

مدل سازی عددی فرآیند انتشار ترک در نمونه زغال سنگ ترد حاوی ترک تحت بار فشاری

محمد رضا شهبازی^۱، مهدی نجفی^{۲*}، محمد فاتحی مرجی^۳، سروش گدازگری^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

چکیده

در نمونه زغال سنگ ترد حاوی ترک تحت بار فشاری، اولین ترک ایجاد شده ترک باله‌ای است که تحت نیروی کششی به وجود می‌آید. پس از آن به ترتیب ترک صفحه‌ای و مورب شکل گرفته که حاصل از نیروی برشی است. در این پژوهش جهت بررسی مسیر رشد انواع ترک و مقدار نیروی لازم جهت ایجاد آن از یک روش المان گسسته مبتنی بر مدل پیوند موازی خطی (LPBM) استفاده شده است. نتایج مدل های عددی با بررسی بار وارد بر نمونه زغال سنگ حاوی ترک از پیش موجود نشان داده است که میانگین مقدار نیروهای نرمال برای شکستن پیوند در ترک باله‌ای حدود ۱۱ و ۳۰ درصد در ترک مورب و هم صفحه است و همین مقدار پایین نیروهای نرمال دلیلی بر رشد ترک باله‌ای کششی در نمونه است. مقدار نیروی برشی لازم برای غلبه بر پیوند موازی ذره‌ها در ترک مورب و هم صفحه به ترتیب حدود ۷/۵ و ۳/۵ برابر ترک باله‌ای است و برای رشد ترک لازم است پیوند برشی بین ذره‌ها در مسیر ترک مورب و هم صفحه شکسته شود. میانگین نیروی برشی لازم برای شکستن پیوند در مسیر ترک هم صفحه حدود ۴۷ درصد در مسیر ترک مورب است، و این موضوع باعث می‌شود ترک هم صفحه سریع تر از ترک مورب شکل بگیرد. تا قبل از مقاومت اوج نمونه ترک باله‌ای نسبت به بقیه ترک‌های ثانویه بیشترین طول را دارد و این موضوع سبب به هم پیوستن ترک‌های از پیش موجود در لایه‌های زغال سنگ با استفاده از ترک باله‌ای می‌شود.

کلید واژه‌ها: زغال سنگ ترد، ترک‌های ثانویه، انتشار ترک، مدل پیوند موازی خطی.

۱. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، mr.shahbazi@stu.yazd.ac.ir

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

۳. استاد دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۴. مدیر نظارت، بازرسی و ایمنی سازمان نظام مهندسی معدن ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

زغال سنگ یک سنگ رسوبی با سامانه ترک‌ها، نقص‌ها و کاستی‌های میکروسکوپی مانند حفره‌های میکرو (micro-pores)، میکروترک (micro-cracks)، میکروشکاف (micro-pits) است که به عنوان آسیب (damage) در مکانیک شکست از آن یاد می‌شود. این پیچیدگی ساختاری نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی و شکست زغال سنگ دارد. لیو و همکاران (Li et al., 2018) معتقدند که انتشار ترک‌ها در زغال سنگ دارای شکستگی پیش‌رونده و تدریجی به طور عمده به دلیل آشفتگی تنش (disturbance stress) است که ناشی از منافذ (حفره‌ها) و درزه‌های موجود بوده که نشان می‌دهد تکامل آسیب دلیل اصلی شکست ماکروسکوپی لایه زغال سنگ است. ترک‌ها می‌توانند به صورت ماکرو یا میکروسکوپی، جدا شده یا شبکه‌ای (متصل شده) طبقه‌بندی شوند، و از پیش موجود (pre-existing crack) و یا القا شده (Induced crack) باشند.

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 توجه به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین ساختی و هندسی لایه زغال سنگ، ضخامت روباره، وضعیت توپوگرافی محل معدن، امکانات فنی و ... انتخاب می‌شود (نجفی، ۱۳۹۳، شهبازی ۱۳۹۵).

از دیدگاه مکانیک شکست یکی از پارامترهای مهم جهت بررسی تحلیل پایداری استخراج زغال سنگ به انواع روش روباز شامل روش تک پله (Single benched)، چند پله (Multi benched)، روش سطح برداری (Strip mining)، انواع روش زیرزمینی شامل جبهه کار بلند (Long wall method)، جبهه کار کوتاه (Short wall method) و روش اتاق پایه (Room and pillar method) و به ویژه بررسی گسترش فضای استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ

(UCG)، آگاهی و شناخت ساز و کار انتشار ترک تحت بار وارده است. در زمینه معادن زیرزمینی زغال سنگ اهمیت دارد که قوانین فیزیکی حاکم بر انتشار ترک در زغال سنگ مشخص شده و ایمنی در تولید زغال سنگ، استخراج گاز، توزیع نفوذپذیری یا پایداری پهنه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد (Li et al., 2018). به عنوان مثال، فاجعه انفجار سنگ در معدن زغال سنگ می‌تواند به عنوان یک فرآیند شکست در نظر گرفته شود. حفاری و استخراج زغال سنگ باعث افزایش تنش تکیه‌گاه جلویی می‌شود که می‌تواند تعداد زیادی ترک القا شده در زغال سنگ را به وجود آورده و پایداری پهنه را تغییر دهد. به منظور بهبود بهره‌وری از استخراج حاصل از گاززدایی معادن زغال سنگ، از فن‌آوری‌های ویژه جهت افزایش نفوذپذیری توده زغال سنگ با از بین بردن ساختار اصلی آن و تولید ترک‌ها استفاده می‌شود (Huang et al., 2001). مثال‌هایی از این قبیل نشان می‌دهد که فرآیند رشد یا انتشار ترک در زغال سنگ باید به طور دقیق و موشکافانه مورد بررسی قرار گیرد تا رفتار و نوع ترک تشکیل شده بر اثر بار وارده تعیین گردد. به طور کلی بررسی ساز و کار انتشار ترک در افزایش تولید گاز حاصل از روش CBM (گاززدایی متان از زغال سنگ)، افزایش تولید و کیفیت گاز سنتزی خروجی در روش UCG (گازکردن زیرزمینی زغال سنگ)، پایداری پهنه و ... تاثیر مستقیم دارد.

تحقیقات گسترده‌ای در مورد انتشار ترک در مواد مختلف در آزمون فشاری تک محوره بر روی شیشه، گچ، سنگ آهک، گرانودیوریت، ماسه سنگ، سنگ مرمر و ... انجام شده است. اگرچه تفاوت‌های زیادی در الگوی ترک مشاهده شده وجود دارد، اما ویژگی‌های مشترکی نیز وجود دارد (Bobet and Einstein, 1998). تحقیق‌های گذشته در مورد قانون انتشار ترک در زغال سنگ 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 فیلم برداری با کیفیت بالا (high-

همکاران (Lin et al., 2021) تلفیق ترک در نمونه‌های شبه-سنگ با دو لایه غیرمشابه و درزه‌های موازی دوگانه از قبل موجود را تحت بار فشار تک محوره مورد بررسی قرار دادند. ایشان تأثیر زاویه درزه و زاویه پل سنگی را بر رفتار مکانیکی و فرآیندهای شکست در توده‌های سنگی لایه‌ای را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که مقاومت اوج با زاویه درزه و زاویه پل سنگی مرتبط است.

