

تحلیل عددی تأثیر مشخصات هندسی شکستگی‌های توده سنگ بر نرخ نفوذ دستگاه TBM

سید مصلح افتخاری^۱؛ علیرضا باغبانان^{۲*}؛ راحب باقرپور^۳

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ؛ دانشگاه صنعتی اصفهان mosleh.eftekhari@mi.iut.ac.ir

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان bagh110@cc.iut.ac.ir

۳- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان bagherpour@cc.iut.ac.ir

(دریافت ۲۰ شهریور ۱۳۹۰، پذیرش ۲۸ خرداد ۹۱)

چکیده

شکستگی یکی از مهمترین پارامترهای اثر گذار بر نرخ نفوذ دستگاه TBM در توده سنگ است. در مطالعات گذشته اثر پارامترهای هندسی درزه‌ها به طور جداگانه و تنها برای یک دسته درزه منظم در نظر گرفته شده‌است در حالیکه توده سنگ واقعی شامل درزه‌هایی به صورت منفصل است. در این تحقیق تلاش شده‌است که با استفاده از الگوریتم روش عددی احتمالی، مدلی نزدیک به واقعیت برای بررسی اثر پارامترهای هندسی درزه‌ها بر نرخ نفوذ ایجاد شود که در آن به طور همزمان درزه‌ها به صورت مجزا نزدیک به شرایط واقعی زمین مدل شود. به منظور انجام مدل-سازی از روش ترکیبی شبکه درزه مجزا- روش المان مجزا استفاده شده‌است. نسبت سطح تراشه‌شدگی به تنش تراشه‌شدگی به طور غیرمستقیم بیانگر نرخ نفوذ TBM است. از آنجا که نیروی به کار رفته در تمام مدل‌ها یکسان بوده بنابراین معیار مقایسه‌ی نرخ نفوذ بین مدل‌ها سطح تراشه‌شدگی آن‌ها است. نتایج مدل‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که میزان افزایش سطح تراشه نسبت به سنگ بکر از تابع توزیع نرمال با میانگین ۴۶/۰۷ و انحراف معیار ۱۵/۵۱ تبعیت می‌کند. در سطح اعتماد ۸۰ درصد، میزان افزایش سطح تراشه نسبت به حالت سنگ بکر بیش از ۳۳ درصد و در سطح اعتماد ۹۵ درصد، میزان افزایش سطح تراشه نسبت به حالت سنگ بکر بیش از ۲۰ درصد است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که وجود درزه‌ها در سنگ سبب اغتشاش در انتشار ترک‌ها و میدان تنش و در نتیجه تغییر در شکل تراشه می‌شود که بیانگر تأثیر مهم درزه‌ها بر ایجاد و گسترش ترک‌ها و از این‌رو بر نرخ نفوذ است.

کلمات کلیدی

ماشین حفر تونل (TBM)، نرخ نفوذ، شبکه درزه مجزا، آنالیز احتمالی

۱- مقدمه

جهت درزه‌های یک دسته درزه بر نرخ نفوذ با مدل‌سازی پرداختند که با توجه به نتایج مدل‌سازی، افزایش زاویه‌ی بین جهت درزه‌ها و محور تونل (α) تا ۶۰ درجه سبب افزایش نرخ نفوذ دیسک و پس از آن باعث کاهش نرخ نفوذ می‌شود. بنابراین بیشترین نرخ نفوذ در زاویه ۶۰ درجه رخ می‌دهد [۱۳]. ایشان پس از آن در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر فاصله درزه‌ها از ۱۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر نرخ نفوذ پرداختند که با توجه به نتایج مدل‌سازی، با افزایش فاصله درزه‌ها نرخ نفوذ کاهش می‌یابد [۱۴]. پارامتر دیگری که گانگ و ژائو (۲۰۰۷) به بررسی اثر آن بر نرخ نفوذ پرداختند، پارامتر اندیس تردی سنگ است. با توجه به نتایج مدل‌سازی نتیجه گرفتند که نرخ نفوذ به‌طور تقریبی با افزایش تردی به صورت خطی افزایش می‌یابد و همچنین تأثیر اندیس تردی در سنگ با مقاومت فشاری بالاتر، بیشتر است [۱۵]. پس از آن شریف‌زاده و ایران‌زاده اثر فاصله‌داری و شیب دسته درزه بر عملکرد TBM را به صورت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که زاویه بحرانی شیب دسته درزه که در آن احتمال حداکثر پیشروی وجود دارد بین ۴۵ تا ۶۰ درجه است و دیگر اینکه زاویه شیب دسته درزه اثر بیشتری بر فرآیند تولید تراشه سنگ نسبت به فاصله‌داری دارد [۱۸-۱۶]. نتایج مدل‌سازی و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر واقعی حاکی از آن است که روش عددی برای تعیین نرخ نفوذ روشی مناسب است، اما از طرفی مدل‌سازی تنها اثر یک پارامتر خاص را بر نرخ نفوذ در نظر می‌گیرند در صورتی که شرایط واقعی زمین تلفیقی از پارامترهای مختلفی از قبیل وجود درزه‌های مختلف با جهت‌داری و فاصله‌داری متفاوت است، بنابراین بهترین مدل به منظور بررسی نرخ نفوذ ایجاد مدلی با شرایطی نزدیک به شرایط واقعی زمین است. سیستم شکستگی‌ها در توده‌سنگ هندسه‌ی پیچیده‌ای دارند و از طرفی روش DEM روشی بسیار مفید برای شبیه‌سازی مدل‌های هندسه‌ی پیچیده از سیستم‌های شکستگی از قبیل مدل‌های شبکه شکستگی مجزا با ساختمان ساده یا پیچیده‌ای از ماتریکس سنگ و شکستگی‌ها است. از طرف دیگر، به طور کلی کیفیت و کمیت پارامترهای هندسی برداشت‌شده صحرائی عدم قطعیت بالایی دارند. برای کاهش چنین عدم قطعیت‌هایی در سیستم شکستگی‌ها، می‌توان از مدهای شبکه درزه‌مجازی تصادفی با فرض اینکه پارامترهای هندسی درزه‌ها به صورت آماری توزیع شده‌اند استفاده کرد [۱۹]. بنابراین، روشی مناسب به منظور مدل‌سازی نزدیک به واقعیت توده‌سنگ، استفاده از روش تلفیقی شبکه درزه مجزا-روش المان مجزا است که در این تحقیق نیز استفاده شده‌است. پارامترهای مکانیکی و هندسه‌ی توده سنگ برای انجام مدل‌سازی از تونل بلند زاگرس برداشت شده‌است.

