

بکارگیری روش شبه- فشرده کششی برای تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ گرانیات

شهربانو صیادی^{۱*}، علیرضا باغبانان^۲ مرتضی جوادی^۳، جوردی دلگادو- مارتین^۴، سید حمید هاشم‌الحسینی^۵

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان (مسئول مکاتبات)، sayadiasal@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، bagh110@iut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، mortezjavadi@gmail.com

۴- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اکرونی، کرونی، ttscopo@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، hamidh@iut.ac.ir

چکیده

چقرمگی شکست مود I، بعنوان یک مشخصه در فرآیند آغاز و گسترش ترک، ویژگی مهمی در مصالح سنگی بشمار می‌آید. تاکنون روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مود I معرفی شده است. تسهیل فرآیندهای مرتبط با آماده‌سازی نمونه و تدقیق نتایج آزمایش از طریق اعمال کنترل هرچه بیش‌تر در حین فرآیند شکست، همواره به عنوان مؤلفه‌های هدف در پیشنهاد روش‌های جدید تعیین چقرمگی شکست مود I، مورد توجه قرار می‌گیرد. در این راستا، در این مطالعه مقادیر چقرمگی شکست مود I با استفاده از یک روش جدید پیشنهادی موسوم به آزمایش شبه‌فشرده کششی (pCT) ارزیابی شده و میزان و نحوه تأثیرپذیری چقرمگی شکست مود I، حاصل از روش مذکور نسبت به اندازه نمونه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های گرانیات با چهار قطر مختلف و با تکرارپذیری شش آزمایش در هر قطر برای آزمایش pCT، آماده‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفته است. برای هر یک از ۲۴ نمونه مورد آزمایش، علاوه بر ثبت نتایج مربوط به بارگذاری و جابجایی، رویدادهای آوایی در حین فرآیند شکست توسط تجهیزات انتشار آوایی نیز بصورت همزمان ثبت شده است. ابتدا نتایج مربوط به چقرمگی شکست هر نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته، سپس با بررسی پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست به تحلیل اثر اندازه پرداخته شده است. در نهایت، نتایج حاصل از روش انتشار آوایی به عنوان ابزار رفتارنگاری فرآیند شکست در آزمایش‌های انجام شده مورد استفاده قرار گرفته و با بررسی پارامترهای اثرگذار به تحلیل آن پرداخته شده است. روند تغییرات پارامترهای انتشار آوایی بخوبی فرآیند مکانیکی رخ داده در نمونه‌های تحت آزمایش را نشان می‌دهد و تغییرات کمی مشاهده شده در فعالیت‌های انتشار آوایی، به لحاظ هم‌زمانی با تغییر رفتار مکانیکی در طول فرآیند بارگذاری مطابقت دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد رابطه مستقیم بین چقرمگی شکست مود I و اندازه نمونه برقرار است. همچنین اثر اندازه نیز تا قطر مشخصی در روند تغییرات K_{IC} مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست مود I، آزمایش شبه فشرده کششی (pCT)، روش انتشار آوایی، فرآیند شکست سنگ ترد، اثر اندازه.

استفاده گسترده از توده سنگ به عنوان محیط میزبان در طیف وسیعی از فعالیت‌های ژئوتکنیکی، کاربردهای صنعتی و بهینه‌سازی طراحی‌های مهندسی، مکانیک شکست مصالح سنگی را به مبحثی پراهمیت در فرآیندهای مهندسی مرتبط با پایداری سازه‌های سنگی بدل کرده است. بررسی و کنترل آغاز و گسترش ترک در هریک از فعالیت‌های ذکر شده، که غالباً در محیط سنگی حاوی شکستگی‌های طبیعی با انواع و اندازه‌های مختلف و تحت بارگذاری‌های مکانیکی، هیدرولیکی و حرارتی بصورت منفرد یا توأمان قرار دارند، موضوعی کلیدی است.

گسترش ترک در سنگ توسط چقرمگی شکست کنترل می‌شود. چقرمگی شکست ضریب شدت تنش بحرانی در نوک یک ترک تیز بیضوی به‌هنگام انتشار ترک به‌طور ناگهانی است. مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در بارگذاری مود I (کششی خالص)، تحت شرایط کرنش صفحه‌ای که کمترین مقدار چقرمگی در ضخامتی مشخص است، یک ویژگی ذاتی ماده تلقی و تحت عنوان چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای (K_{IC}) شناخته می‌شود. K_{IC} مهم‌ترین و مرتبط‌ترین نوع چقرمگی در مطالعه فرآیند شکست سنگ است؛ چراکه مصالح سنگی اساساً مقاومت کم‌تری در حالت کششی نسبت به دو حالت دیگر بارگذاری از خود نشان می‌دهد