همان‌طور که مشخص است اکثر کارهای انجام شده شامل بررسی و رشد ترک بدون نظر گرفتن ساز و کار ترک ثانویه تشکیل شده، بررسی شده است به طوری که پژوهش‌های رشد ترک از منظر زاویه شکل‌گیری ترک ثانویه، سرعت رشد ترک، اثر اصطکاک بر رشد ترک، بررسی میدان تنش، پدیده تلفیق و ... انجام شده و در زمینه ساز و کار، ماهیت، چگونگی تشکیل ترک‌های ثانویه از نگاه نیروی نرمال و برشی لازم برای غلبه بر شکست پیوند و در نهایت الویت یا تقدم و تاخر رشد انواع ترک با تحلیل عددی و نیرو تحقیق مستقلی انجام نشده است و نسبت نیروی مورد نیاز برای انواع ترک ثانویه بررسی شده که همه این موارد می‌تواند جهت ساز و کار گسترش ترک و شکست در حفریات یا لایه‌های زیرزمینی و روباز زغال‌سنگ مورد استفاده قرار گیرد.

در این پژوهش انواع ترک ایجاد شده بر اثر بار فشاری اعمال شده بر روی نمونه زغال‌سنگ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا از روش پیوند موازی خطی (LPBM) استفاده شده است تا مقدار نیروی نرمال و برشی لازم برای غلبه بر پیوند موازی بین ذرات مورد بررسی قرار گیرد. این پژوهش می‌تواند به تحلیل رفتار انواع ترک برابر انواع بار و تنش وارده از جنس نیرو، حرارت و گاز و ساز و کار نیروی لازم جهت انتشار ترک در پژوهش‌های بعدی کمک نماید و آگاهی و شناخت لازم جهت بررسی مسائل آسیب و شکست در حفریات روباز و زیرزمینی زغال‌سنگ ترد را ایجاد نماید.

۲. انتخاب روش عددی و معادلات حاکم

علاوه بر روش‌های تحلیلی و مدل‌های نیمه تجربی، مانند مدل آسیب بر اساس کرنش اصلی کششی حداکثر

(definition) انجام شده است (Li et al., 2018). بین و همکاران (Yin et al., 2003) آزمایش سی تی اسکن را در مورد قانون تکامل آسیب در زغال‌سنگ تحت بار تک محوره انجام داده‌اند. وو و همکاران (Wu et al., 2016)، 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. لی و همکاران (Li et al., 2012) سرعت انتشار ترک در زغال‌سنگ حاوی گاز را مورد بررسی قرار دادند و ارتباط بین فشار گاز و سرعت انتشار ترک را یافتند. یو و همکاران (Yao et al., 2016) 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 محتوی) دارد. خی و همکاران (Xie et al., 2016)، اثر اصطکاک سطح ترک اولیه بر شروع و انتشار ترک در مواد شبه‌سنگ در معرض بارهای فشاری با کمک روش المان محدود توسعه یافته را اندازه‌گیری کردند. یانگ و هوانگ (Yang and Huang, 2017) یک شبیه‌سازی عددی مواد شبه‌سنگ حاوی دو ترک از پیش موجود را تحت بار فشار تک محوره انجام دادند، و میدان تنش نمونه و ساز و کار تلفیق ترک را مورد بررسی قرار دادند. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2018) سه حالت شکست برشی، کششی و ترکیبی تحت بار تک محوره را مشاهده کردند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2019) بررسی عددی خصوصیات مکانیکی توده زغال‌سنگ با شبکه کلیت‌های مختلف تحت بار فشاری را مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و ژو (Zhang and Zhou, 2020) با استفاده از روش انتشار آوایی، انتشار ترک را بررسی کردند. یو و همکاران (Yue et al., 2020) با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال (digital image correlation) میدان کرنش و جابجایی نزدیک ترک اولیه و پدیده تلفیق را در نمونه گرانیات تحت بارگذاری با نرخ بالا مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که حالت تلفیق عمدتاً یک شکست کششی است و تغییر در فاصله نوک داخلی ترک‌های پیش ساخته تأثیر کمی بر حالت تلفیق دارد. لین و

کامپیوتری انجام شده است، اما روش مستقیم اندازه‌گیری میدان تنش در داخل نمونه به جز روش تحلیل عکس تنش الاستیک (photo elastic stress analysis) به ندرت انجام شده است. با توجه به چالش اندازه‌گیری مستقیم و تجسم میدان تنش اساسی، به طور معمول از ابزارهای عددی استفاده می‌شود. روش عددی برای تحلیل فرآیندهای ترک‌خوردگی و تفسیر انواع ترک‌های مرتبط مشاهده شده در آزمایش‌های فیزیکی مفید است (Zhang and wong, 2012).

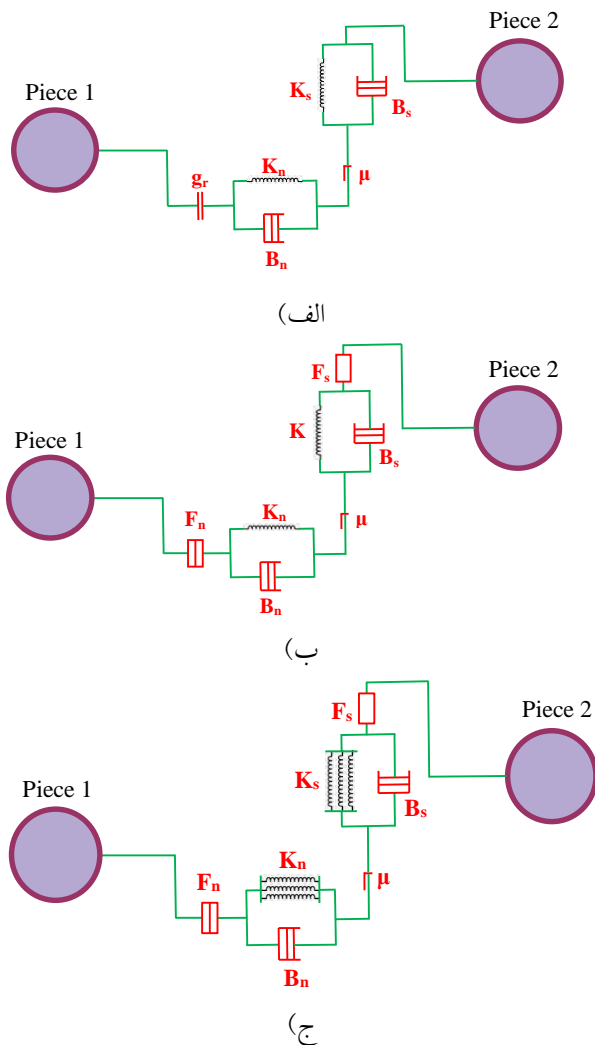
در این پژوهش برای بررسی دقیق مسیر ترک و حل مشکلات موجود در انتخاب معیار شروع ترک، از یک روش المان گسسته مبتنی بر مدل پیوند موازی خطی (LPBM) استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت این روش این است که رفتار ساختاری تجربی پیچیده را می‌توان با تماس ذرات ساده جایگزین کرد. پوتایاندی و همکاران (Potyondy et al., 2004) با معرفی مدل ذرات پیوند یافته، نشان دادند که چگونه می‌توان از تکنیک مدل‌سازی ناپيوسته 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 (Itasca group, 2019). در این روش، تحلیل مبتنی بر ذرات دایره‌ای شکل برای شبیه‌سازی فرآیندهای ترک‌خوردگی در نمونه‌های حاوی یک نقص باز یا بسته از قبل موجود انجام می‌شود. در ادامه قوانین حاکم بر مدل پیوند موازی خطی بیان شده است.

