

### بررسی تاثیر افزایش عرض نمونه زغال سنگ ترد بر گسترش ترک و رشد فضای استخراجی در فرآیند UCG

#### مقاله پژوهشی

محمد رضا شهبازی<sup>۱</sup>؛ مهدی نجفی<sup>۲\*</sup>؛ محمد فاتحی مرجی<sup>۳</sup>؛ ابوالفضل عبداللهی پور<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته‌ی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، mohammadrezashahbazi66@gmail.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، mehdinajafi@yazd.ac.ir

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، mfatehi@yazd.ac.ir

۴- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران، abdollahipour@ut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

شماره صفحات: ۳۱ تا ۴۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.11974.1458

واژگان کلیدی	چکیده
رشد ترک UCG روش مدل پیوند موازی خطی (LPBM) عرض نمونه	تبدیل زغال سنگ برجا به محصولات گازی در زیرزمین را گازکردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) می‌نامند. طبق تحقیقات گذشته افزایش تعداد ترک می‌تواند باعث افزایش رشد فضای استخراجی شود. بر این اساس در این پژوهش اثر افزایش عرض نمونه زغال سنگ بر گسترش ترک و رشد فضای استخراجی در روش UCG با استفاده از روش مدل پیوند موازی خطی (LPBM) مورد بررسی قرار گرفته است. از دیدگاه مکانیک شکست و با تعمیم نتایج عددی مشخص گردید که برای لایه زغال سنگ قرار گرفته در اعماق زیاد هر چه نسبت عرض پهنه به ارتفاع لایه زغال سنگ کم و تعداد پهنه استخراجی افزایش یابد، پتانسیل گسترش ترک و رشد فضای استخراجی افزایش می‌یابد. با افزایش عرض نمونه نسبت به ارتفاع آن بدون در نظر گرفتن عمق قرارگیری لایه زغال سنگ میکروتورک-های اولیه بر اثر بار روباره سریع‌تر شکل گرفته و شرایط بهتری را برای گسترش فضای استخراجی فراهم می‌کنند. با افزایش عرض به ارتفاع نمونه مقدار تردی کاهش یافته و در این شرایط مدول الاستیسیته تغییر چندانی ندارد. در زغال سنگ ترد نرخ افزایش میکروتورک در انتهای بارگذاری، تردی و مقاومت فشاری تک محوره نسبت به افزایش عرض نمونه رابطه خطی و نرخ افزایش میکروتورک در نقطه اوج نسبت به افزایش عرض نمونه رابطه نمایی مثبت دارد.

توجه به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین ساختی و هندسی لایه زغال سنگ، ضخامت روباره، وضعیت توپوگرافی محل معدن، امکانات فنی و ... انتخاب می‌شود. در سال‌های اخیر روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (Underground Coal Gasification) مورد توجه قرار گرفته است (Couch, 2009).

#### ۱- مقدمه

زغال سنگ به عنوان یک منبع انرژی از دو هزار سال پیش مورد استفاده بشر بوده و تاکنون تلاش‌های فراوانی به منظور ابداع روش‌ها و فن‌آوری‌های نوین برای استفاده بهینه از آن و به ویژه کنترل و کاهش آلودگی حاصل از این فرآیند صورت گرفته است. روش استخراج یک لایه زغال سنگ با

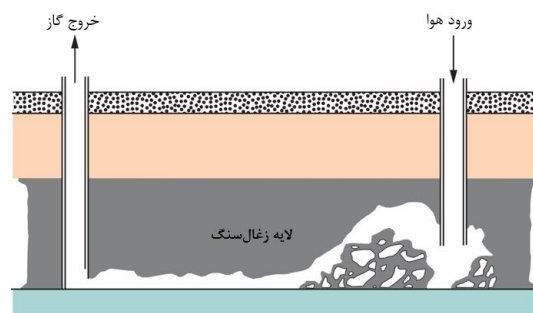
و نفوذپذیری تحت تاثیر قرار می‌دهد. شبیه‌سازی ژئومکانیکی می‌تواند فرصتی برای پیش‌بینی پاسخ لایه زغال سنگ و تشکیلات اطراف آن به گاز کردن زغال سنگ تهیه کند و اجازه بررسی درستی و بی‌عیبی سنگ روباره (*caprock*) و سنگ بستر در گام‌های زمانی مختلف و تحت شرایط عملیاتی مختلف را می‌دهد؛ بنابراین بررسی شکست و ترک‌خوردگی لایه زغال سنگ یکی از پارامترهای مهم جهت بررسی گسترش فضای استخراجی است (Akbarzadeh & Chalaturnyk, 2011).

بیشتر کارهای پیشین به نقش فرآیندهای شیمیایی و شرایط عملیاتی در گسترش فضای استخراجی پرداخته‌اند. در زمینه شبیه‌سازی ژئومکانیکی فرآیند *UCG* پژوهش‌هایی منتشر شده است که در این تحقیقات رشد ترک بررسی نشده است. به طور مثال ادوانی و همکاران مدل‌های المان محدود خطی ترموالاستیک کرنش صفحه‌ای با یک کارگاه استخراج بیضی شکل تحلیل کرده‌اند (Advani, et.al., 1977). تان و همکاران به شبیه‌سازی المان محدود کرنش صفحه‌ای یک کارگاه استخراج *UCG* با کمک نرم‌افزار *ANSYS* پرداخته‌اند (Tan, et al., 2008). مدل سازی المان محدود دو بعدی یک کارگاه استخراج دیسکی شکل توسط وروبیف و همکاران انجام شده است (Vorobiev, et.al., 2008). مدل ترمومکانیکی اجرا شده توسط تیان (Tian) و نجفی و همکاران با هدف بررسی فرونشست زمین ناشی از فرآیند *UCG* بر اساس روش منبع احتراق قابل کنترل (*Controlled Retraction and Injection Point*) انجام شده است (Otto & Kempka, 2015). نجفی و همکاران توزیع تنش در مجاورت پهنه‌های استخراجی فرآیند *UCG* به منظور تخمین عرض پایه نگهدارنده و محافظ مورد نیاز در مقیاس تجاری در عملیات *UCG* را تحلیل کرده‌اند (Najafi, et al., 2014). جوکار و همکاران به بررسی شکل فضای استخراجی پرداخته است. این امر با استفاده از نرم‌افزار *Comsol* انجام شده است که نتایج مشابهی با شکل واقعی آن دارد (Jowkar et al., 2018). شهبازی و همکاران تحلیل ترمومکانیکی چاه‌های تزریق و تولید قائم را در مدت زمان‌های مختلف سوختن زغال سنگ انجام داده‌اند (Shahbazi, et al., 2018).

