



## مطالعه آزمایشگاهی رشد ترک در نمونه‌های دیسکی برزلی ترکی‌دار و بررسی تاثیر شیب ترک در رفتار شکست آن

حسین میرزائی نصیرآباد<sup>۱</sup>، محمود شریعتی<sup>۲</sup>، رضا کاکایی<sup>۳</sup> و سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۴</sup>

### چکیده

محیط‌های سنگی عموماً حاوی ترک‌های متعددی بوده و در اکثر موارد این ترک‌ها رفتار مکانیکی آن را کنترل می‌کنند. در فرآیند رشد ترک، اطلاع از میزان بار منجر به انشعاب ترک، زاویه انشعاب ترک، نوع مود رشد ترک ضروری می‌باشد. شیب ترک تاثیر قابل توجهی در رفتار شکست محیط ترکی‌دار دارد. در این مقاله با استفاده از مصالح گچی نمونه‌های دیسکی برزلی ترکی‌دار با مقادیر مختلف شیب ترک تهیه و تحت بار فشاری قرار گرفته است. برای تمامی نمونه‌ها بار منجر به شکست نمونه، زاویه انشعاب ترک‌ها از نوک ترک اصلی و مود رشد ترک‌های جدید ثبت شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که وجود ترک مرکزی با طول یک سوم قطر دیسک، بسته به شیب ترک حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد مقاومت نمونه را کاهش می‌دهد و شیب ترک در میزان کاهش مقاومت تاثیر بسزایی دارد. بر مبنای نتایج بدست آمده، شیب صفر درجه بیشترین مقاومت و شیب ۴۵ درجه کمترین مقاومت را در برابر رشد ترک دارا هستند. همچنین با افزایش شیب ترک میزان زاویه انشعاب ترک‌های جدید نسبت به راستای ترک اصلی کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** مکانیک شکست سنگ، دیسک برزلی ترکی‌دار، گچ، زاویه انشعاب ترک

### ۱- مقدمه

در حوزه مکانیک شکست سنگ تعیین ضرایب تمرکز تنش به عنوان عوامل مخرب و چقرمگی شکست مود کششی و برشی به عنوان عوامل مقاومتی و ارزیابی آنها در قالب یک معیار شکست ضروری می‌باشد. انواع مطالعات مکانیک شکست سنگ به سه دسته تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی تقسیم می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی علی‌رغم هزینه بالا و زمان‌بر بودن، نتایج معتبر داشته و در

<sup>۱</sup> - استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، hm\_nasr@yahoo.com

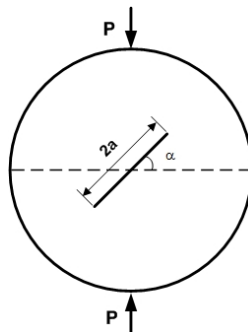
<sup>۲</sup> - دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۳</sup> - دانشیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۴</sup> - استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود



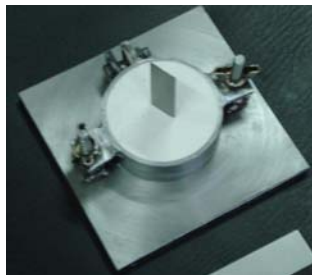
اکثر موارد برای ارزیابی دقت مطالعات عددی بکار گرفته می‌شوند. در مطالعات آزمایشگاهی مکانیک شکست سنگ به خاطر سهولت تهیه نمونه دیسکی (نسبت به نمونه‌های مکعبی)، نمونه دیسکی حاوی ترک شیبدار (شکل ۱) کاربرد متعددی دارد. این نوع نمونه در مطالعات متعدد عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه تاثیر هندسه ترک در مکانیزم رشد آن [۱]، تعیین چقرمگی شکست سنگ-ها [۲]، [۳] و ... بکار گرفته شده است. در این مقاله با استفاده از نمونه‌های دیسکی حاوی ترک شیبدار تاثیر هندسه ترک (شیب ترک) در رفتار شکست این نمونه‌ها مطالعه شده است. به این منظور نمونه‌های مختلف با مقادیر مختلف شیب ترک از جنس گچ تهیه شده و رفتار شکست آن‌ها به ازای مقادیر مختلف شیب ترک (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) تحت بار فشاری تک محوری به طور آزمایشگاهی مطالعه شده است. در این مطالعه قطر نمونه ۷۵ میلیمتر، ضخامت آن ۳۰ میلی‌متر و طول ترک ۲۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): نمونه دیسکی حاوی ترک مرکزی شیبدار تحت بار فشاری