مدل پیوند موازی خطی (Linear Parallel Bond Model) مبتنی بر تابع خطی است که می‌تواند در هر دو تماس گوی-گویی (ذره-ذره) و گوی-دیواره (ذره-دیواره) قرار گیرد. پیوند موازی رفتار مکانیکی یک نمونه با اندازه محدود از مواد شبه-سیمانی متناسب بین دو نمونه تماسی (شبه سیمان‌شدگی دانه‌های شیشه‌ای با چسب نشان داده شده در شکل ۱) را فراهم می‌کند. مولفه پیوند موازی به موازات مولفه خطی عمل می‌کند و تعامل الاستیکی بین ذرات (گوی‌ها) ایجاد می‌کند. وجود پیوند موازی از احتمال لغزش جلوگیری نکرده و

(maximum tensile principal strain) و معیار F-) F-criterion)، بررسی رشد و انتشار ترک با روش‌های عددی قابل انجام است. روش‌های عددی متنوعی مانند روش المان محدود (FEM)، روش المان مجزا (DEM)، روش‌های ترکیبی المان مجزا-محدود (FDEM)، روش چند ظرفیتی عددی (NMM) و روش ناپيوستگي جابجایی (DDM) برای مطالعه شروع و انتشار ترک با معیارهای مختلف بر اساس مکانیک شکست وجود دارد (Xie et al., 2016, Zhang and wong, 2012).

با پیشرفت در محاسبات رایانه‌ای، مطالعات مربوط به بررسی رشد و انتشار ترک با روش‌های عددی گسترش یافته است. روش المان محدود به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی مواد دارای نقص از پیش موجود در یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده است. هیلبربورگ و همکاران (Hillerborg et al., 1976) تلاش کرد تا مدل منطقه چسبنده را در روش المان محدود برای مصالح بتنی در نظر بگیرد. به طور کلی در روش المان محدود برای مواد سنگی و شبه-سنگی شکست با در نظر گرفتن سه معیار مختلف یعنی تنش اصلی، کرنش اصلی و معیار انرژی بررسی می‌شود. بسیاری از این مطالعات سنگ را با نقص‌های باز در نظر می‌گیرند که تحت تنش فشاری قرار گرفته و این نقص‌ها در طول بارگذاری باز باقی می‌ماند. سنگ ممکن است دارای نقص‌های باز و بسته باشد که در حالت نقص بسته در حین بارگذاری، نقص یا ترک از پیش موجود بسته مانده و منجر به اصطکاک سطح بین نقص می‌شود. با توجه به این رفتار، تغییراتی در شروع ترک و تنش‌های اوج مواد می‌تواند ایجاد شود. داشتن یک معیار مناسب که بتواند تنش شروع ترک را با توجه به تنش اوج برای طراحی و امور مهندسی تعیین کند، حائز اهمیت است (Xie et al., 2016).

در اکثر مطالعات آزمایشگاهی ساز و کار ترک‌خوردگی با چشم غیرمسلح، فیلم‌برداری با فیلم سرعت بالا (high-speed video)، مشاهده میکروسکوپی (مقطع نازک پتروگرافی و SEM/ESEM)، انتشار صوتی و تکنیک‌های اسکن توموگرافی



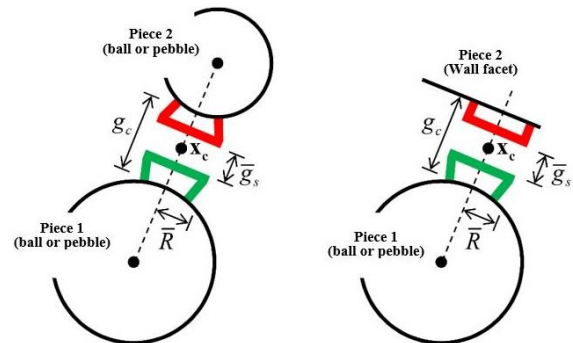
شکل ۲. مولفه‌های روانه‌شناسی (اندرکنش بین نیروها) و رفتار بین ذرات در مدل: الف) خطی، ب) پیوند تماسی ج) پیوند موازی خطی
به طور کلی روابط بین گوی‌ها یا گوی و دیواره در نرم‌افزار PFC با قانون نیرو-جابجایی بیان می‌شود. قانون نیرو-جابجایی برای مدل پیوند موازی خطی، نیروی تماس و ممان به صورت زیر بیان می‌شود (Itasca group, 2019):

$$F_c = F^l + F^{dl} + \bar{F} \quad (1)$$

$$M_c = \bar{M} \quad (2)$$

که F^l ، F^{dl} 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.

پیوندهای موازی می‌توانند نیرو و ممان را بین ذرات منتقل کنند (Itasca group, 2019).



شکل ۱. سیمان شدگی بین ذرات در نرم افزار PFC (با نمایش گپ‌های بین ذرات و شعاع پیوند) (Itasca group)
یک پیوند موازی را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از فنرهای الاستیک با سختی نرمال و برشی ثابت، بصورت یکنواخت بر روی یک مقطع عرضی (به صورت مستطیل شکل در حالت دو بعدی و دایره‌ای در حالت سه بعدی) که روی صفحه تماس و در مرکز نقطه تماس قرار گرفته فرض کرد. این فنرها به موازات فنرهای با مولفه خطی عمل می‌کنند. حرکت نسبی در تماس، پس از ایجاد پیوند موازی رخ می‌دهد، که باعث ایجاد نیرو و ممان در درون ذرات پیوند خورده شده می‌شود. این نیرو و ممان بر روی دو ذره تماس یافته تأثیر گذاشته و می‌تواند مربوط به حداکثر تنش‌های نرمال و برشی باشد که در داخل ذره پیوند خورده در حاشیه پیوند عمل کند. اگر هر یک از این تنش‌های حداکثر از مقاومت پیوند متناظر آن فراتر رود، پیوند موازی شکسته شده و مولفه‌های نیرو، گشتاور و سختی موجود در ذره پیوند خورده از مدل حذف می‌شود (Itasca group, 2019).