در زمینه رشد فضای استخراجی و گسترش ترک در

تبدیل زغال سنگ برجا به محصولات گازی را گازی کردن زیرزمینی زغال سنگ (*UCG*) می‌نامند. فرآیند *UCG* تکنولوژی بسیار پیشرفته مبتنی بر انرژی پاک است که برای تولید انرژی برق، سوخت موتور، انواع گازهای سنتزی (عمدتاً متان، هیدروژن و مونواکسیدکربن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند لایه‌های زغال سنگ با یک فرآیند پیشرفته مبتنی بر اندرکنش ترمومکانیکی و ترموشیمیایی به صورت برجا در زیرزمین به گاز سنتزی تبدیل می‌شود (Couch, 2009).

همان‌طور که در شکل ۱، دیده می‌شود، در فرآیند *UCG* ابتدا چاه‌های تزریق و تولید تا رسیدن به سطح لایه زغال سنگ حفاری و به یکدیگر متصل می‌شوند. بعد از حفاری چاه‌های تزریق و تولید و ایجاد ارتباط بین آن‌ها اکسیدان (مشمول بر ترکیبی از هوا، اکسیژن و بخار آب یا گاهی هوا و بخار آب) به داخل چاه تزریق ارسال می‌شوند تا باعث سوختن زغال سنگ و تبدیل آن به گاز شود. بر اثر احتراق، گرما، منو اکسیدکربن و بعضی گازهای ترکیبی تولید می‌شود. گاز ترکیبی از فضای استخراجی ایجاد شده در لایه زغال سنگ به داخل چاه تولید و سپس به سطح زمین منتقل می‌شود (James, 2009).



شکل ۱- فناوری گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ

(Couch, 2009)

مدل ژئومکانیکی یک پروژه *UCG* از دو نظر قابل توجه است. نخست، پاسخ ژئومکانیکی لایه افقی به فرآیند تبدیل به گاز کردن زغال سنگ می‌تواند سطح خطر یا امنیت مکان پروژه *UCG* را تعیین نماید. دوم، شکست، ترک خوردگی، تغییر شکل و به طور کلی، تغییرات ژئومکانیکی در زغال سنگ و سنگ لایه‌های اطراف چاه، فرآیند شیمیایی گاز کردن زغال سنگ را با تغییر خصوصیات جریان مانند تخلخل

قرار می‌گیرند (Li, et al., 2018).

از دیدگاه مکانیک شکست برای بررسی ساز و کار گسترش فضای استخراجی در فرآیند UCG نیاز است، رشد ترک در لایه زغال‌سنگ مورد بررسی گردد؛ چرا که رشد فضای استخراجی را می‌توان متناسب با افزایش نرخ رشد و تعداد ترک در لایه زغال‌سنگ دانست. طبق مطالعات سو و همکاران با انجام روش آزمایشگاهی در هر دوره زمانی، حرکت ابر AE (انتشار آوایی) از منطقه سوختن و گازی شدن و رشد فضای استخراجی درون زغال‌سنگ منعکس می‌شود، یعنی با افزایش تعداد ترک در لایه زغال‌سنگ در مناطق مختلف، سرعت سوختن و به دنبال آن نرخ گسترش فضای استخراجی افزایش می‌یابد (Su, et al., 2016). با توجه به اثر رشد ترک بر گسترش فضای استخراجی در این پژوهش اثر نسبت عرض به ارتفاع نمونه زغال‌سنگ در مقیاس آزمایشگاهی بر گسترش ترک مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا با استفاده از آن بتوان چشم‌انداز مناسبی از شرایط رشد ترک در لایه زغال‌سنگ در فرآیند UCG داشت. لازم به ذکر است، تحلیل‌های مورد نیاز در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده و نتایج حاصل از آن را می‌توان به مقیاس‌های بزرگتر تعمیم داد.

## ۲- انتخاب روش عددی

علاوه بر روش‌های تحلیلی و مدل‌های نیمه تجربی، مانند مدل آسیب بر اساس کرنش اصلی کششی حداکثر ( $F_{-}$ ) و معیار ( $F_{-}$ )  $maximum\ tensile\ principal\ strain$  و  $critierion$ ، بررسی رشد و انتشار ترک با روش‌های عددی قابل انجام است. روش‌های عددی متنوعی مانند روش المان محدود ( $finite\ element\ method$ )، روش‌های ترکیبی المان مجزا- محدود ( $hybrid\ finite-discrete\ element$ )، روش‌های چند ظرفیتی عددی ( $numerical\ methods$ )، روش ناپیوستگی جایجایی ( $manifold\ method$ ) و روش ناپیوستگی جایجایی ( $displacement\ discontinuity\ method$ ) برای مطالعه شروع و انتشار ترک با معیارهای مختلف بر اساس مکانیک شکست وجود دارد (Xie, et al., 2016).

در این پژوهش برای بررسی دقیق مسیر ترک و حل مشکلات موجود در انتخاب معیار شروع ترک، از یک روش

فرآیند UCG تحقیقات گسترده‌ای انجام نشده است. تحقیق‌های گذشته در مورد قانون انتشار ترک در زغال‌سنگ در مقیاس میکرو یا ماکرو با استفاده از روش‌های اسکن توموگرافی کامپیوتری ( $CT\ scanning$ )، میکروسکوپ اسکن الکترونی ( $scanning\ electronic\ microscopy$ )، روش انتشار آوایی، میکروسکوپ نوری ( $optical\ microscopy$ ) و فیلم‌برداری با کیفیت بالا ( $high-definition$ ) انجام شده است.

