

## Examining Coal Gas Outbursts in Mines via Lab Research

Reza Heidari Sheibani<sup>1</sup>, Mohammad Ataei<sup>2\*</sup>, Reza Kakaie<sup>3</sup>

1. PhD Student, Dept. Of Mining, Petroleum, and Geophysics Engineering, Shahrood, Iran, rh.miner@gmail.com
2. Professor, Dept. Of Mining, Petroleum, and Geophysics Engineering, Shahrood, Iran, ataei@shahroodut.ac.ir
3. Professor, Dept. Of Mining, Petroleum, and Geophysics Engineering, Shahrood, Iran, r.kakaie@shahroodut.ac.ir

Received: 2023/10/24 - Accepted: 2024/03/09

### Abstract

The phenomenon of coal gas outbursts, with its direct influence on preserving the safety of mining through tension alleviation and sustaining operational continuity, as well as the reliance on its quality for various concerns, warrants scrutiny during the planning phase. Consequently, accurately forecasting these sudden gas expulsions is a critical and primary measure in the initial design stage, continuing through the mining and extraction processes.

Although the subject has been extensively researched, a complete model is lacking to predict the interrelated impacts of methane gasification and outbursts. Hence, considering its national significance and widespread adoption of this technique globally, it is imperative to investigate the dynamics of sudden gas discharge and drainage.

For numerous years, across various research disciplines, experiments utilizing physical models have been conducted to explore and comprehend systems' behaviors and physical properties. A fundamental aspect of these models is the requirement that both the modeled system and the primary model abide by the same physical principles. In the study detailed within this document, following the recognition of critical parameters in the outburst process, a novel apparatus was constructed through dimensional analysis. Utilizing this specially designed laboratory equipment, the outburst emissions were assessed on two coal samples.

### Keywords

Coal mining, outburst, Methane drainage, Laboratory study.

---

\* Corresponding Author



## 1- Introduction

The phenomenon of coal gas outbursts, with its direct influence on preserving the safety of mining through tension alleviation and sustaining operational continuity, as well as the reliance on its quality for various concerns, warrants scrutiny during the planning phase. Consequently, accurately forecasting these sudden gas expulsions is a critical and primary measure in the initial design stage, continuing through the mining and extraction processes.

Although the subject has been extensively researched, a complete model is lacking to predict the interrelated impacts of methane gasification and outbursts. Hence, considering its national significance and widespread adoption of this technique globally, it is imperative to investigate the dynamics of sudden gas discharge and drainage.

For numerous years, across various research disciplines, experiments utilizing physical models have been conducted to explore and comprehend systems' behaviors and physical properties. A fundamental aspect of these models is the requirement that both the modeled system and the primary model abide by the same physical principles. In the study detailed within this document, following the recognition of critical parameters in the outburst process, a novel apparatus was constructed through dimensional analysis. Utilizing this specially designed laboratory equipment, the outburst emissions were assessed on two coal samples.

## 2- Methods

Dimensional analysis employs dimensionless parameters and variables to analyze issues, eschewing individual variables in favor of corresponding dimensionless numbers. Dimensional analysis utilizes compression methods to simplify the study of physical phenomena by decreasing variable counts and organizing them into dimensionless groups. The key objective of this analytical approach is to consolidate variables into these non-dimensional clusters. The Pi-Buckingham theorem creates models with dimensionless parameters (Pi terms) that encapsulate the relevant physical variables. These Pi terms are smaller than the variables in the initial system, thus streamlining the analysis process. Drawing on insights from dimensional analysis, an apparatus has been constructed to explore the phenomenon of coal gas eruptions. This section of the paper details the production process of the device, encompassing the overall design planning, crafting the cylinder in compliance with ASME standards, preparing the necessary equipment, fabricating the cylinder, and assembling the structural framework and the electronic components.

The device comprises a framework, test chamber, hydraulic cylinder, vacuum pump, gas capsule, pressure sensors, connecting pipes, solenoid valves, pneumatic valve, electrical panel, accessories, PLC, and HMI. The cylinder design is based on the ASME standard, which is crucial for pressure vessels. The cylinder is one meter long, with an inner diameter of 500 mm and a thickness of 20 mm. According to the ASME standard analysis, two LUG supports were designed and added to reinforce the cylinder tank holding system. The design gas pressure is 80 bar, with a working temperature range of 10 to 55 degrees. As per the ASME standard analysis, the device's stability is ensured with a safety factor of 5. The new device can analyze diverse conditions of instantaneous coal gas release and methane gasification relevant to all coal mines. Following coal preparation and pressure adjustments within the chamber, all data can be analyzed in Excel files. This includes statistical analysis and output in pressure-time and temperature-time graphs.

The article explores the instantaneous gas emission in coal mines through physical modeling. Coals from the K10 and K21 layers of Tazreh Mine have been prepared for experimentation with the new coal gas emission device. The selection of these two layers is based on their high gas rate and distinct positions within the mine, allowing for result comparison. During the test, a vacuum was initially produced within the cylinder of the test chamber using a suction pump to create

negative pressure, followed by gas injection. Notably, the bilayer exhibited differing behaviors in vacuum creation. The vacuum creation time for the K10 coal layer was 520 seconds, while for the K21 layer, it was 300 seconds. This distinction in behavior is attributed to the bilayer's differing properties and geometrical positions. The test was conducted in two cycles. During the first cycle, the outburst system valve was opened for 5 seconds and then immediately closed. Subsequently, the suction pump was activated to empty the gas from the gas injection test chamber. Based on the graph derived from the outburst simulation process, the pressure exhibited an increasing trend corresponding to the gas quantity within the cylinder. However, this trend declined when the outburst occurred at 3 bar pressure and gas and coal were discharged. The process was then repeated in the second cycle of pressure increase.

