

مقایسه مقادیر چقرمگی شکست مد I سنگ بازالت در آزمون نمونه‌های استوانه‌ای و دیسکی با شیار مستقیم

مهدی موسوی^{۱*}؛ علی محمد پاکدامن^۲

۱- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد مهندسی معدن، گرایش مکانیک سنگ، دانشگاه تهران

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴

چکیده

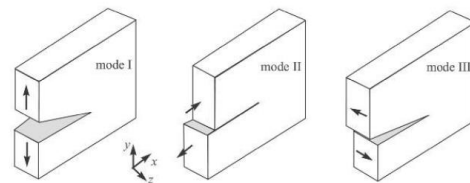
چقرمگی شکست مبین مقاومت در برابر گسترش ترک و یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک شکستی سنگ‌ها و سایر جامدات است. آزمون‌های مختلفی به منظور تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها ارائه شده که نتایج آن‌ها در عمل با یکدیگر تفاوت دارند، در این مقاله از بین روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست سنگ‌ها در مود I، دو آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم و نمونه دیسکی با شیار مستقیم به منظور تعیین میزان اختلاف مقادیر چقرمگی شکست انتخاب شدند. نتایج حاصل مبین اختلافی ۱۳/۵ درصدی، بین مقادیر چقرمگی شکست این دو آزمون که اختلاف چندان زیادی نبود، است. به منظور بررسی علل تفاوت مقادیر چقرمگی شکست، مدل‌سازی عددی این دو آزمون با روش المان محدود سه‌بعدی صورت گرفت. نتایج مدل‌سازی عددی نشان‌دهنده حجم یکسان ناحیه پلاستیک نوک ترک در این دو آزمون بود، در نتیجه صحت نظریه الاستیک خطی برای هر دو آزمون به یک مقدار است. عامل دیگری که برای بررسی علت تفاوت مقادیر چقرمگی شکست در این دو آزمون مورد بحث واقع شد، نسبت ضخامت شیار به طول نمونه بود که با توجه به کمتر بودن این نسبت در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم و در نتیجه صحیح‌تر بودن فرض شیار به عنوان یک ترک در این نمونه‌ها، آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم مقادیر قابل اعتمادتری از چقرمگی شکست ارائه می‌کند.

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

کلمات کلیدی

۱- مقدمه

چقرمگی شکست^۱ یا همان ضریب شدت تنش بحرانی^۲ یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک شکستی سنگ‌ها و سایر مواد که جزو ویژگی‌های ذاتی آن‌ها محسوب می‌شود، برای تعیین چقرمگی شکست آزمون‌های متفاوتی در دو حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی طراحی شده است که هر یک از این حالات مشتمل بر سه مود شکست است، مود I که در آن سطوح ترک نسبت به هم باز می‌شوند (مودکششی)^۳، مود II یا مود برشی که سطوح ترک بدون هیچ‌گونه بازشدگی، نسبت به هم در داخل صفحه می‌لغزند (مود برش داخل صفحه)^۴، مود III یا مود پارگی که در این حالت نیز سطوح ترک بدون هیچ‌گونه بازشدگی نسبت به هم در خارج از صفحه قطعه می‌لغزند (مود برش خارج از صفحه)^۵ و در نهایت مود ترکیبی^۶ که زمانی ایجاد می‌شود که مود حاصل به‌صورت ترکیبی از دو یا سه حالت بارگذاری مذکور باشد [۱].



شکل ۱: حالات مختلف جابه‌جایی صفحات ترک [۲]

آزمون‌های مختلفی به‌منظور تعیین چقرمگی شکست سنگ‌ها با شیار مستقیم در مود I ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم^۷ [۳]، آزمون نمونه دیسکی با شیار مستقیم^۸ [۴، ۵]، آزمون نمونه نیم‌دایره‌ای با شیار مستقیم^۹ که استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ در سال ۲۰۱۳ است [۶-۸] و آزمون نمونه برزلی با شیار مستقیم^{۱۰} [۹] اشاره کرد که مقادیر چقرمگی شکست مشاهده شده از آن‌ها در عمل انطباق مناسبی با یکدیگر ندارد.

