

مطالعه تاثیر شکل هندسی دیسک TBM بر خردایش سنگ توسط نرم افزار PFC2D

وهاب سرفرازی^{۱*}؛ نسرين ميخک پيرالوند^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۲- کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه صنعتی همدان

پذیرش: ۹۵/۱۲

دریافت: ۹۵/۰۴

چکیده

در این تحقیق با استفاده از کد جریان ذره دو بعدی (PFC2D) تاثیر شکل نوک برنده بر مکانیزم خردشدگی سنگ بررسی شده است. به این منظور، دو مدل عددی با مقاومت کششی متفاوت ۵ MPa و ۲۵ MPa ساخته و به ترتیب تحت تنش محصورکننده ۵ MPa و ۲۰ MPa قرار گرفتند. ۸ برنده با اشکال هندسی متفاوت با نرخ 0.2 m/s به سطح سنگ برخورد کرده تا اینکه ۴ mm در سنگ نفوذ نماید. بطور کلی ۱۶ مدلسازی انجام شد. سنگ زیر برنده سه رفتار مکانیکی مختلف را نشان می‌دهد که عبارتند از: ناحیه شکسته شده زیر برنده، ناحیه پلاستیک دارای ترک‌های موضعی زیر ناحیه شکسته شده و ناحیه الاستیک. زمانیکه مقاومت کششی سنگ ۵ MPa است، تنش شکست حاصل از تیغه مقعر شکل کمترین و تعداد ترک‌های ایجاد شده بیشترین است. این بدین معنی است که در سنگ با مقاومت ۵ MPa، شکل برنده تاثیر زیادی بر تنش شکست و وسعت شکست سنگ دارد. زمانیکه مقاومت کششی سنگ ۲۵ MPa است، تیغه U شکل بیشترین شکست را ایجاد می‌کند ولی تنش شکست حاصل از تیغه‌ها یکسان است. این بدین معنی است که در سنگ با مقاومت ۲۵ MPa، شکل برنده تاثیری بر تنش شکست ندارد ولی وسعت شکست را کنترل می‌کند. بطور کلی تیغه مقعر شکل و U شکل با کمترین تنش مصرفی، بیشترین شکست را در سنگ با مقاومت کششی ۵ MPa و ۲۵ MPa ایجاد می‌کنند. با افزایش مقاومت کششی، تنش شکست افزایش می‌یابد مادامی که وسعت شکست کم می‌شود.

کلمات کلیدی

TBM، نرم‌افزار PFC2D، برنده، مقاومت کششی، فشار محصورشوندگی

۱- مقدمه

تونل‌ها از مهمترین نیازهای شهرنشینی مدرن امروزی می‌باشند. با گذشت زمان استفاده از ماشین‌های تونل‌کشی ابعاد وسیعتری به‌خود گرفته است. امروزه پروژه‌های تونل‌سازی زیادی در ارتباط با ملزومات حمل و نقل و جاده‌ها در سرتاسر دنیا در حال اجرا می‌باشند. پیشرفت طراحی ماشین حفاری مستلزم آگاهی از عوامل تأثیرگذار بر برش مکانیکی سنگ می‌باشد. از مهمترین عوامل بکارگیری موفق ماشین‌های حفاری، طراحی بهینه و پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تونل می‌باشد که تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی و هندسه ابزار برش است. یکی از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده عملکرد ماشین حفر تونل (*TBM*)، شاخص نرخ نفوذ می‌باشد. فاکتورهای متعددی بر میزان نرخ نفوذ ماشین‌های حفر تونل تأثیرگذار هستند. به‌طور کلی عوامل تأثیرگذار بر نرخ نفوذ را می‌توان به سه گروه خصوصیات سنگ، مشخصات فنی *TBM* و هندسه تونل دسته‌بندی کرد. خصوصیات توده‌سنگ به وسیله مشخصات سنگ بکر و ساختار ناپیوستگی توده‌سنگ تعیین می‌شود. اکثر پارامترهای مهم سنگ بکر که نرخ نفوذ را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند متأثر از مقاومت فشاری تک محوره سنگ می‌باشند بگونه‌ای که هر چه مقاومت سنگ بیشتر باشد نرخ نفوذ کمتر خواهد بود. وجود ناپیوستگی‌های ضعیف در توده‌سنگ می‌تواند میزان نرخ نفوذ را افزایش دهد. این میزان افزایش نرخ نفوذ، متأثر از خصوصیات ناپیوستگی‌ها از قبیل جهت‌داری، زاویه‌داری، پرخش‌دگی و درجه هوازدگی است. مهم‌ترین مشخصات فنی *TBM* تأثیرگذار بر نرخ نفوذ، قطر و نوع دیسک برنده، نیروی نفوذ هر دیسک، گشتاور پیچشی دستگاه، فاصله‌داری دیسک‌ها، مهارت اپراتور و ... می‌باشد. هندسه تونل نیز نقش عمده‌ای بر نرخ نفوذ داشته و اغلب این نقش را با اعمال تغییرات در خصوصیات فنی *TBM* ایفا می‌کند. بسیاری از پارامترها از قبیل گشتاور، نیرو و انرژی مصرفی کل تحت تأثیر هندسه، قطر تونل و پایداری تونل هستند. با توجه به اهمیت بالای نرخ نفوذ *TBM* محققان فراوانی سعی در

ابداع روابطی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ *TBM* براساس پارامترهای یاد شده داشتند. تارکوی^۱ مدلی ارائه کرد که در آن از سختی کل سنگ به عنوان عامل تخمین زنده استفاده شده بود. عیب این روش عدم استفاده از مشخصات توده سنگ و خصوصیات ماشین در پارامترهای ورودی به مدل برای پیش‌بینی می‌باشد [۱]. مدل ارائه شده توسط گراهام^۲ نرخ نفوذ را به عنوان تابعی از نیروی فشاری هر برنده و مقاومت فشاری نامحسوس سنگ بستر تونل محاسبه می‌کرد [۲]. عیب این مدل در نظر نگرفتن مشخصه‌های ناپیوستگی سنگ و برنده‌ها بود. برولند^۳ و همکاران نشان دادند که علاوه بر زاویه‌داری، فاصله داری صفحات ضعیف هم تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ نفوذ دارند [۳]. مدل ارائه شده توسط ایناراتو^۴ توانایی در نظر گرفتن اثر رده‌بندی ساختار توده سنگ را در روند تخمین نرخ نفوذ داشت [۴]. چپایا^۵ به منظور بررسی فرآیند نفوذ دندان‌برشی سخت در مواد ناهمگن، روش المان محدود را بکار گرفت [۵]. گانگ^۶ با استفاده از مدل‌سازی عددی دوبعدی به روش المان مجزا تأثیر جهت‌داری درزه بر خردایش سنگ را بررسی کردند [۶]. نتایج نشان داد که جهت‌داری درزه بر روند شروع ترک و انتشار آن و نرخ نفوذ *TBM* تأثیر مهمی دارد. گانگ^۷ و همکاران تأثیر شکنندگی سنگ بر خردشدگی سنگ را با روش عددی *UDEC* آنالیز نمودند [۷]. نتایج نشان داد که سرعت نفوذ *TBM* با افزایش شکنندگی سنگ افزایش می‌یابد. تحقیقات انجام شده توسط هانگسو^۸ و همکاران نشان داد که تنش محصورکننده تأثیر قابل توجهی بر عوامل کلیدی خردشدگی سنگ از قبیل زاویه ترک، طول ترک و اتلاف انرژی دارد [۸]. در مطالعات فوق، تأثیر هندسه برنده بر مکانیزم شکست سنگ زیر برنده بررسی نشده است. هدف این تحقیق تعیین بهینه‌ترین شکل هندسی نوک تیغه می‌باشد بگونه‌ای که با صرف کمترین نیرو، بیشترین وسعت شکست را حاصل نماید. از آنجاییکه نرم افزار *PFC2D* توانایی مدل‌سازی رشد و گسترش ترک را دارد لذا در این تحقیق از این نرم افزار استفاده شده است.