در شکل ۲ روانه‌شناسی (rheology)، اندرکنش و پارامترهای موجود بین گوی‌های موجود در مدل خطی، پیوند تماسی و پیوند موازی خطی نشان داده شده است که مولفه‌های K_n و B_n به ترتیب سختی نرمال و برشی، B_s و K_s به ترتیب میراگر نرمال و برشی، μ و g_f به ترتیب شکاف مرجع (فاصله فرضی برای تحمل نیروی فشاری) و زاویه اصطکاک داخلی میکرو و F_s و F_n به ترتیب نیروی نرمال و برشی لازم در برابر شکسته شدن اتصال بین دو گوی (ذره) است.

به صورتی انجام پذیرفت که آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و آزمایش برزیلی منطبق بر واقعیت باشد. نمونه مورد بررسی استوانه‌ای به قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی-متر 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 ۶۹۵۰ 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 ۸ درصد و چگالی ذره‌ها برابر چگالی نمونه زغال‌سنگ یعنی برابر ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. پارامترهای میکرو برای ساخت مدل نهایی در جدول ۱ آورده شده است. نمودار تنش-کرنش و بار-گام حل مساله به ترتیب در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و آزمایش برزیلی تحت بار فشاری دو فک بالا و پایین با سرعت ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{F}_n}{A} + \beta \frac{\| \bar{M}_b \| \bar{R}}{I} \quad (3)$$

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

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 β 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 میکروترک‌های کششی، برشی یا ترکیبی از آنها ترک ماکرو شکل می‌گیرد (Itasca group, 2019).

۳. کالیبره کردن مدل

در این پژوهش از یک نوع زغال‌سنگ بیتومینه با رفتار الاستوشکننده استفاده شده است. جهت شبیه‌سازی رفتار ماکرو نمونه، تغییرات پارامترهای میکرو در نرم‌افزار PFC2D

جدول ۱. پارامترهای میکرو برای مدل‌سازی

| Micro-parameter | Value | Micro-parameter | Value |
|------------------------|-------|-------------------------|--------|
| emod (GPa) | 1.8 | g _r (m) | 0.5e-4 |
| K _{rat} | 2 | Pb _{ten} (MPa) | 7 |
| R _{max} (mm) | 0.6 | Pb _{coh} (MPa) | 6 |
| R _{min} (mm) | 0.3 | Pb _{fa} (°) | 25 |
| ρ (kg/m ³) | 1600 | dp _{nratio} | 0.5 |

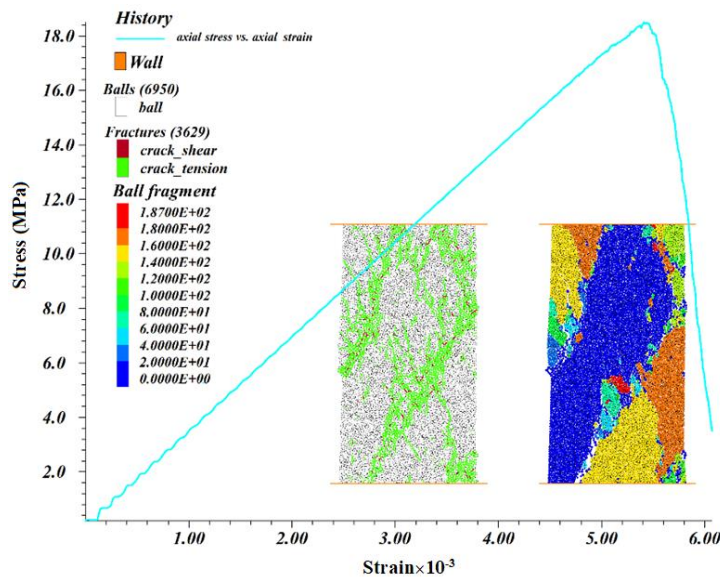
است (Itasca group, 2019). هر چه سرعت کمتر باشد ساز و کار رشد ترک دقیق‌تر بررسی شده و مقاومت واقعی نمونه نمایان خواهد شد.

در مطالعه عددی حاضر با استفاده از روش پیوند موازی خطی، ترک وقتی ایجاد می‌شود که پیوند موازی بین ذرات اصلی مجاور شکسته شود. در واقع هر ترک به عنوان یک خط برابر با میانگین طول قطرهای دو ذره مجاور نشان داده می‌شود. برای تجسم بهتر توسعه ترک‌های ماکروسکوپی و تکامل الگوهای ترک، ساز و کار به این صورت است که ریزترک‌های مجزا که به اندازه کافی نزدیک به هم بوده، یعنی در همسایگی همدیگر قرار دارند با خط فرضی به همدیگر

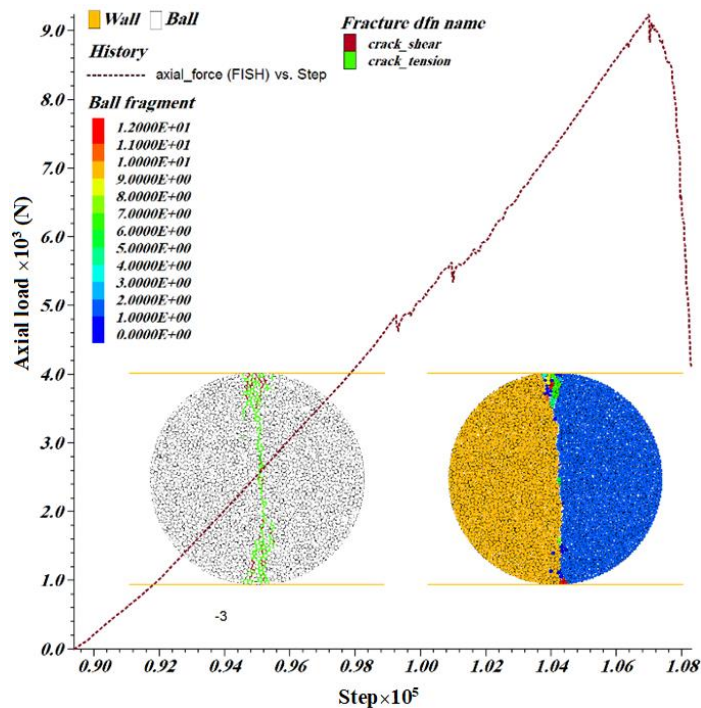
به منظور انجام شرایط مرزی از آنجا که در روش LPBM پیوند بین ذرات دارای مقاومت کششی، فشاری، برشی و خمشی بوده که این امر باعث یکپارچه شدن نمونه تحت بارگذاری می‌شود. بنابراین سمت راست و چپ مدل نیازی به صفر کردن سرعت و جابجایی ندارد و نیروی پیوندی بین ذرات باعث تشکیل مقاومت نمونه در مقابل بار وارده تا لحظه گسیخت است. اعمال بار مطابق با آزمون مقاومت فشاری تک محوره توسط دو فک بالا و پایین با سرعت ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه بر نمونه وارد می‌شود. همان‌طور که در این پژوهش بیان شده واحدها بر حسب SI است و سرعت مناسب فک‌ها جهت بررسی رشد ترک بین ۰/۱ تا ۰/۵ سانتی‌متر بر ثانیه

حاصل $a/c < 1$ باشد، دو ریزترک به عنوان یک ترک مداوم منفرد در نظر گرفته شده و یک خط ماکروترک برای پیوند مرکزهای دو ریزترک ترسیم می‌شود. زمانی که سه یا چند میکروترک با این روش به هم متصل شدند، یک ترک ماکروسکوپی شکل می‌گیرد (Zhang and Wong, 2013).