روش‌های متعددی بر پایه بارگذاری به شیوه خمشی، فشاری و کششی برای تعیین K_{IC} در سنگ پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش روش میله کوتاه^۱ [۱]، آزمون خمش نمونه استوانه‌ای با شیار چورون^۲ [۱، ۲]، نمونه نیم‌دایره‌ای با شیار مستقیم^۳ [۳-۶]، نمونه برزیلی با شیار مستقیم^۴ [۷، ۸]، نمونه برزیلی با شیار چورون^۵ [۹، ۱۰]، نمونه نیم‌دایره‌ای با شیار چورون^۶ [۱۱] و دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی^۷ [۱۲، ۱۳] اشاره کرد. از بین این روش‌ها، چهار روش میله کوتاه، آزمون نمونه استوانه‌ای با شیار چورون، آزمون نمونه نیم‌دایره‌ای با شیار مستقیم و آزمون نمونه برزیلی با شیار چورون به عنوان استاندارد پیشنهادی توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۸ ارائه شده است. اگرچه رویه این آزمایش‌ها بصورت استاندارد درآمده، با این حال بکارگیری این روش‌ها در مقاصد کاربردی گاه‌ها با مشکلاتی روبرو است. فرآیند آماده‌سازی وقت‌گیر نمونه‌ها، احتمال وقوع شکست زود هنگام^۹ در نمونه، دشواری‌های موجود در تأمین ابعاد ثابت شیار اولیه در گستره تلورانس مجاز [۱۴]، گستره وسیع ابعادی متأثر از اثر اندازه^{۱۰} و اعمال بار کششی بصورت غیر مستقیم از جمله این مشکلات است. وجود هریک از این موارد در جریان انجام آزمایش می‌تواند به عنوان یک عامل افزایش‌دهنده عدم قطعیت، اعتبار مقدار چقرمگی شکست تخمینی را تحت الشعاع قرار دهد. با هدف رفع قسمت عمده‌ای از این مشکلات، مونیز-ایبانیز^{۱۱} و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۰، روشی جدیدی با نام آزمون شبه‌فشرده کششی^{۱۲} (pCT) را، برای ارزیابی و تخمین چقرمگی شکست سنگ و سایر مصالح با استفاده از نمونه‌های دیسکی شکل تحت بارگذاری کششی خالص، پیشنهاد داد. برخلاف غالب روش‌های پیشنهادی توسط ISRM (غیر از روش میله کوتاه)، چقرمگی شکست در روش pCT با اعمال بار کششی خالص (بصورت مستقیم) تعیین می‌شود. این روش با ایجاد کنترل مناسب پس از رسیدن به بار بیشینه، بررسی بیش‌تر پدیده‌های درگیر در گسترش شکستگی پس از شکست را امکان‌پذیر می‌نماید. همچنین، این روش از مزیت‌هایی از جمله کنترل الکترونیکی مناسب حین آزمایش، صلبیت بالای دستگاه آزمایش و کاهش سطح انرژی الاستیک ذخیره شده در نمونه در طی بارگذاری برخوردار است [۱۵]. با این وجود، مطالعات محدودی [۱۵-۱۷] با استفاده از روش pCT برای ارزیابی چقرمگی شکست مصالح سنگی بویژه سنگ‌های کریستالی ناهمگن (هتروژن) با ملاحظات مطالعات در مقیاس دانه انجام شده است. از طرف دیگر، شکست سنگ فرآیندی تدریجی و متشکل از بهم‌پیوستن و توسعه ترک‌های طبیعی یا

¹ Short Rod (SR)

² Chevron Bend Test (CB)

³ Semi-Circular Bend Test (SCB)

⁴ Cracked Straight-through Brazilian Disc (CSTBD)

⁵ Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD)

⁶ Cracked Chevron Notched Semi-Circular Bend (CCNSCB)

⁷ Hollow Center Cracked Disc (HCCD)

⁸ International Society for Rock Mechanics (ISRM)

⁹ Premature Failure

¹⁰ Size effect

¹¹ Muñoz-Ibáñez

¹² Pseudo-Compact Tension test (pCT)

تازه گسترش یافته در ساختار سنگ و توأم با آزادسازی انرژی است. اگرچه بررسی این فرآیند همواره موضوع هدف در مطالعات پیشین [۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۸] با استفاده از روش‌های استاندارد شده موجود بوده؛ با این حال بعلاوه محدودیت روش‌های معمول در آشکارسازی مراحل مختلف شکست و یا کنترل نامناسب در محدوده پس از شکست، ارزیابی بهینه چقرمگی شکست و بررسی پدیده‌های درگیر بطور توأمان در این مطالعات صورت نگرفته است. موارد ذکر شده بعنوان مهم‌ترین اهداف این مطالعه در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر این مطالعه با استفاده از روش pCT و با بهره‌گیری از روش انتشار آوایی^۱ بعنوان ابزار رفتارنگاری، به بررسی پدیده‌های درگیر در مراحل مختلف فرآیند شکست سنگ هتروژن کریستالی پرداخته است. همچنین، چگونگی تأثیرگذاری اندازه نمونه بر رفتار شکست و چقرمگی شکست نمونه‌های سنگی متوسط دانه، در روش pCT نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مطالعه مقادیر چقرمگی شکست مود I با استفاده از یک روش جدید پیشنهادی موسوم به آزمایش شبه‌فشرده کششی ارزیابی شده و میزان و نحوه تأثیرپذیری K_{IC} حاصل از روش مذکور نسبت به اندازه نمونه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های گرانیته با چهار قطر مختلف و با تکرارپذیری شش آزمایش در هر قطر برای آزمایش pCT ، آماده‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفته است. برای هر یک از ۲۴ نمونه فوق، علاوه بر ثبت نتایج مربوط به بارگذاری و جابجایی، رویدادهای آوایی در حین فرآیند شکست توسط تجهیزات انتشار آوایی نیز بصورت همزمان ثبت شده است. ابتدا نتایج مربوط به چقرمگی شکست هر نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته، سپس با بررسی پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست به تحلیل اثر اندازه پرداخته شده است. در نهایت، نتایج حاصل از روش انتشار آوایی به عنوان ابزار رفتارنگاری فرآیند شکست در آزمایش‌های انجام شده مورد استفاده قرار گرفته و با بررسی پارامترهای اثرگذار به تحلیل آن پرداخته شده است.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- روش آزمایش

