

### تحلیل بیرون زدگی ناشی از پدیده انفجار ناگهانی گاز و زغال سنگ در معدن کاری زیرزمینی با استفاده از معیار شکست ناپایدار (مطالعه موردی: معدن پروده زغال سنگ طبس)

#### مقاله پژوهشی

حسین خاکشور<sup>۱</sup>؛ حسین نوفرستی<sup>۲</sup>؛ محمدجواد رحیم دل<sup>۳\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، hosseinkhakshoor@gmail.com

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، hnoferesty@birjand.ac.ir

۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، rahimdel@birjand.ac.ir

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳

شماره صفحات: ۱۵۵ تا ۱۷۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.12524.1466

واژگان کلیدی	چکیده
معدن کاری زیرزمینی زغال سنگ بیرون زدگی زغال سنگ و گاز روش های عددی معدن پروده طبس	در جریان معدن کاری زیرزمینی زغال سنگ، تنش های زمین، ناهنجاری های زمین شناسی مانند گسل ها و مناطق برشی منجر به تمرکز تنش، تغییر شکل و شکست زغال سنگ و در نهایت ایجاد مخاطراتی نظیر بیرون زدگی زغال سنگ و گاز می شوند. بیرون زدگی زغال سنگ و گاز، انتشار سریع مقدار زیادی از زغال سنگ یا سنگ ها، همراه با مقدار زیادی گاز در معادن زیرزمینی زغال سنگ است. تاکنون وقوع این پدیده منجر به از بین رفتن تجهیزات و جان بسیاری از معدنچیان در سراسر جهان شده است. از این رو، پیش بینی، تحلیل و کنترل آن ضرورت دارد. شبیه سازی عددی یکی از روش های توانمند برای مطالعه این پدیده پیچیده است. هدف از این مقاله، پیش بینی این پدیده در معادن زیرزمینی زغال سنگ با استفاده از روش های تحلیلی و عددی است. برای این منظور، یکی از تونل های فرعی کارگاه E۴ معدن پروده یک طبس که در عمق ۴۷۲ متری از سطح زمین قرار دارد، در نرم افزار Phase2 شبیه سازی و احتمال وقوع بیرون زدگی در این لایه با فرض وجود یک مخزن گاز بررسی شده است. علاوه بر این، به منظور پیش بینی وقوع بیرون زدگی از معیار شکست ناپایدار استفاده شده است. باتوجه به نتایج این تحقیق، بین احتمال وقوع پدیده مورد مطالعه و ضخامت لایه رابطه خاصی پیدا نشد این مطلب توسط محققان قبلی این حوزه نیز تأیید شده است، اما به طور کلی لایه ضخیم تر بیشتر در معرض این پدیده است؛ زیرا احتمال افزایش زغال نرم تر وجود دارد و مقدار کل گاز موجود برای جابه جایی زغال سنگ بیرون زده شده بیشتر است. علاوه بر این، پارامترهای مقاومتی نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته دارای تأثیر معناداری بر شدت وقوع بیرون زدگی بوده در حالی که احتمال وقوع این پدیده مستقل از مقاومت کششی زغال برآورد شده است.

۱- مقدمه  
بیرون زدگی زغال سنگ و گاز (Coal and gas outburst) در جبهه کار یا فضای داخلی معدن تعریف می شود. وقوع این پدیده در معادن زغال سنگ می تواند منجر به خرابی به عنوان انتشار مخرب و هم زمان گاز و مواد سنگی خرد شده

\* خراسان جنوبی؛ بیرجند؛ انتهای بلوار دانشگاه؛ پردیس شوکت آباد؛ دانشگاه بیرجند؛ دانشکده مهندسی؛ طبقه دوم؛ کدپستی: ۹۷۱۷۴۳۴۷۶۵؛ صندوق پستی: ۹۷۱۷۵/۶۱۵؛ شماره تلفن: ۰۵۶-۳۱۰۲۶۴۷۵؛ دورنگار: ۰۵۶-۳۱۰۲۲۱۳۳

هستند (Kanduč, et al., 2012). به عبارت دیگر، در صورتی که لایه های زغال سنگ تحت شرایطی نظیر افزایش محتوی یا فشار گاز، وجود عوامل زمین شناسی پیچیده تر، مانند چین خوردگی ها و شکستگی ها، وجود گسل، دایک، و مناطق برشی، تغییر در ضخامت لایه، نفوذ ماگمایی و مناطق میلونیتی، افزایش عمق معدن کاری، افزایش زاویه شیب لایه، کاهش نفوذ پذیری کمتر و افزایش ضریب انتشار قرار گیرند، احتمال وقوع بیرون زدگی به شدت افزایش می یابد. علاوه بر این، احتمال بروز این پدیده در لایه هایی که محتوی دی اکسید کربن بیشتری دارند (به دلیل بالابودن آهنگ انتشار گاز از ذرات زغال سنگ) در مقایسه با لایه هایی که محتوی گاز متان آن ها بیشتر است، بالاتر است (Wold, et al., 2008). علاوه بر این، موارد یاد شده می توانند یکدیگر را تحت تأثیر قرار دهند. به عنوان نمونه، نفوذ پذیری زغال سنگ تحت تأثیر سطح تنش و وجود درزه، شکاف و شکستگی ها قرار دارد. سطح تنش وارد بر لایه ها نیز تحت تأثیر ساختارهای زمین شناسی و عمق فضای استخراج است. میزان انتشار گاز از ذرات زغال سنگ (میزان دفع گاز) به میزان قابل توجهی تحت تأثیر اندازه ذرات زغال سنگ یا درجه خرد شدن آن است. در این صورت، مقاومت زغال سنگ می تواند متأثر از فشار گاز، وقوع بیرون زدگی را تحت تأثیر قرار دهد (Wold, et al., 2008). مطابق با اظهارات منتصری هر چه محل استقرار لایه زغالی مورد نظر عمیق تر باشد، فشار طبقات بالای آن زیادتر است. در این صورت، امکان فرار گاز کمتر و در نتیجه میزان گاز خیزی آن بیشتر است. به عبارت دیگر در این شرایط، احتمال بیرون زدگی بیشتر خواهد بود (Montazeri, 1998).

در این تحقیق به منظور شبیه سازی بیرون زدگی زغال سنگ از نرم افزار عددی Phase2 استفاده شده است. نرم افزار Phase2 یکی از نرم افزارهای قدرتمند شرکت Rocscience بوده که به منظور مدل سازی خاک و سنگ با استفاده از روش عددی المان محدود مورد استفاده قرار می گیرد. این نرم افزار در زمینه های متنوعی نظیر تحلیل پایداری شیروانی ها (Li, et al., 2017; You, et al., 2022) تحلیل پایداری تونل ها و فضاهای زیرزمینی (Karimi Nasab, et al., Abdollahi, et al., 2019) و پایش لرزه ای معادن عمیق (Konicek, 2018; 2021)

تجهیزات، ریزش جبهه کار، خفگی کارکنان، انفجار گاز متان و یا آلودگی محیط معدن توسط دی اکسید کربن شود. در طول سال های گذشته بسیاری از بیرون زدگی های معادن زغال سنگ منجر به ازدست دادن جان تعداد قابل توجهی از کارکنان معدن در سراسر جهان شده است. در سال های اخیر تحقیقات گسترده ای به منظور بررسی سازوکار این پدیده در معادن عمیق زغال سنگ صورت گرفته است. باین وجود، عوامل زیادی از جمله ساختارهای متنوع زمین شناسی، خواص زغال سنگ آنیزوتروپ و ناهمگن، محتوی گاز، تنش های درجا و نیز روش استخراج شناسایی و تحلیل این پدیده را پیچیده کرده است (Xue & Wang, 2018). بیشتر محققان حوزه زغال سنگ بر این باورند که علت پیچیدگی این پدیده را می توان ترکیب عوامل متعددی مانند فشار گاز، تنش برجای زمین، خواص مقاومتی و ساختار زمین شناسی زغال سنگ دانست (Jiang & Yu, 1995). به طور کلی پدیده بیرون زدگی زغال سنگ و گاز دارای مراحل زیر است:

بخشی از سنگ که به دلیل داشتن گاز تحت فشار بوده و در اثر تنش های محصورکننده در معرض تغییر شکل سریع قرار گرفته، در اثر عوارض زمین شناسی موجود در منطقه و یا تمرکز تنش ناشی از معدن کاری بسیار شکسته و خرد می شود. سپس، گازهای موجود در ماسه سنگ ها یا سنگ های تخییری دربرگیرنده زغال به سرعت وارد شکستگی ها که خود حاوی گاز هستند می شوند. هنگامی که گاز بیشتری وارد فضای شکستگی می شود ممکن است تنش ناشی از فشار گاز به مرحله ای برسد که سنگ قابلیت تحمل آن را ندارد. در صورتی که تنش های وارد بر سنگ فراتر از مقاومت آن باشد، توده سنگ خرد شده و گازها شروع به حرکت می کنند. در نهایت، سنگ شکسته شده و گازها به سمت حفراتی نظیر گمانه ها و بازکننده های معدن رانده می شوند (Wu, et al., 2020).