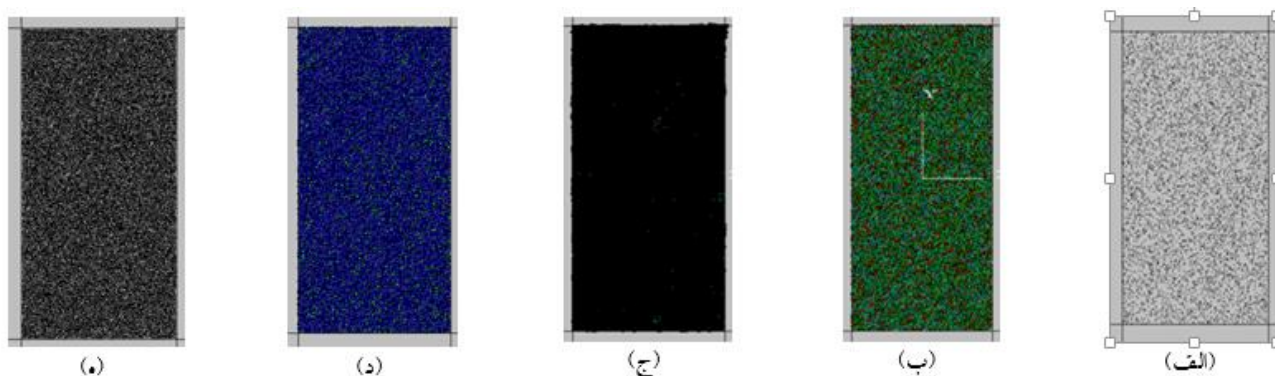
۲- معرفی نرم افزار PFC2D

روش عددی المان مجزا ابتدا توسط کاندل برای تحلیل مسائل مکانیک سنگ معرفی شد [۹] و سپس در مکانیک خاک توسط کاندل و استراک به کار برده شد [۱۰]. در این روش، اجسام مجزا می‌توانند جابجایی و چرخش‌های محدودی داشته باشند [۱۱]. در سال ۲۰۰۲ کوک کاربرد روش المان مجزا در ناپیوستگی‌ها را توسعه داده و متداول نمود [۱۲]. در نرم افزار PFC2D محیط سنگ به صورت مجموعه فشرده از ذرات با اندازه‌های غیر یکنواخت و اشکال کروی و یا دایروی مدلسازی می‌شود که ذرات در نقاط اتصال خویش با پیوندهای موازی به هم چسبیده‌اند. مجموعه فشرده مصالح در این سیستم طوری تولید می‌شوند که ذرات به خوبی به هم وصل شده و نیروهای بین دانه‌ای اندک باشد [۱۴]. حرکت و اندرکنش نیروهای ذرات توسط روش تفاضل محدود محاسبه می‌گردد. تماس بین ذرات توسط اتصال‌های خطی یا غیرخطی معرفی می‌شود. اتصال خطی، که در این مقاله از آن استفاده شده است، ارتباط الاستیک را بین تغییرشکل و نیروهای اعمال شده به دیسک‌ها مهیا می‌نماید. مدل اتصال تماسی و موازی که در کد جریان ذره کاربرد دارد، بیانگر مقاومت بین دیسک‌ها می‌باشند. مدل اتصال موازی که در این مقاله از آن استفاده شده است با

میکروپارامترهای زیر معرفی می‌گردد؛ مدول یانگ دیسک‌ها، نسبت سختی نرمال به سختی برشی دیسک، ضریب اصطکاک دیسک، مقاومت نرمال اتصال موازی، مقاومت برشی اتصال موازی، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت نرمال، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت برشی، مینیمم شعاع دیسک‌ها، ضریب افزایش‌دهنده شعاع دیسک، مدول یانگ اتصال موازی دیسک‌ها و نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال موازی. در ادامه مراحل آماده سازی مدل عددی، تعیین میکروپارامترهای فوق و کالیبراسیون مدل، آماده سازی مدل‌های اصلی، انواع هندسه تیغه‌ها و نحوه بارگذاری مدل ارائه گردیده است.

۲-۱- مراحل آماده سازی مدل عددی اولیه

بطور کلی آماده سازی مدل در نرم افزار PFC2D شامل ۵ مرحله می‌باشد که عبارتند از: ایجاد مرزهای مدل و تولید دیسک‌ها با ابعاد مورد نظر (شکل ۱-الف)، فشردگی اولیه ذرات (شکل ۱-ب)، اعمال تنش ایزوتروپیک (شکل ۱-ج)، کاهش تعداد ذرات معلق (شکل ۱-د) و اعمال پیوندهای موازی (شکل ۱-ه).



شکل ۱: نمایی از مراحل مختلف آماده سازی مدل، (الف) ایجاد مرزهای مدل و تولید دیسک‌ها، (ب) فشردگی اولیه ذرات، (ج) اعمال تنش ایزوتروپیک، (د) کاهش تعداد ذرات معلق و (ه) اعمال پیوندهای موازی

دیگر باید میکروپارامترهای معرفی شده فوق را بگونه ای تعیین کرد که رفتار مکانیکی مدل عددی (مقاومت کششی) و نمونه آزمایشگاهی سنگ آهک و گنایس یکسان گردد. مقاومت

۲-۲- کالیبراسیون مدل

بعد از ساخت مدل اولیه بایستی مدل را کالیبره نمود. به عبارت

می‌باشد. با سعی و خطا، میکروپارامترها بگونه ای انتخاب شدند که مدل‌های عددی با مقاومت کششی 5 MPa و 25 MPa حاصل شود (جدول ۱).

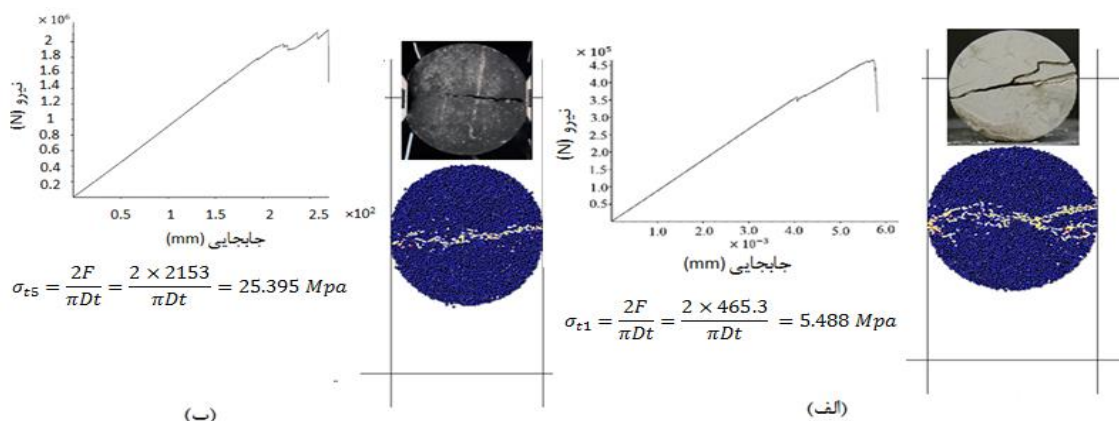
کششی برزیلی سنگ آهک و گنایس توسط استاندارد *ASTM* [۱۳]، اندازه گیری شد. به این ترتیب که نمونه‌های دیسکی با قطر 56 mm و ضخامت 27 mm آماده سازی شد و تحت آزمایش برزیلین قرار گرفت. نرخ بارگذاری 0.02 mm/s

جدول ۱: میکروپارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل عددی با مقاومت کششی 5 MPa و 25 MPa

مقاومت کششی (MPa)		میکروخصوصیات	مقاومت کششی (MPa)		میکروخصوصیات
۲۵	۵		۲۵	۵	
۱	۱	$\bar{\lambda}$ افزایش دهنده شعاع اتصال موازی	دیسکی	دیسکی	نوع ذره
۵	۵	$\bar{E}$ مدول یانگ اتصال موازی (GPa)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	دانسیته (kg/cm^3)
۳	۳	$\left(\frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}\right)$ نسبت سختی های اتصال موازی	۰/۲۷	۰/۲۷	مینیم شعاع دیسک (mm)
۰/۵	۰/۵	ضریب اصطکاک	۱/۷۶	۱/۷۶	نسبت مینیم شعاع به ماکزیم شعاع دیسک
۱۵۲	۲۹	مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (MPa)	۰/۰۸	۰/۰۸	نسبت تخلخل
۳۸	۷/۲۵	مقاومت نرمال اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۰/۷	۰/۷	ضریب میرایی (α)
۱۵۲	۲۹	مقاومت برشی اتصال موازی، میانگین (MPa)	۵	۵	مدول یانگ تماسی E (GPa)
۳۸	۷/۲۵	مقاومت برشی اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۳	۳	$\left(\frac{k_n}{k_s}\right)$ نسبت سختی های اتصال تماسی

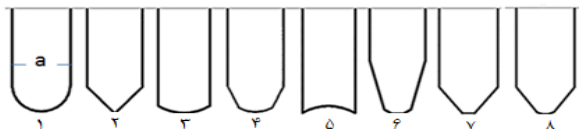
الگوی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. زمانیکه مقاومت کششی کم است، چند نوار کششی منجر به شکست سنگ می‌گردد درحالیکه با افزایش مقاومت کششی، یک سطح گسیختگی باعث شکست نمونه می‌شود.