## ۲- تهیه نمونه‌های دیسکی ترک‌دار

برای مطالعه تاثیر هندسه ترک (شیب ترک) در رفتار شکست نمونه ترک‌دار، نمونه‌های دیسکی از جنس گچ (ترکیب گچ و آب با نسبت وزنی ۳ به ۲) با قطر ۷۵ میلی‌متر، ضخامت ۳۰ تا ۳۲ میلی‌متر و با ترک مرکزی شیبدار به طول ۲۲/۵ میلی‌متر مطابق شکل (۲) تهیه شدند. نمونه‌های تهیه شده با زوایای مختلف شیب ترک در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل (۲): قالب ساخت نمونه حاوی ترک شیبدار و نحوه ایجاد ترک در آن



شکل (۳): نمونه‌های دیسکی حاوی ترک مرکزی با شیب متغیر

### ۳- تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها

با آزمایش‌های مختلف خواص مکانیکی مصالح گچی تشکیل دهنده نمونه‌های آزمایشگاهی از قبیل: مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، ضریب ارتجاعی، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعیین شدند. این پارامترها در جدول (۱) درج شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی مصالح گچی مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی

مقاومت فشاری	مقاومت کششی	ضریب ارتجاعی	ضریب پواسون	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی
MPa ۱۵/۷	MPa ۳/۱۷	GPa ۳/۳۳	۰/۱۹	MPa ۵/۳۲	۱۰

### ۴- بارگذاری نمونه‌ها

نمونه‌های تهیه شده با شیب‌های مختلف در آزمایشگاه تعیین خواص مکانیکیدانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از دستگاه فشاری INSTRON با سلول بار به ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن تحت بار فشاری قرار گرفتند و رفتار شکست آنها ثبت شد (شکل ۴). بار فشاری اعمالی به طور تدریجی و با نرخ حدود ۲۰ نیوتن بر ثانیه افزایش داده شد.



شکل (۴): بارگذاری فشاری نمونه‌های دیسکی با دستگاه INSTRON و با سلول بار به ظرفیت ۲۵ کیلو نیوتن

#### ۵- رفتار شکست نمونه‌ها

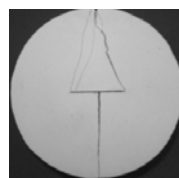
نمونه‌های مختلف بسته به شیب ترک با مکانیزم خاصی می‌شکنند. در فرآیند شکست این نمونه‌ها، میزان بار منجر به شکست نمونه، محل انشعاب ترک‌های جدید، مود انتشار ترک‌های منشعب شده و رشد ناپایدار ترک‌های منشعب شده حائز اهمیت است. لازم به ذکر است تمامی ترک‌های جدید منشعب شده از نوع کششی بوده و به طور ناپایدار رشد می‌کنند. در شکل (۵) وضعیت نمونه‌ها بعد از شکست نشان داده شده است.



