

ارزیابی سه آزمون رایج جهت تعیین چقرمگی شکست مود I استاتیکی سنگ‌ها

علی محمد پاکدامن^{۱*}؛ مهدی موسوی^۲

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن، گرایش مکانیک سنگ، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۴/۱۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2017.49903

چکیده

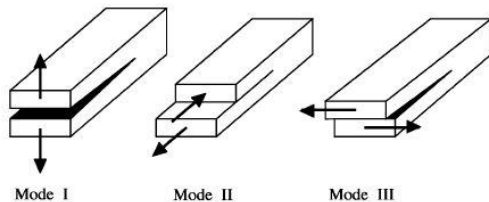
امروزه بررسی شروع و گسترش ترک در مسائل مرتبط با پایداری سازه‌های سنگی ایفاگر نقشی کلیدی است. چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها یکی از خواص ذاتی بسیار مهم آن‌ها جهت پیش‌بینی گسترش ترک در کشش و در فرآیند شکست هیدرولیکی است. تاکنون روش‌های متنوعی جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها ارائه شده است که نتایج آن‌ها با توجه به عواملی همچون ابعاد نمونه، هندسه‌ی ترک، نوع شیار و شرایط بارگذاری تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند. در این مقاله سه آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، آزمون

واژگان کلیدی

چقرمگی شکست سنگ، آزمون‌های آزمایشگاهی، آنالیز المان محدود، مکانیک شکست سنگ.

برزیلی و آزمون برزیلی مسطح شده، جهت تعیین مقدار چقرمگی شکست مود I بر روی نمونه‌ی سنگی بازالت انتخاب شدند. پس از بررسی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، نهایتاً آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون به دلیل رشد پایدار یک ترک طبیعی، کم‌تر بودن حجم ناحیه‌ی پلاستیک نسبت به حجم کل نمونه و در نتیجه صحت بیش‌تر فرض الاستیک خطی در این نمونه، همچنین عدم تأثیر شرایط مرزی بر مقادیر چقرمگی شکست و آماده‌سازی نسبتاً مناسب آن بهترین آزمون در بین سه آزمون اشاره شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها تشخیص داده شد.

حالت بارگذاری بحرانی است. چقرمگی شکست در دو حالت دینامیکی و استاتیکی با توجه به شرایط بارگذاری نسبت به ترک، مشتمل بر سه مود شکست بوده که در شکل ۱، قابل مشاهده می‌باشد (Ayatollahi & Akbaridoost, 2013).



شکل ۱. حالات مختلف جابه‌جایی صفحات ترک (Chang, Lee, & Jeon, 2002)

اخیراً در صنعت نفت به منظور افزایش نفوذ نفت به داخل چاه،

۱. پیش‌گفتار

در مسائل مهندسی سنگ که مرتبط با پایداری سازه‌هاست، کنترل شروع و گسترش ترک امری بسیار حیاتی است. ترک‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت توده سنگ و تغییر شکل آن دارند. این عوامل همچنین، به شدت بر پایداری سازه‌ها، همچون معادن روباز و زیرزمینی، تونل‌ها و شیب‌های سنگی تأثیرگذارند. شکست سنگ نقشی کلیدی در اکتشاف ذخایر انرژی که در آن ایجاد ترک‌های جدید منجر به افزایش و بهبود تولید نفت و گاز می‌شود رادار است (Funatsu et al., 2014).

چقرمگی شکست سنگ پارامتری تعیین‌کننده در مکانیک سنگ می‌باشد که بیانگر مقاومت در برابر گسترش ترک است. در مواد ترد و تقریباً ترد همچون سنگ‌ها این پارامتر (K_{IC}) همان مقدار بحرانی ضریب شدت تنش (K) در

شده است (Valko & Economides, 1995). از آنجا که نوع شکست ایجاد شده در این فرآیند شکست کششی است، مود شکستگی تعیین‌کننده در فرآیند شکست هیدرولیکی، مود I یا همان مود کششی است (Saouma, 2000). اگرچه پیشتر بر اساس مطالعات دوبعدی فرض می‌شد که چقرمگی شکست، به جز در موارد خاص، نقشی قابل صرف‌نظر کردن در پدیده‌ی شکست هیدرولیکی دارد، اما مطالعات سه‌بعدی صورت گرفته نشانگر تأثیر قابل توجه تعیین دقیق این پارامتر در فرآیند مذکور دارد (Settari, 1985).

آبه و همکارانش با مدل‌سازی ترک سکه‌ای نشان دادند که تعیین مقدار چقرمگی شکست تأثیر قابل توجهی بر گسترش ترک دارد (Abe et al., 1976).

از طرفی تیرسلین بر اساس مطالعات سه‌بعدی نشان داد که چقرمگی شکست نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین ابعاد زون شکسته شده‌ی ناشی از فرآیند شکست هیدرولیکی دارد؛ به‌گونه‌ای که از طرفی در محیط‌های همگن که تفاوت چقرمگی شکست در بخش‌های مختلف بارز نیست، چقرمگی شکست بالاتر منجر به شکستگی‌های کوچک‌تر می‌شود. همچنین در محیط‌های ناهمگن تفاوت در مقادیر چقرمگی شکست بر محدودشدگی ناحیه‌ی شکست هیدرولیکی به‌شدت تأثیرگذار است (Thiercelin, 1989).

در محیط‌های سنگی به دلیل محدودیت در تهیه‌ی نمونه، روش‌های متعددی به‌منظور تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها ارائه شده است. از این رو می‌توان آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست سنگ‌ها را از نظر نوع بارگذاری به سه دسته تقسیم کرد؛ بارگذاری کششی، بارگذاری خمشی و بارگذاری فشاری (Tutluoglu & Keles, 2011).

مهم‌ترین آزمون جهت تعیین چقرمگی شکست مود I با بارگذاری کششی، تعیین چقرمگی شکست با آزمون میله‌ی کوتاه^۱ است که استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۲ در سال ۱۹۸۸ است (Ouchterlony, 1988). آزمون‌هایی که از بارگذاری خمشی جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها استفاده می‌کنند عبارت‌اند

تولید ترک مصنوعی با فرآیند شکست هیدرولیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این صنعت به منظور افزایش استحصال نفت از چاه‌هایی که یا به علت برداشت طولانی مدت بازدهی آن‌ها کاهش یافته است و یا به علت جنس سنگ و خاک‌های اطراف چاه نفوذپذیری کمی دارند، از شکست هیدرولیکی یا همان پروسه‌ی ایجاد شکست در لایه‌هایی از پوسته‌ی زمین استفاده می‌شود. استفاده از این تکنولوژی جهت افزایش استخراج نفت به ویژه در زمین‌های رسی بسیار مؤثر است. پیش‌بینی دقیق مسیر و میزان رشد ترک، تعیین مقدار دقیق فشار لازم برای به وجود آوردن ترک‌های مناسب و پیش‌رونده در دیواره‌ی چاه و همچنین سایر پارامترهای مهم و مؤثر این پدیده، ضرورت تعیین ضرایب شدت تنش^۱ و حد بحرانی آن‌ها که همان چقرمگی شکست^۲ است را در اطراف چاه به خوبی نشان می‌دهد (Abe et al., 1979).

