

## مطالعه تأثیر نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده بر نفوذ دیسک U شکل TBM توسط روش اجزای گسسته

وهاب سرفرازی\*؛ نسرين ميخک بيرالوند<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران Sarfarazi@hut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

(دریافت ۳ تیر ۱۳۹۴، پذیرش ۲۶ خرداد ۱۳۹۵)

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای مجزا تأثیر نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده بر نفوذ دیسک U شکل TBM بررسی شده است. بدین منظور، سه مدل عددی با مقاومت‌های کششی متفاوت ۵ MPa، ۱۵ MPa و ۲۵ MPa ساخته شد. از هر مدل دو نمونه مشابه آماده شد و تحت دو تنش محصورکننده ۵ MPa و ۲۵ MPa قرار گرفت. به‌طور کلی ۶ مدل‌سازی انجام شد. بعد از اعمال فشار جانبی، برنده با نرخ ۰/۰۲ m/s به میزان ۴mm در سنگ نفوذ کرده و باعث شکست سنگ می‌شود. سنگ زیر برنده سه رفتار مکانیکی مختلف را نشان می‌دهد که عبارتند از: ناحیه شکسته شده زیر برنده، ناحیه پلاستیک با ترک‌های موضعی زیر ناحیه شکسته شده و ناحیه الاستیک. نتایج نشان می‌دهند که نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده تأثیر بسزایی بر وسعت نواحی شکسته شده دارد. در فشار محصورکننده ۵ MPa، با افزایش مقاومت کششی نیروی شروع ترک، تنش شکست افزایش می‌یابد ولی وسعت شکست و میزان نفوذ دیسک کم می‌شود. همچنین در فشار محصورکننده ۲۵ MPa، با افزایش مقاومت کششی نیروی شروع ترک، تنش شکست، وسعت شکست و میزان نفوذ دیسک تقریباً ثابت است.

### کلمات کلیدی

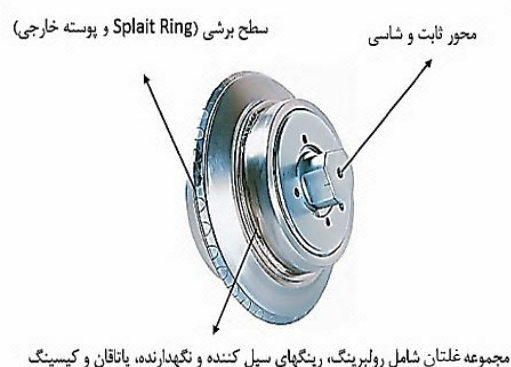
نرم‌افزار PFC2D، برنده، مقاومت کششی، فشار محصورشوندگی، کد جریان ذره

## ۱- مقدمه

به کارآیی بیشتر، دیسک‌های برشی با مقطع ثابت طراحی شده‌اند که به‌وفور به‌کار گرفته می‌شوند. در صورتی که بار ثابتی بر دیسک‌های برشی اعمال شود، با افزایش قطر آن‌ها سطح مقطع دیسک بالا رفته و به طبع آن سطح تماس دیسک با سنگ نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه میزان نفوذ دیسک در سنگ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر دیسک‌های بزرگ‌تر سرعت دورانی کمتری در یک سرعت دورانی ثابت سربرنده دارند. این به معنای ایجاد گرمای کمتر در حفاری است. در ضمن دیسک‌های برشی بزرگ‌تر بدنه برنده بیشتری برای حفاری تا قبل از فرسوده شدن دارند. در مجموع تمامی عوامل بالا موجب بالا رفتن عمر دیسک‌ها می‌شوند. همچنین با افزایش قطر و ضخامت لبه آن، دیسک برای برش نیازمند نیروهای بیشتری است [۱].

عملکرد تیغه‌ها و اثرگذاری آن‌ها به خصوصیات مقاومتی سنگ، آرایش تیغه‌ها در کله حفار، قطر دیسک‌ها و عرض دیسک‌ها بستگی دارد. مرکز تحقیقات کره جنوبی به منظور مطالعه نحوه خراش دیسک‌ها ماشین برش خطی را در سال ۲۰۰۴ ارائه کرد. محققان مختلفی نظیر Park و همکاران [۲]، Chang و همکاران [۳]، Yu و همکاران [۴]، Cho و همکاران [۵] و Jeong و همکاران [۶] با استفاده از این دیسک‌ها نحوه شکست ۸ نوع مختلف سنگ در کره جنوبی را تحت اثر دیسک‌ها مطالعه کردند. مطالعات محققین نشان داد که در سنگ‌های شکننده، میزان خردایش سنگ بیشینه است. این در حالی است که در سنگ‌های نرم کرنشی نظیر خردایش سنگ کمتر است. نتایج نشان دادند که شکنندگی سنگ تأثیر بسزایی بر عمق نفوذ ترک‌های القایی دارد. Roxborough و همکاران [۷] با مطالعات آزمایشگاهی اثر فاصله‌داری دیسک ماشین حفار و عمق نفوذ دیسک را بر نیرو و انرژی مصرفی مطالعه کرد. مطالعات نشان داد که نسبت فاصله‌داری دیسک به عمق نفوذ دیسک توسط نسبت مقاومت فشاری به مقاومت برشی سنگ کنترل می‌شود. با افزایش نسبت مقاومت فشاری به برشی فاصله‌داری بهینه برای ایجاد تراشه از سنگ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش این نسبت، انرژی مصرفی برای شکست سنگ افزایش می‌یابد. Rostami [۸] سه الگوی متفاوت تراشه را بر حسب فاصله‌داری دیسک‌ها معرفی کرد. Gertsch و همکاران [۹] مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی را با

برنده‌ها ابزار برش سنگ هستند که روی صفحه حفار نصب می‌شوند و حفر سنگ را انجام می‌دهند. زمانی که TBM حفاری می‌کند، برنده‌های TBM در سر تا سر سطح تونل می‌چرخند و زون خردشده‌ی زیر برنده را به‌طور پیوسته توسعه می‌دهند. پروسه تولید تراشه حفاری به این ترتیب است که بر اثر غلتش و نیروی نرمال وارد بر برنده، شکستگی از زیر دیسک شروع شده و در جهت‌های خاصی رشد می‌کنند. از بین ترک‌های ایجاد شده ممکن است یک یا چند ترک به سطح آزاد برسند و یا به ترک‌های ناشی از برنده‌های مجاور برخورد کنند و تراشه ایجاد شود. بسته به نوع زمینی که باید حفر شود ابزار برش متفاوت است. ابزار برش به انواع مختلفی همچون برنده‌ها، خراشنده‌ها و تیغه-ها تقسیم می‌شوند. برنده‌ها و خراشنده‌ها در مورد سپرهای گل و متعادل‌کننده فشار زمین کاربرد دارند. پرکاربردترین ابزار برش تیغه‌ها هستند که شامل انواع مختلفی می‌باشند. محدوده استفاده از این ابزار در سنگ‌های متوسط تا بسیار قوی است. انواع تیغه‌ها عبارتند از برنده‌های تک دیسکی، چند دیسکی، برنده‌های نوع توت فرنگی و برنده‌های چند ردیفی. در شکل ۱ یک نمونه از دیسک برنده دیده می‌شود.