مهم ترین عوامل مؤثر بر وقوع بیرون زدگی در معادن عمیق زغال سنگ شامل مقدار و فشار گاز لایه زغال سنگ، عوامل زمین شناسی شامل عمق معدن، زاویه شیب و ضخامت لایه ها، چین خوردگی، شکستگی، گسل، مناطق برشی، تغییرات ضخامت لایه، و نفوذ ماگمایی، ویژگی های مکانیکی زغال سنگ شامل نفوذ پذیری، خواص جذب، مقاومت و درجه زغال شدگی و نیز شرایط تنش در منطقه

زغال‌سنگ را خرد کرده و ترک‌هایی را در داخل لایه زغال‌سنگ ایجاد می‌کند، در ادامه لایه‌های زغال‌سنگ به شکل پوسته‌ای کروی در می‌آیند. مطابق با این فرضیه، زغال‌سنگ گاز را به مناطق شکسته انتقال داده و تجمع گاز پر فشار باعث توسعه ترک‌ها شده و در نهایت لایه‌های زغال‌سنگ به شکل پوسته‌هایی کروی شکل شکسته شده و به درون جبهه کار ریخته می‌شوند. با ادامه این روند، توزیع مجدد تنش، زغال‌سنگ نزدیک به جبهه کار را شکسته و به یک فرایند بیرون‌زدگی مداوم تبدیل می‌شود. گووان و همکاران در سال ۲۰۰۹ (Guan, et al., 2009) پدیده بیرون‌زدگی زغال را مشابه فوران مواد آتش‌فشانی در نظر گرفتند. مطابق اظهارات گووان و همکاران، ازدیاد فشار گاز در داخل زغال‌سنگ در مقایسه با فشار محیط پیرامون آن، منجر به خرد شدن زغال‌سنگ و انتشار گاز پرفشار شده و در نهایت به صورت یک موج شوک، به بیرون‌زدگی گاز منتهی می‌شود.

ین و همکاران (Yen, et al., 2002) اظهار داشتند که انقباض گاز در پدیده بیرون‌زدگی فرایندی متغیر بین فرایندهای بی‌دررو و هم‌دما است. آنان در تحقیق خود روشی را برای تعیین شاخص تغییرپذیری ارائه دادند. جیانگ و همکاران (Jiang, et al., 2013) یک رابطه خطی بین انرژی انبساط گاز و فشار ارائه دادند و بیان نمودند که انبساط دائمی گاز می‌تواند به‌عنوان یک فرایند هم‌دما در نظر گرفته شود. گانگ و همکاران (Wang, et al., 2015) با در نظر گرفتن معیار بیرون‌زدگی و انفجار گاز، مدلی را به‌منظور پیش‌بینی شدت انفجار گاز ارائه دادند که حساسیت آن به محتوی گاز بیشتر از تنش برجا بود. بر اساس محاسبات انرژی حاصل از تعداد ۳۶ حادثه انفجار و بیرون‌زدگی زغال‌سنگ، لی و همکاران (Li, et al., 2018) اظهار داشتند که در حدود نیمی از این حوادث، انرژی انبساط گاز یک تا دو برابر بیشتر از کار حاصل از خردایش بوده است.

لیو و همکاران (Lu, et al., 2019) به حل معادلات مکانیک جامدات و نیز معادلات مستقل از زمان جریان سیال با لحاظ نمودن انتشار گاز در ماتریکس زغال‌سنگ و جریان گاز در ترک‌ها پرداختند. در این تحقیق، کرنش پلاستیک معادل به‌منظور پیش‌بینی و تحلیل تغییرات نفوذپذیری و

تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (Yadav & Sharan, 2019) و بررسی پتانسیل لهیدگی در جریان تونل‌سازی (Maleki, et al., 2022) مورد استفاده قرار گرفته است.

تاکنون سازوکارهای مختلفی به‌منظور بررسی پدیده نحوه وقوع پدیده انفجار و بیرون‌زدگی زغال‌سنگ توسط محققین حوزه معدن ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به دو گروه تک عاملی و چندعاملی تقسیم‌بندی نمود. در ادامه به معرفی این مکانیسم‌ها پرداخته شده است.

سازوکارهای تک عاملی را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی نمود. در دسته اول، محتوی گاز زغال نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع پدیده انفجار گاز دارد، درحالی‌که گروه دیگر، نحوه توزیع تنش را به‌عنوان عامل اثرگذار بر وقوع پدیده انفجار و بیرون‌زدگی گاز زغال می‌داند.

تیلور (Taylor) برای اولین بار در سال ۱۸۵۲ به ارائه ارتباط نزدیک بین انتشار ناگهانی گازها در معادن زغال‌سنگ و پدیده بیرون‌زدگی پرداخت. رووان (Rowan) نیز در سال ۱۹۱۱ علت اصلی وقوع این پدیده را وجود یک زون بسیار خرد شده از زغال‌سنگ مطرح کرد که در آن گاز موجود در ترک‌ها تحت فشار بالایی قرار دارند. نظریه رووان به نظریه پوکت (Pocket) معروف است. مطابق این نظریه، دلیل اصلی خرد شدن آن است که زغال‌سنگ در مناطق برشی و گسل‌ها تحت وزن طبقات بالایی قرار دارد (Karimi Nasab, et al., 2021). با این وجود، مطابق اظهارات لویرت (Loiret) و لالیگنت (Laligant) در سال ۱۹۲۳، تأثیر نیروهای مکانیکی مستقل از فشار گاز بوده و تنش‌های موجود در سنگ، به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم، نقش مهمی در وقوع بیرون‌زدگی دارند. کائولفیلد (Caulfield) در سال ۱۹۳۱ نیز علت اصلی بروز بیرون‌زدگی و انفجار سنگ را وجود تنش‌ها بیان می‌کند. پچوک (Pechuk) در سال ۱۹۳۳ ضمن تأیید تحقیقات کائولفیلد، بیرون‌زدگی‌ها را نتیجه آزادسازی انرژی پتانسیل انباشته شده در سنگ در فرایندهای تکتونیک دانسته است. بنا بر اظهارات پچوک، گازهای آزاد شده در حین خرد شدن زغال‌سنگ تنها پیامدهای ثانویه وقوع بیرون‌زدگی زغال هستند. جیانگ در سال ۱۹۹۸ (Jiang, 1998) فرضیه بی‌ثبات‌سازی پوسته کروی را پیشنهاد کردند که در آن، تنش سنگ ابتدا

سنگ (*Rock burst*)، در نظر گرفته شده با این تفاوت که علاوه بر تنش زمین، تأثیر فشار گاز نیز در نظر گرفته می‌شود. در این صورت، می‌توان با تعیین شاخص شکست ناپایدار (*Unstable Failure Index, UFI*)، برای تشخیص نواحی مستعد بیرون زدگی را تعیین نمود. در این مقاله حاضر ابتدا پدیده بیرون زدگی گاز با استفاده از معیار شکست ناپایدار سنگ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و سپس به بررسی احتمال وقوع انفجار گاز با استفاده از معیار شکست ناپایدار سنگ در معدن زغال سنگ پروده طبس پرداخته شده است.