در فرآیند شکست هیدرولیکی ایجاد شده در چاه، شکست مذکور در راستای عمود بر تنش حداقل گسترش می‌یابد. در بسیاری از موارد این شکست به صورت قائم، عمود بر تنش اصلی حداقل اتفاق می‌افتد. حال آنکه برخی سازندهای نفتی دارای عمقی کم‌اند و شکست هیدرولیکی (وابسته به رژیم تنش منطقه) می‌تواند به صورت افقی به وقوع بپیوندد. از آنجا که تنش‌های نزدیک چاه با تنش‌های دور از محل متفاوت‌اند، بدین ترتیب شروع شکستگی در چاه از صفحه‌ای پیروی می‌کند که با جهت گسترش نهایی شکست متفاوت است. از این رو استفاده از تحلیل‌های مکانیک شکستی جهت پیش‌بینی مسیر رشد ترک اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

بر اساس نظریات گریفیث، گسترش شکستگی غالباً طی سه مرحله مدل‌سازی می‌شود. مرحله‌ی اول، محاسبه‌ی ضریب شدت تنش برای هندسه و حالت بارگذاری شکستگی موجود؛ مرحله‌ی دوم، به‌کارگیری ملاک پایداری چقرمگی شکست برای مشخص نمودن امکان شکستگی، به این ترتیب که هر جا ضریب شدت تنش در شکستگی موردنظر از مقدار چقرمگی شکست فراتر رود، شکستگی ناپایدار بوده و انتشار آن آغاز می‌شود؛ مرحله‌ی سوم نیز شامل تعمیم شکستگی ناپایدار تا یک مسافت معین، مطابق گام زمانی در نظر گرفته

1 Stress Intensity Factors

2 Fracture Toughness

3 Short Rod (SR)

4 International Society for Rock Mechanics (ISRM)

این تفاوت در مقادیر چقرمگی شکست را به علت نوع شیار و به تبعیت از آن نوع گسترش ناحیه‌ی پلاستیک^۴ دانستند که متأثر از نوع بارگذاری است و نشان دادند که چنانچه از چرخه-های بارگذاری و باربرداری به منظور پیش ترک‌دار کردن نمونه‌های SCB استفاده شود؛ مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های SCB نزدیک به مرحله‌ی دوم چقرمگی شکست نمونه‌های CB می‌شود.

در این مقاله سه آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، نمونه‌ی برزلی، نمونه‌ی برزلی مسطح شده از یک مطالعه‌ی جامع بر روی شش آزمون رایج جهت تعیین چقرمگی شکست با توجه به شباهت نمونه‌ها و مکانیزم گسترش ترک (رشد ترک پایدار) انتخاب شدند. ابتدا، با مطالعات آزمایشگاهی مقادیر چقرمگی شکست مود I در این آزمون‌ها تعیین می‌شوند. سپس با استفاده از شواهد آزمایشگاهی و همچنین مطالعات عددی با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی، به بررسی دلایل وجود تفاوت در مقادیر چقرمگی شکست پرداخته می‌شود. نهایتاً بهترین آزمون در بین این سه روش، با توجه به دلایل ارائه شده تعیین می‌شود.

۲. آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست

۱.۲ آزمون تعیین چقرمگی شکست با نمونه‌ی

استوانه‌ای با شیار چورون

این آزمون در زمره‌ی آزمون‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ جهت تعیین چقرمگی شکست است که در سال ۱۹۸۸ انتشار یافت. در این آزمون نیاز به ایجاد شیار در مرکز مغزه و در فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه است، که این شیار عامل توسعه‌ی ترک است، نوع شیار ایجاد می‌شود مطابق شکل ۲، به شکل V بوده که اصطلاحاً شیار چورون نامیده می‌شود (Ouchterlony, 1988).

از: آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار مستقیم^۵ (Ouchterlony, 1982)، آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون^۶ که استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ در سال ۱۹۸۸ است (Ouchterlony, 1988)، آزمون نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای با شیار مستقیم^۷ که استاندارد پیشنهادی سال ۲۰۱۳ انجمن بین‌المللی مکانیک است (Kuruppu et al., 2014)، آزمون نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای با شیار چورون^۸ (kuruppu, 1997) و آزمون نمونه‌ی دیسکی با شیار مستقیم^۹ (Tutluoglu & Keles, 2011). آزمون‌هایی که از بارگذاری فشاری جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ-ها استفاده می‌کنند بسیار متنوع می‌باشند، اما مهم‌ترین آنان عبارت‌اند از: نمونه‌ی برزلی^{۱۰} (Guo et al., 1993)، آزمون نمونه‌ی برزلی مسطح شده^{۱۱} (Wang & Xing, 1999)، آزمون نمونه‌ی برزلی با شیار مستقیم^{۱۲} (Awaji & Sato, 1978) و آزمون نمونه‌ی برزلی با شیار چورون^{۱۳} که استاندارد پیشنهادی سال ۱۹۹۵ انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ است (Fowell, 1995).

مطالعات صورت گرفته بر روی مقادیر چقرمگی شکست مبین این واقعیت است که نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف جهت تعیین این پارامتر تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای دارند. چانگ و همکارانش که بر روی نمونه‌های گرانیت و مرمریت مطالعه می‌کردند بیان کردند در بین آزمون‌های CCNBD، CNSCB، SCB و BDT چقرمگی شکست نمونه‌های CCNBD و CNSCB و BDT انطباق مناسبی با یکدیگر داشته و به وضوح بیش از SCB است؛ که علت این تفاوت را پیش‌ترک‌دار نکردن نمونه‌های SCB بیان کردند (Chang et al., 2002).

فوناتسو و همکارانش نیز اشاره کردند که در نمونه‌های ماسه سنگ مورد آزمایش آن‌ها چقرمگی شکست روش SCB کمتر از روش CB است (Funatsu et al., 2014). آنان وجود

5 Single Edge Crack Round Bar Bending Test (SECRBB)

6 Chevron Bend Test (CB)

7 Semi-Circular Bend Test (SCB)

8 Chevron Notch Semi-Circular Bend Test (CNSCB)

9 Straight Notch Disk Bend Test (SNDB)

10 Brazilian Disc Test (BDT)

11 Flattened Brazilian Disc Test (FBD)

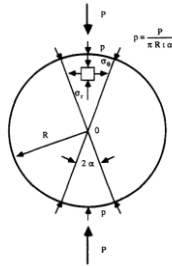
12 Crack Straight Trough Brazilian Disc (CSTBD)

13 Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD)

14 Fracture Process Zone (FPZ)

مقایسه‌ی آزمون‌های نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، برزیلی، برزیلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها

رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود.



