



Imam Khomeini International University

Vol. 8, No. 3, Autumn 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Investigation of the Long-Term Stability of Salt Rock Cavern for Compressed Air Storage

Alishavandi A.¹, Ahmadi M.^{2*}, Ghoshtasbi K.², Askari A.³

1- M.Sc, Dept. of Mining, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Dept. of Mining, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Ph.D Student, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 08 Jun. 2022

Accepted: 05 Sep. 2022

Abstract: Compressed air storage is one of the methods of energy storage. One of the most important parts of a compressed air storage system is the storage cavern. In this study, the behaviour and the long-term stability of the salt cavern as a storage site for compressed air were investigated. Due to the construction and operation of the salt cavern, the in-situ stress conditions around the cavern will change. The difference between induce stress and pressure of compressed air will cause the cavern to converge and damage around it. In this study, the salt rocks from one of the regions of Iran were used to test creep. To investigate the creep behavior of salt rock, creep test was performed in three stress levels in a stepwise manner. Lubby2 model parameters were calculated. Then, using LOCAS finite element software, the compressed air storage cavern was simulated and its behavior and stability were investigated. The results of these experiments and modelling have shown that with increasing stress in each stage, the slope of the secondary part of the creep increases. Therefore, it can be concluded that with increasing stress, the Maxwell viscosity coefficient decreases. In addition, the amount of movement in the lower half of the cavern was more than the upper half of it. Value of the cavern safety factor according to the Devries dilation criterion also decreased with increasing depth and the probability of dilation in the cavern wall increased.

Keywords: Compressed air storage, Salt cavern, Creep, LUBBY2 creep model, LOCAS software.

How to cite this article

Alishavandi, A., Ahmadi, M., Ghoshtasbi, K., and Askari, A. (2023). "Investigation of the long-term stability of Salt rock cavern for compressed air storage". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(3): 75-89.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.17363.1590](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.17363.1590)

*Corresponding Author Email: moahmadi@modares.ac.ir

COPYRIGHTS



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

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

INTRODUCTION

Large-scale compressed air energy storage (CASE) is a convenient way to balance the renewable energy used in electrical energy systems such as solar, wind and tide[1].

The compressed air energy storage system was first developed in Huntorf, Germany in the mid-1970s. A few years after the construction of this power plant, the first compressed air power plant was built in the United States. At present, both of these plants have successfully used the salt cavern for compressed air energy storage[2]. In this study, salt cavern was selected as a compressed air storage location due to its very low permeability, low construction cost and its use in two existing power plants [3].

After construction and during the operation of the salt cavern as a storage site, the in situ stress conditions around the cavern will change and will cause deviant stresses around the cavern. Deviation stress will cause the cave to converge and damage around it. Most studies on salt caverns have been on natural oil and gas storage caverns and less studied have focused on salt caverns on compressed air storage.

In this research, by performing creep experiments on samples of salt rock under three different stresses, the creep behavior of the salt rock has been studied step by step and then to investigate the stability of the salt cavern during construction and operation, simulation of cavern behavior has been performed. In a series of preliminary experiments performed by Habibi et al [4] on rock samples, the strength and elastic properties of salt rock samples have been determined. These data are shown in Table 1.

Table 1. Strength and elastic properties of the samples [4]

| Uniaxial compressive strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elastic modulus (MPa) | Poisson ratio |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------|
| 13.15 | 1.55 | 938 | 0.284 |

METHODS

Samples of rock salt

Salt rock samples have been tested for creep. Salt rock samples have been prepared according to the standards of the International Society of Rock Mechanics. The diameter of salt rock samples was 54 mm and the ratio of sample length to sample diameter was 2.5 to 2.79[5]Grade A or Deutsche Normen DIN 51 220, DIN 51 223, Klasse 1 and DIN 51 300. (b. Samples of rock salt used in creep experiments are shown in Figure 1.



Figure 1. Samples of rock salt

The rock has shown a transition from deformable to brittle behavior in the expansion zone. Consequently, increased damage in the dilation area leads to the opening of small cracks and increased permeability. For these reasons, the expansion boundary can be considered as a criterion to ensure the long-term integration of the cavern [6]. The most advanced measure of dilation was introduced by Devries [7]. To determine the viscoplastic properties of rock salt, stepwise creep test was used. The basic model used to study the deformation properties of salt is Lubby2 model. At the beginning of the experiment, the displacement was taken every few seconds, minutes, and over time, every few hours. Then, after the strain rate reaches a constant value, a new stress level (step) is applied to the sample and the strain measurement were repeated. Experiments have been performed under three levels of stress (steps). The specifications of the experiments are given in Table 2. Figure 2 shows the creep carve obtained from the experiment. The parameters of

Lubby2 model have been calculated using the creep test and presented in Table 3. It was also found that at each step of the creep test, the slope of the secondary creep curve has a direct relationship with the applied stress values; and with increasing the stress, the slope of the secondary creep curve increases and Maxwell viscosity coefficient values decreases.

Table 2. Specifications of uniaxial creep test

| Step | Stress (MPa) |
|--------|--------------|
| Step 1 | 8.5 |
| Step 2 | 10 |
| Step 3 | 11.5 |

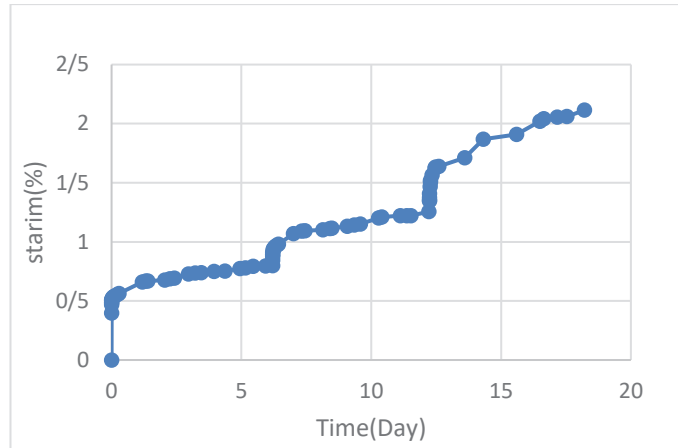


Figure 2. Creep curve obtained from the experiment

Table 3. Lubby2 Model Parameters

| Sample | $\bar{\eta}_{M\sigma}^*$ (MPa.d) | m (MPa ⁻¹) | \bar{G}_k^* (MPa) | K ₁ (MPa ⁻¹) | $\bar{\eta}_k^*$ (MPa.d) | K ₂ (MPa ⁻¹) |
|--------|----------------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| STC1 | 4.4E4 | -0.262 | 9.7E4 | -0.42 | 1289 | -0.038 |

Numerical modelling

Salt rock has a very complex behavior and therefore predicting the long-term behavior of this rock requires appropriate behavioral models, simulation and analysis of its behavior by a powerful software. In this study, LOCAS 2D finite element software was used for the salt cavern simulation.

Geological structure

The shape of the cavern considered as capsule shape with diameter of 42 m, a length of 150 m and overburden thickness of 650 m was considered.

Simulation of manufacturing and operation process

During the construction process, the pressure in the center of the cave decreased from the in-situ pressure (7.9 MPa) to 4.4 MPa (weight from the salt water column) at the end of the debrining phase and then to 6.4 MPa at the end of the leaching phase.