بین و همکاران آزمایش سی تی اسکن را در مورد قانون تکامل آسیب در زغال‌سنگ تحت بار تک محوره انجام داده‌اند (Yin, et al., 2003). وو و همکاران، ویژگی‌های انتشار ترک در زغال‌سنگ را با استفاده از سه روش تجربی بررسی کردند و مسیرهای انتشار ترک و زاویه انحراف را مورد بحث قرار دادند (Wu, et al., 2016). لی و همکاران سرعت انتشار ترک در زغال‌سنگ حاوی گاز را مورد بررسی قرار دادند و ارتباط بین فشار گاز و سرعت انتشار ترک را یافتند (Li, et al., 2012). یائو و همکاران اثر نفوذ آب بر انتشار ترک در زغال‌سنگ را بررسی کردند و نتیجه‌گیری کردند که آستانه بسته شدن ترک و شروع ترک یک رابطه منفی با افزایش رطوبت (آب محلولی) دارد (Yao, et al., 2016). ژائو و همکاران از روش‌های تجربی و عددی برای بررسی شکست در زغال‌سنگ تحت بار ضربه استفاده کردند و دریافتند که اثر ناهمگونی ( $heterogeneity$ ) و اندازه دانه در شکستگی دینامیکی نسبت به بارگذاری شبه استاتیک ( $quasistatic$ ) بیشتر است. خی و همکاران، اثر اصطکاک سطح ترک اولیه بر شروع و انتشار ترک در مواد شبه سنگ در معرض بارهای فشاری با کمک روش المان محدود توسعه یافته را اندازه‌گیری کردند (Xie, et al., 2016). وانگ و همکاران خصوصیات مکانیکی نمونه زغال‌سنگ با شبکه‌های کلیت مختلف را تحت فشار تک محوره مورد بررسی قرار دادند (Wang, et al., 2019). با این حال، تحقیقات گزارش شده پیشین در مورد قانون انتشار ترک در زغال‌سنگ، به اندازه کافی نسبت به مطالعات روی نمونه‌های سنگ دیگر بسیار کم است. اکثر تحقیقات آزمایشگاهی در مقیاس میکروسکوپی قرار دارند. علاوه بر این، روش‌های رایج سی تی اسکن، انتشار صوتی نمی‌توانند به صورت مستقیم به انتشار ترک بپردازند و به راحتی تحت تاثیر محیط خارجی

ممان به صورت زیر بیان می‌شود.

$$F_c = F^l + F^d + \bar{F} \quad (۱)$$

$$M_c = \bar{M} \quad (۲)$$

که  $F^l$ ،  $F^d$  و  $\bar{F}$  به ترتیب نیروی خطی، نیروی میرا کننده و نیروی پیوند موازی است و  $\bar{M}$  گشتاور پیوند موازی است. رابطه حداکثر تنش‌های نرمال و برشی را در پیرامون پیوند موازی به صورت زیر اعمال می‌شود.

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{F}_n}{\bar{A}} + \bar{\beta} \frac{\|\bar{M}_t\| \bar{R}}{\bar{I}} \quad (۳)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\|\bar{F}_s\|}{\bar{A}} + \begin{cases} 0, & 2D \\ \bar{\beta} \frac{\|\bar{M}_t\| \bar{R}}{\bar{J}}, & 3D \end{cases} \quad (۴)$$

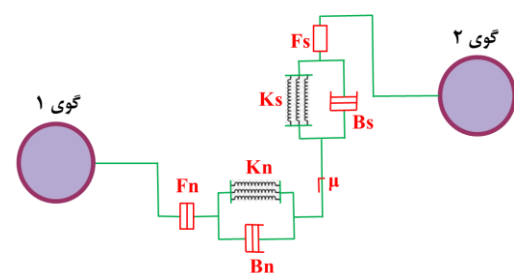
که در آن  $\bar{F}_s$  و  $\bar{F}_n$  به ترتیب نیروی نرمال و نیروی برشی از جنس نیرو،  $\bar{A}$ ،  $\bar{I}$  و  $\bar{J}$  به ترتیب برابر سطح مقطع عرضی، ممان اینرسی و ممان قطبی اینرسی مقطع عرضی پیوند موازی،  $\bar{R}$  معادل شعاع ذره و  $\bar{\beta}$  ضریب سهم گشتاور و عددی بین ۰ تا ۱ است. اگر مقادیر تنش نرمال و برشی اعمال شده بر پیوند بین ذرات بیشتر از روابط فوق باشد، پیوند شکسته می‌شود و با به هم پیوستن میکروتکرک‌های کششی، برشی یا ترکیبی از آن‌ها ترک ماکرو شکل می‌گیرد (Itasca group, 2019).

### ۳- واسنجی مدل

در این پژوهش از یک نوع زغال سنگ بیتومینه با رفتار الاستوشکننده استفاده شده است. جهت شبیه‌سازی رفتار ماکرو نمونه، تغییرات پارامترهای میکرو در نرم‌افزار PFC2D به صورتی انجام پذیرفت که آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و آزمایش برزیلی منطبق بر واقعیت باشد. نمونه‌های مورد بررسی استوانه‌ای به قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است که در نرم‌افزار PFC دو بعدی، ابعاد نمونه با ارتفاع و عرض به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تعداد ۷۲۴۴ گوی به ابعاد ۰٫۳ تا ۰٫۶ میلی‌متر به عنوان اجزای تشکیل دهنده‌ی نمونه داخل آن جانمایی شده است. مطابق نمونه‌های آزمایشگاهی - تخلخل بین دانه‌ای برابر ۴ درصد و چگالی ذره‌ها برابر چگالی نمونه زغال سنگ یعنی برابر ۱۶۰۰ کیلوگرم بر

