

مطالعه الگوی شکست درزه‌های ناممتد عمود برهم زیر بار نقطه‌ای برنده TBM با آزمون آزمایشگاهی و روش اجزای محدود

وهاب سرفرازی^۱، شادمان محمدی بلبان اباد^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان
۲- کارشناسی ارشد استخراج معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

(دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۰۹، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۴)

چکیده

در این مقاله، روش شکست درزه ناممتد عمود برهم با ایجاد بار نقطه‌ای برنده TBM توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، ۴ نمونه آزمایشگاهی از جنس گچ با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر حاوی درزه ناممتد عمود برهم آماده‌سازی شد. نمونه‌ها دارای دو درزه ناممتد با طول‌های ۱ و ۲ سانتی‌متر و عمود بر یکدیگر بودند. درزه کوچک‌تر دارای زاویه‌داری ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نسبت به افق است. این نمونه‌ها زیر اثر بار نقطه‌ای برنده U شکل قرار گرفتند. هم‌زمان با مطالعات آزمایشگاهی، توسط نرم افزار FRANC2D شبیه‌سازی عددی نیز بر روی نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد عمود برهم انجام شد. به‌طور کلی، ۱۲ مدل عددی که الگوی هندسی آنها شبیه نمونه‌های آزمایشگاهی بود، ساخته شد. نتایج نشان می‌دهد که آرایش درزه ناممتد T شکل، تاثیر به‌سزایی بر الگوی رشد و گسترش ترک دارد. نمونه در زوایای ۴۵ و ۱۳۵ درجه نسبت به محور اعمال بار، کمترین مقاومت را دارد. با مقایسه الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی شکست مشابهی در نمونه آزمایشگاهی و مدل‌های عددی به‌وقوع پیوسته است.

کلمات کلیدی

برنده U شکل، درزه ناممتد عمود برهم، ترک کششی، ماشین تونل‌زنی، الگوی شکست سنگ.

۱- مقدمه

ماشین‌های تونل‌زن (TBM)، ابزارهای موثری در حفاری تونل هستند. عوامل زمین‌شناسی هم در عملیات حفر تونل موثر هستند. میرزایی نصیرآباد و همکاران [۳-۱]، دو معیار شکست برای پیش‌بینی جهت انتشار ترک در محیط‌های شبه‌سنگی ارائه دادند و با استفاده از روش گالرکین، عامل شدت تنش را برای سنگ شکننده درزه‌دار تعیین کردند. حایری و همکاران [۴]، با استفاده از مدل‌سازی عددی و مطالعات آزمایشگاهی، رشد ترک را در شیروانی‌های سنگی درزه‌دار بررسی کردند. حسینی‌نسب و فاتحی مرجی [۵]، با استفاده از روش ناپیوستگی جابه‌جایی، رشد ترک حاصل از انفجار را مطالعه نمودند. فاتحی مرجی [۶]، رشد ترک را در خردایش سنگ بررسی کرد. بهنیا و همکاران [۷]، رشد ترک را در سازندهای لایه‌ای مطالعه کردند. فاتحی مرجی [۸]، انشعاب ترک را با روش ناپیوستگی جابه‌جایی اصلاح شده بررسی و در تحقیقی دیگر [۹]، یکپارچگی ترک را زیر یک و دو دیسک با روش ناپیوستگی جابه‌جایی شبیه‌سازی کرد. حایری و فاتحی مرجی [۱۰]، رشد ترک حاصل از برنده TBM را مدل‌سازی و حایری و همکاران [۱۱]، تاثیر دیسک گوه‌ای بر سنگ را با استفاده از روش ناپیوستگی جابه‌جایی بررسی کردند.

گانگ و همکاران [۱۲]، به مطالعه مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان مجزا دو بعدی برای تعیین تاثیر جهت‌داری درزه بر خردایش سنگ توسط برش‌دهنده‌های TBM پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که هرچه زاویه درزه نسبت به محور بارگذاری کوچک‌تر باشد، خردایش توده‌سنگ آسان‌تر خواهد بود. هم‌چنین با افزایش زاویه درزه از ۰ به ۶۰ درجه نرخ نفوذ افزایش می‌یابد.

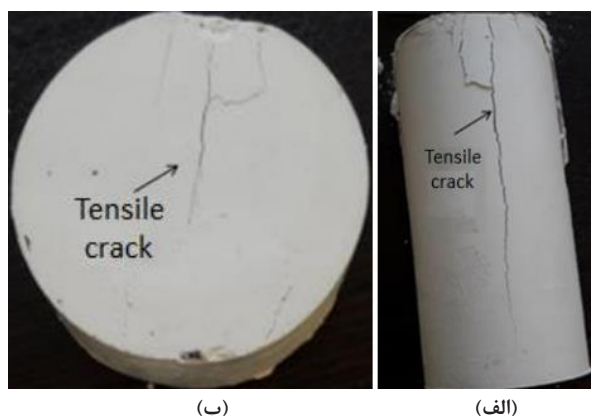
گانگ و همکاران [۱۳]، به مطالعه تاثیر شکنندگی سنگ بر نرخ نفوذ TBM با استفاده از شبیه‌سازی UDEC پرداختند. در طول مدل‌سازی عددی، تعداد شاخص‌های شکست، از جمله شکست فشاری و کششی را ثبت و تغییرات معیارهای شکست بر روی شاخص شکنندگی سنگ‌های مختلف و مقاومت کششی متناظر را مورد ارزیابی قرار دادند. هم‌چنین نشان دادند که با افزایش شاخص شکنندگی، عوامل موثر بر شکست، تقریباً خطی افزایش و در مقایسه با شاخص شکنندگی، با افزایش مقاومت کششی، به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابد. نتایج گرفته‌شده نشان داد که

شاخص شکنندگی با افزایش درجه هوازدگی کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش شاخص شکنندگی سنگ، زون خردشده و ترک‌های شعاعی افزایش می‌یابد و المان‌های شکست ناشی از برش‌دهنده، تقریباً با افزایش شاخص شکنندگی سنگ، افزایش می‌یابد و روند شکست سنگ آسان‌تر و نرخ نفوذ TBM افزایش می‌یابد.

گانگ و ژئو [۱۴]، با انجام تحلیل رگرسیون غیرخطی روی خصوصیات توده‌سنگ، یک مدل آماری برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM ارائه کردند. مطالعات انجام شده، مدل جدیدی با چهار معیار مقاومت فشاری سنگ، شکنندگی سنگ، فاصله درزه و جهت‌گیری درزه، برای ارزیابی توانایی حفر توده‌سنگ پیشنهاد کرد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوره و تعداد درزه حجمی سنگ، عمدتاً اثراتی در نرخ نفوذ دارند. نرخ نفوذ با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره، کاهش و با افزایش شاخص شکنندگی سنگ به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. هم‌چنین نرخ نفوذ با افزایش تعداد درزه حجمی افزایش، و با افزایش زاویه بین محور تونل و سطح درزه، زمانی که زاویه کمتر ۶۰ درجه است، افزایش و پس از آن با افزایش زاویه، کاهش می‌یابد.

بجاری و همکاران [۱۵]، به مطالعه اثرات هم‌زمان فاصله‌داری و جهت‌گیری درزه بر نرخ نفوذ تک‌دیسک برشی با استفاده از روش اجزا مجزا پرداختند. مدل‌سازی انجام شده برای سه مقدار فاصله‌داری ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر همراه با هفت مقدار جهت‌گیری درزه در زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ صورت گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها در یک جهت‌گیری ثابت، نرخ نفوذ TBM کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نرخ نفوذ برای هر فاصله‌داری، وقتی تغییرات جهت‌گیری درزه از ۰ تا ۷۵ درجه است، افزایش و زمانی که از ۷۵ تا ۹۰ درجه است، کاهش می‌یابد. هم‌چنین مطلوب‌ترین جهت‌گیری درزه از نظر نرخ نفوذ، در حدود زوایای ۶۰ تا ۷۵ درجه ارزیابی شد.

چویی [۱۶]، با استفاده از برنامه عددی PFC3D، رفتار برشی دیسک برنده بر روی سنگ را بررسی کرد. هدف این مطالعه موردی، بررسی فاصله‌داری بهینه برنده و جوانب شکست سنگ بود. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش فاصله‌داری برنده، نیروی نرمال دیسک افزایش می‌یابد ولی نیروی غلتشی ثابت می‌ماند.



شکل ۱: الگوهای شکست الف) نمونه تک‌محوره، ب) نمونه برزلی

جدول ۱: مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها

۷٫۲	مقاومت فشاری (MPa)
۱٫۳	مقاومت کششی (MPa)

۲-۲- چگونگی ساخت نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد

برای ساخت نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد از ترکیب گچ و آب با نسبت ۲ به ۱ استفاده شد. مخلوط گچ و آب داخل قالب‌های مخصوصی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و از جنس فایبرگلاس، ریخته می‌شود. چون آب جذب این قالب‌ها نمی‌شود، بنابراین رطوبت نیز باعث افزایش حجم قالب نمی‌شود. یک عدد فیبر پلاستیکی مخصوص به ابعاد $10 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر در داخل قالب قرار داده شد. سپس ورقه‌های آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر، عرض ۲ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و آغشته به روغن گریس، از یک طرف داخل فیبر پلاستیکی فرو رفته و از طرف دیگر به سطح آزاد ارتباط می‌یابد. روغن گریس از چسبیدن تیغه به گچ جلوگیری می‌کند. تیغه‌ها دارای طول‌های یک و دو سانتی‌متر بوده و به‌طور عمود برهم، در فوم فرورفته‌اند. پس از ریخته‌شدن دوغاب گچ درون قالب و سپری‌شدن ۱۵ دقیقه، ورقه‌های آلومینیومی از قالب خارج می‌شود. نمونه‌ها دارای دو درزه ناممتد با طول‌های یک و دو سانتی‌متر بوده که این درزه‌ها بر یکدیگر عمود هستند. درزه کوچکتر دارای زاویه‌داری ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نسبت به افق است. بعد از مدت ۱۵ روز، نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و چگونگی شکست نمونه‌ها بررسی شد. شکل ۲، نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد را نشان می‌دهد.