FINDINGS AND ARGUMENT

The rate of converge in the volume of the cavern can be considered as 0.68% per year, which is an ideal value and less than 1%, and reducing the volume of the cavern in these conditions is acceptable for the storage cavern. Examining the vertical displacement contour, it can be seen that the amount of displacement in the lower part of the cavern was more than the upper part of the cavern, which was a result of more deviatoric stress in that area. In the study of contour radial displacement, it was observed that most of the displacement is related to the lower half of the cavern (Figures 3A and 3B). By examining the contours of the cavern safety coefficient based on Devries (2005) dilation criterion in two pressures of minimum (4.6 MPa) and maximum (6.6 MPa), it was observed that all different parts of the cavern wall have a suitable and high safety factor. The value of safety factor in both contours decreased with increasing depth, which can be considered as a result of increasing the deviatoric stress following an increase in ground stress (Figures 3C and 3D).

CONCLUSION

Compressed air storage is one of the types of energy storage methods. One of the most important parts of this compressed air storage system is the storage site. In this study, the long-term stability of the compressed air storage cavern under cyclic loading was investigated. Using rock samples, uniaxial creep test was performed in three stages in a stepwise manner and then the results of the experiments were used for numerical analysis. The results are as follows:

With increasing stress in each stage, the slope of the secondary part of the creep curve increased, so it can be concluded that with increasing stress, the Maxwell viscosity coefficient decreased. Vertical displacement contour showed that the amount of displacement in the lower half of cavern was more than the upper part, so the stress difference was higher in that area and the roof tended to move down and the bottom of the cave tended to move up. The radial displacement contour showed that most of the displacement was related to the lower half of the cavern. Also, with increase in depth, the value of the cavern safety factor according to Devries dilation criterion decreased.

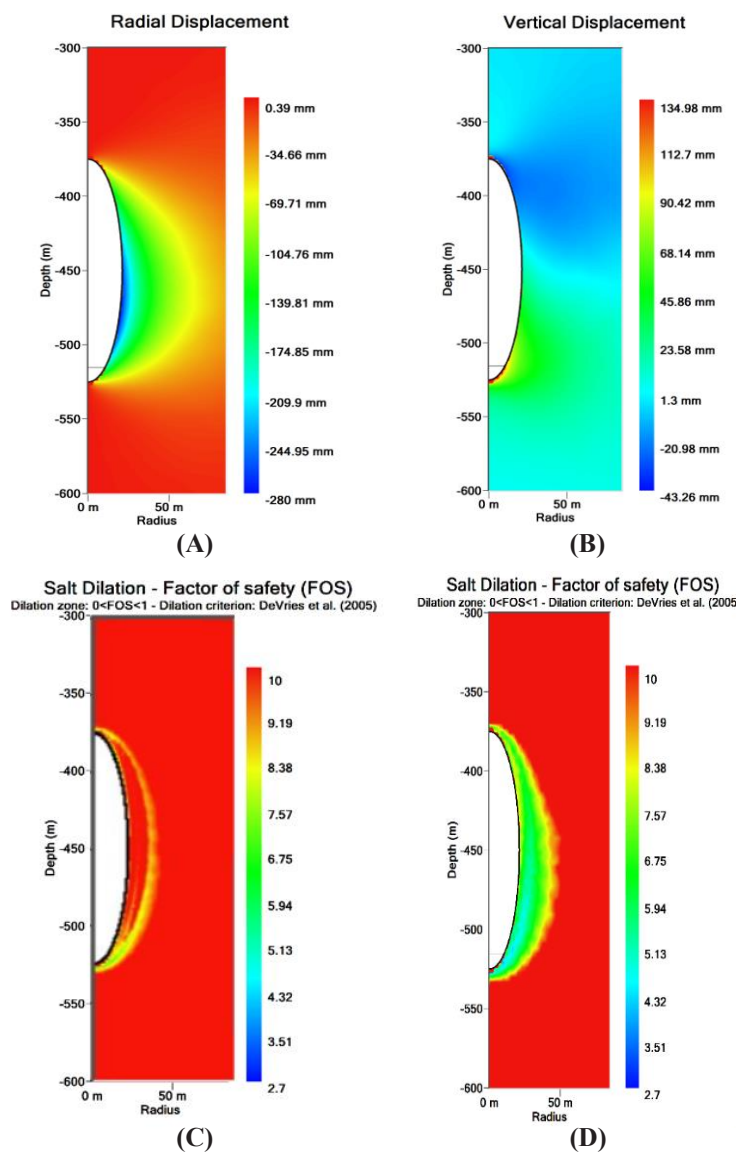


Figure 3. Displacement contour and safety factor contour of cavern according to Devries dilation criterion; **A:** contour of radial displacement, **B:** contour of vertical displacement, **C:** Contour of Devries dilation criterion at maximum pressure, **D:** Contour Devries dilation criterion at minimum pressure

REFERENCES

- [1] Han, Y., Ma, H., Yang, C., Li, H., and Yang, J. (2021). “*Journal of Petroleum Science and Engineering The mechanical behavior of rock salt under different confining pressure unloading rates during compressed air energy storage (CAES)*”. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107676. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107676.
- [2] Zhan, J., Ansari, O. A., Liu, W., and Chung, C. Y. (2019). “*An accurate bilinear cavern model for compressed air energy storage*”. *Applied Energy*, 242: 752-768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.104>.
- [3] Wang, T., Ao, L., Wang, B., Ding, S., Wang, K., Yao, F., and Daemen, J. J. K. (2022). “*Tightness of an underground energy storage salt cavern with adverse geological conditions*”. *Energy*, 238: 121906. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121906.
- [4] Habibi, R., Moomivand, H., Ahmadi, M., and Asgari, A. (2021). “*Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern)*”. *Environmental Earth Sciences*, 80: 1-22. DOI: 10.1007/s12665-021-09620-8.
- [5] ISRM. (1981). In: Brown, E. T. (Ed.), *Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring*. Pergamon, Oxford, 111-113.
- [6] Moghadam, S. N., Mirzabozorg, H., and Noorzad, A. (2013). “*Modeling time-dependent behavior of gas caverns in rock salt considering creep, dilatancy and failure*”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33: 171-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.10.001>.
- [7] Devries, K. L., Mellegard, K. D., Callahan, G. D., and Goodman, W. M. (2005). “*Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt*”. Project Final Report, June 2005, pp. 191.



بررسی پایداری دراز مدت مغار نمکی به منظور ذخیره‌سازی هوای فشرده

علی عالیشوندی^۱، مرتضی احمدی^۲، کامران گشتاسبی گوهرریزی^۲، امین عسگری^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

چکیده

ذخیره‌سازی هوای فشرده یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی است. مهم‌ترین قسمت سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده، مخزن ذخیره‌سازی است. در این تحقیق رفتار و پایداری بلندمدت مغار نمکی به عنوان محل ذخیره‌سازی هوای فشرده بررسی شد. بر اثر ساخت و بهره‌برداری از مغار نمکی، شرایط تنش برجا در اطراف مغار تغییر کرده و باعث ایجاد اختلاف تنش برجا در اطراف مغار می‌شود. اختلاف فشار بین تنش برجا و فشار درون مغار باعث همگرایی مغار و آسیب‌هایی در اطراف آن می‌شود. در این تحقیق از سنگ نمک گنبد نمکی نصرآباد واقع در اطراف کاشان برای آزمایش خزش استفاده شد. برای بررسی رفتار خزشی سنگ نمک، آزمایش خزش در سه سطح تنش به صورت پلکانی انجام شد. پارامترهای مدل رفتاری لابی ۲ (LUBBY 2) محاسبه شد. با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LOCAS مغار شبیه‌سازی و رفتار و پایداری آن بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی مشخص کرد که با افزایش تنش در هر مرحله شیب قسمت ثانویه خزش افزایش یافته، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تنش ضریب ویسکوزیته ماکسول کاهش یافته است. مغار شبیه‌سازی شده آهنگ افت حجم ۰/۶۸ درصد سالیانه دارد و میزان جابه‌جایی در قسمت نیمه پایین مغار بیشتر از قسمت نیمه بالایی مغار بوده است. سقف مغار تمایل حرکت به سمت پایین و کف مغار تمایل حرکت به سمت بالا داشته است. ضریب ایمنی مغار بر اساس معیار اتساع دوریس نیز با افزایش عمق، کاهش و احتمال اتساع در دیواره مغار افزایش یافته است.

