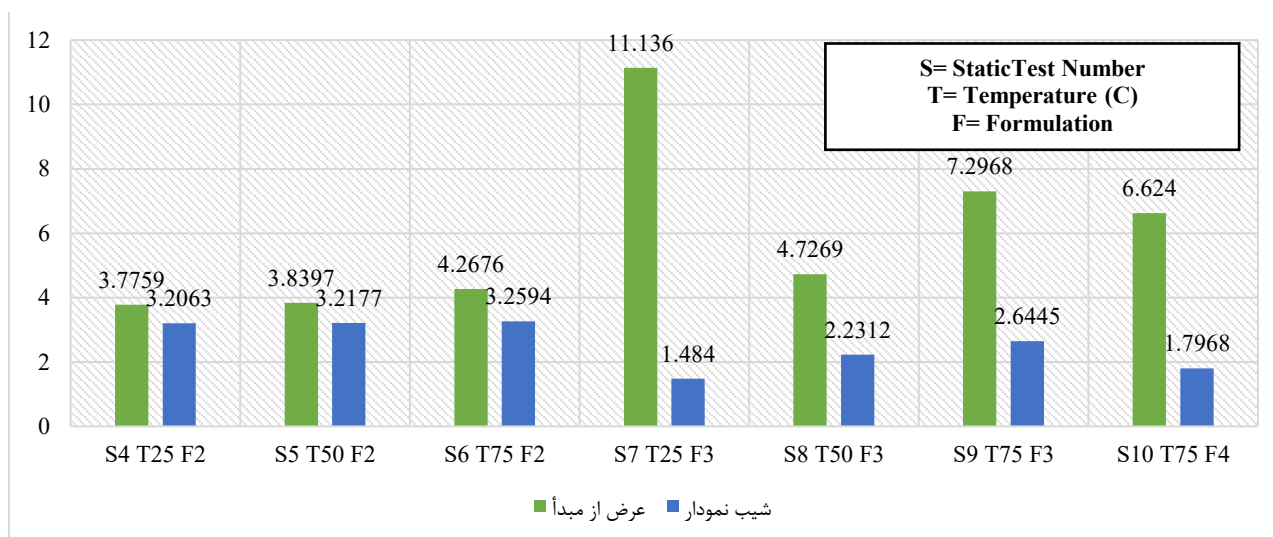


شکل ۶- حجم فیلترات گروه دوم و سوم بعد از گذشت ۷/۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه در هنگام آزمایش توسط دستگاه فیلترپرس استاندارد

Fig 6- Filtrate volume after 7.5 and 30 min using a static filter press for series 2 and 3

را نسبت به فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی دوم داشته باشد. همانگونه که در نمودار نشان داده شده است در شرایط استاتیکی حجم فیلترات فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی اول از فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی دوم و سوم بیشتر بوده است و این یعنی فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی اول بدترین عملکرد را در آسیب رسانی به سازند می‌تواند داشته باشد. این مقدار به رنگ آبی در شکل ۷ نشان داده شده است.

رفتار نمودار ۷/۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه روند مشابهی را داشته است. در این نمودار فراز و فرود (تقعر و تحدب) نیز شبیه به یکدیگر است. هر چند بعد از گذشت ۳۰ دقیقه حجم فیلترات نهایی افزایش یافته است. با توجه به این شکل دریافت می‌شود که فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی دوم فیلترات بیشتری را نسبت به فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی سوم داشته است، به عبارتی دیگر فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی سوم توانسته است عملکرد بهتری



شکل ۷- مقادیر عرض از مبدأ و شیب نمودار آزمایش‌های دستگاه فیلتراسیون استاندارد

Fig 7- Slope and intercept of static filtration tests

همانگونه که در نمودار فوق دیده می‌شود، اثر درجه حرارت بر تغییرات شیب نمودار فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی دوم قابل چشم پوشیست. این درحالیست که افزایش دما باعث افزایش شیب این نمودار در گروه آزمایشگاهی سوم شده است. هرچند در مقایسه کلی فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی سوم به فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی دوم، افزایش دمای فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی سوم تا  $75^{\circ}$  درجه کمتر از شیب نمودار فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی دوم در دمای  $25^{\circ}$  درجه است. از آنجا که فرآیند تشکیل کیک گل در دستگاه فیلتر پرس استاندارد از اختلاط و نزدیکی سیال حفاری با کیک گل هیچ ممانعتی به عمل نمی‌آورد. تأثیر دمای سیال وارد شده به استوانه دستگاه، تحت فشار گذاشتن آن، تشکیل کیک گل، شستن سطح آن و در انتها خشک شدن آن باعث خواهد شد که نتوان بین آزمایش‌های استاتیکی تفاوتی قائل شد. از آنجا که گل با دمای بالا بعد از گذشت زمان در یک ظرف استیل خنک می‌شود، جهت تأثیر این امر باید کاغذ صافی را از کیک گل جدا نموده و عملیات

در نمودار بالا، مقادیر  $q_0$  (عرض از مبدأ) و  $A\sqrt{C}$  (شیب نمودار) در معادله آقای لارسن برای آزمایش‌های انجام شده توسط دستگاه فیلترپرس استاندارد نشان داده شده است.  $q_0$  نشان‌دهنده خطای صفر که منظور میزان حجمی از فیلترات است که بلافاصله پس از اعمال اختلاف فشار از داخل دستگاه فیلترپرس بیرون می‌ریزد و سبب آسیب رسانی به سازند می‌شود را نشان می‌دهد.

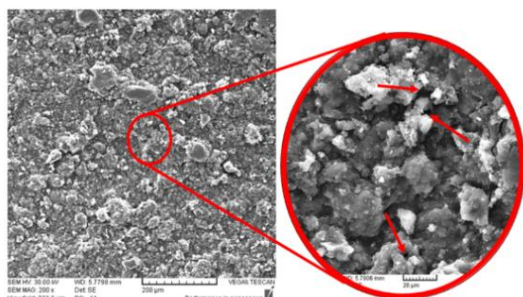
ضخامت کیک گل در فرمولاسیون گروه آزمایشگاهی چهارم پایین بوده و از طرفی تغییرات حجم فیلترات در برابر تغییر سایر پارامترها نسبت به فرمولاسیون‌های گروه آزمایشگاهی سوم و دوم تا حدی پایین بوده است.