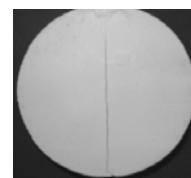
(د) ترک با شیب ۳۰ درجه



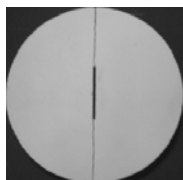
(ج) ترک با شیب ۱۵ درجه



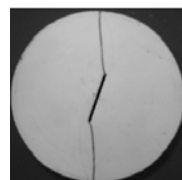
(ب) نمونه حاوی ترک افقی



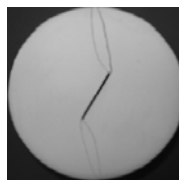
(الف) نمونه بدون ترک



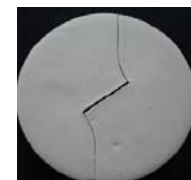
(ح) ترک با شیب ۹۰ درجه



(ز) ترک با شیب ۷۵ درجه



(و) ترک با شیب ۶۰ درجه



(ه) ترک با شیب ۴۵ درجه

شکل (۵): شکست نمونه‌های دیسکی حاوی ترک با شیب متغیر تحت بار فشاری

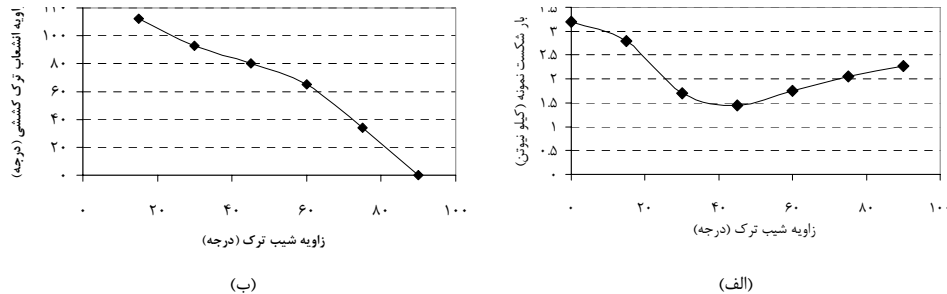


نمونه دیسکی بدون ترک تحت بار فشاری همان آزمایش برزیلی بوده و نمونه با مکانیزم کشش غیر مستقیم و در راستای قائم می‌شکند (شکل ۵-الف). این نمونه تحت بار فشاری ۷/۹ کیلو نیوتن می‌شکند. در نمونه دیسکی با ترک افقی، تحت بار فشاری ابتدا یک ترک از وسط ترک اصلی منشعب شده به مرز پایینی می‌رسد. سپس ترک دیگری از نوک ترک اصلی منشعب و به مرز بالایی می‌رسد (شکل ۵-ب). این نمونه تحت بار ۳/۱ کیلو نیوتن می‌شکند. در نمونه دیسکی ترک‌دار با شیب ۱۵ درجه، تحت بار فشاری از نزدیکی دو نوک ترک (نه دقیقاً نوک ترک)، ترک‌های کششی با زاویه ۱۱۲ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می‌رسند (شکل ۵-ج). این نمونه تحت ۲/۷۹ کیلو نیوتن می‌شکند. در نمونه دیسکی ترک‌دار با شیب ۳۰ درجه، تحت بار فشاری از دو نوک ترک، ترک‌های کششی با زاویه ۹۳ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می‌رسند (شکل ۵-د). این نمونه تحت ۱/۷۵ کیلو نیوتن می‌شکند. در نمونه دیسکی ترک‌دار با شیب ۴۵ درجه، تحت بار فشاری از دو نوک ترک اصلی، ترک‌های کششی با زاویه ۸۰ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می‌رسند (شکل ۵-ه). این نمونه تحت بار فشاری ۱/۴۵ کیلو نیوتن می‌شکند. در نمونه دیسکی ترک‌دار با شیب ۶۰ درجه تحت بار فشاری از دو نوک ترک، ترک‌های کششی با زاویه ۶۵ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می‌رسند (شکل ۵-و). این نمونه تحت ۱/۷۵ کیلو نیوتن می‌شکند. در نمونه دیسکی ترک‌دار با شیب ۷۵ درجه تحت بار فشاری از دو نوک ترک، ترک‌های کششی با زاویه ۳۴ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می‌رسند (شکل ۵-ز). این نمونه تحت ۲/۰۵ کیلو نیوتن می‌شکند. نمونه دیسکی با ترک قائم تحت بار فشاری همانند نمونه بدون ترک با مکانیزم کشش غیر مستقیم و در راستای قائم می‌شکند (شکل ۵-ح). این نمونه تحت ۲/۲۸ کیلو نیوتن می‌شکند. مقدار بار شکست نمونه‌های ترک‌دار و زاویه انشعاب ترک‌های کششی از نوک ترک اصلی برای مقادیر مختلف شیب ترک در جدول (۲) درج و در نمودارهای (۶-الف و ب) نشان داده شده است.