از آنجاکه چقرمگی شکست یکی از ویژگی‌های ذاتی مواد است، مقادیر چقرمگی شکست مشاهده شده از آزمون‌های مختلف باید انطباق مناسبی برای یک نوع سنگ با یکدیگر داشته باشند، اما

در عمل با توجه به نوع آزمون مورد استفاده، مقادیر چقرمگی شکست حاصل با یکدیگر متفاوت‌اند. سان^{۱۱} و اجترلونی^{۱۲} که بر روی نمونه‌های گرانیتی مطالعه می‌کردند به این نتیجه رسیدند که مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های آزمون میله کوتاه^{۱۳} از نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم بیش‌تر است و چنانچه نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم پیش‌ترک‌دار شوند نتایجی نزدیک به نمونه‌های SR که تصحیح غیرخطی دارند ارائه می‌کنند [۱۰]. در تحقیقی دیگر، تاتلوگلو^{۱۴} و کلس^{۱۵} نیز که بر روی نمونه‌های آندزیت و مرمیت مطالعه می‌کردند، نشان دادند که مقادیر چقرمگی نمونه‌های نیم دایره‌ای با شیار مستقیم کم‌تر از نمونه‌های دیسکی با شیار چورون^{۱۶} است، همچنین بیان کردند که چقرمگی شکست نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم در نسبت‌های ضخامت به شعاع ۱ تقریباً برابر با چقرمگی شکست نمونه‌های نیم‌دایره‌ای با شیار مستقیم بوده و در نسبت‌های ضخامت به شعاع بیش از ۲ نیز چقرمگی شکست نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم مشابه به نمونه‌های دیسکی با شیار چورون است [۴]. در بسیاری از آزمون‌ها که ارائه رابطه تحلیلی امکان‌پذیر نیست، از روش‌های عددی برای تعیین چقرمگی شکست سنگ‌ها استفاده می‌شود. روش‌های متنوعی به‌منظور تعیین چقرمگی شکست به روش عددی در این آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به روش المان محدود^{۱۷} [۶-۱۱، ۱۴-۱۱]، المان محدود توسعه‌یافته^{۱۸} [۲]، المان مرزی^{۱۹} [۱۵]، المان مجزا^{۲۰} [۱۶] اشاره کرد. در مدل‌سازی عددی نمونه‌های سنگی در مراجع بیش‌تر از روش المان محدود استفاده شده است. آلکیلیسچیل^{۲۱} [۵] با بررسی ۴ نرم‌افزار المان محدود آباکوس^{۲۲}، انسیس^{۲۳} فرنس دوبعدی^{۲۴} و فرنس سه‌بعدی^{۲۵} بیان کرد که نتایج حاصل از این ۴ نرم‌افزار اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند، البته نرم‌افزار آباکوس حساسیت کم‌تری به تعداد المان‌ها از خود نشان می‌دهد. روش تعیین چقرمگی شکست در این نرم‌افزار با استفاده از انتگرال-جی^{۲۶} است.

آزمون‌های نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم و نمونه دیسکی با

$$Y = \frac{12.7527 \left(\frac{a}{D}\right)^{0.5} \left[1 + 19.646 \left(\frac{a}{D}\right)^{4.5}\right]^{0.5}}{\left[1 - \left(\frac{a}{D}\right)\right]^{0.25}} \quad (2)$$

اوپترونی اشاره کرد که رابطه ارائه شده توسط وی تنها برای نسبت طول شیار به عرض نمونه (a/D) ، بین صفر تا ۰٫۶ برقرار است [۳].

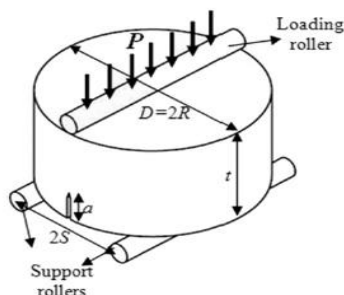
۲-۲- آزمون نمونه دیسکی تحت خمش با شیار مستقیم تتلواگلو^{۲۸} و همکاران در سال ۲۰۱۱ این آزمون را به منظور تعیین چقرمگی شکست ارائه کردند، این آزمون نیز شامل نمونه‌های دیسکی است که مطابق شکل ۳، در مرکز آن شیار مستقیمی ایجاد شده است [۴،۵].

