

بررسی مود ترکیبی کششی-برشی مکانیک شکست سنگ با استفاده از نمونه‌ی دیسک برزیلی ترک‌دار

صمد منصوری^۱، حسین میرزایی نصیرآباد^۲، محمود شریعتی^۳، نادر زیاری^۴

...

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- کارشناس آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود

...

Samad.mansouri@gmail.com

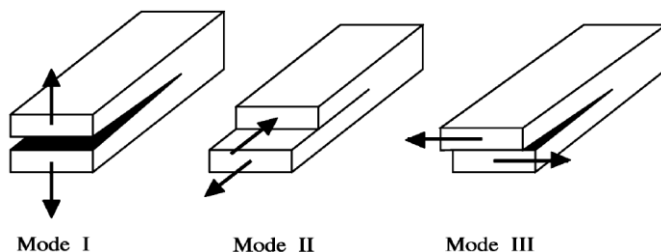
خلاصه

توده سنگ‌ها همواره در معرض شرایط بارگذاری پیچیده هستند اما برخلاف سایر مواد مهندسی وجود ناپوستگی‌ها (درزه، ترک، گسل و...) در محیط سنگی باعث می‌شوند که نحوه توزیع تنش و رفتار شکست سنگ تحت تاثیر این ناپوستگی‌ها قرار گیرد. برای اطمینان از پایداری توده‌های سنگی و طراحی مطمئن سازه‌ها بر روی سنگ یا در درون آن، بررسی رفتار شکست سنگ‌ها در شرایط مود ترکیبی I-II بسیار مهم بوده و بخش عمده‌ای از تحقیقات مکانیک شکست سنگ را تشکیل می‌دهد. در این مقاله رفتار شکست مود ترکیبی I-II در نمونه‌های شبه‌سنگی با استفاده از نمونه‌های دیسک برزیلی ترک‌دار که از مصالح گچی ساخته شده‌اند بطور آزمایشگاهی مطالعه شده است. بدین منظور با هدف بررسی تاثیر هندسه ترک (طول و شیب متغیر) برای هر نمونه بار منجر به شکست و زاویه انشعاب ترک‌های کششی از راستای ترک اصلی ثبت شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که وجود ترک با طول و زاویه مختلف، مقاومت نمونه‌ها را بین ۵۴ تا ۹۲ درصد کاهش داده است. همچنین با افزایش زاویه بین راستای ترک و محور بارگذاری زاویه انشعاب ترک‌های کششی نیز افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: نمونه دیسک برزیلی، مکانیک شکست سنگ، مطالعات آزمایشگاهی، مود ترکیبی

