



Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 3, Autumn 2025



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Laboratory Study on the Effect of Methane Degassing on the Instantaneous Coal Gas Outburst Phenomenon in the Tazareh Mine

Heidari Sheibani R.¹, Ataei M.^{2*}, Kakaie R.²

1- Ph.D Student, Dept. of Mining, Petroleum, and Geophysics Engineering, Shahrood, Iran

2- Professor, Dept. of Mining, Petroleum, and Geophysics Engineering, Shahrood, Iran

Received: 30 Jul. 2024

Accepted: 07 Jul. 2025

Abstract: An outburst is a hazardous and complex phenomenon characterized by the sudden and violent release of large amounts of coal and gas within a short period. Such unexpected events can result in catastrophic consequences, including loss of life and considerable economic damage. Coal gas outbursts, driven by rapid and intense energy release, can significantly impact the surrounding environment. In the early stages of these events, coal fracturing and gas discharge are critical determinants of their onset and intensity. This study focuses on the K10 seam of the Tazareh coal mine and utilizes an advanced laboratory apparatus to investigate the energy dynamics involved in such occurrences. The critical energy release was measured at 30.66 mJ/g, with the corresponding threshold pressure for outburst initiation estimated at 0.35 MPa. To evaluate the effect of methane degassing, controlled experiments were conducted on coal samples from the seam using the custom-designed device. The results revealed that reducing the internal gas pressure by 20% through degassing effectively prevented outburst initiation. These findings represent a notable advancement in coal mine safety and offer practical insights for developing proactive risk mitigation strategies in similar high-risk mining environments.

Keywords: Coal outburst, Methane degassing, Energy release, Coal mine safety.

How to cite this article

Heidari Sheibani, R., Ataei, M., and Kakaie, R. (2025). "Laboratory study on the effect of methane degassing on the instantaneous coal gas outburst phenomenon in the Tazareh mine". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(3): 55-68.

DOI: 10.30479/jmre.2025.20686.1710

*Corresponding Author Email: ataei@shahroodut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2025 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

Methane, a major component of natural gas, is one of the most potent greenhouse gases. It forms a transparent layer in the atmosphere—much like greenhouse glass—that traps heat and gradually raises the Earth's surface temperature. Excessive emissions of methane and other greenhouse gases are a primary contributor to climate change and various adverse environmental effects.

One of the most significant challenges facing coal mines worldwide, especially in developing countries, is the risk of explosions resulting from methane and coal dust accumulation. Far from diminishing, this threat has intensified in recent years.

The motivations for methane recovery in coal mines can be broadly categorized into three main areas:

1. **Enhancing Mine Safety:** Methane can accumulate to explosive levels in underground mines, contaminating the air and creating hazardous working conditions. Sudden methane releases drastically increase the likelihood of explosions, leading to potentially fatal consequences and substantial financial losses. Moreover, the release of other toxic gases during such events poses additional risks to human safety and the environment.

2. **Economic Utilization:** Methane captured through degassing systems not only reduces explosion risks but can also be harnessed as an energy source for internal mine operations or commercial use. This improves the mine's economic efficiency and opens new revenue-generating opportunities.

3. **Environmental Protection:** Beyond safety and economic benefits, methane recovery also serves ecological goals. Reducing methane emissions contributes significantly to mitigating climate change and improving air quality at both local and global levels.

In summary, the effective management of methane in coal mines enhances worker safety, increases economic productivity, and serves as a strategic step toward environmental sustainability.

The coal gas outburst phenomenon presents a critical safety hazard, particularly in longwall mining operations. Predicting methane levels is essential for mitigating this risk, as the danger intensifies with increasing mining depth due to higher gas emission rates from coal seams.

Studies have shown that variables such as gas pressure, low permeability, geological structures, and insufficient degassing are key contributors to gas outbursts. Proper identification and understanding of these factors can improve mine safety and reduce the occurrence of sudden gas releases [1].

Methane remains one of the most significant threats in coal mining. However, modern gas drainage techniques can transform this hazard into an opportunity. Methane drainage is typically performed via two methods: pre-mining and post-mining extraction. Variations in geology and mining conditions worldwide necessitate customized drainage strategies [2].

Gas pressure, gravitational forces, and mining-induced disturbances can weaken the rock mass, leading to the formation of fractures. These fractures alter the load-bearing capacity of coal seams and influence the probability of outbursts [3]. Simulated gas release using compressed coal briquettes has been widely applied to study the underlying mechanisms of instantaneous gas emission [4–7].

In 1998, Lama and Budzianowski identified gas pressure and coal seam permeability as crucial factors in coal gas outbursts. They found that high gas pressure combined with low permeability increased the likelihood of sudden emissions [8]. Similarly, in the Bowley mines in Australia, mining operations were halted due to high gas concentrations, as reported in a 1994 safety report [9].

In 2012, Skoczylas studied rapid gas diffusion under various methane pressures and uniaxial strengths [10]. Later, Zhai et al. (2018) investigated the effect of borehole diameter and lateral stress on gas discharge during drilling. Their findings suggested that larger and deeper boreholes subjected to stress could yield more accurate predictions of sudden gas emissions [11].

The coal gas adsorption-desorption process is considered a dynamic equilibrium. Due to the rapid kinetics involved, high-energy gas releases during explosions play a major role in initiating and propagating such events. However, pressure alone is insufficient to trigger an outburst. Shock tube experiments with CO₂ under high pressure (4–6 MPa) demonstrated only minimal impact on coal samples [12].

In 2022, Shu and colleagues developed a structural simulation apparatus to study the mechanical thresholds required for instantaneous gas release. Their lab-scale eruption tests helped validate a new model for outburst prediction [13].

Despite advancements, there is a lack of large-scale physical models that accurately replicate real

mining conditions while evaluating the behavior of degassing under stress. This study addresses that gap by introducing a newly developed experimental device to investigate instantaneous gas release and the effect of methane degassing, with a specific focus on the K10 seam of the Tazreh coal mine.

METHODS

In dimensional analysis, physical problems are simplified by converting variables into dimensionless numbers, rather than analyzing each variable independently. This technique reduces complexity and minimizes the number of experimental variables affecting a given physical phenomenon. The primary objective of dimensional analysis is to consolidate and reduce variables into meaningful, dimensionless forms.

It serves as a powerful tool for problem-solving, enabling the interpretation of physical systems through dimensionless parameters. Dimensional analysis supports transitions between unit systems, decreases the number of experimental parameters, guides model design through similarity principles, determines scaling rules for fluid properties and structural dimensions, and enhances physical insight by helping derive governing equations.

When the influencing variables of a phenomenon are known but their interrelations are unclear, dimensional analysis can express the system using a reduced number of dimensionless groups. These groups are typically fewer than the number of original variables, thereby reducing the number of experiments required to establish their relationships and often leading to simpler and more cost-effective testing.

In this study, a custom-designed laboratory apparatus was developed based on the principles of dimensional analysis and physical similarity to investigate coal gas outbursts and the effect of methane degassing.