وصل شده تا مسیر ترک ماکرو را تشکیل دهند. در این روش فاصله مرکز دو ریزترک مجاور به طور مثال به عنوان پارامتر a تعریف شده و طول هر یک از دو ریزترک مجاور، هر کدام که دارای طول بیشتری باشد به عنوان پارامتر c تعریف می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، اگر

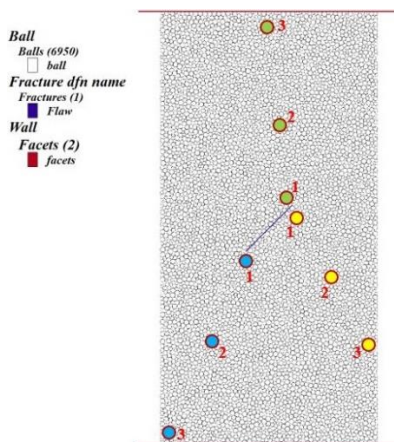


شکل ۳. نمودار تنش-کرنش نمونه کالیبره همراه با نمایش شکل‌گیری میکروترک و خردایش نمونه



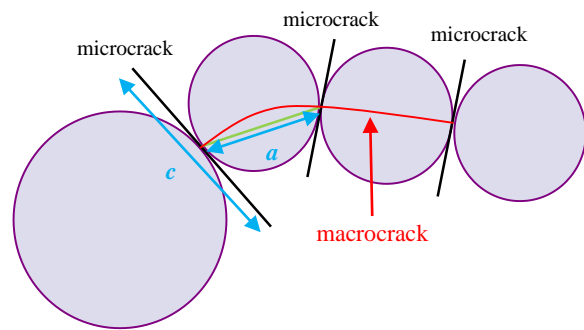
شکل ۴. نمودار بار وارد بر نمونه در آزمون برزیلی با نمایش شکل‌گیری میکروترک و خردایش نمونه

فشاری قرار گرفته و نوع ترک‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. نسبت طول کلیت (ترک اولیه) به عرض نمونه ۰/۳ یعنی ترک اولیه با طول ۱۵ میلی‌متر و شیب ۴۵ درجه است. برای بررسی نوع ترک، نیروی نرمال و برشی مورد نیاز برای غلبه بر پیوند موازی بین ذره‌ها بدست آمده است. بدین منظور تعداد نه نقطه کنترلی در نمونه جانمایی شده است و مقدار نیروی نرمال و برشی برای غلبه بر پیوند موازی در این نقاط طی تحلیل نرم‌افزار به صورت پیوسته اندازه‌گیری شده است. نقاط بیان شده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. کلیت موجود در نمونه زغال‌سنگ به طول ۱۵ میلی‌متر و شیب ۴۵ درجه (نقاط سبز، زرد و آبی رنگ به ترتیب مسیر ترک باله‌ای، مورب و هم‌صفحه را نشان می‌دهد) گزینش نقاط به این صورت است که ابتدا نمونه با ترک موجود تحت بار فشاری قرار گرفته و مسیر ترک‌های باله‌ای، مورب و هم‌صفحه مشخص شده است. سپس این نقاط به گونه‌ای جانمایی شده که در مسیر این ترک‌ها قرار گیرد. به طور مجدد از ابتدا سیکل بارگذاری انجام گرفته است و ترک‌های یاد شده از نقاط مورد نظر عبور کرده و مقدار نیروی نرمال و برشی لازم برای غلبه بر شکست پیوند موازی خطی بین ذره‌ها بدست آمده است. جالب است که در این نمونه به دلیل تردی، هر سه نوع ترک باله‌ای، هم‌صفحه و مورب تشکیل می‌شود.

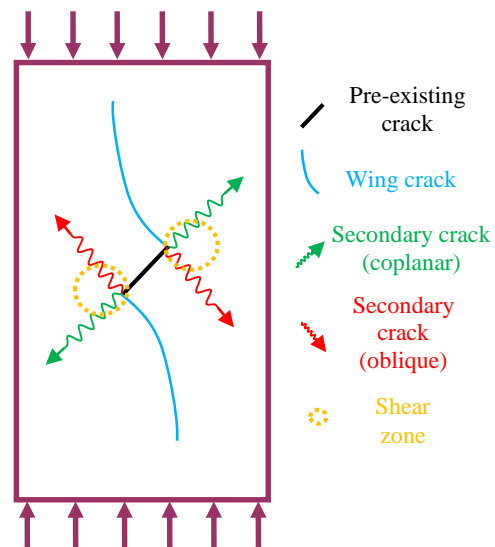
نقاط شماره یک، دو و سه به ترتیب نزدیک کلیت زغال‌سنگ، در میانه مسیر و انتهای مسیر ترک انتشار یافته قرار دارد تا به طور کامل نیروهای نرمال و برشی لازم برای شکست پیوند



شکل ۵. نحوه اتصال میکروترک‌ها و تشخیص مسیر ترک ماکرو (Zhang and Wong, 2013)

۴. بررسی مسیر رشد ترک و تحلیل نتایج

در مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌هایی که در معرض فشار تک محوره قرار دارند، به طور معمول سه نوع ترک در نتیجه بار اعمال شده انتشار می‌یابد. ترک‌های اولیه ایجاد شده توسط تنش کششی (مود ۱) که در لبه‌های ترک از پیش موجود شکل گرفته و سایشی در این نوع از ترک رخ نمی‌دهد و دو نوع ترک ثانویه یعنی هم‌صفحه و مورب (coplanar and oblique) هستند که به وسیله برش (مود ۲) ایجاد شده و دارای ویژگی‌های مواد سایشی در سطح گسیختگی هستند که در شکل ۶ نشان داده شده است (Fatehi, 2014).