شکل ۳. هندسه و شیوه‌ی بارگذاری در آزمون برزیلی

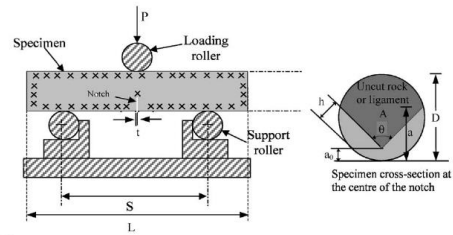
$$K_{IC} = B' P_{min} \phi_{max} \left(\frac{C}{R} \right) \quad (3)$$

شکل ۳. هندسه و شیوه‌ی بارگذاری در آزمون برزیلی
 برای ϕ_{max} ، برای $\alpha = 5^\circ$ برابر 0.112 است. برای هندسه‌ی آزمون برزیلی استاندارد (ضخامت و شعاع 27 میلی‌متر) مقدار B' برابر $920 \text{ m}^{-3/2}$ است. برای تستی با ابعاد اشاره شده، معادله‌ی (۳) به صورت رابطه‌ی (۴) ساده می‌شود.

$$K_{IC} = 104.1 P_{min} \quad (4)$$

۳.۲ آزمون برزیلی مسطح شده

این آزمون توسط وانگ و زینگ به منظور رفع نقایص آزمون برزیلی بدون شیار جهت تعیین چقرمگی شکست ارائه شد (Wang & Xing, 1999). در این روش به منظور تعیین چقرمگی شکست از نمونه‌ی آزمون برزیلی که در دو انتها مسطح شده باشد (مطابق شکل ۴)، استفاده می‌شود؛ تا بارگذاری نمونه ساده‌تر باشد و شرایط توسعه‌ی ترک در مرکز دیسک در نظر گرفته شده است که به شدت وابسته به زاویه‌ی بارگذاری است. از آنجا که در این آزمون نیز جهت تعیین چقرمگی شکست نیاز به ثبت نقطه‌ی حداقل موضعی منحنی بار-جاب‌جایی است، باید برای انجام تست از دستگاه پرس صلب استفاده شود. رابطه‌ی (۵) برای تعیین چقرمگی شکست این آزمون استفاده می‌شود.



شکل ۲. مشخصات هندسی آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون

این آزمون طبق دو روند صورت می‌گیرد، در روند اول صرفاً نیاز به ثبت نقطه‌ی بار حداکثر است؛ در حالی که در روند دوم منحنی کامل بار-جاب‌جایی ثبت می‌شود که در این حالت نیاز به دستگاه صلب است. روند دوم آزمون فقط در صورتی مورد استفاده واقع می‌شود که نمونه رفتار غیرخطی بارزی از خود نشان دهد. لذا در این مقاله تنها از روند اول استفاده می‌شود. اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ با رابطه‌ی (۱) صورت می‌گیرد (Ouchterlony, 1988).

$$K_{IC} = \frac{Y_{min}^* F_{max}}{D^{1.5}} \quad (1)$$

که در آن Y_{min}^* با رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$Y_{min}^* = \left[1.835 - 7.15 \left(\frac{a_0}{D} \right) + 9.85 \left(\frac{a_0}{D} \right)^2 \right] \frac{S}{D} \quad (2)$$

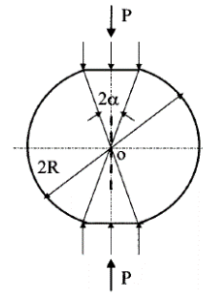
۲.۲ آزمون برزیلی

آزمون برزیلی جهت تعیین چقرمگی شکست مود I اولین بار توسط گوا ارائه شد (Guo et al., 1993). در این روش نیاز به ایجاد هیچ شیاری در نمونه نیست (مطابق شکل ۳). زاویه‌ی محفظه‌ی آزمون برزیلی که بار به آن وارد می‌شود 10° درجه در نظر گرفته می‌شود ($\alpha = 5^\circ$).

اعمال بار تا بعد از نقطه‌ی شکست نیز ادامه می‌یابد، از این رو نیاز به دستگاه پرس صلب جهت مشاهده‌ی رفتار بعد از شکست نمونه است؛ تا آنجا که نقطه‌ی مینیمم موضعی بلافاصله بعد از نقطه‌ی ماکسیمم مشاهده شود و بعد از مشاهده‌ی این نقطه دیگر نیاز به ثبت منحنی بار-جاب‌جایی نیست. به منظور تعیین چقرمگی شکست در این آزمون از

جدول ۱. خصوصیات نمونه‌ی مورد استفاده جهت انجام

آزمایش	
مقدار	پارامتر
۱۳۲/۱۵	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)
۴۲/۹۸۴	مدول یانگ (GPa)
۰/۱۸۳	ضریب پواسون
۱۱/۱۲	مقاومت کششی (MPa)
۲/۸۵۳	جرم مخصوص (Kg/m^3)
۰/۲۴	تخلخل (%)



شکل ۴. نمونه‌ی آزمون برزلی مسطح شده

$$K_{IC} = \frac{P_{min}}{t\sqrt{R}} \phi_{max} \quad (5)$$

۲.۳ خصوصیات ابزار مورد استفاده
 به منظور ایجاد شیار در نمونه‌ها از آره با ضخامت ۱/۵۸ میلی-متر استفاده شد. همچنین به منظور اعمال بار بر نمونه‌ها از دستگاه پرس صلب ۸۱۵ MTS استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها به منظور جلوگیری از تأثیرات نرخ بارگذاری و همچنین اثرهای دینامیکی بر چقرمگی شکست با سرعت ۰/۰۰۲ میلی-متر بر ثانیه صورت گرفت. به منظور ثبت بار نیز از بارسنج با ظرفیت ۵ تن استفاده شد. در تمامی روش‌ها به منظور تعیین چقرمگی شکست از متوسط سه تست استفاده شده است.

۳.۳ نتایج آزمون‌ها

آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون
 در این روش از نمونه‌هایی به قطر ۵۴ میلی‌متر، طول ۲۱۶ میلی‌متر و فاصله‌ی تکیه‌گاهی ۱۸۰ میلی‌متر (نسبت دهانه به قطر ۳/۳۳) استفاده شده است. شیار ایجاد‌ی شیار چورون با زاویه‌ی ۹۰ درجه بوده و طول اولیه‌ی شیار ایجاد شده در مرکز نمونه ۱۱ میلی‌متر است. میانگین نیروی گسیختگی در این روش ۲/۷۷ KN و مقدار چقرمگی شکست میانگین از روش تحلیلی $2/72 MPa\sqrt{m}$ است. در جدول ۲ مقادیر چقرمگی شکست حاصل از آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۵ نیز شیوه‌ی انجام تست در آزمایشگاه مشاهده می‌شود. در شکل ۶ نیز تصاویر نمونه‌ی شکسته شده در این آزمون قابل مشاهده است.

با توجه به زاویه‌ی بارگذاری و به صورت عددی تعیین می‌شود. مطالعات وانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ نشان می‌دهد که برای زوایای بارگذاری بیش از ۱۹/۵ درجه ترک حتماً از مرکز نمونه شروع به گسترش می‌کند (Wang et al., 2004). از طرفی مطالعات کاکلیس و همکارانش و مطالعات کِلِس و توتلوگو نیز شرط لازم برای گسترش ترک از مرکز نمونه را، زاویه‌ی بارگذاری بیش از ۱۵ درجه تعیین کردند (Kaklis et al., 2005; Keles & Tutluoglu, 2011). در این مقاله به منظور رعایت شرایط هر دو مورد مذکور، زاویه‌ی مسطح شدگی ۳۰ در نظر گرفته شده است. وانگ و زینگ حداکثر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش را برای نمونه‌ی برزلی مسطح شده با آنالیز المان محدود و المان مرزی با زاویه‌ی ($\alpha = 30^\circ$)، برابر با ۰/۵۸ در نظر گرفتند (Wang & Xing, 1999). کِلِس و توتلوگو نیز با آنالیز المان محدود دوبعدی، حداکثر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش برای همین زاویه‌ی مسطح شدگی را برابر با ۰/۴۴۵ در نظر گرفتند (Keles & Tutluoglu, 2011).

