

## تأثیر جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر نفوذ دیسک TBM با استفاده از PFC2D

وهاب سرفرازی\*<sup>۱</sup>، رحمان شیرکوند<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۳۱

دریافت مقاله: ۹۶/۰۴/۰۵

چکیده:

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار PFC2D تأثیر جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر مکانیزم خردشدگی سنگ بررسی شده است. به این منظور ۵ زاویه‌داری برای تنش‌های محصورکننده وارد بر سنگ با مقاومت کششی ۲/۱ مگاپاسکال انتخاب شده است. مدل‌های عددی با جهت‌داری‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب تحت تنش محصورکننده ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تنش شروع ترک قرار گرفتند. دیسک‌های انتخاب شده جهت حفاری سنگ U شکل و فاصله‌داری بین آنها ثابت 1a بودند. (a عرض تیغه می باشد). در نهایت از نتایج گرفته شده می‌توان دریافت که بهینه‌ترین جهت‌داری تنش‌های محصورکننده در فاصله‌داری ثابت 1a، و در جهت صفر درجه می‌باشد که باعث خردایش بهتر و ایجاد تراشه در سنگ در فضای بین دیسک‌های برنده می‌شود.

کلمات کلیدی: نرم‌افزار PFC2D، جهت‌داری، مقاومت کششی، تنش‌های محصورکننده، فاصله‌داری دیسک

۱ هیات علمی دانشگاه صنعتی همدان، گروه مهندسی معدن، همدان، ایران sarfarazi@hut.ac.ir

۲ دانشجوی فوق لیسانس معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

\*مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه:

تونل سازی در جهان امروز یکی از مشاغل مهم بوده که در شرایط موجود، راه های صعب العبور را خیلی آسان ساخته است. دستگاه حفاری تونل (Tunnel Boring Machine) یا TBM، یکی از مهمترین ماشین آلات حفر تونل می باشد که قادرند تونل را به صورت تمام مقطع حفر کنند. استفاده از این ماشین مزایایی همچون کاهش اضافه حفاری و ایجاد دیوارهای بدون دست خوردگی در تونل را دارند. این دستگاه به صورت قابل توجهی هزینه نگهداری تونل را کاهش می دهد که خود این عمل باعث شده برای استفاده در مناطق شهری مناسب باشند. از مهم ترین عوامل بکارگیری موفق ماشین های حفاری، طراحی بهینه و پیش بینی عملکرد ماشین حفر تونل می باشد که تحت تاثیر شرایط زمین شناسی و خواص توده سنگ و ماده سنگ و مشخصات TBM (از قبیل اندازه دیسک کاترها و فاصله داری متوسط آنها) و پارامترهای عملیاتی آن است. یکی از مهم ترین پارامترهای تعیین کننده عملکرد ماشین حفر تونل (TBM)، خصوصیات توده سنگ می باشد. تنش های محصورکننده از جمله ویژگی های خصوصیات توده سنگ می باشد. تنش محصورکننده یکی از مهم ترین عواملی است که میزان درصد تأثیر ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ را با توجه به مقاومت سنگ دربرگیرنده کنترل می کند. به عبارت دیگر تنش محصورکننده با توجه به مقاومت سنگ عاملی است که میزان اثر ناپیوستگی ها را بر روی مقاومت سنگ تغییر می دهد. ناپیوستگی ها یکی از مهم ترین عواملی هستند که باعث ایجاد خواص آنیزوتروپی مقاومتی سنگ شده و سبب کاهش مقاومت سنگ می گردند. در نتیجه جهت توصیف رفتار سنگ حتماً باید خواص مربوط به ناپیوستگی ها و میزان تأثیری که بر روی سنگ می گذارند مورد توجه و بررسی قرار گیرد (Ramamurthy, 1993). با توجه به اهمیت بالای

عملکرد ماشین TBM محققان فراوانی به بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد دیسک های TBM پرداخته اند.

