

بررسی عملکرد دستگاه شیرر در روش جبهه‌کار طولانی با استفاده از کد جریان ذره مطالعه موردی: معدن زغال سنگ مکانیزه پروده طبس

محمدرضا عجم‌زاده^۱؛ وهاب سرفرازی^۲؛ حسام دهقانی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲-۳- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱

چکیده

زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی در دنیاست. هر چند که از اهمیت آن به دلیل گسترش استفاده از منابع نفت، گاز، انرژی‌های نوین و غیره کاسته شده ولی هنوز هم از اهمیت بالایی در صنایع فولاد و تولید انرژی برخوردار است. زغال‌سنگ به روش‌های سطحی یا زیرزمینی استخراج می‌شود. یکی از روش‌های استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ روش جبهه‌کار طولانی است. در این روش که یک روش مکانیزه محسوب می‌شود برای استخراج از دستگاه‌هایی همچون رنده یا شیرر استفاده می‌شود. معدن زغال‌سنگ مکانیزه پروده طبس، یکی از معادنی است که به روش جبهه‌کار طولانی استخراج می‌شود. دستگاه برش زغال در این معدن شیرر است. در این پژوهش با استفاده از خصوصیات زغال‌سنگ معدن مکانیزه پروده طبس به بررسی عملکرد دستگاه شیرر پرداخته شده است. برای نیل به این هدف از روش مدل‌سازی با نرم‌افزار کد جریان ذره استفاده شد. در این راستا ابتدا با نمونه‌گیری از زغال معدن پروده و انجام آزمایشات تک‌محوری و برزیلی بر روی آن مدل کالیبره شد. سپس با ساخت مدل و استفاده از متغیرهایی همچون قطر شیرر، جابجایی در هر دور و سرعت خطی شیرر مدل‌سازی صورت گرفت. پس از ساخت ۲۷ مدل برای شیرر، بهترین مدل شیرر بر اساس حداکثر نیروی وارد بر دستگاه در جهت X و Y انتخاب گردید. در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین عملکرد شیرر مدلی با قطر ۲۰ میلی‌متر و جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر دور است که مقدار حداکثر نیروی وارد بر شیرر در این مدل برابر ۱۸۸۰۰ کیلو نیوتن در جهت X و مقدار ۱۶۰۰۰ کیلو نیوتن در جهت Y می‌باشد.

شیرر، جبهه‌کار طولانی، کد جریان ذره، مدل‌سازی عددی

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

زغال‌سنگ یکی از قدیمی‌ترین منابع تولید انرژی در جهان است که در سال‌های اخیر بدلیل محدود بودن منابع نفت و گاز و همچنین زیان‌های آنها و از طرفی گستردگی منابع زغال‌سنگ دوباره مورد توجه قرار گرفته است. طبق آمار موجود، ذخایر جهانی اثبات شده زغال‌سنگ ۸۴۷ میلیارد تن است. این آمار بیانگر آن است که با میزان تولید کنونی، ذخایر زغال‌سنگ ۱۱۹ سال دیگر جوابگوی تقاضای جهانی برای این ماده با ارزش معدنی خواهند بود [۱]. این عدد برای نفت و گاز به ترتیب ۴۶ و ۶۳ سال می‌باشد. در سال‌های آینده زغال‌سنگ به عنوان فراوان‌ترین و مطمئن‌ترین سوخت فسیلی جهان مطرح شده و درخواست جهانی برای زغال‌سنگ به شدت

افزایش خواهد یافت. البته نمونه‌هایی از این تقاضا امروزه نیز در برخی کشورهای فاقد نفت و گاز به وضوح قابل رویت است [۲]. طبق آمار آژانس بین‌المللی انرژی، در سال ۲۰۱۲، ۴۱٪ از انرژی برق جهان توسط نیروگاه‌های زغالی تأمین شده و پیش‌بینی می‌شود این میزان به ۴۴٪ در سال ۲۰۳۰ برسد [۱]. در شکل ۱ میزان تولید انرژی از هر یک از منابع تولید انرژی برای سال‌های ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۵ آورده شده است و این میزان تا سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی شده است که با توجه به این نمودار روند صعودی مصرف زغال‌سنگ در سال‌های آینده مشاهده می‌گردد که این لزوم توجه بیشتر به تولید زغال را نشان می‌دهد.

امروزه صنعت فولادسازی بازار جهانی و اقتصاد زغال‌سنگ را پررونق ساخته است. طبق گزارش انجمن جهانی زغال‌سنگ، ۷۰٪

می‌کنند. بطور کلی شیرها ماشین‌هایی با قابلیت انعطاف زیاد هستند و تقریباً هر نوع لایه‌ای را می‌برند، از گسل‌ها به خوبی عبور می‌کنند، تغییرات لایه و جنس زغال‌سنگ را به خوبی می‌پذیرند و زمان تلف شده ناشی از مشکلات تکنیکی و زمین‌شناسی در آن‌ها بسیار اندک است.

شیر برش‌هایی عمیق ایجاد می‌کند و برای لایه‌های ضخیم تا بسیار ضخیم مناسب است اما به سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تعمیر و نگهداری بالایی نیاز دارد. به علت توان تولید بالا معمولاً هزینه کل آن کمتر است. سرعت شیر با بار، ۵ تا ۶ متر در دقیقه و بدون بار حدود ۱۴ متر در دقیقه است. ضخامت لایه قابل استخراج با شیر یک طبلکه ۱/۲ تا ۴/۵ متر و با شیر دو طبلکه ۲ تا ۴/۵ متر تغییر می‌کند [۳]. مهم‌ترین دلایل عمومیت پیدا کردن شیرها عبارت‌اند از: راندمان بالا، ایمنی بالا، انعطاف‌پذیری بالا، سهولت کاربرد، قیمت کمتر نسبت به سایر دستگاه‌های با کارکرد یکسان [۳].

بزرگترین عیب شیر خرد کردن زیاد زغال است به طوری که ۵۰ تا ۶۰ درصد زغال کنده شده زیر ۱۲ میلیمتر و ۸۰ تا ۹۰ درصد آن زیر ۵۰ میلیمتر است. ذرات ریز زغال باعث گرد و غبار شده و علاوه بر آن ممکن است خطر انفجار گرد زغال وجود داشته باشد. شیرها بر اساس تعداد طبلکه‌ها و ثابت و یا قابل تنظیم بودن طبلکه‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند: شیر یک طبلکه ثابت، دو طبلکه ثابت، یک طبلکه قابل تنظیم و دو طبلکه قابل تنظیم [۳]. در شکل ۲ نمونه‌ای از شیر در حال کار در روش جبهه کار طولانی نشان داده شده است.

