

مطالعه آزمایشگاهی و عددی تاثیر برنده U شکل بر درزه های ناممتد

وهاب سرفرازی*؛ شادمان محمدی بلبان آباد^۲

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۳۰ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۴

چکیده:

هدف این مقاله بررسی تاثیر فاصله داری درزه ناممتد از برنده U شکل بر مکانیزم رشد ترک می باشد. همچنین مطالعه اینکه با تغییر زاویه داری درزه ناممتد نسبت به افق و تعداد درزه ناممتد، مکانیزم رشد ترک چگونه تغییر می کند. به این منظور ۹ نمونه های با ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ حاوی درزه ناممتد ساخته شد. سه نمونه اول دارای یک درزه ناممتد با زاویه داری های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه، طول ۲ سانتی متر و فاصله درزه تا برنده U شکل ۲ سانتی متر می باشد. سه نمونه دوم دارای یک درزه ناممتد با زاویه داری های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه، طول ۲ سانتی متر و فاصله درزه تا برنده U شکل ۴ سانتی متر میباشد. سه نمونه سوم دارای دو درزه ناممتد با زاویه داری های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه که طول درزه های ناممتد ۲ سانتی متر و فاصله درزه ناممتد اول تا برنده U شکل ۲ سانتی متر و فاصله درزه ناممتد دوم از درزه ناممتد اول ۲ سانتی متر میباشد. نمونه ها با نرخ $0.1/0.1 \text{ mm/s}$ تحت آزمایش قرار گرفتند. همزمان با انجام مطالعات آزمایشگاهی، شبیه سازی عددی توسط نرم افزار FRANC2D نیز بر روی نمونه های حاوی درزه های ناممتد انجام شد. نتایج نشان می دهند که فاصله داری درزه ناممتد ا تا برنده U شکل، زاویه داری درزه ناممتد و تعداد درزه ناممتد تاثیر بسزایی بر مکانیزم رشد ترک دارد. همچنین نتایج نشان دادند که مود شکست و الگوی شکست نمونه های آزمایشگاهی و مدل های عددی مشابه می باشند.

کلمات کلیدی: برنده U شکل، زاویه درزه های ناممتد، تعداد درزه های ناممتد، فاصله داری درزه های ناممتد

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

۲. دانشجوی فوق لیسانس مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه:

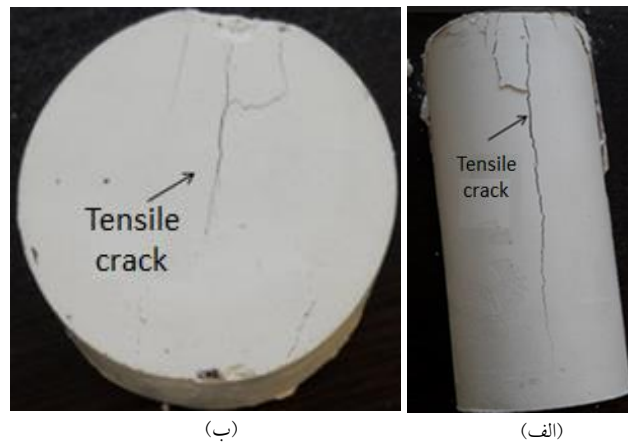
توان برشی دیسک برش دهنده را مطابق با الگوی توزیع درزه از جمله زوایای مختلف درزه، جهت داری های مختلف درزه و فواصل مختلف درزه داری در مدل‌های توده سنگ درزه دار با استفاده از نرم افزار PFC مطالعه نمودند. ژئونگ و همکاران (۲۰۱۳) طی مطالعه ای با استفاده از تست برش خطی به تخمین کارایی دیسک برش دهنده TBM در یک نمونه سنگ آنیزوتروپ پرداختند. سان و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از PFC2D فرایند خرد شدگی سنگ توسط دیسک برش دهنده TBM را شبیه سازی کردند. نتایج نشان دادند که فاصله داری بهینه دیسکها در سنگ های متفاوت با کاهش مقاومت سنگ افزایش می یابد. درزه های مجاور در سنگ فرایند رشد ترک را کنترل می کنند. بجاری و همکاران (۲۰۱۱) با بکارگیری نرم افزار عددی UDEC اثرات فاصله داری و جهت داری درزه ها بر نرخ نفوذ دیسک برش دهنده منفرد را بررسی کردند. بجاری و خادمی (۲۰۱۳) تاثیر فاصله داری و جهت داری درزه ها بر راندمان برشی TBM در توده سنگ درزه دار را بصورت عددی بررسی نمودند. هدف این مقاله، مطالعه آزمایشگاهی و عددی تاثیر برنده U شکل بر مکانیزم رشد ترک از درزه های ناممتد می باشد. به این ترتیب که با تغییر زاویه داری و محل درزه های ناممتد از برنده U شکل، مود و الگوی شکست مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲. مراحل انجام آزمون های آزمایشگاهی

۲-۱. تعیین خواص مکانیکی نمونه ها

برای ساخت نمونه ها، از ترکیب گچ و آب با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. آزمایش تک محوره و برزیلی روی نمونه های استوانه ای و دیسکی انجام گردید. نمونه های استوانه ای دارای قطر ۵۴ mm و ارتفاع ۱۰۸ mm می باشد. نمونه های دیسکی دارای قطر ۵۴ mm و ضخامت ۲۷ mm می باشد. شکل ۱-الف و ب شکست نمونه های تک محوره و برزیلی را نشان داده و جدول ۱ مقاومت فشاری و کششی نمونه ها را نشان می دهد.

امروزه بسیاری از حفاری های زیرزمینی با وسایل مکانیکی انجام می شوند. در این میان رایج ترین نوع حفاری مکانیکی در سنگ، استفاده از TBMها است که برای حفر تونل هایی با مقاطع دایره ای شکل به کار می روند. TBMها نسبت به تغییر شرایط زمین، انعطاف پذیری زیادی ندارند و عملکرد TBM نسبت به تغییر شرایطی مانند نوع سنگ، جریان آب زیرزمینی، وجود گسل و درزه و سایر ویژگی های ساختاری بسیار حساس است. بنابراین انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل باید با احتیاط انجام شود. گانگ در سال ۲۰۰۵ برای سنگ هایی با مقاومت فشاری تک محوری بین ۱۴۰ تا ۲۰۰ مگا پاسکال رابطه ی معکوسی بین میزان نفوذ کله حفار و مقاومت ماده سنگ به دست آورد. گانگ و همکاران در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ و گانگ و ژائو در سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ برای پیش بینی میزان نفوذ TBM مدل هایی را بر اساس کیفیت توده سنگ پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که با افزایش کیفیت توده سنگ، میزان نفوذ TBM کاهش می یابد. یاقیز در سال ۲۰۰۹ با مطالعه خواص سنگ سالم مانند مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و تردی سنگ و همچنین خصوصیات توده سنگ مانند جهت یابی و فاصله داری ناپیوستگی ها روابط خوبی را برای پیش بینی عملکرد TBMها ارائه کرد. فرخ و رستمی در سال ۲۰۰۹ تأثیر شرایط نامطلوب زمین شناسی بر عملکرد TBM را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش فشار زمین مچاله شونده، فشار بر روی سپر TBM افزایش یافته و میزان نفوذ و گشتاور کله حفار کاهش می یابد. گونگ و همکاران ۲۰۰۶ با استفاده از مدل سازی عددی UDEC اثر برنده TBM و فاصله داری درزه را مورد بررسی قرار دادند. گونگ و همکاران (۲۰۰۵) اثر جهت داری درزه را بر مکانیزم شکست سنگ تحت اثر برنده TBM بررسی نمودند. چوی و همکاران (۲۰۱۵) رفتار شکست سنگ را تحت اثر برنده TBM مطالعه نمودند. لی و همکاران (۲۰۰۹) تاثیر یک درزه را بر خردایش حاصل از تیغه TBM بررسی نمودند. لی و چویی (۲۰۱۱) در تحقیقی



شکل ۱. الف) شکست نمونه های تک محوره و ب) شکست نمونه برزیلی.

جدول ۱. مقاومت فشاری و کششی نمونه ها

| Compressive strength | Tensile strength |
|----------------------|------------------|
| 7.2 MPa | 1.3 MPa |

۲-۲. نحوه ساخت نمونه های حاوی درزه های ناممتد:

دقیقه، ورقه ی آلومینیومی از قالب خارج می شود. سپس پیچ های قالب باز شده و نمونه ها از قالب خارج می گردد. بعد از مدت ۱۵ روز، نمونه ها تحت بارگذاری قرار گرفته و نحوه ی شکست نمونه ها بررسی شده است. شکل ۲-۴ نمونه های حاوی درزه های ناممتد با زاویه داری های مختلف را نشان می دهد.

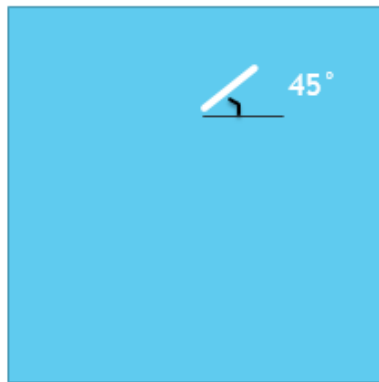
۲-۳. نحوه بارگذاری:

جهت انجام بارگذاری بر نمونه ها، نمونه ها داخل ماشین تک محوره قرار داده می شود سپس برنده U شکل بین نمونه و فک بالایی ماشین بارگذاری قرار گرفته می شود. به این ترتیب که شاخه های سیلندر U شکل با فک بالایی دستگاه در تماس می باشد و قسمت تحتانی سیلندر به نمونه متصل است (شکل ۵). نرخ بارگذاری ماشین (mm/s) ۰/۰۱ تنظیم می شود و الگوی شکست نمونه ها و مقاومت آنها مورد مطالعه قرار می گردد.

