



Construction of Pressurized Chamber to Simulate the Bottom Hole Condition for Laser Radiation

Ali Forouzandeh¹, Siavash Riahi^{*1,2} and Ali Nakhaee^{1,2}

1. Department of Petroleum Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran

2. Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

riahi@ut.ac.ir

DOI:10.22078/pr.2023.5104.3266

Received: May/19/2023

Accepted: October/16/2023

Introduction

Throughout history, two main methods were used for drilling wells, which included impact drilling and rotary drilling. The basic drilling technology currently used by the oil industry was developed more than 100 years ago when rotary drilling surpassed cable drilling as the standard method for reaching oil and gas formations [1]. Conventional drilling, in turn, has many defects that lead to many drilling problems during the operation. Reducing costs and preventing common and well-known problems in the drilling industry can be a great strength in increasing the productivity of the oil and gas industry [2,3]. During the years of extensive research on the effect of high thermal stress of high power laser on the mechanical properties and resistance of stones, experiments have been designed. From the results of the tests, it appears that the temperature-dependent modulus of elasticity such as conductivity, diffusion and heat capacity, as well as other properties in the rock, undergo drastic changes. The results show a sharp increase in porosity and permeability in sandstones due to the high thermal conductivity of sandstone compared to other samples, which is lower in carbonate rock due to thermal conductivity. But the resistance of the stones showed a significant decrease in all samples due to the formation of cracks [4-8]. In 2020, Bazargan, Chamankhah and Forouzandeh took an important step in the field of solving operational problems of drilling with the help of laser and by analyzing the development of cracks in

the rocks and the change in the fracture pressure of the formation, using the managed pressure drilling method to control the drilling conditions using this technology [9]. As it was reviewed in the above documents and articles, all the efforts made in the direction of the growth and development of the nascent thinking of using laser in drilling operations are only in the form of laboratory studies and non-field applications, and the researches made are only in the direction of form that the mentioned knowledge base has been done.

Materials and Methods

Pressurized Chamber Construction

The built pressurized chamber has unique capabilities to simulate the conditions of the bottom hole in drilling for laser radiation on the rock and checking and recording its effects. This chamber enables us to create the conditions of pressure and temperature of a drilling well in such a way that the laser beam can pass through it and reach the stone trapped inside. The ability to place any type of drilling fluid under pressure and the ability to circulate the drilling fluid inside the chamber are among other features of this chamber. It is worth noting that so far all the tests performed by different lasers on different samples were performed only under atmospheric pressure conditions and without the presence of temperature and pressure conditions at the bottom of the well, and therefore, there was never

any effect of temperature and pressure in the conditions of laser radiation and fracture. The rock and the presence of pressurized drilling fluid have not been investigated.

This chamber contains several components and accessories including body, location of stone sample and sealing O-ring, compartment cover, temperature and pressure sensors, safety valve and drain valve, glass for the window to pass the laser beam, glass retaining flange, O-rings and glass gaskets, connecting nut and bolts, accordion base for holding and adjusting the stone sample and data logger.

Result and Discussion

As it can be seen from the process of work, the first step in performing the tests under pressure is the initial comparison between these tests with the usual

tests performed at atmospheric pressure, so that the difference in the results obtained by applying pressure can be extracted. Therefore, we have based the tests on this difference. Therefore, in the first test for each sample, we have performed a test at atmospheric pressure without the presence of a main cap. The time required for sample failure was investigated in these tests. During this test, only the stone sample was placed on the adjustable stand inside the chamber and after setting the appropriate focal distance under the laser collimator, the laser device was started and the sample was exposed to laser radiation. The rock breaking time was calculated from the moment the laser radiation started, and it was observed that the dry carbonate rock breaks and collapses within 17 to 20 seconds (Fig. 1). The marked area on the graph indicates the laser irradiation time on the stone (Fig. 2).



Fig. 1 Right) Intact Limestone dry sample. Left) Lasered Carbonate dry sample.

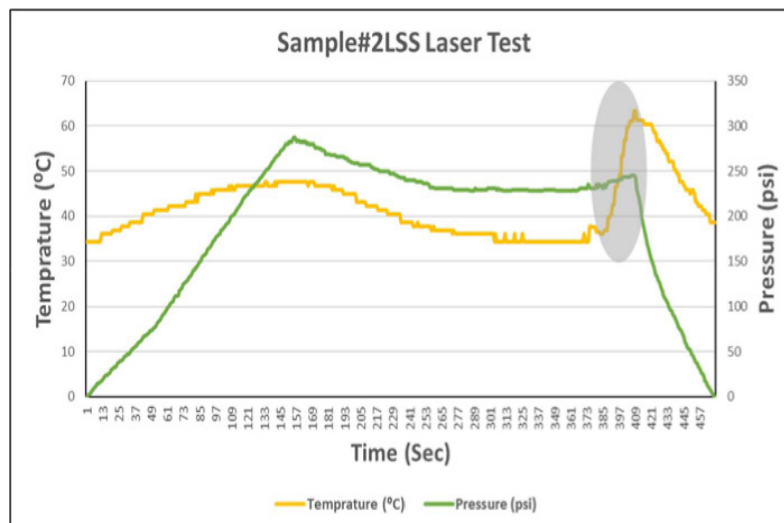


Fig. 2 Pressure & Temperature Vs. Time Chart extracted from Data logger during test.

As shown on the diagram, the chamber is pressurized according to the test procedure. After raising the pressure to the desired range (about 220-230 psi) and preparing the test conditions, the laser is irradiated into the chamber and the rock surface. This radiation for the sample of dry carbonate rock at atmospheric pressure was estimated to be between 17 and 20 seconds, and by repeating the test under pressure, this value was estimated to be about 5 seconds more for the conditions under pressure (Fig. 3). According to the numbers obtained from the graph above, an increase in about 24 degrees Celsius has been recorded for the temperature inside the chamber and an increase equal to 10 psi for the pressure inside the chamber. After performing the above tests and in order to determine the extent of laser effect on rock resistance and also to determine the compressive moduli of rock before and after laser radiation from triaxial stress tests in order to measure the considered parameters and also to draw the stress to strain diagram. At this stage, the basic level was

considered to analyze and measure developments. The base surface in this part of the changes is drawn from an intact rock sample before irradiation to the sample subjected to radiation and thermal stress. Therefore, an intact stone sample that is in harmony with the irradiated sample in terms of material and specific dimensions is considered as a measuring criterion. Therefore, the physical and mechanical parameters of the stone were performed in the rock mechanics laboratory for both intact and irradiated samples by triaxial stress test (Table 1). As expected, the change and reduction in the compressive moduli of the rock after laser irradiation and the reduction of the compressive strength, which can lead to an increase in the penetration rate of the drilling and a significant reduction in the drilling time, have occurred. In other words, a decrease in these parameters includes a decrease in the rock's resistance to impact and pressure, in which case the drill bit will encounter an unconsolidated rock, which will be much easier to crush.



Fig. 3 Right) Intact Limestone dry sample. Left) Lased Carbonate dry sample under Pressure.

Table 1 Mechanical Properties of Limestone sample before and after laser irradiation.