کلمات کلیدی

ذخیره‌سازی هوای فشرده، مغار نمکی، خزش، مدل LUBBY 2 و نرم‌افزار LOCAS.

استناد به این مقاله

عالیشوندی، ع، احمدی، م، گشتاسبی گوهرریزی، ک، عسگری، ا؛ ۱۴۰۲؛ "بررسی پایداری دراز مدت مغار نمکی به منظور ذخیره‌سازی هوای فشرده". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۳، ص ۸۹-۷۵.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.17363.1590



۱- مقدمه

از سازندهای زمین‌شناسی زیرزمینی که به اندازه کافی پیوسته بوده تا مانع از فرار سیال فشرده شوند، به عنوان مخزن برای مواردی همچون نفت، گاز طبیعی و هوای فشرده استفاده می‌شود. از جمله این سازه‌ها می‌توان به مواردی همچون مخازن گاز و نفت تخلیه شده، آبخوان‌ها، مغار نمکی، مغار سنگی، معادن ترک شده اشاره کرد [۸-۱۰]. در این تحقیق مغار نمکی به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، هزینه ساخت پایین و مورد استفاده قرار گرفتن در دو نیروگاه موجود به عنوان مکان ذخیره‌سازی هوای فشرده انتخاب شد [۷].

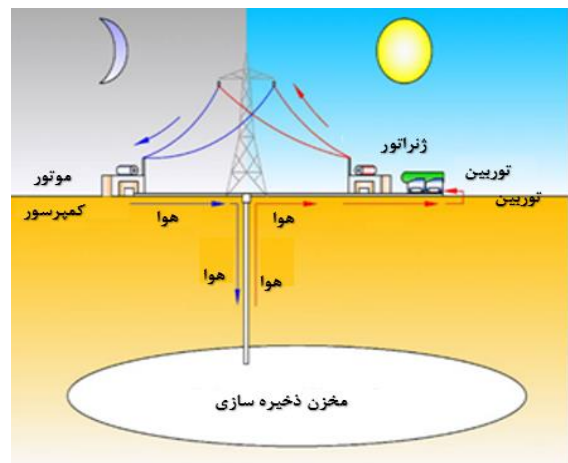
پس از ساخت و در زمان بهره‌برداری از مغار نمکی به عنوان محل ذخیره‌سازی، شرایط تنش برجا در اطراف مغار تغییر کرده و باعث ایجاد اختلاف تنش برجا و فشار سیال داخل مغار در اطراف مغار خواهد شد. اختلاف تنش باعث همگرایی مغار و آسیب‌هایی در اطراف مغار نمکی خواهد شد [۹]. تحقیقات زیادی توسط پژوهشگران بر روی رفتار مغار نمکی ذخیره‌سازی انجام شده است. کای ژائو و همکاران یک سیستم شاخص یکپارچه برای ارزیابی پایداری مغار نمکی در درازمدت، به صورت کمی ارائه کرده است و نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که فشار سیال داخلی، پارامتری تاثیرگذار در پایداری مغار است [۱۰]. زوچنگما و همکاران مطالعاتی را بر روی تغییر شکل خزشی مغارهای نمکی ذخیره گاز طبیعی انجام داده‌اند و حساسیت همگرایی مغار به عواملی مانند زمان، پارامترهای خزش و تفاوت بین فشار ژئواستاتیکی و فشار درون مخزن را مورد بحث قرار داده‌اند. نتایج نشان داده است که با کاهش اختلاف فشار حداکثر و حداقل مغار، سرعت همگرایی مغار کاهش یافته و برای مغارهای سنگ نمک با پارامترهای خزشی بزرگ، مانند D و n در مدل رفتاری نورتون-هاف، همگرایی مغار سریع بوده و با کاهش اختلاف فشار، نرخ همگرایی مغار کاهش یافته است [۱۱]. ونجینگ لی و همکاران مطالعاتی را بر تاثیر حرارتی- مکانیکی بارگذاری سیکلی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز انجام داده‌اند و نتایج مشخص کرد که در سقف مغار، ناحیه‌ای تحت تنش کششی وجود دارد و پس از چندین سیکل بهره‌برداری از مغار در این ناحیه شکست‌هایی اتفاق افتاده و ماندن مغار در فشار حداقل بعد از تخلیه گاز باعث افزایش آسیب شده است [۱۲].

کوشنیر و همکاران معادله ترمودینامیکی برای مغار ذخیره‌سازی هوای فشرده ارائه کرده‌اند و یک راه‌حل تحلیلی برای محاسبه تغییرهای دما و فشار درون مغار پیشنهاد دادند [۱۳]. تانگو وانگ و همکاران نشان داده‌اند که دو علت اصلی

با گذشت زمان، از محبوبیت استفاده از انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی همچون نفت، گاز و زغال‌سنگ به دلایل متعدد از قبیل تجدیدنپذیر بودن و ایجاد آلودگی‌های محیط زیستی کاسته شده و توجه‌ها به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک رفته است [۱]. ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در مقیاس بزرگ، روشی مناسب برای متعادل کردن انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده در سیستم‌های انرژی الکتریکی از قبیل خورشید، باد و جزر و مد است [۵-۲].

سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده برای اولین بار در هانتورف آلمان در اواسط دهه ۱۹۷۰ و بعد از چند سال از ساخت این نیروگاه اولین نیروگاه هوای فشرده در ایالات متحده آمریکا توسط شرکت تعاونی برق آلاباما و موسسه پژوهشی انرژی الکتریکی ساخته شد [۳]. در حال حاضر، هر دو نیروگاه با موفقیت از مغار نمکی برای ذخیره انرژی هوا فشرده استفاده کرده‌اند و وارد بهره‌وری تجاری شده‌اند و مشخص شده است که مغارهای نمکی برای ذخیره هوای فشرده نیز مناسب است [۴].

شماتیک یک سیستم ذخیره انرژی هوا فشرده با تفاسیر بیشتر در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۱ نشان می‌دهد که معمولا کل سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده از دو سری اجزا شامل اجزای سطح زمین که شامل یک کمپرسور، یک توربین، یک ژنراتور و یک سیستم ذخیره‌کننده انرژی حرارتی و اجزای درون زمین که شامل منبع ذخیره‌سازی و چاه تشکیل شده است [۶،۷].



شکل ۱: شماتیک مخزن هوای فشرده [۸]

دلیل نیازهای مختلف ذخیره سازی، میزان فشار و دمای سیال درون مغار بر اساس نوع ذخیره سازی متفاوت است. از این رو در این پژوهش به پایداری دراز مدت مغار نمکی ذخیره سازی هوای فشرده پرداخته شده است.