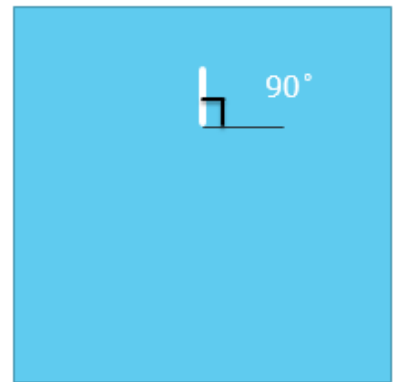
برای ساخت نمونه های حاوی درزه های ناممتد از ترکیب گچ و آب با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. مخلوط گچ و آب داخل قالب های مخصوص ریخته می شود. این قالب دارای ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ می باشد. جنس قالب ها از چوب فایبرگلاس ساخته شده است که آب جذب نمی کند و رطوبت باعث افزایش حجم قالب نمی گردد. یک عدد فیبر پلاستیکی مخصوص به ابعاد $5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ در داخل قالب قرار داده شد. سپس ورقه های آلومینیومی به ضخامت ۱ mm، عرض ۲ cm و ارتفاع ۱۲ cm با گریس چرب کرده و از یک طرف داخل فیبر پلاستیکی فرو رفته و از طرف دیگر به سطح آزاد ارتباط دارد. گریس روی تیغه ها از چسبیدن تیغه به گچ جلوگیری می کند. زاویه داری های این تیغه ها با افق ۰ درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه بوده و فاصله داری تیغه ها از بالای قالب ۲ cm و ۴ cm می باشد. بطورکلی نمونه های حاوی یک و دو عدد درزه ناممتد ساخته شد. بعد از ریخته شدن دوغاب گچ داخل قالب و سپری شدن ۱۵



(الف)



(ب)

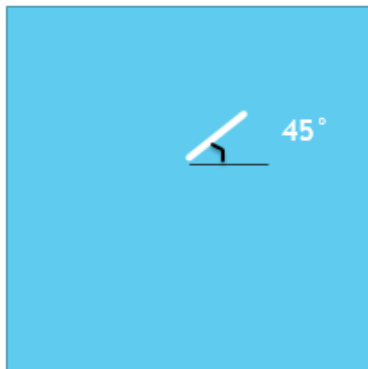


(ج)

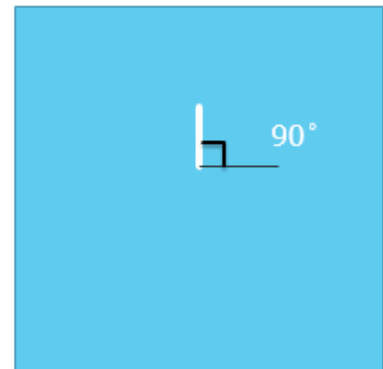
شکل ۲. ادرزه ناممتد با فاصله ۲ cm از برنده u شکل و زاویه داری الف) ۹۰ درجه، ب) ۴۵ درجه، ج) ۰ درجه.



(الف)



(ب)

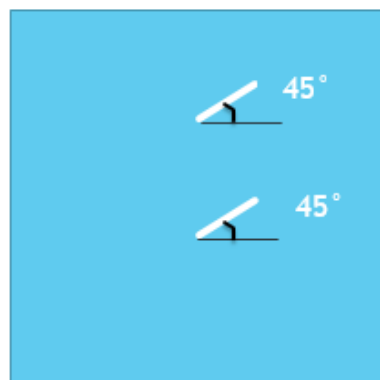


(ج)

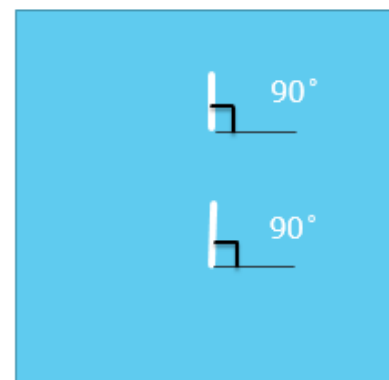
شکل ۳. ادرزه ناممتد با فاصله ۴ cm از برنده u شکل و زاویه داری الف) ۹۰ درجه، ب) ۴۵ درجه، ج) ۰ درجه.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. ادرزه ناممتد با فاصله ۲ cm از برنده u شکل و زاویه داری الف) ۹۰ درجه، ب) ۴۵ درجه، ج) ۰ درجه.



شکل ۵. ماشین تک محوره و نحوه ی بارگذاری نمونه ها.

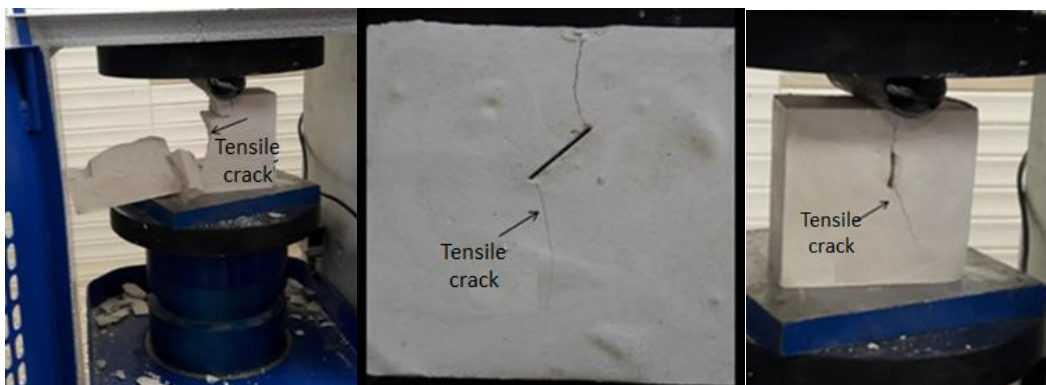
۳. نتایج آزمایش:

۳-۱. مکانیزم شکست نمونه ها:

شکل ۶ نحوه شکست نمونه های حاوی یک درزه های ناممتد را که در فاصله ۲cm از محل بارگذاری برنده u شکل قرار دارد، نشان می دهد. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۹۰ درجه است (شکل ۶-الف)، ترک بالایی از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. همچنین ترک کششی از دیواره پایینی درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند.

شکل ۷ نحوه شکست نمونه های حاوی یک درزه های ناممتد را که در فاصله ۴cm از محل بارگذاری برنده u شکل قرار دارد، نشان می دهد.

شکل ۶ نحوه شکست نمونه های حاوی یک درزه های ناممتد را که در فاصله ۲cm از محل بارگذاری برنده u شکل قرار دارد، نشان می دهد. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۹۰ درجه است (شکل ۶-الف)، ترک بالایی از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری گسترش پیدا می کند. ترک پایینی نیز از نوک پایینی درزه شروع شده و تقریباً با زاویه ۴۵ درجه از محور بارگذاری منتشر می شود. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۴۵ درجه است (شکل ۶-ب)، ترک های باله ای کششی از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. همچنین ترک کششی از نوک پایینی درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد

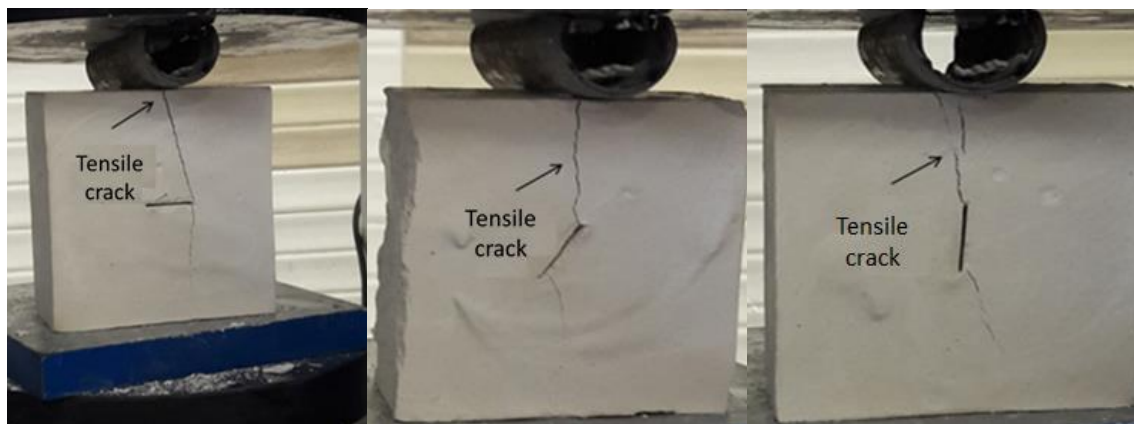


(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۶. الگوی شکست ۱ درزه ناممتد با فاصله ۲ cm از بالای قالب و زاویه داری الف) ۹۰ درجه، ب) ۴۵ درجه، ج) ۰ درجه.