## ۲- تحلیل پدیده بیرون زدگی گاز با استفاده از معیار شکست ناپایدار سنگ

بیرون زدگی گاز در شاخص شکست ناپایدار سنگ (*Unstable Failure Index, UFI*) نوعی انفجار سنگ در نظر گرفته شده و علاوه بر تنش زمین، سنگ تحت تأثیر فشار گاز نیز قرار می‌گیرد. در این صورت، به منظور تحلیل ظرفیت تحمل انرژی، از مقادیر انرژی کرنشی الاستیک و ظرفیت انرژی ذخیره شده تا لحظه شکست استفاده می‌شود. شکست ناپایدار در ارتباط با شکست ترد بوده و در حین آن انرژی کرنشی به شدت افت می‌کند. در این نوع شکست، کرنش پلاستیک ناچیزی قبل از وقوع گسیختگی وجود دارد. از این رو، رفتار سنگ تا لحظه شکست را می‌توان به صورت الاستیک فرض کرد. در این صورت، معیار شکست ناپایدار از نسبت انرژی کرنشی الاستیک اعمال شده به ظرفیت تحمل انرژی کرنشی الاستیک سنگ قابل محاسبه است. چگالی انرژی کرنشی الاستیک اعمال شده در حالت سه بعدی از رابطه (۱) به دست می‌آید (*Doroodgar, 2021*):

$$\frac{1}{2} \sum \sigma_{ii} \varepsilon_{ii} + \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz}) + (\sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + \sigma_{zx} \varepsilon_{zx}) = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z) + (\tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (1)$$

محتوی انرژی در آغاز بیرون زدگی مورد استفاده قرار گرفت. ژائو و همکاران (*Zhao, et al., 2022*) با استفاده از فرایند ترکیبی مکانیک جامدات - سیالات - حرارت به مطالعه پاسخ پارامترها در طول وقوع پدیده بیرون زدگی گاز پرداختند. آن‌ها با بهره‌گیری از ترکیب معیارهای دراکر - پراگر (*Drucker-Prager*)، موهر - کلمب (*Mohr-Coulomb*) و معیار حداکثر تنش کششی به ارزیابی مقاومت و شکست کششی زغال پرداختند. در این مطالعه از ترکیب قانون دارسی، محتوی گاز و معادلات رفتار جریان گاز در لایه‌های زغال سنگ استفاده شده است. ژائو و همکاران ضمن اظهار وجود افزایش در تغییر میدان تنش، انتقال تنش و شکست کششی در حین وقوع بیرون زدگی، انرژی الاستیک را به عنوان تابعی از تنش ارائه دادند.

علی‌رغم تلاش‌های گسترده‌ای که برای تحلیل، پیش‌بینی و کنترل پدیده انفجار و بیرون زدگی زغال انجام شده است، پیش‌بینی مناطق مستعد انفجار و جلوگیری و یا کاهش پتانسیل بیرون زدگی به عنوان یک راهکار عملی برای جلوگیری از وقوع این پدیده مخرب در حین استخراج زغال در معادن عمیق مطرح است. از آنجاکه مکانیسم بیرون زدگی گاز به ساختار زمین‌شناسی، میدان تنش ناشی از عملیات معدن کاری و فشار گاز وابسته است، کنترل، حذف و یا کاهش اثرگذاری یک یا چند مورد از عوامل یادشده پتانسیل وقوع بیرون زدگی زغال را به شدت کاهش دهد. به عنوان نمونه، با تغییر در نرخ استخراج، روش معدن کاری و هندسه فضای استخراجی می‌توان تنش‌ها القایی ناشی از معدن کاری را کاهش داد. علاوه بر این، با انجام مؤثر عملیات گاززدایی، امکان کاهش محتوی گاز پیش و یا در حین معدن کاری وجود دارد (*Kanduč, et al., 2012*).

هدف از مقاله حاضر، بررسی رفتار بیرون زدگی گاز در معادن زغال سنگ با بهره‌گیری از معیار شکست ناپایدار سنگ است. مطابق با این معیار، بیرون زدگی نوعی انفجار

که در این رابطه،  $\varepsilon$ : کرنش،  $\sigma$ : مقادیر تنش نرمال (مگاپاسکال)،  $\tau$ : تنش برشی (مگاپاسکال) و  $\gamma$ : کرنش برشی اعمال شده در حالت دوبعدی از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{2} \sum \sigma_{ii} \varepsilon_{ii} + \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy}) + (\sigma_{xy} \varepsilon_{xy}) = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y) + (\tau_{xy} \gamma_{xy}) \quad (2)$$

در این صورت، ظرفیت تحمل انرژی کرنشی الاستیک در حالت سه‌بعدی طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\left( \frac{1}{2} \sum \sigma_{ii} \varepsilon_{ii} + \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \right)_{at Failure point} = \left( \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz}) + (\sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + \sigma_{zx} \varepsilon_{zx}) \right)_{at Failure point} = \left( \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \right)_{at Failure point} \quad (3)$$

در این رابطه، مقادیر  $\varepsilon_1$ ،  $\varepsilon_2$  و  $\varepsilon_3$  به ترتیب از روابط (۴)، (۵) و (۶) قابل محاسبه است.

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan \psi = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7) \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3)) \quad (4)$$

در این رابطه،  $c$ : چسبندگی (مگاپاسکال) و  $\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ (درجه) است؛ بنابراین چگالی ظرفیت تحمل انرژی کرنشی الاستیک در حالت سه‌بعدی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود (Doroodgar, 2021).

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu (\sigma_1 + \sigma_3)) \quad (5)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} (\sigma_3 - \nu (\sigma_1 + \sigma_2)) \quad (6)$$

در این روابط،  $\nu$  نسبت پواسون است.

$$\left( \frac{1}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)) \right)_{at Failure point} = \quad (8)$$

$$\frac{1}{2E} \left( (\sigma_c + \sigma_3 \tan \psi)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu ((\sigma_c + \sigma_3 \tan \psi) \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + (\sigma_c + \sigma_3 \tan \psi) \sigma_3) \right)$$

در این رابطه،  $\nu$ : نسبت پواسون،  $E$ : مدول یانگ (مگاپاسکال) و  $\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ (درجه) است. در این صورت چگالی ظرفیت انرژی کرنشی الاستیک

$$\left( \frac{1}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \sigma_1 \sigma_3) \right)_{at Failure point} = \frac{1}{2E} ((\sigma_c + \sigma_3 \tan \psi)^2 + \sigma_3^2 - 2\nu (\sigma_c + \sigma_3 \tan \psi) \sigma_3) \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2E} \left( \left( \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \left( \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \sigma_3 \right)$$

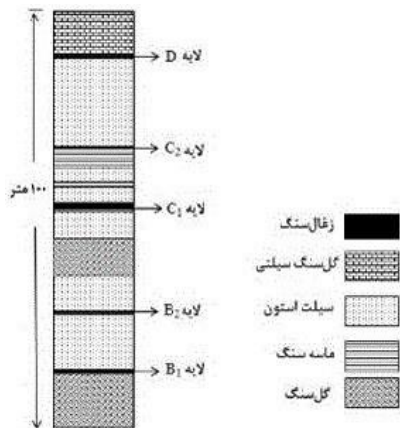
(UFI (2D)) مورد نیاز است که از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

از آنجایی که نرم‌افزار Phase2 یک نرم‌افزار المان محدود دوبعدی است، پس معیار UFI در حالت دو بعدی

$$UFI (2D) = \left[ \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y) + (\tau_{xy} \gamma_{xy}) \right] / \left[ \frac{1}{2E} \left( \left( \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \left( \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \sigma_3 \right) \right] \quad (10)$$