به منظور تعیین چقرمگی شکست در این آزمون از رابطه ۳ استفاده می‌شود [۴،۵].

$$K_{IC} = Y \sigma_{cr} \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

که در آن:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{2DB}$$



شکل ۳: هندسه آزمون نمونه دیسکی با شیار مستقیم [۴]

۳- آزمایش‌ها

۳-۱- خصوصیات نمونه‌های مورد آزمایش

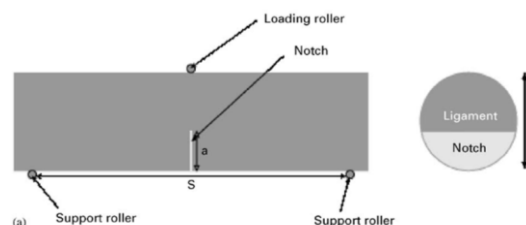
نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق از جنس بازالت‌اند که در جدول ۱ به خصوصیات آن‌ها اشاره شده است. علت انتخاب این نوع سنگ یکنواختی بسیار زیاد خصوصیات سنگ در نمونه‌های مختلف آن است.

شیار مستقیم از آزمون‌هایی نسبتاً ساده از نظر آماده‌سازی و روند انجام است که در این مقاله به دلیل یکسان بودن نوع شیار ایجاد شده به بررسی مقادیر چقرمگی شکست آن‌ها و میزان تفاوت این مقادیر، پرداخته شده است. مقادیر چقرمگی شکست حاصل از این دو روش در آزمایشگاه و با استفاده از روابط پیشنهادی تعیین شد، سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و نتایج آزمایشگاهی، به بررسی علل تفاوت مقادیر چقرمگی شکست، در این دو آزمون پرداخته شد.

۲- آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست

۲-۱- آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم

در سال ۱۹۸۲، اوپترونی^{۲۷} آزمون را برای تعیین چقرمگی شکست مواد سنگی ارائه کرد که ویژگی اصلی آن استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای توپر با شیار مستقیم (مطابق شکل ۲) به منظور تعیین چقرمگی شکست سنگ‌ها بود که با توجه به شکل نمونه‌ها، آزمونی مناسب برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های سنگی بود [۳].



شکل ۲: مشخصات هندسی آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم [۳]

رابطه ۱ به منظور تعیین چقرمگی شکست توسط اوپترونی ارائه شد [۳].

$$K_{IC} = 0.25 \left(\frac{S}{D}\right) Y \frac{P_{max}}{D^{1.5}} \quad (1)$$

اگرچه پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش به وضوح با نسبت دهانه به قطر تغییر می‌کند اما برای نسبت دهانه به قطر ۳٫۳۳، این عامل به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

جدول ۱: خصوصیات نمونه مورد استفاده برای انجام آزمایش

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

جدول ۲: مقادیر چقرمگی شکست حاصل از دو آزمون

چقرمگی شکست (MPa√m)	نیروی گسیختگی (KN)	پارامتر
۱/۷۸۵	۴/۲۱۷	SEC 1
۲/۸۲۴	۶/۶۷۱	SEC 2
۲/۲۷۰	۵/۳۴۳	SEC 3
۲/۲۹	۵/۴۲	SEC AVE
۲/۰۸۳	۹/۴۱۷	SNDB 1
۲/۱	۹/۴۹۶	SNDB 2
۱/۷۳۶	۷/۸۵۲	SNDB 3
۱/۹۷	۸/۹۲	SNDB AVE

۳-۲- خصوصیات ابزار مورد استفاده

به منظور ایجاد شیار در نمونه‌ها از اره با ضخامت ۱/۵۸ میلی‌متر استفاده شد، همچنین به منظور اعمال بار بر نمونه‌ها از دستگاه پرس صلب ۸۱۵ MTS، استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها به منظور جلوگیری از تأثیرات آهنگ بارگذاری و همچنین اثرات دینامیکی بر چقرمگی شکست با سرعت ۰/۰۰۲ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفت.