(ج)

(ب)

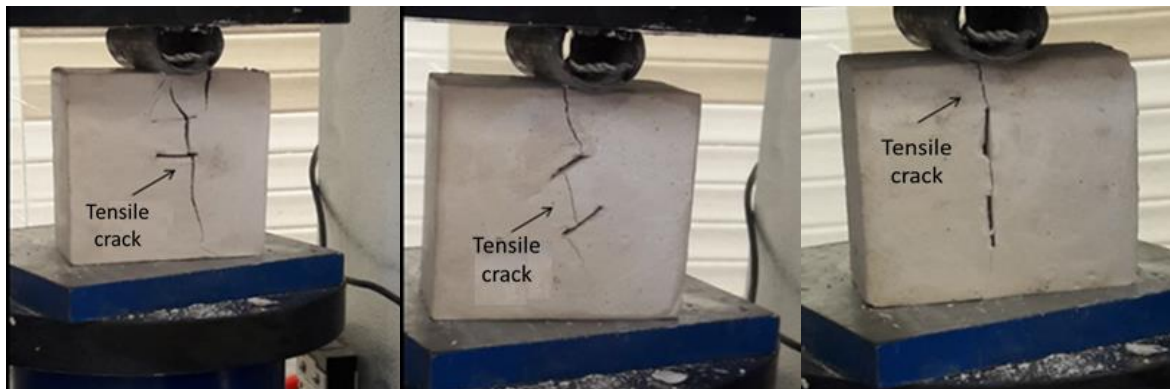
(الف)

شکل ۷. الگوی شکست ۱ درزه ناممتد با فاصله ۴ cm از بالای قالب و زاویه داری الف) ۹۰ درجه، ب) ۴۵ درجه، ج) ۰ درجه.

راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۰ درجه است (شکل ۷-ب)، ترک های باله ای کششی از محل اتصال سیلندر و گچ شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به نوک سمت راست درزه برخورد می کند. همچنین ترک کششی پایینی از نوک سمت راست درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند.

شکل ۸ نحوه شکست نمونه های حاوی دو درزه ناممتد را که درزه بالایی در فاصله ۲cm از محل بارگذاری برنده u شکل قرار دارد، نشان می دهد.

زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۹۰ درجه است (شکل ۷-الف)، ترک باله ای از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری گسترش پیدا می کند تا به محل اتصال سیلندر و گچ متصل می شود. ترک پایینی نیز از نوک پایینی درزه شروع شده و تقریباً با زاویه ۲۵ درجه از محور بارگذاری منتشر می شود و سرانجام به لبه پایینی نمونه متصل می شود. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۴۵ درجه است (شکل ۷-ب)، ترک های باله ای کششی از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. همچنین ترک کششی از نوک پایینی درزه شروع شده و در



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۸. الگوی شکست ۲ درزه ناممتد با فاصله ۲ cm از بالای قالب و زاویه داری (الف) ۹۰ درجه، (ب) ۴۵ درجه، (ج) ۰ درجه.

زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۹۰ درجه است (شکل ۸-الف)، ترک باله ای از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری گسترش پیدا می کند تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و گچ متصل می شود. یک ترک کششی در محدوده پل سنگ بین دو درزه ایجاد می شود. ترک کششی پایینی نیز از نوک پایینی درزه شروع شده و تقریباً با زاویه ۱۵ درجه از محور بارگذاری منتشر می شود. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۴۵ درجه است (شکل ۸-ب)، ترک های باله ای کششی از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. یک ترک کششی در محدوده پل سنگ بین دو درزه ایجاد می شود. همچنین ترک کششی از نوک پایینی درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۰ درجه است (شکل ۸-ج)، ترک های باله ای کششی از دیواره بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. یک ترک کششی در محدوده پل سنگ بین دو درزه ایجاد می شود. همچنین ترک کششی از دیواره پایینی درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند.

۳-۲. تأثیر درزه های ناممتد بر مقاومت فشاری نمونه:

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه ها، نیروی شکست به سطح مقطع نمونه ها یعنی $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ تقسیم شده است. ۳-۲-۱. تعداد درزه های ناممتد ۱ عدد با فاصله ۲ cm از بالای قالب:

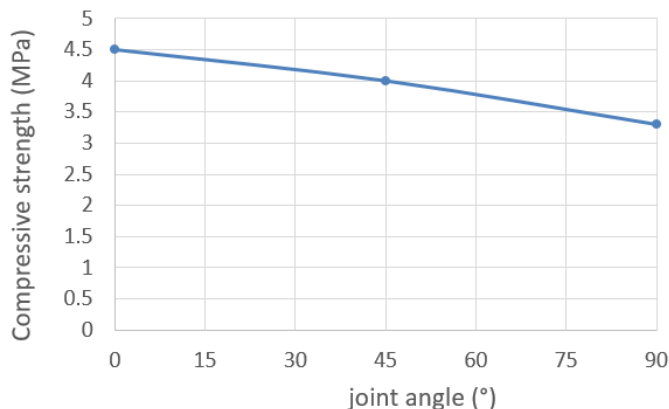
شکل ۹ تأثیر زاویه داری ۱ درزه ناممتد را بر مقاومت فشاری نمونه ها نشان می دهد. فاصله درزه ناممتد از بالای قالب ۲cm می باشد. با افزایش زاویه داری درزه ناممتد از ۰ به ۹۰ درجه مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد. دلیل این مهم را می توان در رشد ترک های کششی یافت بگونه ای که در زاویه داری ۹۰ درجه رشد ترک کششی در تنش کمتری اتفاق می افتد.

۳-۲-۲. تعداد درزه های ناممتد ۱ عدد با فاصله ۲ cm از بالای قالب

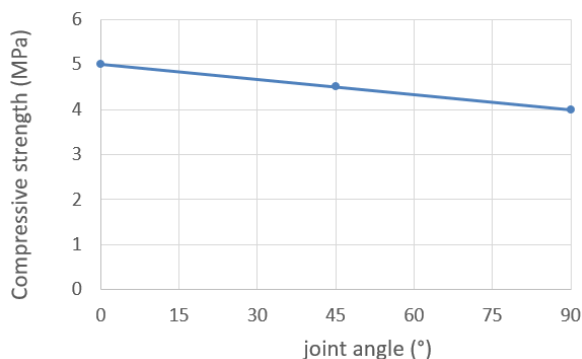
شکل ۱۰ تأثیر زاویه داری ۱ درزه ناممتد را بر مقاومت فشاری نمونه ها نشان می دهد. فاصله درزه ناممتد از بالای قالب ۴cm می باشد. با افزایش زاویه داری درزه ناممتد از ۰ به ۹۰ درجه مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد. دلیل این مهم را می توان در رشد ترک های کششی یافت بگونه ای که در زاویه داری ۹۰ درجه رشد ترک کششی در تنش کمتری اتفاق می افتد و شکست شکافته در نمونه رخ می

برنده u شکل بر درزه ناممتد دانست که منجر به افزایش مقاومت می گردد.

دهد. با مقایسه شکل ۹ و شکل ۱۰ می توان دریافت که با افزایش فاصله درزه ناممتد از بالای قالب مقاومت نمونه افزایش می یابد. دلیل این مهم را می توان در کاهش اثر بار



شکل ۹. تاثیر زاویه داری ۱ درزه تاممتد بر مقاومت فشاری نمونه ها؛ فاصله درزه ناممتد از بالای قالب ۲cm می باشد.



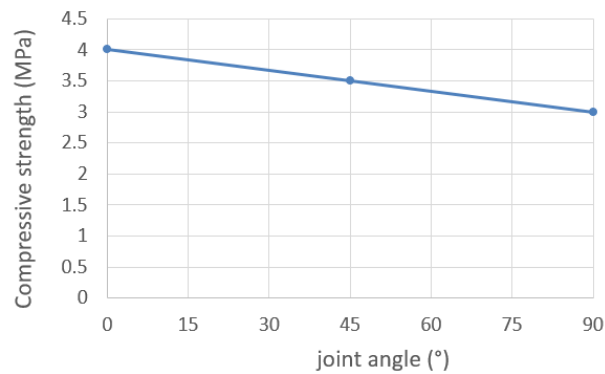
شکل ۱۰. تاثیر زاویه داری ۱ درزه تاممتد بر مقاومت فشاری نمونه ها؛ فاصله درزه ناممتد از بالای قالب ۴cm می باشد.

۳-۲-۳. تعداد درزه های ناممتد ۲ عدد با فاصله ۲ cm از

بالای قالب

تنش کمتری اتفاق می افتد و شکست شکافنده در نمونه رخ می دهد. با مقایسه شکل ۶ و شکل ۴ می توان دریافت که با افزایش تعداد درزه ناممتد، مقاومت نمونه کاهش می یابد. دلیل این مهم را می توان در افزایش تعداد درزه ناممتد دانست که منجر به افزایش تعداد ترک های کششی و کاهش مقاومت نمونه می گردد.