Grandori و همکارانش در سال ۱۹۹۵ به مطالعه تاثیر نیروی رانش به ازای هر ابزار برش بر نرخ نفوذ برای انواع گرانتیت پرداخته اند. نتایج نشان داد که با افزایش نیروی رانش، نرخ نفوذ افزایش می یابد (Liu (Grandori, 1995) و همکارانش در سال ۲۰۰۲ با استفاده از شبیه سازی عددی روند خردایش شکستگی سنگ توسط یک ابزار برش گوه ای و دو ابزار برش گوه ای مورد ارزیابی قرار دادند (Lui, 2002). Gong و همکارانش در سال ۲۰۰۶ فرآیند خردایش سنگ ناشی از دو دیسک TBM و بهینه سازی فاصله دیسک ها را با استفاده از شبیه سازی عددی انجام دادند. در این مطالعه، روند تراشه سنگ ناشی از دو دیسک TBM با استفاده از روش المان مجزا (DEM) انجام شد (Gong, 2006). Lee و همکاران در سال ۲۰۰۹ به شبیه سازی عددی مکانیزم خردایش سنگ با توجه به فرورفتگی دیسک های TBM در نمونه سنگ هایی با تک درزه پرداخته و الگوی انتشار ترک وابسته به نقطه تماس دیسک برشی و زاویه درزه های سنگ برای نمونه سنگ با یک درزه تنها با استفاده از UDEC مورد مطالعه قرار گرفت (Lee et al., 2009). Cho و همکارانش در سال ۲۰۱۰ به مطالعه فاصله داری بهینه دیسک های برشی TBM با استفاده از AUTODYN 3D برای شبیه سازی شکست دینامیکی در آزمایش دستگاه برشی خطی (LCM) پرداختند (Cho, 2010). Bejari و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعه اثرات همزمان فاصله داری و جهت گیری درزه در نرخ نفوذ تک دیسک برشی با استفاده از روش اجزا مجزا DEM پرداخته اند (Bejari et al., 2011). نتایج گرفته شده نشان داد که با افزایش فاصله داری درزه ها در یک جهت گیری درزه باعث کاهش نرخ نفوذ TBM می شود. تحقیقات انجام شده توسط Hongsu و همکاران در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که تنش

کد جریان ذره دوبعدی، یک کد المان مجزاست که توده‌سنگ را با مجموعه‌ای از دیسک‌های دایره مدل می‌نماید. ذرات مستقل از یکدیگر حرکت می‌کنند و فقط در نقاط تماس با یکدیگر اندرکنش دارند. دیسک‌ها توسط اتصال موازی به یکدیگر اتصال دارند. برای تعیین میکروپارامترهای مناسب اتصال موازی، کالیبراسیون انجام می‌شود. مدل اتصال موازی که در این مقاله از آن استفاده شده است با مشخصه‌های 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، مینیم شعاع دیسک‌ها، ضریب افزایش‌دهنده شعاع دیسک، مدول یانگ اتصال موازی دیسک‌ها و نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال موازی. پروسه تولید مدل سنگ از پنج مرحله‌ی فشرده‌گی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیک، کاهش تعداد ذرات معلق در مدل، ایجاد پیوندهای موازی و حذف دیواره‌های مدل انجام می‌شود.

محصورکننده تاثیر قابل توجهی بر عوامل کلیدی خردشدگی سنگ از قبیل زاویه ترک، طول ترک و اتلاف انرژی دارد (Hongsu, 2011). Bejari و همکاران در سال ۲۰۱۳ به مطالعه تاثیر هم‌زمان فاصله درزه‌ها و جهت‌داری آن‌ها در بهره‌وری برش TBM در توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از شبیه‌سازی المان مجزا (DEM) بر روی دو دیسک برشی پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که، با افزایش فاصله درزه‌ها، بهره‌وری برش TBM کاهش می‌یابد (Bejari et al., 2013). سرفرازی و همکاران ۱۳۹۵، تاثیر مقاومت کششی و فشار محصورکننده را بر مکانیزم خردایش مدل عددی مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهند که الگوی شکست تابع نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده می‌باشد و نیروی شکست تابع الگوی شکست نمونه‌ها است. در مطالعات فوق، تاثیر جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر مکانیزم شکست سنگ در زیر دیسک‌های TBM بررسی نشده است. از آنجایی که نرم‌افزار PFC2D توانایی مدل‌سازی رشد و گسترش ترک را دارد لذا در این تحقیق از این نرم‌افزار استفاده شده است.