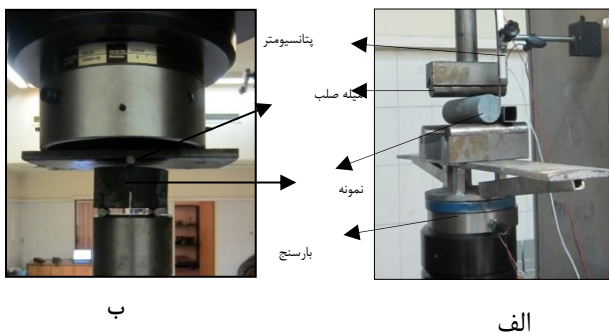
به منظور ثبت دقیق بار نیز از بارسنج با ظرفیت ۵ تن استفاده شد. تمامی آزمون‌ها به منظور تعیین چقرمگی شکست سه بار تکرار شدند.

۳-۳- نتایج آزمایش‌ها

به منظور تعیین چقرمگی شکست در آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم نمونه‌هایی به قطر ۵۴، طول ۲۱۶ و فاصله تکیه‌گاهی ۱۸۰ میلی‌متر (نسبت دهانه به قطر ۳/۳۳) مورد استفاده قرار گرفته‌اند، شیار ایجاد شده مستقیم و به طول ۱۱/۷ میلی‌متر در مرکز نمونه است.

همچنین در آزمون نمونه دیسکی با شیار مستقیم از نمونه‌هایی نیم‌دایره‌ای به قطر ۷۴ و ضخامت ۳۷/۵ و طول دهانه ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است، در این آزمون شیار ایجاد شده مستقیم و به طول ۱۸ میلی‌متر در مرکز نمونه است.

نتایج حاصل از مقادیر چقرمگی شکست مشاهده شده از این دو آزمون، در جدول ۲ قابل مشاهده است. در شکل ۴ شیوه انجام آزمون نشان داده شده است.



شکل ۴: شیوه انجام دو آزمون. الف: نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم، ب: نمونه دیسکی با شیار مستقیم

۴- مدل‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی عددی آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS استفاده شد. برای تعیین چقرمگی شکست از روش انتگرال-جی و به منظور مدل‌سازی ترک از المان سینگولار در نوک ترک استفاده شد. به دلیل وجود تقارن در هندسه نمونه و شرایط مرزی، تنها نیمی از نمونه مدل‌سازی شد. از ۱۰ کنتور انتگرالی در اطراف ترک برای تعیین ضریب شدت تنش در نمونه استفاده شد.

۴-۱- مدل‌سازی نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم

به منظور مدل‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم از ابعادی مشابه آزمون‌های انجام شده، استفاده شد. تعداد المان‌های مورد استفاده در این آزمون به منظور مدل‌سازی در حدود ۵۶۰۰ المان است.

با توجه به صعودی بودن نمودار پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش در این نمونه‌ها (مطابق شکل ۵)، رشد ترک به صورت ناپایدار است. مقدار چقرمگی شکست با مدل‌سازی عددی $21285 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ حاصل شده است که اختلافی کم‌تر از ۱ درصد (۰/۱۸۵ درصد) با روند تحلیلی (معادله ۲) دارد.