The apparatus includes the following main components:

- A structural support frame
- A high-pressure test chamber (cylindrical)
- A hydraulic cylinder
- A vacuum pump
- A gas capsule
- Pressure sensors
- Solenoid valve and pneumatic valve system with connecting pipes
- An electrical control panel with PLC and HMI interfaces

The test cylinder is designed in accordance with ASME standards—recognized globally as key design codes for pressure vessels. The cylinder has a length of 1 meter, an internal diameter of 500 mm, and a wall thickness of 20 mm. The design specifications allow for a maximum intended gas pressure of 80 MPa, with an operational temperature range from 10°C to 55°C. A safety factor of 5 was incorporated into the design to ensure operational reliability.

FINDINGS AND ARGUMENT

Figure 1 presents the energy-time graph, which indicates that the highest energy recorded from the coal gas outburst test is 30.66 mJ/g. In this experiment, the suction pump first generated a vacuum within the cylinder after 328 seconds. Subsequently, gas was injected, and the hydraulic jack was activated to replicate the earth stress conditions acting on the coal, thereby increasing the chamber pressure. When the pressure reached 0.35 MPa, a sudden gas release took place. The valve of the instantaneous release system was opened for 10 seconds, leading to a pressure drop and a rise in temperature within the system. At the start of the test, the initial temperature at the valve of the device's instantaneous discharge system was 29 °C. When the instantaneous discharge occurred, the temperature rose to 33 °C.

CONCLUSIONS

The extraction of coal resources—predominantly conducted via underground mining methods—requires strict adherence to engineering principles, safety protocols, and industry standards. At present, most coal mining activities take place in gas-bearing zones, and as operations expand to greater depths, the frequency and severity of gas-related issues are expected to increase. Therefore, minimizing these risks through the application of modern technology, scientific knowledge, and available resources is essential.

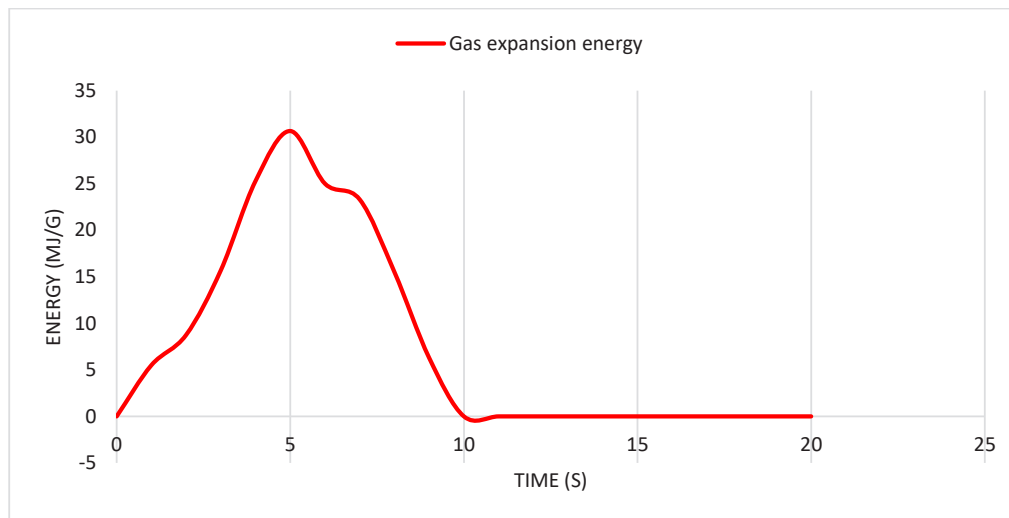


Figure 1. Energy versus time graph generated from the simulation of the outburst process for the K10 layer sample from the Tazareh mine

Methane degassing plays a vital role for three main reasons:

- (1) it reduces greenhouse gas emissions,
- (2) it provides a renewable energy source with economic potential, and
- (3) it significantly enhances mine safety by mitigating the risk of dangerous outbursts.

This study introduced a novel laboratory apparatus, designed and constructed based on physical modelling principles, to investigate the coal gas flashover phenomenon and assess the effects of methane degassing on this event—specifically focusing on the K10 seam of the Tazreh coal mine.

The experimental results demonstrated that at a flashover pressure of 0.35 MPa, the energy release reached 30.66 mJ/g. Additionally, the system recorded a temperature increase of 4°C during the outburst event. In the degassing test, reducing the internal pressure by 20% through suction successfully prevented the flashover, demonstrating the effectiveness of this method in enhancing safety.

This innovative apparatus—developed for the first time in Iran—offers robust capabilities for analyzing and simulating conditions related to coal gas outbursts. It serves as a practical tool for optimizing methane degassing strategies across coal mines, contributing to both improved safety and environmental sustainability.

REFERENCES

- [1] Heidari Sheibani, R., Ataei, M., and Kakaie, R. (2024). “Unveiling the Catastrophic Mechanism of Coal and Gas Outbursts: Strategies for Prevention and Control”. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 14(39): 59-67.
- [2] Jia, L., Li, K., Shi, X., Zhao, L., and Linghu, J. (2021). “Application of gas wettability alteration to improve methane drainage performance: A case study”. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(4): 621-629.
- [3] Huang, W., Zhanqing, C., Jianhua, Y., Zhang, Y., and Min, Y. (2010). “Failure modes of coal containing gas and mechanism of gas outbursts”. *Mining Science and Technology (China)*, 20(4): 504-509.
- [4] Zhou, H., Zhang, R., Cheng, Y., Dai, H., Ge, C., and Chen, J. (2015). “Methane and coal exploitation strategy of highly outburst-prone coal seam configurations”. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 23: 63-69.
- [5] Zhao, W., Cheng, Y., Guo, P., Jin, K., Tu, Q., and Wang, H. (2017). “An analysis of the gas-solid plug flow formation: New insights into the coal failure process during coal and gas outbursts”. *Powder Technology*, 305: 39-47.
- [6] Tu, Q., Xue, S., Cheng, Y., Zhang, W., Shi, G., and Zhang, G. (2022). “Experimental study on the guiding effect of tectonic coal for coal and gas outburst”. *Fuel*, 309: 122087.
- [7] Zhang, M., Cao, X., Zhang, L., Zhou, A., and Li, B. (2023). “Experimental study on the contribution of desorbed gas to

- the propagation and disaster-causing of coal-gas outbursts*". Fuel, 349: 128656.
- [8] Lama, R., and Bodziony, J. (1998). "*Management of outburst in underground coal mines*". International Journal of Coal Geology, 35(1-4): 83-115.
- [9] Kissell, F. N., and Iannacchione, A. T. (2014). "*Gas outbursts in coal seams*". In: Coal Bed Methane (pp. 177-184): Elsevier.
- [10] Skoczylas, N. (2012). "*Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst*". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, (55): 102-107.
- [11] Zhai, C., Xu, J., Liu, S., and Qin, L. (2018). "*Investigation of the discharge law for drill cuttings used for coal outburst prediction based on different borehole diameters under various side stresses*". Powder Technology, 325: 396-404.
- [12] Yang, D., Chen, Y., Tang, J., Li, X., Jiang, C., Wang, C., and Zhang, C. (2018). "*Experimental research into the relationship between initial gas release and coal-gas outbursts*". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 50: 157-165.
- [13] Shu, L., Wang, K., Liu, Z., Zhao, W., Zhu, N., and Lei, Y. (2022). "*A novel physical model of coal and gas outbursts mechanism: Insights into the process and initiation criterion of outbursts*". Fuel, 323: 124305.