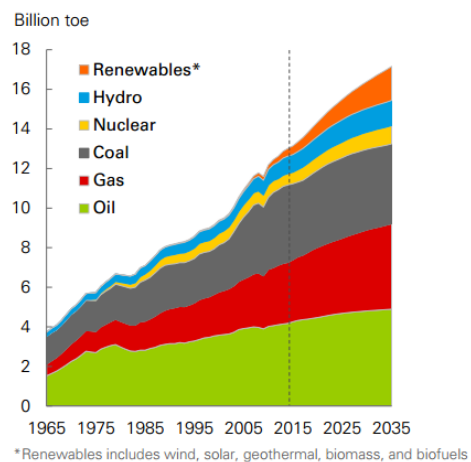


شکل ۲- ماشین درام شیر در حال کار در یک پهنه جبهه کار طولانی

در بسیاری از موارد برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر یک طرح باید هزینه‌های بسیاری را متحمل گردید که از نظر اقتصادی، پرهزینه و از نظر زمانی بسیار وقت‌گیر هستند و گاهی عملاً از نظر فنی قابل اجرا نمی‌باشند. در این وضعیت، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد می‌تواند در کاهش زمان و هزینه‌ها

فولاد جهان با استفاده از زغال‌سنگ تولید می‌شود. جهان صنعتی امروز که به صورت سرسام‌آوری نیازمند فولاد می‌باشد، به طور غیرمستقیم به زغال‌سنگ نیز وابستگی قطعی دارد [۱]. با توجه به اینکه یکی از شاخص‌های توسعه‌یافتگی کشورها میزان مصرف سرانه فولاد آنها است، لذا می‌توان میزان مصرف سرانه زغال‌سنگ را نیز به طور غیرمستقیم شاخص توسعه یافتگی کشورها در نظر گرفت. شاهد این ادعا مصرف ۸۲٪ زغال‌سنگ جهان توسط شش کشور چین، آمریکا، آلمان، ژاپن، روسیه و هندوستان است که چهار مورد اول چهار قدرتمند اقتصادی جهان به شمار می‌آیند [۱]. برای استخراج زغال‌سنگ از روش‌های مختلفی از جمله روش جبهه کار طولانی، اتاق و پایه و غیره استفاده می‌شود. روش جبهه کار طولانی، روشی مکانیزه است که در زمره روش‌های بزرگ مقیاس از نظر بهره‌برداری و یکی از ارزان‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی است. در این روش در مقایسه با هر روش استخراج دیگر به ازای آماده‌سازی مشخص، تناژ استخراجی بالاتری بدست می‌آید [۳].

از جمله مهم‌ترین اهداف مکانیزاسیون می‌توان به مواردی همچون کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش بهره‌وری، توسعه سریع‌تر، معدنکاری سریع‌تر، معدنکاری با ایمنی بیشتر، حذف جبهه کارهای کوچک و به عبارت دیگر متمرکز نمودن عملیات استخراج، دستیابی به نرخ تولید بیشتر در هر شیفت، معدنکاری با کارکنان کمتر و انتخاب کارکنان با کارایی بیشتر اشاره کرد [۵]. روش جبهه کار طولانی عمدتاً به سه شکل دستی، استفاده از آتشکاری و مکانیزه انجام می‌شود. در روش مکانیزه اغلب از دو ماشین رنده و درام شیر برای عمل خردایش استفاده می‌شود.



شکل ۱- عمده منابع تولید انرژی و پیش‌بینی میزان مصرف هر یک از منابع تا سال ۲۰۳۵ [۴]

شیرها ماشین‌های نسبتاً باریکی هستند که روی ناوزنجیری جبهه کار حرکت و معمولاً یک برش با عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتیمتر ایجاد

مؤثر باشد. یکی از این روش‌ها استفاده از مدل‌سازی عددی است. اوندن و ادواردز کاربرد تئوری برش و تکنیک تشخیص لایه زغال را در طراحی شیربر مورد بررسی قرار دادند [۶]. تیریاکی مطالعه‌ای برجا بر روی عمر خدمات و پارامترهای مصرف ناخن شیربر انجام داده است [۷]. چانگ لونگ و همکاران آرایش ناخن‌های شیربر را بر اساس تغییرات بار مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، نتایج نشان می‌دهند که آرایش متجانس گوشه‌ها یک ضریب نوسان بار برش‌دهنده کوچک‌تر از دیگر شکل‌های آرایش دارد و درام با ۴ پره آغازین کوچک‌ترین ضریب را دارد. سرعت چرخشی و انتقالی درام نه تنها بوسیله آرایش ناخن‌ها بلکه بوسیله تعداد پره‌ها تأثیر می‌پذیرند [۸].

سونگ یونگ و همکاران آزمایش خصوصیات برش‌دهنده یک درام شیربر را در مقاله‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند [۹]. همچنین سونگ یونگ و همکاران تحقیقی تجربی بر روی یک درام شیربر جدید انجام دادند. آنها برای بهبود راندمان برش و درصد زغال کلوخه درام شیربر، یک درام شیربر جدید با پره‌های با قطر متغیر با توجه به مشخصه زغال و تئوری تشابه را گسترش دادند. در زمان یکسان، تشابه دیواره زغال با توجه به تئوری تشابه توسعه یافته بود. همچنین آزمایش‌های برش بر روی سطح آزمایش برش زغال و سنگ برای درام شیربر جدید و یک درام موجود انجام یافته بود. برای فهم برتری و عدم برتری دو درام، پارامترهای آزمایش مانند مصرف ویژه برش‌دهنده، نوسان بار و درصد زغال کلوخه درام‌ها بر اساس سرعت چرخشی یکسان و سرعت انتقالی (کشش) آغازین یکسان مقایسه شده بود و دو درام دارای شروع‌کننده پره‌های مشابه، ترتیب پیک‌های مشابه و تعداد کل پیک‌های مشابه بودند. نتایج نشان می‌دهند که درصد زغال کلوخه برش داده شده در درام جدید، بهتر از درام موجود است و درصد کلوخه درام جدید بیش از ۳ درصد از درام موجود افزایش یافته است. در زمان یکسان، مصرف ویژه برش‌دهنده درام‌ها تقریباً یکسان اما نوسان بار درام جدید بزرگ‌تر است [۱۰].

ژین ژیان و همکاران کاربرد معدنکاری با شیربر برای لایه‌های نازک و نرم زغال با سقف سخت را مطالعه کرده است [۱۱]. یونگ و همکاران، خصوصیات یک ناخن برش‌دهنده جدید را برای شیربرهای زغال‌سنگ توضیح دادند [۱۲]. فانگ و همکاران آزمایش و تحلیل خطا برای عملیات مکان‌یابی خودکار شیربر را در یک جبهه کار مکانیزه انجام دادند [۱۳]. فان و همکاران استراتژی کنترل سیستم هوشمند تنظیم‌کننده ارتفاع شیربر را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. لیو و همکاران تحلیل پارامترهای مؤثر بر عملکرد بارگیری درام شیربر را بررسی کردند [۱۵]. جانو و همکاران تأثیر پارامترهای موقعیت درام و ضخامت بازوی درام را بر روی عملکرد بارگیری زغال آزمایش کردند [۱۶]. مین و همکاران کمترین حد انتقال گرد و غبار قابل تنفس را در یک جبهه کار بسیار طولانی با شیربر دوطبلکه مورد

بررسی قرار دادند [۱۷]. کانگ و همکاران یک ماشین برش خطی برای تشخیص عملکرد برش سنگ یه ناخن برش دهنده طراحی کردند [۱۸]. کیم و همکاران اثر زاویه کجی ناخن‌های مخروطی را بر روی دما، فرسایش و عملکرد برش سنگ ناخن بررسی کردند [۱۹].