یاقیز [۱۷]، حفاری در زمین‌های سخت را مطالعه کرد. ژانگ و همکاران [۱۸]، فرسایش مته TBM را بر اثر حفاری مطالعه کردند. توماک [۱۹]، به‌طور آزمایشگاهی، تئوری و تجربی، فرایند حفاری را مطالعه کردند. یین و همکاران [۲۰]، تاثیر فشار محصورکننده را روی خریدش سنگ بررسی کردند. تن و همکاران نیز تاثیر خصوصیات مکانیکی درزه‌ها را روی خریدش سنگ کاوش کردند.

لیو و همکاران [۲۱-۲۴]، تاثیر ناپیوستگی‌ها و شرایط بارگذاری را روی خریدش سنگ حاصل از بارگذاری TBM مطالعه کردند. گنگ و همکاران [۲۵]، روند شکست سنگ را تحت اثر برنده TBM، به‌طور آزمایشگاهی مطالعه کردند. هدف این مقاله، مطالعه آزمایشگاهی و عددی تاثیر بار نقطه‌ای برنده U شکل بر چگونگی رشد ترک از درزه ناممتد عمودبرهم بود. به این ترتیب که با تغییر در زاویه‌داری درزه ناممتد عمودبرهم، نحوه الگوی شکست، مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، درگام اول نمونه‌های شبه‌سنگی از جنس گچ که حاوی درزه‌های ناممتد عمود برهم هستند، ساخته شد. سپس با استفاده از یک ابزار U شکل بار به‌طور محوری به نمونه، وارد و نحوه شکست درزه‌های ناممتد بررسی و در گام دوم، با استفاده از نرم‌افزار FRANC2D، رفتار رشد ترک از درزه‌های ناممتد عمود برهم بررسی و نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شدند.

۲- مراحل انجام آزمون‌های آزمایشگاهی

در این بخش، به‌روند تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته‌شده از گچ پرداخته می‌شود. سپس به چگونگی ساخت نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد پرداخته و در ادامه، نحوه بارگذاری نمونه‌ها و در انتها رفتار شکست آنها بررسی می‌شود.

۲-۱- تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، از ترکیب گچ و آب با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. آزمایش تک‌محوره و برزلی روی نمونه‌های استوانه‌ای و دیسکی انجام شد. نمونه‌های استوانه‌ای دارای قطر ۵۴ و ارتفاع ۱۰۸ میلی‌متر و نمونه‌های دیسکی دارای قطر ۵۴ و ضخامت ۲۷ میلی‌متر هستند است. شکل ۱، الگوی شکست نمونه‌های تک‌محوره و برزلی را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۲- چگونگی بارگذاری نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد

به منظور انجام بارگذاری بر نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها داخل ماشین تک‌محوره و سپس ابزار U شکل، بین نمونه و فک بالایی ماشین بارگذاری قرار گرفت (شکل ۳). این ابزار، بار را به‌طور خطی به نمونه منتقل می‌کند. نرخ بارگذاری ماشین، ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم و الگوی شکست نمونه‌ها و مقاومت آنها بررسی شد.

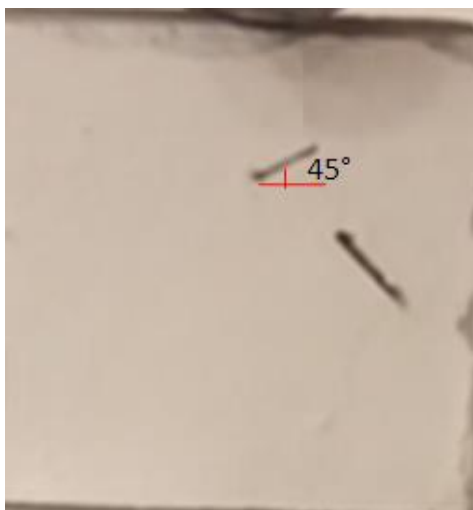
۳- نتایج آزمایش

۳-۱- الگوی شکست نمونه‌ها

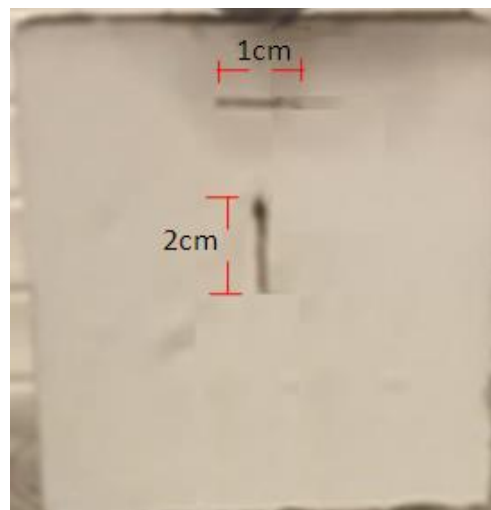
شکل ۴، الگوی شکست درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری با فاصله

۲ سانتی‌متر تا برنده U شکل و زاویه صفر درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر و عمود بر درزه ناممتد یک سانتی‌متری را نشان می‌دهد. ترک‌های باله‌ای کششی از دیواره بالایی درزه، شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می‌شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می‌کند. یک ترک کششی در محدوده پل سنگ بین دو درزه ایجاد می‌شود. همچنین ترک کششی از نوک درزه پایینی شروع می‌شود و در راستای اعمال بار، رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می‌کند.

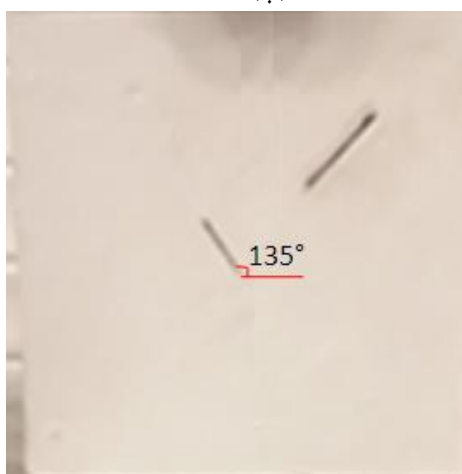
شکل ۵، الگوی شکست درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر تا برنده U شکل و زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر که



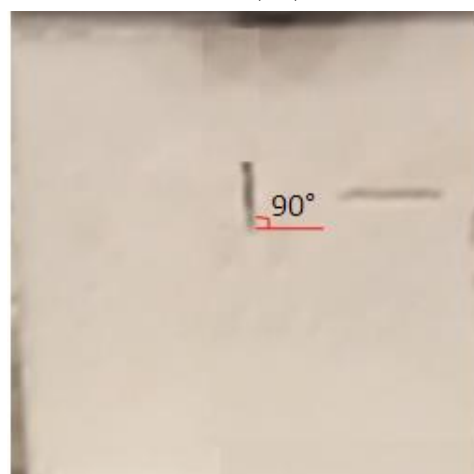
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۴: نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد

گسترش پیدا می‌کند تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و گچ متصل می‌شود. ترک کششی پایینی نیز از نوک پایینی درزه شروع و تقریباً با زاویه ۲۰ درجه از محور بارگذاری منتشر می‌شود. لازم به ذکر است که درزه با طول ۲ سانتی‌متر در فرآیند شکست، شرکت نمی‌کند.

شکل ۷، الگوی شکست درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متری تا برنده II شکل و زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر که عمود بر درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری و بالای آن قرار گرفته است را نشان می‌دهد. ترک باله‌ای از زیر برنده II شکل، شروع می‌شود و در راستای محور بارگذاری و تقریباً در مرکز دو درزه ناممتد گسترش پیدا می‌کند.

عمود بر درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری و پایین آن قرار گرفته است را نشان می‌دهد. ترک‌های باله‌ای کششی از نوک بالایی درزه شروع و در راستای محور بارگذاری، منتشر می‌شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می‌کند. دو ترک کششی مایل در محدوده پل سنگ بین دو درزه ایجاد می‌شود. هم‌چنین ترک کششی از نوک پایینی درزه شروع و در راستای اعمال بار رشد و به لبه پایینی نمونه برخورد می‌کند.

شکل ۶، الگوی شکست درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متری تا برنده II شکل و زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر و عمود بر درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری را نشان می‌دهد. ترک باله‌ای از نوک بالایی درزه شروع می‌شود و در راستای محور بارگذاری،



شکل ۳: ماشین تک محوره و نحوه بارگذاری نمونه‌ها



شکل ۴: الگوی شکست درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متری تا برنده II شکل و زاویه صفر درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر و عمود بر درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری

CASCA ساخته می‌شود. مدل‌سازی در CASCA شامل ساخت قطعه با هندسه موردنظر و مش‌بندی است. مدل ذخیره‌شده در CASCA ورودی نرم افزار فرنک است. در فرنک بایستی مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، چگالی و چقرمگی شکست کششی را برای مدل تعریف کرد. وقتی قطعه مورد نظر وارد نرم افزار فرنک شد، شرایط مرزی شامل ثابت شدن گره‌ها در راستای محورهای مختصات و اعمال بارگذاری در مدل اجرا می‌شود. در نهایت، آنالیز انجام و از آن، نمودار گرفته می‌شود. این نرم افزار بیشترین استفاده را در صفحات دارد. هم‌چنین می‌توان صفحات حفره‌دار و ترک‌دار را طراحی و تحلیل کرد. به‌منظور ایجاد ترک در مدل، باید بعد از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، ترک‌های داخلی و یا لبه‌ای را با طول و زاویه‌داری مورد نظر در مدل ایجاد کرد. ضریب شدت تنش در نوک ترک به روش‌های مختلف از جمله روش انتگرال K_I روش انرژی و ... محاسبه می‌شود.