کار انجام شده) بر ظرفیت تحمل انرژی کرنشی سنگ از آنجایی که این معیار از نسبت انرژی کرنشی الاستیک

حدود یک کیلومتر یا گاهی بیشتر است که به شیوه پسر و استخراج می‌شوند (Salimi, et al., 2018). برای ایجاد مدل عددی، تونل پیشروی کارگاه استخراج E4 معدن پروده یک معدن پروده طبس شبیه سازی شده است. این کارگاه در لایه زغالی CI و در عمق ۴۷۲ متری در حال استخراج است. لایه های فوقانی، با ضخامت ۴۷۲ متر، شامل ماسه سنگ، سیلت، گل سنگ و سیلت ماسه ای هستند که باتوجه به اطلاعات گمانه های اکتشافی در مدل در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که نسبت تنش افقی به قائم در این مطالعه باتوجه به گزارش های دفتر فنی معدن برابر با ۱/۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- ستون چینه شناسی منطقه زغالی پروده طبس (Salimi, et al., 2018)

جدول ۱، پارامترهای مقاومتی توده سنگ معدن پروده طبس را نشان می‌دهد که برای ساخت مدل عددی استفاده شده است. ضخامت لایه زغالی CI بین ۱/۵ تا ۲ متر است که در شبیه سازی برابر با ۲ متر در نظر گرفته شده است (ارتفاع تونل ۳/۶ متر). علاوه بر این، یک منطقه پرفشار به ابعاد تونل، به طول ۲ متر و با فشار گاز ۰/۶ مگاپاسکال در شبیه سازی فرض شده است. لازم به توضیح است که مطابق پژوهش فیو و همکاران (Fu, et al., 2009)، حداقل فشار گاز لازم برای وقوع بیرون زدگی ۰/۶ مگاپاسکال است. از آنجایی که در نرم افزار Phase2 امکان شبیه سازی جریان سیال وجود ندارد، تحقیق انجام شده بر مبنای تحلیل تنش ها بوده و فشاری که گاز منطقه پرفشار به دیواره حفره وارد می‌کند، به صورت تنش معادل اعمال شده است.

حاصل می‌شود، اگر UFI بزرگ تر از یک باشد، به این معناست که سنگ در آستانه گسیختگی قرار دارد. در سنگ های شکل پذیر، اضافه انرژی اعمال شده به صورت تغییر شکل های پلاستیک جذب شده و ممکن است گسیختگی قابل توجهی در سنگ رخ ندهد. ولی در سنگ های ترد، مانند زغال سنگ که ظرفیت تغییر شکل پلاستیک ناچیزی دارند، با افزایش UFI، احتمال شکست ترد سنگ و ایجاد درزه و ترک جدید در زغال سنگ بیشتر می‌شود. با این وجود، اینکه دقیقاً در کدام مقدار از UFI پدیده شکست ناگهانی یک واحد سنگی اتفاق می‌افتد نیاز به مطالعات دقیق آزمایشگاهی دارد. با این وجود، در این گونه سنگ ها با افزایش مقدار UFI، احتمال شکست ترد بیشتر می‌شود. شکست ترد زغال سنگ می‌تواند همچون شکست پایه های زغالی بدون فشار گاز نیز اتفاق افتد؛ اما وجود فشار گاز منجر به افزایش فشار وارد بر سنگ شده و در نهایت وقوع این پدیده را تسریع می‌کند. این فرایند که با تخلیه ناگهانی گاز از ترک های ایجاد شده و به صورت شدیدتر اتفاق می‌افتد در اصطلاح بیرون زدگی نامیده می‌شود.

### ۳- بررسی وقوع بیرون زدگی در معدن زغال سنگ پروده طبس

معدن زغال سنگ طبس بزرگ ترین معدن زغال سنگ خاورمیانه است. ذخایر اکتشاف شده این معدن در حدود ۲/۵ میلیارد تن است. این معدن از چهار ناحیه پروده، نایبند (با زغال ککشو)، مزینو (زغال سنگ حرارتی) و آب دوغی تشکیل شده است. محدوده زغال سنگ پروده طبس به معادن پروده یک، دو، سه و چهار و پروده شرقی تقسیم بندی می‌شود. در پروده یک، ضخامت محدوده اصلی در حدود ۱۰۰ متر است که لایه های B1، B2، C1، C2 و D در آن، دارای ضخامت اقتصادی هستند. ضخامت قابل کار در این لایه ها به طور متوسط بین ۰/۵۲ تا ۱/۸۳ متر متغیر است. شکل ۱، نمایی از ستون چینه شناسی منطقه زغالی طبس را نشان می‌دهد. ضخامت روباره در این معدن از ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر متغیر است. کانسار مورد نظر به روش جبهه کار طولانی و به صورت مکانیزه استخراج می‌شود. بر اساس طراحی انجام شده، عرض اولین پهنه ۲۰۰ متر و در بقیه پهنه ها، ۲۲۰ متر است. طول پهنه های استخراجی نیز در

جدول ۱- مشخصات مقاومتی لایه‌ها در مدل‌سازی عددی (Salimi, et al., 2018)

پارامتر	واحد	سیلت	سیلت ماسه‌ای	زغال‌سنگ	گل‌سنگ	ماسه‌سنگ
وزن مخصوص	$MN/m^3$	۰/۰۲۷	۰/۰۲۵	۰/۰۱۶	۰/۰۲۶	۰/۰۲۷
مقاومت کششی	$MPa$	۲/۵	۲/۶	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۶/۳
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۲۴/۱۲	۳۱/۷۵	۱۵-۲۵	۱۸/۶۲	۲۱/۷۵
چسبندگی	$MPa$	۱/۳	۰/۴۴۳	۰/۵	۰/۹۴	۸/۶۹
مدول الاستیسیته	$MPa$	۲۸۳۸	۲۹۸۷	۳۱۶	۲۸۳۸	۵۲۸۱
نسبت پواسون	-	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۲۵

در محیط نرم‌افزار *Phase2* در شکل ۳ و در شکل ۴، تونل و گام‌های حفر نشان داده شده است.

جدول ۲- خصوصیات پیچ سنگ فولادی استفاده شده در تونل E4 (Ghadimi, et al., 2018)

پارامتر	واحد	مقدار
قطر	$mm$	۲۲
ارتفاع آج	$mm$	۱/۳
عرض آج	$mm$	۱/۵
فاصله‌داری آج	$mm$	۱۲
مدول الاستیک	$GPa$	۲۰۰
بار تسلیم کششی	$Ton$	۲۵

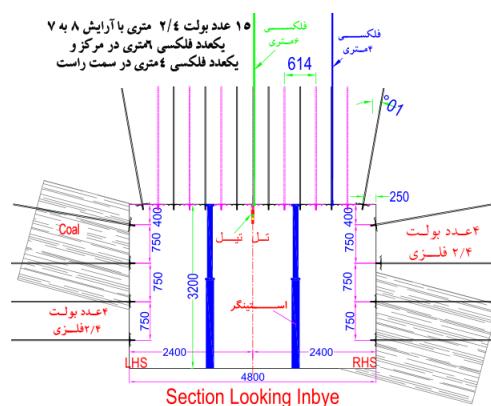
جدول ۳- خصوصیات پیچ سنگ فلکسی استفاده شده در تونل E4 (TPCC, 2022)

پارامتر	واحد	مقدار
قطر	$mm$	۲۳
ارتفاع آج	$mm$	۱/۳۵
عرض آج	$mm$	۲/۵
مدول الاستیک	$GPa$	۲۰۰
بار تسلیم کششی	$Ton$	۵۱

#### ۴- بحث و نتایج

تأثیر وجود فشار گاز با در نظر گرفتن یک مخزن گاز با فشار ۰/۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است که در خروجی مدل قابل مشاهده است. به طوری که، مقدار تنش‌ها در انتهای تونل که در فاصله ۰/۵ متری از مخزن گاز قرار دارد با فرض وجود این مخزن ۲/۵ مگاپاسکال بیشتر از حالتی است که این

سیستم نگهداری مورد استفاده در محدوده مورد مطالعه در شکل ۲، نشان داده شده است. با توجه به گزارشات دفتر طراحی و مهندسی شرکت زغال‌سنگ پروده طبس (TPCC, 2022)، سقف تونل‌های پیشروی با پیچ‌سنگ فولادی و فلکسی تقویت شده است.