لی و چویی در تحقیقی توان برشی دیسک برنده را مطابق با الگوی توزیع درزه از جمله زوایای مختلف درزه، جهت‌داری‌های مختلف درزه و فواصل مختلف درزه‌داری در مدل‌های توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از نرم‌افزار *PFC 2D* آنالیز کردند [۲۰]. سان و همکاران با استفاده از *PFC 2D* فرآیند خردشدگی سنگ توسط دیسک برنده *TBM* را شبیه‌سازی کردند [۲۱]. مون با استفاده از روش اجزاء گسسته (*PFC 2D*) به بررسی شرایط بهینه برش سنگ در *TBM*‌های سنگ سخت پرداخت [۲۲]. لی و چویی با استفاده از برنامه عددی *PFC 3D* رفتار برشی دیسک برنده بر روی سنگ را بررسی کردند [۲۳]. چویی و لی رفتار برشی سنگ را توسط تک دیسک برشی با استفاده از کد جریان سه بعدی ذرات (*PFC 3D*) مورد بررسی قرار دادند [۲۴].

حائری و همکاران با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و

مدل‌سازی با نرم‌افزار *PFC 2D* به بررسی اثرات مقاومت برشی بر شکست برشی سخت پرداختند [۲۵]. حائری و سرفرازی با استفاده از

PFC شکست برشی سیمان را مدل‌سازی کردند [۲۶]. سرفرازی و همکاران رفتار برشی درزه‌های ناپیوسته را تحت بارگذاری نرمال بالا

با استفاده از *PFC 2D* بررسی کردند [۲۷]. سرفرازی و همکاران با استفاده از *PFC 2D* مکانیزم شکست دیسک‌های برزیلی با درزه‌های

موازی چندگانه را مدل‌سازی کرده و مورد بررسی قرار دادند [۶].

یانگ و همکاران با استفاده از *PFC* رفتار مکانیکی شکست را در نمونه‌های گرانیت سوراخ شده پس از بالا بردن درجه حرارت بررسی

کردند [۲۸].

۲- روش کار

در روش‌های مدل‌سازی عددی، با توجه به نوع مدل ممکن است از روش‌های مختلفی استفاده شود مانند روش المان محدود، روش

احجام محدود، روش تفاضلات محدود، روش المان طیفی و غیره. در این پژوهش برای مدل‌سازی از نرم‌افزار *PFC 2D vol.5* استفاده

شده است که با روش المان مجزا مدل‌سازی را انجام می‌دهد. در این شکل ۳ فلوچارت مراحل انجام این پژوهش آورده شده است. در این

پژوهش برای مدل‌سازی‌ها از سه پارامتر قطر طبلک (۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌متر)، جابجایی طبلک در جهت افق (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ میلی‌متر

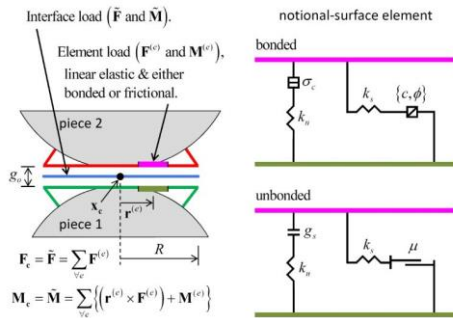
بر دور) و سرعت خطی (۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه) به عنوان

متغیر استفاده شده است.

تا زمانی که از حد مقاومت تجاوز کند و پیوند شکسته شده و المان‌های غیرپیوندی را ایجاد کند، در حالی که رفتار یک المان غیرپیوندی الاستیک است و اصطکاک و لغزش بوسیله اعمال یک حد *Coulomb* بر روی نیروی برشی تطبیق پیدا می‌کند. هر المان یک نیرو و یک گشتاور را داراست که از قانون نیروی جابجایی پیروی می‌کند، در حالی که واکنش نیرو-جابجایی سطح مشترک *flat-joint* یک رفتار معلول است که شامل استخراج از یک حالت کاملاً پیوندی برای یک حالت کاملاً غیرپیوندی و اصطکاک است [۳۰].

۲-۲- ساخت مدل

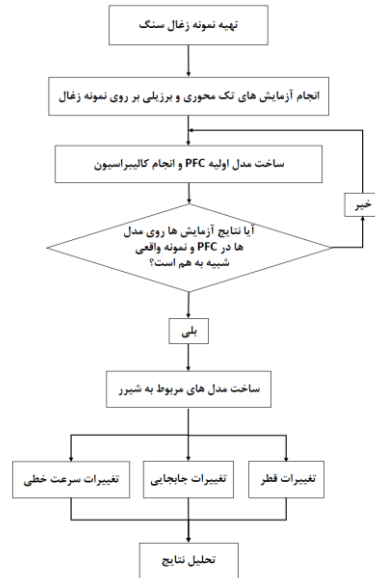
در این پژوهش به جهت ساخت مدل‌ها، ابتدا نمونه‌هایی از زغال سنگ از معدن مکانیزه پروده طبس جمع‌آوری شد و تست‌های تک‌محوری و برزلی روی آن انجام گرفت و سپس با توجه به نتایج حاصله به کالیبراسیون مدل پرداخته شد.



شکل ۴- رفتار و مؤلفه‌های تغییر شکل یافته مدل سطح مشترک مسطح [۳۰]

۲-۳- جمع‌آوری داده

جهت انجام این پژوهش، نیاز به داده‌های واقعی بود. از این رو معدن زغال سنگ پروده طبس، تنها معدن مکانیزه استخراج زغال سنگ در ایران، به عنوان محل مورد مطالعه انتخاب گردید. ناحیه پروده با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۰ کیلومتری جنوب شهرستان طبس واقع است. میزان ذخیره زغال سنگ کک‌شو این ناحیه بیشترین ذخایر زغال سنگ کشور بوده و ۱/۱ میلیارد تن برآورد شده است. با توجه به کیفیت و کمیت ذخایر ناحیه پروده، بیشترین فعالیت‌های اکتشافی و طرح‌های بهره‌برداری در طبس به این مناطق اختصاص یافته است. ارتفاع متوسط ناحیه زغال‌دار پروده از سطح دریا ۸۵۰ متر می‌باشد. در این ناحیه ۲۹ لایه زغالی شناسایی شده که به طور کلی به گروه‌های A, B, C, D, E و F تقسیم‌بندی شده‌اند. مهم‌ترین لایه‌های زغالی با ضخامت قابل استخراج (بیش از ۰/۴ متر) عبارت‌اند از: C1, C2, B1, B2, E و D که از بین آنها لایه C1 دارای تداوم و گستردگی بیشتری در منطقه بوده و از قابلیت معدنکاری بالایی برخوردار است. میزان خاکستر لایه‌ها تا حد زیادی



شکل ۳- فلوجارت مراحل انجام پژوهش

۲-۱- نرم‌افزار PFC

این نرم‌افزار ساخت شرکت *Itasca* است و از روش المان مجزا برای مدل‌سازی استفاده می‌کند. دارای نسخه‌های دو بعدی و سه بعدی است. المان‌ها در حالت دو بعدی دیسک و در حالت سه بعدی بال (*ball*) نامیده می‌شوند. این نرم‌افزار توانایی مدل کردن سرعت و برهم‌کنش ذرات کروی را با روش المان مجزا دارد که در سال ۱۹۷۹ میلادی توسط کندال و استراک مطرح شد. کاربرد اساسی این روش برای مطالعاتی در حوزه رفتار مواد گرانولار و شبیه‌سازی تست‌های عددی است. این نرم‌افزار توانایی مدل کردن مسائل پیچیده در بحث مکانیک جامدات و جریان ذرات دائمی را دارد. مسائل فیزیکی که با بحث حرکت و برهم‌کنش بین ذرات کروی ارتباط دارند را می‌توان بشکل مستقیم با نرم‌افزار *PFC 3D* مدل کرد. در نرم‌افزار *PFC 3D* از بال‌ها به عنوان المان استفاده می‌شود بنابراین از این نرم‌افزار برای مدل کردن مستقیم مربوط به حرکت و برهم‌کنش بین جریان ذرات کروی می‌توان استفاده کرد [۲۹].