۳. آزمایش‌ها

۱.۳ خصوصیات نمونه‌های آزمایش

از آنجاکه سنگ بازالت سنگی تقریباً همگن و ایزوتروپ است، نمونه‌های انتخاب شده در این مقاله به علت یکنواختی زیاد، از این نوع سنگ است که در جدول ۱ خصوصیت‌های آن قابل مشاهده است.

مقایسه‌ی آزمون‌های نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، برزیلی، برزیلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها

جدول ۲. نتایج آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست

پارامتر	نیروی گسیختگی (KN)	چقرمگی شکست ($MPa\sqrt{m}$)
CB 1	۳/۰۳	۲/۹۸
CB 2	۲/۰۴	۲/۰۱
CB 3	۳/۲۳	۳/۱۷
AVE	۲/۷۷	۲/۷۲

پارامتر	نیروی مینیمم موضعی (KN)	چقرمگی شکست ($MPa\sqrt{m}$)
BDT1	۱۸/۹۲	۱/۹۴
BDT2	۲۳/۶۴	۲/۳۰
BDT3	۲۰/۳۸	۲/۰۹
AVE	۲۰/۶۴	۲/۱۱

پارامتر	نیروی مینیمم موضعی (KN)	چقرمگی شکست (Wang & Xing, 1999) ($MPa\sqrt{m}$)	چقرمگی شکست (Keles & Tutluoglu, 2011) ($MPa\sqrt{m}$)
FBD1	۲۴/۴۵	۲/۹۵	۲/۲۷
FBD2	۱۸/۸۵	۲/۴۳	۱/۸۶
FBD3	۲۱/۵۳	۲/۷۵	۲/۱۱
AVE	۲۱/۶۱	۲/۷۱	۲/۰۸



شکل ۵. شیوه‌ی انجام آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون



شکل ۶. نمونه‌های شکسته شده‌ی آزمون استوانه‌ای با شیار چورون



شکل ۷. شیوه‌ی انجام آزمون برزیلی

آزمون برزیلی

در این روش از نمونه‌هایی به قطر ۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۲۷ میلی‌متر و زاویه‌ی تماس فک‌ها با نمونه ۱۰ درجه ($\alpha=5^\circ$)، جهت تعیین چقرمگی شکست استفاده شده است. میانگین نیروی حداقل موضعی مشاهده شده در این آزمون $20/64 KN$ و چقرمگی شکست میانگین $2/11 MPa\sqrt{m}$ است. در جدول ۲ مقادیر چقرمگی شکست حاصل از آزمون نمونه‌ی برزیلی نشان داده شده است. در شکل ۷ نیز شیوه‌ی انجام تست این آزمون با دستگاه پرس صلب قابل مشاهده است. در این تست، ترک در مرکز نمونه ایجاد نشده و در مجاورت صفحات اعمال بار ایجاد می‌شود (مطابق شکل ۸)؛ که به دلیل عدم توزیع یکنواخت بار توسط صفحات قوسی است.



شکل ۱۰. نمونه‌ی شکسته شده‌ی آزمون برزیلی مسطح شده



شکل ۸. نمونه‌ی شکسته شده‌ی آزمون برزیلی

محل شروع شکستگی

آزمون برزیلی مسطح شده

در این روش از نمونه‌هایی به قطر ۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۲۷ میلی‌متر که در دو انتها با زاویه‌ی ۳۰ درجه مسطح شده باشد، استفاده می‌شود ($\alpha = 30^\circ$). مقدار میانگین نیروی مینیمم موضعی آزمون برزیلی مسطح شده ۲۱/۶۱ KN و چقرمگی شکست طبق معیار وانگ و زینگ $2/71 \text{ MPa}\sqrt{m}$ و مطابق معیار پیشنهادی کلس و توتلوگو $2/08 \text{ MPa}\sqrt{m}$ است؛ که اختلافی ۲۳ درصدی با یکدیگر دارند (Wang & Xing, 1999; Keles & Tutluoglu, 2011). مقادیر چقرمگی شکست حاصل از این آزمون در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین شیوه‌ی انجام تست نیز در شکل ۹ قابل مشاهده است. در شکل ۱۰ نیز نمونه‌ی شکسته شده‌ی این آزمون قابل مشاهده است.



شکل ۹. شیوه‌ی انجام آزمون برزیلی مسطح شده

۴. مدل‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی عددی آزمون‌ها، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^{۱۵}، استفاده شده است. تمامی مدل‌سازی‌های صورت گرفته به صورت سه‌بعدی است. روش تعیین چقرمگی شکست نیز در این نرم‌افزار با استفاده از روش انتگرال J ^{۱۶} است.

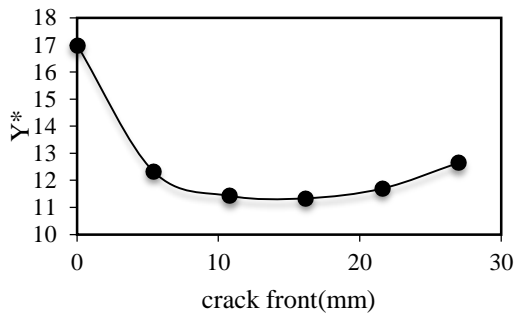
جهت مدل‌سازی دقیق‌تر، ابعاد نمونه‌ها مشابه ابعاد آن‌ها در آزمون‌ها در نظر گرفته شد. به منظور بهره‌گیری از مزایای تقارن موجود در نمونه، تنها نیمی از نمونه در آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون و یک چهارم نمونه در آزمون‌های برزیلی و برزیلی مسطح شده با استفاده از المان سینگولار مدل‌سازی شد.

همچنین به منظور تعیین چقرمگی شکست در تمامی روش‌ها، از ۱۰ کنتور انتگرالی در اطراف ترک استفاده شد. جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون در ابتدا مدل‌سازی می‌شود؛ از آنجاکه رابطه‌ی تحلیلی در این آزمون جهت تعیین چقرمگی شکست وجود دارد. برای آزمون برزیلی مقادیر چقرمگی شکست حاصل از مدل‌سازی عددی با مقدار چقرمگی شکست گوا و همکارانش مقایسه می‌شود (Guo et al., 1993). برای آزمون برزیلی مسطح شده نیز مقادیر چقرمگی شکست حاصل از مدل‌سازی عددی با مقادیر وانگ و زینگ و کلس و توتلوگو مقایسه می‌شود (Wang & Xing, 1999; Keles & Tutluoglu, 2011).

¹⁵ ABAQUS

¹⁶ J integral

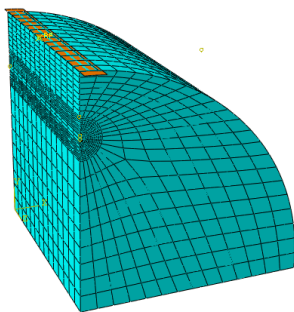
مقایسه‌ی آزمون‌های نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، برزلی، برزلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها



شکل ۱۳. نمودار پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش بر حسب جبهه‌ی ترک در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار چورون

۲.۴ مدل‌سازی عددی آزمون برزلی

مدل‌سازی آزمون برزلی جهت تعیین چقرمگی شکست از لحظه‌ی وقوع گسیختگی (یعنی از زمان شروع ترک مرکزی) در نمونه شروع می‌شود. حدود ۶۲۰۰ المان جهت مدل‌سازی استفاده شد (مطابق شکل ۱۴). برای مدل‌سازی رشد ترک از ۹ طول متفاوت ترک استفاده شد. شکل ۱۵ نشان دهنده‌ی تغییر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش با رشد ترک است. مطابق شکل ۱۵، نمودار از دو بخش تشکیل شده: یکی قبل از نقطه‌ی حداکثر که رشد ترک به صورت ناپایدار بوده و دیگری بعد از نقطه‌ی حداکثر که رشد ترک به صورت پایدار است. جهت تعیین ضریب شدت تنش از نقطه‌ی حداکثر، که نقطه‌ی گذر از رشد ناپایدار ترک به رشد پایدار آن است استفاده شد؛ زیرا این نقطه متناظر با نقطه‌ی حداقل موضعی در منحنی بار است.