چقرمگی شکست در این مطالعه با استفاده از روش (pCT) [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. روش pCT رویکردی جدید برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود I در سنگ‌ها و سایر مواد است که اخیراً با اعمال تغییراتی در آزمایش شکست با نمونه فشرده کششی^۲ (CT) مطابق با استاندارد ASTM E399-12 [۱۹]، توسط مونیخ-ایبانیز و همکاران [۱۵] پیشنهاد شده است. نمای شماتیکی از هندسه نمونه مورد استفاده در این روش، در شکل ۱ ارائه شده است. مطابق با شکل ۱، یک بریدگی U شکل در آزمایش pCT جایگزین سوراخ‌های قرارگیری فیکسچر (فک) بارگذاری در قطعه متداول آزمایش CT شده و شیار شعاعی باریکی جهت ایجاد موقعیتی برای انتشار ترک در نمونه تعبیه شده است. فرآیند آزمایش در این روش ساده و فاقد پیچیدگی‌های مربوط به آماده‌سازی و یا کالیبراسیون دستگاه است. دستگاه بارگذاری اختصاصی متشکل از دو فک فولادی با صلبیت و مقاومت بالا بوده که با قرارگیری در بریدگی U شکل نمونه، فرآیند انتقال نیروی کششی به نمونه را برعهده دارند. با قرارگرفتن نمونه روی پایه مرکزی و در تماس با دو فک فولادی، نیروی کششی انتقال یافته در ترک باریک منجر به رشد ترک، از نوک شیار اولیه و انتشار در راستای شعاعی نمونه دیسکی شکل می‌شود. مقدار K_{IC} در این آزمایش مطابق با تعریف عمومی چقرمگی شکست مود I با استفاده از رابطه زیر [۱۵] محاسبه می‌شود:

$$K_{IC} = Y \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، σ_{max} تنش اعمالی متناظر با بار بحرانی لحظه شکست، a طول ترک اولیه و Y ضریب شدت تنش بدون بعد است و از رابطه زیر [۱۵] محاسبه می‌شود:

$$Y'_{pCT} = C_0 + C_1 \left(\frac{a}{b}\right) + C_2 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + C_4 \left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (2)$$

¹ Acoustic Emission (AE)

² Compact Tension test (CT)

C_0-C_4 ، ضرایب وابسته به اندازه نمونه، برای محاسبه ضریب شدت تنش است. مقادیر C_0-C_4 ، برای قطرهای ۲۸، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، به عنوان ضرایب مرجع، در جدول ۱ ارائه شده است [۱۵].

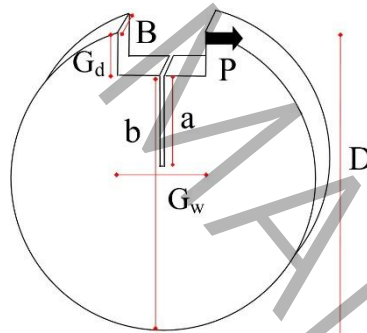
جدول ۱: ضرایب وابسته به اندازه نمونه، برای محاسبه ضریب شدت تنش در روش pCT [۱۵]

Table 1. Coefficients of the dimensionless stress intensity factor (Y'_{pCT}) expression derived for the pCT specimen. Coefficients are given for each specimen diameter (D)

D (mm)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4
۳۰	۷/۶۶۱	-۰/۰۲۹	-۳۹/۹۹۸	۱۴۸/۴۴۲	-۱۱۶/۸۰۲
۵۰	۱۲/۶۵۱	-۴۷/۰۵۴	۱۵۸/۷۲۰	-۲۴۷/۱۷۰	۱۸۵/۲۲۰
۱۰۰	۱۵/۳۴۱	-۷۴/۵۵۱	۲۶۰/۰۳۰	-۴۰۴/۵۲۰	۲۷۳/۱۹۰

۲-۲ آماده‌سازی نمونه

در این مطالعه از یک گونه سنگ گرانیتی (گرانیت گریس کادالسو^۱) استخراج شده از نواحی شمال غرب اسپانیا، ایالت گالیسیا^۲ استفاده شده است. گریس کادالسو نوعی گرانیت متوسط دانه، متشکل از کانی‌های فلدسپار، کوارتز و میکا است. نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه، با برش مغزه‌های حاصل از یک بلوک واحد سنگی، به دیسک‌هایی استوانه‌ای با نسبت ضخامت به قطر (B/D) برابر با ۰/۵ تبدیل شده و سپس یک بریدگی U شکل و یک شیار مستقیم در راستای بریدگی در آن‌ها تعبیه شده است. بریدگی U شکل از طریق چندین عبور متوالی اره با استفاده از یک دیسک الماسه دو میلی‌متری و شیار مستقیم نیز با یک بار عبور دیسک الماسه یک میلی‌متری در نمونه ایجاد شده است.



شکل ۱: طرح شماتیک هندسه و نحوه بارگذاری نمونه در روش pCT : D قطر نمونه، B ضخامت نمونه، a طول شیار، b فاصله بریدگی تا لبه نمونه، G_d و G_w بترتیب عمق و عرض بریدگی.