شکل ۱۱ تاثیر زاویه داری ۲ درزه تاممتد را بر مقاومت فشاری نمونه ها نشان می دهد. فاصله درزه ناممتد بالایی از راس قالب ۲cm می باشد. با افزایش زاویه داری درزه ناممتد از ۰ به ۹۰ درجه مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد. دلیل این مهم را می توان در رشد ترک های کششی یافت گونه ای که در زاویه داری ۹۰ درجه رشد ترک کششی در



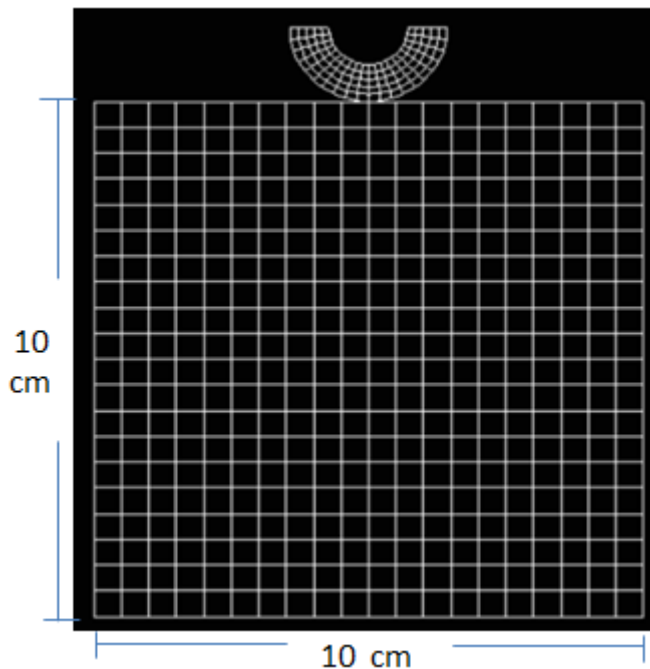
شکل ۱۱. تاثیر زاویه داری ۲ درزه ناممتد بر مقاومت فشاری نمونه ها؛ فاصله درزه ناممتد بالایی از راس نمونه ۲cm می باشد.

۴. مدل سازی عددی

۴-۱. نرم افزار FRANC2D

تحلیل نمود. به منظور ایجاد ترک در مدل، بایستی بعد از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، ترک را با زاویه داری و طول مورد نظر در مدل ایجاد نمود. ضریب شدت تنش در نوک ترک به روش های مختلف از جمله روش انتگرال I ، روش انرژی و ... محاسبه نمود. دستگاه مختصات بکار رفته در این نرم افزار همواره ثابت است بطوریکه محورهای مختصات u و x افقی و به سمت راست افزایش می یابند و محورهای مختصات v و y عمودی و به سمت بالا افزایش می یابند. ۴-۲. نحوه مدل سازی: برای شروع کار با نرم افزار FRANC2D ابتدا باید قطعه مورد نظر را در نرم افزار CASCA مدل کرد. به این ترتیب یک مدل مربعی با ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ساخته شد. یک سیلندر توخالی نیز در بالای مدل جایگذاری گردید که وظیفه اعمال بار (برنده) را در نرم افزار FRANC بر عهده دارد. قطر خارجی این سیلندر 2 cm و قطر داخلی آن 1 cm می باشد. بعد از ساخت هندسه اولیه نمونه، نمونه را قطاع بندی کرده و با مش چهارگره ای مش بندی انجام می شود (شکل ۱۲).

نرم افزار FRANC2D یک نرم افزار المان محدود برای شبیه سازی رشد و گسترش ترک می باشد. این نرم افزار در دانشگاه کرنل آمریکا طراحی و توسعه یافته است. قابلیت لایه بندی در این نرم افزار در دانشگاه کانساس تکمیل گردید. محاسبات مکانیک شکست که در نرم افزار فرنیک انجام می شود از مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی دو بعدی LEFM بهره می برند. برای استفاده از این نرم افزار بایستی یک فایل با پسوند `inp` در نرم افزار CASCA ساخته شود. مدل سازی در CASCA شامل ساخت قطعه مورد نظر و مش بندی می باشد. مدل ذخیره شده در CASCA ورودی نرم افزار FRANC2D می باشد. در FRANC2D بایستی ضریب الاستیسیته، چکالی، نسبت پواسون، چقرمگی شکست مود I را برای مدل تعریف نمود. وقتی قطعه مورد نظر وارد نرم افزار فرنیک شد، شرایط مرزی شامل ثابت شدن گره ها در راستای محورهای مختصات و اعمال بارگذاری در مدل اجرا می شود. در نهایت آنالیز را انجام داده و در پایان از آنالیز نمودار گرفته می شود. این نرم افزار بیشترین استفاده را در صفحات دارد. همچنین می توان صفحات حفره دار و ترک دار را طراحی و



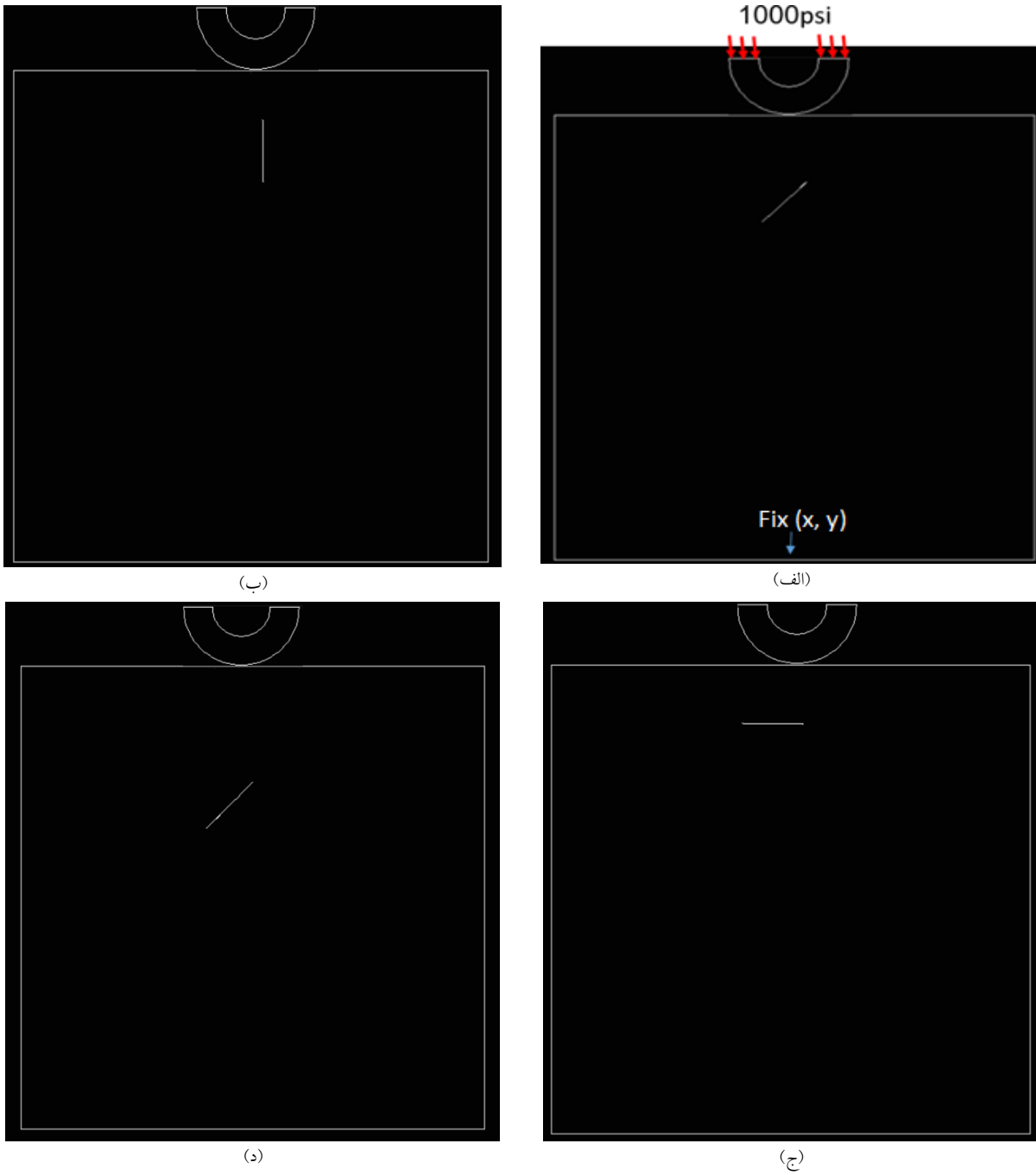
شکل ۱۲. هندسه نمونه آماده سازی شده در CASCA.

شود. مشخصات جسم (جدول ۲)، قید بندی و بارگذاری روی قطعه انجام می شود. ضلع پایینی نمونه در راستای x و y بسته می شود و نیروی ۱۰۰۰ PSI به مدل اعمال می گردد (شکل ۱۳-الف). بعد از اعمال بارگذاری، درزه ها با هندسه مشابه نمونه های آزمایشگاهی درون مدل تعریف می شوند و رشد آنها مورد مطالعه قرار می گیرد (شکل ۱۴).