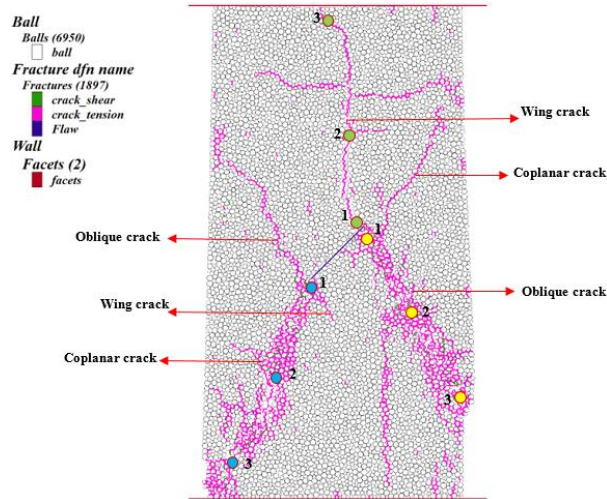


شکل ۶. نحوه رشد ترک از پیش موجود (کلیت) در اثر اعمال بار فشاری

در این پژوهش برای بررسی نوع ترک‌های بوجود آمده از کلیت موجود در نمونه زغال‌سنگ، این نمونه تحت بار

مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۸ روند رشد ترک تحت بار فشاری در نمونه زغال‌سنگ حاوی کلیت با مشخصات فوق را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این بررسی برای یک نمونه زغال‌سنگ با مقدار تنش اوج و مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۸/۲ مگاپاسکال و ۳/۵۴ گیگاپاسکال و مقدار تردی برابر ۰/۹۲ انجام شده است که نشان از رفتار الاستوشکننده دارد. دلیل این انتخاب این است که در این نمونه پس از اعمال بار فشاری به نمونه تمام ترک‌های موجود (ترک باله‌ای، هم‌صفحه و مورب) تشکیل می‌شود که در شکل ۸ نشان داده شده است.

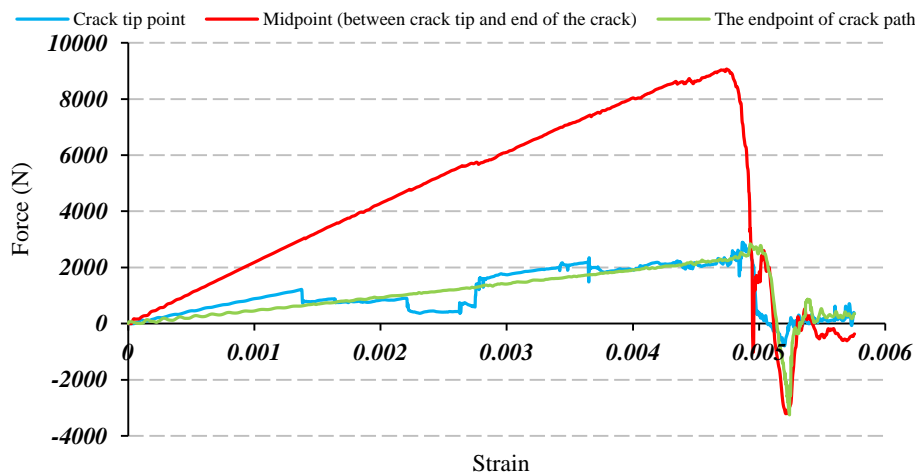
شکل ۸ انواع ترک تشکیل شده در نمونه زغال‌سنگ ترد حاوی ترک بعد از اعمال بارگذاری و مشخص کردن نقاط بررسی نیروهای پیوند موازی



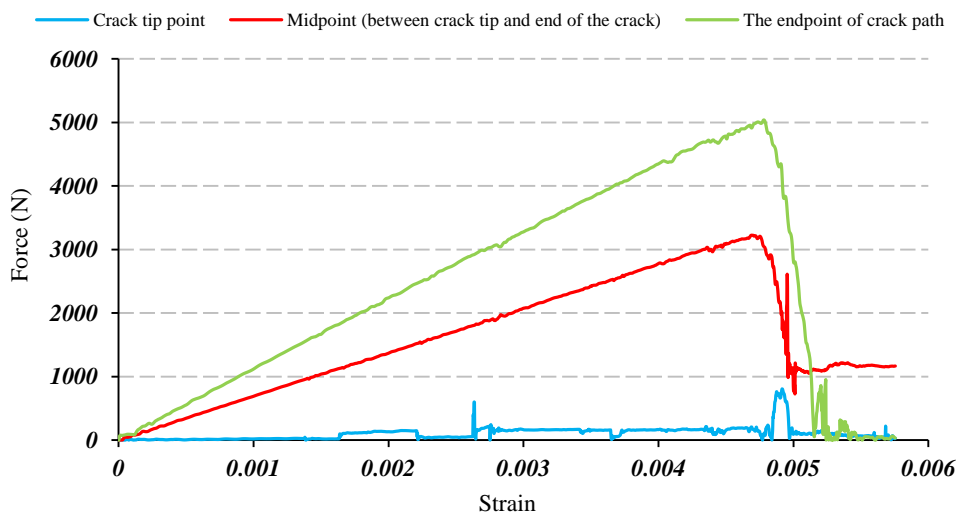
شکل ۸. انواع ترک تشکیل شده در نمونه زغال‌سنگ ترد حاوی ترک بعد از اعمال بارگذاری و مشخص کردن نقاط بررسی نیروهای پیوند موازی

در تحلیل نرم‌افزاری ذکر این نکته ضروری است که مقدار تنش شروع ترک خیلی کمتر از حالت واقعی است، چرا که در مدل واقعی میکروترک اولیه تشکیل شده داخل مدل با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شود و دقت نرم‌افزار برای تشخیص میکروترک‌ها حتی دقیق‌تر از روش‌های انتشار آوایی و سی‌تی اسکن است. در تحلیل نرم‌افزاری کوچکترین شکست پیوند موازی به صورت میکروترک کششی یا برشی دیده شده و در

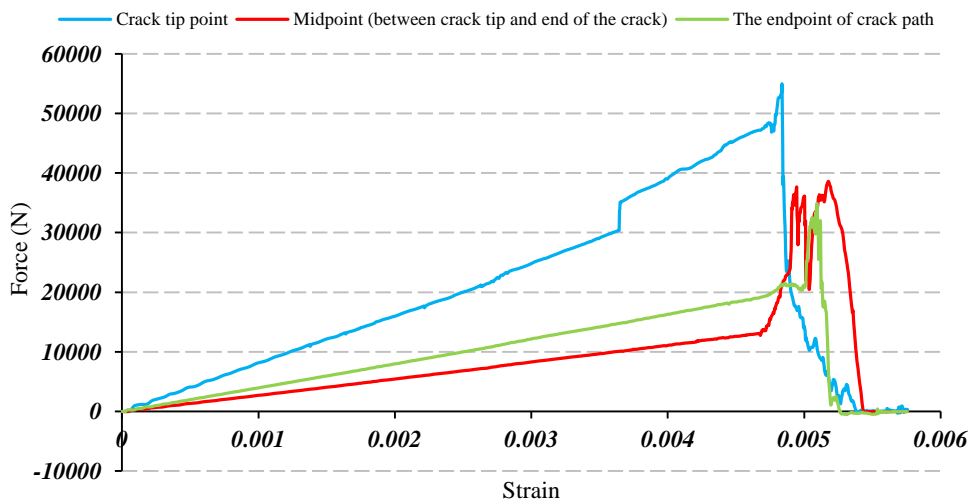
در تحلیل نرم‌افزاری ذکر این نکته ضروری است که مقدار تنش شروع ترک خیلی کمتر از حالت واقعی است، چرا که در مدل واقعی میکروترک اولیه تشکیل شده داخل مدل با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شود و دقت نرم‌افزار برای تشخیص میکروترک‌ها حتی دقیق‌تر از روش‌های انتشار آوایی و سی‌تی اسکن است. در تحلیل نرم‌افزاری کوچکترین شکست پیوند موازی به صورت میکروترک کششی یا برشی دیده شده و در