شکل ۱: نمایی از دیسک برنده [۱]

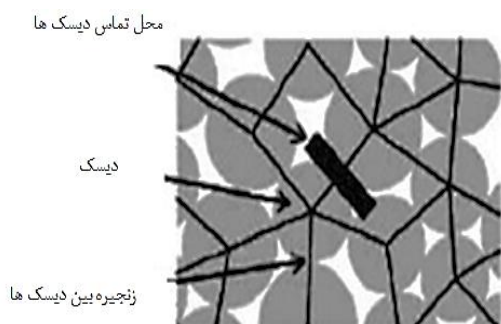
هندسه دیسک‌های برشی توسط قطر و پروفیل لبه آن‌ها مشخص می‌شوند. در گذشته دیسک‌های برشی مورد استفاده در دستگاه‌های TBM با مقطع V شکل و با زاویه ۶۰ الی ۱۲۰ درجه تولید می‌شدند. این دیسک‌ها علیرغم نرخ پیشروی مناسب، پس از سایش لبه دیسک عملکرد خود را به سرعت از دست می‌دادند. امروزه برای دستیابی

به مقاومت کششی سنگ بر عملکرد تیغه TBM بررسی نشده است. همچنین گسترش ترک‌ها در زیر دیسک به‌طور موشکافانه آنالیز نشده است. هدف این تحقیق مطالعه تأثیر نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده بر نفوذ دیسک TBM با اشکال هندسی متفاوت توسط روش اجزای مجزا است. چون کد جریان ذره دوبعدی، PFC2D<sup>1</sup>، توانایی مدل‌سازی رشد و گسترش ترک را دارد بنابراین در این تحقیق از این نرم‌افزار استفاده شده است.

## ۲- معرفی نرم‌افزار PFC2D

کد جریان ذره دوبعدی، یک کد اجزا مجزا است که سنگ را با مجموعه‌ای از دیسک‌های به هم چسبیده مدل می‌کند [۱۷]. این دیسک‌ها می‌توانند نسبت به یکدیگر جابجایی داشته و در فصل مشترک، با یکدیگر اندرکنش داشته باشند. میزان جابجایی و اندرکنش نیروها توسط روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود [۱۸]. این روش در شناسایی شکست توانا بوده و پیچیدگی‌های محاسباتی ندارد [۱۹].

تماس بین ذرات توسط اتصال‌های خطی یا غیرخطی معرفی می‌شود. اتصال خطی، که در این مقاله از آن استفاده شده است، رابطه الاستیک را بین تغییر شکل و نیروهای اعمال شده به دیسک‌ها مهیا می‌کند. دیسک‌ها در PFC در یک نقطه به یکدیگر متصل می‌شوند که در فصل مشترک آن‌ها فشرده‌ایی با سختی نرمال و برشی قرار دارد (شکل ۲).



شکل ۲: آرایش دیسک‌ها در PFC

زمانی که مدل تحت بار خارجی قرار می‌گیرد، در محل تماس دو دیسک جابجایی ایجاد می‌شود. این جابجایی

استفاده از ماشین حفار انجام داد و بیان داشت که شکنندگی، کریستاله بودن و سخت بودن سنگ بر فاصله‌داری دیسک‌ها برای تعیین بزرگ‌ترین تراشه سنگی تأثیرگذار است. به عبارت دیگر سخت بودن سنگ باعث کاهش فاصله‌داری بهینه دیسک می‌شود به‌گونه‌ای که بزرگ‌ترین تراشه از سنگ ایجاد شود.

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، شبیه‌سازی کامپیوتری ابزار مناسبی برای درک بهتر از نحوه عملکرد دیسک‌ها و مکانیزم شکست سنگ است. Cook و همکاران [۱۰] اثر ابعاد برنده و فشار محصورکننده را بر ابعاد تراشه سنگ بررسی و نتایج آزمایشگاهی را با نتایج روش المان محدود مقایسه کرد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش ابعاد برنده زون شکست افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش فشار محصورکننده زون پلاستیک یا زون شکست محدود می‌شود. Liu و همکاران [۱۱] با استفاده از کد آنالیز روند شکست سنگ (RFPA2D)، اثر فشار محصورکننده را بر نفوذ یک و دو دیسک با نرخ جابجایی ثابت مطالعه کرد. نتایج نشان دادند که با افزایش فشار محصورکننده، وسعت ناحیه خرد شده کاهش می‌یابد. Gong و همکاران [۱۲-۱۳] با استفاده از روش اجزا مجزا اثر فاصله‌داری درزه را بر تراشه حاصل از نفوذ یک و دو دیسک را بررسی کرد. نتایج نشان دادند که با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها، عمق نفوذ دیسک بایستی افزایش یابد تا تراشه سنگ ایجاد شود. هرچه فاصله‌داری درزه‌ها کمتر باشد با نفوذ کمتر دیسک و با صرف انرژی کمتری تراشه سنگی ایجاد می‌شود. Chiaia به‌منظور بررسی فرآیند نفوذ دیسک در مواد ناهمگن، روش المان محدود را به‌کار گرفت [۱۴]. نتایج نشان دادند که ناهمگنی تأثیر بسزایی در شکل تراشه‌های ایجاد شده دارد. Gong و همکاران تأثیر شکنندگی سنگ بر عملکرد دیسک را با نرم‌افزار UDEC آنالیز کردند [۱۵]. نتایج نشان داد که سرعت نفوذ دیسک با افزایش شکنندگی سنگ افزایش می‌یابد. تحقیقات عددی انجام شده توسط Hongsu و همکاران نشان داد که تنش محصورکننده تأثیر قابل توجهی بر زاویه رشد ترک، طول ترک و اتلاف انرژی دارد [۱۶]. به‌گونه‌ای که با افزایش فشار محصورکننده، ترک عمود بر جهت تنش محصورکننده رشد می‌کند و طول آن کاهش می‌یابد. در مطالعات قبلی، تأثیر نسبت فشار محصورکننده

بعد از ساخت مدل اولیه بایستی مدل را کالیبره کرد. به عبارت دیگر باید میکروپارامترهای معرفی شده بالا را به گونه‌ای تعیین کرد که رفتار مکانیکی مدل عددی (مقاومت کششی) و نمونه آزمایشگاهی یکسان شود.

برای کالیبراسیون مدل عددی از آزمایش برزیلی استفاده شد. قطر نمونه برزیلی مشابه نمونه آزمایشگاهی و ۵۴ انتخاب شد. مدل عددی از ۵۶۱۵ دیسک تشکیل شده است. مجموعه دیسک‌ها با دیوارهای قائم که طرفین مدل قرار دارد بارگذاری می‌شوند. دیوارها با سرعت  $0.2 \text{ m/s}$  به سمت یکدیگر حرکت کرده و باعث شکست مدل می‌شود. این نرخ بارگذاری، شرایط بارگذاری استاتیکی را برای مدل مهیا می‌کند.