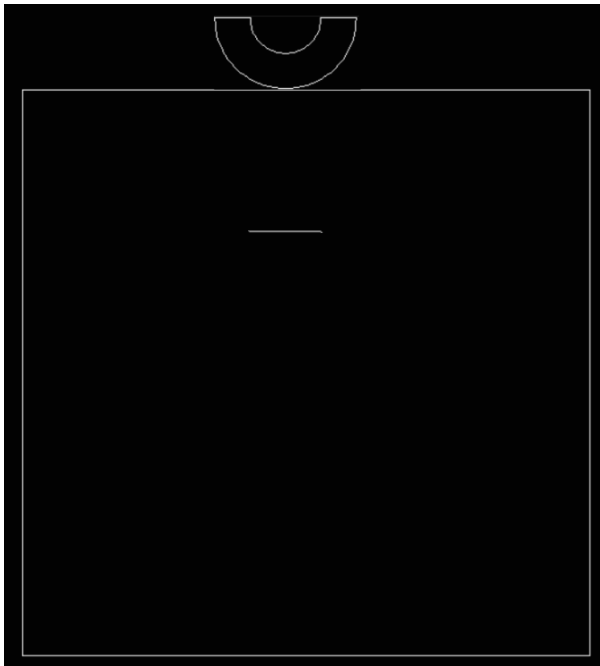
این فایل با پسوند inp برای شروع کار FRANC ذخیره می شود. همچنین می توان یک فایل خروجی با پسوند CSC برای CASCA ذخیره نمود که در صورت نیاز به CASCA برگشته و تغییراتی روی مدل ایجاد کرد. در این قسمت کار با نرم افزار CASCA به پایان می رسد. فایل مورد نظر را در نرم افزار FRANC فراخوانی کرده و در ادامه کار تحلیل انجام می

جدول ۲. خصوصیات مکانیکی مدل عددی

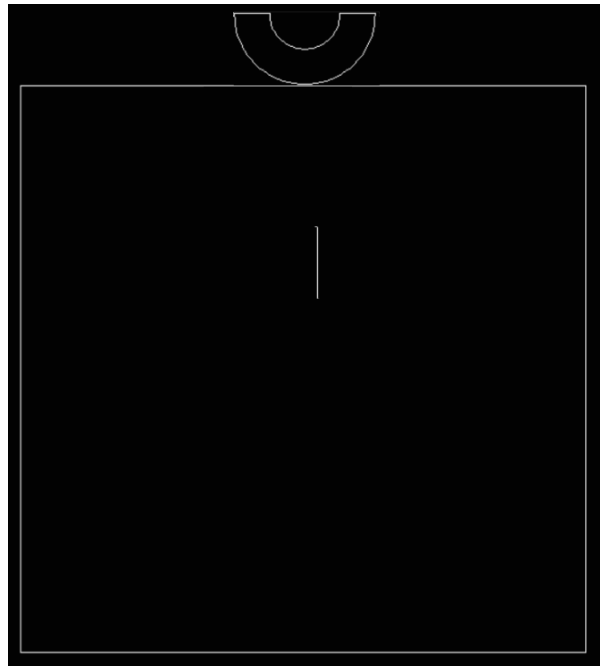
| Mechanical properties | Young modulus (GPa) | Poisson ratio | Density (kg/m ³) | Tensile fracture toughness (MPa√m) |
|-----------------------|---------------------|---------------|------------------------------|------------------------------------|
| value | 50 | 0.2 | 3500 | 0.8 |



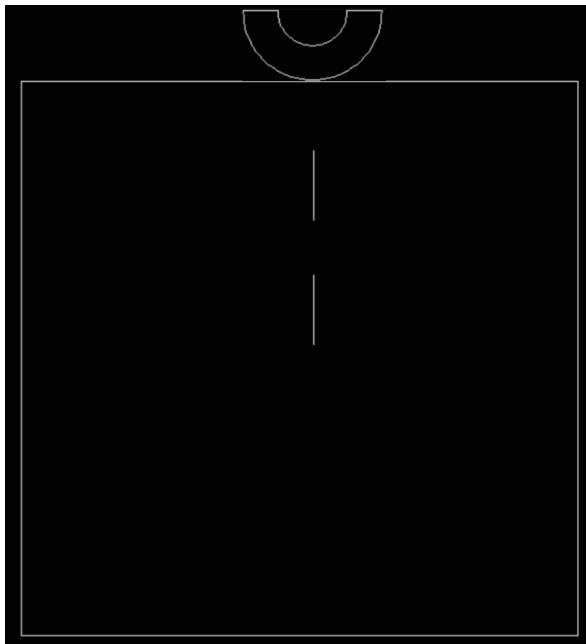
شکل ۱۳. مدل های عددی حاوی درزه های ناممتد.



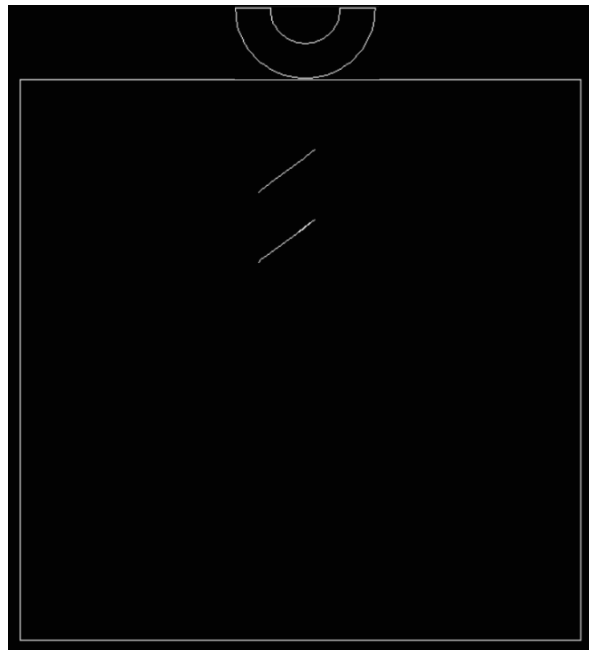
(ب)



(ج)

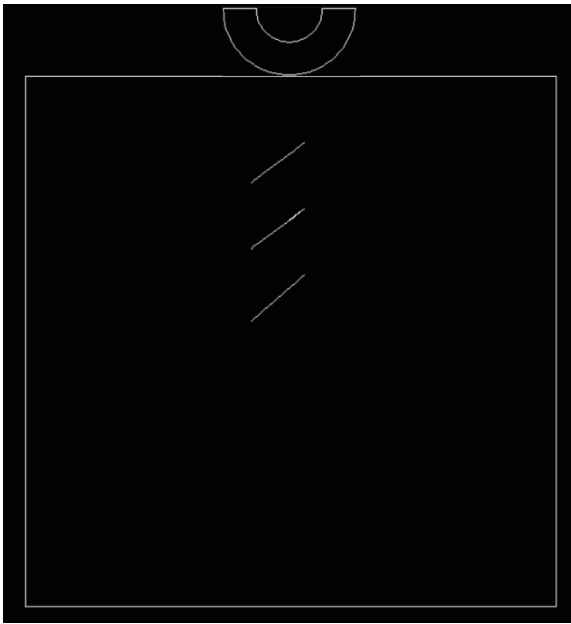


(د)

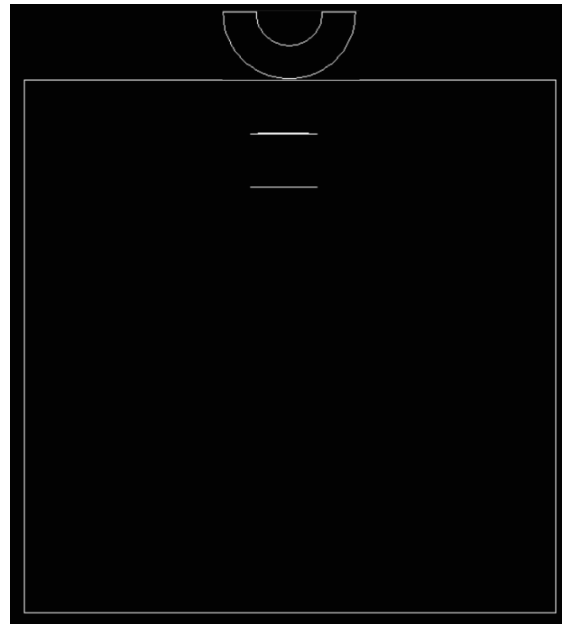


(ه)

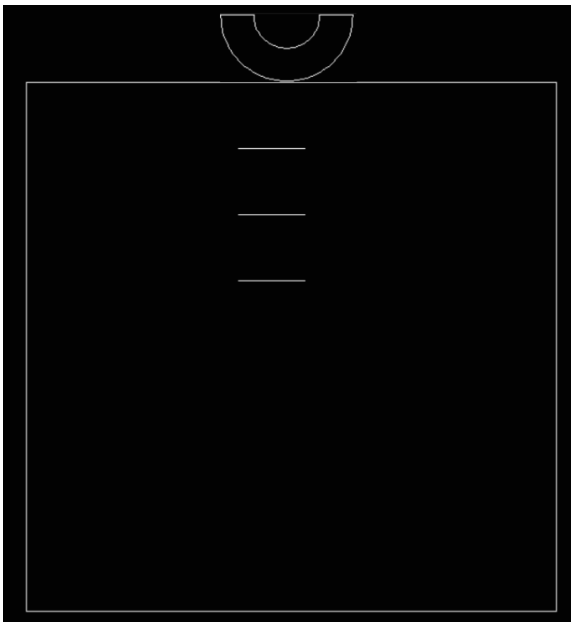
ادامه شکل ۱۳. مدل های عددی حاوی درزه های ناممتمد.