### **3- Conclusion**

The outburst of coal gas poses a significant hazard in coal mines, particularly with the longwall mining method. Predicting methane gas is crucial to reducing this hazardous occurrence, which can impede tunnel progress. As mining depth increases, the gas content within the coal layer also rises. The study reveals that gas pressure, low permeability, geological factors, and inadequate methane gas drainage influence this phenomenon. The device, designed and manufactured by ASME standards, was calculated to remain stable at pressures up to 80 bar with a safety factor 5. To investigate the instantaneous gas emission in the K10 and K21 layers of Tazareh mine, pressure sensitivity analysis was conducted under 3 bar pressure. The results indicated a temperature increase during the instantaneous release, and distinct behaviors were observed due to the varying characteristics of these layers. This new device, a first in Iran, can analyze and compute various conditions related to outbursts and methane drainage, making it suitable for all coal mines.



مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی پدیده تصاعد آبی گاز زغال در معادن زغال سنگ

رضا حیدری شبیبانی<sup>۱</sup>، محمد عطائی<sup>۲\*</sup>، رضا کاکائی<sup>۳</sup>

۱. دانش آموخته دکتری استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، rezaheidari@shahroodut.ac.ir

۲. استاد گروه استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، atae@shahroodut.ac.ir

۳. استاد گروه استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، kakaei@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

چکیده

پدیده تصاعد آبی گاز یک مساله مهم و از لحاظ ایمنی بسیار جدی در تمامی معادن زغال سنگ بشمار می آید. فروپاشی ناگهانی زغال سنگ و پرتاب لایه زغال بدون تعمد اولیه و همراه با انتشار بسیار زیاد گاز را تصاعد آبی گاز گویند. در این پدیده میزان گازبر حمل زغال شکسته شده در فاصله قابل توجهی موثر است و طی مدت زمان کوتاهی مقدار بسیار زیادی گاز از لایه‌ها یا سنگ درون گیر زغال سنگ خارج و ضمن آن حجم وسیعی از زغال یا سنگ به بیرون پرتاب می شود. در حال حاضر اکثر عملیات معدنی در معادن زغال سنگ در زون گازدار انجام می گیرد. درآیند نیاز با گسترش و توسعه معدن و عمیق تر شدن آن مسلماً مسایل و مشکلات ناشی از گازها در معادن زغال سنگ افزایش می یابد. درعین حال باید نهایت تلاش به عمل آید تا با استفاده از دانش و فناوری نوین و سایر امکانات موجود خطرات را به حداقل رساند. در این مقاله بعد از شناسایی دسته عوامل موثر بر پدیده تصاعد آبی گاز در لایه‌های زغال سنگ و بررسی اندرکنش آن‌ها با یکدیگر با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی جدید ساخته شده، به بررسی پدیده تصاعد آبی گاز زغال در معادن زغال سنگ پرداخته شده است. برای افزایش ایمنی و جلوگیری از خسارات جانی و مالی باید اقدامات کنترلی انجام گیرد. برای بررسی پدیده تصاعد آبی دولایه K10 و K21 معدن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد در هنگام تصاعد آبی سیستم با افزایش درجه حرارت مواجه است. همچنین به دلیل تفاوت در ویژگی‌های این دولایه رفتار متفاوتی در هنگام تصاعد آبی دیده شده است.

کلمات کلیدی

معدن زغال سنگ، پدیده تصاعد آبی گاز، ایمنی، دستگاه آزمایشگاهی.

## ۱- مقدمه

عددی و بر اساس مفاهیم کیفی و مدیریت ریسک برای ارزیابی فرآیند زهکشی گاز متان و پدیده تصاعد آبی گاز در معادن زغال سنگ توسعه یافته است. در سال ۱۹۸۶ لیتونیوزین به بحث و بررسی پدیده تصاعد آبی گاز زغال پرداخت. هنگامی که پدیده تصاعد آبی گاز زغال روی می‌دهد، ناپیوستگی در اطراف توده سنگ باعث تغییرات سرعت، تنش و دانسیته گاز و سنگ می‌شود که به امواج ضربه‌ای مربوط است. این امواج با قوانین غیرخطی جرم و اندازه تکانه و انرژی در ارتباطند [۲]. لاما و بودزیونی در سال ۱۹۹۸ مطالعات جامعی که در مورد پدیده انتشار ناگهانی گاز در سراسر جهان رخ داده بود را ارائه داده‌اند [۳]. با وجود عوامل زیادی که در پدیده انتشار ناگهانی گاز موثرند، شناسایی عوامل مهم تر کاری سختی است اما دو عامل فشار گاز (میزان گاز) و نفوذپذیری لایه زغال سنگ از عوامل مهم و اساسی پدیده انتشار ناگهانی گاز است. نفوذپذیری پایین تر لایه زغال در فشار بالا باعث انتشار بیشتر گاز می‌شود این امر به این علت است که جهت جریان تند فشار در جبهه کار وجود دارد [۳]، [۴]، [۵]، [۶].

مقدار زغال سنگ از مقدار کم تا صدها تن تغییر می‌کند. انتشار گاز می‌تواند نسبتاً بزرگ و اگر گاز متان آزاد شود، وجود یک جرقه کوچک یک منبع تخریب بزرگ خواهد شد. هزاران پدیده انتشار ناگهانی گاز در معادن سراسر جهان رخ داده است که صدها تلفات برجای گذاشته است.

در تحقیقاتی دیگر در سال ۱۹۹۸ بیمیش و کروسدل پیشنهاد داده‌اند که زغال‌های با ماسرال<sup>۱</sup> بالا و یا محتوای اینرتودترینیت<sup>۲</sup> به احتمال زیادی مقداری از گازی که برای انتشار ناگهانی لازم دارند را حفظ می‌کنند [۷].

بر طبق تحقیقات بر روی منبع انتشار ناگهانی گاز محققان پیشنهاد کرده‌اند که عوامل مربوط به زغال سنگ ممکن است مهم باشد. در سال ۲۰۰۱ کائو و همکاران پدیده انتشار ناگهانی گاز را با گسل‌ها و تغییرات تکتونیکی ربط داده‌اند. این محققان به پدیده انتشار گاز در کشور چین اشاره کرده‌اند که همراه با تکتونیک فعال که گسل‌های معکوس و امتداد لغز تولید کرده‌اند. زغال سنگ‌های نزدیک به چنین گسل‌هایی معمولاً خرد و ساییده شده‌اند که منجر به تغییر در ویژگی‌های واجذبش و نفوذپذیری می‌شوند [۸].