۴-۲- مدل‌سازی نمونه دیسکی با شیار مستقیم

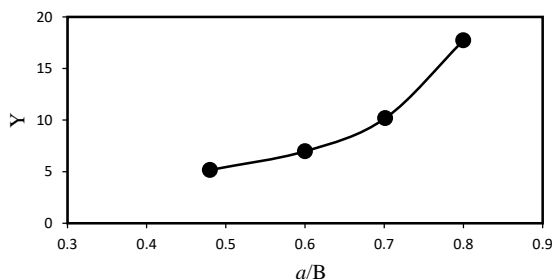
به‌منظور مدل‌سازی نمونه دیسکی با شیار مستقیم نیز از ابعادی مشابه ابعاد آزمایش‌ها و تقریباً ۹۳۰۰ المان استفاده شد. برای مدل‌سازی ترک نیز از ۵ طول متفاوت ترک استفاده شد و سپس مقادیر پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش برای این ۵ طول ترک با رابطه ۵ محاسبه شد.

$$Y = \frac{K_I(2DB)}{P\sqrt{\pi a}} \quad (5)$$

با توجه به صعودی بودن نمودار پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش (مطابق شکل ۶)، در این نمونه نیز رشد ترک به صورت ناپایدار است.

جدول ۴: مقادیر پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش در نمونه دیسکی با شیار مستقیم

طول ترک (a/D)	Y
۰/۱۸	۵/۱۶
۰/۲۲۵	۶/۹۸
۰/۲۶۳	۱۰/۱۸
۰/۳	۱۷/۷۲
۰/۳۳۸	۶۲/۲۴



شکل ۶: نمودار مقادیر پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم

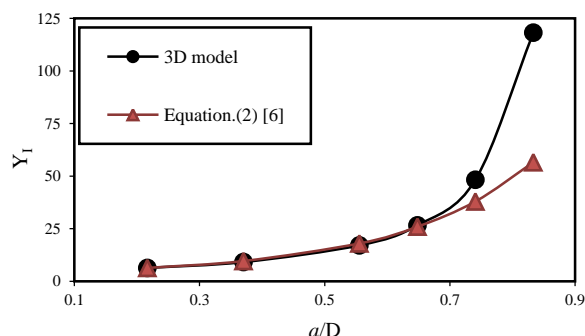
مدل‌سازی برای ۶ طول متفاوت ترک صورت گرفت و مقادیر پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش با استفاده از رابطه ۴ به صورت عددی محاسبه و با مقادیر حاصل از رابطه ۲ که به صورت تحلیلی است، مقایسه شدند.

$$Y = \frac{K_I D^{1.5}}{0.25 \left(\frac{S}{D}\right) P} \quad (4)$$

در جدول ۳ مقادیر پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش به صورت عددی و تحلیلی نشان داده شده است. نتایج مبین اختلافی ناچیز تا نسبت طول ترک به قطر نمونه (a/D)، ۰/۶۵ است، اما برای مقادیر بیش‌تر این نسبت انطباق مناسبی با رابطه تحلیلی مشاهده نمی‌شود زیرا رابطه تحلیلی ارائه شده توسط اوچترلونی تنها تا بازه نسبت طول ترک به قطر نمونه ۰/۶ معتبر است.

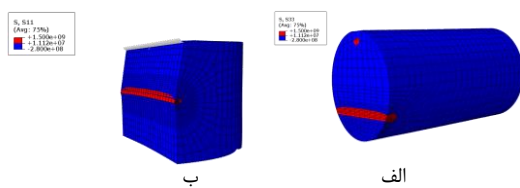
جدول ۳: مقایسه مقادیر عددی و تحلیلی پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم

طول شیار (متر)	(a/D)	Y (تحلیلی)	Y (عددی)	اختلاف (%)
۰/۱۱۷	۰/۲۱۶۶	۶/۳۷	۶/۳۵۸	۰/۱۸۵
۰/۲	۰/۳۷۰۳۷	۹/۶۴	۹/۱۵۴	۵/۰۳
۰/۳	۰/۵۵۶	۱۸/۰۱۵	۱۷/۱۱۳	۵/۰۱
۰/۳۵	۰/۶۴۸	۲۵/۹۶	۲۶/۵۷	۲/۳۶۳۸
۰/۴	۰/۷۴	۳۷/۹۶	۴۸/۲۸	۲۷/۱۸
۰/۴۵	۰/۸۳	۵۶/۵۹۶	۱۱۸/۲۰	۱۰/۸۸۵



شکل ۵: نمودار مقایسه مقادیر پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش به صورت عددی و تحلیلی در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم

در مراجع [۱۰، ۱۶]، اشاره شده که به منظور دستیابی به مقادیر صحیح تر چقرمگی شکست و در نتیجه ایجاد یک ترک طبیعی و با ضخامت ناچیز از چند چرخه بارگذاری- باربرداری بر روی نمونه استفاده شود، اما چون اعمال چرخه های بارگذاری- باربرداری و همچنین کنترل رشد پایدار ترک در نمونه های شکننده همچون سنگ ها کاری دشوار است، بهتر است صحت همین نمونه ها مورد ارزیابی واقع شود.