شکل ۲-الف و ب الگوهای شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی را به ترتیب برای مقاومت‌های 5 MPa و 25 MPa نشان می‌دهد. خطوط زرد رنگ (رنگ روشن) و قرمز رنگ (رنگ تیره)، نشان دهنده ترک‌های کششی و ترک‌های برشی می‌باشند. بطور کلی الگوهای شکست مدل‌های عددی مشابه



شکل ۲: الگوی شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی به ترتیب برای مقاومت‌های الف) 5 MPa و ب) 25 MPa

دیواره‌های مورب کوتاه است. تیغه شماره ۵ دارای لبه مقعر است. تیغه شماره ۶ دارای لبه U شکل با دیواره‌های مورب بلند است. تیغه شماره ۷ دارای لبه به شکل V نوک تخت با لبه‌های تیز و دیواره‌های کوتاه است. تیغه شماره ۸ دارای لبه به شکل V نوک تخت با لبه‌های گرد است.



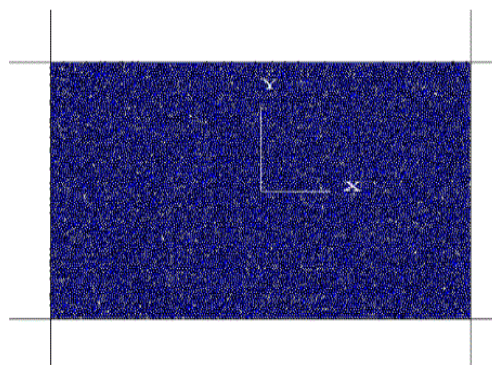
شکل ۴: انواع دیسک برنده با شکل هندسی مختلف

۲-۵- بارگذاری مدل‌ها

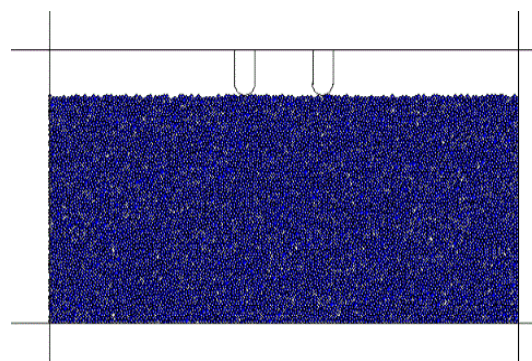
اعمال تنش در برنامه PFC توسط دیواره‌های مدل انجام می‌شود (شکل ۳-ب). سختی نرمال و برشی دیواره‌ها، ۲ برابر سختی دیسک‌ها انتخاب می‌شود تا دیواره‌ها نسبت به مدل سخت‌تر باشند و صلابت آزمایش حفظ شود. زاویه اصطکاک دیواره‌ها در مدل صفر انتخاب می‌شود تا اصطکاک بین دیوار و مدل ایجاد نشود. صفحات جانبی، فشار جانبی مورد نظر را بر نمونه اعمال می‌کنند و صفحه بالا وظیفه بارگذاری به دیسک‌ها را برعهده دارد. صفحه پایین نمونه را در محل ثابت نگه می‌دارد. در تمام آزمایش‌ها، نرخ بارگذاری استاتیکی دیوار برابر 0.2 m/s در نظر گرفته می‌شود. این میزان از بارگذاری منجر به فراهم ساختن شرایط بارگذاری استاتیکی می‌شود. برای تعیین این میزان بارگذاری، نرخ‌های مختلف بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفت و مشخص شد که در نرخ بارگذاری 0.2 و کمتر از آن منحنی بار-جابجایی روند خطی دارد و هیچگونه اعوجاج در آن مشاهده نمی‌شود. میزان تنش جانبی با مکانیزم کنترل شده‌ای ثابت می‌ماند. مدل‌های با مقاومت کششی MPa ۵ و ۲۵ به ترتیب تحت تنش محصورکننده MPa ۵ و ۲۰ قرار می‌گیرند. با حرکت صفحه فوقانی به سمت پایین، برنده به میزان 4 mm در سنگ نفوذ می‌نماید و توزیع نیروهای داخلی و نحوه شکست سنگ مطالعه می‌گردد. به منظور تجزیه و تحلیل نتایج از تنش شکست استفاده شده است. برای تعیین تنش شکست نیروی عکس العمل از دیوار بالایی برداشت شد و این

۲-۳- آماده سازی مدل اصلی

بعد از کالیبراسیون مدل، مدل‌های عددی با ابعاد 120×60 میلی‌متر ساخته شد (شکل ۳-الف). این مدل‌ها دارای 13456 دیسک می‌باشند. به منظور مهیا ساختن شرایط آزمایش، یک نوار افقی به عرض 10 میلی‌متر و طول 120 میلی‌متر از مدل حذف گردید (شکل ۳-ب). سپس دیسک برنده که وظیفه شکست سنگ را برعهده دارد، بین سطح سنگ و دیوار افقی بالایی نصب گردید.



(الف)



(ب)

شکل ۳: (الف) مدل عددی اصلی، (ب) مدل عددی حاوی دیسک برنده

۲-۴- انواع هندسه‌های دیسک

به منظور بررسی اثر شکل هندسی برنده بر الگوی شکست سنگ، ۸ شکل هندسی مختلف برای برنده مدلسازی شد. عرض تمام دیسک‌ها $a = 10 \text{ mm}$ است و ارتفاع آنها 10 mm است (شکل ۴). تیغه شماره ۱ دارای لبه U شکل است. تیغه شماره ۲ دارای لبه کاملاً V شکل است. تیغه شماره ۳ دارای لبه‌ای به شکل U خوابیده است. تیغه شماره ۴ دارای لبه U شکل با

محصورکننده 5 MPa ، نیروی کششی و فشاری ماکزیمم در زیر تیغه‌ها ایجاد شده است. این نشان می‌دهد که ترک از این نقاط آغاز می‌شود. بیشترین نیروی کششی ماکزیمم مربوط به هندسه‌های شماره ۵، ۶ و ۷ (شکل ۵-ه، و و ز) می‌باشد که نوک تیز هستند. به عبارت دیگر در میزان نفوذ 0.5 mm ، این سه تیغه بیشترین نیروی کششی ماکزیمم را به سنگ اعمال می‌کنند که منجر به تغییر شکل بیشتر سنگ و شکست سنگ گردد. کمترین نیروی کششی ماکزیمم نیز مربوط به هندسه‌های شماره ۱، ۴ و ۸ (شکل ۵-الف، د و ح) می‌باشد که U شکل می‌باشند. به عبارت دیگر در میزان نفوذ 0.5 mm ، این تیغه‌ها کمترین نیروی کششی ماکزیمم را به سنگ اعمال می‌کند که منجر به تغییر شکل کمتر سنگ و افزایش صلابت سنگ زیر تیغه می‌گردد. هر چه نوک تیغه از V شکل به U شکل تغییر می‌کند، مقدار نیروی کششی زیر تیغه افزایش می‌یابد. شکل ۶ نشان می‌دهد که در مدل با مقاومت کششی 25 MPa و تحت تنش محصورکننده 20 MPa ، نیروی کششی و فشاری ماکزیمم در زیر تیغه‌ها ایجاد شده است. در این شرایط نیروی کششی ماکزیمم در تمام دیسک‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. به عبارت دیگر در این مقاومت و محصور شوندگی و با این میزان نفوذ دیسک، نمی‌توان دیسکی را که منجر به بیشترین نیروی کششی ماکزیمم می‌شود شناسایی نمود. بطور کلی می‌توان دریافت که در مقاومت کششی 5 MPa و تحت تنش محصورکننده 5 MPa ، تیغه شماره ۵، ۶ و ۷ دارای بیشترین اثر تخریبی بر سنگ می‌باشد درحالی‌که با افزایش مقاومت کششی و فشار محصورکننده، به میزان نفوذ بیشتری نیاز است تا بتوان دیسک بهینه را شناسایی نمود.