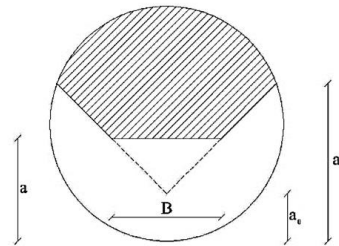


شکل ۱۴. شیوه‌ی مدل‌سازی و مش بندی آزمون برزلی

۱.۴ مدل‌سازی عددی نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار

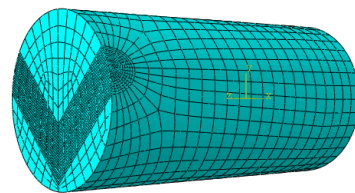
چورون

در مدل‌سازی صورت گرفته به صورت تقریبی از ۷۲۰۰ المان استفاده شده است. در شکل ۱۱، جبهه‌ی ترک در این نمونه نشان داده شده است. مدل‌سازی برای ۶ طول متفاوت جبهه‌ی ترک که مبین گسترش ترک است، صورت گرفت. در شکل ۱۲ نحوه‌ی مش‌بندی نمونه قابل مشاهده است.



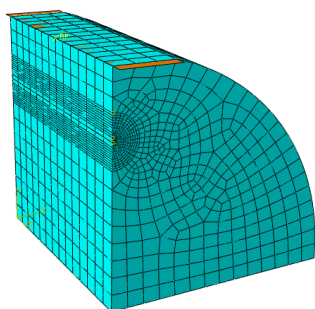
شکل ۱۱. نمایش جبهه‌ی ترک در نمونه‌های با شیار چورون

نقطه‌ی حداقل در شکل ۱۳، نشانگر طول بحرانی ترک است. قبل از این نقطه، گسترش ترک پایدار و بعد از آن گسترش ترک ناپایدار است. جهت تعیین چقرمگی شکست از این نقطه استفاده می‌شود. مقدار چقرمگی شکست با مدل‌سازی عددی $2/5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ حاصل شده است؛ که اختلافی ۸ درصدی با مقدار تحلیلی حاصل از معادله‌ی (۱) دارد.

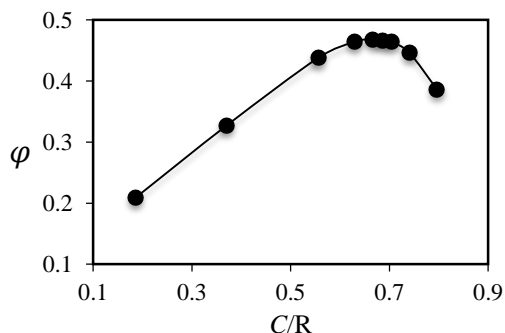


شکل ۱۲. مش‌بندی نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون

است؛ قبل از نقطه‌ی حداکثر که رشد ترک ناپایدار بوده و بعد از نقطه‌ی حداکثر که رشد ترک به صورت پایدار است. چقرمگی شکست در نقطه‌ی حداکثر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش محاسبه می‌شود. چقرمگی شکست در طول ترک ۱۸ میلی‌متر ($C/R=0/۶۷$) محاسبه می‌شود که نزدیک به صفحات انتهایی است.

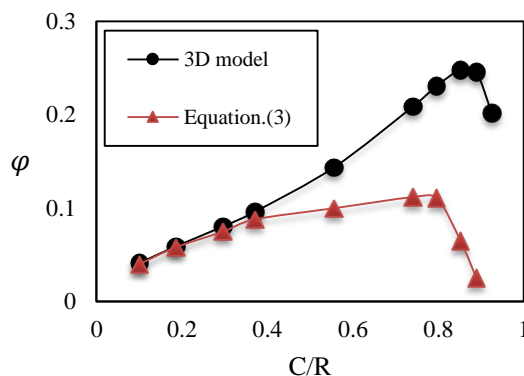


شکل ۱۶. شیوه‌ی مدل‌سازی و مش‌بندی آزمون برزیلی مسطح شده



شکل ۱۷. مقادیر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش با توجه به طول ترک برای نمونه‌ی برزیلی مسطح شده

با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی مقدار حداکثر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش $0/۴۷$ به دست آمده است؛ که نزدیکی بیشتری به مقدار $0/۴۴۵$ که توسط کِلِس و توتلوگو به دست آمده، دارد (Keles & Tutluoglu, 2011). این تفاوت جزئی نیز به دلیل تفاوت در حل سه بعدی صورت گرفته در این مقاله و حل دوبعدی با فرض کرنش صفحه‌ای صورت گرفته‌ی آن‌ها است. نقطه‌ی حداکثر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش در این آزمون، در نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه برابر با $0/۶۶$ ($C/R=0/۶۶$) اتفاق افتاده که نزدیک به صفحات



شکل ۱۵. مقایسه‌ی مقادیر عددی و تحلیلی پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش در آزمون برزیلی

همان‌طور که در شکل ۱۵ نیز قابل مشاهده است در طول‌های ترک کم (کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر)، نتایج عددی و تحلیلی انطباق مناسبی با یکدیگر دارند؛ زیرا رابطه‌ی تحلیلی پیشنهادی (رابطه‌ی ۴ و ۳) با فرض صفحه‌ی بی‌نهایت صورت گرفته است. اما برای طول‌های ترک بیشتر، نتایج تحلیلی قابل اطمینان نیستند. این نکته قبلاً توسط وانگ و زینگ در سال ۱۹۹۹ نیز اشاره شده بود (Wang & Xing, 1999).

نقطه‌ی حداکثر پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش در این آزمون در $C/R=0/۸۵$ اتفاق افتاده که بسیار نزدیک به صفحات اعمال بار است. مقدار چقرمگی شکست محاسبه شده به صورت عددی $۴/۷۵ MPa\sqrt{m}$ حاصل شد؛ که اختلاف زیادی با رابطه‌ی تحلیلی (۴) دارد.

۳.۴ مدل‌سازی عددی آزمون برزیلی مسطح شده

مدل‌سازی این آزمون مشابه آزمون برزیلی از زمان وقوع گسیختگی در نمونه (ایجاد ترک مرکزی در نمونه) انجام می‌شود. وانگ و زینگ و کِلِس و توتلوگو با استفاده از معیار گریفیت نشان دادند که برای زاویه‌ی مسطح شدگی انتهایی، ۳۰ درجه گسیختش ترک از مرکز نمونه صورت می‌گیرد (Wang & Xing, 1999; Keles & Tutluoglu, 2011).

به منظور مدل‌سازی ترک از ۶ طول ترک استفاده شد. تعداد المان‌های مورد استفاده در این روش تقریباً ۷۴۰۰ المان است (شکل ۱۶). مطابق شکل ۱۷ و مشابه آزمون برزیلی نمودار پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش شامل دو قسمت

مقایسه‌ی آزمون‌های نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، برزلی، برزلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها

دارد، محاسبه می‌شود. یک تفاوت بارز و بسیار مهم در این سه آزمون این است که در آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون با توجه به شکل ۱۳، به دلیل نوع شیار، ابتدا رشد ترک به صورت پایدار بوده سپس به صورت ناپایدار است.