۳-۲- تاثیر درزه‌های ناممتد بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

شکل ۸، تاثیر زاویه‌داری درزه ناممتد (زاویه‌داری درزه کوچک) را بر مقاومت فشاری نمونه نشان می‌دهد. وقتی زاویه درزه‌ها نسبت به محور بارگذاری، ۴۵ درجه است، مقاومت فشاری نمونه‌ها با افت شدیدی مواجه می‌شود.

۴- مدل‌سازی عددی

۴-۱- نرم‌افزار FRANC2D

نرم‌افزار FRANC2D یک نرم‌افزار المان محدود است که برای مدل‌سازی شروع و پیشروی ترک به کار برده می‌شود. این نرم‌افزار در دانشگاه کرنل، طراحی و توسعه یافته است. محاسبات مکانیک شکست که در نرم‌افزار فرنک انجام می‌شود از مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی بهره می‌برند. برای استفاده از این نرم‌افزار، یک فایل با پسوند inp در نرم‌افزار



شکل ۵: الگوی شکست درزه ناممتد ۱سانتی‌متری با فاصله ۲سانتی‌متر تا برنده II شکل و زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲سانتی‌متری با فاصله ۲سانتی‌متر عمود بر درزه ناممتد ۱سانتی‌متری



شکل ۶: الگوی شکست درزه ناممتد ۱سانتی‌متری با فاصله ۲سانتی‌متر تا برنده II شکل و زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲سانتی‌متری با فاصله ۲سانتی‌متر و عمود بر درزه ناممتد ۱سانتی‌متری و با زاویه صفر درجه نسبت به افق

U: بردار جابه‌جایی

f: بردار نیروهای خارجی روی مرز Γ است.

برای حل این معادله از روش المان محدود توسعه‌یافته استفاده شد. برای بخش‌بندی ناحیه مورد نظر از المان ایزوپارامتریک استفاده شد [۲۷]. این المان، مربعی شکل بوده و دارای ۴ گره است. در این المان‌ها از توابع شکل یکسان برای درون‌یابی جابه‌جایی‌ها، هندسه و ویژگی‌های ماده استفاده شد. این نوع فرمول‌بندی، به فرمول‌بندی المانی ایزوپارامتریک تعمیم یافته معروف است. المان ایزوپارامتریک مربعی (شکل ۹)، یک المان چهاروجهی در دستگاه مختصات سراسری (x,y) را به یک مربع ۲*۲ در دستگاه محلی ($\xi \times \eta$) نگاشت می‌کنند. مختصات x و y نقاط از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$x = \sum_{i=1}^4 x_i N_i, y = \sum_{i=1}^4 y_i N_i \quad (2)$$

دستگاه مختصات به کار رفته در این نرم افزار همواره ثابت است. به گونه‌ای که مختصات محلی U و مختصات اصلی X، افقی بوده و به سمت راست افزایش می‌یابند. مختصات محلی V و مختصات اصلی Y، عمودی بوده و به سمت بالا افزایش می‌یابند.

۴-۲- معادلات حاکم بر رشد ترک

در این تحقیق مساله در حالت استاتیکی تحلیل شده است. معادله حاکم بر مساله عبارت است از رابطه ۱ [۲۶]:

$$\int_{\Omega} \sigma \cdot \delta \varepsilon \, d\Omega = \int_{\Gamma} f^t \cdot \delta u \, \Gamma \quad (1)$$

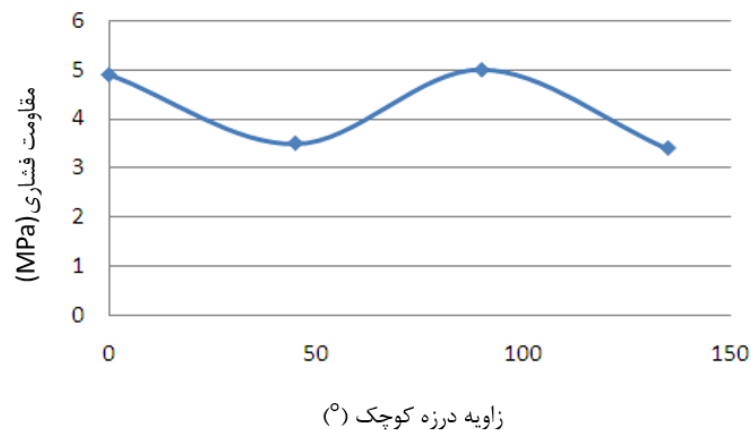
که در آن:

σ : ماتریس تنش روی ناحیه Ω

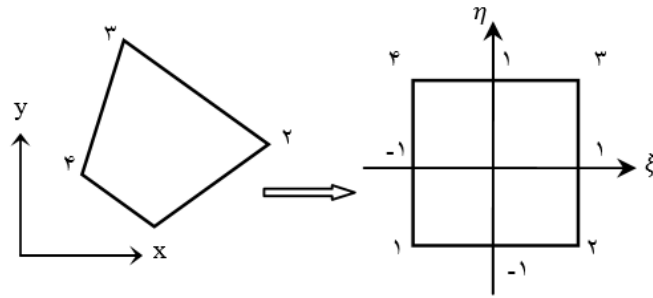
ε : ماتریس کرنش روی ناحیه Ω



شکل ۷: الگوی شکست درزه ناممتد ۱سانتی‌متری با فاصله ۲سانتی‌متر تا برنده II شکل و زاویه ۵۴ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲سانتی‌متری با فاصله ۲سانتی‌متر و عمود بر درزه ناممتد ۱سانتی‌متری و بالای آن



شکل ۸: تاثیر زاویه‌داری درزه ناممتد (درزه کوچک) بر مقاومت فشاری نمونه‌ها



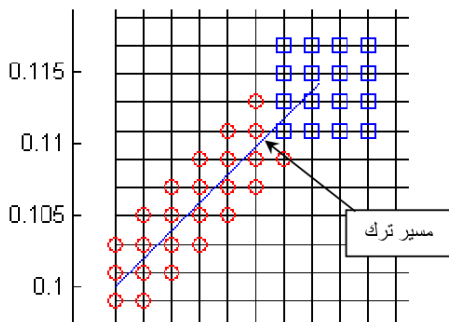
شکل ۹: المان محدود ایزوپارامتریک [۲۷]

مجموعه گره‌های المان‌هایی که توسط ترک، بریده می‌شوند با S_H مشخص شده‌اند. مجموعه المان‌ها و گره‌ها در S_C می‌توانند توسط کاربر انتخاب شوند. معمولاً یک المان، کفایت می‌کند؛ اما با توجه به این‌که با استفاده از چندین المان می‌توان حل دقیق‌تری را به دست آورد، در اینجا مطابق شکل ۱۰، گره‌های ۹ المان که با مربع‌های کوچک مشخص شده‌اند. در اطراف نوک ترک، غنی‌سازی شده‌اند.

گره‌ها در S_C و S_H به ترتیب به عنوان گره‌های غنی‌شده نوک و غنی‌شده گام و مجموعاً، به عنوان گره‌های غنی‌شده شناخته می‌شوند. گره‌های S_H در شکل ۱۰ با دایره‌های کوچک مشخص شده‌اند. $H()$ در رابطه ۵، تابع پله هویساید ارایه شده توسط رابطه ۶ است.

$$H(z) = \begin{cases} 1, & z > 0 \\ 0, & z \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه ۵، $\psi^{(j)}$ مجموعه‌ای از توابع غنی‌سازی هستند که رفتار نزدیک نوک ترک را تقریب می‌زنند. این توابع برحسب مختصات محلی نوک ترک (θ, r) عبارتند از:



شکل ۱۰: قسمتی از صفحه المان‌بندی شده (گره‌های S_C با مربع و گره‌های S_H با دایره مشخص شده‌اند [۲۷]).

در این رابطه N_i تابع شکل مربوط به نقطه i ام است که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$N_i(\xi, \eta) = 1/4(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i) \quad (3)$$

درون‌یابی برای محاسبه خواص ماده به کمک رابطه ۴ انجام می‌شود [۲۶].

$$E = \sum_{I=1}^4 N_I E_I, \quad \nu = \sum_{I=1}^4 N_I \nu_I, \quad \rho = \sum_{I=1}^4 N_I \rho_I \quad (4)$$

که در آن:

E : مدول الاستیسته

ν : نسبت پواسون

ρ : چگالی ماده است.

تقریب میدان‌های جابه‌جایی در روش المان محدود توسعه یافته به کمک رابطه ۵ و از روی مقادیر گره‌ای محاسبه می‌شود [۲۶].

$$u(x) = \sum_{\forall I} N_I(x) q_I + \sum_{\substack{K \in S_C \\ K \in H}} N_K(x) [H(f(x)) - H(f(x_K))] q_K^0 + \sum_j \sum_{K \in S_C} N_K(x) [\varphi^{(j)}(x) - \varphi^{(j)}(x_K)] q_K^j \quad (5)$$

که در آن:

N_i : توابع شکل

q_I : درجات آزادی المان محدود

q_K^j و q_K^0 : درجات آزادی اضافی در گره K

X_K : موقعیت گره K است.