با سعی و خطا، میکروپارامترها به گونه‌ای انتخاب شدند که مدل‌های عددی با مقاومت کششی  $5 \text{ MPa}$  و  $25 \text{ MPa}$  حاصل شود (جدول ۱). لازم به ذکر است که برای کالیبراسیون مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سه نمونه شبه سنگی آماده شد. نمونه اول ترکیبی از گچ، سیمان و آب با نسبت  $(1)/(2)/(1/5)$  با مقاومت کششی ۴ مگاپاسکال است. نمونه دوم ترکیبی از سیمان سفید، فایبر پلی پروپیلن و آب با نسبت نسبت  $(1)/(0.2)/(4-الف)$  که مقاومت کششی آن ۱۳ مگاپاسکال است و نمونه سوم ترکیب سیمان پرتلند، فایبر پلی پروپیلن و آب با نسبت ۳ به ۰/۵ به ۲ است که مقاومت کششی آن ۲۷ مگاپاسکال است (شکل ۴-ب).

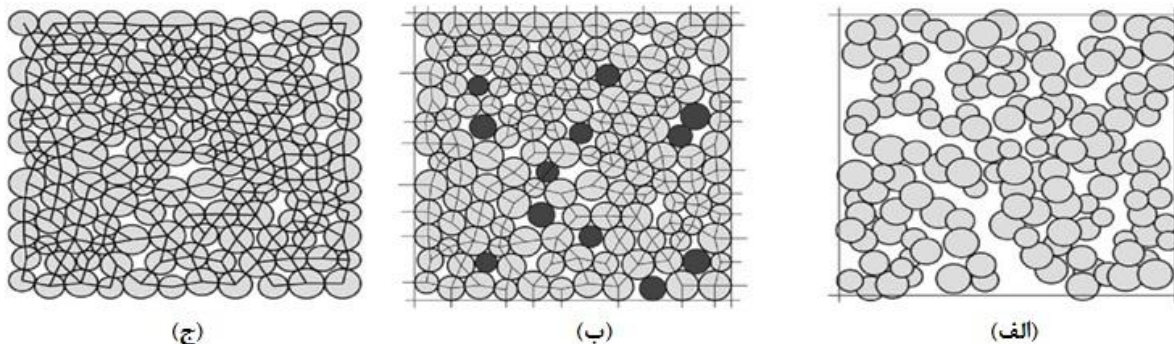
باعث اعمال نیرو به فنرها می‌شود که این نیرو برابر است با حاصل ضرب جابجایی در سختی فنرها. همچنین زمانی-که چرخش در دیسک‌ها ایجاد می‌شود، این چرخش نیز باعث جابجایی در محل تماس شده و منجر به اعمال نیرو در فنرها می‌شود. زمانی که تنش حاصل از این نیروها بر مقاومت فنرها غلبه کند، آن فنر گسیخته شده و یک شکستگی ایجاد می‌شود. در PFC مقاومت فنرها با دو اتصال تماسی و موازی معرفی می‌شود. مدل اتصال موازی که در این مقاله از آن استفاده شده است با مشخصه‌های زیر معرفی می‌شود؛ 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، کمینه شعاع دیسک‌ها، ضریب افزایش‌دهنده شعاع دیسک، مدول یانگ اتصال موازی دیسک‌ها و نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال موازی.

با انتخاب مناسب این میکروپارامترها می‌توان مدل عددی را به گونه‌ای کالیبره کرد که رفتار نمونه طبیعی را داشته باشد. در ادامه مراحل آماده‌سازی مدل عددی، تعیین میکروپارامترهای بالا و کالیبراسیون مدل، آماده‌سازی مدل‌های اصلی، انواع هندسه تیغه‌ها و نحوه بارگذاری مدل ارائه شده است.

#### ۲-۱- مراحل آماده‌سازی مدل عددی اولیه

به‌طور کلی آماده‌سازی مدل در نرم‌افزار PFC2D شامل ۵ مرحله است که عبارتند از: ایجاد مرزهای مدل و تولید دیسک‌ها با ابعاد مورد نظر (شکل ۳-الف)، فشردگی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیک و کاهش تعداد ذرات معلق (شکل ۳-ب) و اعمال پیوندهای موازی (شکل ۳-ج).

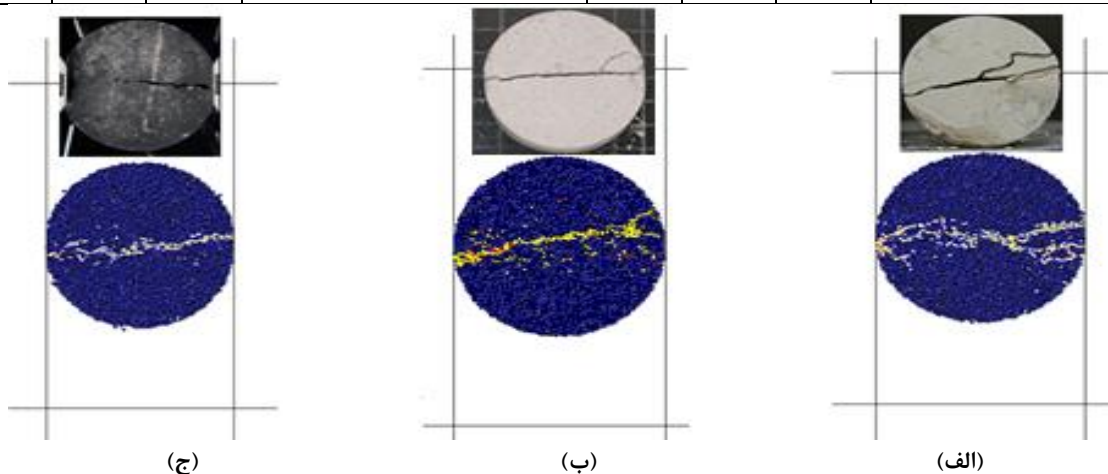
#### ۲-۲- کالیبراسیون مدل



شکل ۳: نمایی از مراحل مختلف آماده‌سازی مدل، ایجاد مرزهای مدل و تولید دیسک‌ها، (ب) فشردگی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیک و کاهش تعداد ذرات معلق و (ه) اعمال پیوندهای موازی [۱۸]

جدول ۱: میکروپارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل عددی با مقاومت کششی ۵ MPa، ۱۵ MPa و ۲۵ MPa

مقاومت کششی (MPa)			میکروخصوصیات	مقاومت کششی (MPa)			میکروخصوصیات
۲۵	۱۵	۵		۲۵	۱۵	۵	
۱	۱	۱	افزایش دهنده شعاع اتصال موازی	دیسکی	دیسکی	دیسکی	نوع ذره
۵	۵	۵	مدول یانگ اتصال موازی (GPa)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	دانسیته (kg/cm <sup>3</sup> )
۳	۳	۳	نسبت سختی‌های اتصال موازی	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	کمینه شعاع دیسک (mm)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	ضریب اصطکاک	۱/۷۶	۱/۷۶	۱/۷۶	نسبت کمینه شعاع به ماکزیمم شعاع دیسک
۱۵۲	۸۱	۲۹	مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (MPa)	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	نسبت تخلخل
۳۸	۲۰/۲۵	۷/۲۵	مقاومت نرمال اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۰/۷	۰/۷	۰/۷	ضریب میرایی (α)
۱۵۲	۸۱	۲۹	مقاومت برشی اتصال موازی، میانگین (MPa)	۵	۵	۵	مدول یانگ تماسی (GPa)
۳۸	۲۰/۲۵	۷/۲۵	مقاومت برشی اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۳	۳	۳	نسبت سختی‌های اتصال تماسی