این امر سبب می‌شود که در نقطه‌ای که چقرمگی شکست محاسبه می‌شود (نقطه‌ی حداقل منحنی پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش) چقرمگی شکست یک ترک طبیعی محاسبه شود؛ که این یک مزیت بسیار مهم برای این آزمون است. از طرف دیگر منحنی‌های ۱۷ و ۱۵ برخلاف شکل ۱۳، ابتدا به صورت صعودی بوده و سپس به صورت نزولی است. این بدان معنی است که در ابتدا رشد ترک به صورت ناپایدار بوده ولی در ادامه رشد ترک به صورت پایدار است. این پایداری ایجاد شده در رشد ترک، در نقطه‌ی محاسبه‌ی چقرمگی شکست به دلیل نزدیکی ترک به سطوح اعمال بار و تأثیر شرایط مرزی بر آن است که سبب تأثیر شرایط مرزی بر مقادیر چقرمگی شکست حاصل از هر دو آزمون برزلی و برزلی مسطح شده است. در واقع، پایدار شدن رشد ترک به دلیل تأثیر شرایط مرزی در نقطه‌ی محاسبه‌ی چقرمگی شکست بوده که نهایتاً منجر به تأثیر بر مقادیر چقرمگی شکست می‌شود.

جهت بررسی طول ناحیه‌ی پلاستیک از معیار تک محوره‌ی تنش کششی نرمال استفاده شده است. با توجه به شکننده بودن سنگ‌ها و برابر گرفتن تنش تسلیم کششی و مقاومت کششی آن‌ها، هر قسمت از نمونه که تنش موجود از مقاومت کششی فراتر رفته است، جزء منطقه‌ی پلاستیک در نظر گرفته می‌شود. در معیار تنش کششی نرمال، تنش عمود بر صفحه‌ی ترک با مقاومت کششی سنگ مقایسه می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، مطابق با معیار تنش کششی نرمال، طول ناحیه‌ی پلاستیک در مرکز نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون برابر ۵ میلی‌متر است، اما با حرکت به سمت کناره‌ها در طول ترک، این مقدار به صفر می‌رسد. به منظور تخمین حجم ناحیه‌ی پلاستیک اطراف ترک، شکل ناحیه‌ی پلاستیک در اطراف ترک دایره‌ای فرض شده (اگرچه در واقعیت دمبلی شکل است) و نسبت حجم ناحیه‌ی پلاستیک به حجم کل نمونه در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار چورون ۰/۳۸ درصد است. از طرفی مطابق شکل ۱۹ و ۲۰، طول ناحیه‌ی پلاستیک نوک ترک طبق معیار تنش کششی

اعمال بار است. مقدار چقرمگی شکست در این آزمون به روش عددی $2/2 MPa\sqrt{m}$ است که رابطه‌ی تحلیلی برای مقایسه با آن وجود ندارد اما، با نتیجه‌ی کلس و توتلوگو اختلافی ۵/۳ درصدی دارد (Keles & Tutluoglu, 2011).

۵. مقایسه‌ی چقرمگی شکست حاصل از

آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی

در جدول ۳ مقادیر چقرمگی شکست حاصل از تست‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی و همچنین میزان اختلاف آن‌ها قابل مشاهده است.

جدول ۳. مقایسه‌ی مقادیر آزمایشگاهی و عددی

آزمون	چقرمگی شکست آزمایشگاهی ($MPa\sqrt{m}$)	چقرمگی شکست عددی ($MPa\sqrt{m}$)	اختلاف (درصد)
CB	۲/۷۲	۲/۵	۸
BDT	۲/۱۱	۴/۷۵	۱۲۵
FBD	۲/۷۱ (Wang & Xing, 1999)	۲/۲	۱۸/۸
	۲/۰۸ (Keles & Tutluoglu, 2011)	۵/۳	

همان‌طور که در جدول ۳ نیز قابل مشاهده است، تنها در آزمون برزلی اختلاف قابل ملاحظه است که در ادامه علت آن بررسی خواهد شد.

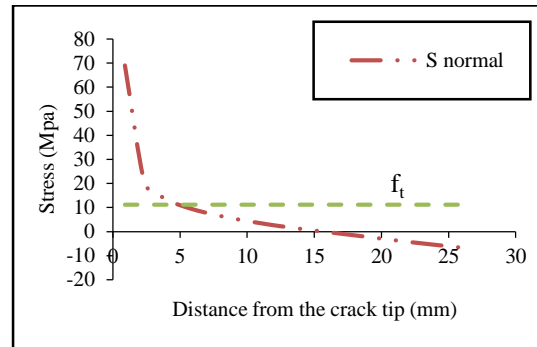
به لحاظ شرایط آماده‌سازی، بدون تردید ساده‌ترین آزمون آزمون برزلی است؛ از آنجا که نه تنها نیاز به ایجاد شیار ندارد بلکه نیازی به مسطح‌سازی انتهای آن نیز نیست. آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون با توجه به دشواری ایجاد شیار V شکل، به لحاظ دشواری در آماده‌سازی در مرحله‌ی بعد قرار دارد. نهایتاً آزمون برزلی مسطح شده با توجه به نیاز به دقت بسیار بالا در مسطح‌سازی انتهای آن، دشوارترین آزمون با توجه به شرایط آماده‌سازی است. در شکل‌های ۱۳، ۱۵، ۱۷ نمودار پارامتر بدون بُعد ضریب شدت تنش از دو بخش تشکیل می‌شود؛ بخش صعودی که در آن رشد ترک به صورت ناپایدار بوده و بخش نزولی که رشد ترک به صورت پایدار است. مقدار چقرمگی شکست در نقطه‌ی اکسترمم منحنی که بین بخش صعودی و بخش نزولی قرار

تخمین چقرمگی شکست در نمونه‌های برزیلی از فرض صفحه‌ی نامحدود در تعیین ضریب شدت تنش استفاده می‌شود، در صورتی که دیسک برزیلی دارای ابعاد محدود است (Wang & Xing, 1999). اختلاف مشاهده شده در نمودار شکل ۱۵ نیز به همین دلیل است. از طرف دیگر وانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ اشاره کردند که در آزمون برزیلی، شکست از صفحات کناری آغاز می‌شود (Wang et al., 2004). همچنین وانگ و زینگ در سال ۱۹۹۹ در مطالعات خود اشاره کردند که در آزمون برزیلی توزیع بار بر روی صفحات قوسی شکل به صورت یکنواخت نیست (Wang & Xing, 1999).