این شیب در حقیقت میزان تأثیر سایر پارامترهای بر حجم فیلترات نهایی بعد از شکل‌گیری اولیه کیک گل نشان می‌دهد. همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، کمترین وابستگی به سایر پارامترها در  $S7T25F3$  دیده می‌شود.

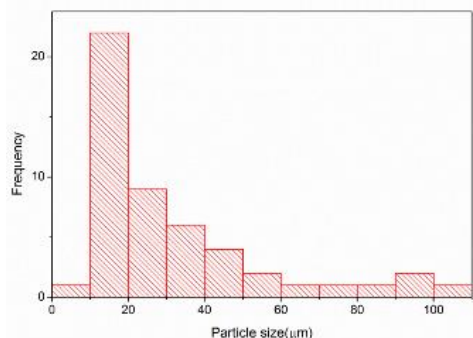
استفاده شده است. به کمک نرم افزار پردازش تصویر image J هیستوگرام اندازه ذرات و تخلخل نشان داده شده است. نمودار قرمز رنگ برای اندازه ذرات و نمودار آبی رنگ برای نشان دادن توزیع اندازه حفرات یا همان تخلخل می باشد (شکل ۸).

عکس برداری را بر سطحی که با کاغذ صافی در تماس بوده بدون شست و شو بررسی نمود ولی در این سری از آزمایش ها، کاغذ صافی، از سطح زیرین کیک گل جدا نشده است و به منظور بررسی مورفولوژی سطحی ذرات، تخلخلهای موجود در سیستم و همچنین بررسی ساختار شبکه ای کامپوزیت، از آزمون SEM

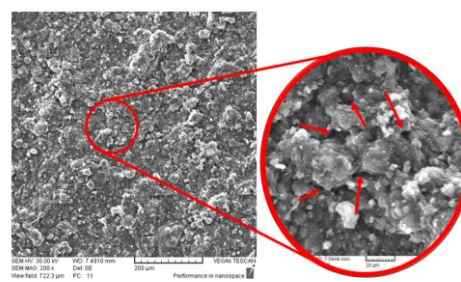
T01-G1-25- rpm 000-INCC00



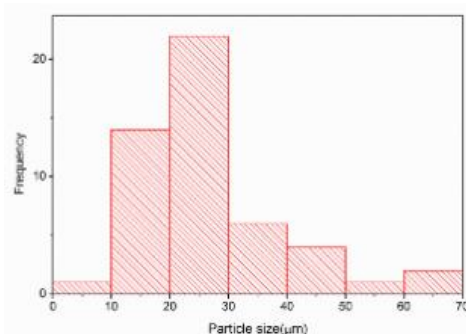
میکروگراف های حاصل از آزمون SEM مربوط به نمونه T1 حاوی آب، بنتونیت و سودناش که در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، سرعت چرخش لوله برابر با صفر و زاویه قلوب حفاری صفر درجه، در دو بزرگنمایی مختلف (۲۰۰۰ برابری و ۲۰۰ برابری)



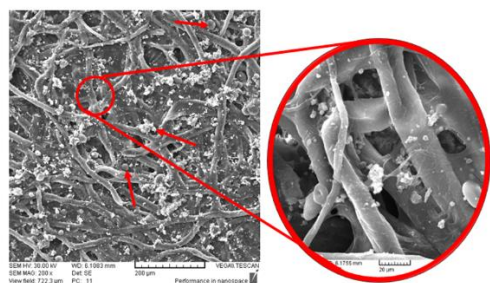
T19-G2-25- rpm 000-INCC00



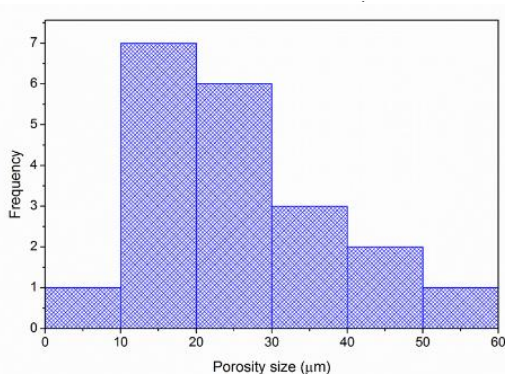
میکروگراف های حاصل از آزمون SEM مربوط به نمونه T19 حاوی آب، بنتونیت، سودناش و CMC که در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، سرعت چرخش لوله برابر با صفر و زاویه قلوب حفاری صفر درجه، در دو بزرگنمایی مختلف (۲۰۰۰ برابری و ۲۰۰ برابری)



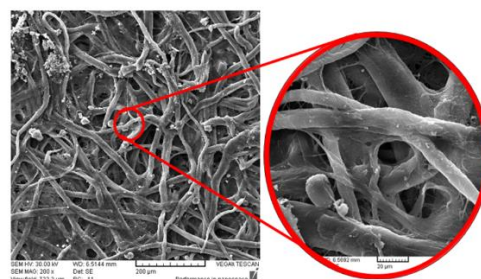
T33-G3-25- rpm 000-INCC45



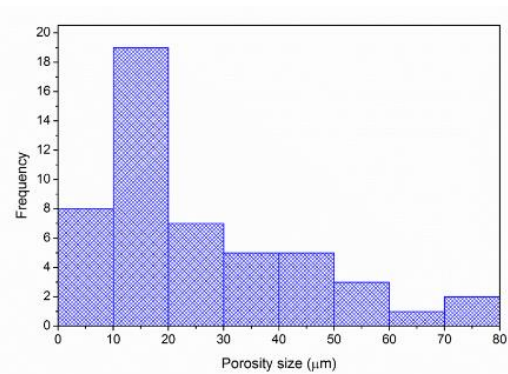
میکروگراف های حاصل از آزمون SEM مربوط به نمونه T33 در دو بزرگنمایی مختلف (۲۰۰۰ برابری و ۲۰۰ برابری)