## ۲. مدل‌سازی عددی با استفاده از کد جریان ذره دو

### بعدی PFC2D

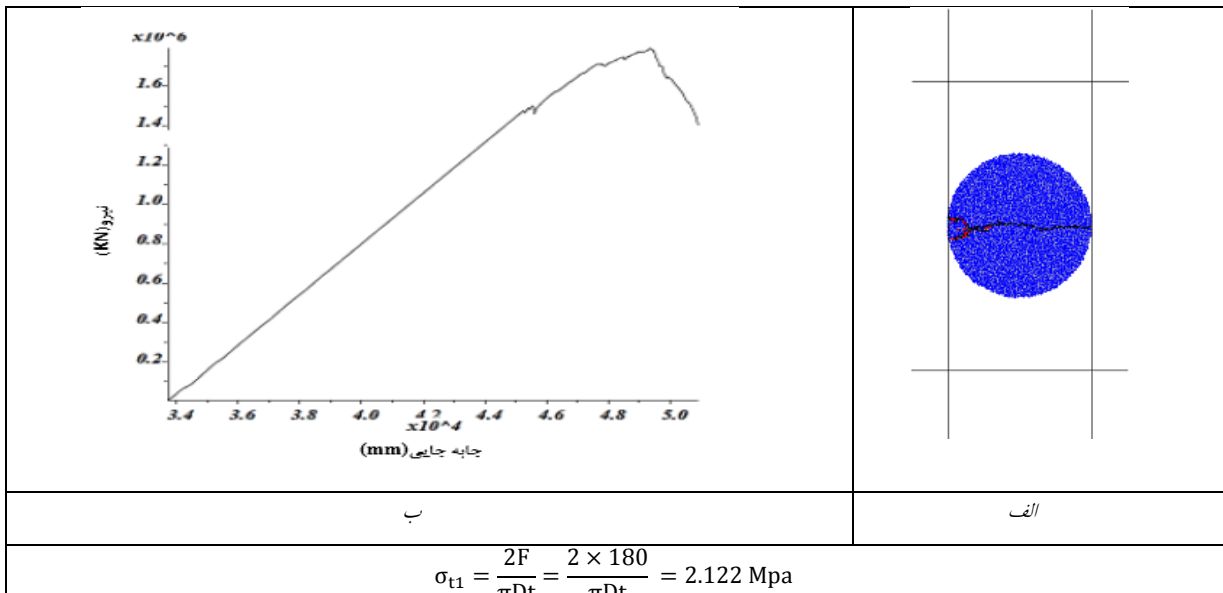
جدول ۱. میکروپارامترهای مدل عددی برای سنگ با مقاومت کششی ۲/۱ مگاپاسکال

مقادیر	میکروخصوصیات	مقادیر	میکروخصوصیات
۱	افزایش‌دهنده شعاع اتصال موازی $\bar{\lambda}$	دیسکی	نوع ذره
۴۰	مدول یانگ اتصال موازی $\bar{E}$ (GPa)	۳۰۰۰	دانسیتته (kg/cm <sup>3</sup> )
۱/۷	نسبت سختی‌های اتصال موازی $\left(\frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}\right)$	۰/۰۰۳	مینیم شعاع دیسک (mm)
۰/۴	ضریب اصطکاک	۱/۶۶	نسبت مینیم شعاع به ماکزیم شعاع دیسک
۱۰	مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (MPa)	۰/۱	نسبت تخلخل
۰/۲	مقاومت نرمال اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۰/۷	ضریب میرایی ( $\alpha$ )
۱۰	مقاومت برشی اتصال موازی، میانگین (MPa)	۴۰	مدول یانگ تماسی $\bar{E}$ (GPa)

۰/۲	مقاومت برشی اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۱/۷	$\left(\frac{k_n}{k_s}\right)$ نسبت سختی‌های اتصال تماسی
-----	---	-----	---

با استفاده از کد جریان ذره (PFC2D)، ابتدا مدل‌های عددی با ابعاد  $1000 \times 1000$  میلی‌متر ساخته شد. سپس با استفاده از کالیبراسیون مقاومت کششی و اعمال میکروپارامترهای موجود در جدول ۱ نمونه سنگی با مقاومت کششی ۲/۱ مگاپاسکال آماده‌سازی شد.

شکل ۱ الگوهای شکست مدل‌های عددی را برای مقاومت ۲/۱ مگاپاسکال نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ و قرمز رنگ، نشان دهنده ترک‌های کششی و ترک‌های برشی می‌باشند. بطور کلی، ترک‌های کششی منجر به شکست نمونه می‌گردند. یک گوه در سمت چپ مدل نیز قابل شناسایی می‌باشد.



شکل ۱- الف- مدل PFC2D تحت آزمایش برزیلین؛ ب- نمودار نیروی شکست بر اساس جابجایی صفحات.

دوران نمی‌یابند و نتایج بدست آمده همان نتایج مدل در حالت افق می‌باشد. به همین دلیل میزان تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره در حالت ۹۰ درجه همان‌طور که در جدول ۲ آورده شده، همان مقداری است که در حالت افق (۰ درجه) بدست آمده است.

#### ۲-۲- اعمال تنش‌های محصورکننده

اعمال تنش‌های محصورکننده در برنامه PFC توسط بارگذاری بر روی دیوارهای مدل انجام می‌شود. نمونه توسط چهار صفحه پیرامونی بارگذاری می‌گردد. در حالت افق صفحات بالا وظیفه بارگذاری به دیسک‌های