Type	Lateral Press.	Test Time	Elast. Modulus G (MPa)	Poisson's Ratio (v)	Bulk Modulus (K)	Young's Modulus E (MPa)	Length Diff. (mm)	Vol. Diff. (mm ³)
Limestone	30	Before Radiation	1261	0.22	1799	2800	0.499	538
		After Radiation	1035	0.22	1525	2532	0.506	520

Conclusions

1. One of the most important shortcomings of past studies is the ignoring the effect of pressure, temperature and type of drilling fluid and their effect on the final results. By designing a pressurized chamber for the first time, these defects will be solved.
2. Experiments at this stage were conducted only using air as drilling fluid and on selected rock samples of Sarvak Formation carbonate type, and low pressures were used due to some limitations.
3. The first step in carrying out the tests under pressure is the initial comparison between these tests with the common tests conducted at atmospheric pressure, so

that the difference in the results due to the application of pressure can be extracted. Therefore, we have based the tests on this difference.

4. Based on the designed tests, the carbonate rock sample was placed inside the chamber and subjected to laser radiation without the cap and at atmospheric pressure. The rock breaking time was calculated from the moment the laser radiation started, and it was observed that the dry carbonate rock breaks and collapses within 17 to 20 seconds.

5. During the main test, the sample was placed in the chamber under pressure and laser radiation was performed on it. This radiation for the sample of dry

carbonate rock at atmospheric pressure was estimated to be between 17 and 20 seconds, and by repeating the test under pressure, this value was estimated to be about 5 seconds more for the conditions under pressure. Therefore, the sample of dry carbonate rock reached the breaking stage within 25 seconds.

6. The initial charging pressure for the chamber was about 220 psi. According to the results obtained from the data logger, an increase of about 24 degrees Celsius was recorded for the temperature inside the chamber and an increase equal to 10 psi for the pressure inside the chamber.

7. After performing the radiation tests and in order to determine the extent of the laser effect on the rock resistance and also in order to determine the compressive moduli of the stone before and after the laser radiation from the triaxial stress tests in order to measure the considered parameters and also to draw the stress diagram It was used for strain.

8. The lateral pressure applied to the samples was considered to be 30 Mpa, and the results of triaxial tests were performed based on it.

9. Ultimately, as expected, the change and decrease in the compressive moduli of the rock, such as about 270 MPa in the Young's modulus or a decrease of 230 MPa in the modulus of elasticity after laser irradiation and a decrease in the compressive strength, which can increase the penetration rate of the drill and significantly reduce the time to pursue excavation, it has taken place.

References

1. Mustafaiz, S., Bjorndalen, N., Islam, M.R., (2010). Lasing into the future: potentials of laser drilling in the petroleum Industry. *Petroleum Science and Technology*, Doi: 10.1081/LFT-200034067.
2. Elahifar, B., Esmacili, A., Prohaska, M., Thonhauser, G., 2011. an energy based comparison of alternative drilling methods. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Oman*, SPE/IADC 148166.
3. Xiaofeng Yang, Zhou, X., Zhu, H., Zhou, J., Li, Y., (2020). Experimental investigation on hard rock breaking with fiber laser: surface failure characteristics and perforating mechanism. *Advances in Civil Engineering, Hindawi*. Doi: 10.1155/2020/1316796.
4. Agha, K.R., Belhaj, H.A., Mustafaiz, S., Bjorndalen, N., Islam M.R., (2004). Numerical investigation of the prospects of high energy laser in drilling oil and gas wells. *Petroleum Science and Technology Vol. 22, Nos. 9 & 10*, pp. 1173–1186. Doi: 10.1081/LFT-120034213.
5. Bjorndalen, N., Belhaj, H.A., Agha K.R., Islam M.R., (2003). Numerical investigation of laser drilling. *SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting held in Pennsylvania*. SPE-84844.
6. Graves, R.M., Batarseh, S., Parker, R.A., Gahan, B.C., (2002). Temperature induced by high power lasers: Effects on reservoir rock strength and mechanical properties. *SPE/ISRM Annual Technical Conference and Exhibition held in Texas*. SPE/ISRM-78154.
7. Gahan, B.C., Batarseh, S., Siegfried, R.W., (2002). Improving gas well drilling and completion with high energy lasers. Report in *Gas Technology Institute*. Des Plaines, Illinois 60018, USA. www.Gastechnology.org.
8. Zhiyue Xu, Reed, C.B., Parker, R.A., Graves, R.M., (2004). Laser spallation of rocks for oil well drilling. *23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. Doi: 10.2351/1.5060237.
9. Bazargan, M., Chamankhah, S., Forouzandeh, A., (2020). Experimental and numerical simulation of laser-assisted drilling in kangan formation. *82nd EAGE Annual Conference & Exhibition*. Doi: 10.3997/2214-4609.202010595.

ساخت محفظه تحت فشار به منظور شبیه سازی شرایط ته چاهی جهت تابش لیزر

علی فروزنده^۱، سیاوش ریاحی^{۲*} و علی نخعی^۳

۱- دپارتمان مهندسی نفت، واحد پردیس بین الملل کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

۲- انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

چکیده

امروزه یکی از روش های قابل قبولی که نظر بسیاری از مهندسين را در زمینه تکنولوژی های جدید حفاری به خود جلب کرده است، حفاری چاه های نفت و گاز با استفاده از تکنولوژی لیزر می باشد که دارای مزایای بسیاری نسبت به روش های قدیمی حفاری می باشد. هر چند آزمایش های متعددی در این زمینه صورت گرفته است. از این رو شبیه سازی شرایط آزمایشگاهی ته چاهی برای چنین عملیات پیچیده ای همچون روش های متداول دیگر امری ضروری به نظر می رسد که به وسیله آن قادر به ایجاد طرح و برنامه مهندسی جامع و دقیقی بمنظور انجام عملیات مذکور در مقیاس میدانی باشیم. ساخت محفظه تحت فشار آزمایشگاهی جهت شبیه سازی عملیات حفاری با کمک لیزر توانست قدمی بزرگ در راستای تکمیل و توسعه هرچه سریعتر این تکنولوژی به منظور تسهیل در امر پیچیده حفاری باشد. در مقاله حاضر با استفاده از محفظه مذکور بررسی نتایج بر روی نمونه های سنگ کربناته مورد نقد و بررسی قرار گرفت تا اثر تابش لیزر در شرایط ته چاهی بر روی این نمونه از سنگ مورد بررسی قرار گیرد. از این رو نمونه های سنگ داخل محفظه تحت فشار، تحت تابش لیزر قرار گرفته تا میزان تغییرات پارامترهایی نظیر دما، فشار، مدت زمان تابش مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. نهایتاً با بررسی تغییرات ایجاد شده در سنگ و شیشه حین و پس از تابش لیزر از منظر مکانیکی نیز مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است افزایش زمان تابش به میزان ۵ s نسبت به حالت بدون فشار و نیز افزایش 24°C در پارامتر دما داخل محفظه و نیز ۱۰ psi افزایش در فشار داخل محفظه از جمله نتایج حاصله از این آزمایش بوده است. از سویی دیگر با انجام آزمایشات مکانیک سنگی کاهش چشمگیر مدول های فشاری در قبل و بعد از تابش لیزر به وقوع پیوسته بود.