شکل ۷: ناحیه پلاستیک ایجادی طبق معیار تنش کششی نرمال، الف: نمونه های استوانه ای با شیار مستقیم، ب: نمونه های دیسکی با شیار مستقیم (ناحیه قرمز مبین نواحی پلاستیک شده است).

با توجه به رشد ناپایدار ترک در این دو آزمون، مقاومت در برابر گسترش شیار ایجادی به عنوان چقرمگی شکست این دو آزمون گزارش می شود. نسبت ضخامت شیار به طول نمونه برای نمونه های دیسکی با شیار مستقیم تقریباً سه برابر نمونه های استوانه ای با شیار مستقیم است. در واقع فرض کردن شیار ایجادی به عنوان ترک در نمونه های استوانه ای با شیار مستقیم فرضی صحیح تر بوده که سبب می شود مقادیر چقرمگی شکست این آزمون در مقایسه با نمونه های دیسکی با شیار مستقیم بیش تر و البته صحیح تر باشند.

همان طور که اشاره شد این دو آزمون به لحاظ هندسه شیار و نوع بارگذاری (خمشی) مشابه یکدیگر بودند، از این رو پیش بینی شد مقادیر چقرمگی شکست حاصل از آن ها تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته باشد که نتایج حاصل نیز، تأییدکننده این پیش بینی بود. از آنجاکه تفاوت مقادیر چقرمگی شکست در این دو تست ۱۳/۵ درصد بود که تفاوت ناچیزی است، برای بررسی علت این تفاوت ناچیز، ابتدا مدل سازی عددی صورت گرفت که نشان داد صحت فرضیه الاستیک خطی برای هر دو نمونه

به منظور مقایسه نتایج مدل سازی عددی در این آزمون رابطه تحلیلی وجود ندارد و با توجه به صحت نتایج آزمون نمونه استوانه ای با شیار مستقیم (بخش ۴-۱)، اعتبار نتایج این آزمون تأیید می شود. مقدار چقرمگی شکست در این آزمون با مدل سازی عددی $1.97 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ حاصل شد.

۵- بحث

با توجه به نتایج آزمون های آزمایشگاهی، مقادیر چقرمگی شکست حاصل از این دو آزمون تا 13.5 درصد با یکدیگر متفاوت است (مقدار چقرمگی شکست نمونه های استوانه ای با شیار مستقیم و نمونه های دیسکی با شیار مستقیم به ترتیب $2.29 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ و $1.97 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ بودند)، اختلاف مشاهده شده بین مقادیر چقرمگی شکست این دو آزمون به دلیل شباهت نمونه ها و نوع بارگذاری که به صورت خمشی است، همچنین نوع شیار که به صورت مستقیم است، اختلاف زیادی نیست اما در این بخش به تحلیل وجود این اختلاف با استفاده از مدل سازی عددی، پرداخته می شود.

در ابتدا برای تعیین ناحیه پلاستیک نوک ترک^{۲۹} از معیار تنش کششی نرمال استفاده می شود، به این ترتیب که هر جا تنش های عمود بر صفحه ترک از مقاومت کششی نمونه تجاوز کرد، آن ناحیه وارد منطقه پلاستیک شده است. در شکل ۷ ناحیه پلاستیک نوک ترک مطابق با معیار تنش کششی نرمال نشان داده شده است. به منظور تخمین حجم ناحیه پلاستیک نوک ترک، شکل ناحیه پلاستیک در نوک ترک دایره ای فرض شد (البته در واقعیت دهمبلی شکل است).