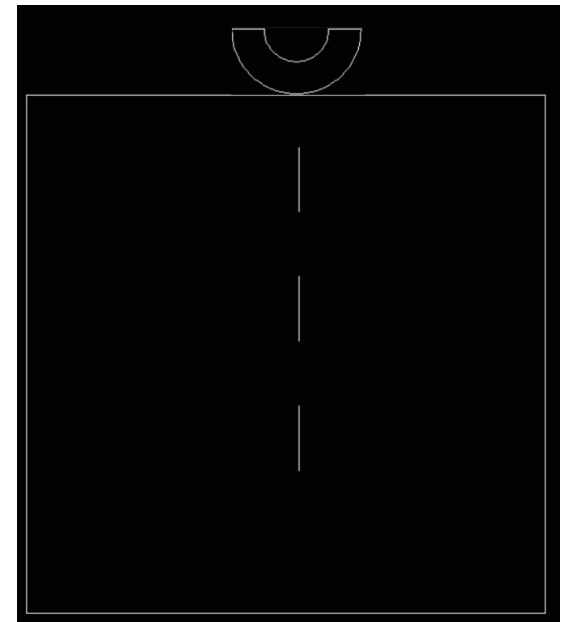
(ی)



(ط)



(ج)



(ک)

ادامه شکل ۱۳. مدل های عددی حاوی درزه های ناممتد.

۳-۴- الگوی شکست مدل های عددی:

بار متصل می شود. دلیل این موضوع نزدیکی ترک بالایی به محل اعمال بار می باشد. زمانیکه یک درزه با زاویه ۹۰ درجه ۲ cm زیر برنده U شکل قرار دارد (شکل ۱۴-ب)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک بالایی بیشتر از ترک پایینی بوده و به محل

شکل ۱۴ الگوی شکست مدل های عددی را نشان می دهد. زمانیکه یک درزه با زاویه ۴۵ درجه ۲cm زیر برنده U شکل قرار دارد (شکل ۱۴-الف)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک بالایی بیشتر از ترک پایینی بوده و به محل اعمال

منتشر شده از درزه بالایی از یک طرف به محل اعمال بار برخورد کرده و از طرف دیگر به درزه پایینی نزدیک می شود (شکل ۱۴-ز). دو ترک نیز از نوک های درزه پایینی ایجاد شده که از یکطرف بطرف درزه بالایی و از طرف دیگر درون جسم پیشروی می کند.

زمانیکه دو درزه موازی با زاویه ۹۰ درجه که ۲ cm بطور قائم از یکدیگر فاصله دارند، ۲cm زیر برنده U شکل قرار گیرند (شکل ۱۴-ح)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک از درزه بالایی بیشتر از طول رشد ترک از درزه پایینی می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های منتشر شده از درزه بالایی از یک طرف به محل اعمال بار برخورد کرده و از طرف دیگر به درزه پایینی نزدیک می شود (شکل ۱۴-ج). یک ترک نیز از نوک بالایی درزه پایینی ایجاد شده و بطرف درزه بالایی پیشروی می کند.

زمانیکه دو درزه موازی با زاویه صفر درجه که ۲ cm از یکدیگر فاصله دارند، ۲cm زیر برنده U شکل قرار گیرند (شکل ۱۴-ط)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک از درزه بالایی بیشتر از طول رشد ترک از درزه پایینی می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های منتشر شده از درزه بالایی از یک طرف به محل اعمال بار برخورد کرده و از طرف دیگر به درزه پایینی نزدیک می شود (شکل ۱۴-ط). دو ترک نیز از نوک های درزه پایینی ایجاد شده که از یکطرف بطرف درزه بالایی و از طرف دیگر درون جسم پیشروی می کند.

زمانیکه سه درزه موازی با زاویه ۴۵ درجه که ۲ cm از یکدیگر فاصله دارند، ۲cm زیر برنده U شکل قرار گیرند (شکل ۱۴-ی)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک از درزه بالایی بیشتر از طول رشد ترک از درزه پایینی می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های

اعمال بار متصل می شود که دلیل این موضوع نزدیکی ترک بالایی به محل اعمال بار می باشد.

زمانیکه یک درزه با زاویه ۰/۰ درجه ۲ cm زیر برنده U شکل قرار دارد (شکل ۱۴-ج)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند و در درون جسم متوقف می شوند. طول رشد ترکها تقریباً یکسان می باشد.

زمانیکه یک درزه با زاویه ۴۵ درجه ۴cm زیر برنده U شکل قرار دارد (شکل ۱۴-د)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک بالایی بیشتر از ترک پایینی بوده و به محل اعمال بار متصل می شود که دلیل این موضوع نزدیکی ترک بالایی به محل اعمال بار می باشد.

زمانیکه یک درزه با زاویه ۹۰ درجه ۴cm زیر برنده U شکل قرار دارد (شکل ۱۴-ه)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک بالایی بیشتر از ترک پایینی بوده و به محل اعمال بار متصل می شود که دلیل این موضوع نزدیکی ترک بالایی به محل اعمال بار می باشد.

زمانیکه یک درزه با زاویه صفر درجه ۴cm زیر برنده U شکل قرار دارد (شکل ۱۴-و)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند و در درون جسم متوقف می شوند. طول رشد ترکها ناچیز می باشد و به عبارت دیگر طول رشد ترک ها کمتر از زمانی است که درزه در فاصله ۲ cm از محل اعمال بار قرار دارد (شکل ۱۴-ج)

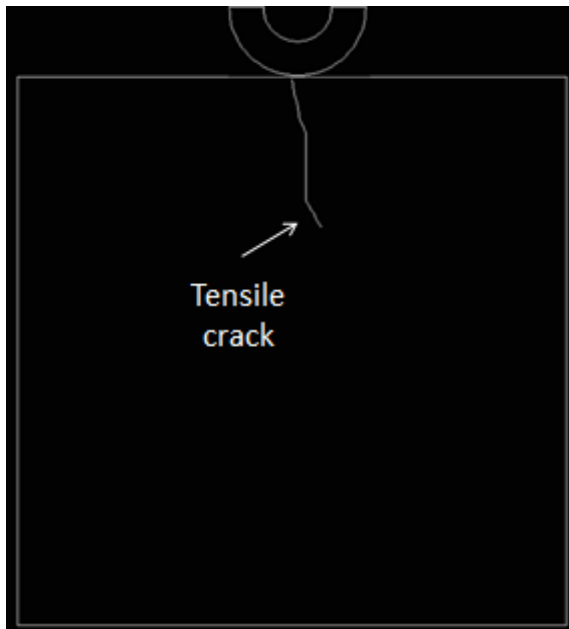
زمانیکه دو درزه موازی با زاویه ۴۵ درجه که ۲ cm از یکدیگر فاصله دارند، ۲cm زیر برنده U شکل قرار گیرند (شکل ۱۴-ز)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک از درزه بالایی بیشتر از طول رشد ترک از درزه پایینی می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های

شده و بطرف درزه بالایی پیشروی می کند. لازم به ذکر است که هیچگونه رشد ترکی از درزه سوم که در دورترین قسمت از محل اعمال بار وجود دارد رخ نمی دهد.

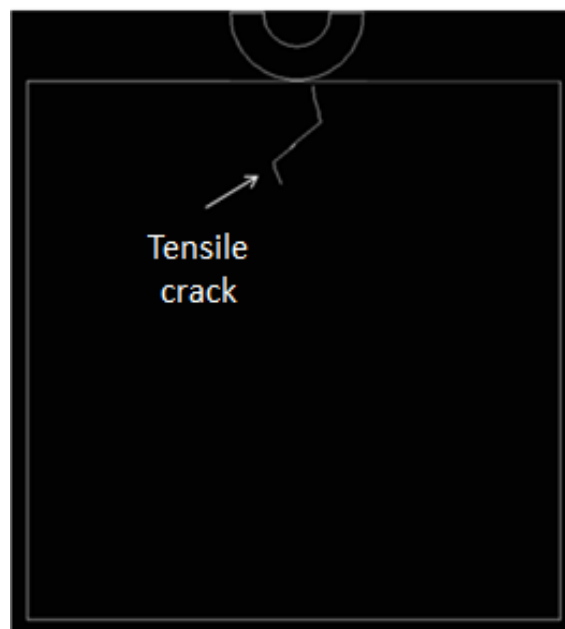
زمانیکه سه درزه موازی با زاویه صفر درجه که ۲ cm از یکدیگر فاصله دارند، ۲cm زیر برنده U شکل قرار گیرند (شکل ۱۴-ل)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک از درزه بالایی بیشتر از طول رشد ترک از درزه هایی پایینی می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های منتشر شده از درزه بالایی از یک طرف به محل اعمال بار برخورد کرده و از طرف دیگر به درزه پایینی نزدیک می شود (شکل ۱۴-ل). دو ترک نیز از نوک های درزه میانی ایجاد شده که از یکطرف بطرف درزه بالایی و از طرف دیگر بطرف درزه پایینی پیشروی می کند. دو ترک نیز از نوک های درزه پایینی ایجاد شده که از یکطرف بطرف درزه میانی و از طرف دیگر درون جسم پیشروی می کند.