نرم‌افزار *PFC 2D* دارای پنج مدل اتصال است که شامل اتصالات توده‌ای، خطی، ذرات سیمانه شده، موازی و سطح مشترک مسطح است [۳۰]. در این پژوهش از اتصال ذرات به روش اتصال سطح مشترک مسطح استفاده شده است.

مدل *flat-joint* رفتار میکروساختاری از یک سطح مشترک با اندازه محدود الاستیک خطی و پیوند شده و اصطکاک ارائه می‌دهد که ممکن است آسیب جزئی را تحمیل کند (شکل ۴). سطح‌های مشترک در المان‌ها از هم جدا شده‌اند. هر المان پیوندی یا غیرپیوندی است و شکست هر المان پیوندی در آسیب جزئی سطح مشترک سهیم است. رفتار یک المان پیوندی الاستیک خطی است

با نمونه واقعی که در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفته است، مقایسه می‌شود. اگر مقادیر بدست آمده و شکل شکست‌ها مشابه نمونه واقعی باشد، نمونه برای انجام مدل‌سازی نهایی آماده است در غیر این صورت دوباره ساخت نمونه اولیه انجام می‌گیرد و بارگذاری‌ها تکرار می‌شوند.

جدول ۲- مقدار نهایی میکرو پارامترها برای ساخت نمونه پایه

ردیف	میکرو پارامتر	مقدار نهایی
۱	ارتفاع مدل	۱۰۸ میلی‌متر
۲	عرض مدل	۵۴ میلی‌متر
۳	ضریب انبساطی	۱/۲
۴	فاکتور انباشتی	۰/۷
۵	چگالی	۲۵۰۰ نیوتن بر سانتی‌متر مربع
۶	حداقل قطر ذرات	۰/۶ میلی‌متر
۷	حداکثر قطر ذرات	۱/۲ میلی‌متر
۸	فشار مواد	۰/۱ مگاپاسکال
۹	تغییرات فشار مواد	۰/۰۱
۱۰	تخلخل	۰/۰۸
۱۱	فاصله‌داری ذرات	۰/۵ میلی‌متر
۱۲	مدول الاستیک	۱۹۰ مگاپاسکال
۱۳	نسبت سختی	۲
۱۴	ضریب اصطکاکی	۰/۵
۱۵	مقاومت کششی	۰/۸۵ مگاپاسکال
۱۶	انحراف معیار مقاومت کششی	۰/۰۰۱ مگاپاسکال
۱۷	مقاومت فشاری	۰/۷ مگاپاسکال
۱۸	انحراف معیار مقاومت فشاری	۰/۱ مگاپاسکال
۱۹	زاویه اصطکاک	۲۰ درجه

به ضخامت آنها بستگی دارد. خاکستر لایه‌های زغال سنگ به‌طور کلی بیشتر از ۳۰ درصد است. یکی از مشکلات اصلی در قابلیت فرآوری و استفاده از زغال سنگ کانسار پروده، بالا بودن میزان گوگرد است که میانگین آن به بیش از ۱ درصد می‌رسد. میزان مواد فرآر، کم تا متوسط است و از جنوب شرقی به طرف شمال غربی افزایش یافته و متوسط آن ۲۳ تا ۲۵ درصد است. بیشینه گاز متان در لایه‌های BI و CI در عمق ۶۵۰ متری، حدود ۲۴ متر مکعب در هر تن زغال سنگ استخراجی است. درجه حرارت با عمیق شدن لایه‌ها افزایش یافته و در عمق ۶۵۰ متری به ۵۰ درجه سانتی‌گراد و گاهی بیشتر از آن می‌رسد. عمق سطح ایستایی آب زیرزمینی از ۲ متر تا حدود ۶۰ متر متغیر است [۳۱]. در این معدن، استخراج به روش جبهه کار طولانی پسرو و به طور تمام مکانیزه انجام می‌شود. ۲۷ کارگاه استخراج برای این معدن طراحی گردیده که در مجموع ۲۹ میلیون تن زغال خام از آنها استخراج خواهد شد. در حال حاضر کارگاه WI این معدن در حال استخراج است [۳۱].

۲-۴- کالیبراسیون مدل

جهت انجام این آزمایش‌ها ابتدا نمونه‌ای از زغال سنگ معدن پروده طبس تهیه شد. سپس این نمونه، برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و کشش غیرمستقیم به آزمایشگاه مکانیک سنگ فرستاده شد که نتایج بدست آمده در جدول ۱ آورده شده است. جهت کالیبراسیون زغال در نرم‌افزار PFC ، با توجه به نمودار شکست و مقدار مقاومت تک‌محوری و آزمایش برزلی انجام گرفته بر روی نمونه‌های زغال معدن پروده طبس، آزمایش تک‌محوری و برزلی شبیه‌سازی می‌گردد.

جهت انجام آزمایش‌های تک‌محوری و برزلی در نرم‌افزار PFC ، ابتدا باید نمونه اولیه ایجاد شده و به تعادل برسد. آنگاه نمونه ایجاد شده، با استفاده از کدهای آزمایش‌های تک‌محوری و برزلی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. در جدول ۲ میکرو پارامترهای استفاده شده و مقادیر نهایی آن‌ها برای ساخت نمونه پایه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های زغال سنگ مورد آزمایش و نتایج

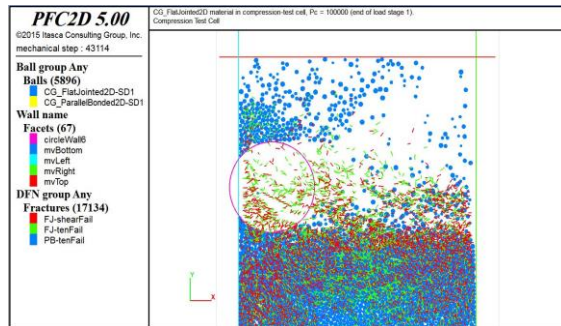
حاصل از آزمایش‌های تک‌محوری و برزلی					
قطر (mm)	طول (mm)	سطح (mm ²)	زاویه سطح شکست (Deg)	مقاومت فشاری UCS (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
۵۵/۴	۱۰۸	۲۴۰۹/۳	۵۵	۳/۱	-----
۵۵/۴	۳۵	۲۴۰۹/۳	-----	-----	۰/۶۲

شکل ۵- a: نحوه شکست نمونه زغال سنگ در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری؛ b: نحوه شکست نمونه ساخته شده در نرم‌افزار PFC در آزمایش مقاومت تک‌محوری؛ c: نمودار شکست حاصل از شکست نمونه زغال در آزمایش مقاومت تک‌محوری؛ d: نمودار شکست حاصل از شکست نمونه ساخته شده در نرم‌افزار PFC در آزمایش مقاومت تک‌محوری

در شکل‌های ۵ و ۶ مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و برزلی در نرم‌افزار PFC با نتایج آزمایش‌های واقعی نشان داده شده است.