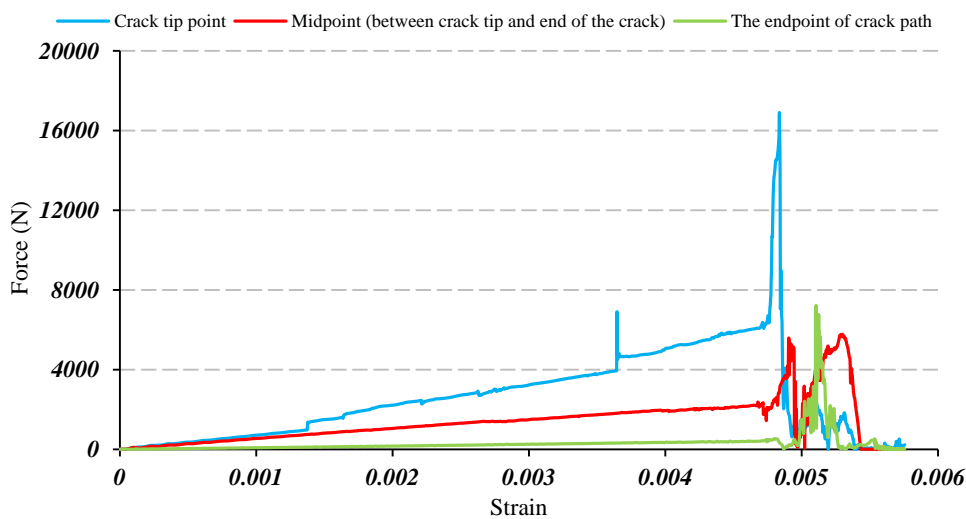
شکل ۹. نیروی نرمال مورد نیاز برای شکستن پیوند موازی در مسیر ترک باله‌ای



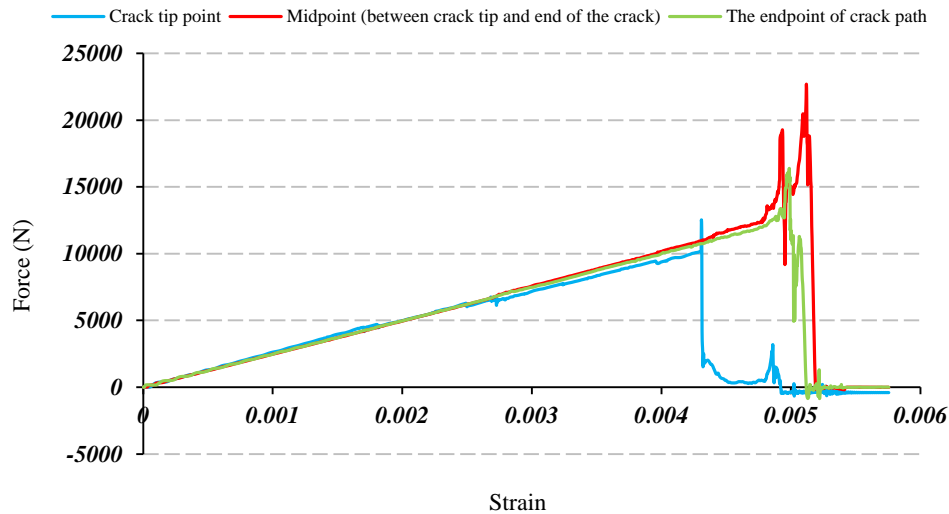
شکل ۱۰. نیروی برشی مورد نیاز برای شکستن پیوند موازی در مسیر ترک باله‌ای



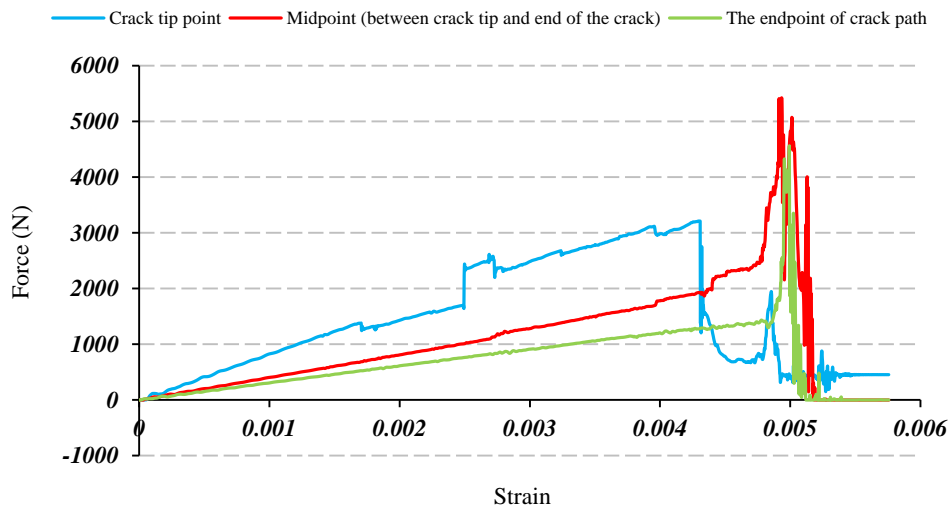
شکل ۱۱. نیروی نرمال مورد نیاز برای شکستن پیوند موازی در مسیر ترک مورب



شکل ۱۲. نیروی برشی مورد نیاز برای شکستن پیوند موازی در مسیر ترک مورب



شکل ۱۳. نیروی نرمال مورد نیاز برای شکستن پیوند موازی در مسیر ترک هم‌صفحه



شکل ۱۴. نیروی برشی مورد نیاز برای شکستن پیوند موازی در مسیر ترک هم‌صفحه

از مقدار نیروی نرمال و برشی مورد نیاز هر یک از نقاط مورد نظر برای شکست پیوند موازی بین ذره‌ها نسبت به کرنش نمونه در شکل‌های ۹ تا ۱۴ می‌توان موارد زیر را استنباط نمود:

- میانگین نیروهای نرمال برای شکستن پیوند در ترک باله‌ای حدود ۱۱ و ۳۰ درصد در ترک مورب و هم‌صفحه است و همین مقدار پایین نیروهای نرمال دلیلی بر رشد ترک باله‌ای کششی در نمونه است.
- مقدار نیروی برشی لازم برای غلبه بر پیوند موازی ذره‌ها در ترک مورب و هم‌صفحه به ترتیب حدود ۷/۵ و ۳/۵ برابر در ترک باله‌ای است و برای رشد ترک لازم است پیوند برشی بین ذره‌ها در مسیر ترک مورب و هم‌صفحه‌ای شکسته شود.