Figure 1. Schematic illustration of the geometry and loading configuration of the pseudo-compact tension (pCT) specimen: D and B are the diameter and the thickness of the specimen, respectively; a is the notch length; G_d and G_w are the depth and width of the U-shaped groove, respectively; b is the distance from the base of the groove to the bottom of the specimen.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک و سپس مگنت‌های دیسکی شکل با قطر و ضخامت به ترتیب ۶ و ۳ میلی‌متر جهت نگهداری سنسورهای AE بصورت قطری بر دو پهلوئی جانبی هر نمونه چسبانده شده است. در این مطالعه نمونه‌هایی با چهار قطر مختلف ۳۰، ۳۷، ۴۰ و ۵۴ میلی‌متر و هریک با ۶ تکرار و در مجموع ۲۴ نمونه استفاده شده است. ابعاد و مشخصه‌های هندسی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳ تجهیزات آزمایش

¹ Gris Cadalso Granite

² Galicia

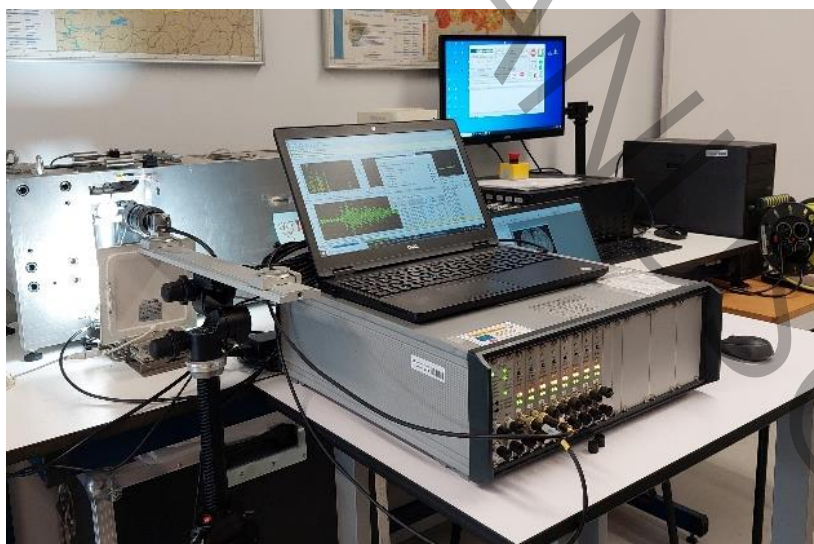
آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک سنگ LaMeRoc، اسپانیا انجام شده است. تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمایش و پایش اطلاعات حین بارگذاری در شکل ۲ ارائه شده است. دستگاه بارگذاری اختصاصی این آزمایش مجهز به یک سلول بار ۵۰ KN و متشکل از دو فک فولادی با صلبیت و مقاومت بالا بوده که با قرارگیری در شیار نمونه، فرآیند انتقال نیروی کششی به نمونه را برعهده دارند. دو سنسور جابجایی خطی^۱ بصورت متقارن و در طرفین نمونه میزان جابجایی فک‌های فولادی را همزمان با اعمال بار ثبت می‌کنند. تمامی آزمایش‌ها در این مطالعه در دمای محیط و با توجه به تأثیرپذیری چقرمگی شکست از نرخ بارگذاری [۲۰] با سرعت آهسته و نرخ ثابت بارگذاری معادل ۰/۱ mm/min (مطابق پیشنهاد [۲۱]) انجام شده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی نمونه‌ها
Table 2. Tested (*p*CT) specimen dimensions

D (mm)	B (mm)	G _d (mm)	G _w (mm)	a/b
۳۰	۱۵	۵	۱۰	۰/۲۵
۳۷	۱۸/۵	۵	۱۰	۰/۲۵
۴۰	۲۰	۵	۱۰	۰/۲۵
۵۴	۲۷	۵	۱۰	۰/۲۵

در طول آزمایش نیروی اعمالی بر نمونه و همچنین جابجایی متناظر با فک متحرک فولادی بطور پیوسته ثبت و سپس جهت پایش اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است.

اگرچه تجهیزات مورد استفاده برای این آزمایش امکان بررسی چقرمگی شکست را مطابق با روش‌های پیشنهاد شده توسط ISRM [۱] در دو سطح فراهم می‌کند؛ در این مطالعه برای انجام محاسبات تنها به سطح I پیشنهادی ISRM اکتفا شده و جهت انجام محاسبات چقرمگی نمونه، مقادیر بار بیشینه (P_{max}) در هر آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. جهت ثبت فعالیت‌های آوایی ایجاد شده در نمونه طی بارگذاری، برداشت‌های انتشار آوایی (AE) با استفاده از سیستم چندکاناله AMSY-6 AE (Vallen Systeme GmbH)، مجهز به ۸ بُرد ASIP-2 (دو کانال در هر بُرد) با قابلیت پایش سیگنال تا ۱۶ کانال انجام شده است.



شکل ۲: تجهیزات مورد استفاده در آزمایش.

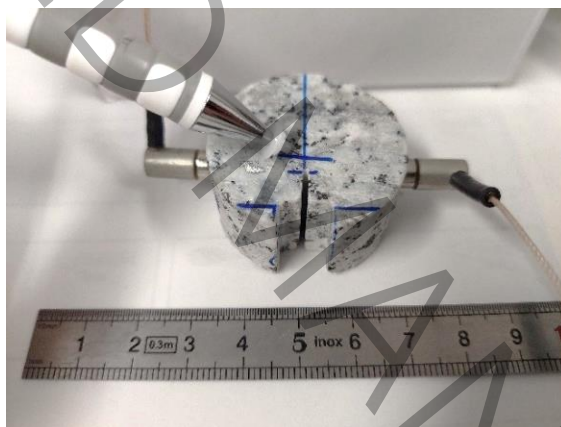
Figure 2. Testing equipment designed and built to perform *p*CT tests.