نسبت حجم ناحیه پلاستیک به حجم کل نمونه در نمونه های با شیار استوانه ای با شیار مستقیم و دیسکی با شیار مستقیم به ترتیب 0.71 و 0.64 درصد است که بیانگر تفاوت ناچیز این نسبت بین این دو نمونه است، پس با توجه به یکسان بودن تقریبی نسبت حجم ناحیه پلاستیک ایجادی به حجم کل نمونه در دو آزمون، صحت به کارگیری فرضیه الاستیک خطی برای هر دو نمونه به یک مقدار است و نسبت حجم ناحیه پلاستیک نوک ترک به حجم کل نمونه عامل این تفاوت نیست.

پلاستیک ایجاد می‌شود در نوک ترک در نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم و استوانه‌ای با شیار مستقیم تفاوت چندانی با یکدیگر نداشت. به همین دلیل کاربرد نظریه الاستیک خطی برای هر دو نوع نمونه صحت یکسانی دارد و نسبت حجم ناحیه پلاستیک به حجم کل نمونه عامل تفاوت در مقادیر چقرمگی شکست نیست.

- پایداری رشد ترک در هر دو نمونه با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد که با توجه به مستقیم بودن شیار ایجاد می‌شود، رشد ترک در هر دو نمونه به صورت ناپایدار بود. از این رو، ناپایداری رشد ترک نیز عامل تفاوت مقادیر چقرمگی شکست در این دو آزمون نبود.

- با توجه به این که نسبت ضخامت شیار به طول نمونه، در نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم تقریباً سه برابر نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم است، فرض کردن شیار ایجاد می‌شود به عنوان ترک در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم فرضی صحیح‌تر است از این رو مقادیر چقرمگی شکست مشاهده شده از آن مقادیر صحیح‌تری است.

۷- تشکر و قدردانی

با سپاس از آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران که امکان انجام تست‌ها و ثبت کامل رفتار نمونه‌ها را با دقت مناسب امکان‌پذیر کرد.

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
P	N	بار اعمالی
Y	-	پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش
D	m	قطر نمونه
a	m	طول شیار ایجاد می‌شود
S	m	طول دهانه (فاصله بین تکیه‌گاه‌ها)
B	m	ضخامت نمونه دیسکی
σ_{cr}	MPa	تنش بحرانی در نمونه دیسکی با شیار مستقیم
K_I	$MPa\sqrt{m}$	ضریب شدت تنش مود I
K_{IC}	$MPa\sqrt{m}$	چقرمگی شکست مود I

تقریباً یکسان است سپس، پایداری رشد ترک بررسی شد که با توجه به یکسان بودن نوع شیار نیز رشد ترک در هر دو نمونه مشابه یکدیگر و به صورت ناپایدار بود و در نهایت نسبت ضخامت شیار به طول نمونه بررسی شد که این عامل برای نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم کم‌تر بود و نشان‌دهنده این واقعیت بود که فرض شیار ایجاد می‌شود به عنوان یک ترک در این نمونه‌ها صحیح‌تر است، از این رو مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم قابل‌اعتمادتر از نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم است، اگرچه مقادیر چقرمگی شکست حاصل از آن‌ها تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی مقادیر چقرمگی شکست نمونه بازالت از دو آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم و نمونه دیسکی با شیار مستقیم استفاده شد که در پایان نتایج زیر حاصل شد:

- نتایج مبین اختلافی ۱۳/۵ درصدی بین مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم و نمونه دیسکی با شیار مستقیم بود که اختلاف کم مشاهده شده در بین این دو نمونه به دلیل مشابهت هندسه، شرایط بارگذاری و نوع شیار در این دو آزمون است.

- نیروی موردنیاز برای گسیختگی نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم بیش از نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم است.

- به منظور تحلیل و بررسی نتایج از مدل‌سازی عددی آزمون‌ها به صورت سه‌بعدی و روش المان محدود استفاده شد که نتایج مدل‌سازی صورت گرفته مبین انطباق مناسب (اختلافی ۵ درصدی) بین مقادیر تحلیلی و عددی پارامتر بدون بعد ضریب شدت تنش در نمونه‌های استوانه‌ای با شیار مستقیم است. در نمونه‌های دیسکی با شیار مستقیم نیز چقرمگی شکست به صورت عددی و با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته در آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار مستقیم محاسبه شد.