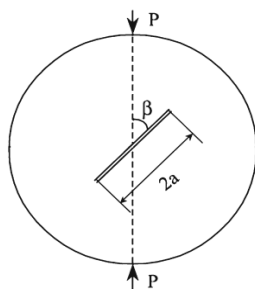
۱- مقدمه

از آنجا که به ندرت می‌توان در طبیعت سنگی را بدون درزه، شکاف و ناپوستگی یافت لذا در بسیاری از کاربردهای عملی مهندسی سنگ نظیر برش سنگ، خردایش سنگ، حفاری و تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، بررسی مسیر گسیختگی یکی از مهم‌ترین اقدامات در بهینه‌سازی اندازه تکه‌های سنگ یا کنترل پایداری سازه‌های سنگی ترک‌دار است. هدف نهایی در ساخت سازه‌های سنگی، طراحی سازه‌ای است که قادر به تحمل انواع بارهای استاتیکی و دینامیکی در بازه‌ی زمانی خاصی (عمر مفید سازه) باشد. در اغلب موارد گسیختگی سازه‌های سنگی در شرایط بارگذاری مود ترکیبی I-II رخ می‌دهد [۱]. گزارش‌ها نشان داده است که اغلب ترک‌های مشاهده شده در سدهای وزنی در معرض گسیختگی‌های مود ترکیبی هستند [۲]. در شرایط بارگذاری مود ترکیبی، رشد ترک در اجزای ترک‌دار و سازه‌ها لزوماً در امتداد مسیر ترک اصلی نیست و ممکن است که در یک مسیر منحنی شکل رخ دهد. برای بررسی رفتار شکست سنگ در شرایط مود ترکیبی انواع روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی وجود دارند که روش‌های تحلیلی بدلیل محدودیت‌های ذاتی کاربرد محدودی دارند ولی روش‌های آزمایشگاهی بسیار پر کاربرد بوده و علی‌رغم هزینه‌بر بودن منجر به ارائه نتایج معتبری می‌شوند که در بسیاری موارد برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش‌های عددی بکارگرفته می‌شوند. یک ترک می‌تواند به سه مود اصلی و یا ترکیبی از این سه مود (که مود ترکیبی نامیده می‌شوند) تحت تنش واقع شده و گسترش یابد؛ مود I یا مود بازشدگی متداول‌ترین فرم گسیختگی در اثر رشد ترک است. در این مود سطوح ترک نسبت به صفحات بطور عمود برهم در جهت مخالف یکدیگر تغییر مکان می‌دهند. مود II یا مود برشی که دو سطح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط نوک ترک می‌لغزند و مود III یا مود پارگی که لغزش دو صفحه ترک در جهتی به موازات خط پروفیل ترک اتفاق می‌افتد (شکل (۱)).



شکل (۱) - سه مود اصلی انتشار ترک

یکی از نمونه‌های متداول در بررسی آزمایشگاهی رفتار شکست سنگ نمونه دیسک برزیلی با ترک مرکزی (CSTBD) است (شکل ۲) که توسط محققین مختلف بکار گرفته شده است [۷ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶]. این نمونه قابلیت ایجاد شرایط بارگذاری مود I خالص، مود II خالص و همچنین مود ترکیبی I-II را با تغییر زاویه بین راستای ترک و محور بارگذاری (زاویه β در شکل ۲) را دارد. در این مقاله با استفاده از این نمونه بطور آزمایشگاهی، تاثیر شیب و طول ترک (۲a در شکل ۲) بر روی مقاومت و رفتار شکست نمونه‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد.



شکل (۲) - نمونه دیسک برزیلی با ترک مرکزی و تحت بار فشاری محوری

یکی از مهمترین چالش‌های روش‌های آزمایشگاهی مواد سنگی، تهیه نمونه‌های یکسان و با خواص مشابه برای قابل مقایسه بودن و در نتیجه اعتباربخشی به نتایج است [۹ و ۸]. در نمونه‌های سنگ طبیعی اغلب بدلیل وجود انواع ناپوستگی‌ها امکان تهیه نمونه‌های همگن، ایزوتروپ، با دانه‌بندی یکنواخت و با مقاومت یکسان وجود ندارد. لذا در این تحقیق از نمونه‌های شبه‌سنگی مصنوعی استفاده شده است.

۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین خواص مکانیکی

برای ساخت نمونه‌های شبه‌سنگی از ترکیب مناسب گچ و آب (نسبت وزنی ۳ به ۲) استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از یک قالب فلزی پیش‌ساخته مطابق شکل (۳) با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر و استفاده از تیغه‌های فلزی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر، نمونه‌های با طول ترک‌های مختلف (۲۰ و ۸۰ میلی‌متر) و با شیب‌های مختلف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) ساخته شدند. سپس با استفاده از تست‌های استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و انجام آزمایش‌های مربوطه خواص مکانیکی نمونه‌های استاندارد این مصالح تعیین شدند که مقادیر متناظر با این پارامترهای مکانیکی در جدول (۱) مشاهده می‌شوند.