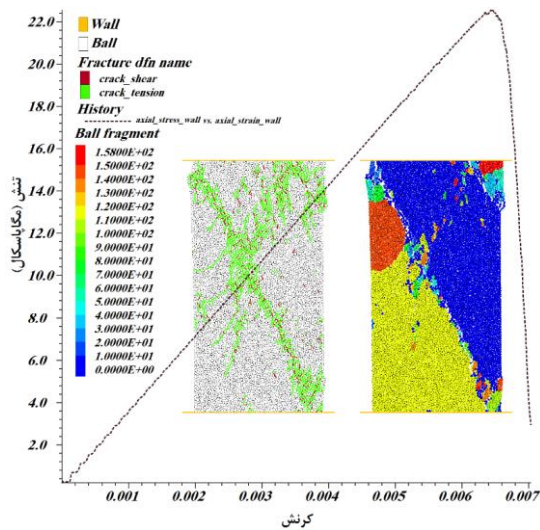
المان گسسته مبتنی بر مدل پیوند موازی خطی (LPBM) استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت این روش این است که رفتار ساختاری تجربی پیچیده را می‌توان با منطق تماس ذرات ساده جایگزین کرد. پوتایندی (Potyondy) و همکاران با معرفی مدل ذرات پیوند یافته، نشان دادند که چگونه می‌توان از تکنیک مدل‌سازی ناپیوسته برای شبیه‌سازی رفتار سنگ‌ها از جمله پوسته شدن (نوعی از شکست ناشی از تنش در اطراف دهانه‌های زیرزمینی) استفاده کرد. در این گونه مسائل مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامتر، کالیبره کردن خواص مدل ذرات پیوند یافته است. در این روش، تحلیل مبتنی بر ذرات دایره‌ای شکل برای شبیه‌سازی فرآیندهای ترک خوردگی در نمونه‌های حاوی یک نقص باز یا بسته از قبل موجود انجام می‌شود و هندسه ذرات نسبت به خود خصوصیات تماسی نقش مهمی در کنترل رفتار مدل ذرات پیوند یافته بازی می‌کند (Zhang & Wong, 2012, Itasca group, 2019).

در شکل ۲، روانه‌شناسی (rheology) اندرکنش و پارامترهای موجود بین گوی‌های موجود در مدل پیوند موازی خطی نشان داده شده است که مولفه‌های  $K_n$  و  $K_s$  به ترتیب سختی نرمال و برشی،  $B_n$  و  $B_s$  به ترتیب میراگیر نرمال و برشی،  $\mu$  و  $g_r$  به ترتیب شکاف مرجع (فاصله فرضی برای تحمل نیروی فشاری) و زاویه اصطکاک داخلی میکرو و  $F_n$  و  $F_s$  به ترتیب نیروی نرمال و برشی لازم در برابر شکسته شدن اتصال بین دو گوی است (Itasca group, 2019).

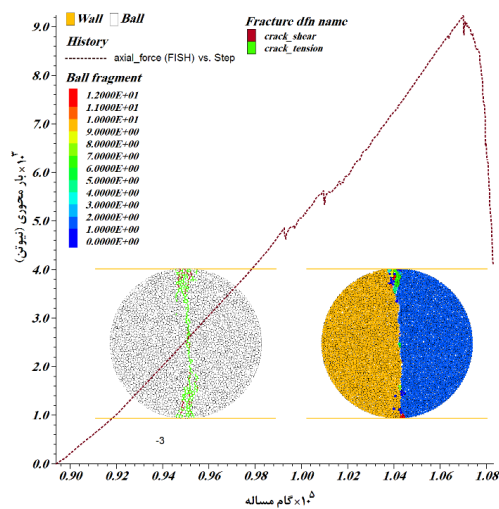


شکل ۲- مولفه‌های روانه‌شناسی (اندرکنش بین نیروها) و رفتار بین ذرات در مدل پیوند موازی خطی (Itasca group, 2019)

به طور کلی روابط بین گوی‌ها یا گوی و دیواره در نرم‌افزار PFC با قانون نیرو-جابجایی بیان می‌شود. قانون نیرو-جابجایی برای مدل پیوند موازی خطی، نیروی تماس و



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش نمونه کالیبره همراه با نمایش شکل‌گیری میکروتک و خردایش نمونه



شکل ۴- نمودار بار وارد بر نمونه در آزمون برزلی با نمایش شکل‌گیری میکروتک و خردایش نمونه

#### ۴- معرفی مشخصات نمونه

از آن‌جا که در این پژوهش اثر نسبت عرض به ارتفاع (ضخامت) نمونه زغال‌سنگ بر انتشار ترک و گسترش فضای استخراجی مورد بررسی قرار می‌گیرد، بنابراین نیاز است تغییرات عرض مدل مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس پنج نمونه به ترتیب با عرض ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰

مترمکعب در نظر گرفته شده است. پارامترهای میکرو برای ساخت مدل نهایی در جدول ۱، آورده شده است. مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی نمونه اولیه به عرض و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر در جدول ۲، آورده شده است. نمودار تنش-کرنش و بار-گام حل مساله به ترتیب در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و آزمایش برزلی تحت بار فشاری دو فک بالا و پایین با سرعت ۰٫۱ سانتی‌متر بر ثانیه در شکل ۳ و شکل ۴، نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای میکرو برای مدل‌سازی

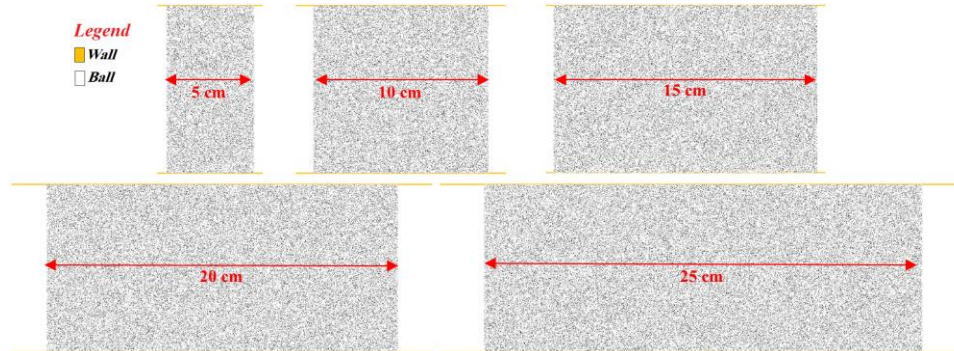
پارامترهای میکرو	واحد	مقدار
<i>emod</i>	پاسکال	$1,7 \times 10^9$
<i>Krat</i>		۲
<i>Rmax</i>	میلی‌متر	۰٫۶
<i>Rmin</i>	میلی‌متر	۰٫۳
<i>damp</i>		۰٫۷
چگالی ذرات	$kg/m^3$	۱۶۰۰
<i>gr</i>		$0,5 \times 10^{-4}$
<i>pb_ten</i>	پاسکال	$7 \times 10^6$
<i>pb_coh</i>	پاسکال	$6 \times 10^6$
<i>pb_fa</i>	پاسکال	۲۵
<i>dp_nratio</i>		۰٫۵
زاویه اصطکاک داخلی ذرات	درجه	۲۵