پس از اینکه نمونه اولیه تحت بارگذاری قرار گرفت و آزمایش تک‌محوری و برزلی به اتمام رسید، شکل شکست و نمودار شکست

المانی از ناخن شیر (که در ادامه شیر نامیده می شود) استفاده شده است که در شکل ۸ نمونه ای از آن مشاهده می شود. جهت حرکت المان شیر از سمت راست به سمت چپ است.



شکل ۸- نمونه ای از مدل ساخته شده به عنوان شیر

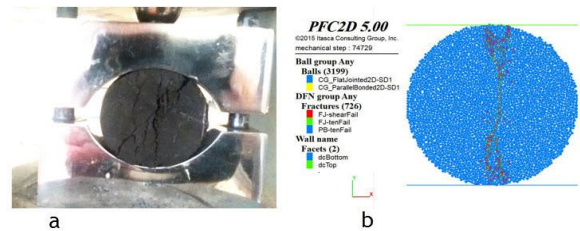
متغیرهای در نظر گرفته شده برای شیر، جابجایی به ازای هر دور شیر (که در ادامه به اختصار جابجایی نامیده می شود)، سرعت خطی و قطر برش دهنده هستند. جابجایی ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ میلی متر بر دور در نظر گرفته شده است. سرعت خطی ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر در دقیقه می باشد و ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی متر برای قطر برش دهنده انتخاب گردید.

۳- بحث و بررسی

برای مدل سازی شیر در این پژوهش تعداد ۲۷ مدل ساخته شد. سپس مدل ها بر اساس قطر، جابجایی و سرعت خطی تقسیم بندی شدند که با توجه به مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی ها، تغییرات سرعت خطی برای هر سه سرعت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر بر دقیقه یکسان بود که در نهایت دلیل مؤثر نبودن این پارامتر در مدل سازی ها، پارامتر سرعت خطی حذف گردید و تنها ۹ مدل برای بحث و بررسی ارائه شد. در جدول ۴ مشخصات این ۹ مدل ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات مدل های شیر

نام مدل	قطر (میلی متر)	جابجایی (میلی متر بر دور)
مدل ۱	۱۰	۰/۵
مدل ۲	۱۰	۱/۰
مدل ۳	۱۰	۱/۵
مدل ۴	۱۵	۰/۵
مدل ۵	۱۵	۱/۰
مدل ۶	۱۵	۱/۵
مدل ۷	۲۰	۰/۵
مدل ۸	۲۰	۱/۰
مدل ۹	۲۰	۱/۵



شکل ۶- نحوه شکست نمونه زغال سنگ در آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی) a: مدل ساخته شده در نرم افزار PFC c: نمودار شکست در تست برزیلی در نرم افزار PFC

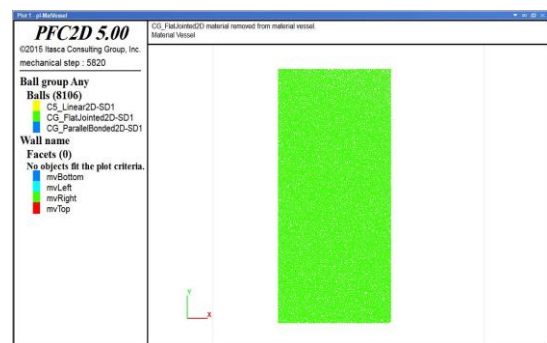
همچنین در جدول ۳ نتایج عددی آزمایش های واقعی و آزمایش های نرم افزار PFC نشان داده شده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج عددی حاصل از آزمایش های واقعی روی زغال سنگ و آزمایش های نرم افزار PFC

مقدار مقاومت فشاری	مقدار مقاومت کششی	
مقدار واقعی	۳/۱ مگاپاسکال	۰/۶۲ مگاپاسکال
مقدار حاصل از مدل سازی	۲/۳ مگاپاسکال	۰/۸۳ مگاپاسکال

۵-۲- ساخت مدل نهایی

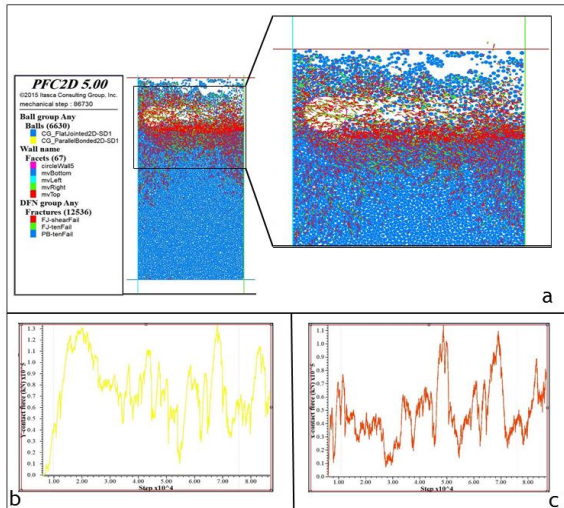
پس از اینکه کالیبراسیون مدل مورد نظر صورت گرفت، با استفاده از نتایج آن، مدل پایه برای مدل سازی شیر ساخته می شود. بر این اساس سطحی با ابعاد ۱۰۸×۵۴ میلی متر به عنوان سطح اولیه انتخاب گردید. سپس با حذف کردن قسمت بالای آن، شرایط برای قرار دادن برش دهنده مهیا گردید. در شکل ۷ نمونه ای از این سطح ایجاد شده، نشان داده شده است.



شکل ۷- نمونه ای از سطح اولیه جهت مدل سازی

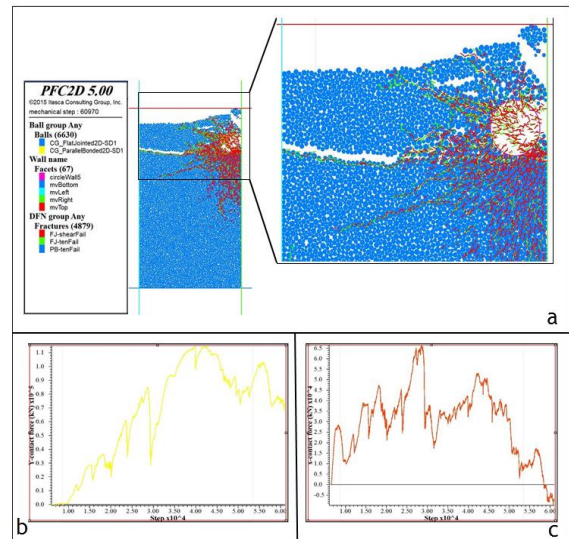
برای مدل سازی شیر از یک سطح دایره ای شکل به عنوان

در شکل ۹ نتایج مربوط به مدل با قطر ۱۰ میلیمتر، جابجایی ۰/۵ میلیمتر بر دور آورده شده است. در شکل ۹ (مدل ۱) مقدار حداکثر نیروی وارد بر شیر در هر سه مدل در جهت X برابر با ۶۶۰۰۰ کیلونیوتن و در جهت Y ۱۱۴۰۰۰ کیلونیوتن می‌باشد.