¹ Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

امواج پیوسته با نرخ ثبت داده ۱۰ MHz ضبط و جهت حذف فرکانس‌های ناخواسته مربوط به نویز سیستم یا محیط، حد آستانه‌ای ۴۰dB برای سیگنال‌ها اعمال شده است. جهت برداشت داده، دو سنسور AE مینیاتوری از نوع Vallen VD700-D (قطر ۶/۳ و ضخامت ۱۰ میلی‌متر) با آرایش قطری در دو پهلوئی نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. هر یک از سنسورهای AE توسط مگنتی با ضخامت ۳ میلی‌متر به نمونه متصل شده و یک لایه نازک چسب سیلیکونی برای ایجاد کوپل بهتر مابین مگنت و سنسور و انتقال آکوستیکی مناسب بین سطوح استفاده شده است. سیگنال‌های خام AE با استفاده از دو پیش‌تقویت‌کننده Vallen AEP5 جمع‌آوری شده و طیف وسیعی از پارامترهای AE شامل تعداد رویداد، دامنه، انرژی، فرکانس و دوام را بصورت پایش در لحظه^۱ ثبت نموده‌اند. همچنین، قبل از شروع برداشته‌های انتشار آوایی، عملکرد سیستم ثبت داده با استفاده از منبع سو-نیلسن^۲ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. شکل ۳ نمایی از یک نمونه آماده‌سازی شده را به‌نگام انجام تست سو-نیلسن، نشان می‌دهد.

۳- بحث و نتایج

از مجموع آزمایش‌های انجام شده، نتایج چقرمگی شکست در نمونه‌هایی معتبر تلقی شد که در آن‌ها ترک بصورت عمودی از لبه شیار به سمت لبه پایینی نمونه گسترش یافته بود. بر این اساس آزمایش در نمونه‌هایی با زاویه انحراف ترک کم‌تر از ۱۰° بعنوان شکست صحیح در نظر گرفته شد. از میان آزمایش‌هایی که صحت آن‌ها با توجه به معیار ذکر شده به تأیید رسید، یک آزمایش در هر یک از قطرها به عنوان منتخب، گزینش شده و از این پس (بمنظور اجتناب از تکرار) تشریح رفتار نمودارها بصورت مجزا تنها برای نمونه منتخب در هر قطر ارائه شده است.



شکل ۳: نمایی از نمونه آماده‌سازی شده همراه با سنسورهای AE.

Figure 3. Prepared pCT specimen equipped with acoustic emission sensors.

۳-۱- منحنی بار-جابجایی در آزمایش pCT

نمودارهای بار-جابجایی حاصل از نتایج داده‌های ثبت شده حین آزمایش برای یک نمونه در هریک از قطرهای ۳۰، ۳۷، ۴۰ و ۵۴ میلی‌متر در شکل ۴ ارائه شده است. براساس شکل ۴، فرآیند کلی شکست در سنگ ترد، با توجه به چارچوب کلی مدل مارتین^۳ و کندلر^۴ [۲۲]، به پنج مرحله مجزا تقسیم‌بندی شده است. هریک از این مراحل با یک رنگ پس‌زمینه مجزا نشان داده شده است. مطابق شکل ۴ مرحله (I) در قسمت آغازین نمودار بار-جابجایی واقع شده است. در این مرحله اعمال بار کششی منجر به بسته شدن ریزترک‌های موجود در ساختار سنگ و جابجایی سطوح اتصال کانی‌ها شده و در نتیجه مقدار اندکی تغییر شکل در نمونه ایجاد می‌شود. در مرحله (II) رفتار کلی بصورت الاستیک و رشد خطی جابجایی با افزایش بار کششی است. تغییرات خطی نمودار در این مرحله بیانگر رشد پایدار ریزترک‌ها داخل نمونه است. مرحله (III) با ظهور رفتار غیرخطی در نمودار آغاز می‌شود. روند غیرخطی ایجاد شده در نمودار، دلالت بر