کلمات کلیدی: حفاری با کمک لیزر، گسترش ترک در سنگ، تنش حرارتی، خواص مکانیک سنگی، بهینه سازی حفاری

*مسئول مکاتبات

riahi@ut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2023.5104.3266)

مقدمه

مخازن زیرزمینی نفت و گاز در اعماق زمین وجود دارند. برای استفاده از این منابع فسیلی باید به این مخازن دسترسی پیدا کرد که حفاری چاه تنها راه است. حفاری چاههای نفت و گاز به علت ریسک بالای عملیات و خطرات موجود جز پیچیده‌ترین، دشوارترین، پرهزینه‌ترین و پر چالش‌ترین موانع توسعه یک میدان است [۱].

در طول تاریخ جهت حفر چاه‌ها از دو روش عمده بهره برده می‌شد که شامل حفاری ضربه‌ای و حفاری دورانی می‌شدند. فن آوری اساسی حفاری که در حال حاضر توسط صنعت نفت استفاده می‌شود بیش از ۱۰۰ سال پیش زمانی توسعه یافت که حفاری دوار از ابزار کابل پیشی گرفت حفاری به عنوان روش استاندارد برای رسیدن به سازندهای گاز و نفت مورد استفاده قرار گرفت. یکی از عمده‌ترین مشکلاتی که همواره با این روش همراه بوده، اتلاف زمانی ایجاد شده بواسطه حفاری گل بود. حفاری معمولی علاوه بر این، مشکلات دیگری از جمله نفوذ سیال سازند به داخل چاه و پس زدن سیال حفاری از داخل سازند بدلیل عدم ایمن‌سازی مناسب دهانه چاه را نیز تجربه می‌کرد. این امر می‌تواند مشکلات زیادی مانند فشار گیر اختلاف فشاری، هرزروی سیال حفاری، تورم و مچاله‌شدگی را باعث گردد [۲].

حفاری متداول به نوبه خود دچار نقص‌های متعددی بوده که منجر به بروز مشکلات حفاری متعددی در طول عملیات می‌شود. کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از مشکلات متداول و شناخته‌شده صنعت حفاری می‌تواند نقطه قوت بزرگی در افزایش بهره‌وری صنایع نفت و گاز باشد [۳ و ۴].

امروزه روشهای غیر متداول و جدید حفاری به جهت ایجاد حفره در مواد مختلف با درجه سختی‌های متفاوت از جمله آلیاژها تا مواد با درجه سختی بالا در دسترس می‌باشند [۵]. در تحقیق حاضر و

از میان روش حرارتی، روش حفاری با کمک لیزر موضوع بحث این تحقیق قرار گرفته تا بتوان با توسعه این تکنولوژی قدمی در جهت پیشرفت علمی اینگونه روش‌ها برداشت. استفاده از تکنولوژی لیزر در عملیات حفاری و تکمیل چاه می‌تواند با حذف برخی پارامترهای مزاحم در حین عملیات نظیر حذف‌کننده‌های حفاری و روش‌های مختلف دفع آنها و یا افزایش بهره‌وری تولیدی چاه بواسطه بهبود عملیات مشبک‌کاری به کاهش چشمگیر زمان‌های مورد نیاز حفاری کمک شایانی نماید. البته باید اشاره نمود که این تکنولوژی خود نیز محدودیت‌ها و مشکلاتی از قبیل انتقال کنده‌های حفاری از ته چاه، انتقال حرارت و تأمین انرژی لازم لیزر از سطح به ته چاه را نیز دارا می‌باشد [۳].

گاهان و همکارانش نمونه‌هایی شامل ماسه سنگ، کربناته و شیل را تحت تابش لیزر Nd:YAG پالسی با توان ۱/۶ kW قرارداده تا اثر اندازه باریکه، دفعات تکرار پالس، پهنای پالس، زمان تابش و انرژی مؤثری که می‌تواند بر انرژی منتقل‌شده به منظور شکستن و ذوب شدن و تبخیر شدن تأثیرگذار باشد را مورد بررسی قرار دهند. طی این آزمایشات مشخص گردید که میزان انرژی مخصوص با افزایش زمان تابش به سرعت روند افزایشی به خود می‌گیرد. نمونه‌های شیلی در این میان در مقایسه با سنگ‌های کربناته و ماسه سنگ کمترین انرژی ویژه مورد نیاز را به خود اختصاص دادند. زمانی که دو پارمتر تعداد تکرار و پهنای پالس افزایش پیدا می‌کرد میزان انرژی مخصوص روند کاهشی به خود می‌گرفت این در حالی بود که میزان افزایش پهنای باند نسبت به تکرار پالس در این قضیه رجحان داشت [۶ و ۷].

در طول سالیان تحقیقات گسترده‌ای روی مبحث تأثیر تنش حرارتی بالای لیزر توان بالا روی خواص مکانیکی و مقاومت سنگ‌ها آزمایشاتی را طراحی شده‌اند. از نتایج آزمایشات اینگونه برمی‌آید که

چمن خواه و همکاران قدم مهمی را در زمینه رفع مشکلات عملیاتی حفاری با کمک لیزر برداشته و با تحلیل توسعه ترک در سنگ ها و تغییر وضعیت فشار شکست سازند به بهره گیری از روش حفاری مدیریت فشاری^۲ جهت کنترل شرایط حفاری با استفاده از این تکنولوژی برداشتند. طی آزمایشات انجام شده روی نمونه های سنگ کربناته از سازند کنگان با استفاده از لیزر فیبری ۲۰ kW پالسی و شبیه سازی فرآیند به وسیله نرم افزار کامسول موفق به تحلیل افزایش پدیده گسترش ترک در سنگ شده و به واسطه آن میزان کاهش فشار شکست سازند را با استفاده از روابط عددی محاسبه نمودند. آن ها روش فشار ته چاهی ثابت^۳ از روش های حفاری مدیریت فشاری را جهت کنترل این پدیده با استفاده از سیستم بسته جریان سیال حفاری پیشنهاد کرده که به واسطه اعمال فشار جبران^۴ بتوانند این نقیصه را جبران نمایند. این پژوهش اولین قدم در راستای عملیاتی سازی این تکنولوژی به حساب می آید [۲۲ و ۲۳].

همانگونه که در اسناد و مقالات بالا مورد نقد و بررسی قرار گرفت، تمامی تلاش های صورت گرفته در جهت رشد و پیشرفت تفکر نوپای کاربرد لیزر در عملیات حفاری صرفاً به صورت مطالعات آزمایشگاهی و کاربردهای غیرمیدانی بوده و پژوهش های صورت گرفته صرفاً در جهت شکل گیری پایه دانش مذکور انجام پذیرفته است. از مهم ترین نقایص کارهای مطالعاتی گذشته عدم بررسی تاثیر فشار، دما و نوع سیال حفاری و میزان اثرگذاری آنها در نتایج نهایی می باشد. در پژوهش حاضر سعی بر آن شد تا با طراحی محفظه تحت فشار برای اولین بار این نقایص برطرف و میزان تاثیرپذیری نتایج با شبیه سازی شرایط واقعی ته چاهی مورد مطالعه قرار گیرد.