دوره دهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، صفحه ۶۸ تا ۶۰

Vol. 10, No. 3, Autumn 2025, pp. 60-68



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

علمی-پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر گاززدایی متان بر پدیده تصاعد آبی گاز زغال در معدن طزره

رضا حیدری شیبانی^۱، محمد عطائی^{۲*}، رضا کاکائی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استاد، گروه استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹

چکیده

پدیده تصاعد آبی گاز، یکی از مخاطرات جدی و پیچیده در معادن زغال سنگ محسوب می شود که با آزادسازی ناگهانی و سریع مقادیر زیادی گاز و زغال سنگ در بازه زمانی کوتاه همراه است. این رویداد پیامدهای ناگواری از جمله تلفات انسانی و خسارات اقتصادی گسترده به همراه دارد. تصاعد آبی گاز، به عنوان فرآیندی ناشی از رهایش سریع و پراثری، تأثیر قابل توجهی بر محیط پیرامون دارد. در مراحل آغازین این پدیده، تخریب ساختار زغال سنگ و رهاسازی گاز، نقش کلیدی در شروع و شدت آن ایفا می کند. در این مطالعه، لایه K10 معدن زغال سنگ طزره مورد بررسی قرار گرفته و با بهره گیری از یک دستگاه آزمایشگاهی نوآورانه، رفتار انرژی آزاد شده در این پدیده تحلیل شده است. بر اساس نتایج، انرژی بحرانی تصاعد معادل ۳۰/۶۶ میلی ژول بر گرم و فشار آستانه آغاز پدیده، برابر با ۰/۳۵ مگاپاسکال اندازه گیری شده است. به منظور بررسی تأثیر گاززدایی، آزمایش هایی بر روی نمونه های زغالی این لایه انجام شد. نتایج نشان داد که با کاهش فشار داخلی نمونه ها به میزان ۲۰ درصد از طریق گاززدایی، می توان از وقوع پدیده تصاعد آبی جلوگیری کرد. این یافته، گامی مؤثر در راستای ارتقای ایمنی معادن زغال سنگ به شمار می آید و می تواند به توسعه راهکارهای پیشگیرانه و کاهش ریسک در محیط های پرخطر معدنی منجر شود.

کلمات کلیدی

تصاعد آبی گاز، گاززدایی، انرژی، معدن زغال سنگ.

استناد به این مقاله

حیدری شیبانی، ر.، عطائی، م.، کاکائی، ر.؛ ۱۴۰۴؛ "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر گاززدایی متان بر پدیده تصاعد آبی گاز زغال در معدن طزره". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۳، ص ۵۵-۶۸.

DOI: 10.30479/jmre.2025.20686.1710



حق مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: ataei@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

متان یکی از اصلی‌ترین ترکیبات موجود در گاز طبیعی و از جمله مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. گازهای گلخانه‌ای به موادی اطلاق می‌شوند که با افزایش تراکم خود در جو، دیواری شفاف مشابه شیشه‌های گلخانه‌ای در اطراف زمین ایجاد می‌کنند. این دیوار شیشه‌ای به مرور زمان باعث افزایش دما در سطح زمین می‌شود و به همین دلیل، انتشار بی‌رویه این گازها به تغییرات اقلیمی و پیامدهای زیست‌محیطی ناگوار منجر می‌شود.

یکی از چالش‌های بزرگ در معادن زغال‌سنگ در سطح جهانی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، خطر انفجار ناشی از تجمع متان و گرد زغال است. این خطر نه تنها کاهش نیافته، بلکه در سال‌های اخیر شدت بیشتری یافته است.

دلایل اصلی برای بازیابی متان در معادن زغال‌سنگ را می‌توان در سه دسته کلی جای داد:

الف) افزایش ایمنی معدن: ممکن است متان به‌طرز خطرناکی در معادن زغال‌سنگ تجمع یابد و هوای معدن را آلوده کند. یکی از خطرناک‌ترین وضعیت‌های آن، آزادسازی ناگهانی به شکل انفجار متانی است که به‌طور قابل‌توجهی ریسک انفجار را افزایش می‌دهد. این انفجارها معمولاً پیامدهای جبران‌ناپذیری چون تلفات جانی و خسارات مالی سنگین به‌همراه دارند. پس از وقوع انفجار، انتشار گازهای سمی دیگر نیز خطرات ثانویه‌ای ایجاد کرده و بر تلفات انسانی و آسیب‌های زیست‌محیطی می‌افزاید.

ب) پیشرفت اقتصادی معادن: با بهره‌گیری از سامانه‌های گاززدایی، می‌توان متان را بازیابی کرد. این اقدام نه تنها خطر انفجار را کاهش می‌دهد، بلکه امکان استفاده از این گاز به‌عنوان سوخت در داخل معدن یا عرضه‌ی آن برای مصارف تجاری را نیز فراهم می‌سازد. کاهش انتشار متان همچنین موجب بهبود بهره‌وری اقتصادی معادن و ایجاد فرصت‌های درآمدزایی جدید خواهد شد.

ج) حفاظت از محیط‌زیست: بازیابی متان، علاوه بر مزایای اقتصادی و ایمنی، دارای اثرات مثبت زیست‌محیطی است. این گاز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای، تأثیر منفی شدیدی بر تغییرات اقلیمی دارد. در نتیجه، بازیابی و کاهش انتشار آن می‌تواند به حفظ محیط‌زیست محلی و جهانی کمک کرده و از بروز پیامدهای مخرب جلوگیری کند.

در نهایت، مدیریت مؤثر متان در معادن زغال‌سنگ، نه تنها

موجب افزایش ایمنی و بهره‌وری اقتصادی می‌شود، بلکه رویکردی مؤثر در راستای حفاظت از محیط‌زیست به‌شمار می‌آید.

پدیده تصاعد آبی گاز زغال، به‌ویژه در روش جبهه‌کار طولانی، یکی از خطرناک‌ترین حوادث در معادن زغال‌سنگ محسوب می‌شود. یکی از اهداف اصلی پیش‌بینی تصاعد گاز متان، کاهش خطرات ناشی از این پدیده در حوزه ایمنی است، زیرا ممکن است بر پیشرفت تونل‌زنی در معادن تأثیر منفی بگذارد. با افزایش عمق عملیات استخراج، حجم گاز موجود در لایه‌های زغال‌سنگ نیز به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد عواملی چون فشار گاز، نفوذپذیری پایین، ویژگی‌های زمین‌شناسی و نبود گاززدایی مناسب، به‌طور مستقیم بر وقوع این پدیده اثرگذارند. شناخت این عوامل می‌تواند موجب بهبود ایمنی معادن و کاهش خطرات مرتبط با تصاعد آبی گاز شود [۱]. وجود متان یکی از مهم‌ترین تهدیدات در مسیر تحقق استخراج ایمن است. این در حالی است که با بهره‌گیری از روش‌های نوین گاززدایی یا زه‌کشی گاز متان، می‌توان این تهدید را به فرصتی مطلوب تبدیل کرد. به‌طور کلی، زه‌کشی گاز متان در معادن زغال‌سنگ به دو روش اصلی زه‌کشی پیش از استخراج و زه‌کشی پس از استخراج انجام می‌شود. تفاوت‌های زمین‌شناسی و شرایط استخراج در نقاط مختلف جهان، استفاده از روش‌های گوناگون زه‌کشی گاز متان را الزامی ساخته است [۲].