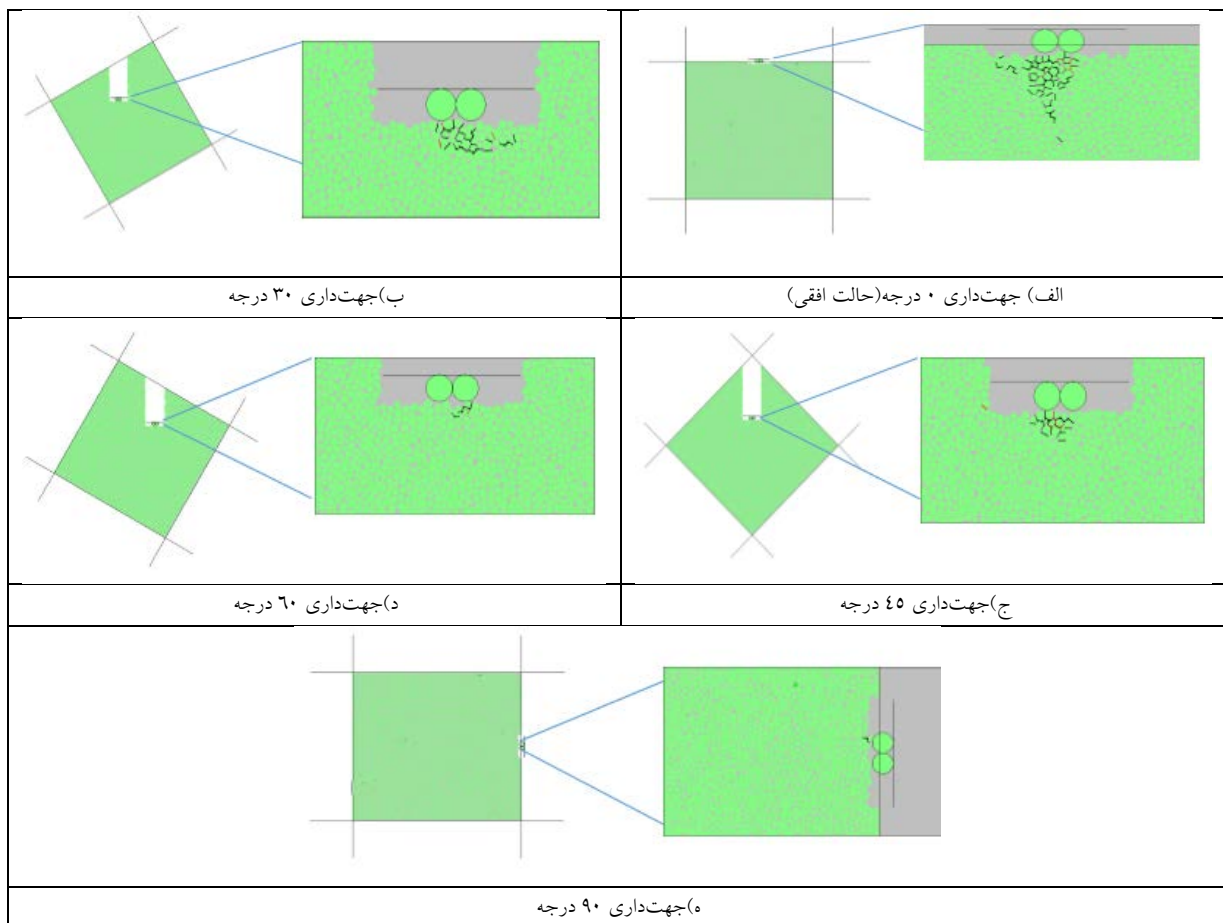
#### ۲-۱- اعمال جهت‌داری تنش‌های محصورکننده

برای نشان دادن جهت‌داری‌های مختلف با اعمال زاویه‌داری‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه پاد ساعتگرد به صفحات بارگذاری، جهت‌داری تنش‌های محصورکننده ایجاد می‌شود. به جای اعمال زاویه‌داری ۹۰ درجه به صفحات بارگذاری و چرخاندن آنها، حفاری مورد نظر را در جهت عمود بر صفحات بالایی و پایینی (تنش برجای مدل  $\sigma_1$  که به شرایط مرزی اعمال می‌شود)، اعمال کرده زیرا با چرخاندن صفحات با زاویه ۹۰ درجه و ایجاد حفاری در صفحه بالایی، تنش‌های اصلی مدل  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$

را برای هریک از جهت‌داری‌های ذکرشده بدست آورده، سپس مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره را محاسبه کرده و بر نمونه‌های بکر

انعطاف‌پذیری غشاء اطراف نمونه حفظ شود. در طی آزمایش، میزان تنش جانبی با مکانیزم کنترل شده‌ای ثابت می‌ماند. تنش‌های جانبی اعمال شده به مدل‌ها برای هر یک از مقاومت‌های سنگ در جهت‌داری‌های مختلف تنش محصورکننده در جدول ۲ آمده است.