زغال سنگ قدیمی‌ترین و فراوان‌ترین سوخت فسیلی در جهان محسوب می‌شود و با توجه به ذخایر فراوان، گسترده‌گی بسیار در سطح دنیا و هزینه نسبتاً اندک هنوز هم کانون توجه در تولید انرژی جهان است. برای تامین میزان زغال سنگ لازم در آینده با افزایش عمق معدنکاری پدیده‌ها و مشکلات ناشی از این افزایش عمق برای بهره‌برداری هر چه بیشتر منابع زغال سنگ افزایش می‌یابد. یکی از این مشکلات، حجم زیاد گاز متان موجود در لایه‌های زغال سنگ است که با افزایش عمق میزان آن نیز بیشتر می‌شود.

فرایند تصاعد آبی گاز زغال به دلیل تاثیر مستقیم بر حفظ ایمنی محیط استخراجی از طریق کاهش تنش‌ها و نیز حفظ پیوستگی عملیات و وابستگی مسایل متعددی به کیفیت آن باید در مرحله طراحی با دقت مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین پیش‌بینی پدیده تصاعد آبی گاز، مرحله‌ای اساسی و بنیادی در طراحی و پس از آن در پیشروی و استخراج است. با وجود مطالعات گسترده در این حوزه، مدل جامعی برای پیش‌بینی تاثیرات متقابل گازکشی متان و پدیده تصاعد آبی گاز وجود ندارد. بنابراین هم از نظر اهمیت برای کشور و هم از لحاظ وسعت فراگیری این روش در سراسر جهان، مطالعه در زمینه پدیده تصاعد آبی گاز و زهکشی امری ضروری به نظر می‌رسد.

پیشگیری از حوادث ناشی از این علل، از یک سو مستلزم مطالعه دقیق تر و نظارت دقیق و اجرای مقررات از سوی دیگر است. در خیلی موارد گازهای متصاعد شده در لایه زغال سنگ در سنگ‌های اطراف محبوس می‌شود. هنگامی که لایه‌ها شکسته می‌شوند و از فشار موثر بر آن کاسته می‌شود، این گازها وارد هوای معدن می‌شوند. معمول‌ترین گاز در معادن، گاز متان است. گاز متان به سه طریق انتشار ملایم، انتشار همراه با صدا و تصاعد آبی گاز متان منتشر می‌شود [۱].

در بررسی سابقه علمی موضوع زهکشی گاز متان در معادن زیرزمینی زغال سنگ باید در نظر داشت که علاوه بر استحصال این گاز برای استفاده در چرخه سوخت و کاهش اثرات زیست‌محیطی، آنچه بسیار مهم است پدیده تصاعد آبی گاز است که عملیات پیشروی و استخراج زغال سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

مطالعات متعددی بر اساس تجربیات میدانی، آزمایشگاهی،

<sup>1</sup> vitrinate

<sup>2</sup> inertodetrinite

در سال ۲۰۱۴ کسپیل و ایناکچوین تحقیقاتی بر روی بررسی پدیده تصاعد آنی گاز در معدن پوکاهونتاس انجام داده‌اند. هر دو پدیده انتشار ناگهانی گاز و تصادم ناگهانی را یک شکست دینامیکی توصیف کرده‌اند. این محققان بیشتر پدیده تصاعد آنی گاز را یک شکست ترد ناگهانی از حاشیه‌ای باز که خروج مواد در این فضای باز توصیف کرده‌اند. در این معدن فشار گاز در این لایه در حدود ۴/۵ مگاپاسکال (۶۵۰ psi) و میزان محتوای گاز ۲۰ مترمکعب بر متر تن زغال بوده است. پس از ۳۶۰ ساعت توقف پیشروی در معدن فشار گاز همچنان بالا بوده است [۹].

آزمایش بر مبنای مدل فیزیکی در بسیاری از سال‌ها و در بسیاری از رشته‌های تحقیقاتی برای کشف و درک رفتار و مشخصات فیزیکی سامانه‌ها انجام شده است. ضرورت پیروی سیستم مدل‌سازی شده و مدل اصلی از قوانین فیزیکی مشابه، از جمله ویژگی‌های اصلی است که اساس مدل فیزیکی بر آن بنا شده است. علاوه بر آن مدل فیزیکی باید کلیه ویژگی‌ها و قسمت‌های هندسی مدل اصلی را مجسم سازد. دو جسم باید از لحاظ هندسی مشابه باشند، به گونه‌ای که تمام زوایای متناظر دو مدل با یکدیگر برابر و نسبت بین طول‌ها در آن دو ثابت باشد. زمانی دو جسم به تشابه جنبشی می‌رسند که هر دو، تغییر شکل و تغییر مکان یکسان را تحمل کنند و این مورد در شرایطی مهیا می‌شود که زمان مورد نیاز برای رسیدن به این تغییرات در جسم تغییر مقیاس داده شده نسبتی از همین زمان در مدل اصلی باشد. زمانی برای ایجاد تغییرات در دو مدل باید در تمامی قسمت‌های متحرک دو مدل ثابت باشد. دو جسم که هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ جنبشی مشابه‌اند، در صورتی از لحاظ دینامیکی نیز مشابه خواهند بود که نسبت نیرو اعمال شده به هر یک از اعضا بین دو مدل بر حسب نیرو، ثابت باشد [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴] و [۱۵].