نیرو به مساحت دیوار تقسیم شد. لازم به ذکر است، در این مدلسازی وضعیت کرنش صفحه‌ای حکمفرما است. شرایط مرزی مدل با دیوارهای پیرامون مدل کنترل می‌شود. به این ترتیب که دیواره‌های سمت چپ و راست، فشارهای جانبی را به مدل اعمال می‌کنند. با حرکت دیوار بالایی در خلاف جهت محور X نیرو به تیغه‌ها منتقل می‌شود و دیوار پایین نیز همواره ثابت است تا شرایط انجام آزمایش مهیا شود. گتنی است بار اعمال شده تیغه، توسط منحنی عکس العمل تیغه بارگذار قابل برداشت است. با انتخاب سختی نرمال و برشی تیغه‌ها در مقادیر بیشتر از سختی دیسک‌ها، صلبیت تیغه از دیسک‌ها بیشتر شده و امکان انجام شبیه‌سازی مهیا می‌شود.

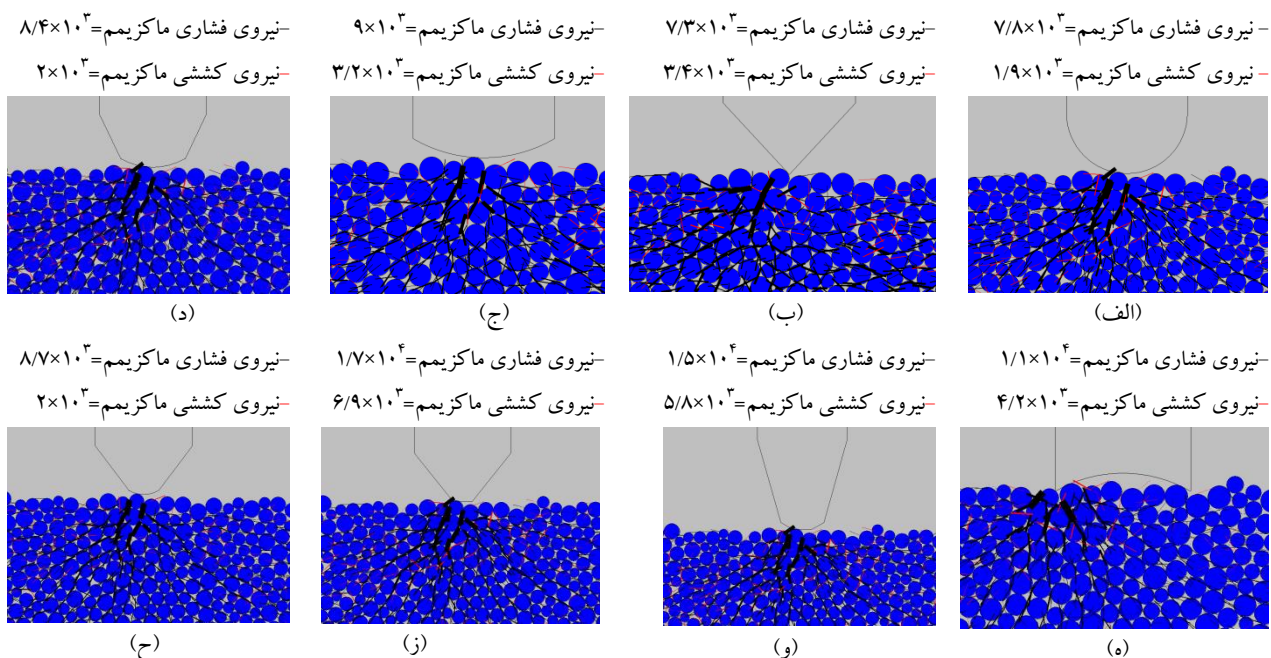
۳- بحث و نتایج

در ادامه تاثیر شکل هندسی برنده بر توزیع نیروهای داخلی مدل در نفوذ 0.5 mm دیسک و الگوی شکست سنگ بررسی شده است.

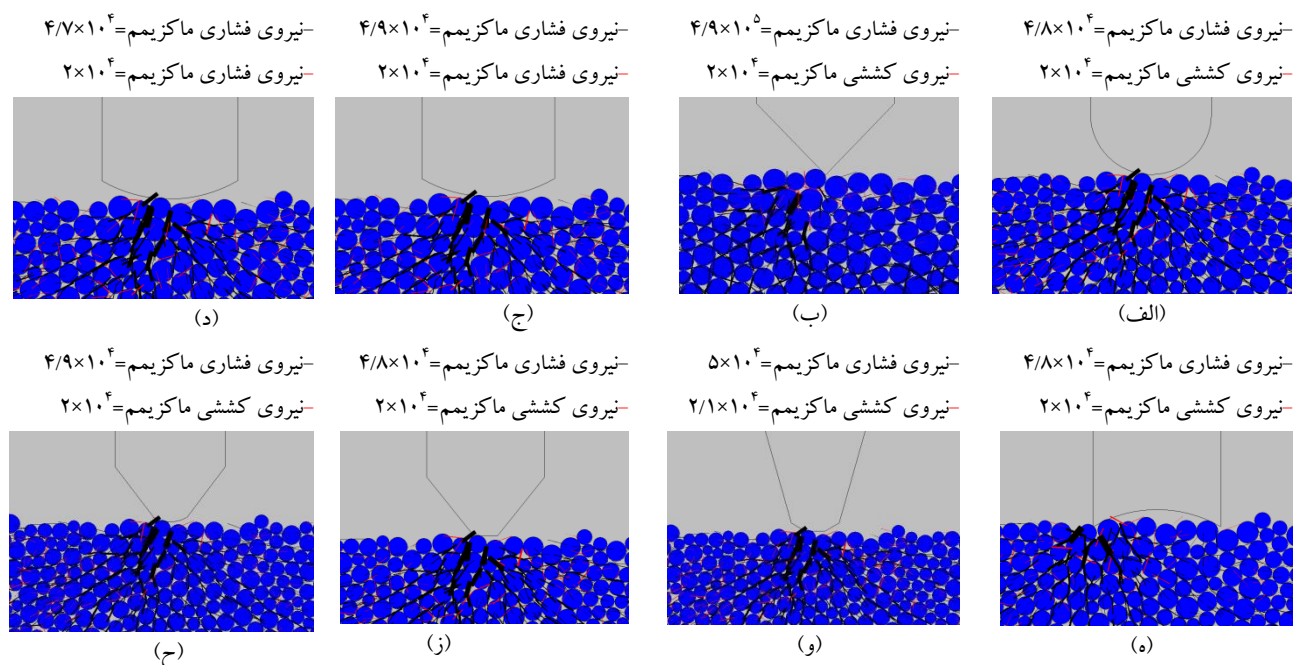
۳-۱- تاثیر شکل هندسی برنده بر نیروهای فشاری و

کششی داخلی مدل در لحظه شروع ترک

شکل‌های ۵ و ۶ توزیع نیروهای فشاری و کششی را در مدل‌های با مقاومت کششی 5 MPa و 25 MPa در نفوذ 0.5 mm دیسک نشان می‌دهد. این شکل‌ها برای تیغه‌های با شکل هندسی مختلف به ۸ بخش تقسیم شده است. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب نشان دهنده نیروهای کششی و فشاری می‌باشند. ضخامت این خطوط بیانگر بزرگی نیرو است. در این شکل مقادیر نیروی فشاری و کششی ماکزیمم بر حسب نیوتن نشان داده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که در مدل با مقاومت کششی 5 MPa و تحت تنش



شکل ۵: توزیع نیروهای فشاری و کششی برای نفوذ ۱ mm تیغه در مدل با مقاومت کششی ۵ MPa.



شکل ۶: توزیع نیروهای فشاری و کششی برای نفوذ ۵ mm تیغه در مدل با مقاومت کششی ۲۵ MPa.

نشان می‌دهد. در این شکل ترکهای کششی به رنگ زرد و ترکهای برشی به رنگ قرمز نمایان شده‌اند.

۲-۲- بررسی تاثیر شکل هندسی دیسک بر زون شکست

شکل ۷ الگوی ایجاد ترک تحت فشار حرکت یک دیسک را

پرداخته می‌شود.