T36-G3-50- rpm 000-INCC45



میکروگراف های حاصل از آزمون SEM مربوط به نمونه T36 در دو بزرگنمایی مختلف (۲۰۰۰ برابری و ۲۰۰ برابری)



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی در فرمولاسیون مختلف و توزیع اندازه ذرات و حفرات در هر آزمایش

Fig. 8- SEM for different formulations and particles and pore size distribution in each test

دارای اندازه ذراتی بین ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر بوده اند. این اندازه ذرات ریز باعث ایجاد ساختاری متراکم شده است. اندازه میانگین مربوط به ذرات ۳۱.۷۷ میکرومتر بوده است. انحراف معیار مربوط به این اندازه گیری ۲۳.۴۴ میکرومتر بوده است که این مقدار بزرگ به دلیل تفاوت اندازه ذرات قابل مشاهده در میکروگراف مربوط به این نمونه می باشد. این تفاوت با توجه به اختلاف بالای کوچکترین و بزرگترین ذره قابل توجیه است.

در بررسی آزمایش T1، ترکیب بدست آمده ساختاری کاملاً ذره‌ای و متراکم دارد و تخلخل‌های بسیار اندکی قابل مشاهده است که بر روی تصویر بزرگنمایی شده با فلش مشخص شده است. همانگونه که از داده‌های جدول ۴ مشاهده می‌شود، میانگین اندازه این تخلخل‌های انگشت شمار حدود ۳.۱۵ میکرومتر بدست آمد که نشان دهنده بسیار کوچک بودن این خلل و فرج می باشد. حدود نیمی از ذرات اندازه گیری شده

جدول ۳- خلاصه‌ای از نتایج مرتبط با آزمایش‌های استاتیکی

Table 3- Static tests results

ردیف	نام آزمایش	معادل دینامیکی	دمای آزمایش	مارش فانل	وزن گل	کیک گل دینامیکی	کیک گل استاتیکی	فیلترت در ۷/۵ دقیقه	فیلترت در ۳۰ دقیقه	عرض از مبدأ	شیب نمودار
	واحد		°C	sec	gr/ml	mm	mm	cc	cc	q0	$A\sqrt{c}$
۳۸	T1s	T1	۲۵	۲۸.۰۰	۱.۰۱۷	۱.۸۰	۲.۲۶	۱۱.۴۰	-		
۳۹	T2s	T3	۵۰	۲۸.۲۰	۱.۰۰۷	۱.۵۸	۲.۲۶	۱۳.۴۰	-		
۴۰	T3s	T5	۷۵	۲۳.۷۰	۱.۰۱۸	۳.۰۰	۲.۴۰	۱۲.۸۰	-		
۴۱	T4s	T19	۲۵	۱۵۷	۱.۰۳۰	۳.۴۰	۲.۷۰	۱۱.۲۰	۲۲.۶۰	۳.۷۷۵۹	۳.۲۰۶۳
۴۲	T5s	T21	۵۰	۱۵۶	۱.۰۳۶	۴.۲۰	۲.۸۰	۱۱.۶۰	۲۲.۶۰	۳.۸۳۹۷	۳.۲۱۷۷
۴۳	T6s	T23	۷۵	۱۵۴	۱.۰۳۵	۴.۳۰	۳.۱۰	۱۲.۰۰	۲۳.۲۰	۴.۲۶۷۶	۳.۲۵۹۴
۴۴	T7s	T35	۲۵	۲۵.۸۷	۱.۰۰۸	۰.۱<	۱.۳۰	۱۴.۲۰	۱۹.۲۰	۱۱.۱۳۶	۱.۴۸۴
۴۵	T8s	T38	۵۰	۲۲.۳۰	۱.۰۱۰	۰.۱<	۱.۴۰	۱۰.۰۰	۱۸.۰۰	۴.۷۲۶۹	۲.۲۳۱۲
۴۶	T9s	T39	۷۵	۱۹.۳۵	۱.۰۰۲	۰.۱<	۱.۱۸	۱۴.۰۰	۲۲.۶۰	۷.۲۹۶۸	۲.۶۴۴۵
۴۷	T10s	T42	۷۵	۱۹.۲۰	۱.۰۱۰	۰.۱<	۰.۷۲	۱۱.۰۰	۱۶.۸۰	۶.۶۲۴	۱.۷۹۶۸

جدول ۴- اطلاعات آماری اندازه ذرات و تخلخل در آزمایش‌های منتخب

Table 4- Statistical information for particles and porosity in selected tests

نمونه	ویژگی نمونه	تعداد ذرات اندازه گیری شده	میانگین اندازه (μm)	انحراف معیار (μm)	بزرگترین اندازه (μm)	کوچکترین اندازه (μm)
T1	ذرات	۵۰	۳۱.۷۷	۲۳.۴۴	۱۰۱.۱۰	۸.۳۳
T19	ذرات	۵۰	۲۹.۴۴	۱۱.۸۱	۶۳.۱۱	۹.۰۵
T33	ذرات	۳۰	۲۴.۴۴	۶.۸۶	۳۸.۹۹	۱۴.۱۴
	تخلخل	۲۰	۲۵.۴۱	۱۱.۱۶	۵۱.۲۱	۶.۳۹
T36	تخلخل	۵۰	۲۵.۳۰	۱۷.۸۰	۷۱.۴۰	۵.۸۹

کامپوزیت باز هم ذره‌ای است با این تفاوت که تعداد حفرات موجود بر روی ساختار افزایش یافته است. اندازه میانگین این حفرات برابر با ۳.۲۹ میکرومتر بدست آمده است که اختلاف چندانی با اندازه حفرات بدست آمده در نمونه T1 نداشته است.