شکل ۲- سیستم نگهداری تونل E4 (TPCC, 2022)

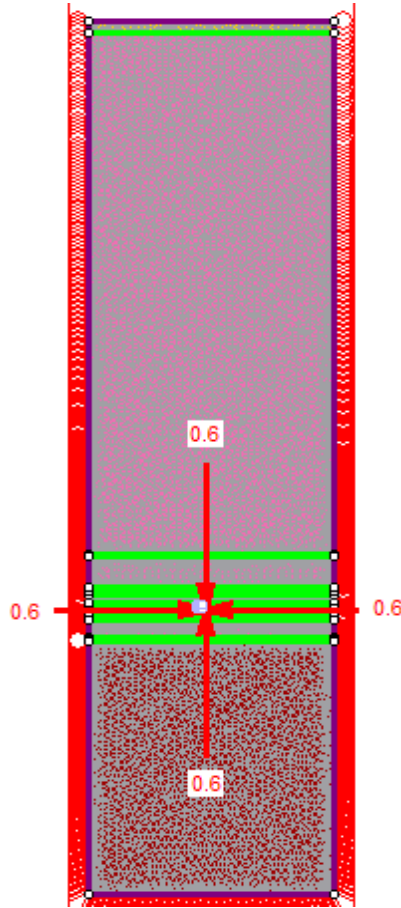
مطابق شکل ۲، قبل از نصب پیچ‌سنگ و برای نگهداری موقت از پایه‌های هیدرولیکی (استینگر) استفاده می‌شود که با توجه به موقت بودن آن در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. خصوصیات پیچ‌سنگ و فلکسی‌های مورد استفاده که از نوع تمام تزریقی هستند به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳، آورده شده است. لازم به توضیح است که از آنجایی که نرم‌افزار *Phase2*، نرم‌افزاری برای مدل‌سازی‌های دوبعدی است، تنها دید جانبی تونل و سیستم نگهداری قابل رویت بوده و فاصله پیچ‌سنگ‌ها در بعد دوم در نرم‌افزار تعریف شده است.

با استفاده از اطلاعات فوق تونل پیشروی مورد نظر در نرم‌افزار *Phase2* مدل‌سازی شده است. مدل اولیه ایجاد شده

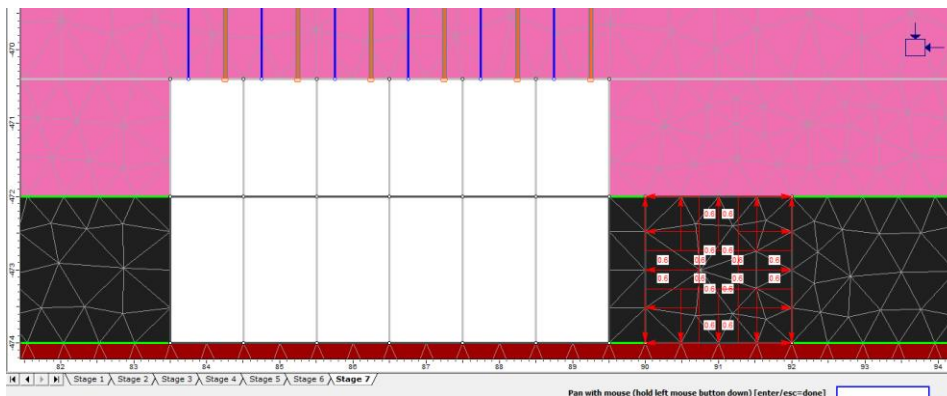


تحلیل بیرون زدگی ناشی از پدیده انفجار ناگهانی گاز و زغال سنگ در معدن کاری... حسین خاکشور و ...، ص ۱۵۵-۱۷۲

مخزن گاز وجود ندارد است. علاوه بر این، میزان جابه جایی ها در انتهای تونل ۴ میلی متر بیشتر از حالتی است که مخزن گاز وجود ندارد. وضعیت جابه جایی و تنش ها در شکل ۵، نشان داده شده است.

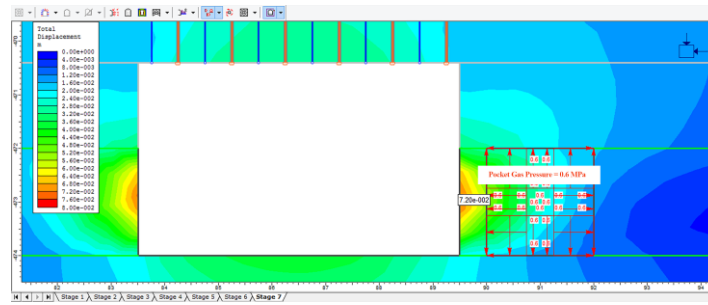


شکل ۳- نمای کلی از مدل ایجاد شده

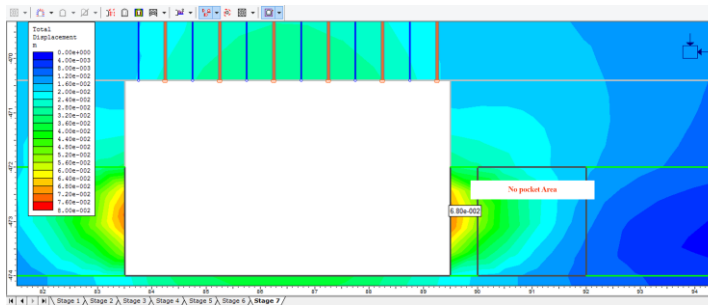


شکل ۴- تونل و گام های حفر

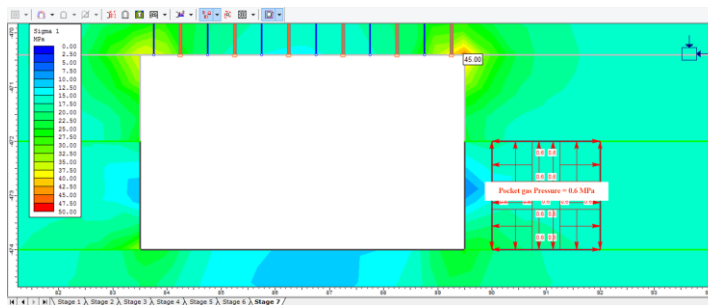




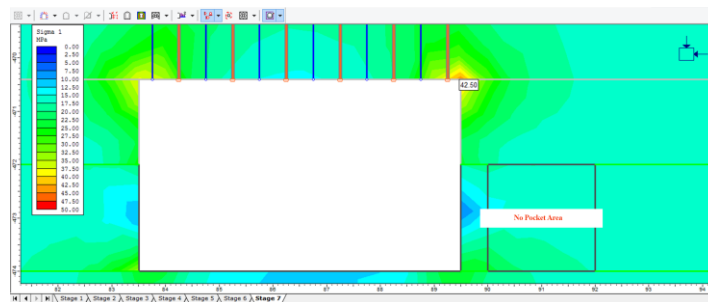
الف) وضعیت جابه‌جایی‌ها با وجود مخزن گاز