یکی از عوامل مهم در حفر تونل‌های زیرزمینی، مدت زمان لازم و بودجه‌ی مورد نیاز برای اجرای آن است، بدین منظور، نیاز به پیش‌بینی نرخ پیشروی یا سرعت حفاری ماشین حفر تونل است. یکی از عوامل مؤثر بر سرعت حفاری یا نرخ پیشروی TBM نرخ نفوذ است که بیانگر نسبت فاصله حفاری شده به زمان انجام آن در طول حفاری پیوسته یا به عبارتی برابر نرخ پیشروی آبی ماشین است. در صورت پیش‌بینی قابل قبولی از نرخ نفوذ و در نتیجه نرخ پیشروی، می‌توان تخمین قابل اطمینانی از زمان و بودجه‌ی لازم برای انجام پروژه به‌دست آورد. با توجه به اهمیت موضوع پیش‌بینی نرخ نفوذ در عملیات تونل‌سازی، هم‌زمان با ساخت TBM همواره محققانی به دلیل اهمیت این پارامتر در پی ایجاد روشی به منظور پیش‌بینی مقدار آن بوده‌اند و به‌طور کلی روش‌های متعددی که در چهار گروه اصلی روش‌های تجربی، تئوری، شبیه‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌سازی عددی ارائه شده است. روش تجربی بر مبنای ارتباط عملی و مشاهداتی بین پارامترهای زمین و ماشین برقرار است و به واسطه برآزش بین خصوصیات سنگ و پارامترهای ماشین با نرخ نفوذ به دست آمده‌اند [۷-۱]. مزیت روش‌های تجربی این است که به‌طور طبیعی تمام تأثیرات ناشی از زمین و ماشین را در نظر می‌گیرند. اما عیب اساسی آن‌ها محدود بودن به فناوری به کار گرفته شده در ماشین است، به عبارت دیگر رشد فناوری و ارائه ماشین‌هایی با قابلیت‌های متفاوت استفاده از این روش‌ها را محدود می‌سازد. با این وجود به دلیل اینکه مدل‌های ارائه شده در یک حالت خاص از شرایط زمین پیشنهاد شده‌اند قابل تعمیم به تمام شرایط نمی‌باشند و می‌توان در شرایط یکسان با تحقیق انجام شده مورد استفاده قرار گیرند. در روش تئوری محققانی با توجه به ارتباط تئوری میان پارامترهای ماشین و نفوذ دیسک و همچنین در برخی موارد پارامترهایی از سنگ به پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداخته‌اند [۸، ۱۰]. در سال‌های اخیر با روش شبیه‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداخته شده‌است [۱۱، ۱۲] که روشی سریع و کم هزینه و در عین حال بدون نیاز به فرمول‌بندی است اما با این وجود به دلیل نیاز به تاریخچه تونل‌سازی تنها در مرحله اجرا قابل استفاده است. روش عددی، روشی بسیار مفید در شبیه‌سازی مدل‌هایی با شرایط نزدیک به واقعیت است که در سال‌های اخیر گانگ و ژائو [۱۳-۱۵] به منظور بررسی اثر پارامترهایی از قبیل فاصله و جهت درزه‌ها، فاصله‌ی دیسک‌های حفاری و تردی بر نفوذ، به تعیین نرخ نفوذ با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم افزار UDEC پرداخته‌اند. گانگ و ژائو در سال ۲۰۰۵ به بررسی اثر

۲- مشخصات و پارامترهای تونل مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از قطعه دوم تونل بلند زاگرس واقع در غرب کشور است. قطعه دوم این تونل به طول ۲۶ کیلومتر و به قطر ۶/۷۳ متر بوسه‌سایه ماشین حفاری تونل (TBM) با سپر دوپل در حال اجرا است. حداکثر ارتفاع روباره تونل ۱۰۰۰ متر و میانگین ارتفاع روباره آن ۴۰۰ متر است. مشخصات مربوط به تونل و ماشین TBM در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات مربوط به تونل و ماشین TBM [۲۰]

طول تونل (KM)	۲۶
قطر حفاری (m)	۶/۷۳
نوع TBM	ماشین دو سپره
تعداد دیسک	۴۲
فاصله دیسکها (mm)	۹۰
قطر دیسک (mm)	۴۳۲
سرعت چرخش (RPM)	۰ - ۹/۰۵

خصوصیات واحدها در ۱۰ کیلومتر اول تونل که در زمان انجام این مطالعه حفر شده بود در جدول ۲ به طور خلاصه ارائه شده است. در این تحقیق مطالعه بر روی واحد آهکی (LI2) انجام شده است.

۳- مدلسازی عددی احتمالی با روش DEM-DFN

به منظور انجام مدل‌سازی به روش ترکیبی شبکه درزه مجزا-روش المان مجزا بعد از مشخص شدن فضای مدل‌سازی، باید شبکه شکستگی‌ها و شرایط مرزی و اولیه‌ی مربوط به مدل مطابق با شرایط واقعی در نظر گرفته شود. سپس با استفاده از روش حل عددی المان مجزا میزان دگرشکل‌پذیری و شکست احتمالی در درزه سنگ و یا سنگ بکر برآورد شود. به منظور ساخت شبکه درزه مجزا بر اساس برداشت‌های صحرایی، پارامترهای توزیع احتمال مشخصات هندسی درزه‌ها محاسبه و در مدل‌سازی بکار می‌رود. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار UDEC انجام شده است.

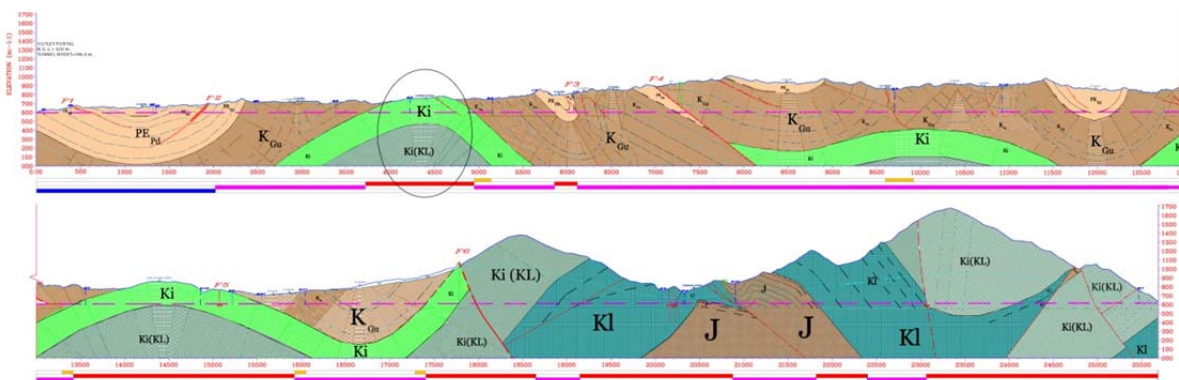
۳-۱- وضعیت مسئله و شرایط اولیه

به منظور ایجاد مدلی مناسب در ابتدا نیاز به تعریف هندسه‌ی بلوک، شرایط مرزی و اولیه و همچنین پارامترهای ورودی است. برای مدلسازی مورد نظر بلوکی با ابعاد کلی ۳۰×۱۵ متر مربع که به طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده، ساخته شد.

با توجه به شکل ۲ مرزهای چپ و راست مدل در جهت محور X و مرزهای پایین بلوک و همچنین سقف و کف تونل حفاری شده در جهت محور Y ثابت شده‌اند. از آنجا که روباره در قسمت مورد مطالعه تونل تقریباً ۱۵۵ متر از محور تونل است بنابراین باری معادل ۱۴۰ متر از سنگ مورد مطالعه

شکل (۱) برش زمین‌شناسی در طول مسیر تونل را نشان می‌دهد [۲۱]. واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در برش زمین‌شناسی مهندسی با علائمی مشخص می‌شوند که از حروف آغازین لیتولوژی آن مجموعه تشکیل می‌شود. این علائم شامل: LI به عنوان نشانه آهک، SH نشانه شیل، MA نشانه مارن، ML نشان‌دهنده آهک مارنی، LS علامت مربوط به شیل آهکی است. مرز واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در عمل بر مرز واحدهای زمین‌شناسی منطبق است.