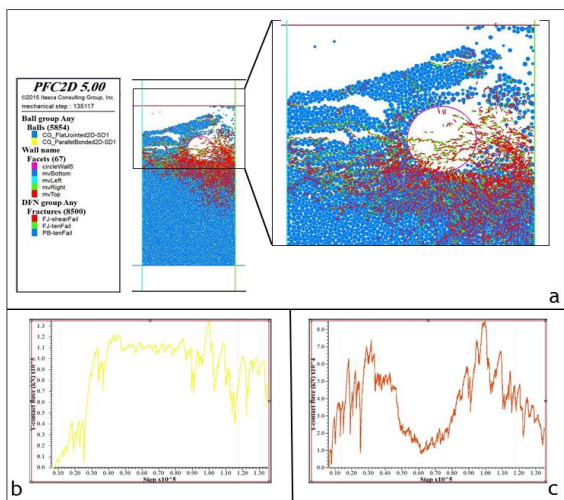
شکل ۱۱- مدل ۳- شیر با قطر ۱۰ میلیمتر و جابجایی ۱/۵ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نیروی وارده در جهت Y کاهش پیدا کرده و به مقدار ۱۳۲۰۰۰ کیلونیوتن رسیده است ولی در جهت X نیروی وارده بر شیر افزایش یافته است. همچنین میزان ترک‌ها افزایش یافته و قطعات به مراتب کوچک‌تری نسبت به مدل‌های قبل ایجاد کرده است.

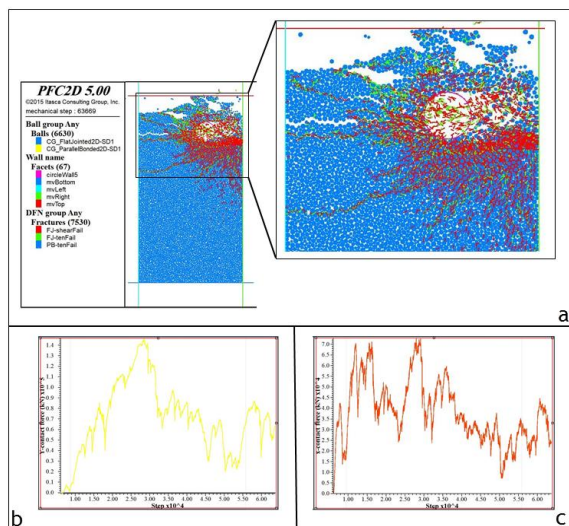


شکل ۹- مدل ۱- شیر با قطر ۱۰ میلیمتر و جابجایی ۰/۵ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X

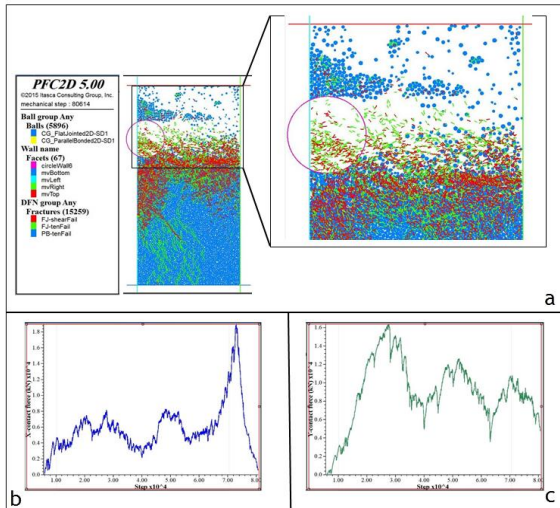
در مدل ۲ (شکل ۱۰) نیروی وارد بر شیر در جهت X برابر با ۷۳۰۰۰ کیلونیوتن و در جهت Y ۱۴۶۰۰۰ کیلونیوتن است که در مقایسه با سرعت زاویه‌ای ۰/۵ میلیمتر بر دور افزایش نیروی وارده مشاهده می‌شود.



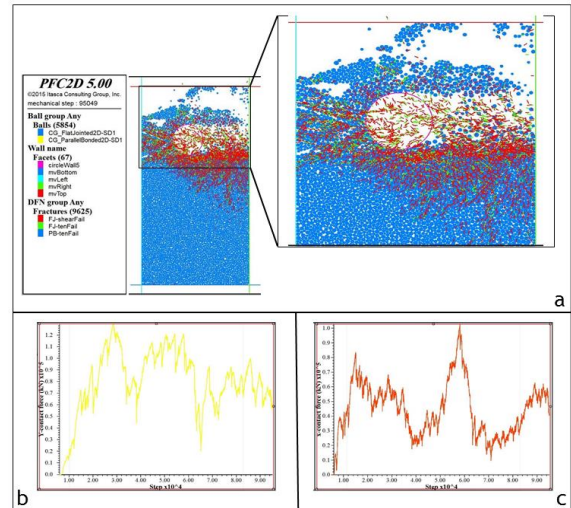
شکل ۱۲- مدل ۴- شیر با قطر ۱۵ میلیمتر و جابجایی ۰/۵ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X



شکل ۱۰- مدل ۲- شیر با قطر ۱۰ میلیمتر و جابجایی ۱/۰ میلیمتر بر a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X



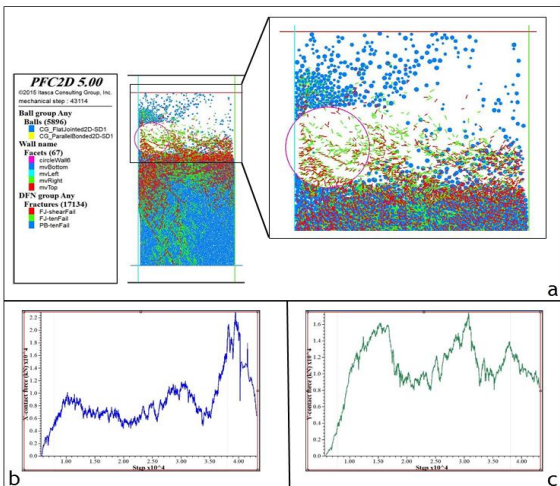
شکل ۱۵- مدل ۷- شیر با قطر ۲۰ میلیمتر و جابجایی ۰/۵ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X



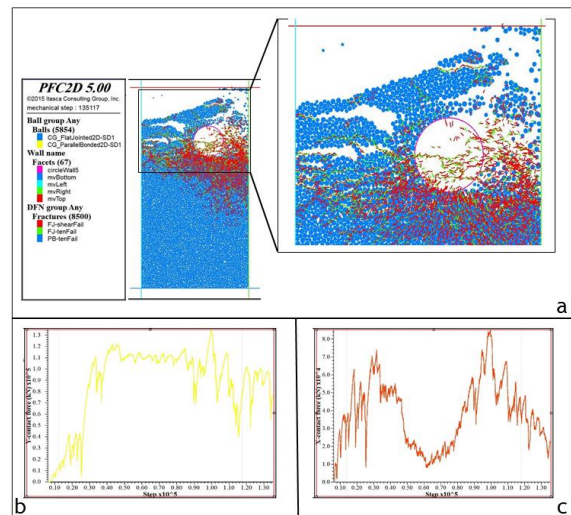
شکل ۱۳- مدل ۵- شیر با قطر ۱۵ میلیمتر و جابجایی ۱/۰ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X

در مدل‌های ۷، ۸ و ۹ (شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷) نیروها در جهت X و Y نسبت به مدل‌های قبلی کاهش چشمگیری دارند، بطوری که در حدود ۲۰ درصد از نیروی وارد بر شیر در مدل با قطر ۱۵ میلیمتر است. در این مدل‌ها نیز با افزایش جابجایی نیروی وارد بر شیر در جهت‌های X و Y افزایش پیدا می‌کند.