مدول الاستیسیته وابسته به دما نظیر هدایت پذیری، پخش و ظرفیت گرمایی و نیز خواص دیگر در سنگ از قبیل دستخوش تغییرات شدید می شوند. نتایج، افزایش شدیدی در تخلخل و نفوذپذیری در ماسه سنگ ها را بدلیل هدایت گرمایی بالای ماسه سنگ نسبت به نمونه های دیگر نشان می دهند که این امر در سنگ کربناته به دلیل هدایت گرمایی پایین تر می باشد. اما مقاومت سنگ ها در تمامی نمونه ها به دلیل ایجاد ترک کاهش قابل ملاحظه ای را نشان می داد [۸-۱۲].

از سوی دیگر نتایج اینگونه نشان می داد که سنگ های کربناته به دلیل هدایت پذیری گرمایی پایین تاثیرات افزایش نفوذپذیری و تخلخل را در اطراف محل تمرکز تنش حفظ نموده و به مناطق دورتر انتقال نداده که این امر در ماسه سنگ معکوس بوده و همچنین تنش حرارتی در سنگ های رسی باعث تبخیر آب میان بافتی شده که به دلیل عدم توانایی تخلیه فشار ناشی از این افزایش حجم ترک های خوبی در سنگ ایجاد کرده که باعث افزایش تخلخل و تراوایی نیز گشته است [۱۰ و ۱۵-۱۳].

آشنا و همکارانش همزمان با بخت بیدار دسته به آزمایشاتی توسط لیزر الکترون آزاد^۱ توان پایین روی نمونه های ماسه سنگی و کربناته آسماری و شیل گروه خامی انجام دادند که منجر به تأیید مطالعات همزمان آقای بخت بیدار شد. نکته مهم نتایج حاصله کنترل مناسب سنگ شیل در حین حفاری و جلوگیری از مشکلاتی نظیر تورم و ریزش بود [۱۶ و ۱۷].

از سویی دیگر برخی مدل سازی ها با استفاده از نتایج تست های آزمایشگاهی در زمینه مشبک کاری روی نمونه های سنگ کربناته انجام پذیرفت. نتایج حاکی از این امر بود که تاثیر فشار منفذی روی خروجی مدل بسیار مؤثرتر از پارامترهایی همچون فشار همه جانبه و اشباع سیال می باشد [۱۸-۲۱].

1. Free Electron Laser

2. Managed Pressure Drilling

3. Constant Bottom Hole Pressure

4. Back Pressure

محفظه تحت فشار

روش ساخت

محفظه تحت فشار ساخته شده دارای قابلیت‌های منحصر به فردی به جهت شبیه‌سازی شرایط ته‌چاهی در حفاری بمنظور تابش لیزر بر روی سنگ و بررسی و ثبت و ضبط آثار آن می‌باشد. این محفظه ما را قادر می‌سازد تا شرایط فشار و دمای یک چاه در حال حفاری را در خود ایجاد نموده به گونه‌ای که باریکه لیزر بتواند از میان آن عبور کرده و به سنگ محبوس داخل آن برسد. قابلیت قرارگیری هر نوع سیال حفاری به صورت تحت فشار و همچنین قابلیت ایجاد گردش سیال حفاری داخل محفظه از جمله دیگر قابلیت‌های این محفظه می‌باشد. نکته قابل ذکر این است که تاکنون تمامی آزمایش‌های انجام شده توسط لیزرهای مختلف بر روی نمونه‌های گوناگون صرفاً در شرایط فشار اتمسفر و بدون حضور شرایط دما و فشار ته‌چاهی انجام پذیرفته و از این رو هیچگاه اثر دما و فشار در شرایط تابش لیزر و شکست سنگ و همچنین حضور سیال حفاری تحت فشار مورد بررسی قرار نگرفته بوده است. دستگاه مذکور شامل چهار بخش اصلی بوده که اساس و شاکله آن را تشکیل می‌دهند. اساس هدف طراحی و ساخت چنین دستگاهی تلاش به جهت عملیاتی سازی تکنولوژی‌های جدید صنعت حفاری (حفاری با کمک لیزر) و کمک به صنعت حفاری به جهت پیشرفت و دستیابی به منابع عمیقتر، غنی تر و دست نیافتنی تر می‌باشد.

نحوه کارکرد این محفظه بدین گونه می‌باشد که با قراردادن نمونه سنگ داخل محفظه و تنظیم ارتفاع آن به‌منظور تمرکز نقطه کانونی کالیماتور، درب محفظه را بسته و توسط سیال حفاری مورد نظر محفظه تحت فشار قرار می‌گیرد. اکنون محفظه آماده تابش لیزر می‌باشد. با تنظیم دستگاه‌های سنجشی و ابزار دقیقی مربوطه و نیز پارامترهای

لیزر عملیات تابش لیزر و ثبت داده‌های مورد نظر قابل انجام می‌باشد. پس از انجام آزمایش با قطع دستگاه لیزر، فشار را تخلیه نموده و دریچه را به جهت بررسی نمونه تحت آزمایش باز می‌نماییم. در شکل ۱ شمایی از محفظه ساخته شده را ملاحظه می‌فرمایید.



شکل ۱ محفظه تحت فشار جهت شبیه سازی شرایط ته چاهی برای تابش لیزر در شرایط آزمایشگاهی

این محفظه شامل اجزا و متعلقات متعددی به قرار زیر می باشد:

- بدنه، محل قرارگیری نمونه سنگ و اورینگ نشت بند
- درپوش محفظه
- سنسورهای دمایی و فشاری
- شیر اطمینان
- شیر تخلیه
- شیشه جهت پنجره به‌منظور عبور باریکه لیزر
- فلنج نگهدارنده شیشه
- اورینگ و واشر درزبند شیشه
- پیچ‌های اتصال
- پایه آکاردئونی نگهدارنده و تنظیم کننده نمونه سنگ
- دیتالاگر
- مراحل تست

به جهت راه‌اندازی و اثبات کارایی محفظه ساخته شده می‌بایست سه آزمایش مهم و اساسی پیرامون آن انجام می‌گرفت. این سه آزمایش به قطعیت ثابت می‌کنند که محفظه ساخته شده در مسیر

درستی طراحی و ساخته شده و همچنین اجزای متشکل به درستی در کنار یکدیگر قرار گرفته و در قالب یک سیستم واحد هدف این مجموعه را محقق می‌سازند. این آزمایش‌ها شامل موارد زیر می‌باشند:

- آزمایش جهت بررسی فشار اولیه
- آزمایش فشار شیشه و محفظه
- آزمایش تحمل سنجی شیشه در محدوده فشار کاری شیر اطمینان