TBM را برعهده دارند، صفحه پایین در راستای محور  $y$  به نمونه تنش اعمال می‌کند و صفحات جانبی، فشار جانبی مورد نظر را بر نمونه اعمال می‌کنند. با استفاده از آزمایش فشاری تک محوره سنگ، ابتدا تنش شروع ترک برای تنش اصلی  $\sigma_3$  اعمال می‌شود، همچنین مقدار تنش اصلی  $\sigma_1$  برای هریک از نمونه‌ها برابر با ۳۵ درصد تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره، می‌باشد. سختی نرمال دیوارهای جانبی کسری از سختی نرمال دیسک‌ها (۰/۲ - ۰/۰۱) در نظر گرفته می‌شود تا وضعیت



شکل ۲- روند تغییرات جهت‌داری تنش‌های محصورکننده در سنگ برای جهت‌داری‌های الف)  $0^\circ$ ، ب)  $30^\circ$ ، ج)  $45^\circ$ ، د)  $60^\circ$  و ه)  $90^\circ$ .

جهت‌داری روی مقاومت کششی، عمق نفوذ، فاصله‌داری و مقدار تنش محصورکننده ثابت فرض شده است. در شکل ۲ انواع شکست حاصل از مدلسازی جهت‌داری تنش‌های محصورکننده مختلف، تحت نفوذ و

### ۳. بررسی تاثیر جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر

مکانیزم شکست حاصل از نفوذ دیسک‌های TBM در این حالت به منظور بررسی اثرات جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر روند مکانیزم شکست سنگ و تغییرات

درصد تنش شروع ترک) ارائه شده است. میزان تنش‌های شروع ترک برای هریک از جهت‌داری‌ها بنابر جدول ۲ می‌باشد.

فاصله‌داری ثابت دیسک در سنگ با مقاومت  $\sigma_t = 2.1 \text{ MPa}$  تحت مقدار فشارهای محصورشوندگی کم، متوسط و زیاد (یعنی ۵، ۱۰ و ۱۵

جدول ۲. میزان تنش‌های شروع ترک برای هر یک از جهت‌داری‌ها

جهت‌داری	۰ درجه	۳۰ درجه	۴۵ درجه	۶۰ درجه	۹۰ درجه
میزان تنش شروع ترک (مگاپاسکال)	۶/۷۵	۳/۱۲۵	۲/۴۵	۱/۸۵	۶/۷۵

سپس شکستگی اصلی در زیر ناحیه خردشدگی به اندازه  $1a$  دارای زاویه ۱۵ درجه نسبت به راستای محور قائم پادساعتگرد و به سمت عمق ایجاد شده است. همچنین در این شکل مشاهده شده است که زون خردشدگی یا تراشه ایجاد شده در بین دیسک‌ها دارای بیشترین مقدار ممکن است. در شکل ۳-۱-ب فرایند شکست سنگ تحت نفوذ دیسک‌ها در تنش محصورکننده ۱۰ درصد تنش شروع ترک، زون خردشده در زیر دیسک‌ها در فاصله بین دو دیسک می‌باشد. میزان محدوده زون شکست تقریباً  $1/5b$  و شکستگی در زیر ناحیه خردشدگی به میزان  $2a$ ، که ابتدا به اندازه  $1a$  با زاویه ۱۵ درجه نسبت به محور قائم ساعتگرد سپس به اندازه  $1a$  با زاویه ۱۵ درجه نسبت به محور قائم پادساعتگرد به سمت عمق ایجاد شده است. همچنین در شکل ۳-۱-ج می‌توان دریافت که تنش محصورکننده ۱۵ درصد تنش شروع ترک نیز باعث ایجاد تراشه در فضای بین دو دیسک شده است. که میزان محدوده زون شکست تقریباً  $1/5b$  و شکستگی در زیر ناحیه خردشدگی به میزان  $1/5a$  با زاویه ۱۵ درجه نسبت به محور قائم ساعتگرد به سمت عمق ایجاد شده است.

### ۳-۲ جهت‌داری تنش محصورکننده ۳۰ درجه

در این مدل، در شکل ۳-۲-الف که میزان تنش محصورکننده پایین است بیان می‌شود که زون خردشدگی درست در زیر دیسک‌ها ایجاد شده است و میزان سطح پراکندگی آن تقریباً  $1/5b$  می‌باشد. سپس یک شکستگی در انتهای زون خردشدگی به اندازه  $1a$  در راستای محور

در شکل ۲ ترک‌های کششی 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. شکل ۲ اثرات تغییرات جهت‌داری تنش‌های محصورکننده در مقاومت کششی  $2/1$  مگاپاسکال، عمق نفوذ ۲ میلی‌متر، فاصله‌داری دیسک‌ها  $1a$  (اندازه قطر دیسک‌های برنده) و مقدار تنش محصورکننده ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تنش اولیه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، وضعیت شکست سنگ در جهت‌داری تنش‌های محصورکننده مختلف در فاصله‌داری ثابت دیسک‌های برنده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این شکل مدل‌سازی‌ها برای هریک از جهت‌داری خاص، شامل سه قسمت می‌شود. که این تقسیم‌بندی براساس مقادیر تنش‌های محصورکننده از کم به زیاد می‌باشد. حال برای بهتر بررسی کردن مکانیزم شکست سنگ در ذیل روند شکست و خردشدگی سنگ توضیح داده شده است.