آزمایش T19 که حاوی آب، بنتونیت، سوداوش و CMC که در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، سرعت چرخش لوله برابر با صفر و زاویه فلپ حفاری صفر درجه بدست آمده است. علیرغم حضور CMC در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در گروه دوم، ساختار

در این نمونه، توزیع اندازه ذرات بدست نیامده و صرفاً میانگین اندازه این ذرات برابر با ۳۲.۱۴ میکرومتر بدست آمده است. هر یک از آزمایش‌های انجام شده با دستگاه فیلتر پرس استاندارد، معادلی در آزمایش‌های دینامیکی داشتند. در شکل ۹ مقایسه‌ای بین دو سری از این آزمایش‌ها انجام شده است.

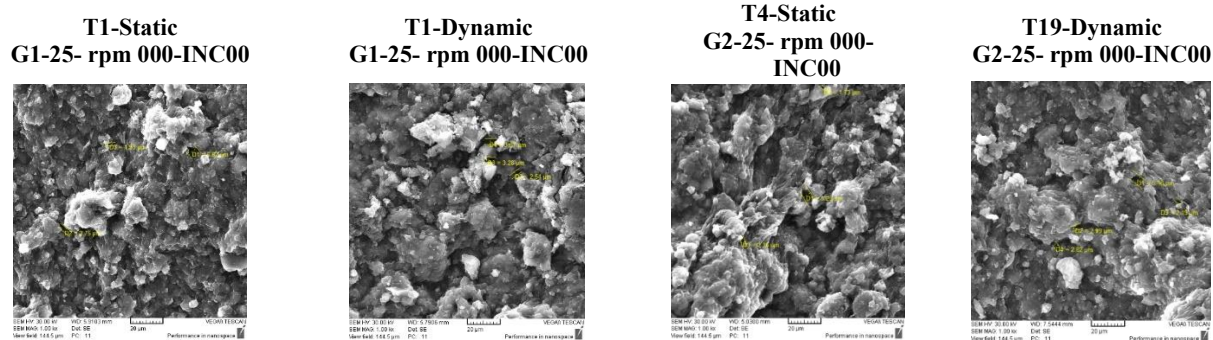
در طول آزمایش‌ها، کیک گل ناشی از شرایط دینامیکی، کاملاً شکل گرفته بود و نیازی به شستشو نداشت ولی به دلیل عدم وجود مرز مشخصی بین کیک گل تشکیل شده در شرایط استاتیکی، نیاز به شستشو دیده می‌شد. اثرات این شستشو در آزمایش‌های استاتیکی به خصوص در زمان استفاده از پلیمرها به خوبی مشهود است.

از مهمترین علت‌ها برای ترد شدن و شکسته شدن کیک گل، خشک شدن سطح کیک گل به مرور زمان است. این در حالیست که کیک گل دینامیکی به مرور زمان خشک شده و ساختارش را حفظ نموده است. خشک شدن کیک گل و آماده شدن آن برای عکس الکترونیکی باعث خروج ذرات آب از پایین کیک به سطح آن خواهد شد. خشک شدن و لزوم خروج ذرات آب از سطح بالایی آن این اندازه‌ها را ممکن است دچار تغییراتی نماید. به عنوان یک قاعده کلی سطح کیک گل دینامیکی مسطح‌تر از استاتیکی است (شکل ۱۰).

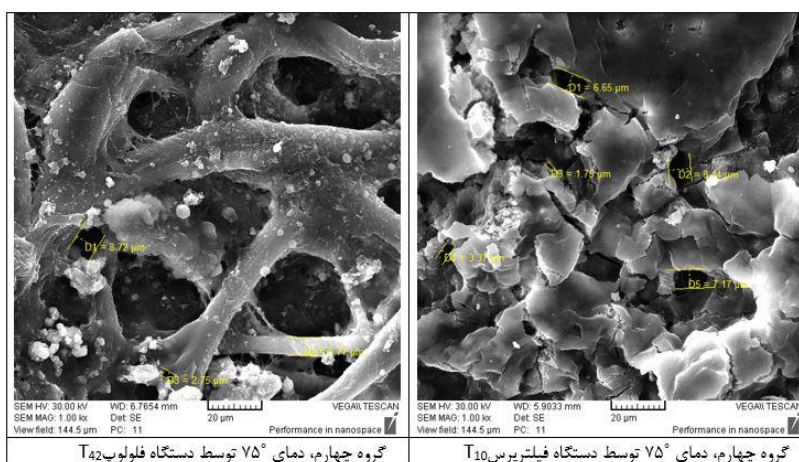
عمده اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر است و توزیع اندازه ذرات نسبت به نمونه T1 نرمالتر و باریکتر می‌باشد. اندازه میانگین مربوط به ذرات در این نمونه برابر با ۲۹.۴۴ میکرومتر بوده است. همچنین انحراف معیار مربوط به این اندازه گیری ۱۱.۸۱ میکرومتر بوده است که کاهش این مقدار به معنی کمتر بودن اختلاف اندازه ذرات نسبت به نمونه T1 می‌باشد. این کمتر بودن اختلاف را می‌توان از تفاوت کمتر اندازه ذرات بزرگترین و کوچکترین ذره اندازه گیری شده دریافت. با توجه به این نتایج افزایش تعداد خلل و فرج در ساختار مربوط به این نمونه نسبت به نمونه T1 قابل توجیه است. در واقع در نمونه T1 به دلیل اختلاف بیشتر بین اندازه ذرات، خلل و فرج بوجود آمده بین ذرات بزرگ توسط ذرات کوچکتر پر شده و ساختاری متراکم ایجاد نموده است. اما با افزودن CMC به ساختار ماده (نمونه T19) به دلیل آنکه عمده ذرات دارای اندازه ذرات نزدیک به هم بوده‌اند، خلل و فرج بین ذرات پر نشده و بنابراین حضور CMC باعث کاهش تراکم ساختار کامپوزیت شده است.