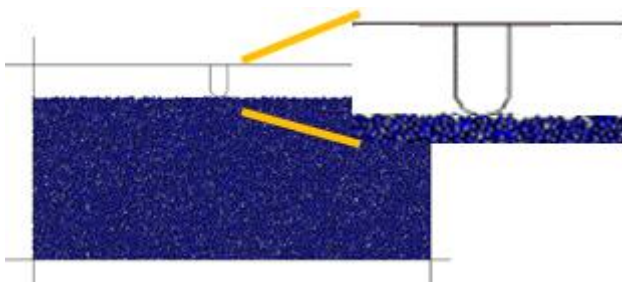


شکل ۴: الگوی شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی به ترتیب برای مقاومت‌های (الف) ۵ MPa، (ب) ۱۵ MPa و (ج) ۲۵ MPa

درحالی که با افزایش مقاومت کششی، یک سطح گسیختگی باعث شکست نمونه می‌شود.

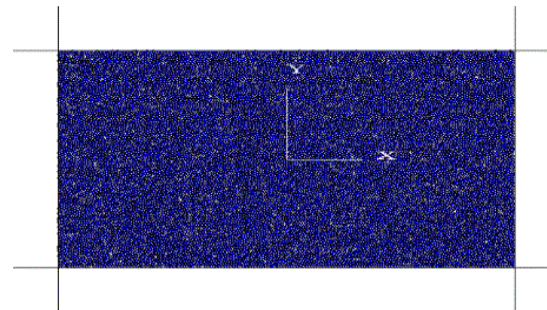
### ۲-۳- آماده‌سازی مدل اصلی

بعد از کالیبراسیون مدل، مدل‌های عددی با ابعاد ۶۰×۱۲۰ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۵-الف). این مدل‌ها ۱۳۴۵۶ دیسک دارند. به‌منظور مهیا ساختن شرایط آزمایش، یک نوار افقی به عرض ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر از مدل حذف شد (شکل ۵-ب). سپس دیسک برنده که وظیفه شکست سنگ را بر عهده دارد، بین سطح سنگ و دیوار افقی بالایی نصب شد.



(ب)

شکل ۴-الف، ب و ج الگوهای شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی را به ترتیب برای مقاومت‌های ۵ MPa، ۱۵ MPa و ۲۵ MPa نشان می‌دهد. خطوط زرد رنگ (رنگ روشن) و قرمز رنگ (رنگ تیره)، نشان دهنده ترک‌های کششی و ترک‌های برشی می‌باشند. به‌طور کلی الگوهای شکست مدل‌های عددی مشابه الگوی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی هستند. زمانی که مقاومت کششی کم است، چند نوار کششی منجر به شکست سنگ می‌شود



(الف)

شکل ۵: الف) مدل عددی اصلی، ب) مدل عددی حاوی دیسک برنده

مورد نظر را بر نمونه اعمال می‌کنند و صفحه بالا وظیفه بارگذاری به دیسک‌ها را بر عهده دارد. صفحه پایین نمونه را در محل ثابت است. در تمام آزمایش‌ها، نرخ جابجایی استاتیکی دیوار برابر  $0.2 \text{ m/s}$  در نظر گرفته می‌شود و میزان تنش جانبی با مکانیزم کنترل شده‌ای ثابت می‌ماند. از هر مدل با مقاومت کششی ۵ MPa، ۱۵ MPa و ۲۵ MPa دو نمونه مشابه آماده شد و تحت دو تنش محصورکننده ۵ MPa و ۲۵ MPa قرار گرفت. با حرکت صفحه بالایی به سمت پایین، برنده به میزان ۴ mm در سنگ نفوذ می‌کند و توزیع نیروهای داخلی و نحوه شکست سنگ مطالعه می‌شود. در ادامه تأثیر شکل هندسی برنده بر توزیع نیروهای داخلی مدل در لحظه شروع ترک و الگوی شکست سنگ بررسی شده است.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۲-۴- هندسه دیسک

شکل ۶ هندسه برنده U شکل را نشان می‌دهد. عرض دیسک  $a = 10 \text{ mm}$  است و ارتفاع آن‌ها  $20 \text{ mm}$  است (شکل ۶).



شکل ۶: دیسک برنده U شکل

#### ۲-۵- بارگذاری مدل‌ها

اعمال تنش در برنامه PFC توسط دیوارهای مدل انجام می‌شود (شکل ۵-ب). سختی نرمال و برشی دیوارها، ۲ برابر سختی دیسک‌ها انتخاب می‌شود تا دیوارها نسبت به مدل سخت‌تر باشند و صلابت آزمایش حفظ شود. زاویه اصطکاک دیوارها در مدل صفر انتخاب می‌شود تا اصطکاک بین دیوار و مدل ایجاد نشود. صفحات جانبی با سیستم کنترل اتوماتیک، فشار جانبی

### ۳-۱- تأثیر فشار محصورکننده و مقاومت کششی بر توزیع

نیروهای فشاری و کششی داخلی مدل در لحظه شروع ترک شکل ۷ توزیع نیروهای فشاری و کششی داخلی را در لحظه شروع ترک نشان می‌دهد. این شکل برای مدل‌های با مقاومت کششی ۵ MPa، ۱۵ MPa و ۲۵ MPa به سه بخش الف، ب و ج تقسیم شده است. همچنین شکل ۷ برای فشارهای محصورکننده ۵ MPa و ۲۵ MPa به دو بخش I و II تقسیم شده است. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب نشان‌دهنده نیروهای کششی و فشاری می‌باشند. ضخامت این خطوط بیانگر بزرگی نیرو است. در این شکل مقادیر نیروی فشاری و کششی بیشینه بر حسب نیوتن نشان داده شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که نیروی کششی و فشاری بیشینه در زیر تیغه‌ها ایجاد شده است. این نشان می‌دهد که ترک از این نقاط آغاز می‌شود. زمانی که تنش محصورکننده کمتر از مقادیر مقاومت‌های کششی است (۵ MPa)، نیروی کششی بیشینه و یا نیروی کششی لازم برای شروع ترک افزایش می‌یابد (شکل I-۷). ولی زمانی که تنش محصورکننده بیشتر از مقادیر مقاومت‌های کششی است (۲۵ MPa)، با افزایش مقاومت کششی نیروی کششی بیشینه تقریباً ثابت است (شکل II-۷). به عبارت دیگر تحت فشار محصورکننده ۲۵ MPa، فشردگی زیاد مدل باعث می‌شود تا تأثیر مقاومت کششی بر نیروی شروع ترک ناچیز باشد. لازم به ذکر است که در مدل با مقاومت ۵ مگاپاسکال تحت فشار محصورکننده کم عمق نفوذ دیسک برای شروع ترک ۰/۴ میلی‌متر و در فشار محصورکننده زیاد ۰/۶ میلی‌متر است. در مدل با مقاومت ۱۵ مگاپاسکال تحت فشار محصورکننده کم عمق نفوذ دیسک برای شروع ترک ۰/۸ میلی‌متر و در فشار محصورکننده زیاد ۱ میلی‌متر است. در مدل با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال تحت فشار محصورکننده کم-عمق نفوذ دیسک برای شروع ترک ۱/۱ میلی‌متر و در فشار محصورکننده زیاد ۱/۴ میلی‌متر است.