### ۳-۱ جهت‌داری تنش محصورکننده ۰ درجه

در این حالت بیشترین زون شکست سنگ مربوط به کم‌ترین مقدار تنش محصورکننده می‌باشد. که مساحت این زون شکست تقریباً  $2b$  است (شکل ۳-۱-الف). برای نشان دادن محدوده زون شکست، آن را با واحد سطح یکی از دیسک‌های برنده سنگ که از این به بعد این واحد با حرف  $b$  بیان می‌شود، معرفی شده است.

۴. تأثیر افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره

شکل ۴ تغییرات نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره را، برحسب افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده نشان می‌دهد. این شکل برای فاصله‌داری‌های  $1a$ ،  $2a$ ،  $3a$  و  $4a$ ، به چهار بخش الف، ب، ج و د تقسیم شده است. در هر بخش، نمودارهای مربوط به تنش‌های محصورکننده ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تنش شروع ترک، تحت مقاومت  $2/1$  مگاپاسکال ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی فاصله‌داری‌ها، با افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده از ۰ تا ۹۰ درجه، مقدار نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره ثابت نمی‌ماند. در هر یک از فاصله‌داری‌ها، روند تغییرات نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره با افزایش جهت‌داری‌ها، برای همه تنش‌های محصورکننده یکسان است. یعنی تغییرات تنش‌های محصورکننده روی جهت‌داری و شاخص شکست ندارد. همچنین در یک فاصله‌داری ثابت، میزان این نسبت، با افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده از ۰ تا ۶۰ درجه افزایش و در جهت‌داری ۹۰ درجه کاهش می‌یابد. علت این کاهش ناگهانی، تغییر شکل زیاد دیسک‌های دیواره‌های تونل، تراشه کم و مقدار نیروی شکست کم نسبت به سایر جهت‌داری‌ها می‌باشد و همچنین چون در جهت‌داری ۹۰ درجه جهت حفاری صورت گرفته عمود بر راستای تنش اصلی فشاری  $\sigma_1$  می‌باشد، سبب این تغییرات ناگهانی شده است. بیشترین مقدار نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره، مربوط به جهت‌داری ۶۰ درجه در بالاترین مقدار تنش محصورکننده است. همچنین در همه فاصله‌داری‌ها، کم‌ترین مقدار این نسبت برای جهت‌داری

افق به سمت راست متمایل گشته است. همچنین برای شکل ۳-۲-ب، یعنی در تنش محصورکننده ۱۰ درصد تنش شروع ترک، مقادیر سطح زون خردشدگی و میزان جهت شکستگی درست مشابه حالت الف می‌باشد. همچنین سطح خردشدگی برای تنش محصورکننده زیاد (شکل ۳-۲-ج)، نسبت به دو حالت قبلی کم‌تر شده و این مقدار برای مدل تقریباً  $1b$  می‌باشد و هیچگونه شکستگی در مدل به وجود نیامده است.

### ۳-۳ جهت‌داری تنش محصورکننده ۴۵ درجه

در این قسمت زون خردشده ایجاد شده برای تمامی تنش‌های محصورکننده تقریباً یکسان می‌باشد (شکل ۳-۳-الف، ب و ج). همچنین این خردشدگی در اثر نفوذ دیسک سمت چپ به سطح سنگ ایجاد شده و هیچگونه تراشه‌ای در فضای بین دو دیسک اتفاق نیفتاده است. میزان سطح شکستگی در این مدل‌سازی‌ها تقریباً  $1b$  می‌باشد.

### ۳-۴ جهت‌داری تنش محصورکننده ۶۰ درجه

به طور مشابه حالت قبل، در این حالت نیز هیچگونه تراشه‌ای در فضای بین دو دیسک ایجاد نشده است. تنها خردشدگی ایجاد شده در اثر نفوذ دیسک سمت راست در سنگ به صورت یک شکستگی می‌باشد. میزان این شکستگی حدوداً  $0/5a$  بوده و برای تمامی تنش‌های محصورکننده به یک میزان است (شکل ۳-۴-الف، ب و ج). این مطلب نشان دهنده این است که در جهت‌داری ۶۰ درجه میزان خردشدگی ایجاد شده تأثیری روی افزایش تنش‌های محصورکننده نمی‌گذارد.