در سال ۱۹۹۰ توٹ و همکاران با استفاده از آزمایش فشار هاپکینسون<sup>۱</sup> به مطالعه و بررسی پدیده تصاعد آنی گاز زغال پرداخته است. در این آزمایش حالت‌های فیزیکوشمیایی پدیده تصاعد آنی گاز مورد آزمایش قرار گرفت. در سال ۲۰۱۲ اسکاجولاس با تحلیل آزمایش فشار گاز متان (P) و مقاومت تک‌محوره (Rc) به مطالعه پدیده تصاعد آنی گاز پرداخت. در سال ۲۰۱۸ زای و همکاران با کاربرد قانون تخلیه<sup>۲</sup> در حفاری

زغال سنگ با استفاده از قطرهای مختلف چال‌های حفاری تحت تنش‌های جانبی به پیش بینی پدیده انتشار ناگهانی گاز زغال پرداخته‌اند [۱۶]. در سال ۲۰۱۸ یانگ و همکاران هفت نمونه زغال سنگ با درجه دگرگونی<sup>۳</sup> مختلف برای استفاده در آزمایش‌های شبیه‌سازی پدیده تصاعد آنی گاز به کار بردند تا روند انتشار گاز از زغال سنگ پودر شده (خاک زغالی) در حضور گاز CO<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> را بررسی کنند. فرآیندی که در آن، در زغال سنگ جذب سطحی انجام می‌گیرد و گاز تخلیه می‌شود به عنوان یک فرآیند تعادل پویا در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که جذب و دفع گاز به سرعت به اتمام می‌رسد، انتشار گاز با انرژی بالا در طی فرآیند انفجار می‌تواند به طور فعال به وقوع (ایجاد) و گسترش انفجار کمک کند؛ با این حال، گاز پرفشار یا تنش بالا به تنهایی نمی‌تواند منجر به انفجار شود [۱۷]. در سال ۲۰۲۰ ژائو و همکاران با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی تاثیر اکسیداسیون زغال سنگ بر روی پدیده تصاعد آنی گاز زغال پرداختند [۱۸].

در سال ۲۰۲۲، تو و همکاران تحقیقات تجربی را در مورد تأثیر زغال سنگ زمین ساختی بر فوران زغال سنگ و گاز انجام دادند. این مطالعه به این نتیجه رسید که فشار بحرانی گاز لازم برای ایجاد یک فوران در نمونه‌های زغال سنگ حاوی زغال سنگ تکتونیک کمتر از نمونه‌های بدون آن است [۱۹].

شو و همکاران، در مطالعه سال ۲۰۲۲ خود، از یک دستگاه آزمایشگاهی طراحی شده برای تکرار یک مدل ساختاری برای بررسی پدیده تصاعد آنی گاز و فرمول‌بندی آستانه‌های مکانیکی و انرژی مورد نیاز برای شروع چنین رویدادهایی استفاده کردند. آن‌ها شبیه‌سازی‌های فوران را انجام دادند و موارد واقعی را برای ارزیابی مدل جدید و اعتبارسنجی معیارهای شروع، تجزیه و تحلیل کردند [۲۰].

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳، وانگ و چنگ به بررسی تأثیر انرژی تغییر شکل زغال سنگ بر وقوع انتشار سریع گاز پرداختند. این مقاله به‌طور سیستماتیک به بررسی روش‌های تحقیق و مسائل موجود در انرژی انفجار زغال سنگ و گاز پرداخت. تمرکز ویژه‌ای بر معیار انرژی پیشنهادی Hodot صورت گرفت که انرژی تغییر شکل زغال سنگ را به‌عنوان عامل اصلی در نظر می‌گیرد. آن‌ها تکنیک‌های شناسایی و مقیاس تقریبی انرژی تغییر شکل زغال سنگ و انرژی انبساط گاز را

<sup>1</sup> Hopkinson bar<sup>2</sup> discharge law<sup>3</sup> metamorphic

اصولی‌اند. عبارت Pi به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود [۱۵]:

$$K=n-a \quad (1)$$

که در آن:

n: تعداد متغیرها

a: تعداد ابعاد اصلی

K: عبارت بی‌بعد Pi (عبارت  $\pi$ )

اگر  $X_i$  متغیر وابسته به تعدادی از متغیرها مانند  $X_1, X_2, \dots, X_n$  در یک سیستم اصلی باشد (رابطه ۲):

$$X_i = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

اگر متغیرها پارامترهای بی‌بعد و بر اساس فرضیه Pi باشد (رابطه ۳):

$$\pi_1 = F(\pi_2, \dots, \pi_{n-a}) \quad (3)$$

این رابطه کلی برای مدل‌ها و یک سیستم خاص می‌تواند بکار رود. اندیس‌های m و p به ترتیب برای اشاره به مدل و سیستم اصلی است:

$$\pi_{1m} = F(\pi_{2m}, \dots, \pi_{km}) \quad (4)$$

$$\pi_{1p} = F(\pi_{2p}, \dots, \pi_{kp}) \quad (5)$$

برای تعیین  $\pi_{1p}$  از طریق  $\pi_{1m}$ :

$$\frac{\pi_{1m}}{\pi_{1p}} = \frac{F(\pi_{2m}, \dots, \pi_{km})}{F(\pi_{2p}, \dots, \pi_{kp})} \quad (6)$$

اگر مدل به صورتی طراحی و اجرا شود که رابطه ۷ برقرار باشد، آنگاه رابطه ۸ به دست می‌آید:

$$\pi_{2p} = \pi_{2m} \cdot \pi_{3p} = \pi_{3m} \cdot \text{ect} \quad (7)$$

$$F(\pi_{2p}, \dots, \pi_{kp}) = F(\pi_{2m}, \dots, \pi_{km}) \quad (8)$$

رابطه ۸ شرایط مرزی برای طراحی مدل و طراحی را نشان می‌دهد. اگر مدل مانند طراحی و روابط پیش‌بینی شده ساخته شود،  $\pi_{1p}$  برابر  $\pi_{1m}$  پیش‌بینی می‌شود. برای شبیه‌سازی متغیرهای وابسته در یک مدل، جابه‌جایی طبقات به واسطه حفاری، شباهت هندسی، شباهت سینماتیکی و دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن شباهت‌ها، تغییرات لایه‌ها و طبقات  $\delta$  به صورت زیر یا به عبارتی به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$\delta = F(\text{متغیرهای دینامیکی، سینماتیکی، هندسی}) \quad (9)$$

$$\delta = F(l, w, h, t, T, \sigma_c, \sigma_b, \sigma_t, \tau, E, R, \phi, \theta)$$

تعریف کردند. علاوه بر این، مکانیزم‌های انتشار و نقش نسبی انرژی تغییر شکل زغال سنگ و انرژی انبساط گاز در هدایت رویدادهای انفجار مورد بررسی قرار گرفت [۲۱].