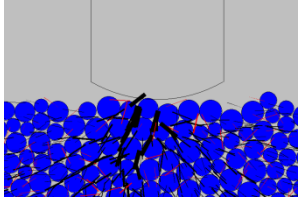
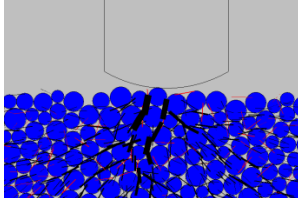
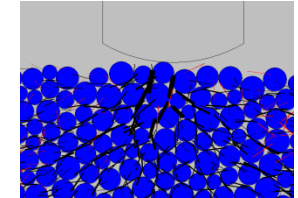
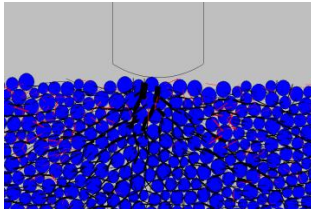
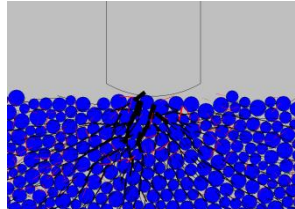
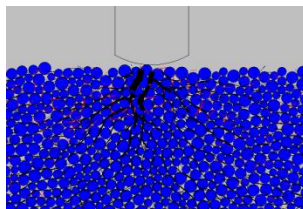
### ۳-۲- معرفی انواع نواحی شکست

شکل ۸ الگوی شکست تحت تنش یک دیسک را نشان می‌دهد. در این شکل ترک‌های کششی به رنگ زرد و ترک‌های برشی به رنگ قرمز نمایان شده‌اند.

چهار ناحیه مختلف آسیب قابل شناسایی است. اولین ناحیه (ناحیه I) که بین مرز سبز رنگ محصور است مربوط به ناحیه

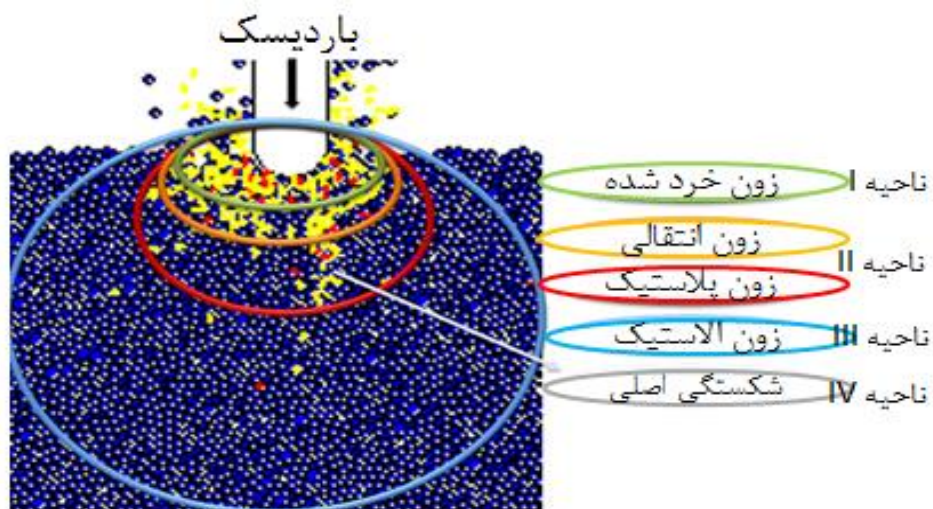
شکسته شده است. این منطقه که تماماً شکسته شده است تمرکز تنش بالایی دارد. ترک‌های موجود در این ناحیه اغلب کششی هستند تا زمانی که حضور ترک‌های برشی نیز قابل شناسایی است. دومین ناحیه که بین مرز سبز و نارنجی رنگ محصور است مربوط به ناحیه انتقالی است. در این ناحیه تعداد شکستگی‌ها کاهش می‌یابد و اغلب ترک‌های کششی باعث شکست بخشی سنگ می‌شوند. کاهش تعداد ترک‌ها در این ناحیه حکایت از کاهش تمرکز تنش در این منطقه و به عبارت دیگر کاهش تأثیر برنده در این زون دارد. سومین ناحیه که بین مرز نارنجی و قرمز رنگ محصور است مربوط به ناحیه پلاستیک است. در این ناحیه یک دسته شکستگی اصلی پیشروی می‌کنند. طول و جهت‌داری 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 تأثیر دیسک به این ناحیه ختم می‌شود.



<p>-نیروی فشاری بیشینه = <math>2 \times 10^4</math></p> <p>-نیروی کششی بیشینه = <math>6 \times 10^2</math></p> 	<p>-نیروی فشاری بیشینه = <math>1/1 \times 10^4</math></p> <p>-نیروی کششی بیشینه = <math>4/8 \times 10^2</math></p> 	<p>-نیروی فشاری بیشینه = <math>9 \times 10^3</math></p> <p>-نیروی کششی بیشینه = <math>3/2 \times 10^2</math></p> 	<p>فشار محصورکننده ۵ MPa</p>
<p>-نیروی فشاری بیشینه = <math>4/98 \times 10^4</math></p> <p>-نیروی کششی بیشینه = <math>2/2 \times 10^4</math></p> 	<p>-نیروی فشاری بیشینه = <math>4/9 \times 10^4</math></p> <p>-نیروی کششی بیشینه = <math>2 \times 10^4</math></p> 	<p>-نیروی فشاری بیشینه = <math>4/8 \times 10^4</math></p> <p>-نیروی کششی بیشینه = <math>1/9 \times 10^4</math></p> 	<p>فشار محصورکننده ۲۵ MPa</p>
(ج)	(ب)	(الف)	

شکل ۷: توزیع نیروهای فشاری و کششی داخلی در لحظه شروع ترک در مدل‌های با مقاومت کششی، الف) ۵ MPa، ب) ۱۵ MPa و ج) ۲۵ MPa

۲۵



شکل ۸: الگوی ایجاد ترک در اثر نفوذ تیغه در سنگ

شکل ۹ نواحی مختلف شکست را در مدل‌های با مقاومت کششی مختلف، در نفوذ ۳ mm دیسک، نشان می‌دهد. این شکل برای مدل‌های با مقاومت کششی ۵ MPa، ۱۵ MPa و ۲۵ MPa به سه بخش الف، ب و ج تقسیم شده است. انواع شکست برای فشار محصورکننده ۵ MPa و ۲۵ MPa به دو بخش I و II تقسیم شده است. خطوط زرد رنگ و قرمز رنگ به ترتیب نشان دهنده ترک‌های کششی و برشی می‌باشند.