می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های منتشر شده از درزه بالایی از یک طرف به محل اعمال بار برخورد کرده و از طرف دیگر به درزه پایینی نزدیک می شود (شکل ۱۴-س). لازم به ذکر است که هیچگونه رشد ترکی از درزه سوم که در دورترین قسمت از محل اعمال بار وجود دارد رخ نمی دهد.

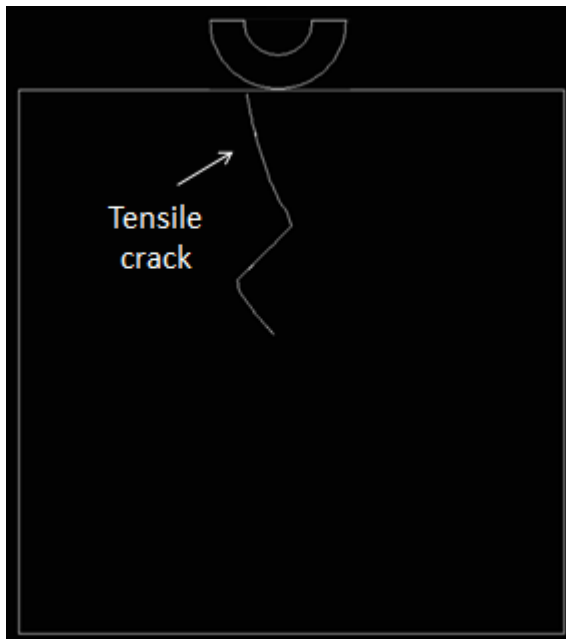
زمانیکه سه درزه موازی با زاویه ۹۰ درجه که ۲ cm بطور قائم از یکدیگر فاصله دارند، ۲cm زیر برنده U شکل قرار گیرند (شکل ۱۴-ک)، ترکهای کششی از نوکهای درزه رشد کرده و بموازات محور بارگذاری پیشروی می کنند. طول رشد ترک از درزه بالایی بیشتر از طول رشد ترک از درزه پایینی می باشد چراکه درزه بالایی به محل اعمال بار نزدیکتر بوده و شدت تنش در نوک درزه بالایی بیشتر می باشد. ترک های منتشر شده از درزه بالایی از یک طرف به محل اعمال بار برخورد کرده و از طرف دیگر به درزه پایینی نزدیک می شود (شکل ۱۴-ک). یک ترک نیز از نوک بالایی درزه دوم ایجاد



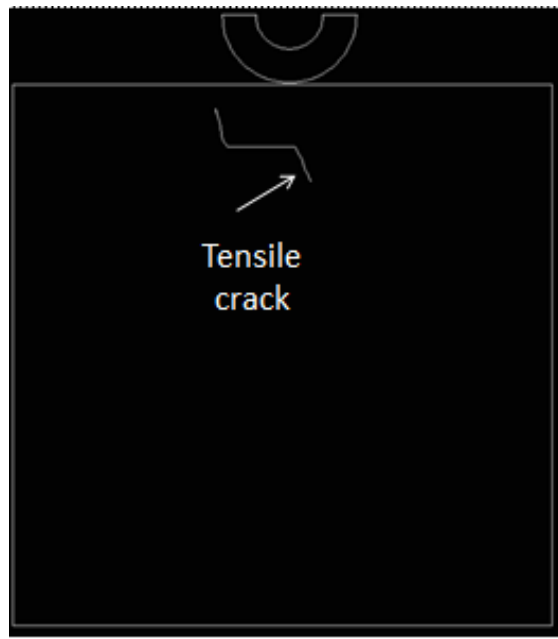
(ب)



(الف)

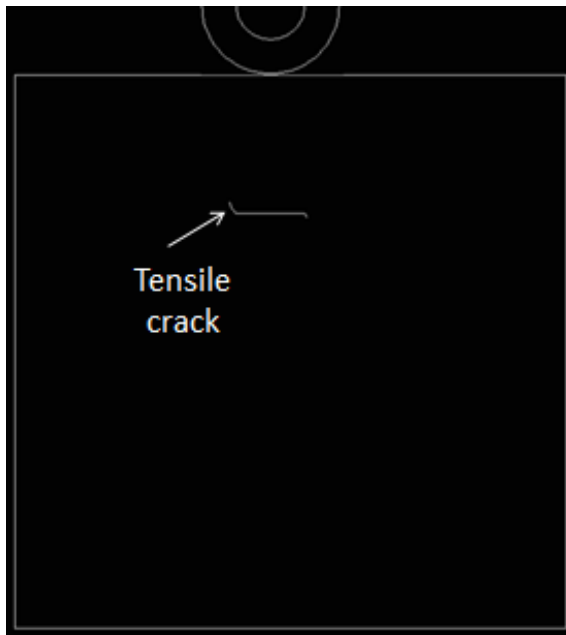


(د)

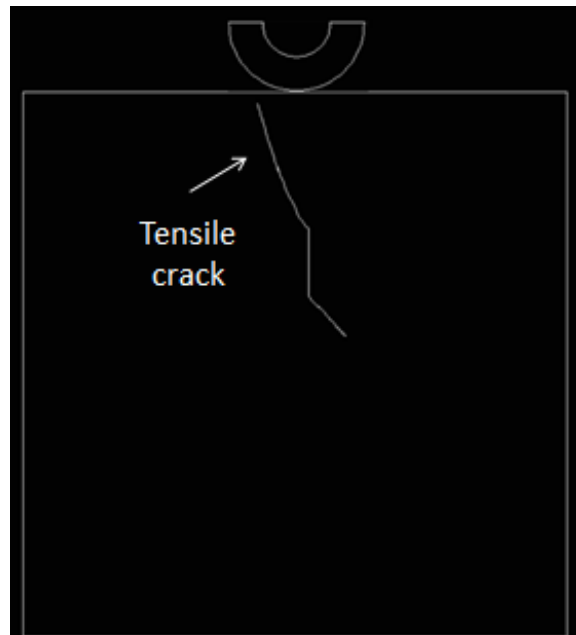


(ج)

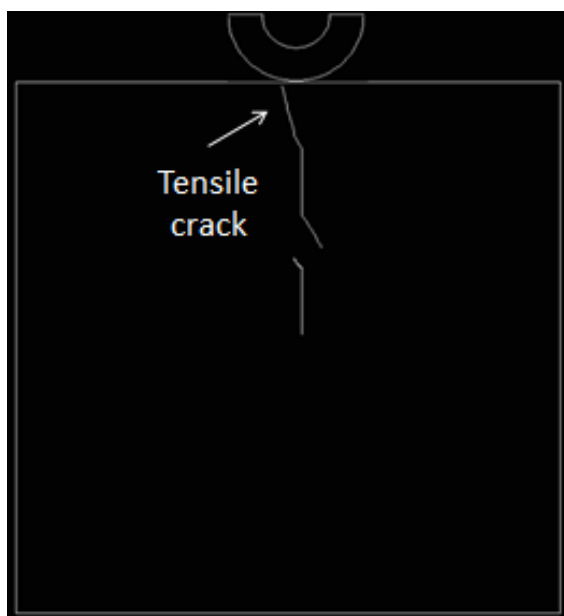
شکل ۱۴. الگوی شکست مدل های عددی.



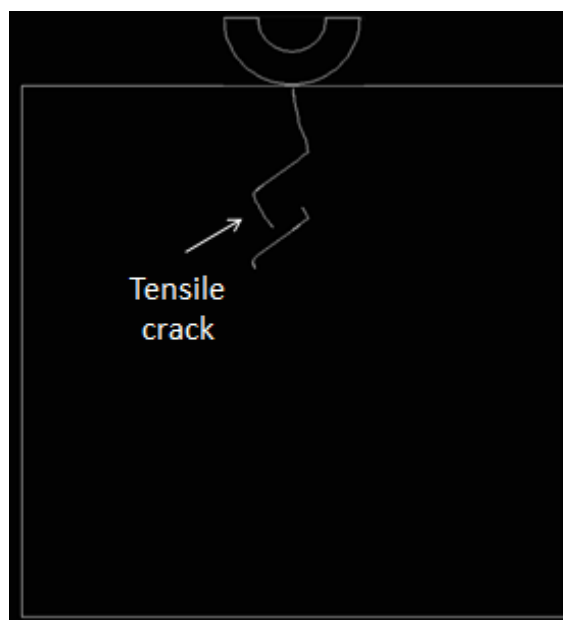
(ز)



(ه)

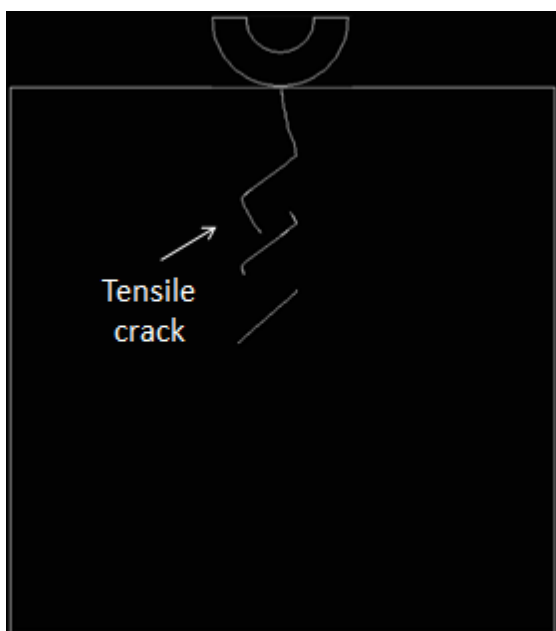


(ح)