در سال ۲۰۲۳، ژانگ و همکارانش یک مطالعه آزمایشی برای بررسی تأثیر گاز جدا شده بر پدیده تصاعد آبی گاز انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با نمونه‌های زغال سنگ با اندازه برابر و تحت فشار انفجار یکسان، شدت انفجارهای شامل CO<sub>2</sub> بین ۸/۰۸ تا ۱۲/۴۸ درصد بیشتر از آن‌هایی بود که شامل N<sub>2</sub> بودند. علاوه بر این، نتایج برای نمونه‌های زغال سنگ با اندازه ذرات ریزتر از ۰/۲۵ میلی‌متر در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر با اندازه ۱ تا ۲/۳۶ میلی‌متر بسیار برجسته‌تر بود. این داده‌ها نشان می‌دهد که گاز آزاد شده نقش مهمی در دینامیک انفجار ایفا می‌کند [۲۲].

در این مقاله بعد از شناسایی پارامترهای مهم فرآیند پدیده تصاعد آبی گاز با استفاده از تحلیل ابعادی دستگاهی جدیدی ساخته شده است و با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی طراحی شده بر روی دو نمونه از زغال به ارزیابی پدیده تصاعد آبی گاز پرداخته شده است.

## ۲- روش کار

در این بخش شرح روند ساخت دستگاه بررسی پدیده تصاعد آبی گاز زغال در معادن زغال سنگ که به طور کلی شامل تهیه نقشه کل دستگاه، طراحی سیلندر با استفاده از استاندارد ASME، تهیه تجهیزات، ساخت سیلندر و ساخت اسکلت سازه و تجهیزات الکترونیکی توضیح داده شده است.

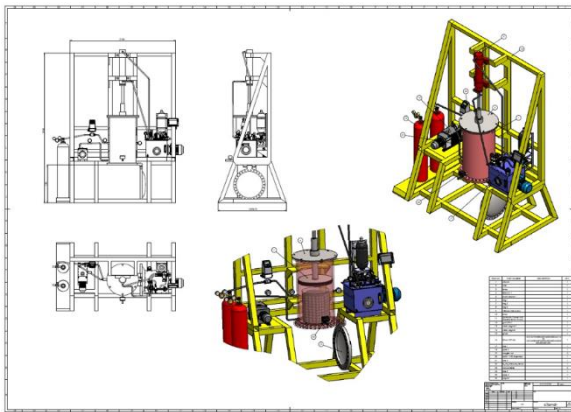
### ۲-۱- تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی روشی در تجزیه و تحلیل مسایل با استفاده از پارامترها و متغیرهای بی‌بعد است. در تحلیل ابعادی به‌جای استفاده از تک‌تک متغیرها، اعداد بدون بعد مربوط را به دست آورده و از آن‌ها استفاده می‌شود. گروه‌های بی‌بعد تحلیل ابعادی به کمک نوعی روش فشرده کردن، به رفع پیچیدگی و کاستن از تعداد متغیرها روی یک پدیده فیزیکی منجر می‌شود. مهم‌ترین هدف تحلیل ابعادی کاهش متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها به صورت بی‌بعد است. در روش پی بوکینگهام توابع تعریف شده بر اساس یک‌سری پارامترهای مستقل بی‌بعد (عبارت‌های Pi) تعریف می‌شوند که شامل پارامترهای فیزیکی وابسته بوده و از نظر تعداد کمتر از متغیرها در سیستم

به ماکزیمم کردن فضا برای استخراج مقادیر بیشتر ماده معدنی و نظایر آن کمک می‌کند [۱۵].

## ۲-۲- ساخت دستگاه

شکل ۱ نمایی سه‌بعدی کل دستگاه طراحی شده را نشان داده است.



شکل ۱- نمای کلی و سه‌بعدی دستگاه طراحی شده

بر طبق شکل ۱ دستگاه طراحی شده شامل اسکلت سازه، سیلندر محفظه آزمایش، سیلندر هیدرولیک، پمپ خلا، کپسول گاز، حس‌گرهای فشار، لوله‌های اتصال شیرهای برقی، دریچه پنوماتیک، تابلو برق و متعلقات و PLC و HMI است.

اساس طراحی سیلندر آزمایش با استفاده از استاندارد ASME<sup>۱</sup> است. این استاندارد یکی از مهم‌ترین کدهای ارایه شده مخازن تحت فشار است. طول سیلندر یک متر و با قطر داخلی ۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر است.

سیلندر هیدرولیک نوعی موتور هیدرولیکی با جابه‌جایی رفت و برگشتی است که انرژی سیال را به انرژی جنبشی برای جابه‌جایی پیستون تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت سیلندر هیدرولیک دستگاهی است که انرژی سیال تحت فشار را، به نیروی مکانیکی خطی و حرکتی تبدیل می‌نماید. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی فیزیکی و اعمال شرایط تنش زمین به طراحی و ساخت جک هیدرولیک پرداخته شد. بعد از تکمیل ساخت سیلندر که بر روی آن سیستم آب‌بندی تجهیز شد لوازم و حس‌گرهای برقی شامل حس‌گرهای فشار، حس‌گر گاز، پمپ خلا و حس‌گرهای مربوط به آن و تجهیزات تابلو برق بر روی دستگاه نصب گردید. همچنین بعد از مونتاژ سیستم تصاعد آنی گاز زغال بر روی دستگاه و سیلندر نصب گردید. بر اساس تحلیل

که در آن:

$d, w, H$  و  $t$ : به ترتیب طول، عرض، ارتفاع فضا، ارتفاع روباره و ضخامت لایه  
 $\sigma_c, \sigma_t, \sigma_b, \tau$  و  $E$ : به ترتیب برابر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت برشی و مدول الاستیسیته  
 $R$ : مقاومت نگه‌دارنده

$\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی

$\theta$ : نسبت پواسون

$T$ : زمان

$$\delta = F(L.T.\sigma.E.R.\phi.\theta) \quad (10)$$

که در آن  $L$  هر بعد خطی  $\sigma$  مقاومت مکانیکی است.