چهارمین ناحیه که بین مرز قرمز و آبی رنگ محصور است مربوط به ناحیه الاستیک است (ناحیه III). در این ناحیه رشد و گسترش ترک مشاهده نمی‌شود و رفتار سنگ الاستیک است. وسعت نواحی معرفی شده بالا تابعی از نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده است. که در ادامه توضیح داده شده است.

### ۳-۲-۱- تأثیر مقاومت کششی مدل بر زون شکست



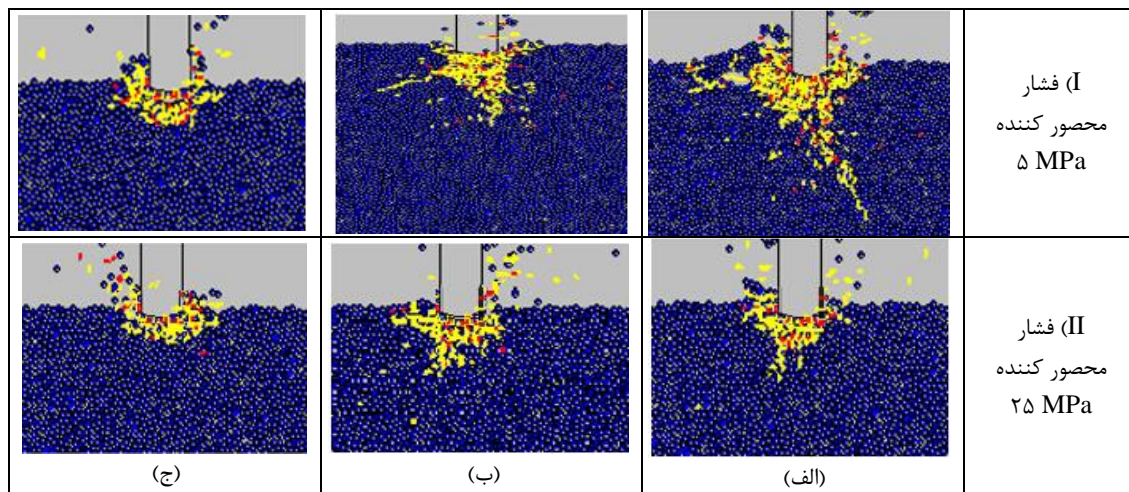
الف-۲-مدل با مقاومت کششی ۱۵ MPa: در این حالت زون خردشده دارای مساحت تقریباً  $4a^2$  است (شکل ۹-I-ب). دو شکستگی کوچک مقیاس مشاهده می‌شود. شکستگی قائم با طول  $a$  و شکستگی مورب با طول  $1/5a$  و زاویه ۴۵ درجه در مدل منتشر می‌شود. در این وضعیت تراشه ای ایجاد نمی‌شود.

الف-۳-مدل با مقاومت کششی ۲۵ MPa: زون خردشده دایره-ای و دارای مساحت تقریباً  $a^2$  است (شکل ۹-I-ج). در این حالت شکستگی و تراشه نیز در مدل ایجاد نمی‌شود. به‌طور کلی می‌توان دریافت که در فشار محصورکننده ۵ MPa، با افزایش مقاومت کششی، مساحت زون شکست کاهش می‌یابد. تعداد و طول شکستگی‌ها کاهش یافته و تراشه در مدل ایجاد نمی‌شود.

همان‌گونه که از تمام آرایش‌ها مشاهده می‌شود، ترک‌های کششی مود غالب شکست هستند که در مدل ایجاد می‌شوند.

#### الف) فشار محصورکننده ۵ MPa

الف-۱-مدل با مقاومت کششی ۵ MPa: در این حالت زون خردشده مستقیم زیر تیغه و به‌صورت دایره‌ای در اطراف لبه تیغه ایجاد شده است (شکل ۹-I-الف). مساحت این ناحیه تقریباً  $4a^2$  است (عرض دیسک است). یک شکستگی مورب و یک شکستگی افقی قابل شناسایی است. شکستگی مورب با زاویه ۳۰ درجه نسبت به قائم و طول  $3a$  رشد می‌کند. شکستگی افقی با طول  $2a$  در مدل رشد کرده و به سطح آزاد برخورد می‌کند که منجر به ایجاد یک تراشه سنگی می‌شود.



شکل ۹: توزیع شکست در مدل‌های با مقاومت کششی، الف) ۵ MPa، ب) ۱۰ MPa و ج) ۲۵ MPa

به‌طور کلی می‌توان دریافت که در فشار محصورکننده ۲۵ MPa، با افزایش مقاومت کششی، مساحت زون شکست تقریباً ثابت است و شکستگی بزرگ مقیاس در مدل ایجاد نمی‌شود.

#### ۳-۳-تأثیر مقاومت کششی مدل بر میزان نفوذ دیسک

به‌منظور بررسی تأثیر مقاومت کششی مدل بر میزان نفوذ دیسک، فاصله بین سطح حفاری و خط موازی با آن که در انتهای ناحیه شکسته شده قرار می‌گیرد، به‌عنوان شعاع زون تأثیر ثبت می‌شود (شکل ۱۰-الف). حاصل تقسیم این فاصله بر عمق نفوذ دیسک (۴ mm) بیانگر شعاع زون تأثیر است. شکل ۱۰-ب تأثیر مقاومت کششی مدل را بر میزان نفوذ دیسک نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر مربوط به دو فشار

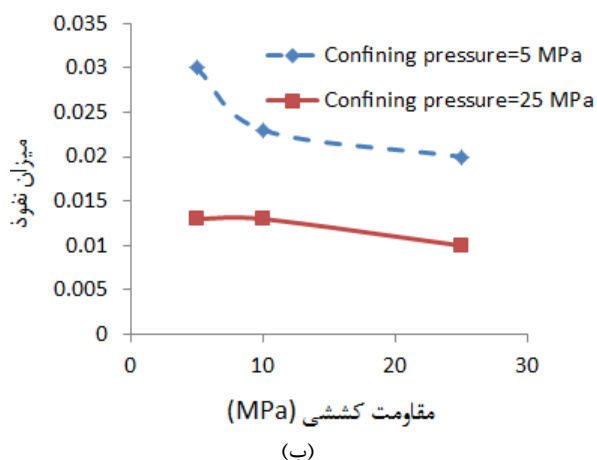
#### ب) فشار محصورکننده ۲۵ MPa

ب-۱-مدل با مقاومت کششی ۵ MPa: در این حالت زون خردشده مستقیم زیر تیغه و به‌صورت مثلثی ایجاد شده است (شکل ۹-II-الف). مساحت این ناحیه تقریباً  $a^2$  است. یک شکستگی قائم به طول  $a$  در مدل ایجاد می‌شود.

ب-۲-مدل با مقاومت کششی ۱۵ MPa: در این حالت زون خردشده دارای مساحت تقریباً  $a^2$  است (شکل ۹-II-ب). در این وضعیت تراشه ای ایجاد نمی‌شود.

ب-۳-مدل با مقاومت کششی ۲۵ MPa: زون خردشده نواری و دارای مساحت تقریباً  $a^2$  است (شکل ۹-II-ج). در این حالت نیز شکستگی و تراشه بزرگ مقیاس در مدل ایجاد نمی‌شود.