در آزمایش T33، وجود ذرات نسبتاً بزرگ (کلوخه) در کنار الیاف کاغذ صافی قابل مشاهده است. اندازه قطر الیاف تقریباً در یک محدوده بوده و به طور میانگین برابر با ۱۹.۲ میکرومتر بوده است. اندازه ذرات میانگین ذرات با توجه به افزوده شدن مواد بیشتری به سیستم کاهش یافته است. به نسبت کاهش اندازه ذرات، انحراف معیار محاسبه شده در این نمونه نیز کمتر شده است. اما تخلخل‌های نسبتاً بزرگ قابل مشاهده در این تصویر اندازه متوسطی برابر با ۲۵.۴۱ میکرومتر و انحراف معیاری برابر با ۱۱.۱۶ میکرومتر داشته است. برخی از این میکروتخلخل‌ها توسط ذرات موجود در سیستم پر شده است که این تخلخل‌های پر شده توسط فلش‌های قرمز رنگ بر روی تصویر مشخص شده‌اند. این پر شدن حفرات توسط ذرات می‌تواند منجر به افزایش تراکم ساختار شبکه در این نمونه‌ها شود که این افزایش تراکم ساختار به نوبه خود بر خواص نهایی کامپوزیت تاثیر بسزایی خواهد داشت.

میکروگراف حاصل از نمونه T36 حاوی اجزای موجود در نمونه T33 به علاوه باریت است که در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش لوله برابر با صفر و زاویه فلوپ حفاری ۴۵ درجه بدست آمده است. تعداد ذرات قابل مشاهده در شکل به صورت چشمگیری کاهش یافته ولی همچنان به صورت کولخه در سیستم وجود دارد. به دلیل انگشت شمار بودن تعداد این ذرات



شکل ۹- تصویر برداری SEM نمونه‌های T1 و T4 استاتیکی، T1 و T19 دینامیکی  
Fig. 9- SEM for T1 and T4 (static) and T1 and T19 (Dynamic)



شکل ۱۰- تصویر برداری SEM نمونه‌های T10 استاتیکی، T42 دینامیکی  
Fig. 10- SEM for T10 (static) and T42 (Dynamic)

در شکل زیر توزیع اندازه حفرات را در سه دمای آزمایش، در حالی که زاویه فلولوپ ۴۵ درجه و چرخش رشته حفاری وجود نداشت، نشان داده شده است. با افزایش دما، توزیع اندازه حفرات تغییر پیدا خواهد کرد. هر چند در حرکت از دمای ۲۵ به ۵۰، بیشترین فراوانی در بازه ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر وجود دارد ولی در ۵۰ درجه اندکی رشد در ماکزیمم اندازه ذرات مشاهده شده و فراوانی اندازه ذرات حالت یکنواخت تری را به خود خواهد گرفت. در حرکت از ۵۰ تا ۷۵ درجه، فراوانی حفرات ۲۰ تا ۳۰ میکرون، به حداکثر مقدار خود خواهد رسید و یکنواختی توزیع از ۴۰ تا ۷۰ میکرون برابر خواهد بود (شکل ۱۲).

نمونه ای از توزیع اندازه ذرات برای سه گروه مختلف در شکل زیر نشان داده شده است. هرچند در گروه یک، ذرات معدنی بنتونایت نقش کلیدی را بر عهده داشتند، رفته رفته با افزایش سهم مواد پلیمری، سایز متوسط ذرات افزایش خواهد یافت (شکل ۱۳).

## ۲-۳- نقش پارامترهای کلیدی آزمایش بر خواص کیک گل

### و گرانروی سیال

جهت بررسی بیشتر اثر دما بر روی ساختار شبکه، نمونه T30 و T26 مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۱).

نمونه T30 ذرات از حالت کلوخه خارج شده و با اندازه ذراتی بسیار ریز در تمام سطح کیک گل پخش شده‌اند. با افزایش دما یکنواختی سطح کیک گل کاسته شده و تجمعات ذرات شکسته‌اند.

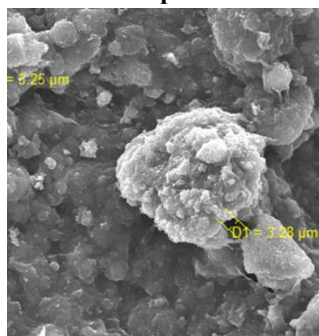
با افزایش دما از ۲۵ درجه سانتیگراد، به دلیل پر نشدن حفرات موجود در ساختار توسط ذرات، کیک گل تولیدی کاملاً متخلخل و غیر متراکم بوده و این ساختار متخلخل و پر از حفره بر روی خواص نهایی سیستم اثرگذار خواهد بود.

با افزایش دما، ضخامت کیک گل در نمونه‌های با rpm و بدون rpm افزایش یافته است. همچنین در بررسی گرانروی، با افزایش دما مقدار گرانروی کاهش می‌یابد و سیر نزولی دارد و این مقدار کاهش از دما ۲۵ به ۵۰ به نسبت ۵۰ به ۷۵ با شیب تندتری انجام می‌شود.

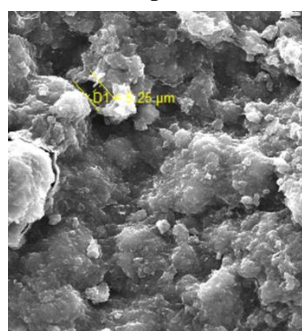
زوایای صفر و نود درجه، مشاهده می‌شود که با افزایش دما، ضخامت کیک گل در نمونه‌های با و بدون چرخش رشته حفاری افزایش یافته است که در نمونه‌های با چرخش رشته بالا به مراتب ضخامت کیک گل بیشتری وجود دارد. در زاویه نود درجه‌ی گروه اول مشاهده می‌شود که با افزایش دما، ضخامت کیک گل در نمونه‌های با و بدون چرخش رشته حفاری افزایش یافته است که در نمونه‌های با چرخش رشته بالا به مراتب ضخامت کیک گل بیشتری وجود دارد. تاثیر سی‌ام‌سی به وضوح مشخص است، سی‌ام‌سی خاصیت چسبندگی بالایی دارد و ضخامت کیک گل نسبت به حالت عدم وجود سی‌ام‌سی، بیشتر می‌شود. در فرمولاسیون سوم، تغییرات ویسکوزیته در زوایای مختلف تفاوت چندانی ندارد.