پس از این سری آزمایشات و اطمینان از کارکرد صحیح محفظه نوبت به آزمایشات اصلی یعنی آزمایش تابش لیزر در شرایط تحت فشار بودن محفظه بر روی نمونه سنگ که هدف نهایی ساخت این محفظه بوده، می‌رسد. پس از انجام آزمایشات قبلی و بررسی اجزای مختلف و درگیر در آزمایش و ثبت موفقیت برای این امر، حال می‌بایست شرایط سیستم را به جهت انجام آزمایشات اصلی مهیا نمود. این آزمایش اهداف مختلفی را دنبال می‌نماید. یکی از مهمترین این اهداف بررسی شرایط پنجره طراحی شده در شرایط همزمان تحت فشار از سوی سیال درون محفظه و تحت تنش حرارتی از سوی باریکه لیزر می‌باشد. پس از بررسی تحمل فشاری شیشه در آزمایشات قبلی و مسجل شدن میزان توانایی شیشه در تحمل فشار سیال، در این مرحله با اضافه نمودن تنش حرارتی این مقاومت دوباره مورد سنجش قرار می‌گیرد. از سویی دیگر هدف اصلی طراحی این محفظه نیز مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت و اثر تابش لیزر در شرایط حضور دما و فشار بر روی نمونه سنگ مورد نقد و بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین، ثبت و بررسی پارامترهای مدنظر در حین آزمایش از دیگر اهداف مهم این آزمایش می‌باشد. بدین منظور پس از بررسی فشار کپسول و آماده‌سازی خطوط اعمال فشار از کپسول به محفظه و نیز بررسی عملکرد دیتالاگر و نمونه سنگ مورد نظر، آزمایش اولیه تحت شرایط زیر انجام شدند:

ابتدا آماده‌سازی درپوش اصلی را انجام داده که به تبع آن شیشه مخصوص پنجره را با دستمال مخصوص تمیز نموده و سپس فلنج نگهدارنده بالا سر آن را اوسط پیچ متصل و محکم می‌گردد. سپس نمونه سنگ موردنظر آماده گشته و بر روی پایه آکاردئونی قرار می‌گیرد و ارتفاع آن را نسبت به نقطه کانونی و تمرکز تنش باریکه لیزر تنظیم می‌گردد. حال درپوش اصلی بوسیله پیچ‌های اتصال به بدنه محفظه متصل و محکم می‌گردد. در این مرحله به‌منظور اعمال فشار به داخل محفظه شیلنگ هوای کپسول به محفظه متصل شده و شیر تخلیه به جهت جلوگیری از افزایش ناگهانی فشار و نیز کنترل تزریق فشار داخل محفظه به حالت نیمه باز تغییر وضعیت داده می‌شود. همزمان با بالا رفتن فشار داخل محفظه شیر تخلیه به آرامی بسته شده تا نرخ افزایش فشار داخل محفظه تنظیم گردد. پس از رسیدن به فشار مورد نظر داخل شیر تخلیه به‌طور کامل بسته و شیلنگ از محفظه جدا می‌گردد. حال دستگاه لیزر را روشن نموده و پس از تنظیم پارامترهای تابش لیزر، عمل تابش انجام می‌پذیرد و همزمان داده‌های سنسور از محوطه داخلی محفظه توسط دیتالاگر ثبت و ضبط می‌شوند. پس از پایان یافتن زمان تابش دستگاه لیزر را خاموش نموده و شیر تخلیه به آرامی جهت تخلیه فشار داخل محفظه باز می‌گردد. حال می‌بایست درپوش اصلی از بدنه جداسازی شده و نمونه تحت آزمایش جهت بررسی از آن خارج گردد و در انتها سیستم پایش اطلاعات را قطع و اطلاعات منتج جهت تحلیل از آن استخراج می‌گردد.

نتایج تست بر روی نمونه سنگ کربناته

طراحی و ساخت محفظه تحت فشار به جهت شبیه‌سازی شرایط ته چاهی تابش لیزر در نهایت منتج به بررسی شرایط بر روی نمونه سنگ‌های انتخابی از نوع کربناته سازند سروک گردید. آزمایشات مذکور در این مرحله اختصاصاً با استفاده از سیال هوا به عنوان سیال حفاری انجام پذیرفته

و فشارهای پایین به جهت برخی محدودیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایشات در مراحل پایه‌ای قرار داشته و در قالب پژوهش حاضر صرفاً آزمایشات استاتیک مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت. از سویی دیگر، فشار داخل محفظه بدون دخل و تصرف و استفاده از پوشش حرارتی صرفاً دمای طبیعی محفظه مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. فرضیات بالا پایه شکل‌گیری آزمایشات انجام شده در پژوهش حاضر هستند. پیش از هر چیز لازم به تذکر است که مشخصات لیزر و پارامترهای مربوطه به شرح جدول زیر می‌باشد (جدول ۱).

همان‌طور که از سیر مراحل کار برمی‌آید اولین قدم در راستای انجام آزمایشات تحت فشار مقایسه اولیه مابین این آزمایشات با آزمایشات معمول و رایج انجام گرفته در فشار اتمسفر می‌باشد تا بواسطه آن اختلاف حاصل از نتایج به واسطه اعمال فشار استخراج گردند. بدین جهت پایه آزمایشات را بر مبنای این اختلاف قرار داده‌ایم. از این رو در

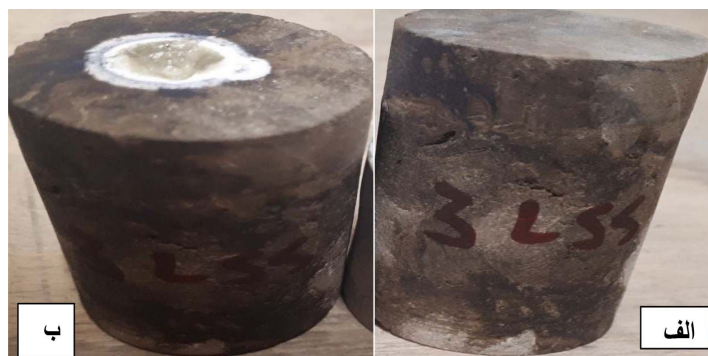
اولین آزمایش برای هر نمونه ابتدا یک آزمایش در فشار اتمسفر و بدون حضور درپوش انجام داده‌ایم. زمان لازم به منظور شکست نمونه در این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت. طی این آزمایش صرفاً نمونه سنگ بر روی پایه تنظیم شونده داخل محفظه قرار داده شد و پس از تنظیم فاصله کانونی مناسب در زیر کالیماتور لیزر، دستگاه لیزر راه اندازی و نمونه تحت تابش لیزر قرار گرفت. زمان شکست سنگ از لحظه شروع تابش لیزر محاسبه گردید و مشاهده شد که سنگ کربناته خشک در بازه ۱۷ تا ۲۰ s دچار شکست و واروی می‌شود. شکل ۲ نمونه سنگ کربناته خشک پیش و پس از تابش لیزر در فضای آزاد و فشار اتمسفر را نمایش می‌دهد. البته لازم به تذکر است که این زمان صرفاً برای نمونه خشک و با مشخصات لیزر ذکرشده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. سنگ‌های کربناته از مخزن سروک بوده که ویژگی‌های مکانیکی آن در جدول ۲ ذکر گردیده است.