ب) وضعیت جابه‌جایی‌ها بدون مخزن گاز



ج) وضعیت تنش‌ها با وجود مخزن گاز

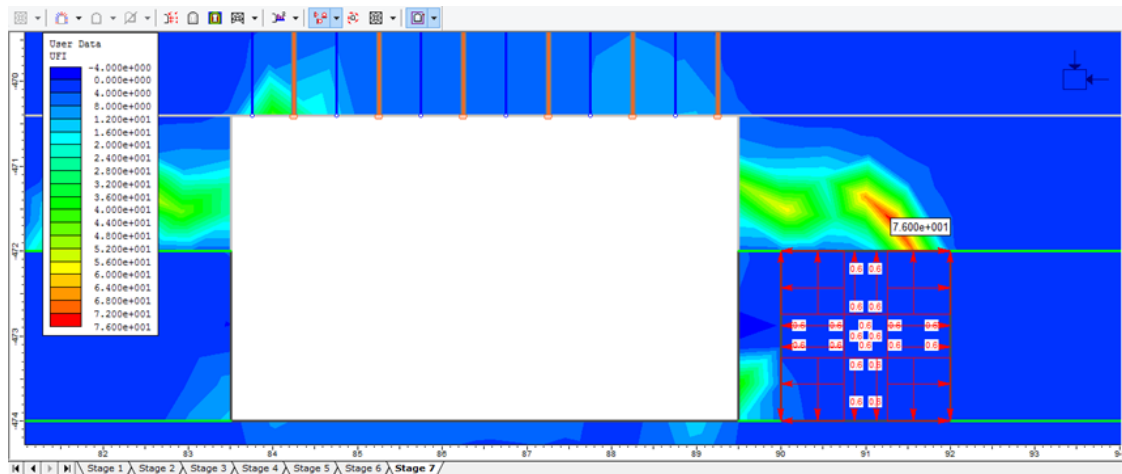


د) وضعیت تنش‌ها بدون مخزن گاز

شکل ۵- مقایسه وضعیت تنش و جابه‌جایی در صورت وجود و نبود مخزن گاز

پدیده بیرون زدگی وجود دارد. لازم به ذکر است که با بزرگ تر شدن این مقدار، احتمال وقوع بیرون زدگی افزایش می یابد. پس با فرض وجود مخزن گاز با فشار ۰/۶ مگاپاسکال در این کارگاه، جنبه کار تونل پیشروی در معرض بیرون زدگی است.

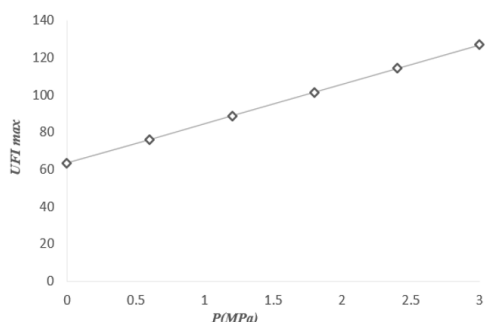
با تعریف معیار شکست ناپایدار (مطابق بخش دوم) نرم افزار و حل مدل، حداکثر مقدار این شاخص ( $UFI_{max}$ ) برابر با ۷۶ برآورد شده است (شکل ۶). باتوجه به رابطه (۱۰)، چون این مقدار بزرگ تر از یک است، به معنای وجود اضافه انرژی نامتعادل در سنگ بوده و در نتیجه احتمال وقوع



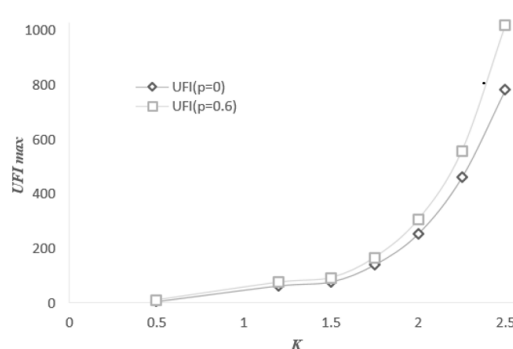
شکل ۶- خروجی اولیه مدل با اعمال شاخص  $UFI$

فشار وارده به دیواره تونل، دیواره مخزن نیز تحت فشار بیشتری قرار گرفته و با تشدید حرکت مولکول های گاز، احتمال بیرون زدگی زغال به شدت افزایش می یابد. با افزایش فشار گاز، شاخص بیرون زدگی به صورت خطی افزایش یافته است؛ بنابراین، با افزایش فشار گاز، استعداد لایه زغال برای بیرون زدگی به طور فزاینده ای افزایش می شود. با افزایش عمق لایه زغال سنگ مقدار شاخص  $UFI$  به طور قابل توجهی افزایش یافته است. از آنجایی که با افزایش عمق لایه مقدار تنش ها افزایش می یابد، احتمال وقوع بیرون زدگی نیز بیشتر می شود. در تحقیقات گذشته رابطه مشخصی بین احتمال وقوع بیرون زدگی و ضخامت لایه زغال ارائه نشده است. این به معنای احتمال وقوع انفجار و بیرون زدگی گاز هم در لایه های نازک و هم در لایه های ضخیم است. اما به طور کلی لایه ضخیم تر بیشتر در معرض این پدیده است؛ زیرا احتمال افزایش زغال نرم تر وجود دارد و مقدار کل گاز موجود برای جابه جایی زغال سنگ بیرون زده شده بیشتر است. با افزایش عمق لایه ها و افزایش مقدار تنش ها، احتمال وقوع بیرون زدگی نیز بیشتر می شود.

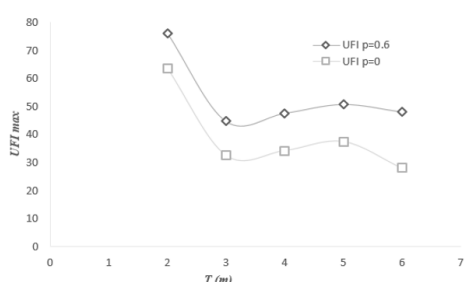
در ادامه این بخش به بررسی تأثیر شاخص هایی نظیر عمق کارگاه، فشار گاز، نسبت تنش و مشخصات مقاومتی لایه ها بر شدت وقوع بیرون زدگی گاز پرداخته شده است. برای این منظور، با فرض ثابت نگه داشتن سایر شاخص ها، به تحلیل حساسیت معیار شکست ناپایدار نسبت به هر یک از شاخص های یاد شده، پرداخته شده است. لازم به ذکر است که تحلیل های انجام شده در دو حالت حدی فشار صفر و فشار ۰/۶ مگاپاسکال انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر نسبت تنش بر احتمال وقوع بیرون زدگی گاز، میزان معیار شکست ناپایدار با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ضریب نسبت تنش، فشار مخزن گاز، ارتفاع و ضخامت لایه زغالی در دو فشار حدی صفر و ۰/۶ مگاپاسکال محاسبه است. نتایج در شکل ۷، آورده شده است. باتوجه به شکل ۷، با افزایش نسبت تنش، احتمال وقوع پدیده بیرون زدگی افزایش می یابد که با تحقیقات پیشین هم خوانی دارد. با افزایش نسبت تنش به مقادیر بیش از ۲/۵، مقدار شاخص شکست ناپایدار به طور قابل توجهی افزایش می یابد که بیانگر تأثیر مقادیر بالای تنش های افقی بر شدت احتمال وقوع این پدیده است. لازم به ذکر است که با افزایش تنش های جانبی، علاوه بر افزایش



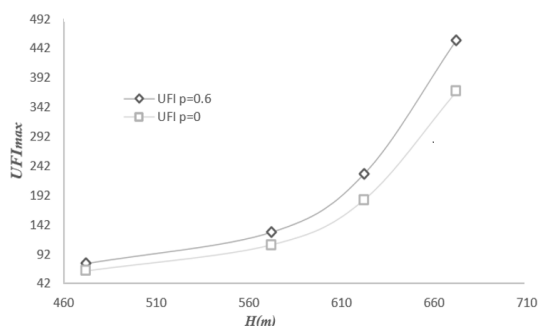
ب) بررسی تأثیر فشار گاز



الف) بررسی تأثیر نسبت تنش



د) بررسی تأثیر ضخامت لایه زغال



ج) بررسی تأثیر عمق معدن کاری

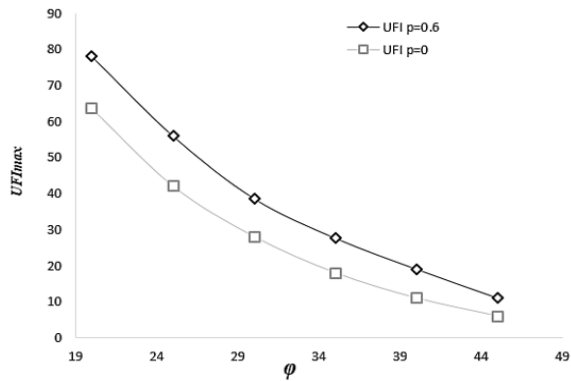
شکل ۷- بررسی تأثیر نسبت تنش، فشار مخزن گاز، عمق و ضخامت لایه زغال بر معیار شکست ناپایدار