برای پرداختن به رفتار پیچیده مغار هوای فشرده تحت بارگذاری حرارتی و مکانیکی و همچنین بررسی پایداری مغار نمکی، نیاز به شناخت دقیق از رفتار خزشی سنگ نمک است. در این تحقیق با انجام آزمایش خزشی بر روی نمونه هایی از سنگ نمک تحت سه تنش متفاوت به صورت پلکانی، رفتار خزشی سنگ نمک مورد مطالعه قرار گرفته و سپس برای بررسی پایداری مغار نمکی در مدت زمان ساخت و بهره برداری شبیه سازی رفتار مغار انجام شده است. در سری آزمایش های اولیه ای که توسط حبیبی و همکاران بر روی نمونه های سنگ انجام شده است، پارامترهای مقاومتی، الاستیک نمونه سنگ نمک مشخص شده است که در جدول ۱ ارائه شده است [۱۷].

۲- نمونه سنگ نمک

نمونه های سنگ نمک که در سری آزمایش های اولیه مورد استفاده قرار نگرفته است، تحت آزمایش های خزش قرار گرفته است. نمونه های سنگ نمک طبق استانداردهای انجمن بین المللی مکانیک سنگ تهیه گردیده است. قطر نمونه های سنگ نمک ۵۴ میلی متر و نسبت طول نمونه به قطر نمونه ۲٫۵ تا ۲٫۷۹ بوده است [۱۹]. نمونه های سنگ نمک مورد استفاده در آزمایش های خزش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمونه های سنگ نمک

ریزش سقف مغار، مسطح بودن سقف و نرخ کاهش فشار مغار است [۱۴]. زینگ و همکاران تجزیه، تحلیل و شبیه سازی عددی در مورد پایداری طولانی مدت ذخیره زیرزمینی سنگ نمک، با اندازه های مختلف و حداقل فشارهای داخلی متفاوت از جنبه همگرایی، اتساع و آسیب انجام داده اند [۱۵]. لیانگ و همکاران با استفاده از نرم افزار FLAC3D میزان همگرایی مغار و ضریب ایمنی سنگ اطراف مغار نمکی را تحت عملکردهای مختلف مورد مطالعه قرار دادند [۱۶]. حبیبی و همکاران مطالعه برای تجزیه و تحلیل پایداری مغار نمک نصرآباد به روش عددی با استفاده از نرم افزار دوبعدی تحت عنوان LOCAS که توانایی مدل سازی رفتار حرارتی-مکانیکی پیچیده وابسته به زمان نمک را تحت بارگذاری چرخه ای فشار گاز طبیعی دارد، انجام داده اند [۱۷]. عسگری و همکاران ارزیابی کلی از رفتار مغارهای نمکی که برای ذخیره سازی گاز طبیعی استفاده می شود انجام داده که نتایج مشخص کرد که هنگامی که فشار به سطح حداقل کاهش می یابد، در اولین سیکل بهره برداری از مغار احتمال شروع اتساع وجود دارد. در مورد احتمال وقوع تنش کششی در سنگ اطراف مغار، با افزایش تعداد سیکل های بهره برداری، به ویژه در یک سوم بالایی از دیوار مغار، این احتمال وجود دارد و مشخص شده است که عمق مغار و حداقل فشار داخلی مغار تاثیرهای مهم تری نسبت به سایر پارامترها بر رفتار مغار نمکی دارند [۱۸]. اکثر مطالعه های انجام شده بر مغار نمکی بر روی مغارهای ذخیره سازی نفت و گاز طبیعی بوده و بر مغارهای نمکی ذخیره سازی هوای فشرده کمتر مورد مطالعه قرار گرفته اند. در این نوع ذخیره سازی، تفاوت هایی عمده ای در شرایط مخزن ذخیره سازی وجود دارد. شرایط مرزی و مقیاس زمانی شبیه سازی به شدت به ماده ذخیره سازی و نیازهای ذخیره سازی بستگی دارد. به عنوان مثال، تغییرات فشار در مغارهای ذخیره گاز طبیعی به صورت فصلی انجام می گیرد، در حالی که مغارهای ذخیره سازی هوای فشرده ممکن است چرخه های روزانه را تجربه کنند. با توجه به این واقعیت، مراحل زمان انتخاب شده برای شبیه سازی در مغارهای نمکی با چرخه های فرکانس بالا بسیار متفاوت از مغارهای ذخیره سازی فصلی یا سالانه است. علاوه بر این، به

جدول ۱: خواص مقاومتی و الاستیک نمونه ها [۱۷]

| نسبت پواسون | مدول الاستیک (MPa) | مقاومت کششی (MPa) | مقاومت فشاری تک محوره (MPa) |
|-------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| ۰٫۲۸۴ | ۹۳۸ | ۱٫۵۵ | ۱۳٫۱۵ |

شده است [۲۲]. مدل لابی ۲ شامل مراحل اولیه و ثانویه خزش است. نرخ خزش کل $\dot{\epsilon}_1$ از مجموع نرخ خزش اولیه $\dot{\epsilon}_1$ و نرخ خزش ثانویه $\dot{\epsilon}_1$ مطابق با رابطه ۳ محاسبه شده و پارامترهای مدل از روابط ۴ تا ۸ قابل محاسبه است.

$$\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_1^{tr} + \dot{\epsilon}_1^{st} = \left[\frac{1}{\eta_{k(\sigma)}} \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_1^{v,t}}{\sigma_v} \bar{G}_{k(\sigma)} \right) + \frac{1}{\eta_{M(\sigma,T)}} \right] \cdot \sigma_v \quad (3)$$

$$\bar{\eta}_{M(\sigma,T)} = \bar{\eta}_{M\sigma} \cdot \exp(m \cdot \sigma_v) \quad (4)$$

$$\bar{\eta}_{M(\sigma,T)} = \bar{\eta}_{M\sigma} \cdot \exp(l \cdot T) \quad (5)$$

$$\bar{\eta}_{M(\sigma,T)} = \bar{\eta}_{M\sigma} \cdot \exp(m \cdot \sigma_v) \exp(l \cdot T) \quad (6)$$

$$\bar{G}_{K(\sigma)} = \bar{G}_K \cdot \exp(k_1 \cdot \sigma_v) \quad (7)$$

$$\bar{\eta}_{k(\sigma)} = \bar{\eta}_k \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_v) \quad (8)$$

که در این روابط:

$\dot{\epsilon}$: نرخ کرنش خزشی (وابسته به زمان) (۱/روز)

σ_v : تنش موثر (مگاپاسکال)

η_m : ضریب ویسکوزیته ماکسول (مگاپاسکال.روز)

G_k : ضریب کلویین (مگاپاسکال)

η_k : ضریب ویسکوزیته کلویین (مگاپاسکال.روز)

T : دما

پارامترهای k_1, k_2, m, l : پارامترهای ثابت ماده اند [۲۳].