جدول ۱ خصوصیات لیزر مورد استفاده.

منبع لیزر	طول موج (nm)	توان لیزر (W)	بازدهی (%)	نوع عملکرد	فرکانس (Hz)	دامنه (cm)
لیزر فیبری	۱۰۶۴	۱۰۰۰	۸۵	CW	۱۰۰	۲۵

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ کربناته.

راستای شکست محوری	حداکثر نیرو (kN)	قطر (mm)	طول (mm)	نیروی کششی (MPa)
۲۱/۵	۵۳/۷	۴۰/۲	۶/۳	



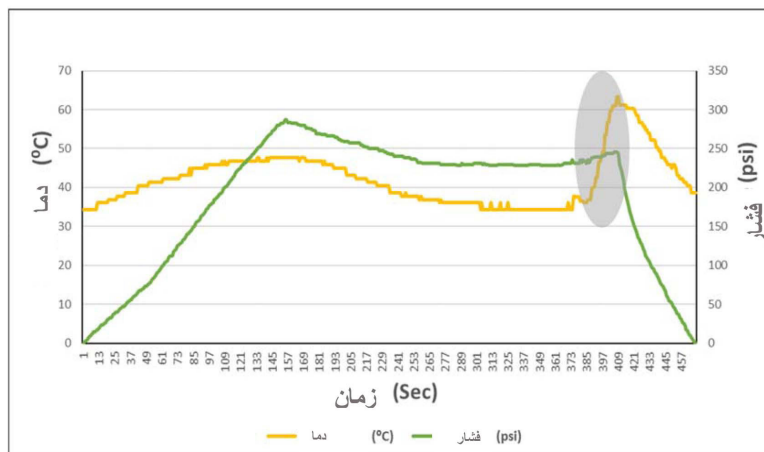
شکل ۲ الف) نمونه کربناته خشک پیش از تابش لیزر و ب) نمونه کربناته خشک پس از تابش لیزر.

تحت تابش قرار گرفت که پس از بررسی‌های صورت‌گرفته نتایج آن با شرایط تابش در فشار اتمسفر از نظر ظاهری یکسان برآورد زده شد. بنابراین اولیه نتیجه‌گیری برای این شرایط افزایش حدودی ۵ s برای تابش لیزر نسبت به شرایط بدون حضور فشار سیال بوده است. اما نتایج بر روی نمودار حاکی از این قضیه است که افزایش فشار و دمای محسوسی داخل محفظه حین تابش اتفاق می‌افتد.

بر طبق اعداد حاصله از نمودار بالا، افزایشی در حدود 24°C برای دمای داخل محفظه و افزایشی معادل ۱۰ psi برای فشار داخل محفظه به ثبت رسیده است. یکی از نتایج بررسی شده نگاه داشت دما داخل سنگ کربناته می‌باشد. بررسی‌های ثانویه بر روی نمونه‌های موثر از تابش نیز نشانگر این موضوع بوده که نمونه‌ها مدت کمی پس تابش (در حدود ۱۲ h) به خودی خود دچار واروی و واپاشی می‌شوند. این اثر نشانگر آن بود که سنگ کربناته حرارت را به گونه‌ای داخل خود حبس می‌نماید و از سوی دیگر میزان تابش از سطح آن نیز قابل توجه می‌باشد که افزایش دمای 24°C ناشی از آن می‌تواند به گونه‌ای تایید این قضیه باشد. از سوی دیگر ناشی از جریان همرفتی بر روی سطح به افزایش دمای نمونه کمک شایانی می‌نماید.

بر طبق نتایج حاصله از تابش لیزر داخل محفظه و نیز اطلاعات ثبت شده از دیتالاگر مشخص است که افزایش دما و فشار داخل محفظه حین تابش رخ می‌دهد. این افزایش خود تابعی از متغیرهای فراوانی بوده که از جمله آنها فشار سیال، نوع سیال، دمای اولیه سیال، نوع سنگ، اشباع سنگ، درجه اشباع و نیز نوع سیال اشباع شده را می‌توان ذکر نمود. شکل ۳ نمایانگر نتایج حاصله از نتایج ثبت شده دیتالاگر حین تابش لیزر به داخل محفظه طی آزمایش تحت فشار بر روی نمونه سنگ کربناته می‌باشد. منطقه مشخص شده روی نمودار نشانگر زمان تابش لیزر بر روی سنگ می‌باشد. همان‌طور که بر روی نمودار نمایش داده شده، محفظه طبق روال آزمایش (ذکر شده در فصل گذشته) تحت فشار قرار گرفته است. پس از بالابردن فشار به محدوده مورد نظر (حدوداً ۲۲۰ الی ۲۳۰ psi) و آماده‌سازی شرایط آزمایش، لیزر به داخل محفظه و سطح سنگ تابیده می‌شود. این تابش برای نمونه سنگ کربناته خشک در فشار اتمسفر به میزان مابین ۱۷ الی ۲۰ s برآورد شده بود که با تکرار آزمایش تحت فشار این مقدار برای شرایط تحت فشار در حدود ۵ s بیشتر تخمین زده شد. شکل ۴ نشانگر نمونه سنگ کربناته خشک پیش از تابش لیزر را نشان می‌دهد.

از این رو نمونه مذکور در آزمایش اصلی به میزان ۲۵ s



شکل ۳ نتایج تابش لیزر به نمونه سنگ کربناته خشک داخل محفظه تحت فشار

این افزایش فشار ناشی از افزایش دمای سیال حاصل از جریان همرفتی و هدایت حرارتی داخل محفظه ناشی از گرم شدن سطح سنگ و جذب انرژی باریکه لیزر بر روی سنگ می‌باشد. در کل باید این نکته را مدنظر قرار داد که فیزیک‌های درگیر در این فرآیند متنوع و پیچیده بود و پدیده‌شناسی این اثر نیاز به بررسی عوامل و شرایط محیطی مختلف و متفاوتی دارد که از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد.

پس از انجام تست‌های بالا و به منظور تعیین میزان اثر لیزر بر روی مقاومت سنگ و نیز به منظور تعیین مدول‌های فشاری سنگ پیش و پس از تابش لیزر از آزمایشات تنش سه محوره به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مدنظر و نیز ترسیم نمودار تنش به کرنش استفاده گردید که در ادامه به بررسی و تفسیر نتایج خواهیم پرداخت.