جدول ۲- پارامترهای ژئومکانیکی نمونه اولیه (مقیاس آزمایشگاهی)

پارامتر ژئومکانیکی	واحد	مقدار
چگالی	$kg/m^3$	۱۶۰۰
نسبت پواسون		۰٫۲۴
مدول الاستیسته سکانتی	گیگاپاسکال	۳٫۵۶
مقاومت اوج	مگاپاسکال	۲۲٫۵۳
تردی		۰٫۹۰۶
چسبندگی	مگاپاسکال	۷٫۲۵
زاویه اصطکاک داخلی ذرات	درجه	۲۵

۲۹۰۴۹ و ۳۶۳۸۰ است. نمونه‌ها در شکل ۵، نشان داده شده است. همه نمونه‌ها تحت بار فشاری توسط دو فک بالا و پایین با سرعت ۰٫۱ سانتی‌متر بر ثانیه قرار گرفته تا شرایط شکست آن بررسی شود.

میلی‌متر و ارتفاع ثابت ۱۰۰ میلی‌متر برای همه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. خصوصیات میکرو جدول شماره ۱ برای هر مدل اعمال شده و تعداد گوی‌های (ذرات) جهت مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۷۲۴۴، ۱۴۵۱۲، ۲۱۷۹۷،

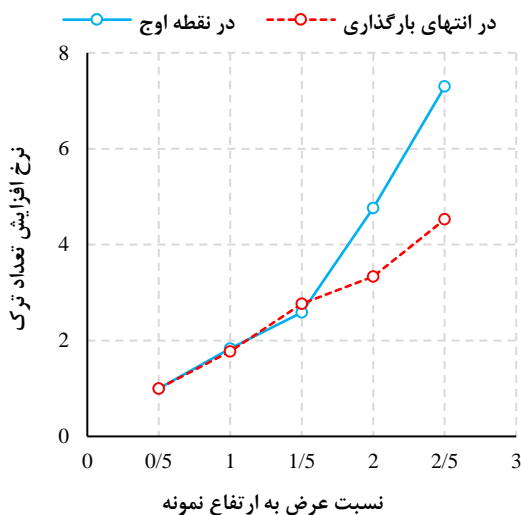


شکل ۵- پنج نمونه با ارتفاع (ضخامت) ۱۰۰ میلی‌متر و عرض متفاوت جهت بارگذاری محوری جهت بررسی پتانسیل رشد ترک

شده با افزایش عرض به ارتفاع لایه زغال سنگ افزایش می‌یابد. نتیجه می‌شود برای لایه زغال سنگ در اعماق کم هر چه عرض پهنه استخراجی نسبت به ارتفاع لایه بیشتر باشد، فرآیند رشد ترک و گسترش فضای استخراجی با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد.

## ۵- بررسی رشد ترک و گسترش فضای استخراجی

به منظور بررسی رشد ترک و گسترش فضای استخراجی در نمونه زغال سنگ با عرض متفاوت، تغییرات چند پارامتر مورد بررسی قرار گرفته شده است. پس از بارگذاری هر ۵ نمونه تحت بار محوری و شکست آن و تشکیل نمودار تنش- کرنش به صورت کامل، تعداد میکروتکرک شکل گرفته در نقطه اوج نمودار تنش-کرنش و در انتهای بارگذاری پس از نقطه اوج یعنی وقتی مقدار تنش برابر با مقدار تقریبی صفر و مقدار کرنش ماکزیمم می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶، نرخ افزایش تعداد میکروتکرک در نقطه اوج بارگذاری و در انتهای بارگذاری با افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۶- اثر افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه بر نرخ افزایش تعداد میکروتکرک در نقطه اوج و انتهای بارگذاری

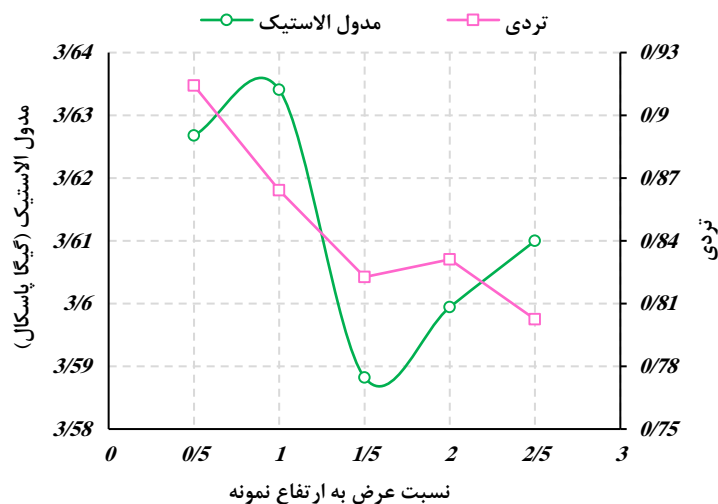
در اعماق زیاد به طور قطع تنش حاصل از تخریب بیشتر از مقاومت فشاری لایه زغال سنگ می‌شود و همان‌طور

همان‌طور که مشخص است، نرخ افزایش تعداد ترک تا ابعاد نسبت عرض به ارتفاع نمونه برابر با ۱/۵ در نقطه اوج و در انتهای بارگذاری برابر است؛ اما وقتی عرض نمونه بیشتر از ۱/۵ برابر ارتفاع (ضخامت) آن می‌شود، نرخ افزایش تعداد ترک در نقطه اوج بیشتر از انتهای بارگذاری است. با افزایش عمق لایه زغال سنگ تنش روباره و تنش حاصل از تخریب افزایش می‌یابد، این موضوع نشان می‌دهد که تنش روباره و تنش حاصل از تخریب لایه زغال سنگ در اعماق کم به نقطه اوج نمودار تنش-کرنش نرسیده و تعداد میکروتکرک تشکیل

لایه زغال‌سنگ قرار گرفته در اعماق زیاد هر چه نسبت عرض به ارتفاع لایه زغال‌سنگ کم و تعداد پهنه استخراجی افزایش یابد، شرایط برای گسترش ترک و رشد فضای استخراجی افزایش می‌یابد.