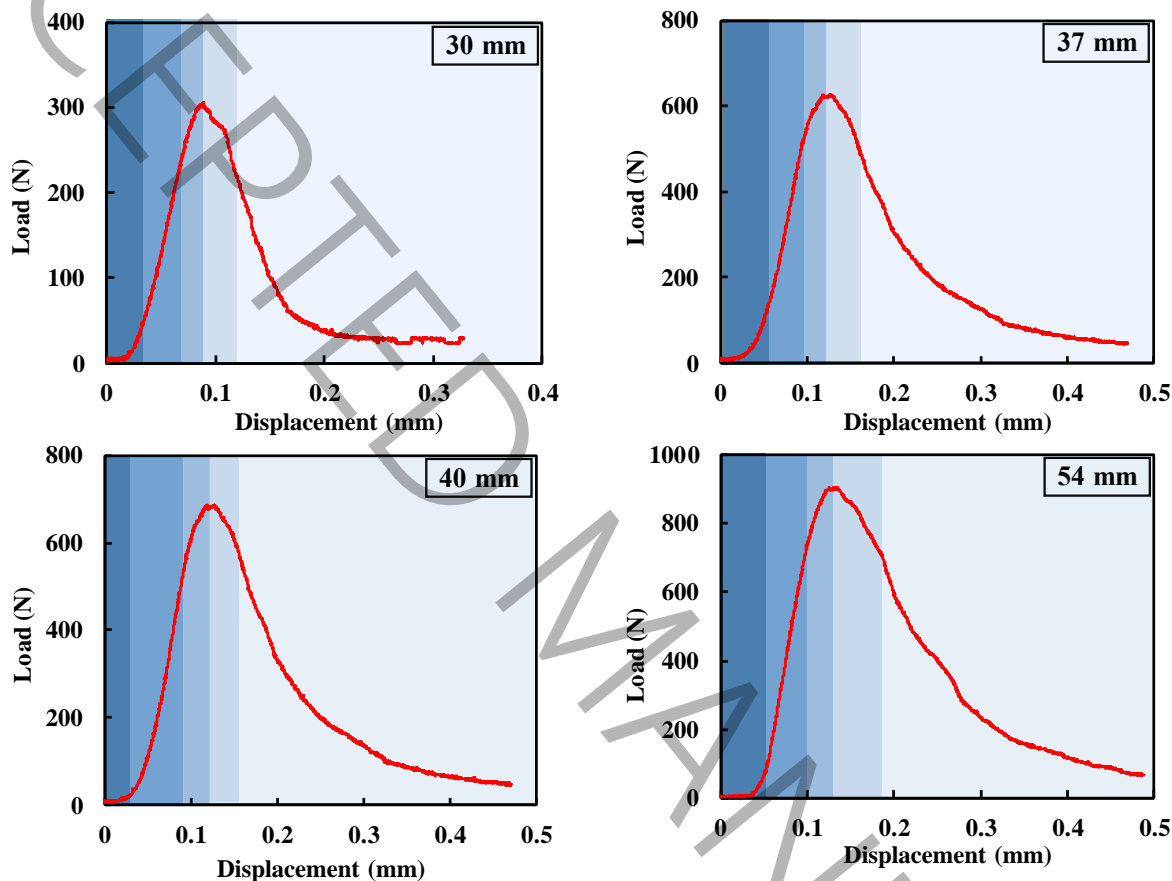
¹ Real-time monitoring

² Hsu-Nielsen source

³ Martin

⁴ Chandler

رشد سریع ریزترک‌ها دارد. استمرار فرآیند بهم‌پیوستن ترک‌ها به فرآیند شکست سرعت بخشیده و با رسیدن به مقدار بار بیشینه در نقطه اوج نمودار، ترک اصلی بطور ناگهانی در نمونه تشکیل می‌شود. پس از آن و در مرحله (IV)، با کاهش بار در نتیجه تشکیل ترک اصلی در صفحه لیگامان^۱، رفتار نمودار در مرحله پس از شکست (V)، بصورت نرم‌شونده^۲ ادامه یافته است. مقایسه نمودار بار-جابجایی مربوط به هر یک از قطرهای نشان می‌دهد که؛ با افزایش قطر نمونه، مقدار بار بحرانی در نقطه گذار از مرحله (II) به مرحله (III) و متعاقب آن بار و جابجایی بیشینه در لحظه شکست افزایش یافته است. در بخش بعد مقادیر جابجایی و بار بیشینه جهت محاسبه چقرمگی شکست مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴: نمودار بار-جابجایی حاصل از روش pCT برای نمونه‌های با قطر ۳۰ (بالا-چپ)، ۳۷ (بالا-راست)، ۴۰ (پایین-چپ) و ۵۴ (پایین-راست) میلی‌متر؛ (رنگ‌های پس‌زمینه بیانگر هر یک از مراحل پنج‌گانه فرآیند شکست است).

Figure 4. Load- displacement curves obtained from pCT method for specimens of 30 mm (up- left), 37 mm (up- right), 40 mm (down- left) and 54 mm (down- right); (Background colors indicate each stages of failure).

۳-۲- چقرمگی شکست مود I

با استفاده از مقادیر بار بیشینه حاصل از نمودار بار-جابجایی، چقرمگی شکست مربوط به هر آزمایش بوسیله رابطه (۱) محاسبه شده است. مقادیر چقرمگی شکست در هر نمونه و همچنین مقادیر میانگین (μ)، انحراف از معیار^۳ (σ) و ضریب تغییرات^۴ (CV) چقرمگی شکست مربوط به هر قطر از نمونه در جدول ۳ خلاصه شده است. همچنین، نمودار نتایج چقرمگی شکست مود I در این مطالعه به‌ازاء هر قطر در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به ضرایب تغییرات محاسبه شده در جدول ۳ و مطابق با نمودار شکل ۵، در هر قطر از نمونه

¹ Ligament

² Softening

³ Standard deviation

⁴ Coefficient of variation

جدول ۳: مقادیر چقرمگی شکست مود I حاصل از روش pCT برای قطرهای مختلف

Table 3. Mode I fracture toughness (K_{IC}) results as a function of pCT specimen diameter (D)

D (mm)	K _{IC} (MPa.√m)	μ (MPa.√m)	σ (MPa.√m)	cv (%)
۳۰	۰/۶۹ - ۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۰۸۳	۱۰
۳۷	۰/۸۸ - ۱/۰۹	۱/۰۱	۰/۰۸۱	۸
۴۰	۰/۹۵ - ۱/۱	۱/۰۳	۰/۰۵۶	۵
۵۴	۱/۱۵ - ۱/۲۵	۱/۲	۰/۰۳۶	۳