سیر تحول آزمایشات وابسته به سنگ این‌طور ایجاب می‌کند که پیش و پس از انجام هر عملیاتی بر روی آن‌ها خواص و ویژگی‌های وابسته به هدف مسئله را مورد بررسی و تحلیل قرار دهیم. از این رو سنجش ویژگی‌های مکانیکی سنگ به جهت دستیابی به تحلیل مناسبی از تغییرات انجام شده بر روی آن و نیز تعیین خط مشی آینده پژوهش‌های وابسته از جمله اقدامات مهم در راستای پژوهش حاضر می‌باشد. در قدم اول همچون ایجاد مبنا به جهت سنجش تغییرات نسبت به آن که در سیر آزمایشات قبلی نیز مدنظر قرار گرفت در این بخش نیز نیاز به ایجاد یک مبنا و سطح سنجش به جهت تحلیل تغییرات ایجاد شده در سنگ می‌باشد. در بخش قبلی آزمایشات نسبت به سطح مبنای فشار اتمسفر که تمامی کارهای پیشین در این موقعیت به انجام رسیده بودند مدنظر قرار گرفته و تحولات بوجود آمده نسبت به این موضوع سنجیده شدند. در این مرحله نیز سطح مبنایی جهت تحلیل و سنجش تحولات در نظر گرفته شد. سطح مبنا در

شکل ۵ نمونه سنگ تحت تابش را نشان می‌دهد. در شکل ترک‌های ایجاد شد و سوراخ شدگی مرکزی به خوبی قابل رویت می‌باشد. در حقیقت پس از تابش در شرایط مذکور می‌توان به راحتی نمونه را از هم جدا نمود و دچار شکست کامل کرد. **شکل ۶** نیز شماتیکی از دیتالاگر استفاده شده در آزمایش به جهت ثبت داده‌های فشاری و دمایی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ نمونه کربناته خشک پیش از تابش لیزر.



شکل ۵ نمونه کربناته خشک تحت تابش لیزر در داخل محفظه و تحت فشار.



شکل ۶ سامانه دیتالاگر به جهت ثبت داده‌های ناشی از آزمایش دستگاه.

داده می‌شود و با اعمال فشار جانبی به وسیله روغن از غشای جانبی محفظه شرایط فشار جانبی سنگ‌های زیر زمین بر روی آن شبیه‌سازی شده و محفظه مذکور در زیر یک دستگاه جک به منظور اعمال فشار محوری قرار داده می‌شود. سپس با اعمال فشار محوری جک توسط دستگاه خودکار و یا نیمه خودکار مدول‌های فشاری اندازه‌گیری و نمودار تنش به کرنش نیز برای آن ترسیم می‌گردد. در آزمایش انجام‌گرفته بر روی نمونه‌های کربناته در حالت خشک نتایج به شرح جدول زیر می‌باشند. (جدول ۳).

جدول ۳ خصوصیات فیزیکی نمونه سنگ کربناته پیش و پس از تابش لیزر.

نوع	فشار جانبی (MPa)	زمان تست	مدول الاستیسیته G (MPa)	نسبت پواسون (N)	مدول حجمی (K)	مدول یانگ E (MPa)	اختلاف طول (mm)	اختلاف حجم (mm ³)
سنگ کربناته	۳۰	قبل از تابش	۱۲۶۱	۰/۲۲	۱۷۹۹	۲۸۰۰	۰/۴۹۹	۵۳۸
		بعد از تابش	۱۰۳۵	۰/۲۲	۱۵۲۵	۲۵۳۲	۰/۵۰۶	۵۲۰

عدم بررسی تاثیر فشار، دما و نوع سیال حفاری و میزان اثرگذاری آنها در نتایج نهایی می‌باشد. با طراحی محفظه تحت فشار برای اولین بار این نقایص برطرف و میزان تاثیرپذیری نتایج با شبیه‌سازی شرایط واقعی ته چاهی مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- آزمایشات در این مرحله صرفاً با استفاده از سیال هوا به‌عنوان سیال حفاری و بر روی نمونه سنگ‌های انتخابی از نوع کربناته سازند سروک انجام پذیرفته و فشارهای پایین به جهت برخی محدودیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- اولین قدم در راستای انجام آزمایشات تحت فشار مقایسه اولیه مابین این آزمایشات با آزمایشات معمول و رایج انجام گرفته در فشار اتمسفر می‌باشد تا بواسطه آن اختلاف حاصل از نتایج به‌واسطه اعمال فشار استخراج گردند. بدین جهت پایه آزمایشات را بر مبنای این اختلاف قرار داده‌ایم.

۴- بر اساس آزمایشات مبنای طراحی شده نمونه سنگ کربناته داخل محفظه قرار داده شده و بدون

این قسمت تغییرات از یک نمونه سنگ سالم و پیش از تابش به سمت نمونه تحت تابش و تنش حرارتی قرار گرفته ترسیم می‌گردد. از این رو نمونه سنگ سالم که از نظر جنس و ابعاد مشخص با نمونه تحت تابش هماهنگی داشته‌باشد به عنوان معیار سنجش در نظر گرفته شده‌است. از این رو معیارهای فیزیکی و مکانیکی سنگ در آزمایشگاه مکانیک سنگ برای دو نمونه سالم و تحت تابش توسط آزمایش تنش سه محوره انجام پذیرفت. بر طبق این آزمایش نمونه داخل یک محفظه خاص با قابلیت اندازه‌گیری مدول‌های الاستیسیته قرار

همان‌طور که انتظار می‌رفت تغییر و کاهش در مدول‌های فشاری سنگ پس از تابش لیزر و کاهش مقاومت فشاری که می‌تواند موجبات افزایش نرخ نفوذ مته و کاهش چشمگیر زمان حفاری را بدنبال داشته باشد، به وقوع پیوسته است. به عبارتی دیگر کاهش در این پارامترها، کاهش در مقاومت سنگ در برابر ضربه و فشار را شامل می‌شود که در این حالت مته حفاری با یک سنگ پوک‌شده مواجه خواهد شد که عمل کندن و خردکردن در آن به مراتب راحت‌تر خواهد بود. از سویی دیگر کاهش در مدول یانگ و یا مقاومت فشاری تک‌محوره به معنای کاهش تحمل سنگ در برابر تنش قائم بوده که در این حالت عمل کوبش نیز می‌تواند تاثیر بسزایی در عملیات حفاری علاوه بر حفاری دورانی را داشته‌باشد. از این رو پیشنهاد تلفیق عمل کوبشی و چرخشی در افزایش نرخ نفوذ می‌تواند مشکل گشا باشد.

نتیجه‌گیری

۱- از مهم‌ترین نقایص کارهای مطالعاتی گذشته

به منظور تعیین مدول‌های فشاری سنگ پیش و پس از تابش لیزر از آزمایشات تنش سه محوره به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مدنظر و نیز ترسیم نمودار تنش به کرنش استفاده گردید.

۸- فشار جانبی اعمالی برای نمونه‌ها ۳۰ MPa در نظر گرفته شد و نتایج تست‌های سه محوره بر پایه آن انجام گرفته شدند.

۹- همان‌طور که انتظار می‌رفت تغییر و کاهش در مدول‌های فشاری سنگ نظیر حدود ۲۷۰ MPa در مدول یانگ و یا کاهش ۲۳۰ MPa در مدول الاستیسیته پس از تابش لیزر و کاهش مقاومت فشاری که می‌تواند موجبات افزایش نرخ نفوذ مته و کاهش چشمگیر زمان حفاری را بدنبال داشته باشد، به وقوع پیوسته است.

تشکر و قدردانی

تشکر از حمایت‌های مجموعه "شورانگیز عسل" در حمایت‌های معنوی از طرح پژوهشی حاضر قابل بیان و مرتبه قدردانی می‌باشد.