با افزایش دما، ضخامت کیک گل در نمونه‌های با و بدون چرخش رشته حفاری افزایش یافته است که در نمونه‌های با چرخش رشته بالا، به مراتب ضخامت کیک گل بیشتری وجود دارد. در مقایسه بین حالتی که رشته حفاری دارای چرخش 110 rpm بوده است نسبت به حالتی که رشته حفاری دارای چرخش نبوده است، ضخامت کیک گل در تمام دماهای متناظر افزایش داشته است. افزایش دما باعث افزایش ضخامت کیک گل در حالات با و بدون چرخش رشته حفاری شده است. (شکل ۱۴) می‌توان گفت در بین حالات مختلف این آزمایش‌ها، بیشترین ضخامت کیک گل برای حالتی است که زاویه صفر درجه و رشته حفاری دارای سرعت 110 rpm بوده است. کمترین ضخامت کیک گل، در زاویه ۹۰ درجه با حالت بدون چرخش رشته حفاری بوده است چون کاغذ فیلترت در قسمت بالای لوله قرار گرفته است.

T26-G2-25- rpm110-INC00



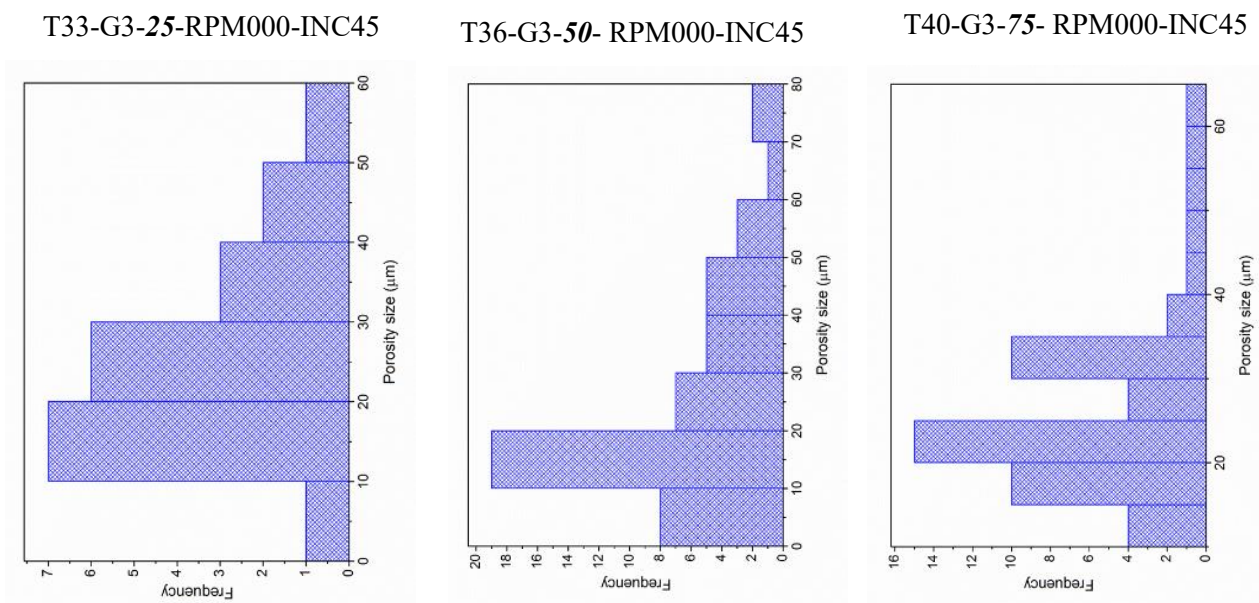
T30-G2-75- rpm110-INC00



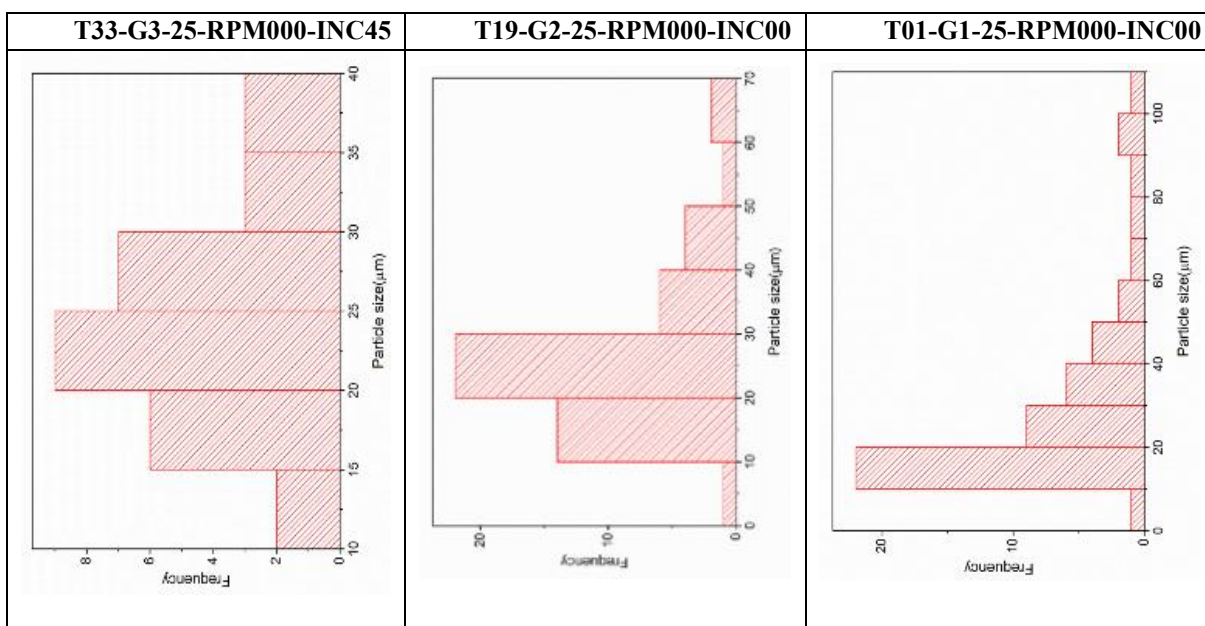
اندازه تخلخل	تعداد ذرات اندازه گیری شده	میانگین اندازه ذرات (μm)	انحراف معیار (μm)	بزرگترین اندازه ذره (μm)	کوچکترین اندازه (μm)
T26	۲۰	۲۵.۴۱	۱۱.۱۶	۱۵.۲۱	۶.۳۹
T30	۵۰	۲۹.۷۲	۱۰.۹۷	۶۱.۴۹	۱۲.۹۴