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت‌گرفته در مراحل مختلف و با در نظر گرفتن تکرار واحدها در قسمت‌های مختلف در مجموع در محدوده مورد مطالعه ۲۱ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تفکیک است [۲۱].

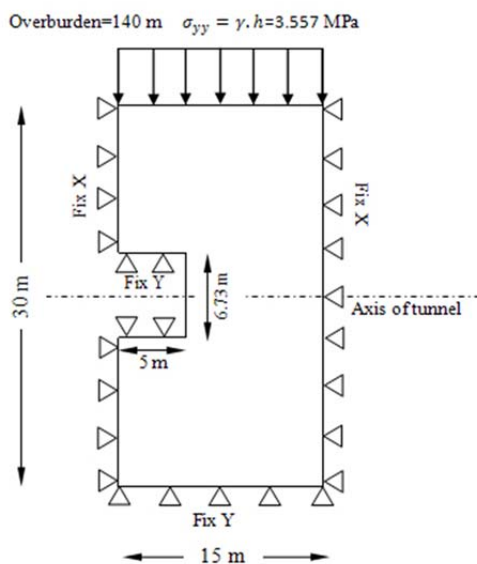


شکل ۱: برش زمین‌شناسی مسیر قطعه دوم تونل (مقیاس افقی و قائم ۱:۸۵۰۰۰) [۲۰]

جدول ۲: مشخصات واحدهای موجود در ۱۰ کیلومتر اول تونل [۲۱]

واحد زمین‌شناسی مهندسی	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	(%)RQD	RMR	دانسیته خشک (gr/cm^3)	تخلخل (%)
SH-ML 1	۱۰-۳۰	۱-۳	۶۸-۷۵	۴۸	۲/۴-۲/۵	۱۰-۱۵
SH-ML 2	۱۵-۳۰	۱-۳	۵۲-۶۰	۴۴	۲/۳-۲/۵	۱۰-۱۵
SH-ML 3	۱۰-۲۰	۱-۳	۵۰-۶۵	۴۴	۲/۳-۲/۵	۵-۱۵
ML-SH 1	۵۰-۱۰۰	۵	۷۲-۸۵	۶۲	۲/۵-۲/۶	۲-۵
ML-SH 2	۱۵-۳۰	۱-۳	۶۰-۷۰	۴۸	۲/۲-۲/۵	۵-۱۰
ML-SH 3	۲۵-۵۰	۲-۴	۵۰-۶۵	۴۶	۲/۰.۵-۲/۵	۵-۱۵
ML-SH 4	۱۵-۳۰	۲-۴	۶۵-۷۵	۵۰	۲/۲-۲/۵	۵-۱۰
ML-SH 5	۵۰-۱۰۰	۵	۷۵-۸۵	۴۹	۲/۳-۲/۶	۳-۵
SH-LS 1	۱۵-۳۰	۱-۳	۶۰-۷۰	۴۴	۲/۴-۲/۵	۳-۱۵
SH-LS 2	۳۰-۵۰	۲-۴	۷۵-۸۰	۵۰	۲/۳-۲/۶	۳-۱۰
SH-LS 3	۱۵-۳۰	۱-۳	۶۵-۷۵	۴۴	۲/۳-۲/۵	۵-۱۵
SH-LS 4	۱۵-۳۰	۲-۵	۷۰-۷۵	۴۸	۲/۳-۲/۶	۵-۱۰
LI 2	۱۰۰-۱۵۰	۲/۵-۶	۸۰-۹۰	۵۷	۲/۵-۲/۶	۲/۵-۶

مقدور نیست و از طرفی پارامتر فاصله دیسک‌ها نیز بر فرآیند شکست و ایجاد تراشه اثر مهمی دارد به همین دلیل برای در نظر گرفتن نامنظمی درزه‌ها در کل سینه کار ۷۲ عدد دیسک با فاصله ۹۰ میلی‌متر و با عرض لبه‌ی ۲۰ میلی‌متر بر روی سینه کار مدل شده است.



شکل ۲: تصویر شماتیک بلوک همراه شرایط مرزی

بر روی مرز بالایی مدل اعمال شده است. توده سنگ ترکیبی از سنگ بکر و ناپیوستگی است، بنابراین به منظور مدل‌سازی توده سنگ در نرم افزار UDEC مشخصات سنگ بکر و درزه‌ها از پارامترهای ورودی می‌باشند. پارامترهای متوسط سنگ بکر مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است. مدل رفتاری سنگ بکر در این مدل‌سازی مدل موهر-کلمب می‌باشد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در محدوده مذکور ۴ دسته درزه وجود دارد و مشخصات مکانیکی مربوط به دسته درزه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. تمامی دسته درزه‌ها در روند مدل‌سازی از رفتار کلمب لغزشی تبعیت می‌کنند. بر هر دیسک از TBM دو نیروی نرمال و چرخشی به منظور شکست سنگ اعمال می‌شود. از آنجا که مدل ساخته شده به صورت دو بعدی است، امکان اعمال نیروهای چرخشی بر روی دیسک‌ها وجود ندارد بنابراین هر دیسک در مدل‌سازی به صورت یک نیروی نرمال بر سینه کار اعمال می‌شود. با توجه به جدول (۱) فاصله‌ی دیسک‌های TBM از هم ۹۰ میلی‌متر و عرض لبه‌ی آن‌ها ۲۰ میلی‌متر است. ۳۶ عدد از دیسک‌ها بر روی تاج حفار به صورت عمود بر سینه کار و با فاصله ۹۰ میلی‌متر از دیسک مجاور خود قرار می‌گیرند، از آن جهت که هدف، بررسی اثر پارامترهای هندسی درزه‌های مجزا است که بدون نظم خاصی در طول سینه کار با سینه کار برخورد می‌کنند و شرایط درزه‌داری در کل سینه کار یکسان نیست، بنابراین بررسی تنها با جایگذاری ۲ دیسک بر روی سینه کار

است. شبکه‌های شکستگی ایجاد شده سپس می‌توانند به عنوان مدل‌های هندسی درزه‌ها در مدل‌سازی عددی توده‌سنگ استفاده شوند. نتایج مدل‌سازی عددی (جابجایی، سرعت، تنش) می‌تواند به عنوان مقادیر آماری به جای مقادیر قطعی حاصل از مدل‌های قطعی مرسوم استفاده شود. مقادیر متوسط و توزیع این نتایج می‌تواند پایه‌ی بهتری برای طراحی و ارزیابی عملکرد کارهای مهندسی ارائه دهد.

با استفاده از تابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها نظیر طول و راستای درزه‌ها و با کمک شبیه‌سازی مونت-کارلو می‌توان تعداد زیادی طول و راستای تصادفی تولید کرد و با استفاده از این طول‌ها و راستاهای تولید شده آنالیزهای لازم را انجام داد. یکی از فرضیات به کار رفته در شبیه‌سازی شبکه درزه مجزای این است که موقعیت ناپیوستگی از فرآیند پواسون تبعیت می‌کند. اغلب در تولید شبکه درزه مجزا فرض می‌شود که جهت درزه‌ها از تابع فیشر با ضریب تمرکز K تبعیت می‌کند [۲۲].