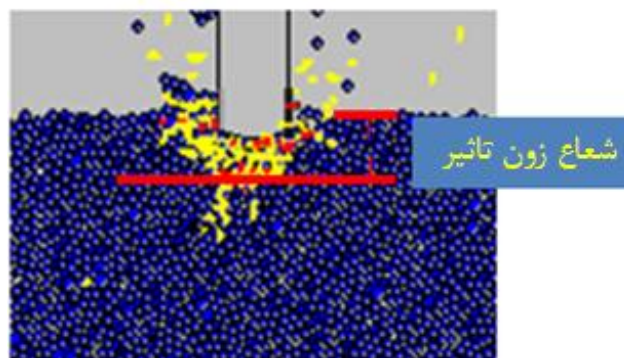
میزان نفوذ تحت تأثیر مقاومت کششی قرار نمی‌گیرد. در این شرایط در مقاومت کششی کم، اثر فشار محصورکننده باعث تراکم زیاد سنگ می‌گردد و در مقاومت کششی زیاد، مقاومت اتصال‌ها به همراه اثر فشار محصورکننده باعث مقاومت زیاد مدل می‌شود به طوری که در هر وضعیت میزان نفوذ ثابت است. لازم به ذکر است که با افزایش فشار محصورکننده از ۵ MPa به ۲۵ MPa میزان نفوذ کاهش می‌یابد که این به دلیل افزایش فشردگی مدل و افزایش مقاومت اتصال‌ها است.



شکل ۱۰: الف) ضخامت تراشه ایجاد شده تحت اثر دیسک، ب) تأثیر مقاومت کششی مدل بر میزان نفوذ دیسک

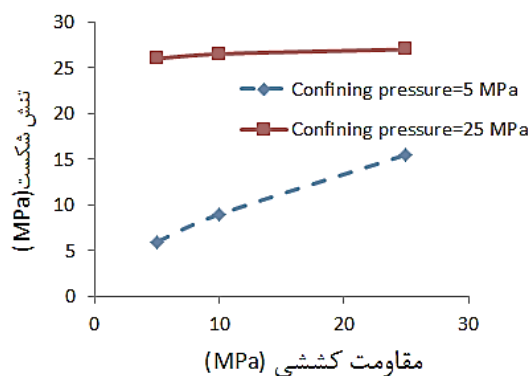
محصورکننده ارائه شده است. خطوط خط چین و توپر به ترتیب مربوط به فشار محصورکننده ۵ MPa و ۲۵ MPa است.

زمانی که فشار محصورکننده ۵ MPa است، میزان نفوذ با افزایش مقاومت کششی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در شرایطی که فشار محصورکننده کمتر از مقاومت کششی سنگ باشد، میزان نفوذ تحت تأثیر مقاومت کششی قرار دارد. زمانی که فشار محصورکننده ۲۵ MPa است، با افزایش مقاومت کششی میزان نفوذ تقریباً ثابت است. به عبارت دیگر در شرایطی که فشار محصورکننده بیشتر از مقاومت کششی سنگ باشد،



(الف)

نمی‌گیرد. در این شرایط در مقاومت کششی کم، اثر فشار محصورکننده باعث تراکم زیاد سنگ می‌شود و در مقاومت کششی زیاد، مقاومت اتصال‌ها به همراه اثر فشار محصورکننده باعث مقاومت زیاد مدل می‌شود به طوری که برای غلبه بر این مقاومت و ایجاد شکست به تنش ثابتی نیاز است.

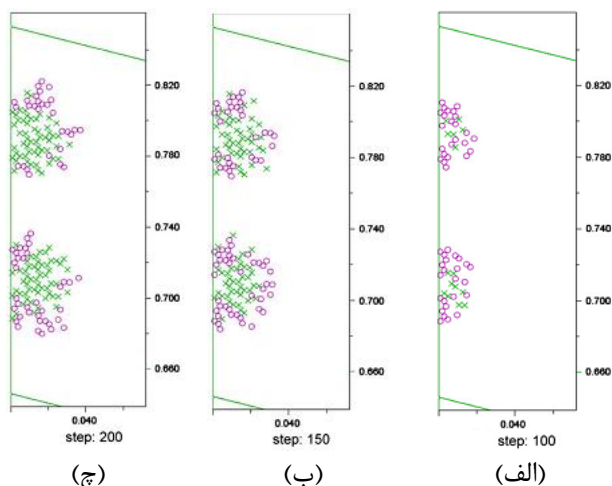


شکل ۱۱: تأثیر مقاومت کششی مدل بر تنش شکست

### ۳-۴- بررسی تأثیر مقاومت کششی مدل بر بیشینه تنش شکست

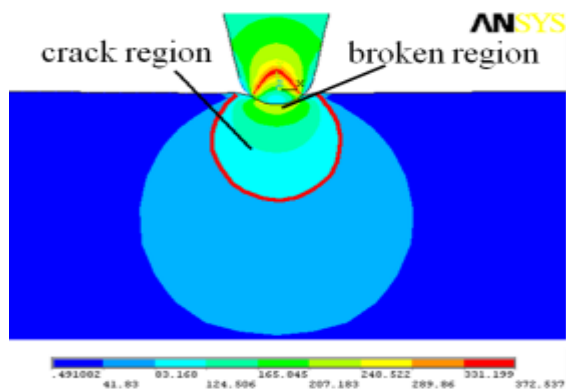
شکل ۱۱ تأثیر مقاومت کششی مدل را بر تنش شکست نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر مربوط به دو فشار محصورکننده ارائه شده است. خطوط خط چین و توپر به ترتیب مربوط به فشار محصورکننده ۵ MPa و ۲۵ MPa است.

زمانی که فشار محصورکننده ۵ MPa است (خط چین)، تنش شکست با افزایش مقاومت کششی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در حالتی که فشار محصورکننده کمتر از مقاومت کششی سنگ باشد، تنش شکست تحت تأثیر مقاومت کششی قرار دارد. زمانی که فشار محصورکننده ۲۵ MPa است (خط توپر)، با افزایش مقاومت کششی تنش شکست ثابت است. به عبارت دیگر در حالتی که فشار محصورکننده بیشتر از مقاومت کششی سنگ باشد، تنش شکست تحت تأثیر مقاومت کششی قرار

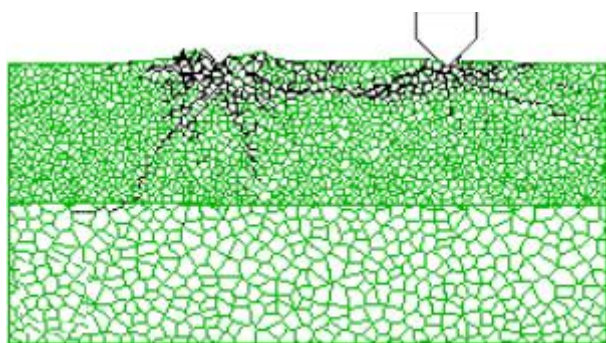


شکل ۱۲: الگوی شکست سنگ با زاویه درزه ۷۵ درجه در سه پله زمانی مختلف (الف) ۱۰۰ سیکل، (ب) ۱۵۰ سیکل و (ج) ۲۰۰ سیکل در نرم افزار UDEC

نتایج تحقیقات جیان [۲۱] بر توزیع تنش و شکست حاصل از برنده TBM نشان داد که زون شکست بیضوی در ناحیه زیر دیسک ایجاد می شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: ناحیه شکسته شده الاستیک و پلاستیک بیضوی زیر دیسک در نرم افزار ANSYS



شکل ۱۴: ناحیه شکست زیر برنده در نرم افزار UDEC

لازم به ذکر است که با افزایش فشار محصورکننده از ۵ MPa به ۲۵ MPa تنش شکست افزایش می یابد که این به دلیل افزایش فشردگی مدل و افزایش مقاومت اتصال ها است.