برای انجام آزمون از سلول خزش تک محوره ارایه شده در شکل ۳ استفاده شد. نمونه در سلول خزش قرار گرفته، طبق استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ نمونه بدون شوک تنشی و به آرامی تحت تنش قرار گرفت و میزان جابه‌جایی با استفاده از جابه‌جایی‌سنج با دقت ۰٫۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در ابتدای آزمایش میزان جابه‌جایی هر چند ثانیه، دقیقه و با گذشت زمان به صورت چند ساعت یک بار برداشت شد. سپس بعد از رسیدن نرخ کرنش به مقداری ثابت سطح تنش جدیدی به نمونه وارد و مراحل اندازه‌گیری کرنش نمونه تکرار شده است. آزمایش تحت سه سطح تنش انجام گرفته است. مشخصه‌های آزمایش در جدول ۳ ارایه شده است. در شکل ۴ نمودار خزشی حاصل از آزمایش نشان داده شده است. با استفاده از نمودار خزشی پارامترهای مدل رفتاری لابی ۲

سنگ نمک انتقال از حالت شکل‌پذیر به رفتار شکننده را در منطقه اتساع نشان داده است. متعاقباً، افزایش آسیب در ناحیه اتساع به باز شدن ترک‌های کوچک و افزایش نفوذپذیری منجر شده است. به همین دلایل، مرز اتساع را می‌توان به عنوان معیاری برای اطمینان از یکپارچگی طولانی مدت مغار در نظر گرفت [۲۰]. از آزمایش‌های اولیه دیگری که بر روی نمونه‌های سنگ نمک انجام گرفته می‌توان به آزمایش‌های مقاومت سه محوری اشاره کرد. از نتایج این آزمایش‌ها برای مشخص کردن پارامترهای معیار اتساع استفاده شده است. کاملترین معیار اتساع توسط دوریس معرفی گردید که در روابط ۱ و ۲ ارایه شده است [۲۱].

$$\sqrt{J_{2dil}} = \frac{D_1 \left(\frac{|I_1|}{\text{sgn}(I_1)\sigma_0} \right)^m + \bar{T}_0}{\sqrt{3} \cos \theta - D_2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$F_s = \frac{\sqrt{J_{2dil}}}{\sqrt{J_2}} \quad (2)$$

که در این روابط:

مقادیر $D_1, D_2, \bar{T}_0, m, \sigma_0 = 1$: ثابت‌های سنگ

بوده که در آزمون‌های تجربی تعیین می‌شوند. مقادیر این پارامترها در این نمونه سنگ نمک در جدول ۲ ارایه شده است [۱۷].

جدول ۲: پارامترهای معیار اتساع دوریس برای سنگ نمک [۱۷]

| D_2 | D_1 | \bar{T}_0 | m |
|-------|-------|-------------|-----|
| ۰٫۸۱۸ | ۰٫۹۷ | ۱٫۵۷ | ۰٫۹ |

J_2 : دومین نامتغیر در تانسور تنش انحرافی

J_{2dil} : مقدار آن در مرز اتساع است.

وقتی $F_s < 1$ ، حالت تنش فراتر از مرز اتساع قرار

می‌گیرد، بنابراین وضعیت عملکرد مغار ایمن است و به دلیل پیشرفت آسیب، مغار ممکن است شکست را تجربه کند [۲۱]. آزمون خزش برای تعیین خواص ویسکوپلاستیک سنگ نمک از آزمون خزش پلکانی استفاده شده است. مدل بنیادی که برای بررسی خواص خزشی نمک استفاده شده، مدل لابی ۲ (LUBBY2) است. این مدل رفتاری توسط هوزرمن پیشنهاد

ترمو- مکانیکی (THM) دارد [۲۴].

۳-۱- ساختار زمین شناسی

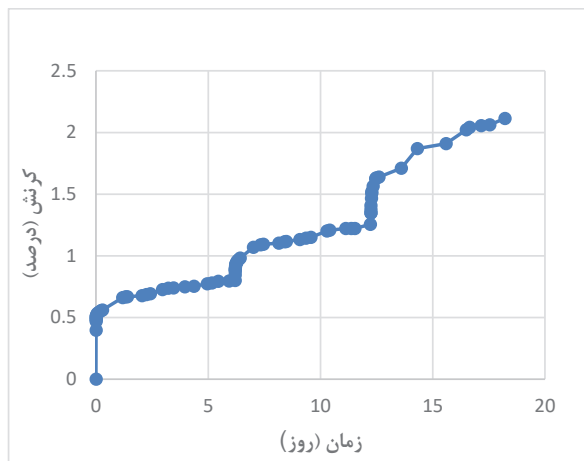
برای مدلسازی مغار ذخیره سازی هوای فشرده، لایه های زمین شناسی طبق جدول ۵ در نظر گرفته شده است. در این لایه بندی، گنبد نمکی در عمق ۲۰۰ متری قرار دارد. با توجه به عمق زیاد و طول دوره های طولانی زمین شناسی، می توان وضعیت تنش را هیدرواستاتیک ($K=1$) فرض کرد [۱۳].

هندس مغار با توجه به الگو برداری تا حد امکان مشابه شکل مغار هانتورف، به شکل کپسول با قطر کوچک ۴۲ متر، طول ۱۵۰ متر و ضخامت لایه های بالای تا سقف مغار ۶۵۰ در نظر گرفته شده است. حجم مغار نیز همانند مغار NK1 نیروگاه ذخیره سازی هوای فشرده هانتورف برابر با ۱۴۱۰۰۰ مترمکعب و با توجه شیب زمین گرمایی و میانگین دمای سطح زمین

محاسبه شده است (جدول ۴). همچنین مشخص شد که در هر مرحله از آزمایش خزش شیب نمودار در قسمت خزش ثانویه (پایا) رابطه مستقیم با مقادیر تنش وارد شده داشته و با افزایش تنش، شیب نمودار افزایش پیدا کرده است و مقادیر ضریب ویسکوزیته ماکسول در هر مرحله با افزایش تنش کاهش یافته است.

۳- مدلسازی عددی

سنگ نمک رفتاری بسیار پیچیده دارد و به همین دلیل برای پیش بینی رفتار بلندمدت این سنگ نیاز به مدل های رفتاری مناسب، شبیه سازی و تحلیل رفتار آن به وسیله نرم افزارهای توانمند وجود دارد. شبیه سازی مغار نمکی به وسیله نرم افزار المان محدود دویعدی LOCAS انجام شده است. این نرم افزار قابلیت تحلیل فرآیندهای توامان هیدرو-



شکل ۴: نمودار خزش نمونه مورد آزمایش

جدول ۳: مشخصات آزمایش خزش یک محوره

| مرحله | تنش (MPa) |
|-----------|-----------|
| مرحله اول | ۸,۵ |
| مرحله دوم | ۱۰ |
| مرحله سوم | ۱۱,۵ |

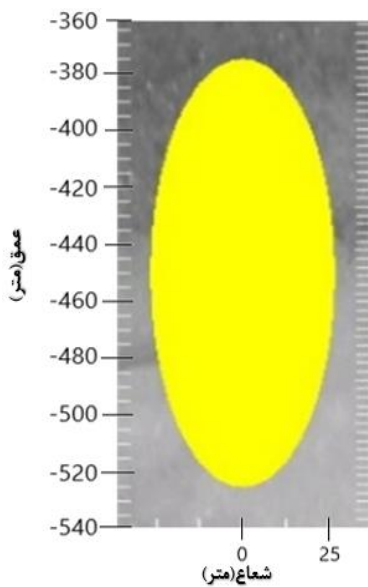


شکل ۳: سلول خزش تک محوره

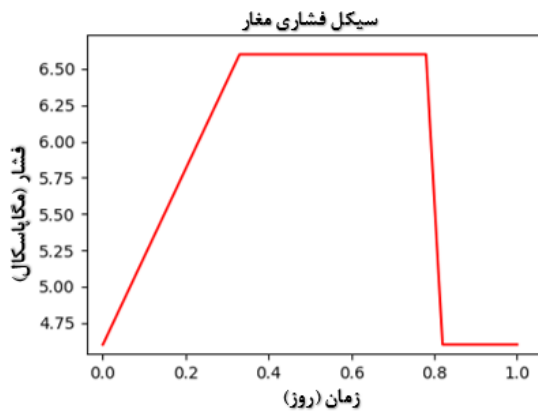
جدول ۴: پارامترهای مدل رفتاری لایه ۲

| نمونه | $\bar{\eta}_{M\sigma}^* (MPa \cdot d)$ | $m (Mpa^{-1})$ | $\bar{G}_k^* (MPa)$ | $k_1 (Mpa^{-1})$ | $\bar{\eta}_k^* (MPa \cdot d)$ | $k_2 (Mpa^{-1})$ |
|-------|--|----------------|---------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| STC1 | ۴E۴,۴ | -۰,۲۶۲ | ۴E۹,۷ | -۰,۴۲ | ۱۲۸۹ | -۰,۰۳۸ |