تا حدودی پراکندگی داخلی در بین نتایج مشاهده می‌شود. این میزان از پراکندگی با توجه به تکرار شونده‌گی موجود در هر قطر از نمونه، را می‌توان مرتبط به ناهمگنی در مقیاس دانه و نحوه توزیع دانه‌های موجود در ساختار سنگ دانست. همچنین مطابق با شکل ۵؛ با افزایش قطر نمونه، از پراکندگی نتایج در قطر ثابت کاسته شده است. این به مفهوم کاهش عدم قطعیت ذاتی مربوط به K_{IC} است. در حقیقت با افزایش اندازه نمونه‌ها اثر هتروژنیتی ناشی از دانه‌ها به تدریج کاهش یافته است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ روند کلی نمودار بصورت افزایش چقرمگی شکست با افزایش قطر نمونه است. این مشاهده در انطباق با تعدادی از مطالعات انجام شده با استفاده از روش‌های آزمایش مختلف تعیین چقرمگی شکست است [۲۳-۲۵]. نمودار شکل ۵ از دو جنبه قابل بررسی و تحلیل است. در ادامه به این دو جنبه که ماهیتاً بهم مرتبط هستند پرداخته شده است. جنبه اول وجود روند افزایشی در چقرمگی شکست با افزایش قطر است که اثر اندازه^۱ نام دارد؛ و جنبه دیگر، همگرایی مقادیر چقرمگی شکست با رسیدن به قطری مشخص است. از جنبه اول؛ نتایج مشاهده شده در این مطالعه برخلاف دیدگاه کلاسیک [۲۶] است که طبق آن؛ با افزایش اندازه نمونه بعلاوه افزایش احتمال وجود منافذ، ریزترک‌ها و مرزهای بین دانه‌ای، مقاومت کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مطالعاتی از جمله [۵، ۶، ۱۰، ۲۴، ۲۷، ۲۸] مشاهداتی مشابه با نتایج این مطالعه گزارش شده است. روند افزایشی چقرمگی شکست با افزایش قطر نمونه را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که؛ نمونه‌های بزرگ‌تر به میزان انرژی بیش‌تری برای گسترش ترک آغاز شده از شیار اولیه نیاز دارند. به عبارتی در نمونه‌های با قطر کوچک‌تر (با فرض ثابت بودن طول شیار اولیه) طول لیگامان (برابر با D-b-Gd در شکل ۱) کوتاه‌تر بوده و در نتیجه میزان انرژی لازم برای گسترش شکست در نمونه، کم‌تر از نمونه‌های با طول لیگامان بزرگ‌تر است. از نگاه دیگر و با استناد بر اصول مکانیک شکست متناهی^۲ نیز می‌توان بر روند مشاهده شده در نتایج یعنی افزایش K_{IC} با افزایش قطر صحنه گذاشت. به این ترتیب که بر اساس اصول اولیه مکانیک شکست متناهی، برای گسترش یک شکستگی سطح تنش باید به حدی آستانه‌ای در نوک ترک برسد و همزمان با آن انرژی کافی به مجموعه وارد شود [۲۹، ۳۰]. سطح تنش آستانه‌ای غالباً مستقل از مقیاس و انرژی ورودی وابسته به اندازه نمونه است. بنابراین هرچه نمونه بزرگ‌تر باشد، با افزایش میزان (P_{max}) موردنیاز، چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد.

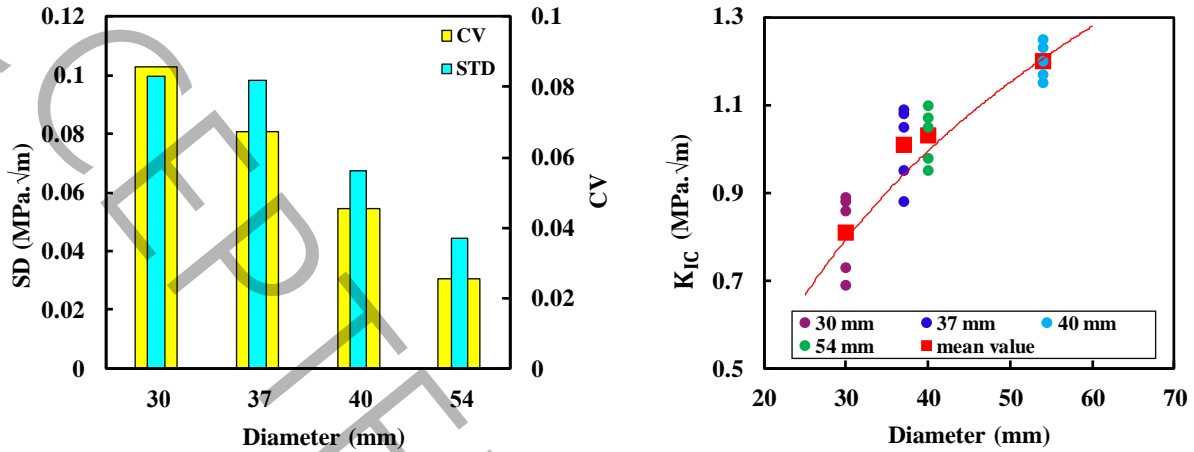
از جنبه دوم، با افزایش قطر تغییری در نرخ افزایش K_{IC} مشاهده می‌شود. به این ترتیب که در قطرهای بالاتر از ۵۰ میلی‌متر از نرخ افزایش K_{IC} کاسته شده و چقرمگی شکست به مقدار تقریباً ثابتی همگرا می‌شود. این مشاهده همچون جنبه اول به نحوی وابسته به اثر اندازه و نیز می‌تواند وابسته به گسترش ناحیه فرآیند شکست^۳ (FPZ) باشد. FPZ دربرگیرنده یک ناحیه با تغییرشکل‌های به شدت موضعی شده ناشی از گسترش ریزترک‌ها است [۶]. در صورتی که FPZ در اطراف نوک ترک، در مقایسه با ابعاد نمونه به قدر کافی کوچک باشد مقدار K_{IC} به عنوان یک ویژگی ماده و مستقل از ابعاد قابل پذیرش است [۱۰]. با استناد بر این موضوع همواره قطر مشخصی، از نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست، بعنوان حداقل قطر مستقل از اثر اندازه پیشنهاد شده است [۱، ۳، ۶، ۲۸]. از سوی دیگر، تأثیرگذاری ترک‌های موجود در نمونه که منجر به کاهش مقاومت ترک می‌شوند در نمونه‌های کوچک‌تر، بیش‌تر و محسوس‌تر است. بنابراین در نمونه‌های به قدر کافی بزرگ مقاومت نمونه تحت تأثیر اندازه ترک‌ها نیست و به K_{IC} اجازه همگرا شدن به مقدار ثابتی را می‌دهد. با استناد بر این دو مدعا، به‌نظر می‌رسد مقدار چقرمگی شکست در آزمایش pCT انجام‌شده در این مطالعه با شروع کاهش نرخ تغییر در قطر ۵۰ میلی‌متر، برای نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر از ۵۴ میلی‌متر تمایل به همگرا شدن K_{IC} به مقدار