زاویه اصطکاک داخلی، حداکثر مقدار  $UFI$  کاهش یافته است. این پارامتر نیز مانند چسبندگی از پارامترهای مقاومتی لایه زغال است که بیانگر احتمال پایین وقوع بیرون‌زدگی در لایه‌های مقاوم است. باتوجه به منحنی تغییرات مقاومت کششی لایه، از آنجاکه شاخص شکست ناپایدار بر فرض شکست برشی سنگ استوار است، مقدار این شاخص مستقل از مقاومت کششی زغال برآورد شده است. باین‌وجود، بررسی این تأثیر مقاومت کششی لایه بر احتمال وقوع پدیده انفجار و بیرون‌زدگی گاز نیازمند تحقیقات مستقل است. تأثیر فاصله جبهه کار تا منطقه پوکت بر شاخص  $UFI_{max}$  در فواصل کمتر از ۰/۵ بیشترین تأثیر را داشته که به معنای افزایش احتمال وقوع بیرون‌زدگی در این ناحیه است. به‌عبارت‌دیگر، در این فاصله، انرژی کرنشی اعمال شده به لایه بر ظرفیت تحمل انرژی کرنشی و مقاومت لایه غلبه کرده و موجب وقوع پدیده بیرون‌زدگی می‌شود. اما در فواصل بزرگ‌تر از ۰/۵ متر، ارتباط معناداری بین فاصله جبهه کار تا منطقه پوکت دیده نمی‌شود. تأثیر این پارامتر

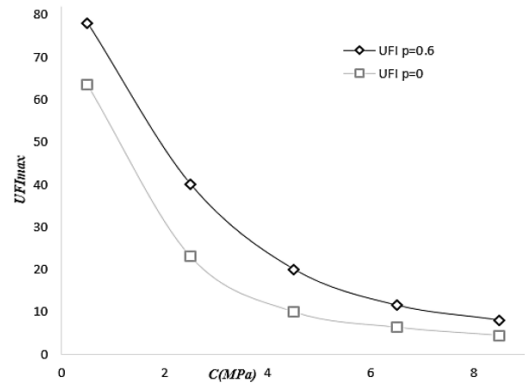
به طور مشابه، تأثیر شاخص‌های مقاومتی لایه زغال نظیر مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی زغال و فاصله جبهه کار تا منطقه پرفشار گاز بر وقوع بیرون‌زدگی محاسبه و در شکل ۸، نشان‌داده شده است. با توجه به شکل ۸، با افزایش مدول الاستیسیته زغال، شاخص شکست ناپایدار کاهش یافته است. به‌عبارت‌دیگر، خطر وقوع پدیده بیرون‌زدگی در لایه‌های نرم‌تر بیشتر است. نقش این شاخص در احتمال بروز پدیده بیرون‌زدگی، مشابه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی لایه زغال است. با افزایش چسبندگی لایه زغال مقدار شاخص شکست ناپایدار کاهش یافته است. به‌عبارت‌دیگر، هر چه لایه زغالی مقاوم‌تر باشد، احتمال بیرون‌زدگی زغال کمتر است. زیرا، انرژی کرنشی اعمالی باید بر ظرفیت ذخیره انرژی غالب شود. این نتایج با تحقیقات انجام شده توسط سوئیفت (Swift, 1964) مطابقت دارد.

منحنی تأثیرات زاویه اصطکاک داخلی زغال سنگ بر مقدار شاخص شکست ناپایدار نشان می‌دهد که با افزایش

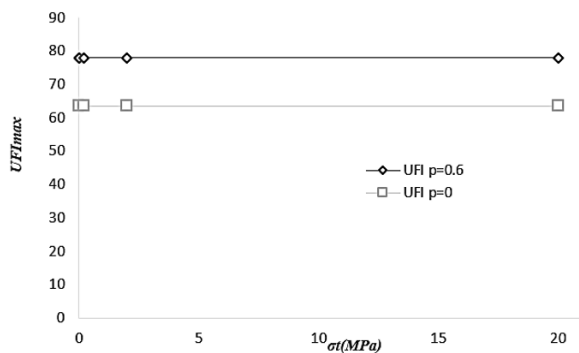
در فواصل کمتر از ۰/۵ متر اهمیت پیدا می کند.



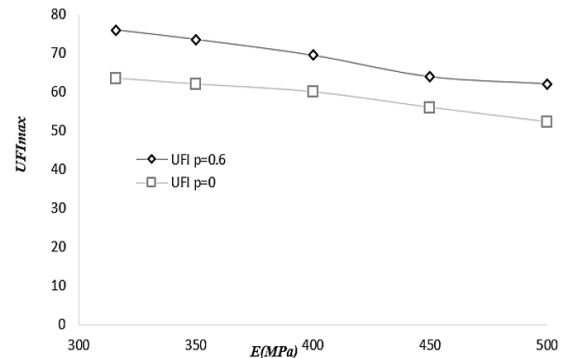
ب) بررسی تأثیر زاویه اصطکاک زغال



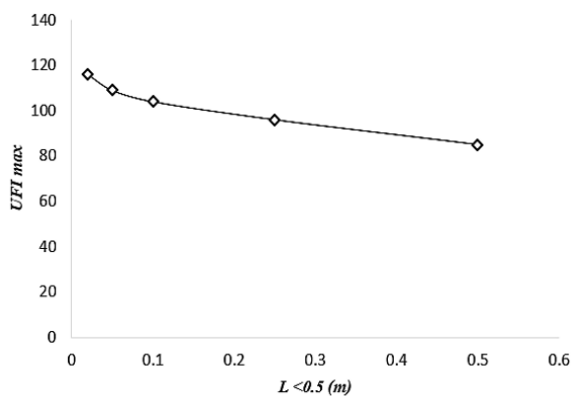
الف) بررسی تأثیر چسبندگی زغال



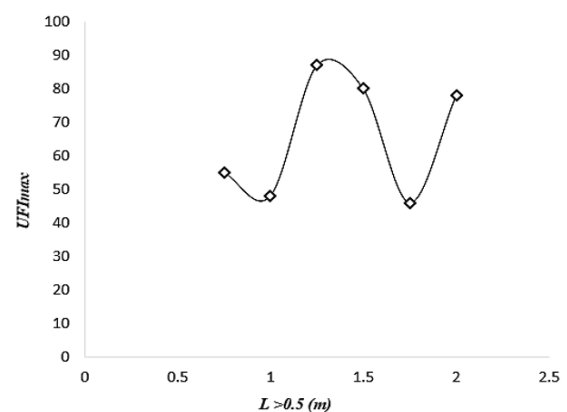
د) بررسی تأثیر ضخامت لایه زغال



ج) بررسی تأثیر مدول الاستیسیته زغال



و) بررسی تأثیر فاصله مخزن گاز تا جبهه کار در فواصل کمتر از ۰/۵ متر



ه) بررسی تأثیر فاصله مخزن گاز تا جبهه کار در فواصل بیش از نیم متر

#### شکل ۸- بررسی تأثیر شاخص های مقاومتی زغال بر معیار شکست ناپایدار

کارگاه  $E4$  معدن زغال سنگ پروده طیس با استفاده از معیار شکست ناپایدار پرداخته شد. برای این منظور، پس از

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی احتمال وقوع پدیده بیرون زدگی در

زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته زغال بیشتر از چسبندگی آن است. از آنجاکه شاخص شکست ناپایدار با فرض شکست برشی سنگ محاسبه می‌شود، احتمال وقوع بیرون‌زدگی با استفاده از این شاخص، مستقل از مقاومت کششی زغال برآورد شده است.