بودن این تنش است. بر اساس شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است که در تمامی مراحل تحلیل، پاشنه چاه در شرایط کاملاً ایمنی قرار داشته و احتمال ایجاد اتساع و تنش کششی در این قسمت در مدت زمان تحلیل انجام شده وجود ندارد.



شکل ۵: هندسه مدل مغار ذخیره‌سازی هوای فشرده



شکل ۶: شماتیک از بارگذاری و باربرداری مغار در یک شبانه‌روز

دمای مرکز مغار ۳۵٫۲ درجه در نظر گرفته شده است [۲۵]. مشخصات هندسی مدل در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴- شبیه‌سازی فرآیند ساخت و بهره‌برداری

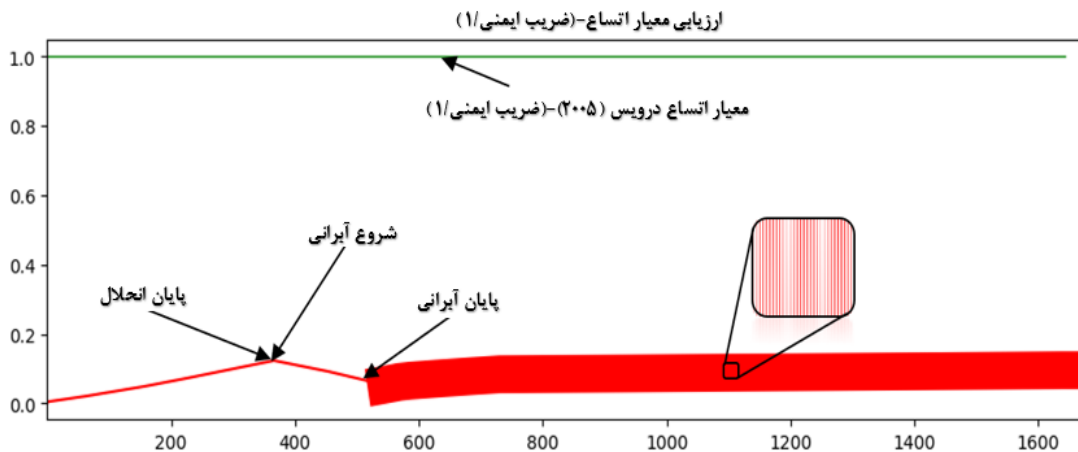
فرآیند ساخت و بهره‌برداری مغار نمکی شامل سه مرحله انحلال (leaching)، آبرانی (debrining) و بهره‌برداری است که هر سه مرحله در مدل شبیه‌سازی شده است. مدت زمان لازم برای مرحله انحلال ۱ سال در نظر گرفته شده است و در مرحله بعد نوبت به آبرانی می‌رسد. برای این مرحله نیز مدت زمان ۶ ماه در نظر گرفته شده است و سپس نوبت به بهره‌برداری می‌رسد که برای مدت ۳ سال با سیکل‌های روزانه الگوبرداری شده از مغار هانتورف که در شکل ۶ نشان داده شده، شبیه‌سازی انجام شده است [۱۳]. مدل در نرم‌افزار ساخته و اجرا شد. در زمان فرآیند ساخت، فشار مرکز مغار از تنش برجای ۷٫۹ مگاپاسکال به فشار ۴٫۴ مگاپاسکال (وزن ناشی از ستون شورآب) در پایان مرحله انحلال رسیده و سپس در پایان مرحله آبرانی فشار مرکز مغار به ۶٫۴ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین تغییرات دما تا پایان مرحله آبرانی نیز صفر در نظر گرفته شده است.

۴-۱- پاشنه چاه

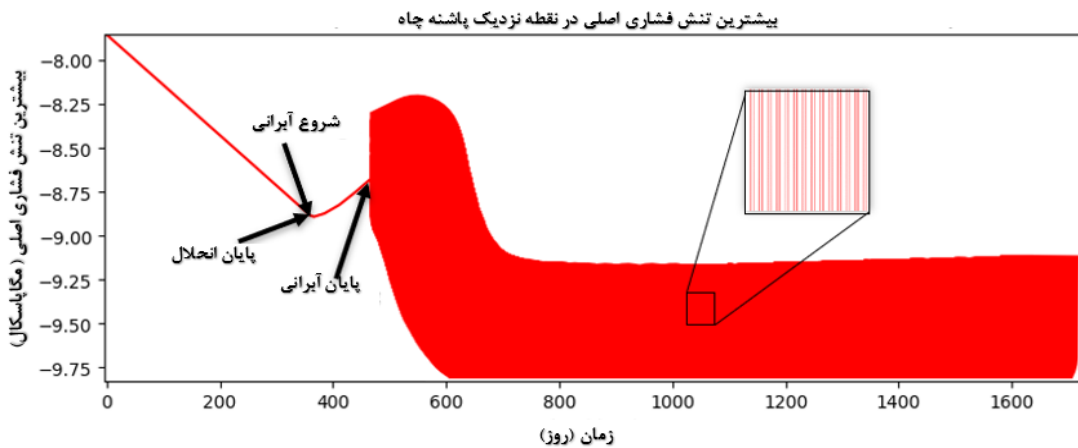
پاشنه چاه نزدیکترین بخش به چاه محسوب می‌شود که در انتهای لوله‌گذاری چاه قرار دارد. به دلیل اهمیت پاشنه چاه برای جلوگیری از نشت سیال و حفظ پایداری مغار اهمیت بسیار زیادی دارد [۲۶]. به همین دلیل پایداری پاشنه چاه به صورت جداگانه بررسی شده است. در این مدل، فاصله پاشنه چاه در فاصله ۵ متری از سقف مغار در نظر گرفته شده و برابر با عمق ۳۷۰ متری است [۲۵]. در شکل ۷ وضعیت اتساع بر اساس معیار دوریس و شکل ۸ وضعیت تنش‌های بیشینه اصلی در نزدیکترین نقطه به پاشنه چاه در طول زمان نشان داده شده است. به دلیل ناچیز بودن مقاومت کششی سنگ نمک می‌توان توزیع تنش را نیز به عنوان معیاری برای طراحی مغار نمکی در نظر گرفت. مقدار منفی تنش بیشینه اصلی نشان‌دهنده فشارشی