جدول (۲): میزان بار شکست و زاویه انشعاب ترک‌های کششی برای مقادیر مختلف شیب ترک

زاویه ترک	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰
بار شکست (کیلو نیوتن)	۳/۱	۲/۷۹	۱/۷	۱/۴۵	۱/۷۵	۲/۰۵	۲/۲۸
زاویه انشعاب (درجه)	-	۱۱۲	۹۳	۸۰	۶۵	۳۴	۰

با توجه به اینکه نمونه دیسکی بدون ترک تحت بار ۷/۹ کیلو نیوتن شکسته است، نتایج جدول (۲) بیانگر این است که وجود ترک مرکزی با طول یک سوم قطر دیسک، بسته به شیب ترک حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد مقاومت نمونه را کاهش می‌دهد و شیب ترک در میزان کاهش مقاومت تاثیر بسزایی دارد.



شکل (۶): الف) بار شکست نمونه‌های ترک‌دار ب) زاویه انشعاب ترک‌های کششی از نوک ترک اصلی

بر مبنای نتایج شکل (۶-الف) شیب ۱۵ درجه بیشترین مقاومت و شیب ۴۵ درجه کمترین مقاومت را دارد. شکل (۶-ب) مقدار زاویه انشعاب ترک‌های کششی را به صورت تابعی از زاویه شیب ترک نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر این است که با افزایش شیب ترک میزان زاویه انشعاب ترک‌های کششی کاهش می‌یابد.

## ۶- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- به خاطر وجود ترک در محیط‌های سنگی، مقاومت توده‌سنگ به مراتب کمتر از مقاومت ماده سنگ می‌باشد.
- در نمونه‌های دیسکی به خاطر وجود ترک با طول یک سوم قطر نمونه، بسته به شیب ترک، مقاومت فشاری تک محوری، حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار، نمونه حاوی ترک با شیب ۴۵ درجه کمترین و نمونه حاوی ترک با شیب صفر درجه بیشترین مقاومت را دارا هستند.
- در تمامی نمونه‌های ترک‌دار با ترک شیب‌دار، تحت بار فشاری متمرکز، از نوک ترک‌ها ترک‌های کششی منشعب و به طور ناپایدار رشد می‌کنند و راستای آنها به راستای بارگذاری متمایل می‌شود.
- با افزایش شیب ترک، زاویه انشعاب ترک‌های کششی نسبت به امتداد ترک اصلی، کاهش می‌یابد.

## منابع

- [1] Al-Shayea N.; "Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture", Engineering Geology, 81, pp. 84-97, 2005.
- [2] Liu H., Y.; Kou S., Q.; Lindqvist P., A.; Tang C., A.; "Numerical Modelling of the Heterogeneous Rock Fracture Process Using Various Test Techniques", Rock Mech. Rock Engng., 40 (2), pp. 107-144, 2007.
- [3] Chang S., H.; Lee C.; Jeon S.; "Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens", Engineering Geology, 66, pp. 79-97, 2002.



## Experimental Investigation of Crack Propagation in Cracked Brazilian Disc Specimens and Influence of Crack Inclination in Failure Mechanisms

H. Mirzaei<sup>1</sup>, M. Shariati<sup>2</sup>, R. Kakaie<sup>1</sup>, S.M.E. Jalali<sup>1</sup>

### ABSTRACT

Rock mediums commonly contain many cracks. These cracks control the mechanical behavior of rock masses. To study the crack propagation process, understanding of crack initiation load, crack initiation angle and crack initiation mode is important. Crack inclination angle has efficient influence on crack propagation mechanisms. In this paper, cracked Brazilian disc specimens with different crack inclination angles are prepared from gypsum and their behaviors are studied under compressive loads. The crack initiation mode, crack initiation angle and failure loads are determined. The results show that in specimens containing a crack with the length of 1/3 of specimen diameter, related to the crack inclination, the compressive strength of cracked specimens 60 to 80 percentage decreases in comparison to the un-cracked specimen. The specimen with flat crack show highest strength and the 45 degree cracked specimen show lowest strength. With the increasing of crack inclination angle, the tension mode initiated crack angle decreases.

*Keywords: Rock Fracture Mechanics, Cracked Brazilian Disc, Gypsum, Crack initiation angle.*