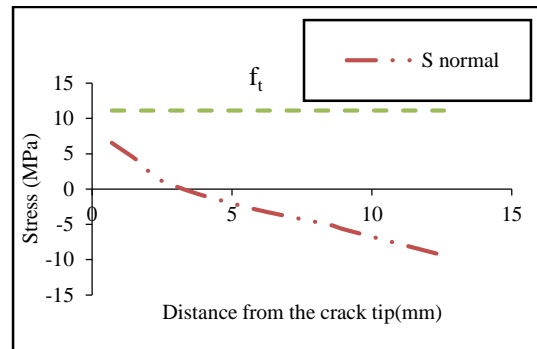
به همین دلیل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ی برزیلی حتی اگر رابطه‌ی تعیین ضریب شدت تنش تصحیح شود و برای صفحه‌ی محدود رابطه‌ی جدید ارائه شود، قابل اعتماد نیست و این آزمون جهت تعیین چقرمگی شکست، آزمون مناسبی نیست. از این رو نمونه‌های برزیلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست استفاده شدند که هم در آن‌ها تحت زاویه‌ی بارگذاری خاصی شکست از مرکز نمونه شروع می‌شود و هم توزیع بار بر روی صفحات انتهایی آنان یکنواخت است و از طرف دیگر رابطه‌ی تعیین ضریب شدت تنش در آن (رابطه‌ی ۵) مبتنی بر فرض صفحه‌ی محدود است.

به طور کلی در بین سه آزمون مورد بررسی در این مقاله، آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون با توجه به رشد پایدار ترک و در نتیجه ایجاد یک ترک طبیعی بدون ضخامت در نوک شیار قبل از محاسبه‌ی چقرمگی شکست، کم‌تر بودن ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد‌ی در اطراف شیار و همچنین عدم تأثیرپذیری رفتار ترک از شرایط مرزی، شرایط آماده‌سازی نسبتاً مناسب آن، بهترین آزمون جهت تعیین چقرمگی شکست است.

نرمال در مرکز نمونه و در گوشه‌ها، در آزمون برزیلی ۱/۶ میلی‌متر و در آزمون برزیلی مسطح شده ۲ میلی‌متر است که نشان از توزیع یکنواخت منطقه‌ی پلاستیک در طول ترک و بیش‌تر بودن ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در آزمون برزیلی مسطح شده دارد.



الف

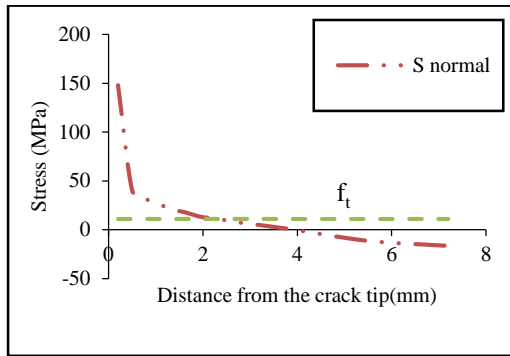


ب

شکل ۱۸. نمودار تنش بر حسب فاصله از نوک ترک در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار چورون
الف: مرکز نمونه ب: گوشه‌های نمونه

نسبت حجم ناحیه‌ی پلاستیک به حجم کل نمونه مطابق معیار تنش کششی نرمال در آزمون‌های برزیلی و برزیلی مسطح شده به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۵۵ درصد است. همان‌طور که قابل مشاهده است، نسبت حجم ناحیه‌ی پلاستیک به حجم کل نمونه، در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار چورون و نمونه‌های برزیلی تقریباً یکسان است و کم‌تر از نمونه‌ی برزیلی مسطح شده است که نشانگر صحت بیش‌تر فرض الاستیک خطی (LEFM) در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار چورون و نمونه‌ی برزیلی است. نکته‌ی بسیار مهم این است که جهت

مقایسه‌ی آزمون‌های نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، برزیلی، برزیلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها



ب

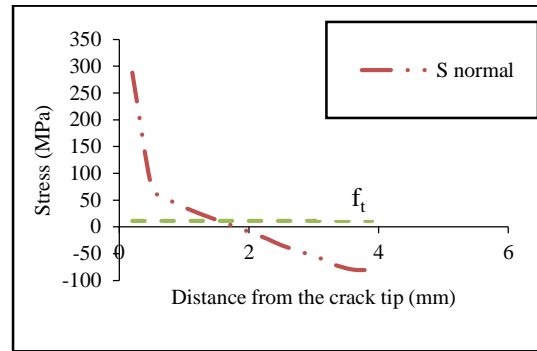
شکل ۲۰. نمودار تنش بر حسب فاصله از نوک ترک در نمونه‌های برزیلی مسطح شده
الف: مرکز نمونه ب: گوشه‌های نمونه

لازم به ذکر است که دلیل انتخاب سنگ بازالت برای آزمایش‌های این تحقیق، همگن و ایزوتروپ بودن این نمونه‌ها است. نظر به اینکه هدف اصلی این پژوهش بررسی تفاوت مقادیر چقرمگی شکست مود I حاصل از آزمون‌های مختلف و بررسی علت آن است، لذا پیش‌بینی می‌شود که نتایج حاصله کمتر وابسته به نوع سنگ باشد و به احتمال زیاد همین نتایج در سایر سنگ‌ها نیز معتبر است. در صورتی که نمونه‌های کاملاً متفاوتی از سنگ مد نظر باشد؛ توصیه می‌شود تست‌های مشابه بر روی این نمونه‌ها انجام شود.

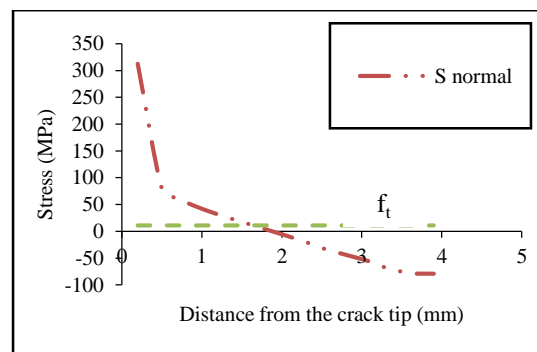
۶. نتیجه‌گیری

چقرمگی شکست یک پارامتر تعیین‌کننده در فرآیند شکست هیدرولیکی به منظور بررسی گسترش ترک است، که تعیین دقیق این پارامتر بر ابعاد زون شکسته شده در فرآیند شکست هیدرولیکی به شدت تأثیرگذار است. در این مقاله سه آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، نمونه برزیلی و نمونه برزیلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ بازالت مورد مطالعه، بررسی آزمایشگاهی و عددی قرار گرفتند که در پایان نتایج زیر حاصل شد.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی بیش‌ترین مقدار چقرمگی شکست مود I در بین این سه آزمون مربوط به نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون و کم‌ترین آن مربوط به نمونه‌ی برزیلی مسطح شده بود که نشانگر اختلاف بیست و چهار درصدی بین نتایج این آزمون‌ها بود.

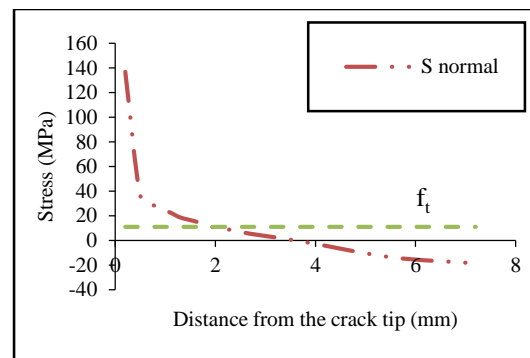


الف



ب

شکل ۱۹. نمودار تنش بر حسب فاصله از نوک ترک در نمونه‌های برزیلی
الف: مرکز نمونه ب: گوشه‌های نمونه



الف

مقادیر چقرمگی شکست همچنان متأثر از شرایط مرزی می‌باشند.