¹ Cracked Straight Trough Brazilian Disk



شکل (۳) - قالب فلزی و نحوه‌ی ایجاد ترک در نمونه‌ها

جدول (۱) - خواص مکانیکی ترکیب استفاده شده در ساخت نمونه‌ها

چسبندگی (C)	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	ضریب پواسون (ν)	مدول یانگ (E)	مقاوت کششی (σ_t)	مقاومت فشاری نک محوری (σ_c)
۵/۳۲ MPa	۱۰ درجه	۰/۱۹	۳/۳۳ GPa	۳/۱۷ MPa	۱۵/۷ MPa

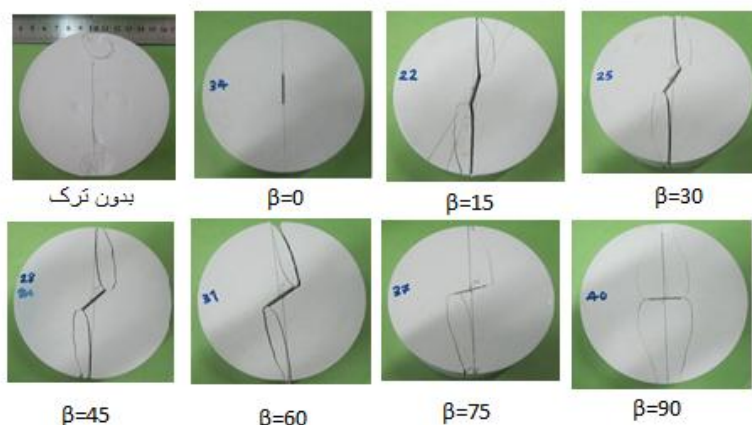
۳- بارگذاری و مکانیزم شکست نمونه‌ها

نمونه‌های تهیه شده پس از خشک شدن به مدت ۴ روز در دستگاه خشک کن، مطابق شکل (۴) با استفاده از یک دستگاه بارگذاری از نوع INSTRON تحت بارگذاری فشاری تک محوره قرار گرفتند. برای بررسی تاثیر شیب ترک روی رفتار شکست نمونه‌ها با استفاده از یک مقاله زاویه مورد نظر بین راستای ترک و محور بارگذاری بر روی تمامی نمونه‌ها خط کشی شدند. بدلیل مقاومت نسبتاً کم نمونه‌های ترک دار و نیاز به دقت زیاد در اندازه گیری میزان بار منجر به شکست هر نمونه، یک سلول بار به ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن در دستگاه مورد استفاده قرار گرفت. بارگذاری و شرایط آزمایش براساس روش استاندارد پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ [ISRM ۱۱ و ۱۰] و با سرعت بارگذاری اندک و حدود ۲۰ نیوتن بر ثانیه در نظر گرفته شد تا در صورت امکان بتوان رشد پایدار ترک را مشاهده کرد. اما در عمل رشد ترک‌ها بسیار ناپایدار بوده و گسیختگی نمونه بصورت آنی پس از شروع رشد ترک اتفاق افتاد.

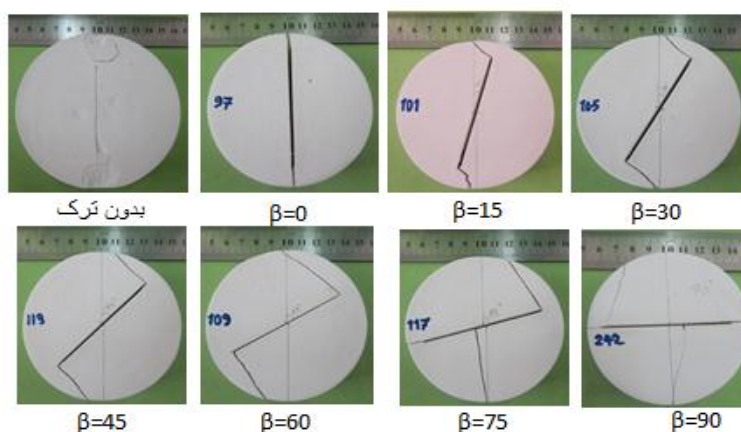


شکل (۴) - نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه INSTRON و سلول بار ۲۵ کیلونیوتنی