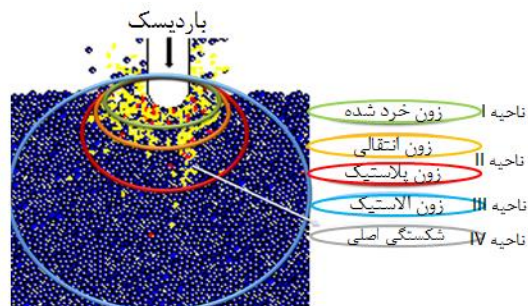
۳-۲-۱- تاثیر شکل هندسی دیسک بر زون شکست در سنگ با مقاومت کششی 5 MPa ، تحت فشارهای محصورکننده 5 MPa

شکل ۸ انواع شکست حاصل از نفوذ تیغه‌های با اشکال هندسی متفاوت در سنگ با مقاومت کششی 5 MPa و تحت فشارهای محصورکننده 5 MPa را نشان می‌دهد. نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده ۱ می‌باشد. میزان نفوذ دیسک 4 mm می‌باشد. در این شکل‌ها انواع نواحی آسیب دیده (ناحیه شکسته شده، ناحیه پلاستیک و ناحیه الاستیک) مشخص شده‌اند. ترک‌های کششی به رنگ زرد و ترک‌های برشی به رنگ قرمز نمایان می‌باشند. همان‌گونه که از تمام آرایش‌ها مشاهده می‌شود، ترک‌های کششی مود غالب شکست هستند که در مدل ایجاد می‌شوند.

(۱) تیغه شماره ۱: در این حالت زون خردشده مستقیم زیر تیغه و بصورت دایره‌ای در اطراف لبه تیغه ایجاد شده است (شکل ۸-الف). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/5$ است (a عرض دیسک است). در ناحیه II، یک شکستگی اصلی و چندین ریز شکستگی قابل شناسایی است. شکستگی اصلی در راستای محور تیغه و به سمت عمق ایجاد می‌شود. طول این شکستگی دو برابر عرض دیسک می‌باشد که نسبت به سایر آرایش‌ها کمتر است. شکستگی‌های کوچک نیز با امتداد 45° درجه نسبت به محور تیغه شکل گرفته است. مساحت ناحیه II تقریباً ۴ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/6$ می‌باشد.

(۲) تیغه شماره ۲- زون خردشده زیر تیغه ایجاد می‌شود و وسعت خردشدگی در یال‌های V بیشتر می‌باشد (شکل ۸-ب). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/5$ است. در این آرایش، مساحت ناحیه II تقریباً $1/25$ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/2$ می‌باشد. ترک اصلی شکل گرفته در ناحیه II دارای طولی معادل a و امتداد آن با محور تیغه 45° درجه است.

(۳) تیغه شماره ۳- در این حالت زون خردشده مستقیم در زیر تیغه و به صورت بیضی در اطراف لبه تیغه گسترده شده است (شکل ۸-ج). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/2$ است. مساحت



شکل ۷: الف) الگوی ایجاد ترک در اثر نفوذ تیغه در سنگ

شکل ۷، چهار ناحیه مختلف آسیب را نشان می‌دهد. اولین ناحیه (ناحیه I) که بین مرز سبز رنگ محصور است مربوط به ناحیه شکسته شده می‌باشد. این منطقه که تماماً شکسته شده است دارای تمرکز تنش بالایی می‌باشد. ترک‌های موجود در این ناحیه عمدتاً کششی هستند مادامیکه حضور ترک‌های برشی نیز قابل شناسایی می‌باشد. دومین ناحیه که بین مرز سبز و نارنجی رنگ محصور است مربوط به ناحیه انتقالی می‌باشد. در این ناحیه تعداد شکستگی‌ها کاهش می‌یابد و عمدتاً ترک‌های کششی باعث شکست بخشی سنگ می‌گردند. کاهش تعداد ترک‌ها در این ناحیه حکایت از کاهش تمرکز تنش در این منطقه و به عبارت دیگر کاهش تاثیر برنده در این زون دارد.

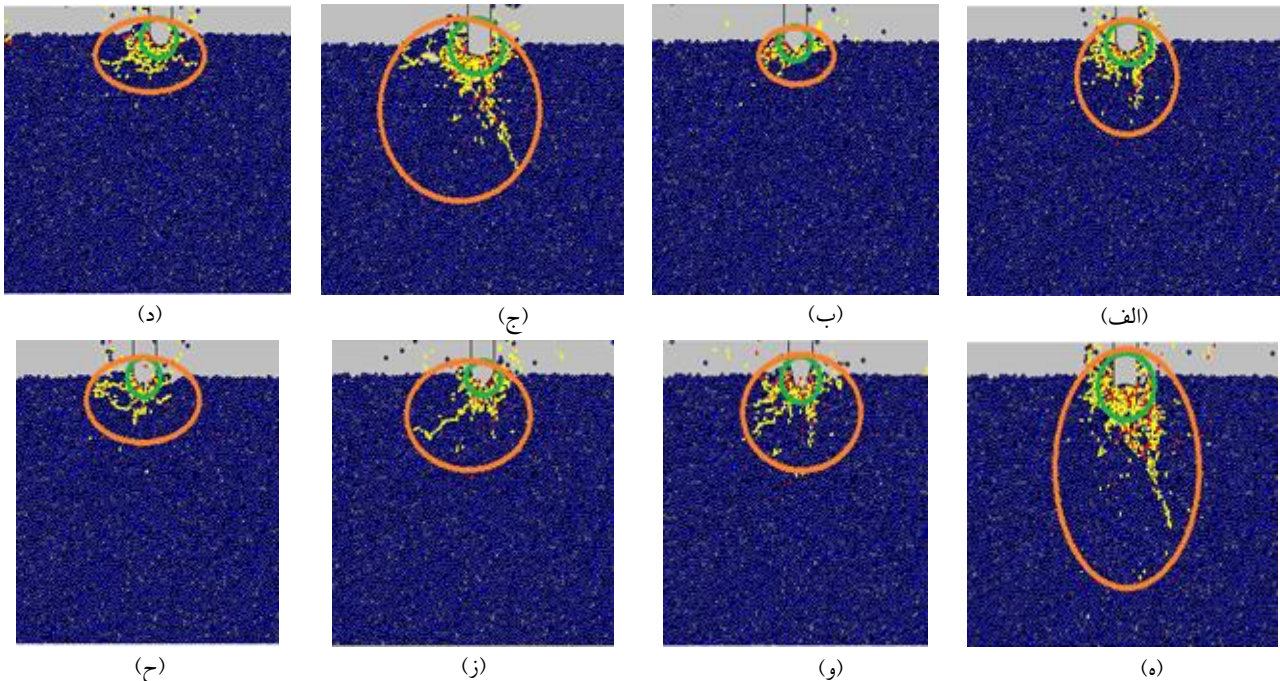
سومین ناحیه که بین مرز نارنجی و قرمز رنگ محصور است مربوط به ناحیه پلاستیک می‌باشد. در این ناحیه یک دسته شکستگی اصلی پیشروی می‌کنند. طول و جهت داری این شکستگی به هندسه برنده و خواص مکانیکی سنگ و فشار محصورکننده بستگی دارد. نواحی دو و سه با ناحیه II معرفی می‌شوند. شعاع ناحیه II که معادل شعاع دایره قرمز رنگ است، چندین برابر بزرگتر از شعاع ناحیه I است. منطقه تاثیر دیسک به این ناحیه ختم می‌شود.

چهارمین ناحیه که بین مرز قرمز و آبی رنگ محصور است مربوط به ناحیه الاستیک می‌باشد (ناحیه III). در این ناحیه رشد و گسترش ترک مشاهده نمی‌شود و رفتار سنگ الاستیک می‌باشد. مساحت نواحی معرفی شده فوق تابعی از شکل هندسی تیغه‌ها و نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده می‌باشد. در ادامه به بررسی این نواحی در دیسک‌های مختلف

ایجاد می‌شود اما وسعت شکست در یک یال تیغه زیاد است (شکل ۸-د). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/5$ است. مساحت ناحیه II تقریباً $1/5$ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/25$ می‌باشد. در این آرایش دو شکستگی اصلی در دو یال تیغه با زاویه 60° درجه نسبت به محور تیغه شکل گرفته است. طول این شکستگی‌ها تقریباً a است.

ناحیه II تقریباً 7 برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/14$ می‌باشد. در ناحیه II دو شکستگی با طول قابل توجه تشکیل شده است. اولین شکستگی دارای زاویه 30° درجه نسبت به افق می‌باشد. طول این ترک تقریباً $a/5$ می‌باشد. رسیدن این ترک به سطح آزاد، باعث جدا شدن تراشه و خرده حفاری از سنگ می‌گردد. شکستگی دوم با زاویه 90° درجه از شکستگی اول ایجاد شده است. طول این ترک تقریباً برابر $3a$ می‌باشد.