ثابت فیشر برای هر دسته درزه از طریق نرم افزار **Dips** بدست آمده و در ستون دوم جدول ۵ آورده شده است. از آنجا که نیاز به تابع توزیع طول هر دسته درزه است بنابراین طول درزه‌ها در هر دسته درزه را طبق شکل ۳ جدا کرده و با استفاده از نرم افزار آماری **Minitab** تابع توزیع طول مربوط به هر دسته درزه تعیین شد. بهترین توابع توزیع برازش شده بر طول درزه‌ها در هر دسته درزه، در شکل ۴ مشاهده می‌شود و مشخصات این توابع در جدول ۵ آورده شده است.

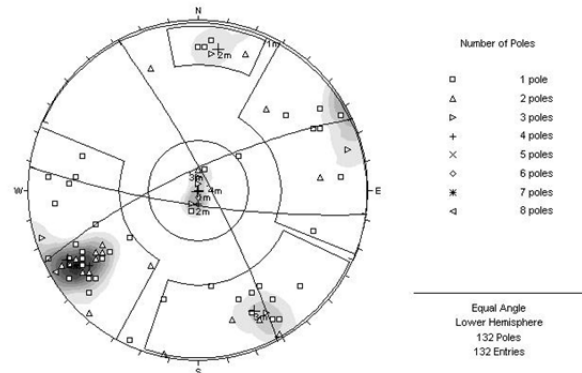
پس از تعیین پارامترهای ورودی به منظور تولید شبکه شکستگی مجزا، با استفاده از کد **FracIUT^{2D}** [۲۳] تعداد زیادی شبکه درزه مجزا تولید شد که این شبکه‌های درزه مجزا مختصات درزه‌هایی است که قابل فراخوانی در نرم افزار **UDEC** می‌باشد. از آن جهت که در ادامه نیاز به تعیین تابع توزیع نتایج مدل‌سازی‌ها است بنابراین به طور تصادفی ۱۵ عدد از آن‌ها انتخاب شد، که در شکل ۵، نمونه‌ای از شبکه درزه مجزای انتخابی که در **UDEC** فراخوانی شده و به عنوان مدل‌های **DFN-DEM** است، نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات سنگ بکر در مقطع مورد مطالعه [۲۱]

مقدار	مشخصه سنگ بکر
۲۵۹۰	دانشیته (Kg/m^3)
۱۶/۳	مدول حجمی (GPa)
۸/۸	مدول برشی (GPa)
۱۲/۶۲	چسبندگی (MPa)
۵۲/۷۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۴/۲۵	مقاومت کششی (MPa)

جدول ۴: مشخصات مکانیکی مربوط به دسته درزه‌های موجود در توده سنگ

دسته درزه	سختی نرمال (GPa/m)	سختی برشی (GPa/m)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱	۴۷/۰۴	۱۸/۵	۰/۱۲	۳۵
۲	۴۷/۰۴	۱۸/۵	۰/۰۴	۳۸
۳	۴۷/۰۴	۱۸/۵	۰/۰۴	۳۸
۴	۴۷/۰۴	۱۸/۵	۰/۳۲	۳۷/۵



شکل ۳: تصویر استریوگرافیک مربوط به درزه‌های برداشت شده مقطع مورد مطالعه

۳-۲- ساخت شبکه درزه مجزا (DFN)

برای ایجاد شبکه درزه مجزا می‌توان از شبیه‌سازی مونت-کارلو استفاده کرد که در واقع یک شکل ساده‌ی تولید اعداد تصادفی

جدول ۵: پارامترهای هندسی مربوط دسته درزه‌ها

پارامترهای توزیع طول					دانشیته P_{20} (m^{-2})	ثابت K توزیع فیشر	جهت دسته درزه (Dip/DDip)
انحراف معیار (m)	میانگین (m)	پارامتر مقیاس σ (m)	پارامتر موقعیت μ (m)	تابع توزیع			
۳/۵۴	۲/۱۵	۱/۰۵۶	۰/۱۱	لاگ نرمال	۰/۹۳	۱۱۱/۶	۱ (۸۰/۱۸۸)
۱/۲۶	۱/۲	۰/۸۶	-۰/۱۸۸	لاگ نرمال	۳/۰۷۵	۱۸/۱	۲ (۸۲/۶۲)
۱/۵۷	۱/۴۸	۰/۸۵	۰/۰۱۶	لاگ نرمال	۰/۷۷	۳۰/۴	۳ (۷۶/۳۳۵)
۰/۳۲	۰/۸	-	-	نرمال	۲/۰۵	۸۱/۴۲	۴ (۱/۲۴)

۳-۳- ساخت مدل DFN-DEM و حل آن

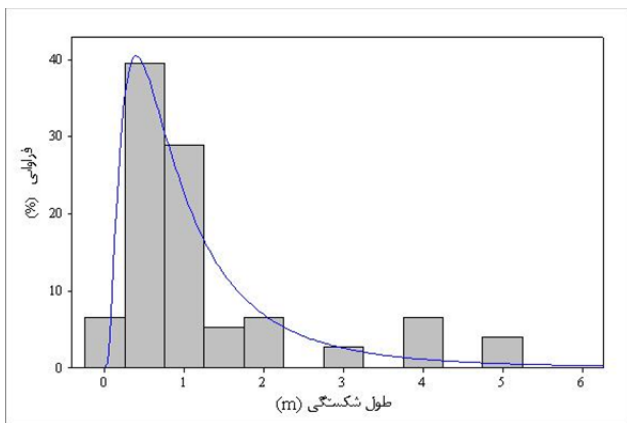
پس از فراخوانی درزه‌های تولید شده DFN در مدل، با توجه به اینکه بلوک ایجاد شده به صورت تغییر شکل پذیر انتخاب شده است نیاز به گسسته‌سازی (مش‌بندی) بلوک است. با توجه به محدودیت حافظه در مش‌بندی، نزدیک سینه کار با حداکثر طول بعد ۵ میلیمتر و بقیه بلوک با حداکثر طول بعد ۱۰ سانتیمتر مش‌بندی شده است.

به دلیل آنکه هدف بررسی اثر درزه‌داری بر نرخ نفوذ است، یک مدل سنگ بکر (IRM) نیز با همان شرایط هندسی و شرایط مرزی و اولیه‌ی مدل‌های توده سنگ مدل‌سازی شد تا بتوان با مقایسه‌ی نتایج آن‌ها اثر وجود درزه‌ها را بررسی کرد.