نیروی نرمال برای شکستن پیوند در نوک ترک باله‌ای بسیار کمتر از نقطه میانی است و همین امر سبب رشد سریعتر ترک باله‌ای نسبت به سایر ترک‌هاست.

- نیروی نرمال برای شکستن پیوند در نوک ترک باله‌ای است و این پیوند بعد از ترک باله‌ای و هم‌صفحه شکل می‌گیرد.
- نیروی نرمال و برشی برای شکستن پیوند در نقطه نوک ترک مورب بیشتر از نقطه میانی و انتهایی است و این پیوند بعد از ترک باله‌ای و هم‌صفحه شکل می‌گیرد.

تحت نیروی کششی به وجود می‌آید. پس از آن به ترتیب ترک صفحه‌ای و مورب شکل گرفته حاصل از نیروی برشی است. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر است:

- مدل ارتباطی پیوند موازی خطی بهترین گزینه جهت بررسی رشد ترک نمونه‌های سنگ ترد است زیرا علاوه بر بررسی نیروی کشش و فشار بین ذرات، ممان خمشی (پیچش) بین ذرات را در نظر می‌گیرد.
- ترک‌های ثانویه ایجاد شده در اثر بار فشاری در نمونه زغال‌سنگ ترد به ترتیب ترک باله‌ای، مورب و هم‌صفحه است.
- میانگین نیروهای نرمال برای شکستن پیوند در ترک باله‌ای کمتر از ترک مورب و هم‌صفحه است و همین مقدار پایین نیروهای نرمال دلیلی بر رشد ترک باله‌ای کششی در نمونه است.
- مقدار نیروی برشی لازم برای غلبه بر پیوند موازی ذره‌ها در ترک مورب و هم‌صفحه به ترتیب حدود $7/5$ و $3/5$ برابر در ترک باله‌ای است و برای رشد ترک لازم است پیوند برشی بین ذره‌ها در مسیر ترک مورب و هم‌صفحه‌ای شکسته شود.
- میانگین نیروی برشی لازم برای شکستن پیوند در سه نقطه در مسیر ترک هم‌صفحه حدود ۴۷ درصد در مسیر ترک مورب است، و این مهم باعث می‌شود ترک هم‌صفحه سریعتر از ترک مورب شکل بگیرد.

- میانگین نیروی برشی لازم برای شکستن پیوند در سه نقطه در مسیر ترک هم‌صفحه حدود ۴۷ درصد در مسیر ترک مورب است، و این مهم باعث می‌شود ترک هم‌صفحه سریعتر از ترک مورب شکل بگیرد.
- نیروی برشی لازم برای شکستن پیوند در نوک ترک هم‌صفحه کمتر از نقطه میانی و انتهای در مسیر این ترک است و همین موضوع دلیلی دیگری برای شکستن سریعتر پیوند ذره‌ها در این مسیر نسبت به ترک مورب است.
- تا قبل از مقاومت اوج نمونه ترک باله‌ای بیشترین طول را دارد و این موضوع سبب به هم پیوستن ترک‌های از پیش موجود در لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از ترک باله‌ای می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش انواع ترک ایجاد شده بر اثر بار فشاری اعمال شده بر روی نمونه زغال‌سنگ با رفتار الاستو شکننده مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از روش پیوند موازی خطی (LPBM) استفاده شد تا مقدار نیروی نرمال و برشی لازم برای غلبه بر پیوند موازی بین ذرات مورد بررسی قرار گیرد. این پژوهش دیدگاه مناسبی در مورد نیروی لازم برای تولید انواع ترک ثانویه ارائه داد که به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفت و می‌تواند جهت ساز و کار گسترش ترک و شکست در حفاریات یا لایه‌های زیرزمینی و روباز زغال‌سنگ مورد استفاده قرار گیرد. بررسی‌ها نشان داد که اولین ترک ایجاد شده در نمونه زغال‌سنگ ترد، ترک باله‌ای است که

منابع

- نجفی، م.، ۱۳۹۳. مدل‌سازی ترمومکانیکی برای تعیین ابعاد پهنه‌های استخراجی در روش گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ، رساله‌ی دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شهبازی، م.، ۱۳۹۵. تحلیل ترمومکانیکی پایداری چاه‌های تزریق و تولید در روش تبدیل به گازکردن زغال‌سنگ در زیرزمین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.

Bobet, A., and Einstein H.H., 1998. Fracture Coalescence in Rock-type Materials under Uniaxial and Biaxial Compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 7, pp. 863±888, PII: S0148-9062(98)00005-9.

- Fatehi, M.M., 2014. Numerical analysis of quasi-static crack branching in brittle solids by a modified displacement discontinuity method, *International Journal of Solids and Structures* 51,1716–1736, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.01.022>.
- Huang, Q.X., and Gao, S.N., 2001. Mechanical model of fracture and damage of coal bump in the entry, *China Coal Soc*, 26 156–9.
- Itasca consulting group, Inc. PFC 2D Version 6.00, 2019, (www.itascacg.com).
- 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*, <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, 914–917.
- Lin, Q., Cao, P., Wen, G., Meng, J., Cao, R., Zhao, Z., 2021. Crack coalescence in rock-like specimens with two dissimilar layers and pre-existing double parallel joints under uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 139, 104621, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104621>.
- 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*, <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, 1–9.
- 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>.
- Yang, S.Q., and Huang, Y.H., 2017. Failure behaviour of rock-like materials containing two pre-existing unparallel flaws: an insight from particle flow modeling, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 22(sup1):s57–78.
- 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 Mechanics and Rock Engineering*, Volume 49, Issue 12, pp.4699-4709, <https://doi.org/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, *J. Chongqing Univ.* 26, 96–100 (in Chinese).
- Yue, Z., Peng, L., Yue, X., Wang, J., Lu, C., 2020. Experimental study on the dynamic coalescence of two-crack granite specimens under high loading rate, *Engineering Fracture Mechanics*, 237 (2020) 107254, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107254>.
- Zhang, J.Z., and Zhou, X.P., 2020. AE event rate characteristics of flawed granite: from damage stress to ultimate failure, *Geophys J Int* 2020, 222(2),795-814.
- Zhang, X.P., and 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, Published online: 13 November 2011, Springer-Verlag 2011, DOI 10.1007/s00603-011-0176-z.
- Zhang, X.P., and Wong, L.N.Y., 2013. Crack Initiation, Propagation and Coalescence in Rock-Like Material Containing Two Flaws: a Numerical Study Based on Bonded-Particle Model Approach, *Rock Mech Rock Eng*, 46:1001–1021, <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-012-0323-1>.
- Zhao, C., Zhou, Y.M., Zhao, C.F., Bao, C., 2018. Cracking Processes and Coalescence Modes in Rock-Like Specimens with Two Parallel Pre-existing Cracks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 11, pp. 3377-3393.