اعمال دیسک U شکل به مدل عددی منجر به سه ناحیه شکست می شود. ناحیه خرد شده، ناحیه بینابینی و ناحیه الاستیک. توزیع این نواحی دایره ای و یا بیضوی است. مقاومت کششی و شار محصورکننده در توسعه این نواحی تأثیرگذار هستند. با افزایش مقاومت کششی و فشار محصورکننده، توسعه این نواحی کاسته می شود. به عبارت دیگر با افزایش مقاومت کششی و شار محصورکننده اتصال دیسک ها مستحکم تر شده و مقاومت آن ها افزایش می یابد که این منجر به کاهش شعاع تأثیر دیسک می شود. با افزایش مقاومت کششی، تعداد کل ترک ها و مخصوصاً تعداد ترک های کششی کاسته می شود. همچنین گسترش زون شکست محدود می شود (شکل ۹-الف، ب و ج). همچنین با مقایسه شکل I-۹ و II می توان دریافت که با افزایش فشار محصورکننده وسعت ناحیه شکست کاهش یافته و هیچگونه شکستگی و تراشه ای در مدل ایجاد نمی شود. همچنین تعداد ترک های کششی کاهش می یابد.

همچنین تحقیقات بجاری و خادمی حمیدی [۲۰] بر تأثیر فاصله داری و جهت داری درزه ها بر عملکرد برش TBM، نشان داد که ناحیه آسیب دیسک بیضوی بوده و به نواحی الاستیک و پلاستیک تقسیم می شود (شکل ۱۲). این نتایج با یافته های این تحقیق تطابق مناسبی دارد.

لازم به ذکر است که تحقیقات لونو [۲۲] درباره تأثیر برنده بر مکانیزم برش سنگ نشان داد که سنگ زیر برنده کاملاً شکسته شده و با فاصله گرفتن از دیسک میزان آسیب کاهش می یابد (شکل ۱۴).

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر مقاومت کششی و فشار محصورکننده بر مکانیزم شکست و عمق نفوذ دیسک بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که:

۱- در فشار محصورکننده ۵ MPa، با افزایش مقاومت کششی نیروی شروع ترک، تنش شکست افزایش می‌یابد ولی وسعت شکست و میزان نفوذ دیسک کم می‌شود.

۲- در فشار محصورکننده ۲۵ MPa، با افزایش مقاومت کششی نیروی شروع ترک، تنش شکست، وسعت شکست و میزان نفوذ دیسک تقریباً ثابت است.

۳- با افزایش فشار محصورکننده، نیروی شروع ترک و تنش شکست افزایش و وسعت شکست و میزان نفوذ دیسک کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [۱] صالحی، بهرام. (۱۳۸۶)، فن تونل‌زنی با TBM. تهران، ناشر صناعی شه‌میرزایی، انتشارات صناعی.
- [2] Park, K. I., Chang, S. H., Choi, S. W., and Jeon, S. W., 2006, "Prediction of the optimum cutting condition of TBM disc cutter in Korean granite by the linear cutting test." Proc. KSRM Conf., pp. 217-236.
- [3] Chang, S. H., Choi, S. W., Bae, G. J., and Jeon, S. W., 2007, "A parametric study of rock properties and mechanical cutting conditions for deriving an optimum design model of a TBM cutter head equipped with disc cutters", J. Korean Society Civil Eng., Vol 27, No. 1, pp. 87-98 (in Korean).
- [4] Yu, S. H., 2007, "A study on rock cutting behavior by TBM disc cutter, MSc Thesis, Seoul National University.
- [5] Cho, J. W., Yu, S. H., Jeon, S. W., and Chang, S. H., 2008, "Numerical study on rock fragmentation by TBM disc cutter", Tunneling Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 139-152.
- [6] Jeong, H. Y., Jeon, S. W., Cho, J. W., Chang, S. H., and Bae, G. J., 2011, "Assessment of cutting performance of a TBM disc cutter for anisotropic rock by linear cutting test", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 6, pp. 508-517 (in Korean).
- [7] Roxborough FF, Phillips HR., 1975, "Rock excavation by disc cutter", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 12,361-366
- [8] Rostami J, Ozdemir L., 1993, "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", Proc RETC Boston, MA, pp 793-809 .
- [9] Gertsch R, Gertsch L, Rostami J., 2007, "Disc cutting tests in Colorado red granite: implications for TBM performance prediction", Int J Rock Mech Min Sci 44,238-246.
- [10] Cook NGW, Hood M, Tsai F., 1984, "Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 21:97-107
- [11] Liu HY, Kou SQ, Lindqvist PA, Tang CA., 2002, "Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters". Int J Rock Mech Min Sci 39,491-505
- [12] Gong QM, Jiao YY, Zhao J., 2006a, "Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters", Tunn Undergr Space Technol 21, 46-55
- [13] Gong QM, Zhao J, Hefny AM., 2006b, "Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization", Tunn Undergr Space Technol 21:263.
- [14] Chiaia, B., 2001 "Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter", International Journal of Solids and Structure 38, 7747-7768.
- [15] Gong, Q.M., Zhao, J., 2007, "Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 317-324.
- [16] Hongsu, Ma., Lijun Yin., Hongguang, Ji., 2011, "Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 48, pp. 1021-1033.
- [17] Itasca Consulting Group Inc. 2004., "PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions) User's Guides" Minneapolis, MN, USA.
- [18] Potyondy, D., Cundall, P., 2004, "A bonded-particle model for rock", Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, Vol. 41, pp. 1329-1364.
- [19] Cundall P., 1971, "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", In: Proceedings of the symposium of international society of rock mechanics, vol 1. Nancy, France. Paper no. II-8.
- [20] Bejari H, Khademi Hamidi J., 2013, "Simultaneous Effects of Joint Spacing and Orientation on TBM Cutting Efficiency in Jointed Rock Masses", Rock Mech Rock Eng, 46, 897-907
- [21] Jian S, (2015), "Stress and Wear Analysis of the Disc Cutter of Rock Tunnel Boring Machine", The Open Mechanical Engineering Journal, 9, 721 - 725

- [22] Lunow C., Konietzky \H., 2009, “Two dimensional simulation of the pressing and the cutting rock destruction”,mInternational Conference on Computational Methods in Tunnelling Ruhr University Bochum, 9-11 September, Aedificatio Publishers, 1-4.

پی نوشت

---

\ Particle Flow Code