رابطه بی‌بعد وابسته برای تغییر شکل با استفاده از تحلیل ماتریس ۱۱ می‌تواند توسعه یابد:

$$\delta/L = F(W/L.\gamma^H/E.\sigma/E.R/\gamma H^3.\phi.\theta) \quad (11)$$

که در آن  $\gamma$  وزن مخصوص است.

رابطه ۱۱، بی‌بعدی ویژگی‌های تغییر شکل مدل و سیستم اصلی را تعریف می‌کند که نشان‌دهنده شرایط طراحی است. انتخاب مواد معادل بر اساس رابطه‌های نتیجه شده از روابط زیر انجام می‌شود:

$$E_m = \alpha_L \alpha_\gamma E_p \quad (12)$$

$$v_m = v_p \quad (13)$$

$$\sigma_{cm} = \alpha_L \alpha_\gamma \sigma_{cp} \quad (14)$$

$$\sigma_{tm} = \alpha_L \alpha_\gamma \sigma_{tp} \quad (15)$$

$$\sigma_{bm} = \alpha_L \alpha_\gamma \sigma_{bp} \quad (16)$$

$$\tau_m = \alpha_L \alpha_\gamma \tau_p \quad (17)$$

$$\phi_m = \phi_p \quad (18)$$

که در آن:

$$\alpha_L = \frac{L_m}{L_p} \quad \text{فاکتور مقیاس هندسی}$$

$$\alpha_\gamma = \frac{L_m}{L_p} \quad \text{فاکتور مقیاس چگالی}$$

از بین پارامترهای مختلف کنترل‌کننده پایداری فضای زیرزمینی، تاثیر ابعاد فضا تحت ارتفاع‌های مختلف روباره برای پیش‌بینی تغییر شکل و توزیع فشار سقف مورد مطالعه قرار نگرفته است. مطالعه این پارامترها به طراحی یک سیستم نگهداری بهینه برای فضا در یک توده سنگ کمک کرده و نیز

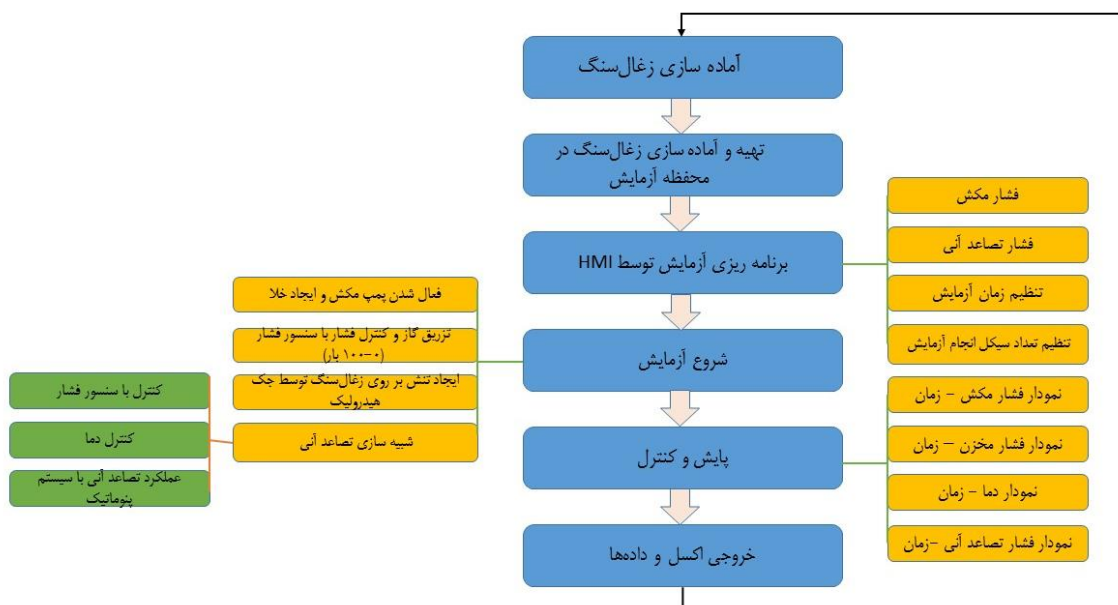
<sup>1</sup> American Society of Mechanical Engineers



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

صورت گرفته با استفاده از استاندارد ASME تعداد ۲ عدد تکیه گاه (LUG) برای تقویت سیستم نگه دارنده مخزن سیلندر طراحی و ساخته و بر روی دستگاه نصب شد. بر اساس تحلیل های انجام شده با استفاده از استاندارد ASME فشار گاز طراحی bar ۸۰ با دمای کاری ۱۰ تا ۵۵ درجه دستگاه طراحی شده با ضریب ایمنی ۵ پایدار هست. شکل ۲ دستگاه طراحی و ساخته شده را نشان داده است. این دستگاه جدید قابلیت تحلیل و محاسبه شرایط مختلف پدیده تصاعد آبی گاز زغال و تحلیل گاز کشی مناسب گاز متان برای تمامی معادن زغال سنگ دارد.

شکل ۳ روند نما و مراحل انجام آزمایش تصاعد آبی گاز کشی با دستگاه را نشان داده است. بر طبق شکل ۳ بعد از آماده سازی زغال سنگ درون محفظه زغال و تنظیم فشارها در نهایت تمامی اطلاعات به صورت فایل اکسل و داده های قابل تحلیل آماری و نمودارهای فشار زمان و دما زمان به صورت خروجی دستگاه قابل تحلیل است.



شکل ۳- روند نمای و مراحل انجام آزمایش تصاعد آبی گاز دستگاه آزمایشگاهی

در موقعیت این دو لایه در معدن برای مقایسه نتایج است. شکل ۴ شبیه سازی پدیده تصاعد آبی گاز را نشان داده است.

برای بررسی تصاعد آبی گاز به آنالیز حساسیت فشار تزریق گاز در دو لایه K10 و K21 معدن طزره پرداخته شد. شکل ۵ نمودار فشار- زمان این دو لایه در فشار تصاعد آبی ۳ بار و شکل ۶ نمودار دما- زمان در همین آزمایش در دو سیکل آزمایش را نشان داده است.