جدول ۵: مشخصات لایه‌بندی زمین مدل اولیه

| شماره لایه | جنس لایه | ضخامت (متر) | عمق (متر) | چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) | مدول الاستیک (گیگا پاسکال) | نسبت پواسون |
|------------|----------|-------------|-----------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| ۱ | ماسه‌سنگ | ۲۰۰ | ۰-۲۰۰ | ۲۶۰۰ | ۱۰ | ۰٫۲۱ |
| ۲ | نمک | ۱۸۰۰ | ۲۰۰-۲۰۰۰ | ۲۲۰۰ | ۰٫۹۳ | ۰٫۲۸۵ |



شکل ۷: وضعیت اتساع در نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول ساخت و بهره‌برداری از مغار نمکی



شکل ۸: وضعیت تنش بیشینه اصلی در نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول ساخت و بهره‌برداری از مغار نمکی

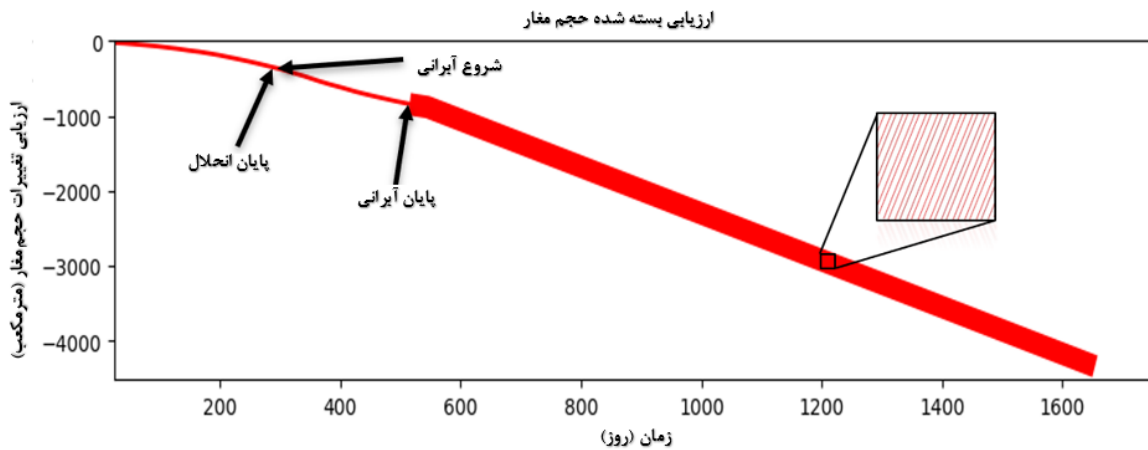
۵- تحلیل مدل

ایمنی مغار بر اساس معیار اتساع درویس در دو فشار حداقل (۴٫۶ مگاپاسکال) و فشار حداکثر (۶٫۶ مگاپاسکال) مشاهده شده است که تمامی قسمت‌های مختلف دیواره مغار ضریب ایمنی مناسب و بالایی دارد. مقدار ضریب ایمنی در هر دو کانتور با افزایش عمق، مقادیر کمتر شده که می‌توان در نتیجه افزایش تنش برجا زمین دانست (شکل ۱۱).

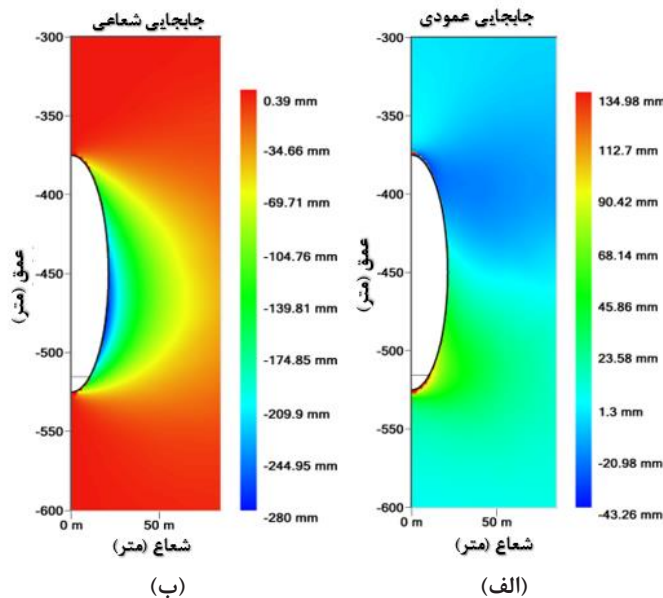
۶- نتیجه‌گیری

ذخیره‌سازی هوای فشرده یکی از انواع ذخیره‌سازی انرژی است که به علت مزایای متعدد آن در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های این سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده، مخزن ذخیره‌سازی است. در این تحقیق پایداری درازمدت تحت بار سیکلی مغار

میزان افت حجم مغار بعد از ۴٫۵ سال از شروع ساخت و بهره‌برداری با فشارهای حداکثر ۶٫۶ مگاپاسکال و حداقل ۴٫۶ مگاپاسکال و سیکل‌های روزانه، ۴۳۰۰ مترمکعب است (شکل ۹). آهنگ افت حجم مغار را می‌توان به صورت ۰٫۶۸ درصد سالیانه دانست که مقداری ایده‌آل و کمتر از ۱ درصد و کاهش حجم مغار در این شرایط برای مخزن ذخیره‌سازی قابل قبول است. با بررسی کانتور جابه‌جایی عمودی قابل مشاهده است که میزان جابه‌جایی در قسمت پایین مغار بیشتر از قسمت بالایی مغار بوده که در نتیجه اختلاف فشار بیشتر بین تنش برجا زمین و فشار درون مغار بوده است. در بررسی کانتور جابه‌جایی شعاعی نیز مشاهده شده است که بیشترین جابه‌جایی مربوط به نیمه پایین مغار است (شکل ۱۰). با بررسی کانتورهای ضریب



شکل ۹: نمودار کاهش حجم مغار



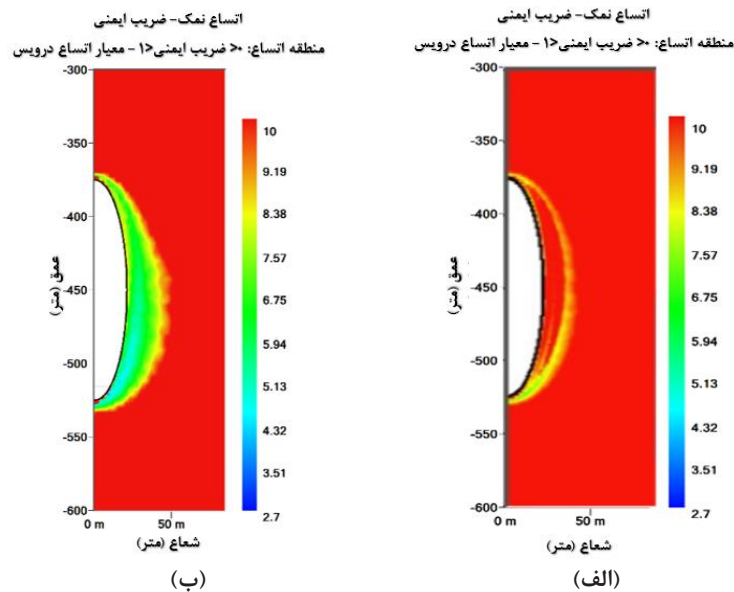
شکل ۱۰: کانتور جابه‌جایی مغار ذخیره‌سازی هوای فشرده؛ الف) کانتور جابه‌جایی مغار در فشار حداکثر، ب) کانتور جابه‌جایی مغار در فشار حداقل

بوده که در نتیجه اختلاف تنش بیشتر در آن منطقه بوده و سقف مغار تمایل حرکت به سمت پایین را داشته و کف مغار تمایل حرکت به سمت بالا را دارد. بیشترین جابه‌جایی مربوط به نیمه پایین مغار است. مقدار ضریب ایمنی مغار بر اساس معیار اتساع دوریس نیز با افزایش عمق کاهش پیدا کرده است.