### ۳-۵ جهت‌داری تنش محصورکننده ۹۰ درجه

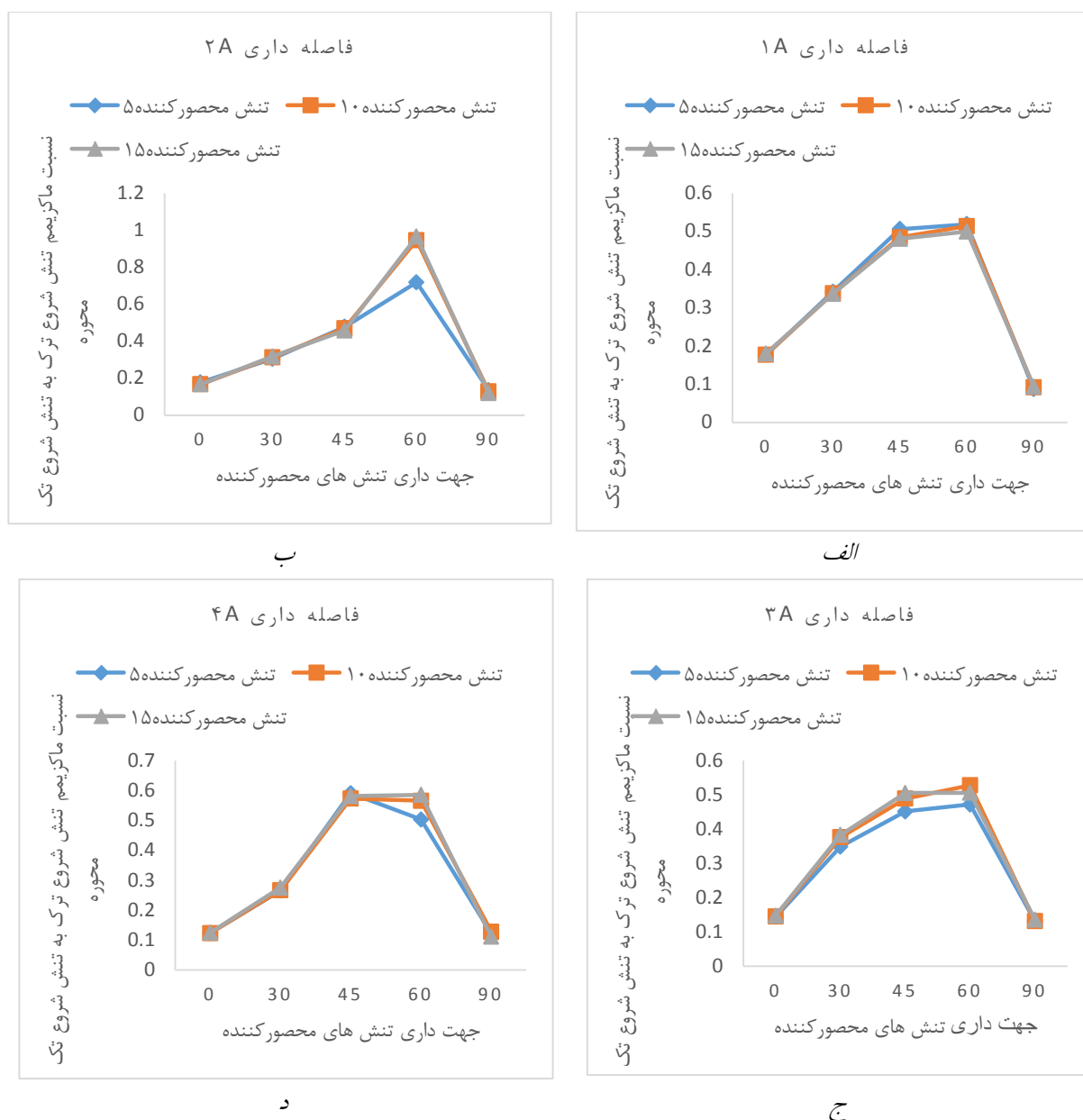
در این حالت نیز به مانند حالت ۴، هیچگونه تراشه در سنگ در فضای بین دو دیسک ایجاد نشده است و شکستگی ایجاد شده در اثر نفوذ دیسک بالایی در سنگ به صورت ریز ترک کوچک می‌باشد (شکل ۳-۵-الف، ب و ج).

۹۰ درجه تحت تنش محصورکننده ۵ درصد تنش شروع ترک می‌باشد.

			(۱) جهت‌داری ۰ درجه
الف) تنش محصورکننده ۵	ب) تنش محصورکننده ۱۰	ج) تنش محصورکننده ۱۵	
الف) تنش محصورکننده ۵	ب) تنش محصورکننده ۱۰	ج) تنش محصورکننده ۱۵	
			(۳) جهت‌داری ۴۵ درجه
الف) تنش محصورکننده ۵	ب) تنش محصورکننده ۱۰	ج) تنش محصورکننده ۱۵	
الف) تنش محصورکننده ۵	ب) تنش محصورکننده ۱۰	ج) تنش محصورکننده ۱۵	
			(۵) جهت‌داری ۹۰ درجه
الف) تنش محصورکننده ۵	ب) تنش محصورکننده ۱۰	ج) تنش محصورکننده ۱۵	