نمودار شکل ۷، مقدار تردی و مدول الاستیسیته ۵ نمونه زغال‌سنگ (شکل ۵) را نشان می‌دهد. با افزایش عرض به ارتفاع نمونه مقدار تردی کاهش می‌یابد و نمونه زغال-سنگ حالت شکل‌پذیرتری به خود می‌گیرد به طوری که با افزایش ۵ برابری عرض نمونه مقدار تردی ۱۲ درصد کاهش می‌یابد که این موضوع با تحقیقات قبلی در مورد رفتار سنگ‌های ترد مطابقت دارد؛ همچنین مدول الاستیسیته تغییر چندی ندارد، به طوری که برای هر ۵ نمونه تحت بارگذاری مقادیر تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهد.

که در شکل ۶، نشان داده شده است، با افزایش عرض نمونه زغال‌سنگ نسبت به ارتفاع آن سرعت گسترش ترک و رشد فضای استخراجی نسبت به حالتی که لایه زغال‌سنگ در اعماق کم قرار دارد، کمتر است. این موضوع نشان می‌دهد که وجود چند لایه با نسبت عرض به ارتفاع کمتر ۱/۵ بیشتر از حالتی که نسبت عرض به ارتفاع بیشتر ۱/۵ است، می‌تواند شرایط بهتری جهت رشد ترک یا گسترش فضای استخراجی داشته باشد؛ چرا که میکروتُرک‌های تشکیل شده در حالت اول بر اثر بار روباره و تنش حاصل از تخریب خیلی بیشتر از حالت دوم است. به طور کلی از دیدگاه مکانیک شکست و با تعمیم نتایج عددی حاصل از این پژوهش نتیجه می‌شود برای لایه زغال‌سنگ قرار گرفته در اعماق کم هر چه نسبت عرض به ارتفاع لایه زغال‌سنگ افزایش یابد و برای



شکل ۷- اثر افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه بر مدول الاستیک و تردی نمونه‌ها

کرده و نتیجه گرفتند مقاومت فشاری تک محوره با افزایش قطر نمونه کاهش می‌یابد. در این پژوهش نیز با افزایش عرض به ارتفاع نمونه تا نسبت ۱/۵ مقاومت فشاری تک محوره زغال‌سنگ کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. برای نرخ افزایش تعداد میکروتُرک در نقطه اوج یا پایان بارگذاری، تردی، تنش شروع ترک و تنش اوج نمونه‌ها می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$\begin{cases} R_{mc} = 1.7226D + 0.0963, & \text{در نقطه اوج} \\ R_{mc} = 0.6321e^{0.9862(D)}, & \text{در انتهای بارگذاری} \end{cases} \quad (4)$$

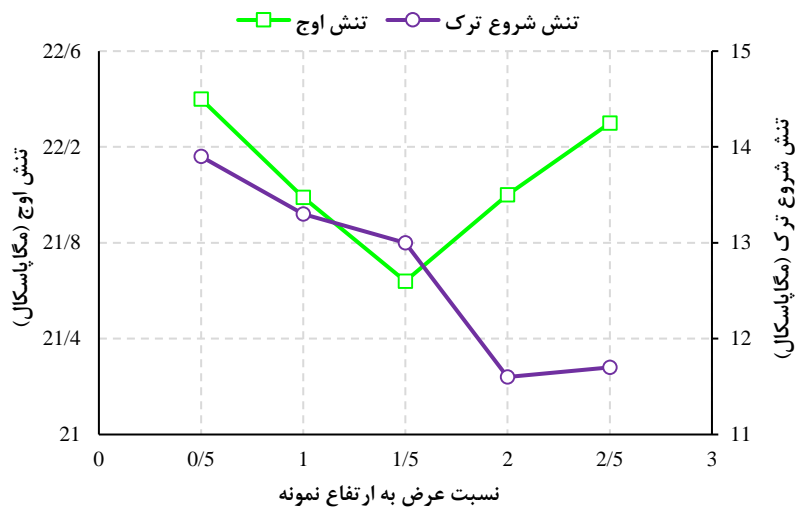
همان‌طور که در شکل ۸، نشان داده شده است، با افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه اولین میکروتُرک ایجاد شده در تنش روباره کمتری تشکیل می‌شود؛ یعنی به طور کلی با افزایش عرض به ارتفاع نمونه بدون در نظر گرفتن عمق قرارگیری لایه زغال‌سنگ میکروتُرک‌های اولیه بر اثر بار روباره سریع‌تر شکل گرفته و شرایط بهتری را از دیدگاه مکانیک شکست جهت گسترش فضای استخراجی فراهم می‌کند. هوک و براون داده‌های موجود در اندازه‌گیری‌های مقاومت فشاری تک محوره بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و سنگ مکعبی با ابعاد بین ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر را بررسی

اوج نسبت به افزایش عرض نمونه رابطه‌ی نمایی مثبت دارد. لازم به ذکر است، روابط بیان شده برای زغال سنگ ترد حاکم بوده و برای سایر زغال سنگ‌ها با رفتار متفاوت نیاز به تحقیقات بیشتری است. در شکل ۹ و شکل ۱۰ شکست و خردایش نمونه با عرض مختلف در انتهای بارگذاری نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه زاویه شکست ماکرو نسبت به افق کاهش می‌یابد که با تحقیقات قبلی مطابقت دارد (Tang, 2000) و (Fang, 2002).

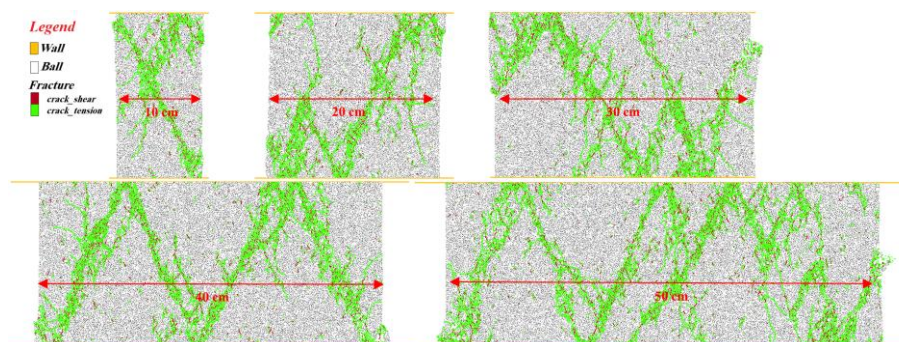
$$B = -0.0513D + 0.924 \quad (5)$$

$$\begin{cases} UCS = -0.76D + 22.7 & D \leq 1.5 \\ UCS = 0.66D + 20.66 & D > 1.5 \end{cases} \quad (6)$$