مجموعه گره‌های المان‌ها در اطراف نوک ترک با S_C و

$$j_{11} = \frac{\partial x}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^4 x_i N_{i,\xi}, \quad j_{12} = \frac{\partial y}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^4 y_i N_{i,\xi}$$

$$j_{21} = \frac{\partial x}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^4 x_i N_{i,\eta}, \quad j_{22} = \frac{\partial y}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^4 y_i N_{i,\eta} \quad (13)$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [D][\varepsilon] \quad (14)$$

برای محاسبه K روی یک ناحیه، از قانون مربع‌سازی گوس استفاده شده است. با استفاده از این قانون، K به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$K = t \sum_{i=1}^{nQ} \sum_{j=1}^{nQ} (B^T D B) \det(j) w_i w_j \quad (15)$$

در این رابطه $(B^T D B) \det(j)$ در نقاط گوسی محاسبه می‌شود

w : ضرایب وزنی هستند.

در رابطه ۱۵، nQ تعداد نقاط گوسی در حالت یک بعدی است.

امکان استفاده از حداکثر 21×21 نقطه گوسی در یک المان برای انتگرال دو بعدی فراهم است. نقاط گوسی برای حالت $nQ = 10$ در المان مربعی و مثلثی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای محاسبه انتگرال عددی روی المان‌هایی که توسط ترک قطع می‌شوند، این المان به مربعات کوچک‌تری تقسیم می‌شود (شکل ۱۲-الف). المان نوک ترک نیز مطابق شکل ۱۲-ب، به چند مثلث تقسیم شد تا اثر تکینگی نوک ترک در عبارت زیرانتگرال حذف شود.

۴-۲-۱- تعیین مسیر رشد ترک

جهتی که ترک در امتداد آن رشد می‌کند، θ_c با استفاده از معیار ماکزیمم تنش محیطی به دست می‌آید. این زاویه به ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} بستگی دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$\theta_c = 2 \arctan \left(\frac{1}{4} \left(\frac{K_I}{K_{II}} - \text{sign}(K_{II}) \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \right) \quad (16)$$

در این رابطه K_I و K_{II} ، به ترتیب ضرایب شدت تنش مد

$$\varphi(r, \theta) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin(\theta) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \\ \sqrt{r} \sin(\theta) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{array} \right\} \quad (7)$$

رابطه ۵ را می‌توان به صورت رابطه ۸ بازنویسی کرد:

$$u(x) = \sum_{i=1}^4 N_i(x) q_i + \sum_{K \in S_H} N_K(x) \left[\frac{H(f(x)) - H(f(x_K))}{H(f(x_K))} \right] q_K^0 + \sum_{K \in S_C} N_K(x) \left[\sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{r_K} \sin\left(\frac{\theta_K}{2}\right) \right] q_K^{(1)} + \sum_{K \in S_C} N_K(x) \left[\sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{r_K} \cos\left(\frac{\theta_K}{2}\right) \right] q_K^{(2)} + \sum_{K \in S_C} N_K(x) \left[\sqrt{r} \sin(\theta) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{r_K} \sin(\theta_K) \sin\left(\frac{\theta_K}{2}\right) \right] q_K^{(3)} + \sum_{K \in S_C} N_K(x) \left[\sqrt{r} \sin(\theta) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{r_K} \sin(\theta_K) \cos\left(\frac{\theta_K}{2}\right) \right] q_K^{(4)}$$

با قرار دادن رابطه ۸ در معادله ۱، معادله حاکم به صورت زیر گسسته‌سازی می‌شود.

$$K u = F \quad (9)$$

که در آن:

K : ماتریس سفتی (رابطه ۱۰)

u : بردار درجات آزادی گره‌ای

F : بردار نیروهای خارجی است.

(۱۰)

$$K = \int_V B^T D B dV = t \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (B^T D B) \det(J) d\xi d\eta$$

که در آن:

t : ضخامت صفحه

B : ماتریس مشتقات توابع شکل که کرنش‌ها را به درجات

آزادی گره‌ای (q) مرتبط می‌کند

D : ماتریس خواص است که تنش‌ها را به کرنش‌ها مرتبط

می‌کند [۲۶].

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [B][q] \quad (11)$$

$$[B] = \frac{1}{\det(j)} \begin{bmatrix} j_{22} - j_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j_{21} & -j_{11} \\ -j_{21} & j_{11} & j_{22} & -j_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1,\xi} \\ u_{1,\eta} \\ u_{2,\xi} \\ u_{2,\eta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

۴-۳- نحوه مدل سازی

برای شروع کار در نرم افزار FRANC، ابتدا قطعه مورد نظر در نرم افزار CASCA مدل شد. به این صورت که یک مدل مربعی با ابعاد ۱۰*۱۰ سانتی متر ساخته و یک سیلندر توخالی نیز در بالای مدل جای گذاری شد که وظیفه اعمال بار برنده را در نرم افزار فرنگ برعهده دارد. قطر خارجی این سیلندر ۲ و قطر داخلی آن ۱ سانتی متر بود. بعد از ساخت هندسه اولیه نمونه، مدل قطع بندی و با مش چهار گره ای، مش بندی انجام شد (شکل ۱۳-الف).

این فایل با پسوند inp برای شروع کار فرنگ ذخیره می شود. همچنین می توان یک فایل خروجی با پسوند CSC برای CASCA ذخیره کرد که در صورت نیاز به CASCA، برگشته و تغییراتی روی مدل ایجاد کند. در این قسمت کار با نرم افزار CASCA به پایان می رسد. فایل مورد نظر در نرم افزار

اول و دوم هستند که به کمک روش انتگرال برهمکنش [۲۷] محاسبه شده اند. مقدار رشد ترک در هر مرحله (Δa) طول ترک است) به میزان دو برابر طول یک المان در نظر گرفته می شود. الگوریتم تعیین مسیر رشد ترک به صورت زیر ارایه می شود:

۱- ابتدا شمارنده $i=0$ تعریف می شود.

۲- $i=i+1$ و محاسبه مقادیر ضرایب شدت تنش KI و KII.

۳- محاسبه زاویه رشد ترک θ_c با استفاده از رابطه ۱۶ و

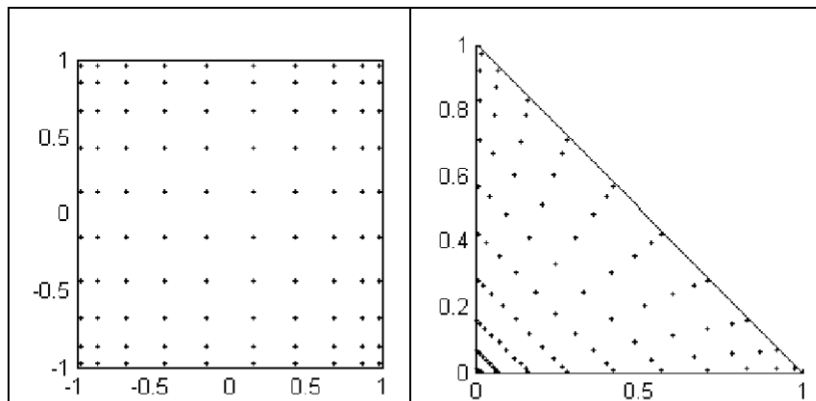
تعیین مختصات جدید نوک ترک با استفاده از رابطه ۱۷.

$$x_{tip}^{(i+1)} = x_{tip}^{(i)} + \Delta a (\cos \theta_c, \sin \theta_c) \quad (17)$$

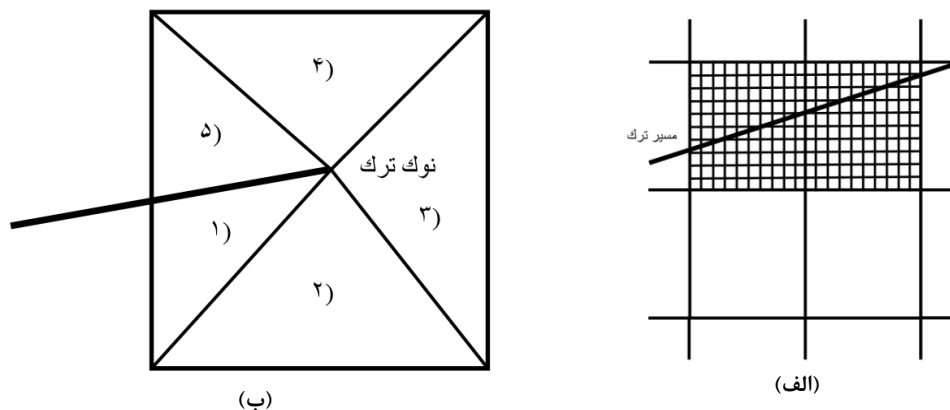
۴- اجرای دوباره برنامه و حل مساله با هندسه جدید ترک.

۵- اگر i کوچک تر از تعداد دفعات تعیین شده برای گسترش

ترک است، برگشت به مرحله ۲ در غیر این صورت خروج.