(۴) تیغه شماره ۴- در این حالت زون خردشده در زیر تیغه



شکل ۸: انواع شکست حاصل از مدلسازی نفوذ تیغه‌های با اشکال هندسی متفاوت در سنگ ضعیف با فشار محصورشوندگی کم (یعنی $\sigma_t = 5 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$).

ناحیه تقریباً $a^2/2$ است. مساحت ناحیه II تقریباً $4/5$ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/9$ می‌باشد. یک شکستگی در راستای محور تیغه به سمت عمق گسترش یافته است که طول این شکستگی‌ها تقریباً $a/5$ است. همچنین دو شکستگی با زاویه 45° درجه نسبت به محور تیغه در یال سمت چپ تیغه ایجاد شده‌اند. طول این شکستگی‌ها تقریباً $a/25$ و $2a$ است. (۷) تیغه شماره ۷- در این حالت زون خردشده زیر تیغه شکل می‌گیرد (شکل ۸-ز). توزیع این زون در اطراف تیغه یکسان است. مساحت ناحیه I تقریباً $a^2/5$ است. مساحت ناحیه II

(۵) تیغه شماره ۵- در این حالت زون خردشده به حالت دایره‌ای در اطراف لبه تیغه گسترده شده است (شکل ۸-ه). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/7$ است. وسعت ناحیه II در مقایسه با سایر آرایش‌ها ماکزیمم است. مساحت ناحیه II تقریباً 4 برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/28$ می‌باشد. شکستگی اصلی شکل گرفته در این حالت دارای زاویه 30° درجه نسبت به محور تیغه می‌باشد. طول این شکستگی‌ها تقریباً $3a$ است.

(۶) تیغه شماره ۶- در این آرایش زون خردشده در زیر لبه تیغه ایجاد شده و گسترش کمی دارد (شکل ۸-و). مساحت این

به رنگ زرد و ترک‌های برشی به رنگ قرمز نمایان شده‌اند. همان‌گونه که از تمام آرایش‌ها مشاهده می‌شود، ترک‌های کششی مود غالب شکست هستند که در مدل ایجاد می‌شوند.

(۱) تیغه شماره ۱- در این حالت زون خردشده مستقیم زیر تیغه و بصورت دایره‌ای در اطراف لبه تیغه ایجاد شده است (شکل ۹-الف). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/25$ است (۰/۲۵) عرض دیسک است). مساحت ناحیه II تقریباً ۳۲ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/8$ می‌باشد. در ناحیه II، یک شکستگی اصلی قابل شناسایی است. این شکستگی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد قائم رشد می‌کند. طول این شکستگی‌ها دو برابر عرض دیسک می‌باشد.

(۲) تیغه شماره ۲- زون خردشده زیر تیغه ایجاد می‌شود و وسعت خردشدگی در یال‌های V بیشتر می‌باشد (شکل ۹-ب). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/1$ است. در این آرایش، مساحت ناحیه II تقریباً ۱/۵ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/15$ می‌باشد. در این آرایش، شکستگی بزرگ مقیاس ایجاد نشده است.

(۳) تیغه شماره ۳- در این حالت زون خردشده مستقیم در زیر تیغه و به صورت بیضی در اطراف لبه تیغه گسترده شده است (شکل ۹-ج). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/25$ است. مساحت ناحیه II تقریباً ۶ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/15$ می‌باشد. در ناحیه II یک شکستگی با طول $2a$ تشکیل شده است. این شکستگی با پیشروی به سطح آزاد سنگ رسیده و یک تراشه از سنگ ایجاد می‌شود.

(۴) تیغه شماره ۴- در این حالت زون خردشده بصورت نواری زیر تیغه ایجاد می‌شود (شکل ۹-د). مساحت این ناحیه تقریباً a^2 است. مساحت ناحیه II تقریباً ۵ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/5$ می‌باشد. در این آرایش یک شکستگی از انتهای زون خرد شده با طول $a/5$ بطور قائم رشد می‌کند.

(۵) تیغه شماره ۵- در این حالت زون خردشده به‌حالت دایره‌ای در اطراف لبه تیغه گسترده شده است (شکل ۹-ه). مساحت این ناحیه تقریباً $a^2/15$ است. مساحت ناحیه II تقریباً ۵ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/75$ می‌باشد. شکستگی اصلی ایجاد

تقریباً ۶ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/9$ می‌باشد. یک شکستگی بزرگ با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد محور بارگذاری ایجاد می‌شود. طول این شکستگی تقریباً $a/25$ است. (۸) تیغه شماره ۸- در این آرایش گسترش ناحیه I در جناحین تیغه زیاد و گسترش آن در جهت عمق کم است (شکل ۸-ج). مساحت ناحیه I تقریباً $a^2/1$ است. مساحت ناحیه II تقریباً $5/5$ برابر مساحت ناحیه I و یا $a^2/5$ می‌باشد. پنج شکستگی در ناحیه II ایجاد شده است. یک شکستگی در راستای محور تیغه رشد می‌نماید که طول آن a است. در هر کدام از یال‌های تیغه، دو شکستگی با فاصله کوتاهی از یکدیگر قرار دارند که تحت زاویه ۴۵ درجه با امتداد بارگذاری پیشروی می‌نماید. طول شکستگی بالایی $a/5$ و طول شکستگی پایینی a است. با رسیدن شکستگی‌هایی بالایی به سطح آزاد نمونه، یک تراشه‌ی مثلثی شکل از سطح سنگ جدا می‌شود.

بطور کلی می‌توان دریافت که تحت نفوذ 4 mm ، تیغه شماره ۳، ۶ و ۸ باعث ایجاد شکستگی‌های افقی در سنگ شده که با رسیدن این شکستگی‌ها به سطح آزاد، تراشه از سطح سنگ جدا می‌شود. بزرگ‌ترین تراشه مربوط به دیسک شماره ۳ می‌باشد. تیغه‌های شماره ۱، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ شکستگی‌های قائم و مورب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به قائم ایجاد می‌کنند که این شکستگی‌ها تاثیری بر ایجاد تراشه سنگی ندارد. بیشترین وسعت شکست توسط تیغه ۵ حاصل شده است. همچنین کمترین وسعت شکست برای تیغه شماره ۲ (V شکل) مشاهده شد.

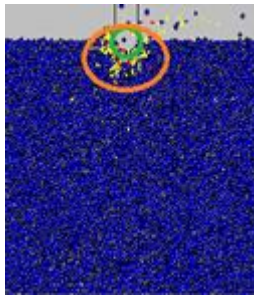
۳-۲-۲- تاثیر شکل هندسی دیسک بر زون شکست در سنگ با مقاومت کششی 25 MPa تحت فشارهای محصورکننده 20 MPa

شکل ۹ انواع شکست حاصل از نفوذ تیغه‌های با اشکال هندسی متفاوت در ناحیه‌ای با مقاومت کششی 25 MPa و تحت فشارهای محصورکننده 20 MPa را نشان می‌دهد. نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده $1/25$ می‌باشد. در این شکل‌ها انواع نواحی آسیب دیده (ناحیه شکسته شده، ناحیه پلاستیک و ناحیه الاستیک) مشخص شده‌اند. ترک‌های کششی

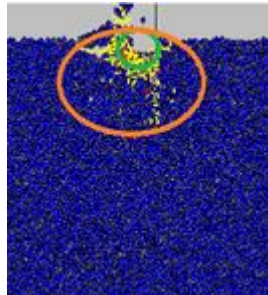
این ناحیه تقریباً a^2 است. مساحت ناحیه II تقریباً ۲ برابر مساحت ناحیه I و یا a^2 می باشد. سه شکستگی کوچک مقیاس با طول $0.5a$ در ناحیه پلاستیک ایجاد شده است. این شکستگی ها بطور قائم و به سمت عمق نمونه گسترش یافته اند.

شده در زون پلاستیک دارای زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور تیغه می باشد. طول این شکستگی a است.