شکل ۳ اثرات تغییرات جهت‌داری تنش‌های محصورکننده بر مکانیزم خردشدگی سنگ





شکل ۴- تغییرات نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره برحسب افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده، تحت تنش محصورکننده متفاوت، در مقاومت‌های کششی و فاصله‌داری ثابت

از میزان شکست و خردشدگی در سنگ کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی فاصله‌داری‌ها برای همه تنش‌های محصورکننده، روند تغییرات نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره در همه جهت‌داری‌ها یکسان است. در یک فاصله‌داری ثابت میزان نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره، با

## ۵. نتیجه‌گیری

نتایج بررسی شده از این مدل‌سازی‌ها نشان داد که میزان خردشدگی سنگ در یک میزان تنش محصورکننده ثابت و فاصله‌داری بین دیسک‌های برنده به میزان ۱a، با افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده، میزان خردشدگی سنگ کاهش می‌یابد. همچنین برای یک جهت‌داری خاص با افزایش میزان تنش‌های محصورکننده

تنش شروع ترک می‌باشد. در نهایت می‌توان دریافت که بهینه‌ترین جهت‌داری تنش‌های محصورکننده در فاصله‌داری ثابت  $1a$  و در جهت صفر درجه می‌باشد که باعث خردایش بهتر و ایجاد تراشه در سنگ در فضای بین دیسک‌های برنده می‌شود. در فاصله‌داری  $1a$ ، با افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده از  $0$  تا  $60$  درجه در هر کدام از تنش‌های محصورکننده، مقدار نسبت ضخامت تراشه به عمق نفوذ دیسک کاهش، سپس با افزایش جهت‌داری از  $60$  تا  $90$  درجه به علت این که تراشه‌ای در سنگ به وجود نمی‌آید، نسبت ضخامت تراشه به عمق نفوذ دیسک صفر می‌باشد. بیشترین مقدار نسبت ضخامت تراشه به عمق نفوذ دیسک، مربوط به جهت‌داری  $0$  درجه در فاصله‌داری  $1a$  می‌باشد.

افزایش جهت‌داری تنش‌های محصورکننده از  $0$  تا  $60$  درجه افزایش یافته و در جهت‌داری  $90$  درجه کاهش یافته است. علت این کاهش ناگهانی، تغییر شکل زیاد دیسک‌های دیواره‌های تونل، تراشه کم، مقدار نیروی شکست کم نسبت به سایر جهت‌داری‌ها می‌باشد و همچنین چون در جهت‌داری  $90$  درجه جهت حفاری صورت گرفته عمود بر راستای تنش اصلی فشاری  $\sigma_1$  می‌باشد، سبب این تغییرات ناگهانی شده است. بیشترین مقدار نسبت ماکزیمم تنش شکست سنگ به تنش شروع ترک در آزمایش تک محوره مربوط به جهت‌داری  $60$  درجه و بالاترین مقدار تنش محصورکننده است. همچنین در همه فاصله‌داری‌ها کم‌ترین مقدار این نسبت برای جهت‌داری  $90$  درجه تحت تنش محصورکننده  $5$  درصد

## منابع

- سرفرازی، و.، میخک بیرالوند، ن.، ۱۳۹۵. مطالعه تاثیر نسبت مقاومت کششی به فشار محصورکننده بر نفوذ دیسک u شکل TBM توسط روش اجزای گسسته، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره یازدهم، شماره ۲۳، پاییز، صفحه ۳۳-۴۵.
- Bejari. H, Kakaie. R, Ataei .M, Khademi-Hamidi .J.2011. Simultaneous effects of joint spacing and joint orientation on the penetration rate of a single disc cutter. Mining Science and Technology (China) 21:507-512.
- 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.
- Grandori R, Jaeger M, Antonini F, Vigl L. 1995. Evinos-Mornos Tunnel, Greece—construction of a 30 km long hydraulic tunnel in less than three years under the most adverse geological conditions. Proceedings of the RECT, San Francisco, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. p. 747-67.
- Gong, Q.M., Jiao, Y.Y., Zhao, J., 2006. Numerical simulation of influence of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. Tunneling and Underground Space Technology 21 (1), 46-55.
- Hongsu Ma, 2011. 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.
- Jung-Woo Cho, Seokwon Jeon, Sang-Hwa Yu, Soo-Ho Chang,2010. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. Tunnelling and Underground Space Technology 25: 30-244.
- Liu, H.Y., Kou, S.Q., Lindqvist, C.A., Tang, C.A., 2002. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 39, 491- 505..
- Ramamurthy T. 1993. Strength and modulus responses of anisotropic rocks, comprehensive rock engineering, vol. 1. UK: Pergamon Press., p. 313-29 [Chapter 13].
- Seung-Joong Lee, Sung O. Choi., 2009. Numerical Analysis on Fragmentation Mechanism by Indentation of Disc Cutter in a Rock Specimen with a Single Joint. TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 19, No. 5, pp. 440-449.