در نهایت در بین سه آزمون مورد بررسی در این مقاله جهت تعیین چقرمگی شکست مود I ، آزمون نمونه‌ی استوانه-ای با شیار چورون به دلیل رشد پایدار ترک و در نتیجه ایجاد یک ترک طبیعی در نوک شیار قبل از محاسبه‌ی چقرمگی شکست، کم‌تر بودن ناحیه‌ی پلاستیک ایجادی در اطراف شیار و عدم تأثیرپذیری رفتار ترک از شرایط مرزی، همچنین شرایط آماده‌سازی نسبتاً مناسب آن، بهترین آزمون جهت تعیین چقرمگی شکست است.

۷. سپاس‌گزاری

با سپاس از آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران که امکان ثبت رفتار کامل و دقیق نمونه‌ها را فراهم کرد.

۸. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۴ معرف نمادهای مورد استفاده در این مقاله است.

جدول ۴. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
K_{IC}	$pa\sqrt{m}$	چقرمگی شکست
F_{max}	N	نیرو
D	m	قطر نمونه
a	m	طول بحرانی ترک
a_0	m	طول اولیه‌ی ترک
a_1	m	طول نهایی ترک
B	m	طول جبهه‌ی ترک
S	m	فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها
Y_{min}^*	بدون واحد	پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش
α	°	زاویه‌ی بارگذاری
B'	$m^{-3/2}$	-
P_{min}	N	نیرو
C	m	نصف طول ترک
ϕ_{max}	بدون واحد	پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش
R	m	شعاع نمونه
t	m	ضخامت نمونه

با توجه به مدل‌سازی عددی صورت گرفته مقادیر چقرمگی شکست در این مقاله به نتایج چقرمگی شکست مطالعات کلس و توتلوگو در سال ۲۰۱۱ نزدیک‌تر بود (Keles & Tutluoglu, 2011). دلیل تفاوت جزئی مشاهده شده نیز، حل سه بعدی صورت گرفته در این مقاله و حل دوبعدی مرجع مذکور است.

ساده‌ترین شیوه‌ی آماده‌سازی مربوط به آزمون برزیلی و دشوارترین آماده‌سازی مربوط به روش برزیلی مسطح شده است.

رشد ترک در نمونه‌های برزیلی و برزیلی مسطح شده ابتدا به صورت ناپایدار و سپس به صورت پایدار است، که دلیل پایدار شدن رشد ترک در این دو آزمون، تأثیر شرایط مرزی بوده که این امر سبب تأثیر بر مقادیر چقرمگی شکست حاصل از این دو آزمون می‌شود.

رشد ترک در آزمون نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون ابتدا به صورت پایدار بوده و سپس به صورت ناپایدار است. علت رشد پایدار ترک، نوع شیار ایجادی است که سبب ایجاد یک ترک طبیعی در اطراف شیار شده و در نتیجه، چقرمگی شکست محاسبه شده، مربوط به یک ترک طبیعی است که مقادیر دقیق‌تری از چقرمگی شکست ارائه می‌کند.

جهت بررسی صحت نظریه‌ی الاستیک خطی، حجم ناحیه‌ی پلاستیک با معیار تک محوره‌ی تنش کششی نرمال تخمین زده شد که در نتیجه حجم ناحیه‌ی پلاستیک آزمون-های برزیلی و نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون تقریباً با یکدیگر برابر بوده و از آزمون برزیلی مسطح شده کم‌تر بودند. در نتیجه فرض الاستیک خطی برای دو آزمون برزیلی و نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون فرضی صحیح‌تر است.

آزمون برزیلی به دلیل فرض صفحه‌ی نامحدود جهت تعیین چقرمگی شکست، عدم تولید ترک در مرکز دیسک، عدم توزیع یکنواخت بار بر روی نمونه، همچنین تأثیر شرایط مرزی بر مقادیر چقرمگی شکست، آزمون مناسبی جهت تعیین چقرمگی شکست نیست.

اگرچه در آزمون برزیلی مسطح شده با توجه به مطالعات عددی، رابطه‌ی ارائه شده برای دیسک محدود است و توزیع بار نیز بر روی نمونه به صورت یکنواخت است و در نتیجه ترک در مرکز نمونه ایجاد می‌شود که سبب می‌شود مقادیر قابل اعتمادتری از آزمون برزیلی حاصل شود، اما در این آزمون

۹. مراجع

- Abe, H., Mura, T., & Keer, L. (1976). Growth rate of a penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks. *Journal of Geophysical Research*, 81, 5335-5340.
- Awaji, H., & Sato, S. (1978). Combined mode fracture toughness measurement by the disc test. *Journal of Engineering Material Technology*, 100(4), 175-182.
- Ayatollahi, M. R., & Akbardoost, J. (2013). Size and geometry effects on rock fracture toughness: Mode I fracture. *rock mechanic rock engineering*, 47, 677-687.
- Chang, S., Lee, C., & Jeon, S. (2002). Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens. *Engineering Geology*, 66(1-2), 79-97.
- Fowell, R. (1995). Suggested Method for Determining Mode I Fracture Toughness Using Cracked Chevron Notched Brazilian Discs (CCNBD) Specimens. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 32(1), 57-64.
- Funatsu, T., Shimizu, N., Kuruppu, M., & Matsui, K. (2014). Evaluation of Mode I Fracture Toughness Assisted by the Numerical Determination of K-Resistance. *rock mechanic rock engineering*, 48(1).
- Guo, H., Aziz, N., & Schmidt, L. (1993). Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test. *Engineering Geology*, 33(3), 177-188.
- Kaklis, K., Agioutantis, Z., Sarris, E., & Pateli, A. (2005). A Theoretical and Numerical Study of Discs with Flat Edges under Diametral Compression (Flat Brazilian Test). *5th GRACM International Congress on Computational Mechanics*. Limassol.
- Keles, C., & Tutluoglu, L. (2011). Investigation of proper specimen geometry for mode I fracture toughness testing with flattened Brazilian disc method. *international journal of fracture*, 69(2), 61-75.
- kuruppu, M. (1997). Fracture toughness measurement using chevron notched semi-circular bend specimen. *international journal of fracture*, 86(4), L33-L38.
- Kuruppu, M., Obara, Y., Ayatollahi, M., Chong, K., & Funatsu, T. (2014). ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 47(1), 267-274.
- Ouchterlony, F. (1982). Extension of the Compliance and Stress Intensity Formulas for The Single Edge Crack Round Bar in Bending. *Fracture Mechanics for Ceramics, Rocks And Concrete*, 237-256.
- Ouchterlony, F. (1988). Suggested Method for Determining Fracture Toughness Using Chevron Bend Specimens. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 25(2), 71-96.
- Settari, A. (1985). Quantitative analysis of factors influencing vertical and lateral fracture growth. *Low Permeability Reservoirs*, 117-134.
- Thiercelin, M. (1989). Fracture Toughness and Hydraulic Fracturing. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 26(3), 177-183.
- Tutluoglu, L., & Keles, C. (2011). Mode I fracture toughness determination with straight notched disk. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48(8), 1248-1261.

مقایسه‌ی آزمون‌های نمونه‌ی استوانه‌ای با شیار چورون، برزلی، برزلی مسطح شده جهت تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها

Valko, P., & Economides, M. (1995). *Hydraulic fracture mechanics*. New York: Wiley.

Wang, Q., & Xing, L. (1999). Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks. *Engineering Fracture Mechanics*, 64(2), 193-201.

Wang, Q., Jia, X., Kou, S., Zhang, Z., & Lindqvist, P.-A. (2004). The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(2), 245-253.