برای هر حالت حداقل ۲ نمونه تهیه شد و سپس مقدار میانگین نتایج بدست آمده بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد. در مجموع حدود ۶۰ نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند که در شکل (۵) رفتار شکست نمونه‌های با طول ترک ۲۰ میلی متر و با شیب‌های ۰ تا ۹۰ درجه و در شکل (۶) نمونه‌های با طول ترک ۸۰ میلی متر و با شیب‌های ۰ تا ۹۰ درجه پس از بارگذاری نشان داده شده‌اند. همچنین در این شکل‌ها تصویر اول از سمت چپ متعلق به نمونه بدون ترک است که تحت بارگذاری قرار گرفته است.



شکل (۵) - نحوه رشد ترک در نمونه‌های با طول ترک ۲۰ میلیمتری



شکل (۶) - نحوه رشد ترک در نمونه‌های با طول ترک ۸۰ میلیمتری

همانطور که در این شکل‌ها مشخص است نمونه‌ها با توجه به شیب یعنی زاویه قرارگیری ترک نسبت به محور بارگذاری (زاویه β در شکل ۱) و همچنین طول ترک با مکانیزم خاصی گسیخته شده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که تمامی ترک‌های منشعب شده اصلی در نمونه‌ها از نوع ترک کششی می‌باشند و رشد آن‌ها ناپایدار است. این ناپایداری در رشد ترک‌ها و در نتیجه عدم امکان متوقف کردن بارگذاری پس از شروع رشد ترک و قبل از گسیختگی نمونه، موجب ایجاد ترک‌های ثانویه پس از گسیختگی بویژه در نمونه‌های با طول ترک ۲۰ میلیمتر شده است. برای هر یک از این نمونه‌ها بار منجر به شکست و همچنین زاویه انشعاب ترک‌ها ثبت شده است که مقادیر متناظر در جداول (۳ و ۲) درج شده‌اند. بار شکست نمونه بدون ترک ۱۰/۳۳ کیلو نیوتن تعیین شد. میزان حداقل و حداکثر بار شکست در نمونه‌های با طول ترک ۲۰ میلیمتر به ترتیب ۴/۶۷ کیلو نیوتن برای زاویه ۹۰ درجه و ۲/۹۸ کیلو نیوتن برای زاویه ۴۵ درجه می‌باشد، لذا وجود این ترک باعث کاهش مقاومت نمونه بین ۵۴ تا ۷۱ درصد شده است. این میزان کاهش مقاومت برای نمونه‌های با طول ترک ۸۰ میلیمتر که حداقل بار شکست ۰/۷۷ کیلو نیوتن در شیب ۱۵ درجه و حداکثر بار شکست ۳/۴۱ را در شیب ۹۰ نشان می‌دهند، بین ۶۶ تا ۹۲ درصد بوده است.

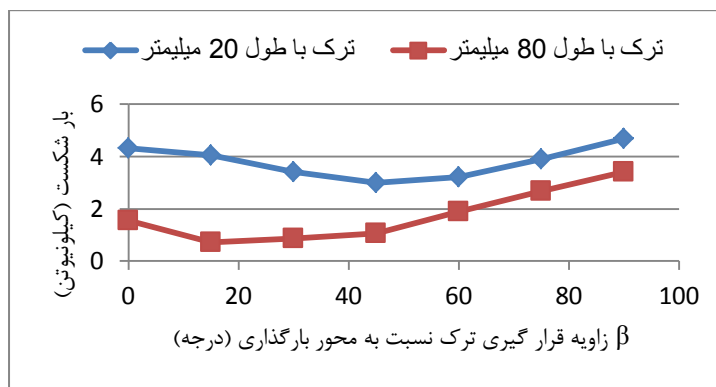
جدول (۲) - میزان بار شکست و زاویه انشعاب ترک‌ها از راستای ترک اصلی در نمونه‌های با طول ترک ۲۰ میلیمتر