به‌دلیل تأثیر فشار گاز، گرانش و تنش‌های حاصل از عملیات استخراج، توده‌سنگ در برخی زون‌ها دچار شکست شده و شیارهایی در آن پدید می‌آید که به‌تدریج به ترک‌هایی گسترده تبدیل می‌شوند. گسترش این ترک‌ها ظرفیت حمل لایه زغال‌سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌همین سبب، زون شکست در لایه زغال‌سنگ و مرزهای آن متنوع است و همین عامل، نقشی مؤثر در بروز پدیده تصاعد آبی گاز دارد [۳]. روش شبیه‌سازی تصاعد آبی گاز با استفاده از بریکت‌های فشرده، در آزمایش‌های متعددی برای بررسی مکانیزم‌های داخلی انتشار گاز به‌کار گرفته شده است [۴-۷].

در سال ۱۹۹۸، لاما و بودزیونی در مطالعه‌ای به بررسی پدیده تصاعد آبی گاز پرداختند و دریافتند که فشار گاز (میزان گاز) و نفوذپذیری لایه زغال‌سنگ، دو عامل اساسی در بروز این پدیده هستند. آن‌ها نشان دادند که نفوذپذیری پایین در فشار بالا منجر به افزایش میزان انتشار گاز می‌شود [۸].

۲- روش آزمایش

در تحلیل ابعادی، به جای استفاده مستقیم از تمام متغیرها، گروه‌های بی‌بعد استخراج شده و در تحلیل پدیده‌های فیزیکی به کار گرفته می‌شوند. این گروه‌ها با فشرده‌سازی روابط میان متغیرها، به کاهش پیچیدگی و محدود شدن تعداد متغیرهای تجربی مؤثر در پدیده کمک می‌کنند. مهم‌ترین هدف تحلیل ابعادی، کاهش تعداد متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها به صورت بی‌بعد است.

تحلیل ابعادی، روشی قدرتمند در بررسی مسائل فیزیکی است که با استفاده از آن می‌توان روابط حاکم میان متغیرها را بدون نیاز به داشتن فرم دقیق معادلات، شناسایی کرد. انتقال میان سیستم‌های مختلف واحد اندازه‌گیری، کاهش تعداد متغیرهای مورد نیاز در آزمایش‌های تجربی، طراحی مدل‌ها بر پایه اصل تشابه دینامیکی، تعیین مقیاس‌های مورد نیاز برای مشخصات سیال و ابعاد فیزیکی، کمک به درک فیزیک مسئله و استنتاج معادلات حاکم مهم‌ترین کاربردهای تحلیل ابعادی هستند.

در شرایطی که متغیرهای مؤثر بر یک پدیده فیزیکی شناخته شده‌اند اما روابط دقیق میان آن‌ها نامعلوم است، می‌توان با بهره‌گیری از تحلیل ابعادی، پدیده را به صورت رابطه‌ای میان چند پارامتر بی‌بعد فرمول‌بندی کرد. به این ترتیب، نه تنها تعداد آزمایش‌های لازم برای استخراج این روابط کاهش می‌یابد، بلکه طراحی و اجرای آزمایش‌ها نیز ساده‌تر خواهد شد.

در این مقاله، با بهره‌گیری از اصول تحلیل ابعادی و مفهوم تغییر مقیاس، اقدام به طراحی و ساخت یک دستگاه گاززدایی در معادن زغال‌سنگ شده است. شکل ۱ نمایی سه‌بعدی از کل دستگاه طراحی شده را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۱، دستگاه طراحی شده شامل بخش‌های اسکلت سازه، سیلندر محفظه آزمایش، سیلندر هیدرولیک، پمپ خلأ، کپسول گاز، حسگرهای فشار، لوله‌های اتصال، شیرهای برقی، دریچه پنوماتیک، تابلو برق و متعلقات، سامانه PLC^۲ و رابط کاربری HMI^۳ است.

طراحی سیلندر آزمایش بر مبنای استاندارد ASME^۴ انجام شده است. این استاندارد یکی از معتبرترین و جامع‌ترین کدهای مورد استفاده در طراحی مخازن تحت فشار به‌شمار می‌رود. ابعاد سیلندر عبارت از طول یک متر، قطر داخلی ۵۰۰

معیار مناسب زه‌کشی، کاهش قابل‌توجه میزان گاز در لایه‌ها است. به عنوان نمونه، در معادن بوولی استرالیا، در صورت بالا بودن میزان گاز، عملیات استخراج ممنوع اعلام می‌شود. اقدامی که از هشدارهای تجربی در پی وقوع حوادث ناشی از انتشار ناگهانی گاز در سال ۱۹۹۴ نشأت گرفته است [۹].

در سال ۲۰۱۲، اسکاجولاس با تحلیل فشار گاز متان و مقاومت تک‌محوره، پدیده تصاعد آبی گاز را مورد مطالعه قرار داد [۱۰]. در سال ۲۰۱۸، ژای و همکارانش با به‌کارگیری قانون تخلیه^۱ و حفر چال‌هایی با قطرهای مختلف تحت تنش‌های جانبی، به پیش‌بینی این پدیده در عملیات حفاری زغال‌سنگ پرداختند.

پیش‌بینی، نخستین گام در کنترل و پیشگیری از پدیده انتشار ناگهانی گاز و مخاطرات زمین‌شناسی در معادن است. با افزایش عمق عملیات استخراج، روش‌های سنتی حفر چال‌های با قطر ۴۲ میلی‌متر با محدودیت‌هایی مواجه می‌شوند. ژای و همکاران با استفاده از چال‌های با قطرهای مختلف و به‌کارگیری قانون تخلیه، به بهبود شاخص‌های پیش‌بینی دست یافتند. نتایج نشان داد که چال‌هایی با قطر و طول بیشتر، منجر به افزایش حجم حفر برش در اطراف نواحی تنش‌دار می‌شوند [۱۱].

فرآیند جذب و دفع گاز در زغال‌سنگ یک فرآیند تعادل پویا است. از آن‌جا که این واکنش‌ها به سرعت انجام می‌شوند، انتشار گاز با انرژی بالا به گسترش انفجار کمک کند. با این حال، فشار زیاد گاز به تنهایی برای وقوع پدیده انتشار ناگهانی کافی نیست. نتایج آزمایش لوله شوک نشان داد که تخلیه ناگهانی گاز CO₂ از فشارهای بالا (۴-۶ مگاپاسکال)، اثر مخربی محدود بر زغال‌سنگ دارد [۱۲].

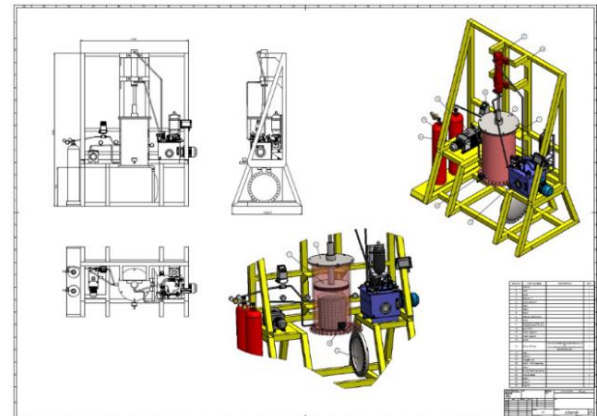
در سال ۲۰۲۲، شو و همکارانش با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی اختصاصی، مدل ساختاری پدیده تصاعد آبی گاز را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با انجام شبیه‌سازی‌های فوران و ارزیابی نمونه‌های واقعی، مدل جدید و معیارهای آغاز رویداد را اعتبارسنجی کردند [۱۳].