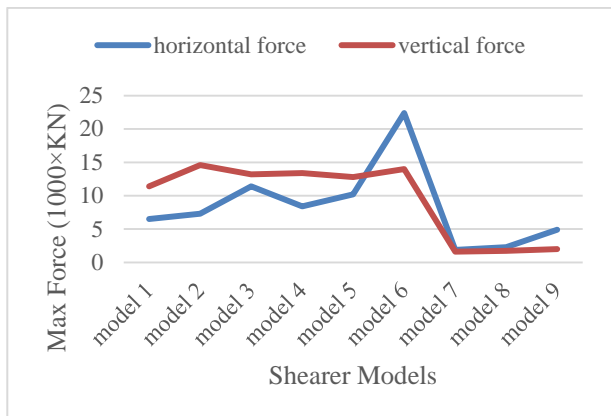
از مقایسه نتایج مدل‌های ۴، ۵ و ۶ که با قطر ۱۵ میلیمتر و جابجایی متفاوت هستند (شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴)، روند افزایش نیروی وارد بر شیر در جهت‌های X و Y قابل مشاهده است. البته در مدل با جابجایی ۱/۵ میلیمتر بر دور، مقدار حداکثر نیروی وارد بر شیر در جهت X افزایش زیادی داشته است که این افزایش به دلیل وجود دیواره سمت چپ مدل است که می‌توان آنرا به عنوان خطا در نظر گرفت. این مقدار در حدود ۱۰۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ کیلونیوتن قابل پذیرش خواهد بود اما روند افزایشی آن ثابت است.



شکل ۱۶- مدل ۸- شیر با قطر ۲۰ میلیمتر و جابجایی ۱/۰ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X



شکل ۱۴- مدل ۶- شیر با قطر ۱۵ میلیمتر و جابجایی ۱/۵ میلیمتر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیر --b: نیروی وارد بر شیر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیر در جهت محور X



شکل ۱۸- تغییرات حداکثر نیروی وارده بر شیربر در جهت افقی و قائم

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار PFC، عملکرد دستگاه شیربر مدل‌سازی شد که در نهایت نتایج زیر بدست آمد:

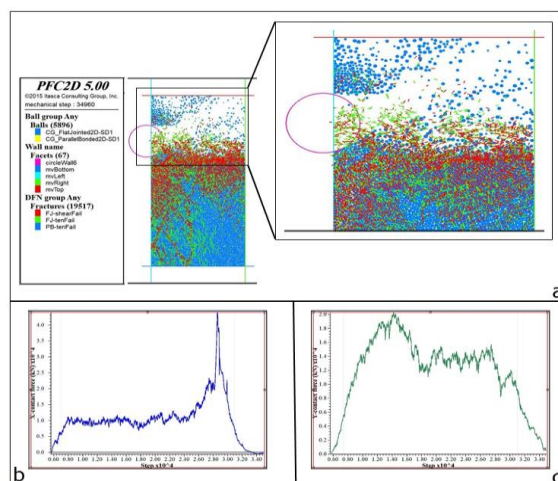
* در مدل‌های شیربر بهترین نتایج مربوط به مدل‌های با قطر ۲۰ میلی‌متر هستند که حداکثر نیروی وارده بر شیربر در جهت افقی و قائم مقدار بسیار کمی است. پس از این مدل‌ها، مدل‌هایی با قطر ۱۰ میلی‌متر قرار دارند.

* بهترین نتایج مدل‌های شیربر زمانی اتفاق می‌افتد که قطر شیربر تقریباً ۲ برابر عمق برش است و در مرحله بعد، نتایج بهتر مربوط به قطر نزدیک به عمق برش می‌باشد که ۱۰ میلی‌متر است.

* در مدل‌های با قطر ۱۵ میلی‌متر بیشترین مقدار نیروی وارد بر شیربر ثبت شده است که در جابجایی ۱/۵ میلی‌متر بر دور بیشترین مقدار نیروی وارده قرار دارد. در اینجا نیروی وارد از طرف دیواره سمت چپ بر ذرات و شیربر تأثیرگذار است ولی با این اوصاف نیز مقدار نیروی ثبت شده نسبت به مدل‌های دیگر شیربر بیشتر است.

* روند حداکثر نیروی وارد بر شیربر در جهت قائم تقریباً با افزایش قطر کاهش می‌یابد ولی این روند در جهت افقی ابتدا افزایشی بوده و جابجایی پایین‌تر، باعث کاهش نیروی وارد بر شیربر در جهت افقی می‌گردد. در نتیجه بهترین مدل در قطر ۲۰ میلی‌متر نیز کمترین جابجایی را دارا می‌باشد که برابر با ۰/۵ میلی‌متر بر دور است. البته کم بودن اختلاف بین نیروی وارد بر شیربر در جابجایی‌های بالاتر ممکن است باعث صرف نظر کردن از جابجایی‌های پایین‌تر جهت افزایش تولید گردد.

* در بین تمامی مدل‌های رنده و شیربر، مدل‌های شیربر با قطر ۲۰ میلی‌متر کمترین مقدار حداکثر نیروی وارد بر شیربر را دارا می‌باشد که در مدل با جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر دور کمترین مقدار تمامی مدل‌ها ثبت گردید است. بنابراین بر اساس مقدار حداکثر



شکل ۱۷- مدل ۹- شیربر با قطر ۲۰ میلی‌متر و جابجایی ۱/۵ میلی‌متر بر دور a: نحوه گسترش ترک‌ها در اثر برش شیربر --b: نیروی وارد بر شیربر در جهت محور Y --c: نیروی وارد بر شیربر در جهت محور X

با مقایسه نتایج حاصل از تمامی مدل‌های ساخته شده از شیربر می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قطر شیربر باعث کاهش نیروی وارد بر آن در تماس با مواد می‌شود. این قطر بزرگ‌تر زمانی که به ۲۰ میلی‌متر می‌رسد باعث کاهش نیروی وارده می‌شود که این یعنی وقتی که قطر برش‌دهنده به دو برابر قطر نفوذ می‌رسد عملکرد بهتری دارد. با توجه به اینکه نیروی وارده در جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر دور کمتر است و میزان ترک‌ها نیز کمتر است، این مدل را باید بهترین مدل نامید اما از طرفی می‌توان مدل با سرعت بیشتر را هم بهینه دانست چون با توجه به تولید بالاتر این نیروی وارده قابل چشم‌پوشی است ولی مشکل اصلی به تولید مواد ریز و گرد و غبار بر می‌گردد که باعث محدودیت می‌شود. بهرحال در اینجا با توجه به رویکرد بررسی همان مدل با جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر دور، در مدل‌های شیربر بهترین دانسته خواهد شد.