که  $R_{mc}$ ،  $D$  و  $B$  به ترتیب برابر با نرخ میکروتورک تشکیل شده، نسبت عرض به ارتفاع نمونه و تردی نمونه و UCS مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال است. همان‌طور که مشخص است، نرخ افزایش میکروتورک در انتهای بارگذاری، تردی و مقاومت فشاری تک محوره نسبت به افزایش عرض نمونه رابطه خطی و نرخ افزایش میکروتورک در نقطه

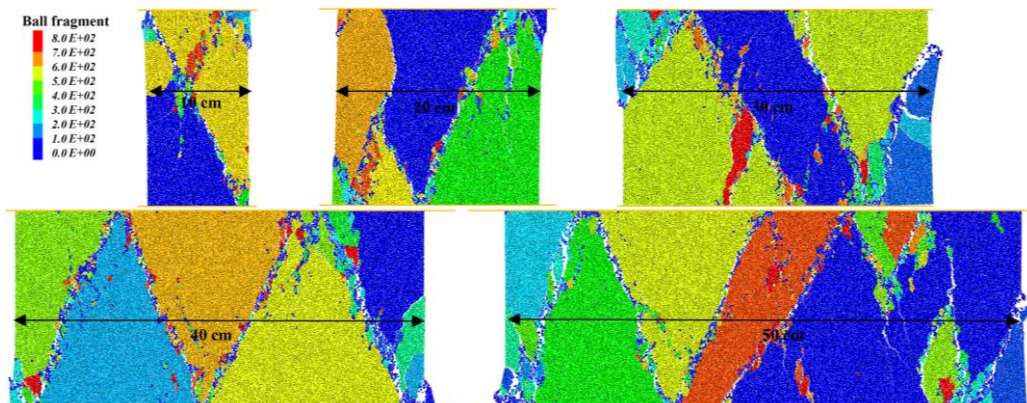


شکل ۸- اثر افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه بر تنش اوج و تنش شروع ترک



شکل ۹- اثر افزایش عرض نمونه بر نحوه و زاویه شکست ماکرو در نمونه‌های زغال سنگ ترد به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر





شکل ۱۰- اثر افزایش عرض نمونه بر نحوه خردایش نمونه‌های زغال‌سنگ ترد به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر نسبت عرض به ارتفاع نمونه بر رشد ترک و گسترش فضای استخراجی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا اثر نسبت عرض به ارتفاع نمونه یا اثر افزایش عرض نمونه بر تعداد میکروتُرک تشکیل شده در نقطه اوج و پایان بارگذاری، تردی و مدول الاستیسیته، مقدار تنش اوج و مقدار تنش در لحظه تشکیل اولین میکروتُرک مورد بررسی قرار گرفت. بارگذاری به صورت محوری بر دو دیواره بالا و پایین نمونه با سرعت ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه انجام شد تا بارگذاری با سرعت آهسته بتواند نتایج بهتری را ارائه دهد. عرض نمونه‌ها به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع همه نمونه‌ها برابر با ۱۰ سانتی‌متر بود. طبق مطالعات گذشته در مطالعات گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ، افزایش تعداد میکروتُرک تشکیل شده پتانسیل گسترش فضای استخراجی را افزایش می‌دهد؛ یعنی با افزایش میکروتُرک اولیه یا ثانویه سرعت گسترش فضای استخراجی افزایش می‌یابد. بر این اساس در این پژوهش و با توجه به فرآیند مدل‌سازی نتایج زیر بدست آمد:

عددی برای لایه زغال‌سنگ قرار گرفته در اعماق کم مشخص گردید هر چه نسبت عرض پهنه به ارتفاع لایه زغال‌سنگ افزایش یابد و برای لایه زغال‌سنگ قرار گرفته در اعماق زیاد هر چه نسبت عرض پهنه به ارتفاع لایه زغال‌سنگ کم و تعداد پهنه استخراجی افزایش یابد، شرایط برای گسترش ترک و رشد فضای استخراجی افزایش می‌یابد؛ بنابراین به جای یک پهنه با عرض زیاد، می‌توان از چند پهنه با عرض کمتر استفاده نمود تا گسترش فضای استخراجی با سرعت بیشتری انجام شود.

- با افزایش عرض به ارتفاع نمونه مقدار تردی کاهش می‌یابد و نمونه زغال‌سنگ حالت شکل-پذیرتری به خود می‌گیرد، به طوری که با افزایش ۵ برابری عرض نمونه مقدار تردی ۱۲ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین مدول الاستیسیته تغییر چندی ندارد، به طوری که برای هر ۵ نمونه تحت بارگذاری مقادیر تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهد.
- در زغال‌سنگ ترد نرخ افزایش میکروتُرک در انتهای بارگذاری، تردی و مقاومت فشاری تک محوره نسبت به افزایش عرض نمونه رابطه خطی و نرخ افزایش میکروتُرک در نقطه اوج نسبت به افزایش عرض نمونه رابطه نمایی مثبت دارد. همچنین با افزایش نسبت عرض به ارتفاع نمونه زاویه شکست ماکرو نسبت به افق کاهش می‌یابد.

- به طور کلی با افزایش عرض نمونه نسبت به ارتفاع آن بدون در نظر گرفتن عمق قرارگیری لایه زغال‌سنگ میکروتُرک‌های اولیه بر اثر بار باره سریع‌تر شکل گرفته و شرایط بهتری را برای گسترش فضای استخراجی فراهم می‌کند و ترک‌های ثانویه در مقدار تنش محوری کمتری شکل می‌گیرد.
- از دیدگاه مکانیک شکست و با تعمیم نتایج

کشور تحت قرارداد شماره ۹۸۰۰۲۲۰۸ انجام شده است. بدینوسیله نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را اعلام می دارند.

لازم به ذکر است، نتایج فوق از دیدگاه مکانیک شکست مورد بررسی قرار گرفته و جهت بررسی جامع نیاز است مدل سازی شیمیایی و حرارتی انجام شود تا نتایج جامع تری حاصل شود.