با وجود مطالعات پیشین، هنوز نیاز به انجام یک آزمایش جامع فیزیکی با مقیاس مناسب، شرایط واقعی، اعمال تنش و بررسی هم‌زمان گاززدایی گاز احساس می‌شود.

در این مقاله، با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی جدید، پدیده تصاعد آبی گاز زغال و تأثیر گاززدایی بر آن، با تمرکز بر لایه K10 در معدن طزره مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲: شمای کلی دستگاه بررسی تصاعد آبی گاز زغال و گاز کشی در معادن زغال سنگ



شکل ۱: نمای کلی و سه بعدی دستگاه طراحی شده

میلی متر و ضخامت دیواره ۲۰ میلی متر است. شکل ۲ نمایی از دستگاه طراحی و ساخته شده را نشان می دهد. در این دستگاه، فشار طراحی گاز برابر ۸۰ مگاپاسکال و دمای کاری در بازه ۱۰ تا ۵۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. دستگاه با ضریب ایمنی ۵ طراحی شده و از پایداری کافی در شرایط کاری دارد.

۲-۱- شبیه سازی پدیده تصاعد آبی گاز زغال

با توجه به سرعت بالای وقوع پدیده تصاعد آبی گاز زغال سنگ و رسانایی حرارتی پایین آن، این فرآیند معمولاً به عنوان یک فرآیند سینتیکی عایق حرارتی در نظر گرفته می شود. بر اساس قانون اول ترمودینامیک، تبدیل انرژی در این فرآیند انفجاری را می توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد [۱۲]:

$$W + Q = F + Q_x \quad (1)$$

که در آن:

W : انرژی کشش الاستیکی ذخیره شده در زغال سنگ

Q : انرژی گاز کاهش یافته از فرآیند انفجار

F : انرژی خرد شدن زغال سنگ

Q_x : انرژی گاز انتقال یافته به خارج از زغال سنگ در طول

انفجار است. علاوه بر این، روابط ۴ و ۵ نیز برقرار است:

$$Q_x = Q_1 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

$$W_p = \frac{1}{2}mv \quad (3)$$

که در آن:

Q_1 : انرژی درونی باقی مانده در گاز

m : جرم عبور گاز از طریق سوراخ نازل

v : سرعت جریان گاز

W_p : انرژی انبساط گاز آزاد شده از زغال سنگ است.

جریان گاز درون سیلندر در حالت بحرانی رخ می دهد.

فشار بحرانی P^* طبق رابطه ۴ تعریف می شود و با پایش فشار

و دمای داخل سیلندر، جرم و سرعت جریان گاز از رابطه ۵

قابل محاسبه است:

$$P^* = P_2 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 > P^* : m = C_q \frac{P_0 \sigma^*}{\sqrt{T_0}} \\ V = c \\ P_0 < P^* : m = \frac{P_0 \sigma^*}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]} \\ v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} RT_0 \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)} \end{array} \right. \quad (5)$$

که در آن:

T_0 و P_0 : به ترتیب فشار و دمای گاز در آزمون سلول

P^* : فشار بحرانی

P_2 : فشار اتمسفر

σ^* : مقطع عرضی روزنه نازل

C_q : گرمای ویژه در فشار ثابت

γ : شاخص بی‌دررو

R : ثابت گاز ایده آل

c : سرعت صوت است.

انتشار گاز را می‌توان به V_0 (حجم گاز تحت شرایط استاندارد) با استفاده از معادله ۶ تبدیل کرد:

$$V_0 = \frac{m}{M_r} V_m \quad (6)$$

که در آن:

V_0 : حجم گاز از توده m تحت شرایط استاندارد (فشار

۱۰۱ کیلو پاسکال، دمای صفر درجه سانتی گراد)

M_r : جرم مولکولی گاز

V_m : حجم مولی گاز (۲۲/۴۱۴۱ L/mol) است.

اطلاعات مربوط به فشار و دما در مرحله اولیه آزمایش،

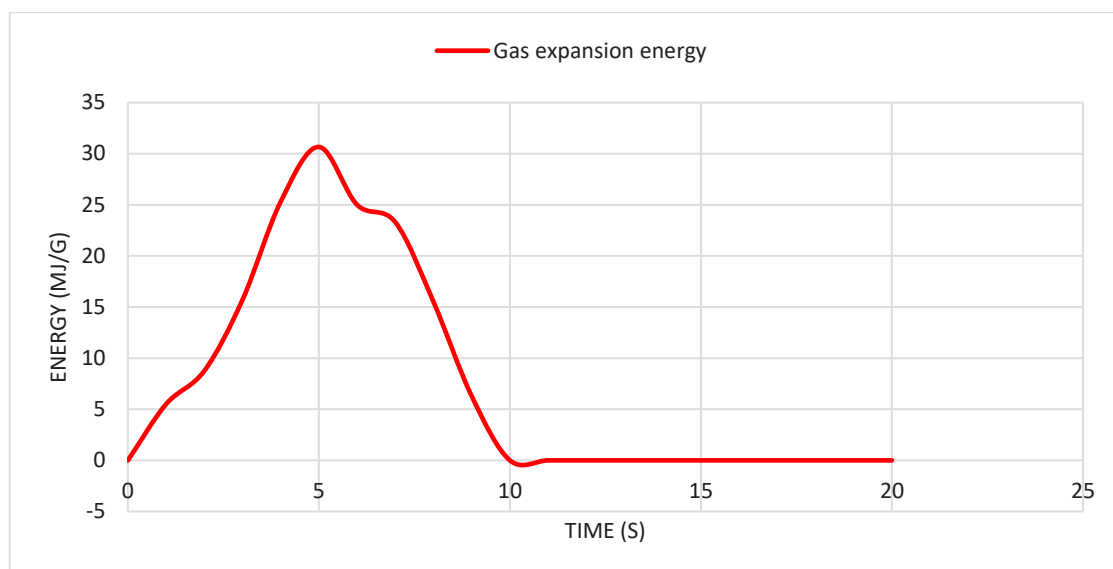
امکان محاسبه انرژی جنبشی و حجم گاز آزاد شده از

زغال سنگ پودر شده را فراهم می‌کند. منحنی انتشار گاز از نمونه زغال سنگی، بر اساس داده‌های ثبت‌شده توسط دستگاه دفع گاز، قابل ترسیم است.