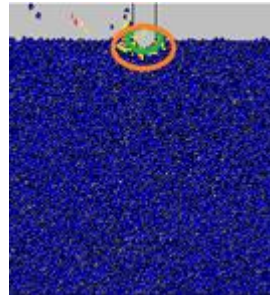
۶) تیغه شماره ۶ در این حالت زون خردشده به حالت دایره ای در اطراف لبه تیغه گسترده شده است (شکل ۹-و). مساحت



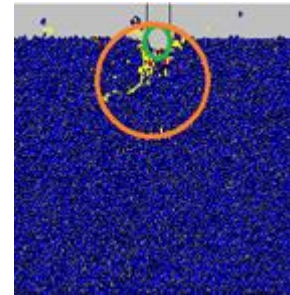
(د)



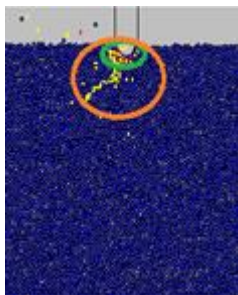
(ج)



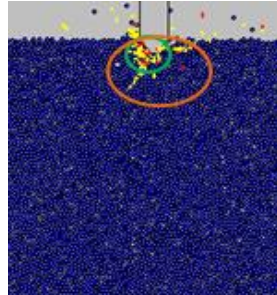
(ب)



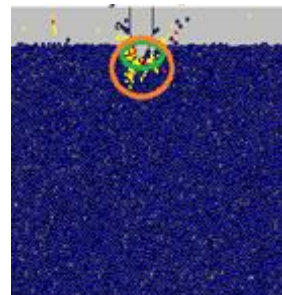
(الف)



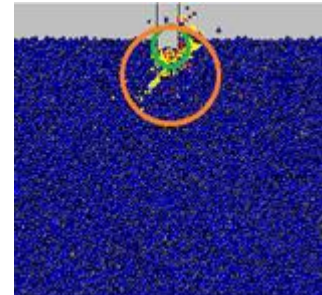
(ح)



(ز)



(و)



(ه)

شکل ۹: انواع شکست حاصل از مدل سازی نفوذ تیغه های با اشکال هندسی متفاوت در سنگ سخت با فشار محصورشوندگی بالا (یعنی $\sigma_3 = 20MPa$ و $\sigma_t = 25MPa$).

محور تیغه رشد می کند. از آنجایی که رشد این ترک به سمت قائم است، لذا منجر به ایجاد تراشه سنگی نمی گردد. بطور کلی تحت نفوذ $4mm$ ، تیغه شماره ۳ باعث ایجاد شکستگی های افقی در سنگ شده که با رسیدن این شکستگی ها به سطح آزاد، تراشه از سطح سنگ جدا می شود. تیغه شماره ۱، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ شکستگی های قائم و مورب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به قائم ایجاد می کنند که این شکستگی ها تاثیری بر ایجاد تراشه سنگی ندارد. بیشترین وسعت شکست توسط تیغه ۳ حاصل شده است. همچنین کمترین وسعت شکست برای تیغه شماره ۲ (شکل V) مشاهده شد.

۷) تیغه شماره ۷- در این حالت زون خردشده زیر تیغه شکل می گیرد. توزیع این زون در یال چپ تیغه بیشتر از یال راست می باشد (شکل ۹-ز). مساحت ناحیه I تقریباً a^2 است. مساحت ناحیه II تقریباً ۵ برابر مساحت ناحیه I و یا $5a^2$ می باشد. یک شکستگی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد محور بارگذاری ایجاد می شود. طول این شکستگی تقریباً $1.5a$ است.

۸) تیغه شماره ۸- در این آرایش گسترش ناحیه I در جهت عمق است (شکل ۹-ح). مساحت ناحیه I تقریباً $0.5a^2$ است. مساحت ناحیه II تقریباً ۱۴ برابر مساحت ناحیه I و یا $7a^2$ می باشد. یک شکستگی در ناحیه II ایجاد شده است. این شکستگی با طول a با زاویه ۴۵ درجه نسبت به راستای

جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه سازی نفوذ تیغه های متفاوت در سنگ با؛

الف) مقاومت ۵ مگاپاسکال و فشار محصورشوندگی ۵ مگاپاسکال

تعداد ترکهای برشی ایجاد شده	تعداد ترکهای کششی ایجاد شده	تعداد کل ترکهای ایجاد شده	ماکزیمم تنش شکست (MPa)	شماره دیسک
۳۲	۲۱۹	۲۵۱	۵/۹	۱
۲۰	۱۱۰	۱۳۰	۵/۹	۲
۶۴	۳۸۲	۴۴۶	۵/۹	۳
۳۲	۲۲۴	۲۵۶	۶/۳	۴
۱۰۲	۴۷۳	۵۷۵	۵/۹	۵
۴۸	۲۲۳	۲۷۱	۵/۹	۶
۳۳	۲۰۸	۲۴۱	۵/۹	۷
۲۸	۱۶۹	۱۹۷	۸/۵	۸

ب) مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و فشار محصورشوندگی ۲۰ مگاپاسکال

تعداد ترکهای برشی ایجاد شده	تعداد ترکهای کششی ایجاد شده	تعداد کل ترکهای ایجاد شده	ماکزیمم تنش شکست (MPa)	شماره دیسک
۱۶	۱۱۵	۱۳۱	۲۱	۱
۱۱	۷۴	۸۵	۲۱	۲
۳۴	۲۵۵	۲۸۹	۲۱	۳
۲۲	۱۳۳	۱۵۵	۲۱	۴
۳۳	۱۶۰	۱۹۳	۲۱	۵
۲۰	۱۰۹	۱۲۹	۲۱	۶
۱۶	۸۹	۱۰۵	۲۱	۷
۱۳	۷۸	۹۱	۲۱	۸

از جدول ۲-ب مشاهده می شود که برای نفوذ دیسکها به میزان ۴mm در سنگ با مقاومت ۲۵ MPa، تحت فشار محصورشوندگی ۲۰ MPa، به تنش ۲۱ مگاپاسکال احتیاج است. این بدین معنی است که در حفاری سنگ با مقاومت کششی زیاد، هندسه دیسک تأثیری بر تنش شکست ندارد ولی وسعت شکستگی را کنترل می کند. بطور مثال دیسک شماره ۲ و ۸ دارای کمترین آسیب می باشند (تعداد ترکها به ترتیب ۱۱ و ۱۳ عدد است) ولی دیسک شماره ۳ دارای بیشترین زون شکست بوده و تعداد ترک، ۳۴ عدد است. از آنجاییکه دیسک شماره ۳، بیشترین آسیب را در سنگ ایجاد می کند، بنابراین

از مقایسه شکل ۸ و ۹ می توان دریافت که با افزایش مقاومت و محصورشوندگی، وسعت نواحی شکست به شدت کاهش یافته است. دلیل این موضوع را می توان به نیروهای داخلی مدل نسبت داد. همانگونه که از شکل ۵ و ۶ مشاهده می شود، با افزایش مقاومت کششی و فشار محصور کننده، نیروی فشاری افزایش و نیروی کششی داخلی مدل کاهش می یابد. این عامل سبب می گردد تا توسعه شکست توسط نیروهای فشاری محدود گردد. این نتایج در تطابق خوبی با تحقیقات انجام شده در مراجع [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸] است.

۳-۳- بررسی تاثیر شکل هندسی تیغه بر ماکزیمم نیروی شکست

جدول ۲-الف و ب، مقادیر تنش شکست و تعداد ترکهای ایجاد شده در مدل های سنگی با مقاومت ۵ و ۲۵ مگاپاسکال را برای نفوذ ۴mm دیسک نشان می دهد. تنش شکست از تقسیم نیروی عکس العمل روی دیوار فوقانی شکل ۳ به طول دیوار حاصل می شود.

از جدول ۲-الف مشاهده می شود که برای نفوذ دیسک شماره ۴ و ۸ به میزان ۴mm در سنگ با مقاومت ۵ MPa، تحت فشار محصورشوندگی ۵ MPa، به تنش های ۶/۳ و ۸/۵ مگاپاسکال احتیاج است؛ درحالیکه تنش شکست مورد نیاز در سایر دیسکها ۵/۹ مگاپاسکال می باشد. این بدین معنی است که در حفاری سنگ با مقاومت کششی کم، هندسه دیسک بر تنش شکست تأثیر گذار است مادامیکه وسعت شکستگی را نیز کنترل می کند. بطور مثال تعداد ترکهای ایجاد شده زیر دیسکهای ۴ و ۸ به ترتیب ۳۲ و ۲۸ ترک است ولی تعداد ترکها زیر دیسک شماره ۵، ۱۰۲ عدد می باشد. از آنجاییکه دیسک شماره ۵ با صرف کمترین تنش، بیشترین آسیب را در سنگ ایجاد می کند، بنابراین می توان دریافت که در این شرایط، دیسک شماره ۵ با لبه مقعر شکل بیشترین کارایی را دارد. بطور کلی می توان بیان داشت که هرچه دیسک نوک تیزتر و دارای سطح مقطع بیشتری باشد، اثر تخریبی آن بر سنگ بیشتر است.