### ۸- فهرست نمادها

در جدول ۳، سیاهه‌ی نمادها آورده شده است.

### ۷- سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت مالی صندوق پژوهشگران و فناوران

جدول ۳- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
$F$	$N$	نیروی خطی
$F^d$	$N$	نیروی میرا کننده
$\bar{F}$	$N$	نیروی پیوند موازی
$\bar{M}$	$N.m$	گشتاور پیوند موازی
$\bar{F}_n$	$N$	نیروی نرمال
$\bar{F}_s$	$N$	نیروی برشی
$\bar{A}$	$m^2$	سطح مقطع عرضی
$\bar{I}$	$m^4$	ممان اینرسی
$\bar{J}$	$m^4$	ممان قطبی
$\bar{R}$	$m$	شعاع ذره
$\bar{\beta}$	-	ضریب سهم گشتاور
$\bar{\sigma}$	$Pa$	حداکثر تنش نرمال
$\bar{\tau}$	$Pa$	حداکثر تنش برشی
$R_{mc}$	-	نرخ میکروتورک تشکیل شده
$D$	-	نسبت عرض به ارتفاع نمونه
$B$	-	تردی
$UCS$	$Mpa$	مقاومت فشاری تک محوره

### ۹- مراجع

- Advani, S. H., Lin, Y. T., & Zane Shuck, L. (1977). Thermal and structural response evaluation for underground coal gasification. SPE Journal, 17(6), 413-422.
- Akbarzadeh, H., & Chalaturnyk, R. J. (2011). Coupled Fluid-Thermal-Mechanical Analyses of a Deep Underground Coal Gasification Cavity. Journal of Architecture and Civil Engineering, 01(01), 01-14, ISSN(Online): 2321-8193, www.questjournals.org
- Couch, G. R. (2009). Underground Coal Gasification. IEA Clean Coal Centre. ISBN 978-92-9029-471-9, <http://www.coalonline.info/DocId=7790>
- Fang, Z., & Harrison, J. P. (2002). Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimen under triaxial conditions. Int. J. of Rock mechanics and Mining Sciences, 39(4), 459-476, [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00036-9)

- Itasca consulting group, Inc. PFC 2D Version 6.00, 2019, ([www.itascacg.com](http://www.itascacg.com)).
- James, R. (2009). Powder River Basin Underground Coal Gasification. National Energy Technology Laboratory.
- Jowkar, A., Sereshki, F., & Najafi, M. (2018). A new model for evaluation of cavity shape and volume during Underground Coal Gasification process. *Energy*, 148, 756-765, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.188>
- Li, L., Yan, S., Liu, Q., & Yu, L. (2018). Micro- and macroscopic study of crack propagation in coal: theoretical and experimental results and engineering practice. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(4), 1706-1718, <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aabb34>
- Li, X. C., Wang, C., Zhao, C. H., & Yang, H. (2012). The propagation speed of the cracks in coal body containing gas. *Safety Sci.* 50(4), 914–917, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.004>
- Najafi, M., Jalali, S. E., & Khalokakaie, R. (2014). Thermal–mechanical–numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels. *International Journal of Coal Geology*, Volumes 134–135, Pages 1-16.
- Otto, C., & Kempka, T. (2015). Thermo-Mechanical Simulations of Rock Behavior in Underground Coal Gasification Show Negligible Impact of Temperature-Dependent Parameters on Permeability Changes. *GFZ German Research Centre for Geosciences*, 8(6), 5800-5827, doi:10.3390/en8065800
- Shahbazi, M., Najafi, M., & Fatehi Marji, M. (2018). On the mitigating environmental aspects of a vertical well in underground coal gasification method. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 24, pages373–398, <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9816-x>
- Su, F., Itakura, K., Deguchi, G., & Ohga, K. (2016). Monitoring of coal fracturing in underground coal gasification by acoustic emission techniques. *Applied Energy*, 189, Pages 142-156, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.082>
- Tan, Q., Luo, X., & Li, S. (2008). Numerical modeling of thermal stress in a layered rock mass. 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Paper Number: ARMA-08-285, San Francisco, CA, USA.
- Tang, C. A., Tham, L. G., Lee, P. K. K., Tsui, Y. & Liu, H. (2000). Numrical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression - part II: constraint, slenderness and size effect. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science*, 37(4), 571-583. doi:10.1016/S1365-1609(99)00122-7
- Vorobiev, O. Y., Morris, J. P., Antoun, T. H., & Friedmann, S. J. (2008). Geomechanical simulations related to UCG activities. *International Pittsburgh Coal Conference*, Pittsburgh, PA, USA.
- Wang, C., Zhang, C., Li, T., & Zheng, C. (2019). Numerical investigation of the mechanical properties of coal masses with T-junctions cleat networks under uniaxial compression. *International Journal of Coal Geology*, 202, 128-146, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.12.005>
- Wu, P. F., Liang, W. G., Li, Z. G., Cao, M. T., & Yang, J. F. (2016). Investigations on mechanical properties and crack propagation characteristics of coal and sandy mudstone using three experimental methods. *Rock Mech. Rock Eng*, 50, 215–223.

- Xie, Y., Cao, P., Liu, J., & Dong, L. (2016). Influence of crack surface friction on crack initiation and propagation: A numerical investigation based on extended finite element method, *Computers and Geotechnics*, 74, 1–14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.12.013>
- Yao, Q. L., Chen, T., Ju, M. H., Liang, S., Liu, Y. P., & Li, X. H. (2016). Effects of water intrusion on mechanical properties of and crack propagation in coal. *Rock Mech. Rock Eng.* 49(12), 4699–4709, doi: 10.1007/s00603-016-1079-9.
- Yin, G. Z., Gao, D. F., & Pi, W. L. (2003). CT real-time analysis of damage evolution of coal under uniaxial compression, *Journal of Chongqing University*, 26, 96–100.
- Zhang, X-P., & Wong, L. N. Y. (2012). Cracking Processes in Rock-Like Material Containing a Single Flaw Under Uniaxial Compression: A Numerical Study Based on Parallel Bonded-Particle Model Approach. *Rock Mech Rock Eng*, 45,711–737, doi: 10.1007/s00603-011-0176-z