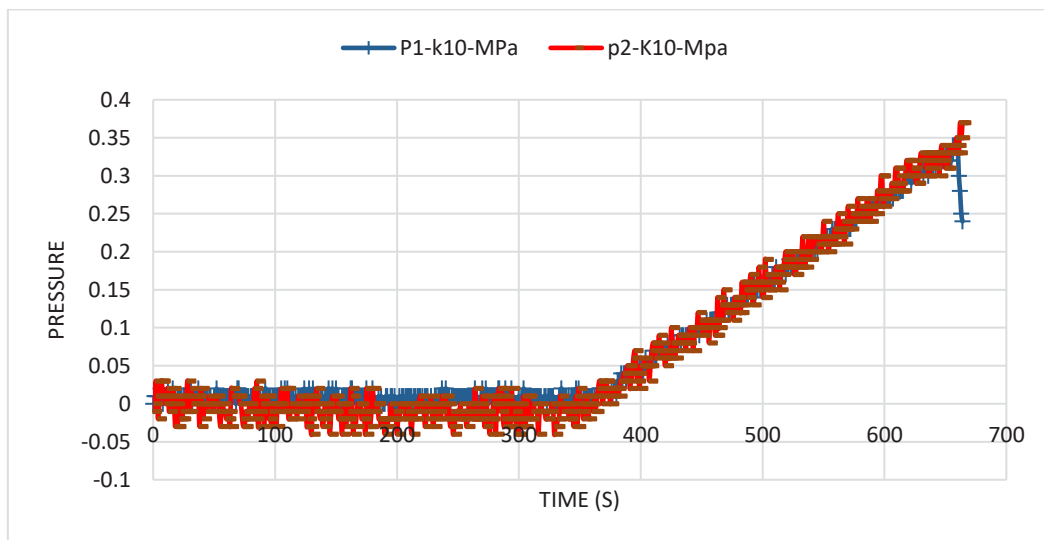
شکل ۳، نمودار تغییرات انرژی بر حسب زمان را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، بیشینه انرژی آزاد شده در فرآیند تصاعد آنی گاز برابر با ۳۰/۶۶ میلی‌ژول بر گرم ثبت شده است.

شکل ۴، نمودار فشار-زمان حاصل از شبیه‌سازی آزمایش را نشان می‌دهد. در این شکل P_1 فشار محفظه سیلندر آزمایش و P_2 فشار سیستم تصاعد آنی گاز (برحسب مگاپاسکال) است. بر اساس نمودار، پمپ خلأ در ثانیه ۳۲۸ موجب ایجاد خلأ درون سیلندر شده است. سپس با تزریق گاز و فعال شدن جک هیدرولیک برای اعمال تنش مشابه تنش‌های زمین‌ساختی، فشار در محفظه افزایش یافته است. در فشار ۰/۳۵ مگاپاسکال، پدیده تصاعد آنی رخ داده و دریچه سیستم تصاعد گاز به مدت ۱۰ ثانیه باز مانده است که منجر به افت سریع فشار شده است.

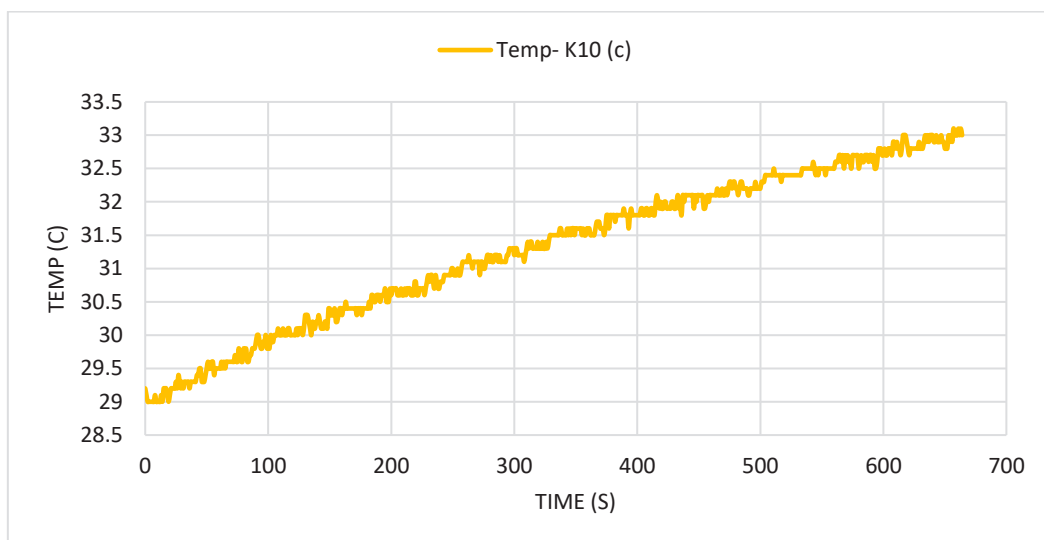
شکل ۵، نمودار تغییرات دما بر حسب زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول آزمایش، افزایش تدریجی دما در سیستم ثبت شده است. به‌طور مشخص، دمای اولیه در ناحیه دریچه ۲۹ درجه سانتی‌گراد بوده و با وقوع پدیده تصاعد آنی، به ۳۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است.



شکل ۳: نمودار انرژی بر حسب زمان حاصل از شبیه‌سازی فرآیند تصاعد آنی گاز زغال نمونه لایه K10 معدن طزره



شکل ۴: نمودار فشار تصاعد آبی گاز (۰/۳۵ مگاپاسکال) در لایه K10 معدن طزره



شکل ۵: نمودار تغییرات دما در حین آزمایش تصاعد آبی گاز لایه K10 در فشار ۰/۳۵ مگاپاسکال

۲-۲- شبیه سازی گاززدایی

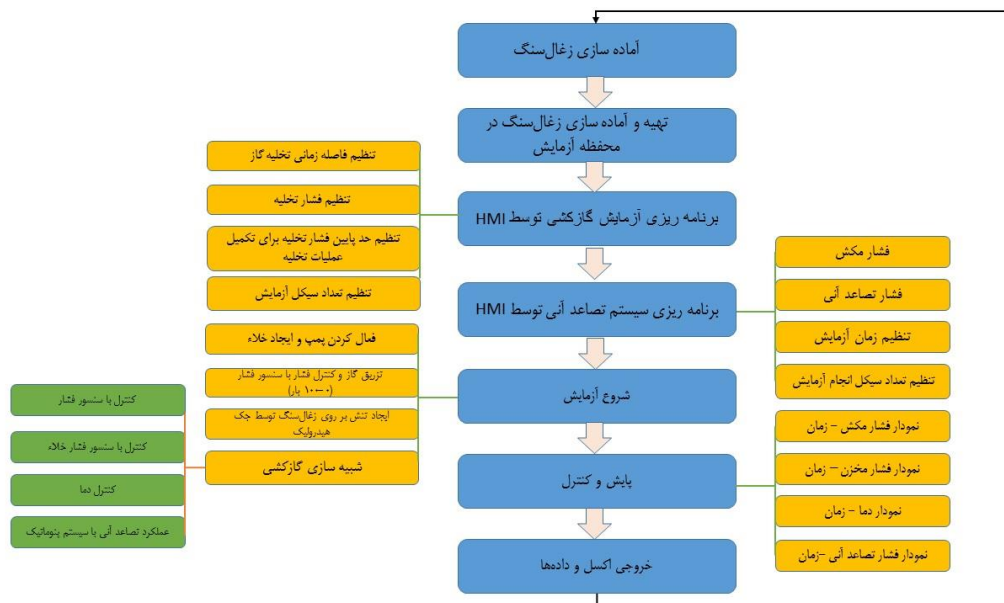
در این مرحله به مطالعه تأثیر گاززدایی بر پدیده انتشار آبی گاز در معادن زغال سنگ با استفاده از مدلسازی فیزیکی پرداخته شده است. این دستگاه جدید قابلیت تحلیل و محاسبه شرایط مختلف پدیده انتشار آبی گاز زغال و تحلیل گاززدایی مناسب گاز متان برای تمامی معادن زغال سنگ را دارد. به منظور انجام آزمایش تصاعد آبی گاز زغال، نمونه هایی از لایه K10 معدن طزره تهیه و آماده سازی شده است. در شکل ۶

روند نما و مراحل انجام آزمایش گاززدایی توسط دستگاه نشان داده شده است.