در این آزمایش و طبق شکل ۵ در ابتدا با استفاده از پمپ

### ۳- شبیه سازی پدیده تصاعد آبی گاز زغال با استفاده از دستگاه جدید ساخته شده

در این مقاله به مطالعه پدیده تصاعد آبی گاز در معادن زغال سنگ با استفاده از مدل سازی فیزیکی پرداخته شده است. برای انجام آزمایش با دستگاه جدید تصاعد آبی گاز زغال زغال هایی از لایه K21 و K10 معدن طزره تهیه و آماده سازی شده است. علت انتخاب این دو لایه میزان گاز خیزی بالا و تفاوت

پدیده تصاعد آبی نمودار فشار با افزایش میزان گاز داخل سیلندر روند افزایشی داشته است و هنگام رخ دادن این پدیده (در فشار ۳ بار) و تخلیه گاز و زغال این روند کاهشی شده است. در ادامه و اجرای سیکل دوم افزایش این روند تکرار شده است.

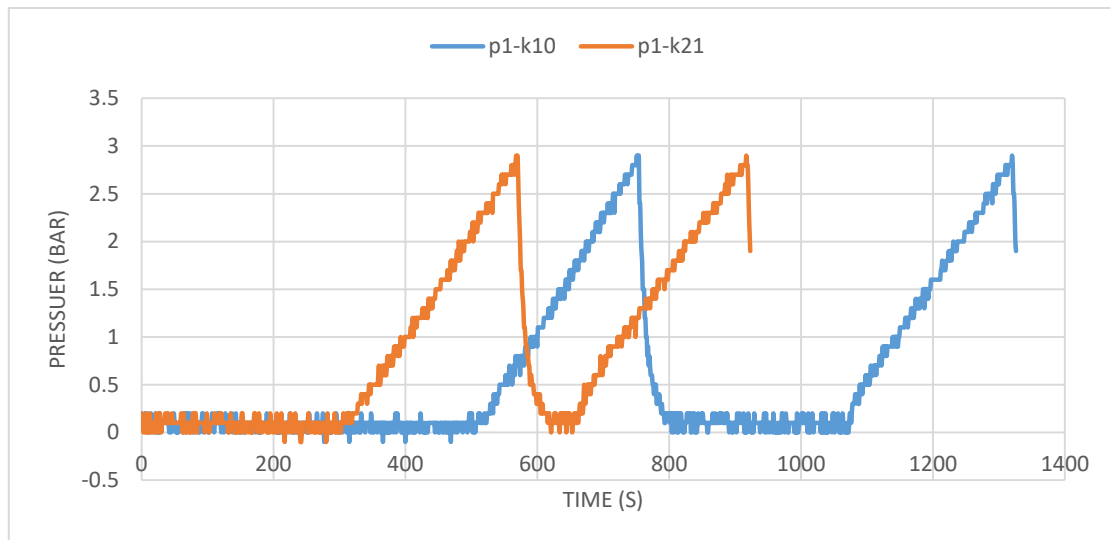


شکل ۴- شبیه‌سازی پدیده تصاعد آبی گاز زغال سنگ

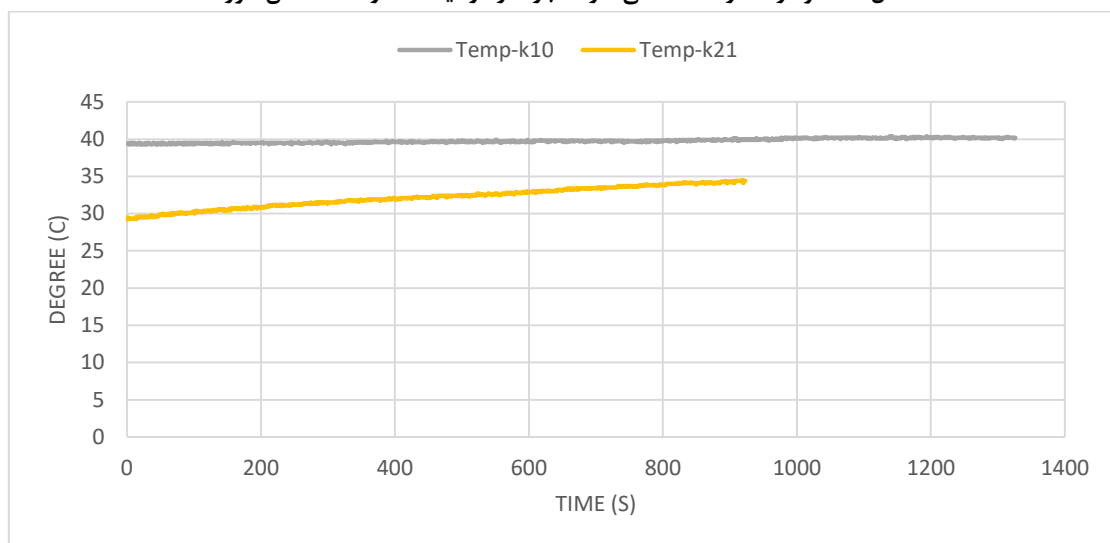
مکش و ایجاد فشار منفی درون سیلندر محفظه آزمایش خلا ایجاد و سپس گاز تزریق شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود رفتار این دولایه برای ایجاد خلا متفاوت است. برای لایه زغال سنگ K10 مدت زمان ایجاد خلا ۵۲۰ ثانیه و برای لایه K21 این زمان ۳۰۰ ثانیه بوده است. علت این رفتار تفاوت در ویژگی‌ها و موقعیت هندسی این دولایه است.

این آزمایش در دو سیکل انجام شده است. بدین صورت که هنگامی که فرآیند (طبق شکل ۳) در سیکل اول و با باز شدن دریچه سیستم تصاعد آبی گاز به مدت ۵ ثانیه دریچه باز و بلافاصله بسته می‌شود و مجدداً پمپ مکش روشن و با خالی شدن گاز داخل محفظه آزمایش تزریق گاز انجام گرفته است (شکل ۵).