شکل ۱۱: نقاط گوسی برای المان مربعی و مثلثی در حالت $nQ = 10$ [۲۷]



شکل ۱۲: الف) تقسیمات المان های اطراف ترک، ب) تقسیمات المان نوک ترک [۲۷]

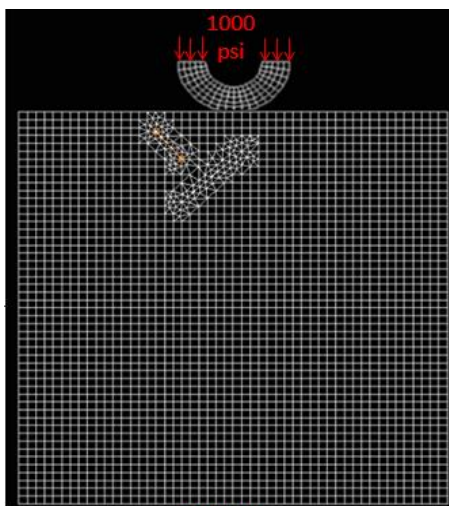
زمانی که زاویه درزه کوچک با محور بارگذاری، ۵۰ درجه است (شکل ۱۵-ب)، یک ترک کششی از نوک بالایی درزه کوچک‌تر شروع می‌شود و در راستای محور بارگذاری رشد و به لبه نمونه برخورد می‌کند. هم‌چنین یک ترک کششی از نوک پایینی درزه کوچک‌تر، شروع می‌شود و در مدل پیشروی می‌کند. البته درزه بزرگ‌تر، در فرآیند شکست شرکت نمی‌کند. زمانی که زاویه‌داری درزه کوچک با محور بارگذاری، ۲۵ درجه است (شکل ۱۵-ج)، یک ترک کششی از نوک بالایی درزه کوچک‌تر شروع می‌شود و در راستای محور بارگذاری رشد و به لبه نمونه برخورد می‌کند. یک ترک کششی نیز از نوک پایینی درزه کوچک‌تر، شروع می‌شود و در مدل پیشروی می‌کند. دو ترک کششی نیز از نوک‌های درزه بزرگ‌تر رشد و در مدل توسعه می‌یابند.

وقتی زاویه درزه کوچک با محور بارگذاری، صفر درجه است (شکل ۱۵-د)، هیچ‌گونه ترک کششی در مدل ایجاد نمی‌شود. زمانی که درزه بزرگ‌تر، بالای درزه کوچک‌تر قرار دارد و زاویه آن با افق، ۹۰ درجه است (شکل ۱۵-ه)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه بزرگ‌تر رشد و درون مدل

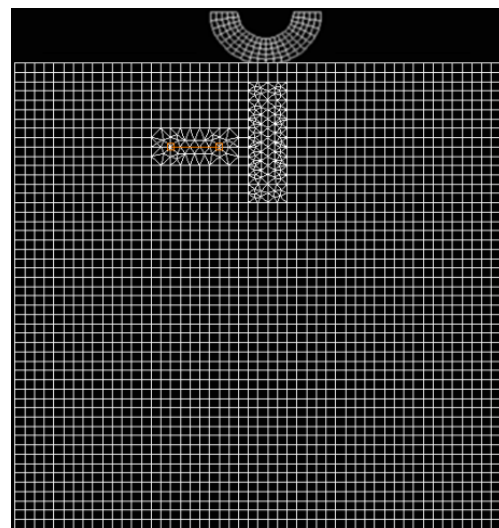
FRANC، فراخوانی و در ادامه، کار تحلیل صورت می‌گیرد. مشخصات جسم (جدول ۲)، بستن مرزها و بارگذاری روی قطعه انجام می‌شود. ضلع پایینی نمونه در راستای X و Y بسته و نیروی ۱۰۰۰ پوند بر اینچ به مدل اعمال می‌شود (شکل ۱۳-ب). بعد از اعمال بارگذاری، درزه‌های درون مدل با هندسه مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی تعریف می‌شوند (شکل ۱۴) و رشد آنها مورد مطالعه قرار می‌گیرد (شکل ۱۵). به عبارت دیگر درزه‌هایی با طول‌های ۱ و ۲ سانتی‌متر به‌طور ناممتد و عمود بر یکدیگر در مدل جای‌گذاری و رفتار رشد ترک از این درزه‌ها تحت بار برنده مطالعه می‌شود (شکل ۱۵).

۴-۴- الگوی شکست مدل‌های عددی

شکل ۱۵، الگوی شکست مدل‌های عددی را نشان می‌دهد. وقتی زاویه درزه کوچک با محور بارگذاری، ۷۵ درجه است (شکل ۱۵-الف)، یک ترک کششی از درزه کوچک‌تر شروع می‌شود و در راستای محور بارگذاری، رشد و به لبه نمونه برخورد می‌کند. لازم به ذکر است که درزه بزرگ‌تر، در فرآیند شکست شرکت نمی‌کند.



(ب)

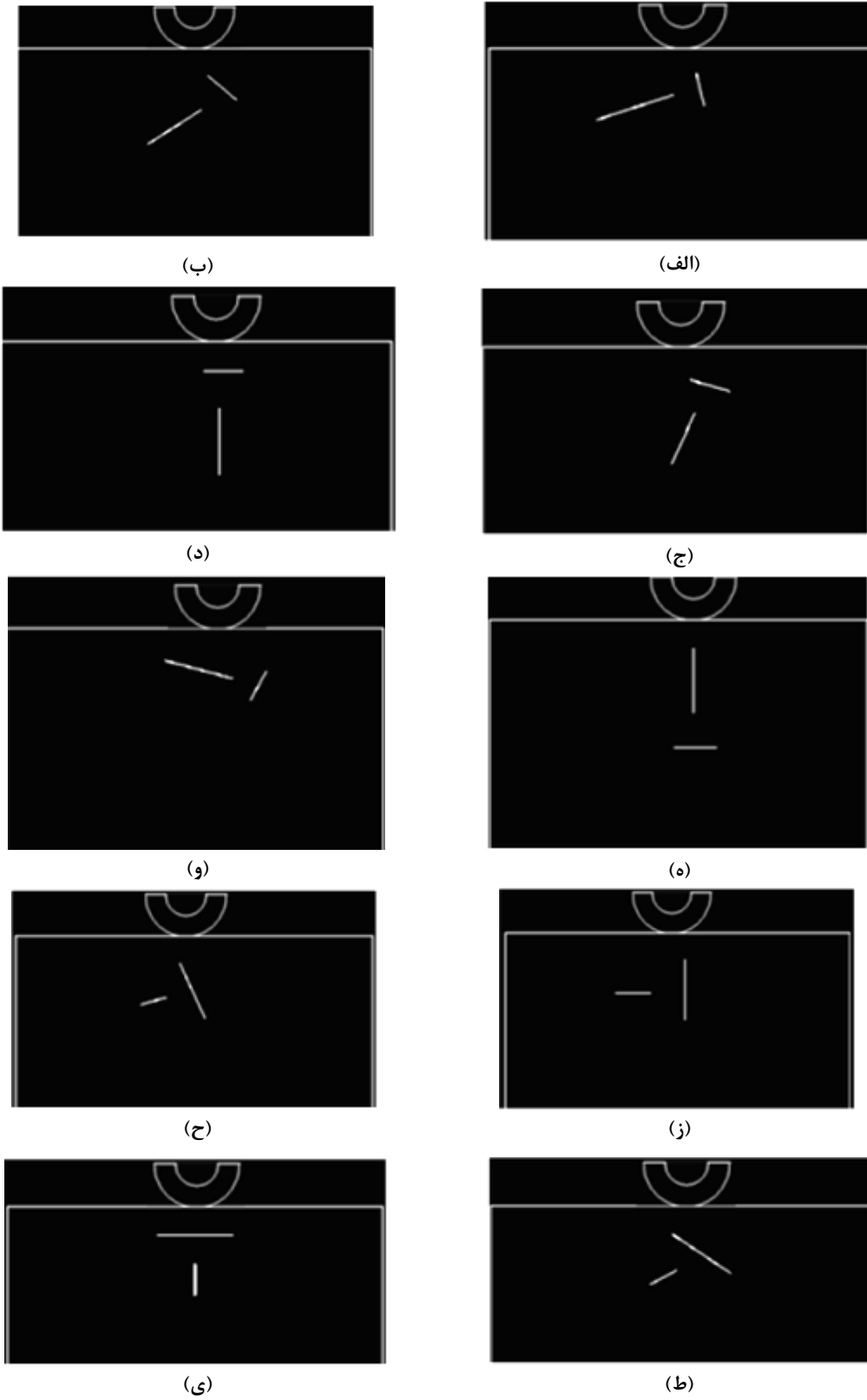


(الف)

شکل ۱۳: الف) هندسه نمونه آماده شده در CASCA (ب) بارگذاری و ثابت شدن مرزها در FRANC

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی مدل عددی

Mechanical properties	Young modulus (GPa)	Poisson ratio	Density (kg/m ³)	Tensile fracture toughness (MPa√m)
value	5	0.2	2500	0.8



شکل ۱۴: مدل‌های عددی حاوی درزه‌های ناممتد



(ل)

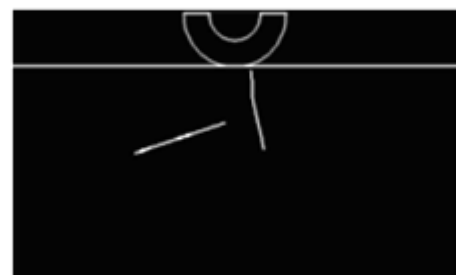


(ک)

شکل ۱۴ (ادامه): مدل‌های عددی حاوی درزه‌های ناممتد



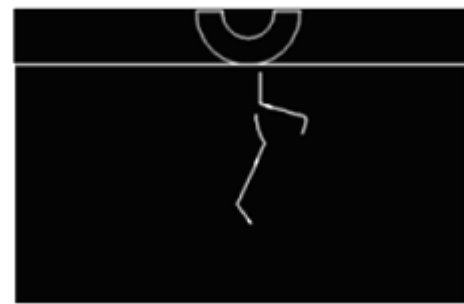
(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(و)