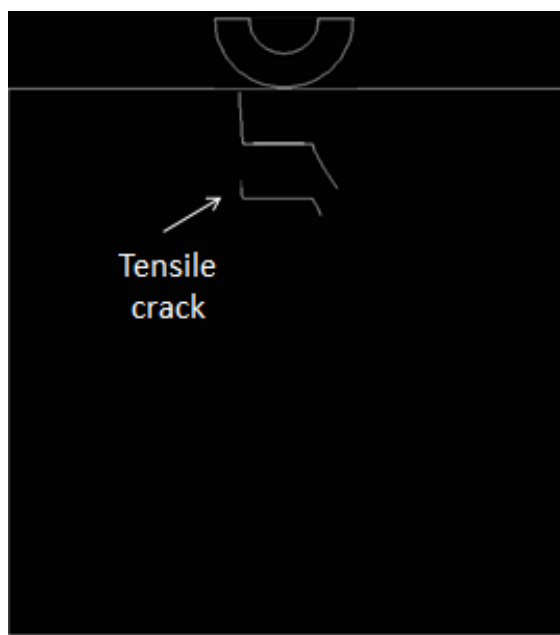


(ز)

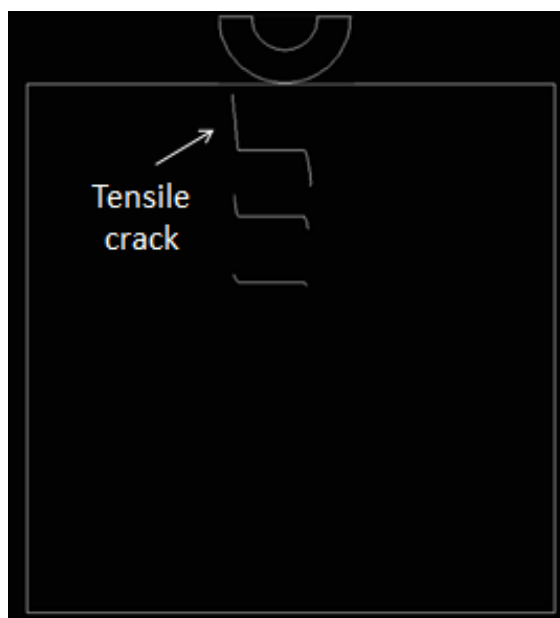
ادامه شکل ۱۴. الگوی شکست مدل های عددی.



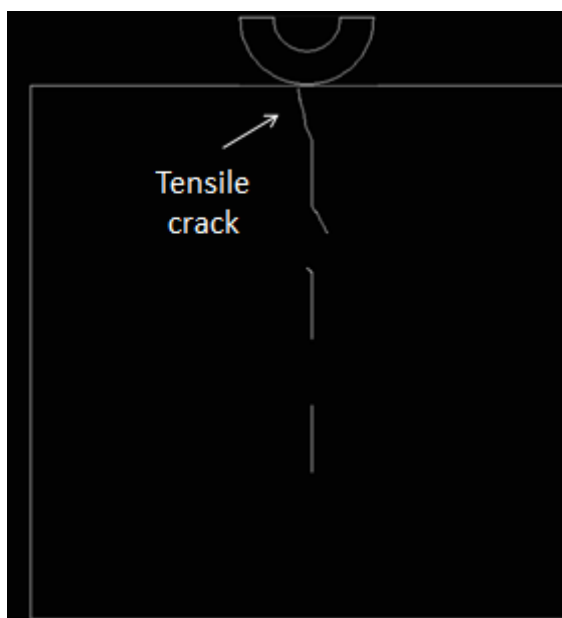
(ی)



(ط)



(ج)



(ک)

ادامه شکل ۱۴. الگوی شکست مدل های عددی.

راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. همچنین ترک کششی از دیواره پایینی درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند.

۲- زمانیکه یک درزه در فاصله ۴ cm از محل اعمال برنده u شکل قرار دارد، مود و الگوی شکست مشابه حالت فوق می باشد.

۳- در آرایش دو درزه ناممتد که درزه بالایی در فاصله ۲ cm از محل اعمال برنده u شکل قرار دارد، مود و الگوی شکست مشابه حالت فوق می باشد با این تفاوت که یک ترک کششی در ناحیه پل سنگ بین دو درزه ایجاد می گردد.

۴- با افزایش زاویه داری درزه از ۰ تا ۹۰ درجه، مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد.

۵- با افزایش تعداد درزه ناممتد، مقاومت نمونه کاهش می یابد. دلیل این مهم را می توان در افزایش تعداد درزه ناممتد دانست که منجر به افزایش تعداد ترک های کششی و کاهش مقاومت نمونه می گردد. ۶- مود شکست و الگوی رشد ترک در نمونه های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی تقریباً یکسان می باشد.

با مقایسه شکل های ۶-۸ و شکل ۱۴ می توان دریافت که مود شکست و الگوی رشد ترک در نمونه های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی تقریباً یکسان می باشد.

۵. نتیجه گیری:

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهند که:

۱- زمانیکه یک درزه در فاصله ۲ cm از محل اعمال برنده u شکل قرار دارد و زاویه داری درزه ناممتد ۹۰ درجه است، ترک باله ای از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری گسترش پیدا می کند. ترک پایینی نیز از نوک پایینی درزه شروع شده و تقریباً با زاویه ۴۵ درجه از محور بارگذاری منتشر می شود. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۴۵ درجه است، ترک های باله ای کششی از نوک بالایی درزه شروع شده و در راستای محور بارگذاری منتشر می شود تا سرانجام به محل اتصال سیلندر و نمونه برخورد می کند. همچنین ترک کششی از نوک پایینی درزه شروع شده و در راستای اعمال بار رشد کرده و به لبه پایینی نمونه برخورد می کند. زمانیکه زاویه داری درزه ناممتد ۰ درجه است، ترک های باله ای کششی از دیواره بالایی درزه شروع شده و در

منابع:

- Bejari, Hadi, 2013. Simultaneous effects of joint spacing and orientation on TBM cutting efficiency in jointed rock masses. *Rock Mech. Rock Eng.* 46, 897–907
- Bejari, H., Kakaie, R., Ataei, M., 2011. Simultaneous effects of joint spacing and joint orientation on the penetration rate of a single disc cutter. *Min. Sci. Technol.* 21 (4), 507–512
- Balci, C., Tumac, D., 2012. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 30, 183–193
- Chen, L., Liu, J., Wang, C., Liu, J., Su, R., Wang, J., 2014. Characterization of damage evolution in granite under compressive stress condition and its effect on permeability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 71, 340–349
- Cho, J.W., Jeon, S., 2010. Optimum spacing of TBM disc cutters: a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 25, 230–244
- Cho, J.W., Jeon, S., 2013. Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 35, 37–54
- Choi, S.O., Lee, S.J., 2014. Three-dimensional numerical analysis of the rock-cutting behavior of a disc cutter using particle flow code. *KSCE J. Civ. Eng.* 19, 1129–1138
- Choi, S. O. and Lee, S. J, 2015. “Three-Dimensional Numerical Analysis of the Rock-Cutting Behavior of a Disc Cutter using Particle Flow Code”, *KSCE Journal of Civil Engineering* (2015) 19(4):1129-1138.
- Gong, Q.M., Zhao, J., 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.
- 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.
- Hu, B., Zhang, N., Wang, S.J., Chen, J.S., 2011. Model test and strength analysis research on intermittent joint rock mass. *Chin. J. Undergr. Space Eng.* 7 (4), 657–665
- Innaurato, N., Oggeri, C., Oreste, P.P., Vinai, R., 2011. Laboratory tests to study the influence of rock stress confinement on the performances of TBM discs in tunnels. *Int. J. Min. Met. Mater.* 18 (3), 253–259
- Jeong, H.Y., 2013. A numerical study on rock cutting by a TBM disc cutter using SPH code. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15(3). pp. 345-356.
- Lee, S.J., Choi, S.O., 2011. Numerical Analysis on Cutting Power of Disc Cutter with Joint Distribution Patterns. *Journal of Korean Society for Rock Mechanics, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 21, No. 3, pp. 151-163.
- Lee, Seung-Joong. Choi, Sung O. 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, 2009, pp. 440-449.
- SUN, J.S., 2011. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters. *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 32. No. 6. pp. 1891-1897.
- Tumac, D., Balci, C., 2015. Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 45, 84–98
- Tuncdemir, H., Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2008. Control of rock cutting efficiency by muck size. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45, 278–288
- Xiao, N., Zhou, X., Gong, Q., 2017. The modelling of rock breakage process by TBM rolling cutters using 3D FEM-SPH coupled method. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 61, 90–103
- Yang, H., Wang, H., Zhou, X., 2015. Analysis on the rock-cutter interaction mechanism during the TBM tunneling process. *Rock Mech. Rock Eng.* 49, 1073–1090
- Yang, K., Xia, Y.M., Wu, Y., 2014. Studies on rock-breaking of positive disc cutter and edge disc cutter. *Appl. Mech. Mater.* 508, 159–164
- Zhang, Z., Meng, L., Sun, F., 2014. Wear analysis of disc cutters of full face rock tunnel boring machine. *Chin. J. Mech. Eng.* 27, 1294–1300.