طبق شکل ۵ و نمودار حاصل شده از فرآیند شبیه‌سازی



شکل ۵- نمودار فشار تصاعد آبی گاز (۳ بار) در دولایه K21 و K10 معدن طزره



شکل ۶- نمودار تغییرات در حرارت (سانتی‌گراد) در حین آزمایش تصاعد آبی گاز دولایه K10 و k21 در فشار ۳ بار

## ۴- نتیجه گیری

پدیده تصاعد آبی گاز زغال یک اتفاق خطرناک در معادن زغال سنگ به ویژه در روش جبهه کار طولانی است. یکی از اهداف پیش بینی گاز متان کاهش این پدیده بسیار جدی ایمنی است که گاهی اوقات پیشروی تونل ها معادن زغال سنگ را تحت تاثیر خود قرار می دهد. با افزایش عمق معدنکاری میزان گازخیزی لایه زغال سنگ افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد عواملی مانند فشار گاز، نفوذپذیری پایین، عوامل زمین شناسی و عدم زهکشی گاز متان بر این پدیده تاثیرگذار است. در این مقاله بعد از طراحی و ساخت کلیه اجزا دستگاه با استفاده از استاندارد ASME دستگاه تا فشار ۸۰ بار با ضریب ایمنی ۵ پایدار محاسبه شد. برای بررسی پدیده تصاعد آبی گاز در دو لایه K21 و K10 معدن طزره به آنالیز حساسیت فشار تصاعد آبی تحت فشار ۳ بار پرداخته شد. نتایج نشان داد در هنگام تصاعد آبی سیستم با افزایش درجه حرارت مواجه است. همچنین به دلیل تفاوت در ویژگی های این دو لایه رفتار متفاوتی در هنگام تصاعد آبی دیده شد.

این دستگاه جدید که برای اولین بار در ایران ساخته شده است، قابلیت تحلیل و محاسبه شرایط مختلف پدیده تصاعد آبی گاز زغال و تحلیل گاز کشی مناسب گاز متان برای تمامی معادن زغال سنگ دارد.

## منابع

1. عطایی، محمد، روش های تخریبی در معدنکاری، چاپ اول، ۱۳۹۴، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
2. Litwiniszyn, J. (1986). Remarks concerning sudden rock-and-gas mass outbursts. *Mining Science and Technology*, 3(4), 243-253.
3. Lama, R., & Bodziony, J. (1998). Management of outburst in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology*, 35(1-4), 83-115.
4. Toth, J., Szabo-Lakatos, J., & Pindel, Z. (1990). Laboratory modelling of sudden coal-methane outbursts with a Hopkinson bar. *MIN. SCI. TECHNOL.*, 10(1), 29-36.
5. Skoczylas, N. (2012). Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*(55), 102-107.
6. Feng, T., & Xie, X.-g. (2009). An experimental study of the effect of injecting water and freezing on mechanical properties of outburst-prone coal seam. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 560-564.
7. Beamish, B. B., & Crosdale, P. J. (1998). Instantaneous outbursts in underground coal mines: an overview and association with coal type. *International Journal of Coal Geology*, 35(1-4), 27-55.
8. Cao, Y., He, D., & Glick, D. C. (2001). Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults. *International Journal of Coal Geology*, 48(1-2), 47-63.
9. Kissell, F. N., & Iannacchione, A. T. (2014). Gas outbursts in coal seams. In *Coal Bed Methane* (pp. 177-184): Elsevier
10. Alexeev, A., Revva, V., Alyshev, N., & Zhitlyonok, D. (2004). True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction. *International Journal of Coal Geology*, 58(4), 245-250.
11. Geng, J., Xu, J., Nie, W., Peng, S., Zhang, C., & Luo, X. (2017). Regression analysis of major parameters affecting the intensity of coal and gas outbursts in laboratory. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2), 327-332.
12. Cheng, Y., Wang, L., Liu, H., Kong, S., Yang, Q., Zhu, J., & Tu, Q. (2015). Definition, theory, methods, and applications of the safe and efficient simultaneous extraction of coal and gas. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2(1), 52-65
13. Skoczylas, N., Dutka, B., & Sobczyk, J. (2014). Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk. *Fuel*, 134, 45-52.
14. Xue, S., Wang, Y., Xie, J., & Wang, G. (2011). A coupled approach to simulate initiation of outbursts of coal and gas—model development. *International Journal of Coal Geology*, 86(2-3), 222-230.
15. Ramamurthy, T., Gupta, K., & Ghazvinian, A. (1995). *Stability of underground opening from equivalent material modelling*. Paper presented at the 8th ISRM Congress.
16. Toth, J., Szabo-Lakatos, J., & Pindel, Z. (1990). Laboratory modelling of sudden coal-methane outbursts with a Hopkinson bar. *MIN. SCI. TECHNOL.*, 10(1), 29-36.
17. Yang, D., Chen, Y., Tang, J., Li, X., Jiang, C., Wang, C., & 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.
18. Zhao, B., Cao, J., Sun, H., Wen, G., Dai, L., &

- gas outbursts mechanism: Insights into the process and initiation criterion of outbursts. *Fuel*, 323, 124305.
21. Wang, C., & Cheng, Y. (2023). Role of coal deformation energy in coal and gas outburst: A review. *Fuel*, 332, 126019.
  22. Zhang, M., Cao, X., Zhang, L., Zhou, A., & Li, B. (2023). Experimental study on the contribution of desorbed gas to the propagation and disaster-causing of coal-gas outbursts. *Fuel*, 349, 128656.
  - Wang, B. (2020). Experimental investigations of stress-gas pressure evolution rules of coal and gas outburst: A case study in Dingji coal mine, China. *Energy Science & Engineering*, 8(1), 61-73
  19. Tu, Q., Xue, S., Cheng, Y., Zhang, W., Shi, G., & Zhang, G. (2022). Experimental study on the guiding effect of tectonic coal for coal and gas outburst. *Fuel*, 309, 122087.
  20. Shu, L., Wang, K., Liu, Z., Zhao, W., Zhu, N., & Lei, Y. (2022). A novel physical model of coal and