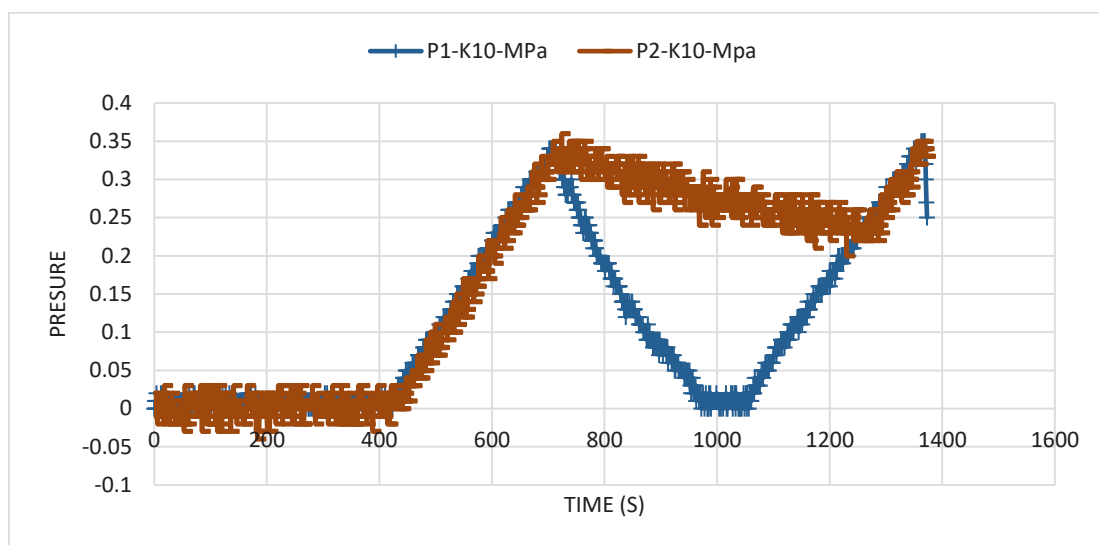
بر اساس شکل ۶، بعد از آماده سازی زغال سنگ درون محفظه آزمایش، تنظیم فشار مکش، فشار تصاعد آبی گاز، زمان آزمایش، تعداد سیکل های آزمایش، فاصله زمانی تخلیه گاز، فشار تخلیه و حد پایین فشار تخلیه، توسط رابط کاربری HMI دستگاه انجام می گیرد. بعد از شروع آزمایش، ابتدا پمپ مکش درون سیلندر

لایه K10 معدن طزره را نشان می‌دهد. در این آزمایش فشار مخزن بر روی ۰/۳۵ مگاپاسکال و فشار داخل دریچه سیستم تصاعد آنی گاز زغال بر روی ۰/۳۷ مگاپاسکال تنظیم شده است. نمونه‌ها از کارگاه استخراج تهیه و با ابعاد دانه‌بندی ۰-۶ میلی‌متر درون محفظه آزمایش قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه در فشار ۰/۳۵ مگاپاسکال تصاعد آنی رخ داده است، مبنای فشار تخلیه معادل ۲۰ درصد این فشار در نظر گرفته شده

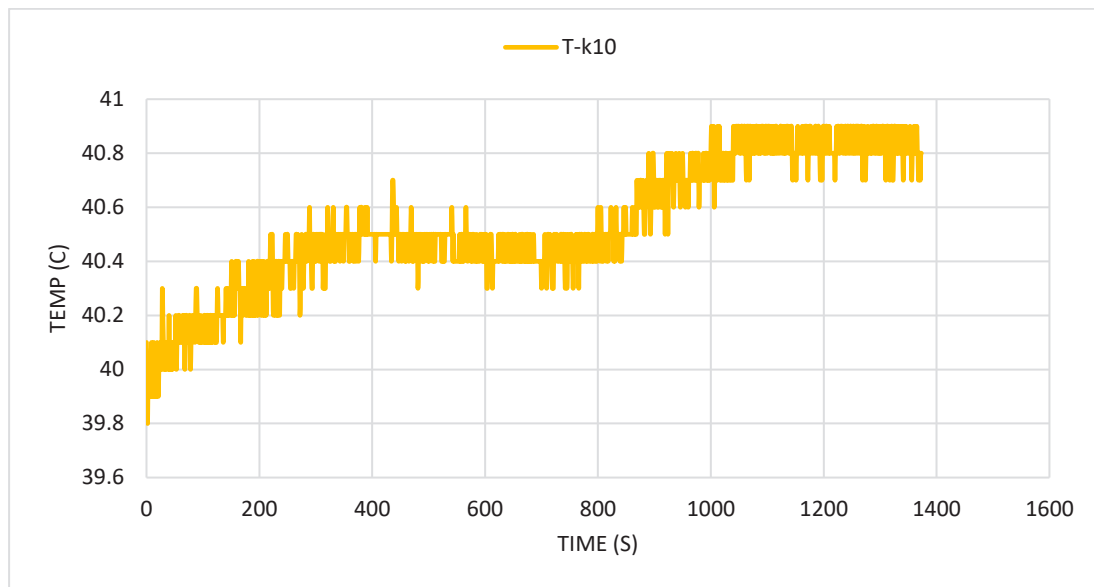
محفظه آزمایش خلأ ایجاد می‌کند و سپس عملیات تزریق گاز انجام می‌شود. تمامی داده‌ها توسط حسگرهای فشار و دما ثبت و در سیستم ذخیره می‌شود. در نهایت، تمامی اطلاعات به‌صورت پرونجا اکسل و داده‌های قابل تحلیل آماری و نمودارهای فشار-زمان و دما-زمان به‌عنوان خروجی دستگاه در دسترس خواهند بود. شکل ۷ نمودار فشار گاززدایی برحسب زمان برای نمونه



شکل ۶: روند نمای و مراحل انجام آزمایش گاز زدایی دستگاه آزمایشگاهی



شکل ۷: نمودار فشار گاززدایی و تصاعد آنی گاز در لایه K10 معدن طزره



شکل ۸: نمودار تغییرات دما در حین آزمایش گاززدایی لایه K10 معدن طزره

در سیستم اصلی هستند. با استفاده از روابط تغییر مقیاس مربوط به این دستگاه و تحلیل رفتار آن از طریق آزمایش‌های مختلف، به‌ویژه در شرایط واقعی استخراج، می‌توان شرایط آزمایشگاهی را به محیط معدن تعمیم داد.