روش ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر در مطالعات اولیه پیش‌بینی پدیده انفجار مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهنمایی در شناسایی نقاط مستعد بیرون‌زدگی گاز در کنار سایر روش‌های مشاهده‌ای، تحلیلی و تجربی استفاده شود. علاوه بر موارد اشاره شده در این تحقیق، بررسی تأثیر بیشتر پارامترهای مقاومتی زغال‌سنگ نظیر مقاومت کششی، و نیز تأثیر ابعاد فضاها‌ی استخراجی و سرعت معدن‌کاری در احتمال وقوع این پدیده به‌عنوان پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

مدل‌سازی کارگاه استخراجی در محیط نرم‌افزار *Phase2*، یک مخزن تحت‌فشار با حداقل فشار لازم برای وقوع پدیده انفجار گاز در نظر گرفته شد. سپس، به بررسی احتمال وقوع پدیده بیرون‌زدگی زغال با حل مدل در شرایط مختلف پرداخته شد. با توجه به نتایج این تحقیق، رابطه مستقیمی بین نسبت تنش‌های جانبی به قائم و پدیده بیرون‌زدگی وجود دارد. با افزایش نسبت تنش‌ها به مقادیر بیش از  $2/5$ ، مقدار شاخص شکست ناپایدار به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. همان‌طور که سایر محققین هم ارتباط خاصی بین ضخامت لایه زغال و بیرون‌زدگی پیدا نکردند این شاخص نیز ارتباط معناداری را تشخیص نداد. علاوه بر موارد فوق، با افزایش چسبندگی لایه زغال، احتمال وقوع بیرون‌زدگی زغال به‌شدت کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی زغال، حداکثر مقدار شاخص شکست ناپایدار کاهش‌یافته، به‌طوری‌که حساسیت بیرون‌زدگی نسبت به

## ۶- مراجع

- Abdollahi, M. S., Najafi, M., Bafghi, A. Y., & Marji, M. F. (2019). A 3D numerical model to determine suitable reinforcement strategies for passing TBM through a fault zone, a case study: Safaroud water transmission tunnel, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 186-199.
- Adach-Pawelus, K. (2022). Back-Calculation Method for Estimation of Geomechanical Parameters in Numerical Modeling Based on In-Situ Measurements and Statistical Methods. *Energies*, 15(13), 4729.
- Akindele, O.B., (2021). Reliability analysis of rick slope stability in OLUPI Coal Mine, Ankpa, Kogi State, Nigeria.
- Doroodgar, A. (2019). Study of Unstable Rock Failure in Compression Using Finite Difference Method, Master Thesis, Department of Mining Engineering, University of Birjand, 43-47.
- Fu, X. H., Zhang, W. P., Zhou, Y. N., Si, X. F., & Wu, H. (2009). Technology and method of coal and gas outburst prediction during coal geological exploration. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 911-916.
- Gang, W., Meng-meng, W., Wei-min, C., Jin-hua, C., & Du Wen-zhou. (2015). Analysis of energy conditions for coal and gas outburst and factors influencing outburst intensity. *Rock and Soil Mechanics*, 36(10), 2974-2982.
- Ghadimi, M., Nikgoftar, M.R., Ataei, M., & Rezvanianzadeh, M.R. (2018). Pull out test in Tabas Coal Mine by using analytical, numerical and experimental method, 4<sup>th</sup> National Iranian Coal Conference, Shahrood, Iran.

- Guan, P., H.Y. Wang, & Y.X. Zhang (2009). *Mechanism of instantaneous coal outbursts*, *Geology*, 37: 915-918.
- Jiang, C. L, Yu, Q. X. (1995). *The hypothesis of spherical shell destabilization of coal and gas outburst. Safety in Coal Mines*, 2, 17-25.
- Jiang, C. L. (1998). *The prediction model and indices of outbursts of coal and gas. J China Univ Min Technol*, 27(4), 373-376.
- Jiang, Y., Zheng, Q., & Liu, H. (2013). *An analysis on the energy of coal and gas outburst process. Journal of Chongqing University*, 36(7), 98-101.
- Kanduč, T, Markič, M, Zavšek, S, McIntosh, J. (2012). *Carbon cycling in the Pliocene Velenje Coal Basin, Slovenia, inferred from stable carbon isotopes. International journal of coal geology*, 89, 70-83.
- Karimi Nasab, S., Jalalifar, H., Rezanejad, M. (2021). *Design of tunnel support system based on instrumentation data using direct back analysis method (Case study: Pooneh Tunnel, Khorramabad – Arak Freeway)*, *Tunneling & Underground Space Engineering*, 9(4), 415-430.
- Konicek, P., & Waclawik, P. (2018). *Stress changes and seismicity monitoring of hard coal longwall mining in high rockburst risk areas. Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 237-251.
- Li, A. J., Mburu, J. W., Chen, C. W., & Yang, K. H. (2022). *Investigations of Silty Soil Slopes under Unsaturated Conditions Based on Strength Reduction Finite Element and Limit Analysis. KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(3), 1095-1110.
- Li, C.W., Fu, S., Jie, B.J., Zhang, M.J., Dong, L.H., Wang, F.Y., & Xue, H. (2018). *Establishment of the prediction model of coal and gas outburst energy and its application in Pingdingshan mining area. Journal of China University of Mining Technology*, 47(2), 231-9.
- Lu, S., Wang, C., Liu, Q., Zhang, Y., Liu, J., Sa, Z., & Wang, L. (2019). *Numerical assessment of the energy instability of gas outburst of deformed and normal coal combinations during mining. Process Safety and Environmental Protection*, 132, 351-366.
- Maleki, Z., Farhadian, H., & Rahimi, E. (2022). *A comparative study on the prediction of squeezing behavior: a case study of Gelas tunnel-NW Iran. Arabian Journal of Geosciences*, 15(2), 1-17.
- Montaseri, B. (1998). *Securing coal mines against the risk of methane gas explosion and an analysis of Sangrood mine explosion, 2<sup>nd</sup> national conference on safety, health and environment in mines and mineral industries, Tehran, Iran*, 47-64.
- TPCC, Tabas Parvadeh Coal Company. (2023). *Tabas Coal Mine Project, Design report*.
- Salimi, M., Baghbanan A., Hashemolhosseini, H. (2018). *determining the parameters of Geo-mechanical faults using the back-analysis process faulting - case study Parvadeh Tabas Coal Mine, 4<sup>th</sup> National Iranian Coal Conference, Shahrood, Iran*, 3-15.
- Swift, R.A. (1964, November). *The occurrence of coal and gas outbursts in the United Kingdom: precautions adopted and research into problem. In UN-ECE Symp. Coal Gas Outbursts*, 25, 219-227.

- Wold, M.B, Connell, L.D, Choi, S.K., (2008). *The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining. International Journal of Coal Geology, 75(1),1-14.*
- Wu, Y, Gao, R, Yang, J, (2020). *Prediction of coal and gas outburst: A method based on the BP neural network optimized by GASA. Process Safety and Environmental Protection.133, 64-72.*
- Yadav, P., & Sharan, S. (2019). *Numerical investigation of squeezing in underground hard rock mines. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(4), 1211-1229.*
- Yan, A.H., Liu, M.J., Ding, W., & Xu, K. (2002). *Thermodynamic model of coal and gas outbursts. International Symposium on Mining Science and Safety Technology.*
- You, G., Mandalawi, M. A., Soliman, A., Dowling, K., & Dahlhaus, P. (2017, July). *Finite element analysis of rock slope stability using shear strength reduction method. In International Congress and Exhibition. Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology (pp. 227-235). Springer, Cham.*
- Zhao, B., Wen, G., Nian, J., Ma, Q., Fan, C., Lv, X., & Deng, C. (2022). *Numerical simulation study on the multi-physical field response to underground coal and gas outburst under high geo-stress conditions. Minerals, 12(2), 151.*