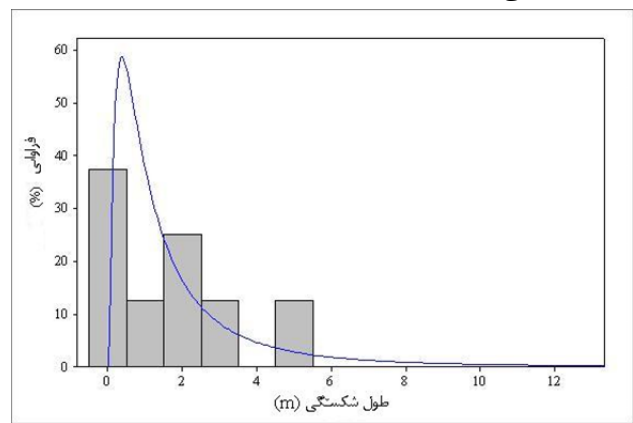
پس از ساخت مدل و اعمال شرایط مرزی و اولیه بر آن، بارگذاری دیسک‌ها به صورت نیروهای نرمال بر سینه کار انجام شد که تمامی این شرایط در همه‌ی مدل‌ها یکسان بوده و تنها

عامل متغیر هندسه‌ی درزه‌ها است. با پلات گرفتن از منطقه پلاستیک مشاهده می‌شود که بر اثر اعمال بار دیسک بر سینه کار، بلافاصله شکست‌های کششی که نشان‌دهنده ترک‌های کششی می‌باشند در سنگ شروع شده و گسترش می‌یابند. به دلیل اثر متقابل بین دو دیسک مجاور، ترک‌های ایجاد شده زیر آنها به طرف یکدیگر منتشر می‌شوند و تا زمانی که این ترک‌ها بین دو دیسک به همدیگر متصل نشوند تراشه ایجاد نمی‌شود. شکل ۶ فرآیند ایجاد و گسترش ترک‌ها و در نتیجه تشکیل تراشه در مدل سنگ بکر را نشان می‌دهد. در تمامی شکل‌های حاصل از مدل‌سازی به منظور نشان دادن بهتر فرآیند شکست، بزرگنمایی صورت گرفته است.

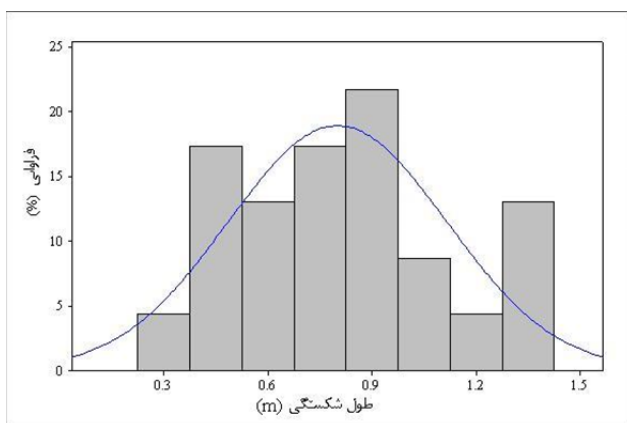
شکل ۷-الف تغییرات تنش در سنگ بکر را نشان می‌دهد. میدان تنش بلافاصله زیر دیسک‌ها ایجاد می‌شود و با فاصله گرفتن از سینه کار به سرعت کاهش می‌یابد.



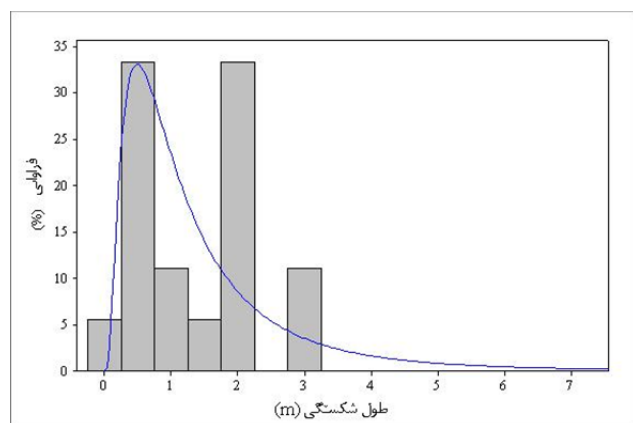
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴: تابع توزیع طول مربوط به دسته درزه (الف) شماره ۱ (ب) شماره ۲ (ج) شماره ۳ (د) شماره ۴

سنگ شکسته متقارن نیست و همانطور که در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود تغییرات تنش به سمت سطوح درزه منحرف

میدان تنش در سنگ بکر به‌طور تقریبی متقارن است در حالی- که این میدان تنش القایی در اثر نیروی دیسک‌ها در توده

تابع توزیع تجمعی احتمال است که توسط نرم افزار Minitab بر داده‌ها برازش شده‌است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده‌است، در سطح اعتماد ۸۰ درصد، میزان افزایش سطح تراشه نسبت به حالت سنگ بکر بیش از ۳۳ درصد و در سطح اعتماد ۹۵ درصد، میزان افزایش سطح تراشه نسبت به حالت سنگ بکر بیش از ۲۰/۵ درصد است و یا به عبارتی در ۸۰ و ۹۵ درصد از تحلیل‌ها درصد افزایش سطح تراشه به ترتیب بیش از ۳۳ و ۲۰ درصد است.



شکل ۵: نمونه‌ای از مدل‌های DFN-DEM انتخاب شده به منظور مدل‌سازی

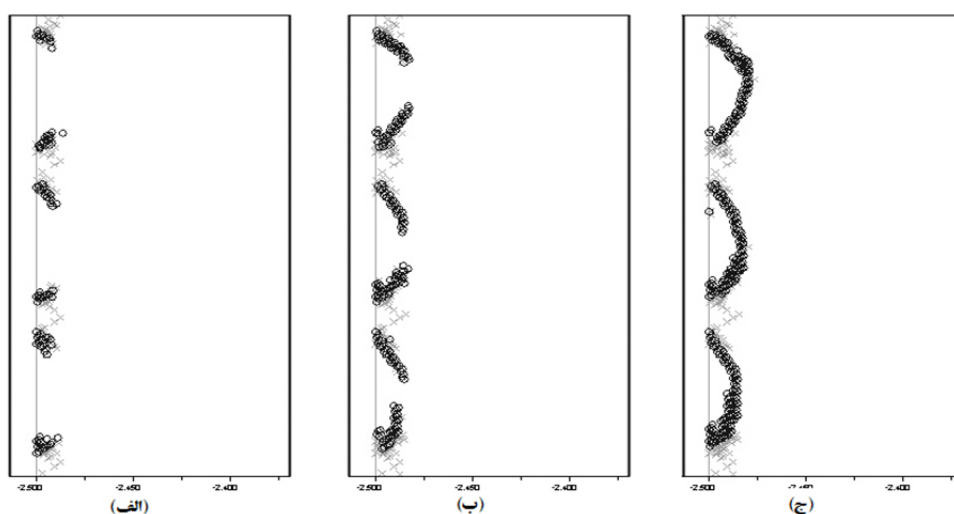
می‌شود و در نتیجه وجود درزه در سنگ سبب اغتشاش در میدان تنش مذکور می‌شود.