با لبه مقعر شکل (شماره ۵)، با کمترین تنش اعمالی بیشترین آسیب را در سنگ ایجاد می‌کند. بطور کلی می‌توان بیان داشت که هرچه دیسک نوک تیزتر و دارای سطح مقطع بیشتری باشد، اثر تخریبی آن بر سنگ بیشتر است. چنانچه مقاومت سنگ ۲۵ مگاپاسکال و تنش محصورکننده ۲۰ مگاپاسکال باشد، هندسه دیسک تأثیری بر تنش شکست ندارد ولی وسعت شکستگی را کنترل می‌کند. در این شرایط، دیسک با لبه U پهن (شماره ۳) بیشترین کارایی را دارد. هرچه نوک دیسک تخت‌تر و دارای سطح مقطع بیشتری باشد، اثر تخریبی آن بر سنگ بیشتر است. بر اساس نتایج فوق می‌توان دریافت که کد PFC توانایی مدلسازی رشد و گسترش ترک را دارد.

Environmental, 2006.

[8] Hongsu Ma, "Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters," State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, PR China, 2011.

[9]- Cundall, P.A., "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems", Proceeding of 1st Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, France, Paper No. II-8, 1971.

[10]- Cundall P.A. and Strack, O., "A Discrete Element Model for Granular Assemblies." Geotechnique, Vol. 29, pp. 47-65, 1979.

[11]- Cundall, P. A. and Hart, R., "Numerical modeling of discontinua", Journal of Engineering Computations, Vol. 9, pp. 101-13, 1992.

[12]- Cook, B. K. and Jensen, R. P., "Discrete element methods: numerical modeling of discontinua", Proceedings of the Third International Conference on Discrete Element Methods, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication, No. 117, 2002.

[13]- ASTM, 1971. Standard method of test for splitting tensile resistance of cylindrical concrete specimens. ASTM designation C496-71.

[14]- Itasca Consulting Group Inc, "PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions) User's Guides" Minneapolis, MN, USA, 2004/2005.

[15] Jian S., Peng Z., "Stress and Wear Analysis of the Disc Cutter of Rock Tunnel Boring

می‌توان دریافت که در این شرایط، دیسک شماره ۳ بیشترین کارایی را دارد. بطور کلی می‌توان بیان داشت که هرچه نوک دیسک تخت‌تر و دارای سطح مقطع بیشتری باشد، اثر تخریبی آن بر سنگ بیشتر است.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور بررسی اثر شکل هندسی لبه برنده‌های TBM بر مکانیسم خردشدگی سنگ، در ۲ نمونه سنگی با مقاومت‌های کششی مختلف تحت فشارهای محصورشوندگی متفاوت انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که چنانچه مقاومت سنگ ۵ مگاپاسکال و تنش محصورکننده ۵ مگاپاسکال باشد، هندسه دیسک بر تنش شکست تأثیر گذار است مادامیکه وسعت شکستگی را نیز کنترل می‌کند. در این شرایط، دیسک

۵- مراجع

[1] Tarkoy, P.J. "Predicting TBM penetration rates in selected rock types," In Proceedings, Ninth Canadian Rock Mechanics Symposium, Montreal.1973.

[2] Graham, P.C. "Rock exploration for machine manufacturers," In Proceedings, Symposium on exploration for rock engineering, Johannesburg, 1976, 173-180. Rotterdam: Balkema.

[3] Bruland, A.; B. E. Johannessen; A. Lislerud; T. Movinkel; K. Myrvold; and O. Johannessen, "Hard rock tunnel boring," Project report 1-88:]83 pp, Trondheim: Norwegian Institute of Technology. 1988.

[4] Innaurato, N.; R. Mancini; E. Rondona; and A. Zaninetti. "Forecasting and effective TBM performances in rapid excavation of a tunnel in Italy," In 7th Internationaler Kongress uber Felsmechanik; Berichte, Aachen, Deutschland, Bd. 2 (W. Wittke, ed.), 9135-990. Rotterdam: Balkema, 1991.

[5] Chiaia, B, "Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter," International Journal of Solids and Structure 38, 7747-7768, 2001.

[6] Qiu-Ming Gong, Jian Zhao, Yu-Yong Jiao, "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters," Underground Technology and Rock Engineering Program, Protective Technology Research Centre and School of Civil and Environmental, 2005.

[7] Q.M. Gong, Y.Y. Jiao, J. Zhao, "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters," Underground Technology and Rock Engineering Program, Protective Technology Research Centre and School of Civil and

destruction”, EURO: TUN 2009 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling Ruhr University Bochum, 9-11 September 2009 Aedificatio Publishers, 1-4.

[18] Huang, H., Damjanac, B., and Detournay, E. “Normal wedge indentation in rocks with lateral confinement”. Rock Mech Rock Eng, 31(2): 81-94, 1998.

Machine”, The Open Mechanical Engineering Journal, 9, 721 – 725, 2015.

[16] Ma H., Yin L., “Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(6) 1021- 1033, 2011.

[17] Lunow C., Konietzky H., “Two dimensional simulation of the pressing and the cutting rock

-
- 1 Tarkoy
 - 2 Graham
 - 3 Bruland
 - 4 Innaurato
 - 5 Chiaia
 - 6 Gong
 - 7 Gong
 - 8 Hongsu

Investigating the Effect of Cutter Edge Shape on Rock Fragmentation Using PFC2D

Sarfarazi, V.¹; Beiralvand, N.²

School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: July 2016

Accepted: March 2017

KEYWORDS

TBM
PFC2D
Cutter Edge Shape
Tensile Strength
Confining Pressure
TBM
PFC2D

ABSTRACT

Summary

In this paper, the effect of cutter edge shape on the failure mechanism of rock has been investigated using particle flow code in two directions (PFC2D). Particle flow code represents a rock mass as an assemblage of bonded rigid particles. The standard process of generating a PFC2D assembly to represent a test model involves: particle generation, packing the particles, isotropic stress installation (stress initialization), floating particle (floaters) elimination and

bond installation. In PFC2D circular disks are connected with cohesive and frictional bonds and confined with planar walls. The values assigned to the strength bonds influence the macro strength of the sample. Friction is activated by specifying the coefficient of friction and is mobilized as long as particles stay in contact. Tensile cracks occur when the applied normal stress exceeds the specified normal bond strength. Shear cracks are generated as the applied shear stress surplus the specified shear bond strength either by rotation or by shearing of particles. The tensile strength at the contact immediately drops to zero after the bond breaks, while the shear strength decreases to the residual friction value. For all these microscopic behaviours, PFC only requires selection of the basic micro-parameters to define contact and bond stiffness, bond strength and contact friction, but these micro-parameters should provide the macro-scale behaviour of the material being modelled. The code uses an explicit finite difference scheme to solve the equation of force and motion, and hence one can readily track initiation and propagation of bond breakage through the system.

For this purpose, two numerical models with different tensile strength of 5 MPa and 25 MPa were built and compressed by two different confining pressures of 5 MPa and 25 MPa, respectively. Eight disc cutters with different edge shape penetrate into the model at the rate of 0.02 m/s till 4 mm of disc penetration is reached. Totally 16 simulation has been done. The rock materials, below the cutters, show three different mechanical behavior i.e. failure, plastic and elastic behavior. The failure zone is fully fractured. The plastic zone is consisted of partially micro crack with several major fractures. The elastic zone is an undamaged zone. The shape of cutter edge has important effect on extension of three introduce zones. When tensile strength is 5 MPa, the failure stress resulted from penetration of convex-shape cutter is the lowest one, 5.3 MPa while the number of total cracks is maximum one, 102. It means that the cutter shape controls the failure stress and failure extension when it cuts the weak rock. When tensile strength is 25 MPa, the failure stress resulted from penetration of different cutters is similar, 21 MPa, but the extension of failure is largest under U-shape cutter. It means that the cutter shapes has not any effects on the failure stress when it cuts the hard rock while the U-shape cutter produce the largest failure zone. The results show that convex-shape edge and U-shape edge cutters have the best performance when tensile strength of rock is 5MPa and 25 MPa, respectively. The results also showed that the failure stress increases with increasing tensile strength, while the failure extension decreases.