شکل ۱۱- بررسی نقش دما در شکل گیری کیک گل در عکس های SEM و مقایسه نتایج آماری

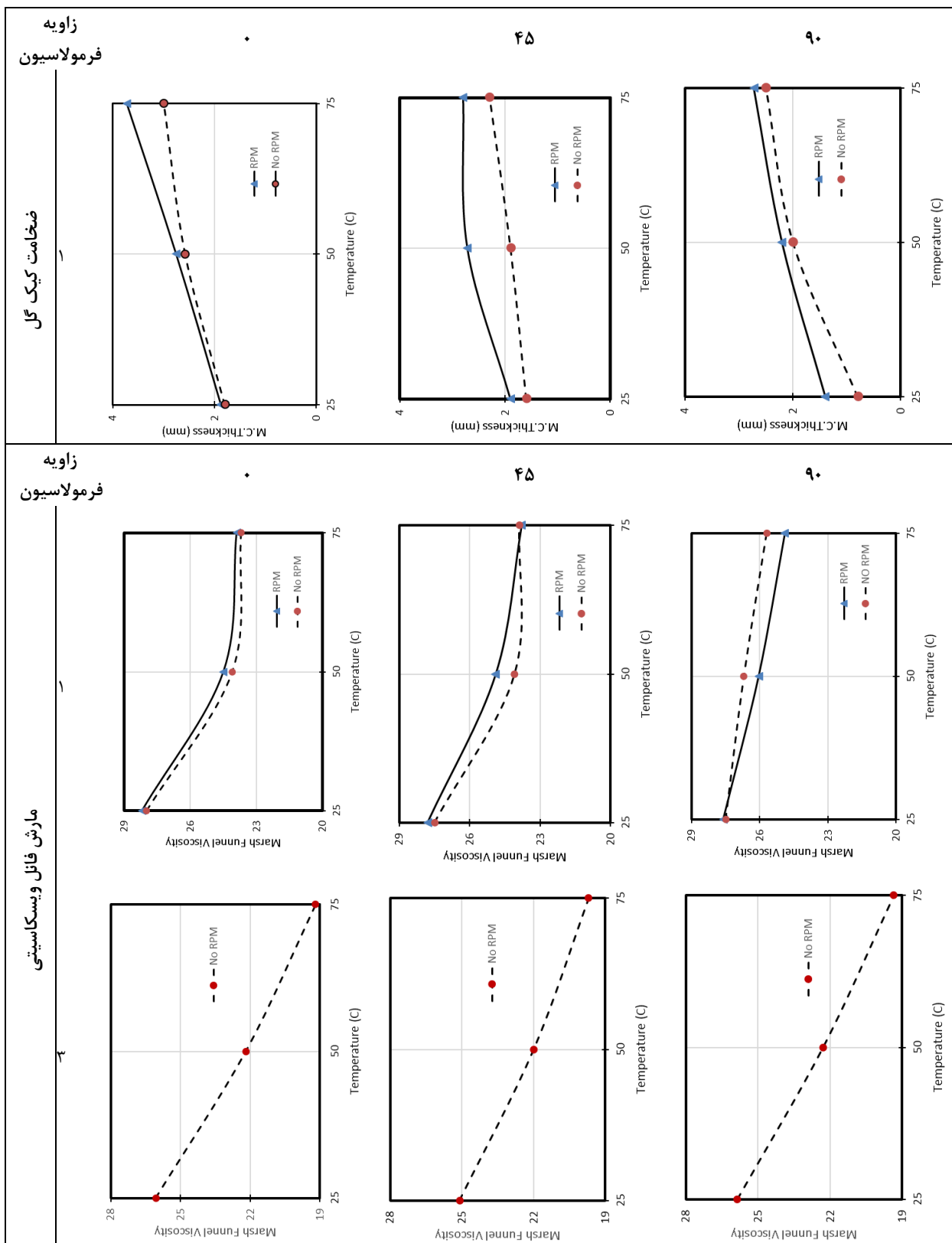
Fig. 11- The effect of temperature on mud cake formation in SEM and comparing the results



شکل ۱۲- توزیع اندازه حفرات با توجه به نقش دما در سه آزمایش منتخب  
 Fig. 12- Pore size distribution based on the temperature at three selected tests



شکل ۱۳- مقایسه توزیع اندازه ذرات در سه گروه سیال مورد آزمایش  
 Fig. 13- particle size distribution in three selected test series



شکل ۱۴- اثر دما و زاویه چاه و سرعت چرخش رشته حفاری بر ضخامت کیک گل و مارش فانل ویسکاسیتی

Fig. 14- The effect of temperature, inclination, and rotation speed on mud cake thickness and marsh funnel viscosity

#### ۴- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه، ساخت دستگاهی آزمایشگاهی برای تشکیل کیک گل در شرایط دینامیکی بوده است. در مطالعه استاتیکی و دینامیکی فیلتراسیون سیال حفاری و تشکیل کیک گل تلاش شد تا اثر پارامترهایی چون دما، چرخش رشته حفاری و زاویه در چهار گروه مختلف سیال حفاری مورد بررسی قرار گیرد. محل قرار گیری کاغذ صافی در تمام آزمایش ها، ثابت و در قسمت بالایی دیواره چاه بوده است. با بررسی و تحلیل عکس های میکروسکوپ الکترونیکی، ضخامت کیک گل، حجم صاف آب خروجی در لحظات اولیه و در طول آزمایش های انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:

- افزایش دما باعث افزایش ضخامت کیک گل و کاهش گرانروی سیالات مورد مطالعه شد. روند کلی افزایش ضخامت با افزایش دما، در آزمایش های استاتیکی خطی با شیب ملایم است در حالیکه در آزمایش های دینامیکی منحنی وار بوده است. اغماض از این پارامتر، سبب بروز مشکلات عملیاتی خواهد شد.
- در زوایای آزمایش شده، چرخش هم مرکز رشته حفاری و فضای دالیزی، باعث افزایش ضخامت کیک گل و کاهش خلل و فرج موجود بر سطح آن در حالت دینامیکی شده است.
- انسجام سطح کیک گل در آزمایش های دینامیکی به گونه ای است که شستن سطح آن تاثیری مخرب بر سطح کیک گل نخواهد داشت، این در حالی است که سطح کیک گل در آزمایش های استاتیکی به نحوه شستشو بسیار وابسته است. بعد از خشک شدن، بر خلاف کیک گل های استاتیکی سطح کیک گل های دینامیکی بسیار منظم و ساختاریافته بود.
- در بررسی اثر دما بر آزمایش های فیلتراسیون استاتیکی در گروه های مختلف سیال، رفتار نمودارهای حجم صاف آب خروجی در زمان ۷/۵ دقیقه بسیار شبیه رفتار آن در زمان ۳۰ دقیقه بود.

- افزودن کربوکسی متیل سلولز به گل بنتونایتی باعث افزایش تعداد خلل و فرج در سطح نمونه های خشک شده می شود.

- استفاده از مواد پلیمری کنترل کننده خواص فیلتراسیون به جای بنتونایت، سبب کاهش ضخامت

کیک گل خواهد شد. این در حالی است که افزودن مواد پلیمری به گل بنتونایتی موجب افزایش ضخامت کیک گل در دو حالت استاتیکی و دینامیکی خواهد شد.

- استفاده از CMC در ترکیب با بنتونایت باعث کاهش آسیب به سازند می شود و می تواند به عنوان یک استراتژی در طراحی سیال حفاری استفاده شود. پیشنهاد می شود نحوه تاثیر پلیمرهایی چون CMC بر عملکرد بنتونایت در شرایط دینامیکی بیشتر مطالعه شود.
- احتمال تشکیل کیک گل در قسمت های اطراف چاه، با افزایش زاویه آن از حالت عمودی به حالت افقی، کاهش خواهد یافت.
- حجم صاف آب در گل های بنتونایتی آزمایش شده در این آزمایش نسبت به سایر فرمولاسیون های استفاده شده، بیشتر بوده است به عبارتی دیگر میزان صدمه وارده از طرف آن به سازند نسبت به سایرین بیشتر بوده است. این در حالی است که فرمولاسیون سوم بیشترین حجم ورودی به سازند را در لحظه اول داشته است.
- در سه فرمول بررسی شده، سیال بنتونایتی مخلوط با کربوکسی متیل سلولز کمترین حجم صاف آب خروجی و در نتیجه کمترین آسیب وارده به سازند را داشته است.
- در فرمولاسیون چهارم، نقش مخرب نمک بر تخریب عملکرد پلیمرهای کنترل کننده خواص فیلتراسیون در ته نشست مواد وزن افزا و پل زنده به خوبی مشاهده شد.
- پیشنهاد می شود روند تاثیر دما و فشار در تغییر ضخامت کیک گل توامان مورد توجه قرار گیرد و از حل عددی معادلات برای مدل سازی این فرآیند توجه شود.

#### ۵- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشد.

#### ۶- قدردانی

از داوران محترم برای نظرهای دقیق و بازخوردهای سازنده ای که به بهبود و ارتقاء کیفی این مقاله کمک شایانی

Conditions. In *SPE California Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers.

- [12] Civan, F. (2007). Chapter 18-Drilling mud filtrate and solids invasion and mudcake formation, Reservoir Formation Damage.
- [13] Farshbaf Zinati, F., Farajzadeh, R., & Zitha, P. L. J. (2007, January). Modeling and ct scan study of the effect of core heterogeneity on foam flow for acid diversion. In *European Formation Damage Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- [14] Kabir, M. A., & Gamwo, I. K. (2011). Filter cake formation on the vertical well at high temperature and high pressure: computational fluid dynamics modeling and simulations. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 7(2), 146-164.

کردند، صمیمانه تشکر میکنیم. همچنین از سردبیر محترم به خاطر حمایت‌ها و راهنمایی‌های مفیدی که در طول فرایند بازبینی انجام دادند، سپاسگزاریم.

#### ۷- منابع و مراجع

- [1] Caenn, R., Darley, H. C., & Gray, G. R. (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Gulf professional publishing.
- [2] Williams, M. (1940). Radial filtration of drilling muds. *Transactions of the AIME*, 136(01), 57-70.
- [3] Prokop, C. L. (1952). Radial filtration of drilling mud. *Journal of Petroleum Technology*, 4(01), 5-10.
- [4] Ferguson, C. K., & Klotz, J. A. (1954). Filtration from mud during drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 6(02), 30-43.
- [5] Stamatakis, K., & Tien, C. (1993). A simple model of cross-flow filtration based on particle adhesion. *AIChE journal*, 39(8), 1292-1302.
- [6] Liu, M., & Guo, T. (2001). Preparation and swelling properties of crosslinked sodium polyacrylate. *Journal of Applied Polymer Science*, 82(6), 1515-1520.
- [7] Salarieh, M., & Kharat, R. (2000). Effect of drispac polymer on the rheological behaviour of drilling mud.
- [8] VAKILI, M. H., & ZARASVANDNIA, S. (2016). The Study of the Biopolymer-Surfactant Mixture Effect on Performance of Water Based Drilling Mud.
- [9] Yousefirad, S., Azad, E., Dehvedar, M., & Moarefvand, P. (2019). The effect of lost circulation materials on differential sticking probability: Experimental study of prehydrated bentonite muds and Lignosulfonate muds. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 736-750.
- [10] Outmans, H. D. (1963). Mechanics of static and dynamic filtration in the borehole. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(03), 236-244.
- [11] Ershaghi, I. (1980, January). Modeling of Filter Cake Buildup Under Dynamic-Static