۳-۴- نتایج مربوط به بررسی اثر درزه‌ها بر نرخ نفوذ

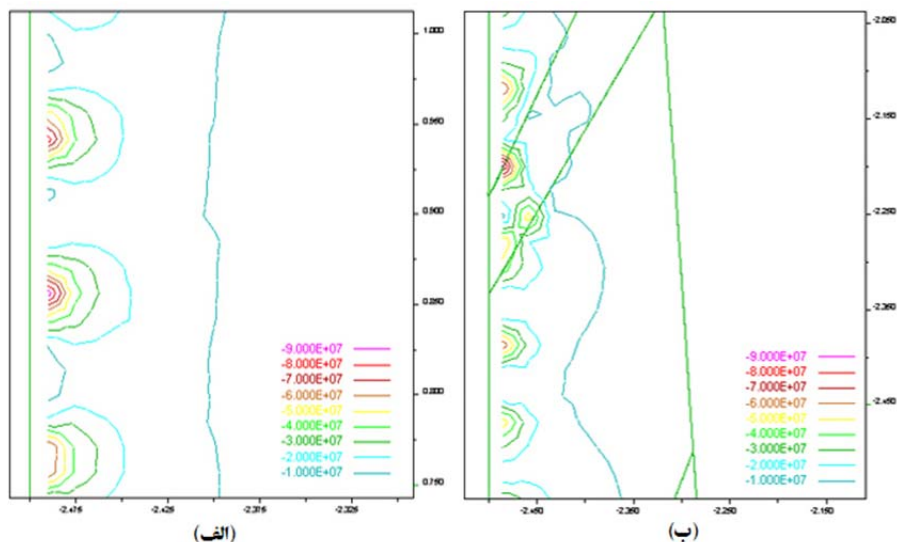
نسبت سطح تراشه‌شدگی به تنش تراشه‌شدگی به طور غیرمستقیم بیانگر نرخ نفوذ TBM است [۲۴]. از آنجا که نیروی به کار رفته در تمام مدل‌ها یکسان بوده بنابراین معیار مقایسه‌ی نرخ نفوذ بین مدل‌ها، سطح تراشه‌شدگی آن‌ها است. سطح تراشه ایجاد شده در کل سینه کار برای هر مدل محاسبه و در ستون ۲ جدول ۶ ثبت شده‌است. در ستون سوم نسبت سطح تراشه در هر مدل به سطح تراشه در مدل سنگ بکر و در ستون چهارم درصد افزایش سطح تراشه در هر مدل نسبت به حالت سنگ بکر که خود نشان‌دهنده اثر درزه‌داری است، آمده‌اند.

همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، درصد افزایش سطح تراشه از تابع توزیع نرمال با میانگین ۴۶/۰۷ و انحراف معیار ۱۵/۵۱ تبعیت می‌کند. همچنین مقدار انحراف مطلق (AD) آن ۰/۲۶۱ است که حداکثر اختلاف بین نمودار رسم شده بر داده‌های اصلی و نمودار تابع توزیعی است که بر داده‌ها برازش می‌شود.

شکل ۹ نمودار تابع توزیع تجمعی احتمال (PCDF) مربوط به درصد افزایش سطح تراشه را نشان می‌دهد. نمودار پلکانی، نمودار داده‌های به‌دست آمده است و نمودار منحنی، نمودار



شکل ۶: فرآیند ایجاد و گسترش ترک و در نتیجه ایجاد تراشه در سنگ بکر در گام‌های زمانی الف) ۱۰۰ (ب) ۲۰۰ (ج) ۳۰۰



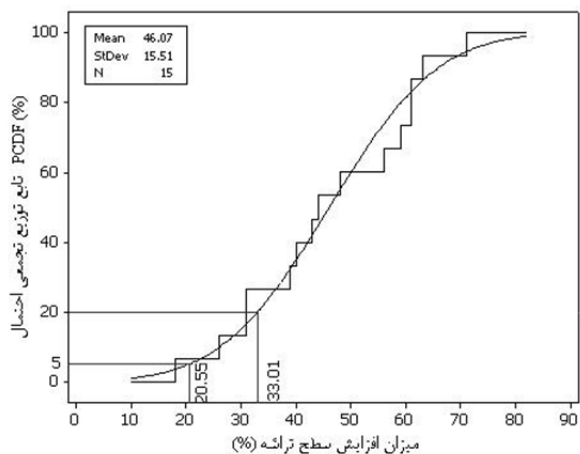
شکل ۷: تغییرات تنش در اثر نیروی دیسک در مدل (الف) مدل سنگ بکر (ب) مدل توده سنگ شکسته

اینکه سبب توقف انتشار آن در محل برخورد با درزه شده و ترک‌های ایجاد شده از طرف دو دیسک مجاور به یکدیگر در یک نقطه برخورد نمی‌کنند در حالی که در سنگ بکر این ترک‌ها در یک نقطه بین دیسک‌ها به یکدیگر برخورد می‌کنند. این روند در مدلسازی عددی نیز به وضوح مشاهده شد که در شکل ۱۱-ب نمونه‌ای از آن آمده است.

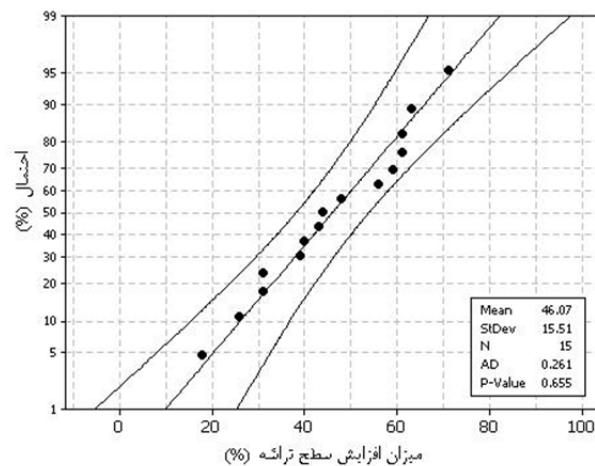
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده شد شکل تراشه بین دو دیسک به‌طور تقریبی متقارن است در حالی که در حالت توده سنگ شکسته (شکل ۱۰) متقارن نیست بنابراین وجود درزه‌ها همچنین باعث اغتشاش در انتشار ترک‌ها و در نتیجه تغییر در شکل تراشه می‌شود. در شکل ۱۱-الف به صورت شماتیک مشاهده می‌شود که وجود درزه بین دو دیسک، جهت انتشار ترک‌ها را تغییر داده و یا

جدول ۶: نتایج حاصل از مدلسازی عددی در تعیین میزان سطح تراشه

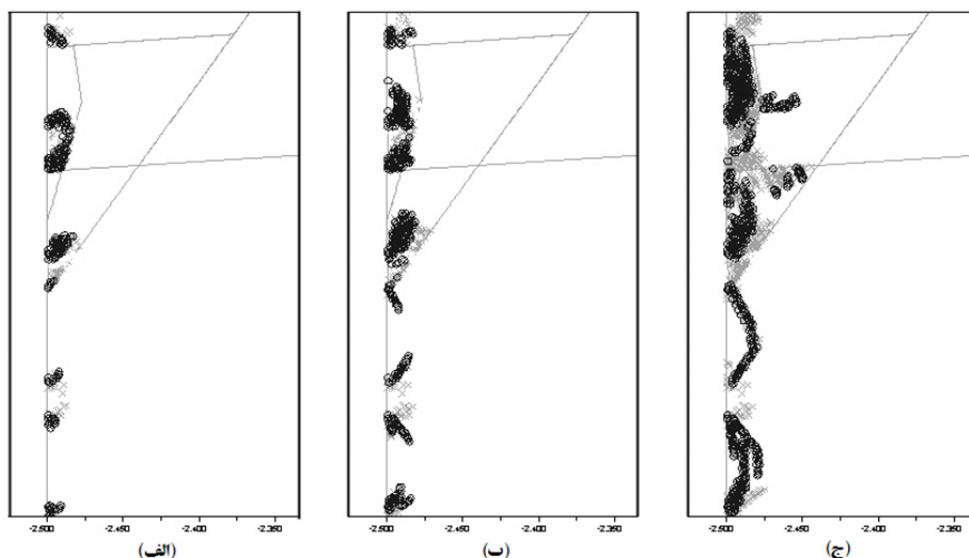
مدل	مساحت تراشه (mm ²)	نسبت سطح تراشه در مدل به سطح تراشه در مدل سنگ بکر	درصد افزایش سطح تراشه
IRM	۶۴۴۰۱	۱	-
۱DFN	۸۴۲۳۶	۱/۳۱	۳۱
۲DFN	۱۰۴۰۰۰	۱/۶۱	۶۱
۳DFN	۱۱۰۳۱۸	۱/۷۱	۷۱
۴DFN	۷۶۰۷۹	۱/۱۸	۱۸
۵DFN	۸۱۴۰۳	۱/۲۶	۲۶
۶DFN	۹۲۰۹۳	۱/۴۳	۴۳
۷DFN	۱۰۳۹۶۹	۱/۶۱	۶۱
۸DFN	۱۰۰۴۳۱	۱/۵۶	۵۶
۹DFN	۱۰۵۰۶۶	۱/۶۳	۶۳
۱۰DFN	۹۰۱۸۱	۱/۴	۴۰
۱۱DFN	۹۵۲۸۹	۱/۴۸	۴۸
۱۲DFN	۱۰۲۵۱۹	۱/۵۹	۵۹
۱۳DFN	۸۹۵۴۲	۱/۳۹	۳۹
۱۴DFN	۹۲۹۷۸	۱/۴۴	۴۴
۱۵DFN	۸۴۳۷۳	۱/۳۱	۳۱