۳- نتیجه‌گیری

استخراج منابع زغال‌سنگ که عمدتاً با روش‌های استخراج زیرزمینی انجام می‌شود، مستلزم رعایت اصول دقیق فنی و مهندسی همراه با الزامات ایمنی و استانداردهای لازم است. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از عملیات استخراج در معادن زغال‌سنگ در زون گازدار صورت می‌گیرد. با توسعه و گسترش معادن و افزایش عمق استخراج در آینده، مسلماً مسائل و مشکلات ناشی از گازها در معادن زغال‌سنگ تشدید خواهد شد. درعین‌حال باید نهایت تلاش به عمل آید تا با استفاده از دانش و فناوری نوین و سایر امکانات موجود خطرات را به حداقل رساند. گاززدایی متان به دلایل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید انرژی به‌منظور کسب درآمد و افزایش ایمنی معدن برای جلوگیری از پدیده بسیار خطرناک تصاعد آبی گاز زغال‌سنگ اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی جدید و مدلسازی فیزیکی، پدیده تصاعد آبی گاز زغال و تأثیر گاززدایی بر آن، همراه با میزان انرژی تولیدشده با تمرکز بر لایه K10 معدن زغال‌سنگ طزره بررسی شد.

است. فواصل زمانی تخلیه به‌منظور نمایش روند نمودارها، در هر ۱۰ ثانیه انتخاب شده است.

برای عملیات گاززدایی، فشار کاهشی پمپ مکش بر روی ۰٫۰۷ مگاپاسکال با فاصله زمانی ۱۰ ثانیه تنظیم شد و آزمایش در دو سیکل انجام گرفت. در سیکل اول آزمایش با گاززدایی و در سیکل دوم بدون گاززدایی انجام شد. این طراحی برای مقایسه تأثیر انجام گاززدایی و عدم گاززدایی بر روی پدیده تصاعد آبی گاز زغال برنامه‌ریزی شده است.

بر اساس شکل ۷، در سیکل اول زمانی که فشار مخزن به ۰٫۳۵ مگاپاسکال رسید، بلافاصله عملیات گاززدایی انجام شد. در این حالت پدیده تصاعد آبی گاز رخ نداد و نمودار فشار به‌صورت کاهشی (P_1) به سمت صفر میل کرده است. در سیکل دوم زمانی که عملیات گاززدایی صورت نگرفته است، محفظه سیستم تصاعد آبی به فشار ۰٫۳۷ مگاپاسکال رسید و در نتیجه آزمایش باز و پدیده تصاعد آبی رخ داده است.

شکل ۸ نمودار دما برحسب زمان آزمایش گاززدایی نمونه زغال لایه K10 معدن طزره را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، با گذشت زمان دمای سیستم از ۳۹٫۸ سانتی‌گراد به ۴۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است.

در روش پی بوکینگهام، توابعی بر اساس مجموعه‌ای از پارامترهای مستقل بی‌بعد (که به‌صورت عبارت‌های π شناخته می‌شوند) تعریف می‌شوند. این پارامترها شامل متغیرهای فیزیکی وابسته‌اند و از لحاظ تعداد، کمتر از متغیرهای موجود

- H. (2017). "An analysis of the gas-solid plug flow formation: New insights into the coal failure process during coal and gas outbursts". Powder Technology, 305: 39-47.
- [6] Tu, Q., Xue, S., Cheng, Y., Zhang, W., Shi, G., and Zhang, G. (2022). "Experimental study on the guiding effect of tectonic coal for coal and gas outburst". Fuel, 309: 122087.
- [7] Zhang, M., Cao, X., Zhang, L., Zhou, A., and Li, B. (2023). "Experimental study on the contribution of desorbed gas to the propagation and disaster-causing of coal-gas outbursts". Fuel, 349: 128656.
- [8] Lama, R., and Bodziony, J. (1998). "Management of outburst in underground coal mines". International Journal of Coal Geology, 35(1-4): 83-115.
- [9] Kissell, F. N., and Iannacchione, A. T. (2014). "Gas outbursts in coal seams". In: Coal Bed Methane (pp. 177-184): Elsevier.
- [10] Skoczylas, N. (2012). "Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, (55): 102-107.
- [11] Zhai, C., Xu, J., Liu, S., and Qin, L. (2018). "Investigation of the discharge law for drill cuttings used for coal outburst prediction based on different borehole diameters under various side stresses". Powder Technology, 325: 396-404.
- [12] Yang, D., Chen, Y., Tang, J., Li, X., Jiang, C., Wang, C., and Zhang, C. (2018). "Experimental research into the relationship between initial gas release and coal-gas outbursts". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 50: 157-165.
- [13] Shu, L., Wang, K., Liu, Z., Zhao, W., Zhu, N., and Lei, Y. (2022). "A novel physical model of coal and gas outbursts mechanism: Insights into the process and initiation criterion of outbursts". Fuel, 323: 124305.
- نتایج نشان داد که انرژی حاصل از انجام آزمایش در فشار تصاعد آبی گاز ۰/۳۵ مگاپاسکال برابر با ۳۰/۶۶ میلی ژول بر گرم است. همچنین در آزمایش تصاعد آبی، سیستم با اختلاف ۴ درجه سانتیگراد مواجه شد. در آزمایش گاززدایی نیز مشخص گردید که با کاهش فشار ناشی از مکش به میزان ۲۰ درصد فشار داخل مخزن، از وقوع پدیده تصاعد آبی گاز زغال جلوگیری می شود. دستگاه طراحی شده که برای نخستین بار در ایران ساخته شده است، امکان تحلیل دقیق رفتار گاز متان در شرایط مختلف آزمایشگاهی و معدنی را فراهم می کند و قابلیت شبیه سازی شرایط واقعی معادن زغال سنگ را داراست. این دستگاه را می توان به عنوان ابزاری مؤثر برای افزایش ایمنی معدن، بهینه سازی عملیات گاززدایی و تحلیل خطرات گاز متان در محیط های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

۴- سپاس گذاری

به این وسیله شایسته است به پاس تلاش ها و زحمات مستمر شرکت معادن زغال سنگ البرز شرقی و دانشگاه صنعتی شاهرود در راستای توسعه و پیشرفت همه جانبه، نهایت سپاس و قدردانی محققین این مقاله را ابراز داریم.

۵- مراجع

- [1] Heidari Sheibani, R., Atace, M., and Kakaei, R. (2024). "Unveiling the Catastrophic Mechanism of Coal and Gas Outbursts: Strategies for Prevention and Control". Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 14(39): 59-67.
- [2] Jia, L., Li, K., Shi, X., Zhao, L., and Linghu, J. (2021). "Application of gas wettability alteration to improve methane drainage performance: A case study". International Journal of Mining Science and Technology, 31(4): 621-629.
- [3] Huang, W., Zhanqing, C., Jianhua, Y., Zhang, Y., and Min, Y. (2010). "Failure modes of coal containing gas and mechanism of gas outbursts". Mining Science and Technology (China), 20(4): 504-509.
- [4] Zhou, H., Zhang, R., Cheng, Y., Dai, H., Ge, C., and Chen, J. (2015). "Methane and coal exploitation strategy of highly outburst-prone coal seam configurations". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 23: 63-69.
- [5] Zhao, W., Cheng, Y., Guo, P., Jin, K., Tu, Q., and Wang,

¹ Discharge Law

² Programmable Logic Controller

³ Human Machine Interface

⁴ American Society of Mechanical Engineers