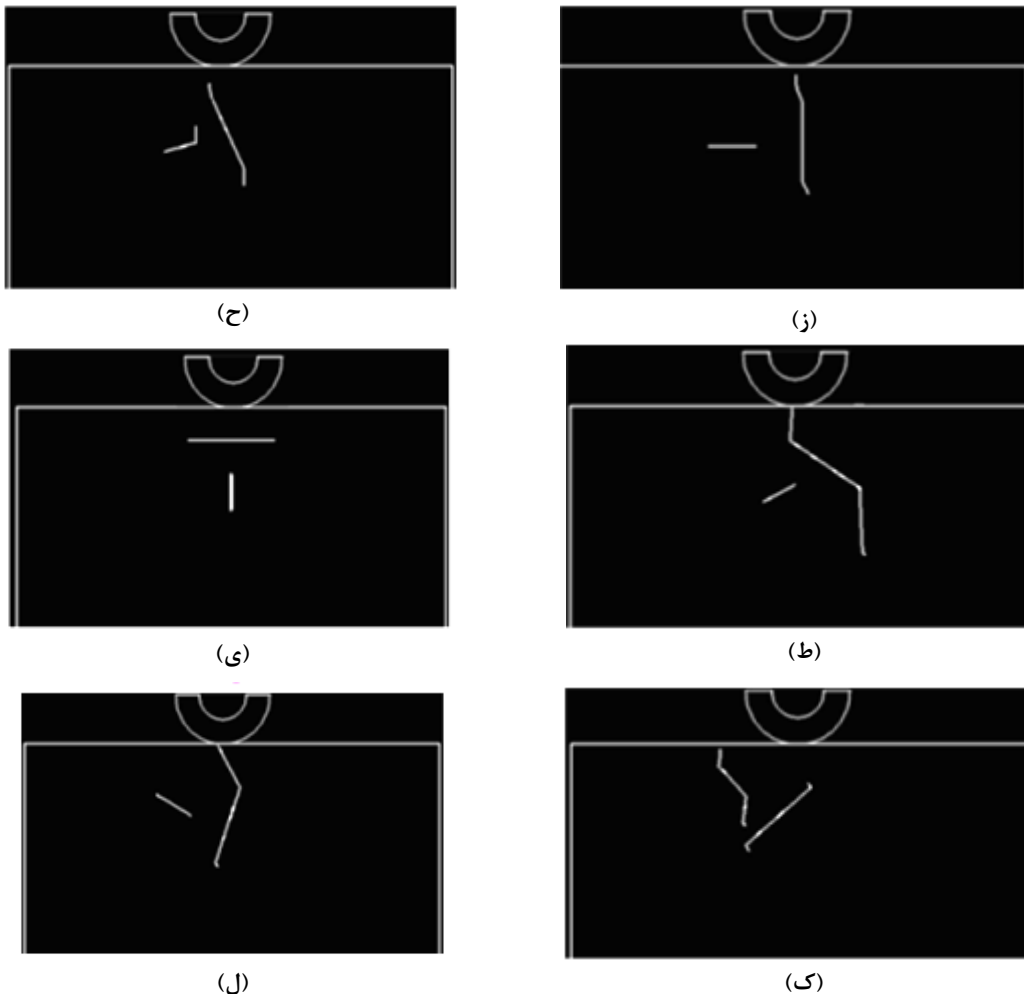


(ه)

شکل ۱۵: الگوی شکست مدل‌های عددی

زاویه آن با افق، ۲۵ درجه است (شکل ۱۵-و)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه کوچک‌تر رشد و درون مدل توسعه می‌یابند. لازم به ذکر است که درزه بزرگ‌تر در فرآیند شکست،

توسعه می‌یابند. لازم به ذکر است که درزه کوچک‌تر در فرآیند شکست شرکت نمی‌کند. زمانی که درزه بزرگ‌تر، بالای درزه کوچک‌تر قرار گرفته و



شکل ۱۵ (ادامه): الگوی شکست مدل عددی

مدل توسعه می‌یابد و درزه کوچک‌تر در فرایند شکست شرکت نمی‌کند.

زمانی که درزه بزرگ‌تر بالای درزه کوچک‌تر قرار دارد و زاویه‌داری آن با افق، صفر درجه است (شکل ۱۵-ج)، هیچ‌گونه ترک کششی در مدل ایجاد نمی‌شود.

زمانی که درزه کوچک‌تر در سمت چپ درزه بزرگ‌تر قرار دارد و زاویه آن با افق، ۵۰ درجه است (شکل ۱۵-ک)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه کوچک‌تر رشد و درون مدل توسعه می‌یابند. دو ترک کششی نیز در نوک‌های درزه بزرگ‌تر ایجاد می‌شود.

زمانی که درزه کوچک‌تر در سمت چپ درزه بزرگ‌تر قرار دارد و زاویه آن با افق، ۲۵ درجه است (شکل ۱۵-ل)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه بزرگ‌تر رشد و درون مدل توسعه می‌یابد و درزه کوچک‌تر در فرایند شکست شرکت

شرکت نمی‌کند. آن هنگام که درزه بزرگ‌تر در سمت راست درزه کوچک‌تر قرار دارد و زاویه‌داری آن با افق، ۹۰ درجه است (شکل ۱۵-ز)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه بزرگ‌تر، رشد و درون مدل توسعه می‌یابد. درزه کوچک‌تر در فرایند شکست، شرکت نمی‌کند.

زمانی که درزه بزرگ‌تر در سمت راست درزه کوچک‌تر و زاویه آن با افق، ۷۵ درجه است (شکل ۱۵-ح)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه بزرگ‌تر، رشد و درون مدل توسعه می‌یابد و یک ترک کششی از نوک بالایی درزه کوچک‌تر شروع می‌شود.

وقتی درزه بزرگ‌تر در سمت راست درزه کوچک‌تر قرار گرفته و زاویه آن با افق، ۵۰ درجه است (شکل ۱۵-ط)، دو ترک کششی از نوک بالا و پایین درزه بزرگ‌تر رشد و درون

نمی‌کند.

از مقایسه الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی (شکل‌های ۴-۷) و مدل عددی (شکل ۱۵)، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی شکست مشابهی در نمونه آزمایشگاهی و مدل‌های عددی به‌وقوع پیوسته است. الگوهای شکست در تطابق مناسبی با نتایج تحقیقات گذشته است [۲۹-۳۲].

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش شکست درزه ناممتد عمود بر هم زیر اثر بار نقطه‌ای برنده TBM با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. به‌این منظور، ۴ نمونه آزمایشگاهی از جنس گچ با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر حاوی درزه ناممتد عمود بر هم با طول‌های ۱ و ۲ سانتی‌متر آماده‌سازی شد. درزه کوچک‌تر دارای زاویه‌داری ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نسبت به افق بود. نسبت آب به گچ در ساخت نمونه‌ها، ۱ به ۲ بود. این نمونه‌ها زیر اثر بار نقطه‌ای برنده U شکل قرار گرفتند.

هم‌زمان با انجام مطالعات آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار FRANC2D نیز بر روی نمونه‌های حاوی درزه‌های ناممتد عمود بر هم انجام شد. به‌این ترتیب که یک مدل مربعی با ابعاد 10×10 سانتی‌متر ساخته شد. یک سیلندر توخالی که وظیفه اعمال بار برنده را در نرم افزار فرنک بر عهده داشت نیز در بالای مدل جای‌گذاری شد. قطر خارجی این سیلندر، ۲ و قطر داخلی آن، ۱ سانتی‌متر بود. بعد از ساخت هندسه اولیه نمونه، مدل قطاع‌بندی و با مش چهار گره‌ای، مش‌بندی انجام شد. ضلع پایینی نمونه در راستای X و Y بسته و نیروی ۱۰۰۰ پوند بر اینچ به مدل اعمال شد. بعد از اعمال بارگذاری، درزه‌ها با هندسه مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی درون مدل تعریف شد و رشد آنها مورد مطالعه قرار گرفت. به عبارت دیگر درزه‌هایی با طول‌های ۱ و ۲ سانتی‌متر به‌طور ناممتد و عمود بر یکدیگر در مدل جای‌گذاری و رفتار رشد ترک در این درزه‌ها تحت بار برنده، مطالعه شد. به‌طور کلی، ۱۲ مدل عددی ساخته شد که الگوی هندسی آنها، شبیه نمونه‌های آزمایشگاهی بود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که:

۱- ترک کششی مود غالب شکست است که در نمونه‌های آزمایشگاهی مدل‌سازی عددی به‌وقوع می‌پیوندد.

۲- وقتی نمونه حاوی درزه ناممتد ۱ سانتی‌متر با فاصله ۲

سانتی‌متر تا برنده U شکل و زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق و درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری با فاصله ۲ سانتی‌متر و عمود بر درزه ناممتد ۱ سانتی‌متری و با زاویه صفر درجه نسبت به افق است، درزه ناممتد ۲ سانتی‌متری، هیچ تاثیری در انتشار و گسترش ترک‌ها ندارد.

۳- زمانی که زاویه درزه کوچک‌تر ۴۵ و ۱۳۵ درجه است، مقاومت کمتری برای رشد ترک ثبت شده است.

۴- با مقایسه الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی شکست مشابهی در نمونه آزمایشگاهی و مدل‌های عددی به‌وقوع پیوسته است.

۵- به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، وقتی درزه‌های ناممتد در راستای محور بارگذاری قرار می‌گیرند، رشد ترک در تنش کمتری اتفاق می‌افتد و طول رشد آن زیاد است.