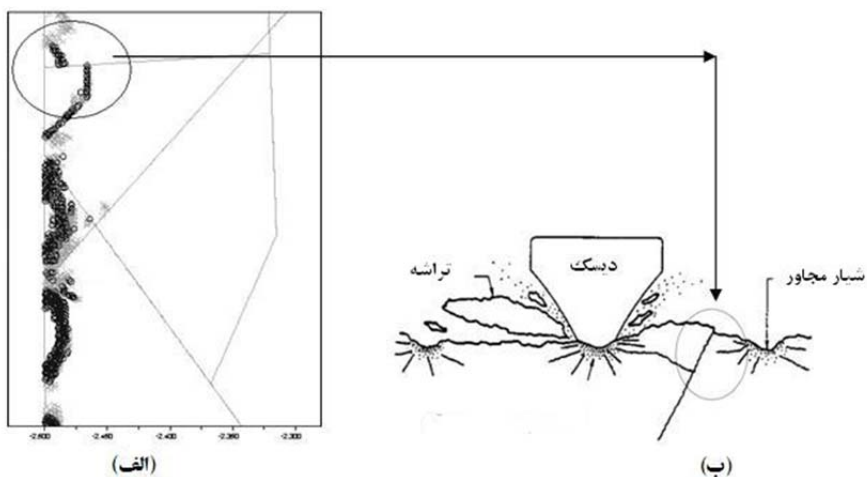
شکل ۹- نمودار تایع توزیع تجمعی احتمال درصد افزایش سطح تراشه



شکل ۸: برازش تابع توزیع نرمال بر درصد افزایش سطح تراشه نسبت به سنگ بکر



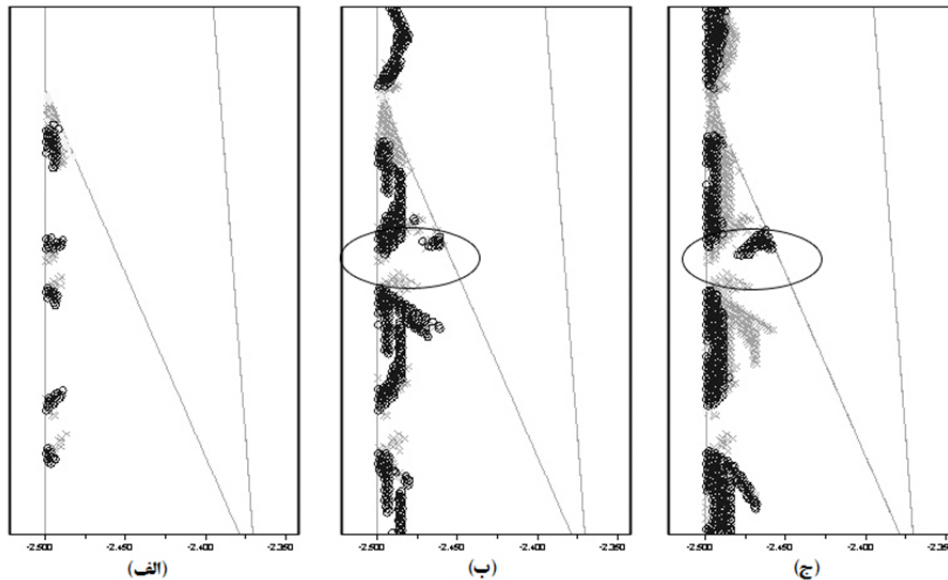
شکل ۱۰: فرآیند ایجاد و گسترش ترک در سنگ درزه‌دار در گام‌های زمانی الف) ۱۰۰ (ب) ۲۰۰ (ج) ۴۰۰



شکل ۱۱: اثر وجود درزه بین دو دیسک بر گسترش ترک (الف) نمای حاصل از مدلسازی (ب) نمایش شماتیک [۲۵]

به سمت زیر دیسک منتشر می‌شوند که این حالت ترک از نقطه‌ای از سطح درزه با فاصله برابر یا کمتر از حدود ۴۰ میلیمتر ایجاد می‌شود که در شکل ۱۲ نمونه‌ای از روند ایجاد و گسترش این نوع ترک نشان داده شده است.

به‌طور کلی بر اساس تحلیل‌های انجام شده بر روی شروع و انتشار ترک‌ها مشخص شد که دو حالت برای گسترش ترک‌ها وجود دارد. یکی آنکه ترک‌ها بلافاصله زیر دیسک‌ها ایجاد شده و به سمت سطوح درزه منتشر می‌شوند که در حالت‌های قبل نیز دیده شد و دیگر اینکه ترک‌ها از سطوح درزه شروع شده و



شکل ۱۲: نمای ایجاد و گسترش ترک از سطح درزه به سمت زیر دیسک در گام‌های زمانی الف) ۱۰۰ (ب) ۳۰۰ (ج) ۶۰۰

می‌کند. با رجوع به تابع توزیع تجمعی احتمال میزان افزایش سطح تراشه نسبت به سنگ بکر، در سطح اعتماد ۸۰ درصد، میزان افزایش سطح تراشه نسبت به حالت سنگ بکر بیش از ۳۳ درصد و در سطح اعتماد ۹۵ درصد، میزان افزایش سطح تراشه نسبت به حالت سنگ بکر بیش از ۲۰ درصد است. بنابراین وجود درزه‌داری اثر مهمی بر فرآیند شکست سنگ و در نتیجه بر نرخ نفوذ دارد.