زاویه ترک (β)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰
بار شکست (کیلو نیوتن)	۴/۳۰۸	۴/۰۵	۳/۴۱۹	۲/۹۸۱	۳/۲۱۶	۳/۹۰۱	۴/۶۷۴
زاویه انشعاب (درجه)	۰	۲۰	۵۸	۹۰	۱۰۱	۱۱۱	-

جدول (۳) - میزان بار شکست و زاویه انشعاب ترک‌ها از راستای ترک اصلی در نمونه‌های با طول ترک ۸۰ میلیمتر

زاویه ترک (β)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰
بار شکست (کیلو نیوتن)	۱/۵۴۸	۰/۷۱۱	۰/۸۶۱	۱/۰۵	۱/۸۸۱	۲/۶۷۸	۳/۴۱۲
زاویه انشعاب (درجه)	۰	۸۲	۷۴	۹۲	۱۰۶	۱۱۵	-

با مقایسه نتایج بدست آمده در نمودارهای شکل‌های (۷ و ۸) تاثیر طول ترک و شیب آن بر روی مقاومت نمونه‌ها و همچنین رفتار شکست آن‌ها کاملاً مشخص است. به ازای زاویه $\beta=0$ درجه با افزایش طول ترک از ۲۰ میلیمتر به ۸۰ میلیمتر میزان مقاومت نمونه ۶۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این میزان برای زاویه $\beta=15$ درجه ۸۲ درصد، برای زاویه $\beta=30$ درجه ۷۴ درصد، برای زاویه $\beta=45$ درجه ۶۴ درصد، برای زاویه $\beta=60$ درجه ۴۱ درصد، برای زاویه $\beta=75$ درجه ۳۱ درصد و برای زاویه $\beta=90$ درجه ۲۷ درصد بوده است.



شکل (۷) - بار شکست نمونه‌های ترک‌دار



شکل (۸) - زاویه انشعاب ترک‌های کششی نسبت به راستای ترک اصلی

با توجه به شکل‌های (۵ و ۶) و همچنین نمودارهای شکل (۸) مشخص می‌شود که در هر دو نوع طول ترک، با افزایش زاویه ترک نسبت به راستای بارگذاری، زاویه انشعاب ترک‌های کششی افزایش یافته است. همچنین در زوایای ۱۵ و ۳۰ درجه اندازه‌ی زاویه انشعاب ترک‌ها با افزایش طول ترک افزایش یافته است اما در زوایای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه اندازه زاویه انشعاب در هر دو نوع ترک بسیار نزدیک به هم مشاهده می‌شود. همچنین در زوایای ۰ تا ۶۰ درجه در هر دو نوع طول ترک، انشعاب ترک‌ها دقیقاً از نوک ترک شروع شده است و سپس با رشد ناپایدار به سمت محور بارگذاری منجر به گسیختگی کامل نمونه‌ها شده‌اند. اما در زاویه ۷۵ درجه در نمونه‌های با طول ترک ۲۰ میلیمتر، انشعاب ترک از نزدیکی نوک ترک (نه دقیقاً

نوک ترک) و در نمونه‌های با طول ترک ۸۰ میلیمتر انشعاب اولیه ترک تقریباً از مرکز ترک شروع شده است. در نمونه‌های با ترک افقی (زاویه ۹۰ درجه) نیز انشعاب ترک‌ها تقریباً از مرکز نمونه آغاز می‌شود ولی با این حال وجود این ترک میزان بار شکست را در حالت طول ترک کوچکتر ۵۴ درصد و در حالت طول ترک بزرگتر ۶۶ درصد کاهش داده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نحوه رفتار شکست و نحوه تاثیر طول ترک و شیب آن در حالت مود ترکیبی I-II در نمونه‌های شبه‌سنگی دیسک برزیلی ترک‌دار که از مصالح گچی ساخته شده بودند بطور آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که:

- مقاومت نمونه‌های دیسک برزیلی با قطر ۱۰۰ میلیمتر با وجود ترک‌های با طول ۲۰ میلیمتر (یعنی نسبت طول ترک به شعاع ۰/۲) بسته به زاویه قرارگیری ترک نسبت به راستای بارگذاری بین ۵۴ تا ۷۱ درصد کاهش می‌یابد. این درحالی است که وجود ترک‌های با طول ۸۰ میلیمتر (یعنی نسبت طول ترک به شعاع ۰/۸) با زوایای مختلف، مقاومت نمونه ترک‌دار را نسبت به نمونه بدون ترک بین ۶۶ تا ۹۲ درصد کاهش می‌دهد.
- با افزایش زاویه بین راستای ترک و محور بارگذاری زاویه انشعاب ترک‌های کششی نیز افزایش می‌یابد.
- با افزایش طول ترک در نمونه‌ها از ۲۰ میلیمتر تا ۸۰ میلیمتر و در زوایای مختلف، مقاومت نمونه‌ها بطور میانگین ۵۴ درصد کاهش می‌یابد.
- رشد و انشعاب ترک‌ها بصورت ناپایدار بوده و با حرکت متمایل به سمت محور بارگذاری منجر به گسیختگی کامل نمونه می‌شوند.
- وجود ترک در نمونه حتی در حالت افقی نسبت به محور بارگذاری نیز موجب کاهش شدید مقاومت نمونه می‌شود.
- با افزایش طول ترک در نمونه‌های دیسک برزیلی از ۲۰ میلیمتر به ۸۰ میلیمتر، زاویه‌ای که کمترین میزان بار شکست را دارد، از زاویه ۴۵ درجه به زاویه ۱۵ درجه کاهش می‌یابد.

۵- منابع

- [1] Rahman MM, Hossain MM, Crosby DG, Rahman MK, Rahman SS(2002) Analytical, numerical and experimental investigations of transverse fracture propagation from horizontal wells. J Petrol Sci Eng;35(3-4):127-50.
- [2] Kishen JMC, Singh KD(2001)Stress intensity factors based fracture criteria for kinking and branching of interface crack: application to dams. Engng Fract Mech;68:201-19.
- [3]Shetty DK, Rosenfield AR, DuckworthWH (1986)Mixed mode fracture of ceramic in diametral compression. J Am Ceram Soc 69:437-443.
- [4]Khan K, Al-Shayea NA (2000) Effect of specimen geometry and testing method on mixed mode I-II fracture toughness of a lime-stone rock from Saudi Arabia. Rock Mech Rock Engng 33(3):179-206.
- [5]Dai F, Chen R, Iqbal MJ, Xia K (2010) Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture param-eters. Int J Rock Mech Min Sci 47:606-613.
- [6]Ayatollahi MR, Aliha MRM (2008) On the use of Brazilian disc specimen for calculating mixed mode I-II fracture toughness of rock materials. Eng Fract Mech 75:4631-4641.
- [7]Wang QZ, Gou XP, Fan H (2012) The minimum dimensionless stress intensity factor and its upper bound for CNBD fracture toughness specimen analyzed with straight through crack assumption.Eng Fract Mech 82:1-8.
- [8]Chen C, Pan E, Amadei B (1998) Fracture mechanics analysis of cracked discs of anisotropic rock using the boundary element method. Int J Rock Mech Min Sci 35(No. 2):195-218.
- [9]Nasser MHB, Mohanty B (2008) Fracture toughness anisotropy in granitic rocks. Int J Rock Mech Min Sci 45:167-193.
- [10] ISRM Testing Commission (1988) Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 25:71-96, Ouchterlony, F. coordinator
- [11] ISRM Testing Commission, Fowell RJ (1995) Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked Chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 32:57-64.