۷- سپاس‌گزاری

بدین وسیله از شرکت خدمات مهندسی بنوار وارد که نرم‌افزار را در اختیار این تحقیق قرار دادند، سپاس‌گزاری می‌شود.

ذخیره‌سازی هوای فشرده بررسی شد. با استفاده از نمونه‌های سنگ نمک آزمایش خزش تک محوره در سه مرحله به صورت پلکانی انجام و سپس از نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای تحلیل عددی استفاده شد که نتایج به صورت زیر است: با افزایش تنش در هر مرحله شیب قسمت ثانویه خزش افزایش یافته از این رو می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تنش ضریب ویسکوزیته ماکسول کاهش یافته است. کانتور جابه‌جایی عمودی مشخص کرد که میزان جابه‌جایی در قسمت نیمه پایین مغار بیشتر از قسمت نیمه بالایی مغار



شکل ۱۱: کانتور ضریب ایمنی مغار ذخیره سازی هوای فشرده بر اساس معیار اتساع دوریس؛ الف) کانتور مغار در فشار حداکثر، ب) کانتور مغار در فشار حداقل

۸- مراجع

- used for compressed air energy storage". Energy, 147: 464-76.
- [7] Wang, T., Ao, L., Wang, B., Ding, S., Wang, K., Yao, F., and Daemen, J. J. K. (2022). "Tightness of an underground energy storage salt cavern with adverse geological conditions". Energy, 238: 121906. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121906.
- [8] Jiang, Z., Li, P., Tang, D., Zhao, H., and Li, Y. (2020). "Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage". Rock Mechanics and Rock Engineering, 53: 2671-83.
- [9] Ma, H., and Yang, Ch., Qi, Z., Li, Y., and Hao, R. (2012). "Experimental and numerical analysis of salt cavern convergence in ultra-deep bedded formation". In Conference: 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, June 2012, Paper Number: ARMA-2012-392.
- [10] Zhao, K., Liu, Y., Li, Y., Ma, H., Hou, W., Yu, C., Liu, H., Feng, C. and Yang, C. (2021). "Feasibility analysis of salt cavern gas storage in extremely deep formation: A case study in China". Journal of Energy Storage, 47: 103649. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103649.
- [11] Ma, X., Xu, Z., Chen, L., and Shi, X. (2021). "Creep deformation analysis of gas storage in salt caverns". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 139: 104635.
- [1] Zhang, S., Wang, H., Li, R., Li, C., Hou, F., and Ben, Y. (2019). "Thermodynamic analysis of cavern and throttle valve in large-scale compressed air energy storage system". Energy Conversion and Management, 183: 721-731. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.055.
- [2] Han, Y., Ma, H., Yang, C., Li, H., and Yang, J. (2021). "Journal of Petroleum Science and Engineering The mechanical behavior of rock salt under different confining pressure unloading rates during compressed air energy storage (CAES)". Journal of Petroleum Science and Engineering, 196: 107676. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107676.
- [3] Li, L., Liang, W., Lian, H., Yang, J., and Dusseault, M. (2018). "Compressed air energy storage: Characteristics, basic principles, and geological considerations". Advances in Geo-Energy Research, 2: 135-47.
- [4] Zhan, J., Ansari, O. A., Liu, W., and Chung, C. Y. (2019). "An accurate bilinear cavern model for compressed air energy storage". Applied Energy, 242: 752-768. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.104.
- [5] Donadei, S., and Schneider, G. S. (2016). "Compressed air energy storage in underground formations". Elsevier Inc.
- [6] Wang, T., Yang, C., Wang, H., Ding, S., and Daemen, J. J. K. (2018). "Debrining prediction of a salt cavern

- A. (2013). "Modeling time-dependent behavior of gas caverns in rock salt considering creep, dilatancy and failure". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33: 171-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.10.001>.
- [21] Devries, K. L., Mellegard, K. D., Callahan, G. D., and Goodman, W. M. (2005). "Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt". Project Final Report, June 2005, pp. 191.
- [22] Heusermann, S., Rolfs, O., and Schmidt, U. (2003). "Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model". 81: 629-38. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00415-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00415-7).
- [23] Zhao, J., Hou, M. Z., and Xing, W. (2013). "Parameter determination for the Constitutive Model Lubby2 and Strength Model Hou based on laboratory tests on rock salt samples from Jintan, PR China". In: *Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion: Proceedings of the 3rd Sino-German Conference "Underground Storage of CO2 and Energy"*, Goslar, Germany, 21-23 May 2013, Springer Berlin Heidelberg, 293-304.
- [24] Brouard, B., Karimi-Jafari, M., Bérest, P., and Frangi, A. (2006). "Using LOCAS software to better understand the behavior of salt caverns". In Conference: Solution Mining Research Institute, Spring 2006 Technical Meeting Brussels, Belgium, May 1-3, 1-15.
- [25] Réveillère, A., and Londe, L. (2017). "Compressed air energy storage : a new beginning?". In Conference: Solution Mining Research Institute, Technical Conference Fall 2017, Munster, Germany, 1-12.
- [26] Bérest, P., Réveillère, A., Evans, D., and Stöwer, M. (2019). "Review and analysis of historical leakages from storage salt caverns wells". *Oil & Gas Science and Technology*, 74: 27. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst/2018093>.
- [12] Li, W., Nan, X., Chen, J., and Yang, C. (2021). "Investigation of thermal-mechanical effects on salt cavern during cycling loading". *Energy*, 232: 120969.
- [13] Kushnir, R., Dayan, A., and Ullmann, A. (2012). "Temperature and pressure variations within compressed air energy storage caverns". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 5616-30.
- [14] Wang, T., Yang, C., Chen, J., and Daemen, J. J. K. (2018). "Geomechanical investigation of roof failure of China's first gas storage salt cavern". *Engineering Geology*, 243: 59-69.
- [15] Xing, W., Zhao, J., Hou, Z., Were, P., Li, M. and Wang, G. (2015). "Horizontal natural gas caverns in thin-bedded rock salt formations". *Environmental Earth Sciences*, 73: 6973-85.
- [16] Liang, G., Huang, X., Peng, X., Tian, Y., and Yu, Y. (2016). "Investigation on the cavity evolution of underground salt cavern gas storages". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33: 118-34.
- [17] Habibi, R., Moomivand, H., Ahmadi, M., and Asgari, A. (2021). "Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern)". *Environmental Earth Sciences*, 80: 1-22. DOI: [10.1007/s12665-021-09620-8](https://doi.org/10.1007/s12665-021-09620-8).
- [18] Asgari, A., Ramezanzadeh, A., Mohammad, S. J. E., and Brouard, B. (2020). "Stability analysis of salt cavern gas storage using 2D thermo-hydro-mechanical finite-element software". *Journal of Mining and Environment*, 11(1): 77-97. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8357.1715>.
- [19] ISRM. (1981). In: Brown, E. T. (Ed.), *Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring*. Pergamon, Oxford, 111-113.
- [20] Moghadam, S. N., Mirzabozorg, H., and Noorzad,