۶- مراجع

- [۱] میرزایی نصیرآباد، ح، کاکایی، ر، حسنی، ب، جلالی، س. م. ا.؛ ۱۳۸۸؛ "ارزیابی دو معیار شکست مبتنی بر ضرایب تمرکز تنش و مولفه‌های تنش برای پیش‌بینی جهت انتشار ترک در محیط‌های شبه سنگی". نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره چهارم، شماره ۸، ص ۱۲-۱۰.
- [۲] میرزایی نصیرآباد، ح، کاکایی، ر، حسنی، ب؛ ۱۳۸۷؛ "تعیین ضریب تمرکز تنش مود کششی شکستگی‌های سنگ با استفاده از روش بدون مش گالرکین و برون‌یابی جابجایی". دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران، ص ۱۹۰-۱۸۳.
- [3] Mirzaei, H., Kakaie, R., and Hassani, B. (2008). "Determination of Stress Intensity Factors for Jointed Brittle Rock Medium Using Element Free Galerkin Method". 5th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS5), 24-26 November, Tehran, Iran, 2: 1135-1141.
- [4] Haeri, H., and Marji, M. F. (2016). "Simulating the crack propagation and cracks coalescence underneath TBM disc cutters". Arabian Journal of Geosciences, 9(2): 124.
- [5] Hosseini_Nasab, H., and Fatehi Marji, M. (2007). "A semi-infinite higher-order displacement discontinuity method and its application to the quasistatic analysis of radial cracks produced by blasting". Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2(3): 439-458.
- [6] Marji, M. (1997). "Modelling of cracks in rock fragmentation with a higher order displacement discontinuity method". Ph.D Thesis in Mining Engineering (Rock Mechanics), 1(1): 167.
- [7] Behnia, M., Goshtasbi, K., Marji, M. F., and Golshani (2014). "A Numerical simulation of crack propagation

- [19] Tumac, D., and Balci, C. (2015). "Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45: 84-98.
- [20] YinN, L-j., Gong, Q-m., Ma, H.-s., and Zhao, J. (2014). "Use of indentation tests to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter [J]". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72(72): 261-276.
- [21] Liu, H-y., and Kou, E. (2002). "Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters [J]". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4): 491-505.
- [22] Liu, J-s. (2015). "Influence of confining stress on fracture characteristics and cutting efficiency of TBM cutters conducted on soft and hard rock". *Journal of Central South University*, 22(5): 1947-1955.
- [23] Liu, J. (2016). "The influence of confining stress on optimum spacing of TBM cutters for cutting granite [J]". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88: 165-174.
- [24] Liu, J., Cao, P., and Han, D-y. (2015b). "Sequential indentation tests to investigate the influence of confining stress on rock breakage by tunnel boring machine cutter in a biaxial state [J]". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(4): 1-17.
- [25] Qi, G. (2016). "An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM) [J]". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52: 182-191.
- [26] Mohammadi, S. (2008). "Extended Finite Element Method. Blackwell Publishing Ltd. Sun, J.S., 2011. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters". *Rock and Soil Mechanics*, 32(6): 1891-1897.
- [27] Kim, J. H., and Paulino, G. H. (2003). "An accurate scheme for mixed-mode fracture analysis of functionally graded materials using the interaction integral and micromechanics models". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 58: 1457-1497.
- [28] Rethore, J., Roux, S., and Hild, F. (2010). "Mixed-mode crack propagation using a Hybrid Analytical and eXtended Finite Element Method". *C. R. Mecanique*, 338: 121-126.
- [29] Lee, S.-J., and Choi, S. O. (2009). "Numerical Analysis on Fragmentation Mechanism by Indentation of Disc Cutter in a Rock Specimen with a Single Joint". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(5): 440-449.
- [8] Marji, M. (2014). "Numerical analysis of quasi-static crack branching in brittle solids by a modified displacement discontinuity method". *International Journal of Solids and Structures*, 51(9): 1716-1736.
- [9] Marji, M. F. (2015). "Simulation of crack coalescence mechanism underneath single and double disc cutters by higher order displacement discontinuity method". *Journal of Central South University* 22(3): 1045-1054.
- [10] Hadi, H., Shahriar, K., and Marji Fatehi, M. (2013). "Simulating the bluntness of TBM disc cutters in rocks using displacement discontinuity method". *ICF13*, 33-45.
- [11] Haeri, H., Sarfarazi, V., Fatehi Marji, M., and Hedayat, A. (2016). "Experimental and Numerical Study of Shear Fracture in Brittle Materials with Interference of Initial Double Cracks". *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29(5): 555-566.
- [12] Gong, Q. M., and Zhao, J. (2009). "Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1):8-18.
- [13] Gong, Q. M., Zhao, J., and Jiao, Y. Y. (2005). "Numerical simulation of influence of joint orientation on rock fragmentation process by TBM cutters". *Tunneling and Underground Space Technology*, 20(2): 183-191.
- [14] Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., and 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.
- [15] Bejari, H., Kakaie, R., and Ataei, M. (2011). "Simultaneous effects of joint spacing and joint orientation on the penetration rate of a single disc cutter". *International Journal of Mining Science and Technology*, 21(4): 507-512.
- [16] Choi, S. O., and Lee, S. J. (2014). "Three-dimensional numerical analysis of the rock-cutting behavior of a disc cutter using particle flow code". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19: 1129-1138.
- [17] Yagiz, S. (2007). "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3): 326-339.
- [18] Zhang, Z., Meng, L., and Sun, F. (2014). "Wear analysis of disc cutters of full face rock tunnel boring machine". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 27: 1294-1300.

- of Central South University: Science and Technology, 44(10): 4040-4046.
- [32] Liu, J., Wang, J., and Wan, W. (2017). "Numerical study of crack propagation in an indented rock specimen". Computers and Geotechnics, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.014>.
- [30] Zhou, F., and Li, H. (2012). "Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter [J]". Rock and Soil Mechanics, 33(6): 1640-1646.
- [31] Tan, Q., Zhu, Y., Xia Y., Xu, Z., Li, J., and Song J. (2013). "Influence of joint characteristics on rock fragmentation induced by TBM disc cutter [J]". Journal



Failure Pattern of Perpendicular Non-Persistent Joints Beneath the Point Load of TBM's Cutter Using Experimental Test and Finite Element Method

Sarfarazi V.^{1*}, Mohamadi Bolban Abad Sh.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
Sarfarazi@hut.ac.ir

2- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
mn.shadman@chmail.ir

(Received: 31 Jul. 2019, Accepted: 04 Mar. 2020)

Abstract: In this paper, the failure pattern of non-persistent joint under U shape cutter was studied by experimental test and numerical simulation. For this purpose, 4 gypsum sample with dimension of 5cm*10cm*10cm containing perpendicular non-persistent joint were prepared. Samples have 2 vertical non-persistent joint with lengths of 1cm and 2 cm. the angle of small joint related to horizontal axis was 0°, 45°, 90° and 135°. This sample was subjected to U shape cutter loading. Concurrent with experimental test, numerical simulation was performed using Franc2d on the non-persistent joint. Totally 12 numerical model was built that some of them have similar configuration with experimental specimens. The results show that perpendicular non-persistent joint configuration has important effect on the failure pattern. The compressive strengths have minimum value when small joint angle were 45° and 135°. The comparison between experimental results and numerical output shows that the good accordance was established between experimental tests and numerical simulation.

Keywords: U shape cutter, Perpendicular non-persistent joints, Tensile crack, Tunnel boring machine.

INTRODUCTION

Tunnel boring machine (TBM) has been used for cutting the rock. Gong et al, [1,2] studied the effect of joint orientation on the rock fragmentation. Gong et al, [3] has been investigated the effect of rock brittleness on the rock failure using UDEC. Li et al [4], studied the effect of one joint on the TBM penetration rate. Bejari et al [5], investigated the effect of joint spacing on the TBM performance. Yagiz [6], studied tunneling in hard rock. Zhang et al [7] scrutinized the bit erosion due to drilling process. Zhu et al [8], investigated the effect of joint spacing and joint angle on the rock fragmentation. Tan et al.9], studied the effect of joint mechanical properties on the rock fragmentaion. Liu [10-12], investigated the effect of joint properties and loading condition on the TBM performance.

EXPERIMENTAL TEST

The materials used for experimental test were the mixture of gypsum and water by ratio of 2/1. Under



the special procedure, the samples consisting non-persistent joint were created.

DISCUSSION

Figures 1-4 show failure pattern of samples. The new born tensile crack initiate from joint tip and propagates parallel to loading axis till coalescence with boundary of sample.



Figure 1. Failure pattern of non-persistent joint



Figure 2. Failure pattern of non-persistent joint



Figure 3. Failure pattern of non-persistent joint



Figure 4. Failure pattern of non-persistent joint

Figure 5 shows the effect of joint angle on the compressive strength. As can be seen, when small joint angle was 45 degree, compressive strength has minimum value.

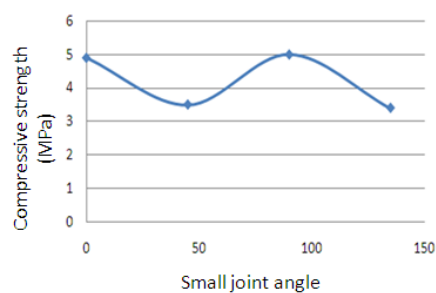


Figure 5. The effect of joint angle on the compressive strength

NUMERICAL MODELLING

For simulation of the effect of u shape loading on the non-persistent joint, a numerical model with dimension of 10 cm * 10 cm consisting joints was prepared. Table 1 shows mechanical properties for numerical simulation.

Table 1. Mechanical properties for numerical simulation

Mechanical properties	Young modulus (GPa)	Poisson ratio	Density (kg/m ³)	Tensile fracture toughness (MPa√m)
value	5	0.2	2500	0.8

Figure 6 shows different configuration for non-persistent joint.