در این تحقیق مدلسازی به صورت دو بعدی انجام شد، هرچند مدل دقیق‌تر باید بصورت سه بعدی ساخته شده و آنالیز شود، به شرطی که ابزار تولید شبکه درزه مجزا بصورت سه بعدی و نرم افزار با قابلیت حل چنین شبکه شکستگی پیچیده در دسترس بوده و همچنین مدل‌های رفتاری سه بعدی سنگ بکر و درزه سنگ‌ها وجود داشته باشد. بنابراین این موضوع در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین در این مقاله امکان بارگذاری برشی در حالت مدلسازی دو بعدی و شرایط کرنش صفحه‌ای وجود نداشته و بنابراین در مطالعات آتی بصورت سه بعدی اعمال نیروی برشی دیسک‌ها پیشنهاد می‌شود. پارامتر بازشدگی درزه‌ها در بعضی از مدل‌های رفتاری درزه سنگ‌ها (نظیر مدل BB) مؤثر است که در این تحقیق با ثابت فرض شدن سختی نرمال و برشی درزه‌ها، پارامتر تاثیر گذاری نیست.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پیش‌بینی پارامتر نرخ نفوذ در تعیین نرخ پیشروی و در نتیجه تعیین مدت زمان حفاری و سرمایه‌گذاری اقتصادی پروژه تونل‌سازی، پیش‌بینی این پارامتر هدف تحقیق حاضر قرار گرفت.

در مدل‌های عددی روش حل صحیحی به کار گرفته می‌شود و در روند محاسبه دقت بالایی دارد و می‌توان پیچیدگی‌های شرایط زمین را مدلسازی کرد. بنابراین در این تحقیق به پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از این روش پرداخته شد.

در این مطالعه با توجه به این نکته که شرایط واقعی توده سنگ پیچیده‌تر از شرایط وجود دسته درزه‌های منظم بوده و تلفیقی از درزه‌های مجزا با جهت‌ها و طول‌هایی است که از توابع توزیع خاصی تبعیت می‌کنند و از طرفی روش شبکه درزه مجزا (DFN) قابلیت ایجاد چنین شرایطی را با در نظر گرفتن توابع توزیع مربوط به پارامترهای هندسی درزه‌ها دارد، بنابراین از روش ترکیبی DFN-DEM برای بررسی اثر پارامترهای هندسی درزه‌ها بر نرخ نفوذ استفاده شده است. با توجه به نتایج مدلسازی میزان افزایش سطح تراشه نسبت به سنگ بکر از تابع توزیع نرمال با میانگین ۴۶/۰۷ و انحراف معیار ۱۵/۵۱ تبعیت

تشکر و قدردانی

از موسسه مهندسی مشاور ایمن سازان به خاطر همکاری‌شان تشکر و قدردانی می‌شود.

بنابراین بررسی تأثیر پارامترها و مدل‌های رفتاری درزه سنگ‌ها بر میزان نفوذ می‌تواند به‌عنوان موضوعی برای تحقیقات آینده پیشنهاد شود.

منابع

- [1] Graham, P.C., "Rock exploration for machine manufacturers", In: Bieniawski ZT, editor. Exploration for rock engineering. Johannesburg: Balkema, 1976.
- [2] Farmer, I. and Glossop, N., "Mechanics of disc cutter penetration", Tunnels TunnellInt, 1980.
- [3] Cassinelli, F., "Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines: analysis of tunnel-boring operation in hard rock", Tunnelling'82, Jones, M.J. Ed. (London: IMM), pp 73-81, 1982.
- [4] Hughes, H.M., "The relative cuttability of Coal-Measures stone", Journal of Mining Sciences and Technology, Vol.3, No. 2, pp. 98-109, 1986.
- [5] Innaurato, N., "Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy", proceeding of 7th International Congress on Rock Mechanics, Aachen, Germany, pp. 1009-1014, 1991.
- [6] Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A. and Cardone, G., "TBM performance estimation using rock mass classifications", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39, 771-788, 2002.
- [7] Barton, N., *TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock*, Balkema Publishers, Netherlands, 2000.
- [8] Roxborough, F.F. and Phillips, H.R., "Rock Excavation by Disc Cutter", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts, Vol. 12, pp. 361-366, 1975.
- [9] Sanio, H.P., "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts 22 (3), 153-161, 1985.
- [10] Boyd, R.J., "Hard rock continuous mining machine Mobile Miner MM-120", Rock Excavation Engineering Seminar, (Eds. Howarth, D.F. and Just, G.D.), Dept. Mining & Met. Eng., Univ. Qld., July, 356p, 1986.
- [11] Grima, M.A., Bruines, P.A. and Verhoef, P.N.W., "Modelling Tunnel Boring Machine performance by Neuro-Fuzzy methods", Tunnelling and Underground Space Technology 23, Vol. 15, No. 3, pp.259-269, 2000.
- [12] Eftekhari, M., Baghbanan, A., Bayati, M., "Predicting penetration rate of a tunnel boring machine using artificial neural network", ISRM International Symposium 2010 and 6th Asian Rock Mechanics Symposium - Advances in Rock Engineering, 23-27 October, New Delhi, India, 2010.
- [13] Gong, Q.M., Zhao, J. and Jiao, Y.Y., "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters", Tunnelling and Underground Space Technology, 20, pp.183-91, 2005.
- [14] Gong, Q.M., Jiao, Y.Y. and Zhao, J., "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters", Tunnelling and Underground Space Technology 23, Vol. 21, No. 1, pp. 46-55, 2006.
- [15] Gong, Q.M. and Zhao, J., "Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore Granite", Tunnelling and Underground Space Technology, 22, pp. 317-324, 2007.
- [16] Sharifzadeh, M., and Iranzadeh, A., "Effect of spacing and orientation of joint set on performance of TBM (tunnel boring machine) cutter" In: Proceeding of 3th conference of Rock mechanics of Iran, Tehran (in persian).
- [17] Iranzadeh, A., Sharifzadeh, M., Sharifi, M "Effect of spacing and orientation of joint set on performance of TBM (tunnel boring machine) cutter using numerical modeling and comparing the results of two-dimensional and three-dimensional", journal of Sharif university, Vol. 47, 2009 (in Persian).
- [18] Sharifzadeh, M., and Iranzadeh, A., "Three-dimensional numerical modelling of joint spacing and orientation effects on rock cutting process by a single TBM", published in CIM Magazine, Vol. 4, No. 6, 2009.
- [19] Priest, S.D., "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", London: Chapman & Hall, 1993.
- [20] KhademiHamidi, J., Shahriar, K., Rezaei, R. and Rostami, J., "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system", Tunnelling and Underground Space Technology, 25, pp. 333-345, 2010.
- [21] Sahel Consulting Eng (2007) Engineering geological investigations along the Zagros long tunnel alignment. report: SCE 2026 UNGR SIT EG RP 002 D1 (in persian).

- [22] Baghbanan, A., Scale and Stress Effects on Hydro-Mechanical Properties of Fractured Rock Masses, PhD thesis, Engineering Geology and Geophysics Research Group Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2008.
- [23] Baghbanan A, Joolaei A (2010) Generating 2D and 3D discrete fracture network. In: Proceeding of 14th conference of Geological Society of Iran, Ormieh University, Iran (in persian).
- [24] Gong, Q.M., Zhao J. and Hefny, A.M., "Numerical Simulation of Rock Fragmentation Process Induced by Two TBM Cutters and Cutter Spacing Optimization", AITES-ITA Congress, Seoul, South Korea, 2006.
- [25] Blindheim, O.T. and Bruland, A., "Boreability testing Norwegian TBM tunnelling 30 years of Experience with TBMs in Norwegian Tunnelling", Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication 11, pp. 29–34, 1998.