قرارگیری درپوش و در فشار اتمسفر تحت تابش لیزر قرار گرفت. زمان شکست سنگ از لحظه شروع تابش لیزر محاسبه گردید و مشاهده شد که سنگ کربناته خشک در بازه ۱۷ تا ۲۰ s دچار شکست و واروی می‌شود.

۵- نمونه طی آزمایش اصلی در محفظه تحت فشار قرار داده شد و عمل تابش لیزر بر روی آن صورت پذیرفت. این تابش برای نمونه سنگ کربناته خشک در فشار اتمسفر به میزان مابین ۱۷ الی ۲۰ s برآورد شده بود که با تکرار آزمایش تحت فشار این مقدار برای شرایط تحت فشار در حدود ۵ s بیشتر تخمین زده شد. از این رو نمونه سنگ کربناته خشک طی ۲۵ به مرحله شکست و واروی رسید.

۶- فشار شارژ اولیه برای محفظه حدود ۲۲۰ psi بوده است. بر طبق نتایج حاصله از دیتالاگر حین تابش افزایشی در حدود ۲۴ °C برای دمای داخل محفظه و افزایشی معادل ۱۰ psi برای فشار داخل محفظه به ثبت رسیده است.

۷- پس از انجام تست‌های تابش و به منظور تعیین میزان اثر لیزر بر روی مقاومت سنگ و نیز

مراجع

- [1]. SHANA Express: <https://www.shana.ir/news/231250/>
- [2]. Mustafiz, S., Bjorndalen, N., & Islam, M. R. (2004). Lasing into the future: Potentials of laser drilling in the petroleum industry, *Petroleum Science and Technology*, 22(9-10), 1187-1198., doi: 10.1081/LFT-200034067.
- [3]. Elahifar, B., Esmaceli, A., Prohaska, M., & Thonhauser, G. (2011). An energy based comparison of alternative drilling methods, In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, SPE-148166, doi.org/10.2118/148166-MS.
- [4]. Yang, X., Zhou, X., Zhu, H., Zhou, J., & Li, Y. (2020). Experimental investigation on hard rock breaking with fiber laser: surface failure characteristics and perforating mechanism, *Advances in Civil Engineering*, 1-12, doi: 10.1155/2020/1316796.
- [5]. Singh, P., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., & Mishra, V. (2020). Developments of non-conventional drilling methods—a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 2133-2166, doi: 10.1007/s00170-019-04749-0.
- [6]. Gahan, B. C., Parker, R. A., Batarseh, S., Figueroa, H., Reed, C. B., & Xu, Z. (2001). Laser drilling: determination of energy required to remove rock, In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, OnePetro. SPE-71466, doi.org/10.2118/71466-MS.
- [7]. Hafez, A., Ibrahim, E. S., Omar, E. S., Seif-Eddeen, F., & Beshay, K. (2015). Laser drilling using Nd: YAG on limestone, sandstone and shale samples: ROP estimation and the development of a constant ROP drilling system, In *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*, D021S015R004, SPE-175848-MS, doi.org/10.2118/175848-MS.
- [8]. Agha, K. R., Belhaj, H. A., Mustafiz, S., Bjorndalen, N., & Islam, M. R. (2004). Numerical investigation of the prospects of high energy laser in drilling oil and gas wells, *Petroleum Science and Technology*, 22(9-10), 1173-1186, doi: 10.1081/LFT-120034213.

- [9]. Bjorndalen, N., Belhaj, H. A., Agha, K. R., & Islam, M. R. (2003). Numerical investigation of laser drilling, In SPE Eastern Regional Meeting, SPE-84844, SPE, doi.org/10.2118/84844-MS.
- [10]. Graves, R. M., Batarseh, S., Parker, R. A., & Gahan, B. C. (2002, October). Temperatures induced by high power lasers: effects on reservoir rock strength and mechanical properties, In SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, SPE-78154, doi.org/10.2118/78154-MS.
- [11]. Gahan, B.C., Batarseh, S. & Siegfried, R.W. (2002). Improving gas well drilling and completion with high energy lasers, Report in Gas Technology Institute. Des Plaines, Illinois 60018, USA. www. Gastechology.org.
- [12]. Xu, Z., Reed, C. B., Parker, R., & Graves, R. (2004). Laser spallation of rocks for oil well drilling, In Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics, AIP Publishing, doi: 10.2351/1.5060237.
- [13]. Ahmadi, M., Erfan, M. R., Torkamany, M. J., & Safian, G. A. (2011). The effect of interaction time and saturation of rock on specific energy in ND: YAG laser perforating, Optics & Laser Technology, 43(1), 226-231, doi:10.1016/j.optlastec.2010.06.018.
- [14]. Keshavarzi, R., Jahanbakhshi, R., Nadgaran, H., & Aliyari, M. (2010). A neural network approach for predicting the penetration depth during laser perforation in limestone, In ARMA US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, ARMA-10, ARMA.
- [15]. Yavuz, H., Demirdag, S., & Caran, S. (2010). Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(1), 94-103, doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.09.014.
- [16]. Ashena, R., Ashena, R., Nabaei, M., Habibnia, B., & Taei, B. (2010, July). Experimental investigation of specific energy of rocks by low power laser drilling. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition, OnePetro, doi.org/10.2118/136986-MS.
- [17]. Bakhtbidar, M., & Ghorbankhani, M. (2010). Effects of laser drilling on rate of penetration for oil and gas wells drilling, In Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics, AIP Publishing, doi.org/10.2351/1.5057214.
- [18]. Batarseh, S. I., Abass, H. H., Al-Mulhem, A. A., & Habib, N. S. (2012). High power laser application in openhole multiple fracturing with an overview of laser research; past, present and future, In SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, OnePetro, doi.org/10.2118/160836-MS.
- [19]. Bazargan, M., Jalalyfar, H., Koohian, A., & Habibpour, M. (2013). Feasibility of using laser bit beside of common bits to drilling slim holes, In IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference, cp-350, European Association of Geoscientists & Engineers, doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.350.iptc16453.
- [20]. Bazargan, M., Madani, A., Sharifi, H., Jalalyfar, H., Ghasseml askary, K., & Roštamian, A. (2013). Utilisation of lasers in petroleum drilling industry, In International Petroleum Technology Conference, IPTC-17019, Iptc, doi.org/10.2523/IPTC-17019-MS.
- [21]. Keshavarzi, R., Jahanbakhshi, R., & Ghorbani, A. (2011). A neural network-based sensitivity analysis of reservoir-related parameters during laser perforation in downhole conditions in limestone, In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA-11.
- [22]. Keshavarzi, R., Jahanbakhshi, R., & Ghorbani, A. (2011). A neural network-based sensitivity analysis of reservoir-related parameters during laser perforation in downhole conditions in limestone, In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA-11, Doi: 10.3997/2214-4609.202010595.
- [23]. Chamankhah, S., Bazargan, M., Forouzandeh, A., & Riahi, S. (2022). Feasibility study of fracture propagation controlled by use of managed pressure drilling during laser-assisted drilling operation, SPE Journal, 27(01), 93-104., doi: 10.2118/208575-PA.