در این پژوهش مقایسه عملکرد شیربر در مدل‌های مختلف بر اساس حداکثر نیروی وارد بر المان شیربر انجام گرفته است که در نمودار شکل ۱۸ تغییرات حداکثر نیروی وارده بر شیربر در هر مدل نشان داده شده است. در اینجا بیشترین مقدار حداکثر نیروی وارده بر شیربر در جهت X مربوط به مدل با قطر ۱۵ میلی‌متر و جابجایی ۱/۵ میلی‌متر بر دور می‌باشد که این افزایش ناگهانی مربوط به نیروی دیواره چپ بر ذرات و همچنین خود شیربر است. کمترین مقدار نیز مربوط به مدل با قطر ۲۰ میلی‌متر و جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر دور است که بهترین مدل برای برش شیربر انتخاب گردید.

Technology 26 (2016) 1109–1115

[14] Gao, K., Du, Ch., Dong, J., Zeng, Q., Influence of the Drum Position Parameters and the Ranging Arm Thickness on the Coal Loading Performance. *Minerals* (2015), 5, 723–736, www.mdpi.com/journal/minerals.

[15] FAN, Q., LI, W., WANG, Y., ZHOU, L., YANG, X., YE, G., Control strategy for an intelligent shearer height adjusting system. *Mining Science and Technology* 20 (2010) 0908–0912.

[16] Liu, S., Du, Ch., Zhang, J., Jiang, H., Parameters analysis of shearer drum loading performance. *Mining Science and Technology (China)* 21 (2011) 621–624.

[17] FANG, X., ZHAO, J., HU, Y., Tests and error analysis of a self-positioning shearer operating at a manless working face. *Mining Science and Technology* 20 (2010) 0053–0058.

[18] Kang, H., Cho, J.W., Park, J.Y., Jang, J.S., Kim, J.H., Kim, K.W., Rostami, J., Lee, J.W., A new linear cutting machine for assessing the rock-cutting performance of a pick cutter. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 88 (2016) 129–136.

[19] Kim, U., Hirrob, K., Oliveiraa, D., Kim, A., Effects of the skew angle of conical bits on bit temperature, bit wear and rock cutting performance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 100 (2017) 263–268.

[20] Lee, S.J., Choi, S.O., 2011. Numerical Analysis on Cutting Power of Disc Cutter with Joint Distribution Patterns. *Journal of Korean Society for Rock Mechanics, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 21, No. 3, pp. 151-163.

[21] SUN, J.S., 2011. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters. *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 32. No. 6. pp. 1891-1897.

[22] Moon, T. J. Oh, 2012. “A Study of Optimal Rock-Cutting Conditions for Hard Rock TBM Using the Discrete Element Method”, *Rock Mech Rock Eng* (2012) 45:837–849.

[23] Lee, S.J., Choi, S.O., 2013. Three Dimensional Numerical Analysis on Rock Cutting Behavior of Disc Cutter Using Particle Flow Code. *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 23, No. 1, pp. 54-65.

[24] Choi, S. O. and Lee, S. J, 2015. “Three-Dimensional Numerical Analysis of the Rock-Cutting Behavior of a Disc Cutter using Particle Flow Code”, *KSCE Journal of Civil Engineering* 19(4):1129-1138.

[25] Haeri, H., Sarfarazi, V., Hedayat, A., Tabaroei, A., 2016, Effect of Tensile Strength of Rock on Tensile Fracture Toughness Using Experimental Test and PFC2D Simulation. *Journal of Mining Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 647–661.

[26] Haeri, H., Sarfarazi, V., 2016, Numerical simulation of tensile failure of concrete using Particle Flow Code (PFC). *Computers and Concrete*, Vol. 18,

نیروی وارد بر دستگاه برش‌دهنده بهترین مدل مربوط به مدل شیرر با قطر ۲۰ میلیمتر و جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر دور است.

۵- سپاس‌گزاری

بدینوسیله از مدیریت و کارکنان معدن زغال‌سنگ مکانیزه پروده طبس به جهت همکاری در راستای جمع‌آوری داده‌های زغال تقدیر و تشکر می‌شود.

۶- منابع

- [1] Jalali, S. E., & Eftekari, M. (۲۰۰۸) World Coal Association (2012), Uses of coal, www.Worldcoal.org
- [2] IEA (International Energy Agency), (2010), Key World Energy Statistics, Paris, France, 82 pages.
- [3] Stefanko, R., Bise, C.J., Coal Mining Technology: Theory and Practice, SME-AIME(1983), Littleton, co.
- [4] bp.com/energyoutlook/2017 edition
- [5] Ataei, M., Khalokakaei, R., Hossieni, M., 2009, Determination of coal mine mechanization using fuzzy logic. *Mining Science and Technology*, Vol.19, No.2, pp. 149–154.
- [6] Sarfarazi, V., Haeri, H., Fatehi Marji, M., Zhu, Zh., 2017, Fracture Mechanism of Brazilian Discs with Multiple Parallel Notches Using PFC2D. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61 (4), pp. 653–663, 2.
- [7] Tiryaki, B. In situ studies on service life and pick consumption characteristics of shearer drums, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* (2004), pp. 107-122.
- [8] Chang-long, D. Song-yong, L. Xin-xia, C. Tijian, L. Study on pick arrangement of shearer drum based on load fluctuation, *J China Univ Mining & Technol* 18 (2008), pp. 0305–0310.
- [9] Song-yong, L. Chang-long, D. Xin-xia, C. Xue, Ch. Model test of the cutting properties of a shearer drum, *Mining Science and Technology* 19 (2009), pp. 0074–0078.
- [10] Song-yong, L. Chang-long, D. Xin-xia, C. Jing, S. Experiment research on a new shearer drum, *Procedia Earth and Planetary Science* 1 (2009), pp. 1393-1397.
- [11] Xin-xian, Zh. Qiang, Sh. Bao-fu, L. Xiao-jun, L. Shearer mining application to soft thin-seam with hard roof, *Procedia Earth and Planetary Science* 1 (2009), pp. 68–75.
- [12] Yong, L. Dekun, Zh. Qingliang, W. Hongtao, L. Gang, Ch. Shirong, G. Preparation and properties of a new cutting pick of coal shearers, *Mining Science and Technology* 20 (2010), pp. 0794–0796.
- [13] Min, J., Yingpeng, F., Yong, Y., Hongmin, W., Song, S., Jie, L., Migration law of respirable dust on a super-long fully mechanized double-shearer working face. *International Journal of Mining Science and*

No. 1, 039-051.

[27] Sarfarazi, V., Haeri, H., Shemirani, A. B., 2017, SHEAR BEHAVIOR OF NON-PERSISTENT JOINT UNDER HIGH NORMAL LOAD. Strength of Materials, Vol. 49, No. 2.

[28] Yang, Sh.Q., Tian, W.L., Huang, Y.H., 2018, Failure mechanical behavior of pre-holed granite specimens after elevated temperature treatment by particle flow code. Geothermics, 72. pp. 124–137.

[29] Potyondy, D., Cundall, P.,. A bonded-particle model for rock. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr,41 (2004). pp. 1329-1364.

[30] Potyondy, D. Material-Modeling Support in PFC 2015. Itasca Consulting Groupe, Inc.

[۳۱] گزارش‌های زمین‌شناسی. طبس: معدن زغال سنگ طبس،

دفتر فنی، بخش زمین‌شناسی؛ ۱۳۷۵.