- به منظور تخمین ناحیه پلاستیک نوک ترک از معیار تنش کششی نرمال استفاده شد که با توجه به آن نسبت حجم ناحیه

۹- مراجع

International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 30, pp. 821-824.

[10] Sun, Z. and Ouchterlony, F., (1986) "Fracture toughness of stripa granite cores", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 23, pp. 399-409.

[11] Alkilicgil, C., (2010), "Development of Specimen Geometries for Mode I Fracture Toughness Testing With Disk Type Rock Specimens", Ph.D. dissertation, Middle East Technical University, Ankara.

[12] 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, vol. 169, pp. 61-75.

[13] Wang, Q., Jia, X., Kou, S., Zhang, Z. and Lindqvist, P.A., (2003) "More accurate stress intensity factor derived by finite element analysis for the ISRM suggested rock fracture toughness specimen—CCNBD", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 40, pp. 233-241

[14] Wang, Q., Jia, X., Kou, S., Zhang, Z. and 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, vol. 41, pp. 245-253.

[15] Wang, Q. and Xing, L., (1999), "Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks", Engineering Fracture Mechanics, vol. 64, pp. 193-201.

[16] Funatsu, T., Shimizu, N., Kuruppu, M. and Matsui, K., (2014), "Evaluation of mode I fracture toughness assisted by the numerical determination of K-Resistance", Rock Mechanic and Rock Engineering.

[1] Saouma, V.E., (2000), "Fracture Mechanics", Lecture notes CVEN-6831, University of Colorado, USA.

[2] Mohammadi, S., (2008), "Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures", Blackwell Publishing, UK.

[3] 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, pp. 237-256.

[4] Tutluoglu, L. and Keles, C., (2011), "Mode I fracture toughness determination with straight notched disk", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 48, pp. 1248-1261.

[5] Alkilicgil, C., (2006), "Development of a New Method for Mode I Fracture Toughness Test", M.Sc thesis, Middle East Technical University, Ankara.

[6] Kuruppu, M. D., Obara, Y., Ayatollahi, M. R., Chong, K. P. and Funatsu, T., (2013), "ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen", ISRM Suggested Method.

[7] Chong, K., Kuruppu, M. and Kuszmaul, J., (1987), "Fracture toughness determination of layered materials", Engineering Fracture Mechanics, vol. 28, pp. 43-54.

[8] Lim, I. L., Johnston, I. W., Choi, S. K., Boland, J. N., (1994), "Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending", Part I Mode I, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 31, pp. 185-197.

[9] Fowell, R., Xu, C., (1993), "The cracked chevron notched brazilian disc test- geometrical considerations for practical rock fracture toughness measurement",

- 1-Fracture Toughness
- 2- Critical Stress Intensity Factor (CSIF)
- 3- Opening Mode
- 4- Shearing Mode
- 5- Tearing Mode
- 6- Mixed Mode
- 7-Single Edge Crack Round Bar Bending Test (SECRBB)
- 8- Straight Notch Disk Bend Test (SNDB)
- 9- Semi-circular Bend Test (SCB)
- 10-Crack Straight Through Brazilian Disc (CSTBD)
- 11-Sun
- 12-Ouchterlony
- 13-Short Rod (SR)
- 14 -Tutluoglu
- 15- Keles
- 16- Cracked Chevron Notch Brazilian Disc (CCNBD)
- 17- Finite Element Method (FEM)
- 18- Extended Finite Element Method (XFEM)
- 19- Boundary Element Method (BEM)
- 20- Distinct Element Method (DEM)
- 21- Alkilicgil
- 22- ABAQUS
- 23- ANSYS
- 24- FRANC 2D
- 25- FRANC 3D
- 26- J-Integral
- 27-Ouchterlony
- 28-Tutluoglu
- 29- Fracture Process Zone (FPZ)