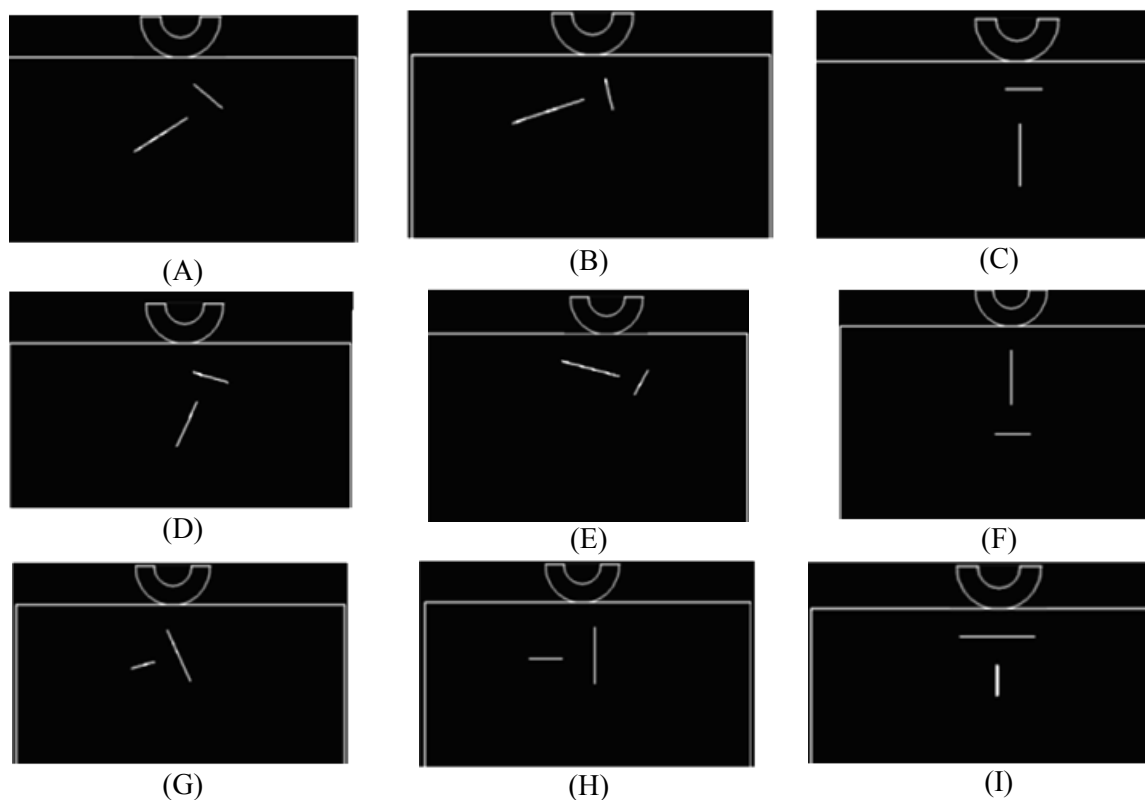


Figure 6. Different configuration for non-persistent joint

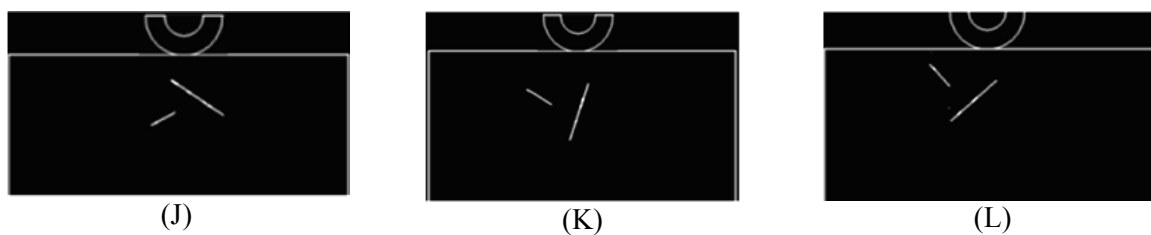


Figure 6 (Continued). Different configuration for non-persistent joint

DISCUSSION

Figure 7 shows failure pattern of samples. The new born tensile crack initiate from joint tip and propagates parallel to loading axis till coalescence with boundary of sample.

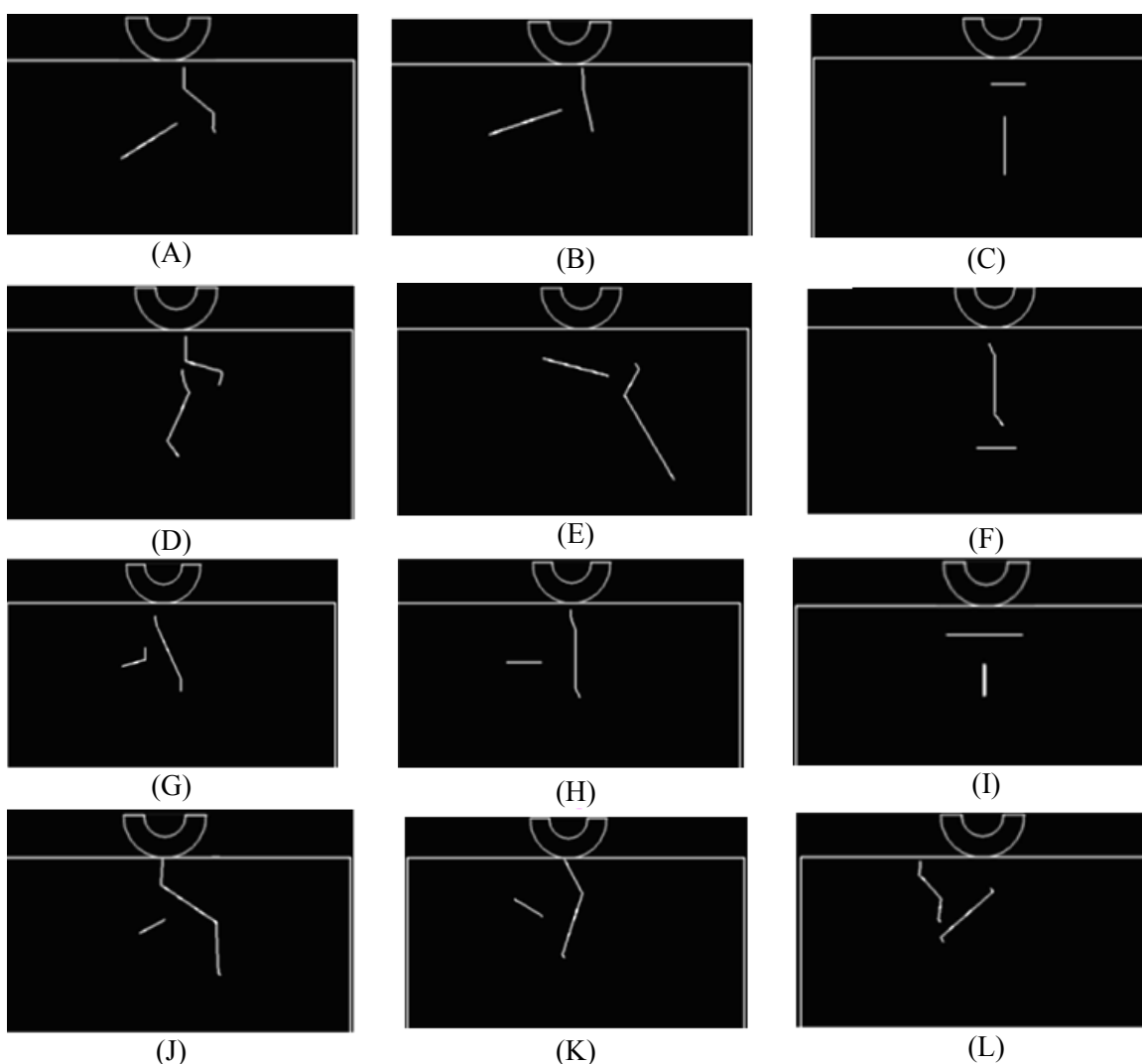


Figure 7. Failure pattern of samples

CONCLUSIONS

- Perpendicular non-persistent joint configuration has important effect on the failure pattern.
- The compressive strengths have minimum value when small joint angle were 45° and 135° .
- The comparison between experimental results and numerical output shows that the good accordance

was established between experimental tests and numerical simulation.

REFERENCES

- [1] Gong Q. M., and Zhao, J. (2009). "Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(1): 8-18.
- [2] Gong, Q. M., Zhao, J., and Jiao, Y. Y. (2005). "Numerical simulation of influence of joint orientation on rock fragmentation process by TBM cutters". Tunneling and Underground Space Technology, 20(2): 183-191.
- [3] Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., and 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.
- [4] Lee, S.-J., and Choi, S. O. (2009). "Numerical Analysis on Fragmentation Mechanism by Indentation of Disc Cutter in a Rock Specimen with a Single Joint". Tunneling and Underground Space Technology, 19(5): 440-449.
- [5] Bejari, H., Kakaie, R., and Ataei, M. (2011). "Simultaneous effects of joint spacing and joint orientation on the penetration rate of a single disc cutter". International Journal of Mining Science and Technology, 21(4): 507-512.
- [6] Yagiz, S. (2007). "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition". Tunneling and Underground Space Technology, 23(3): 326-239.
- [7] Zhang, Z., Meng, L., and Sun, F. (2014). "Wear analysis of disc cutters of full face rock tunnel boring machine". Chinese Journal of Mechanical Engineering, 27: 1294-1300.
- [8] Zhou, F., and Li, H. (2012). "Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter [J]". Rock and Soil Mechanics, 33(6): 1640-1646.
- [9] Tan, Q., Zhu, Y., Xia Y., Xu, Z., Li, J., and Song J. (2013). "Influence of joint characteristics on rock fragmentation induced by TBM disc cutter [J]". Journal of Central South University: Science and Technology, 44(10): 4040-4046.
- [10] Liu, J. (2015). "Influence of confining stress on fracture characteristics and cutting efficiency of TBM cutters conducted on soft and hard rock". Journal of Central South University, 22(5): 1947-1955.
- [11] Liu, J., Wang, J., and Wan, W. (2017). "Numerical study of crack propagation in an indented rock specimen". Computers and Geotechnics, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.014>.
- [12] Liu, J. (2016). "The influence of confining stress on optimum spacing of TBM cutters for cutting granite". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 88: 165-174.