¹ Size effect

² Finite Fracture Mechanics (FFM)

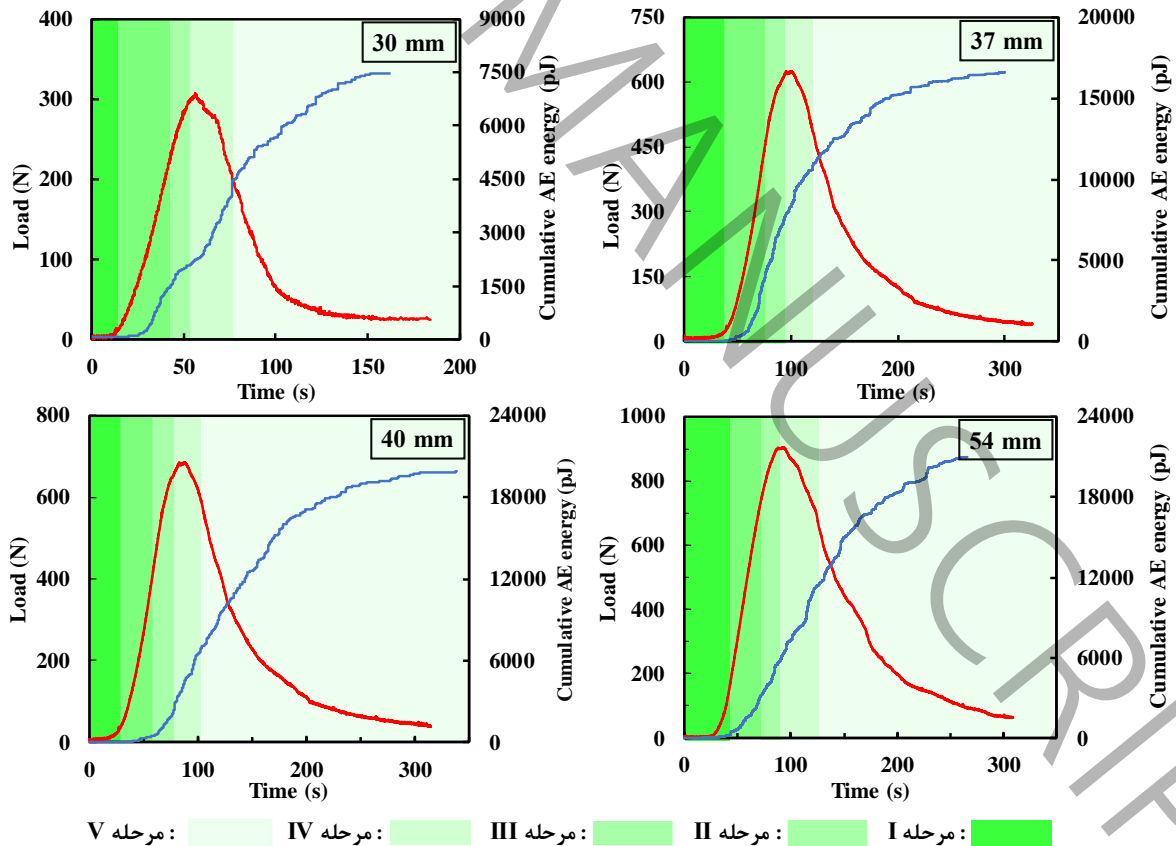
³ Fracture Process Zone (FPZ)

تقریباً ثابتی از خود نشان خواهد داد. بدین ترتیب دور از انتظار نیست که با تکرار آزمایش برای قطرهای (بطور مثال) ۸۴ و یا ۱۰۰ میلی‌متر به مقادیر تقریباً ثابتی از K_{Ic} دست‌یابیم. البته نحوه توزیع دانه‌بندی و میزان ناهمگنی ساختاری نمونه قطعاً اثر قابل توجهی در مقدار قطر حداقلی برای همگرا شدن چقرمگی شکست دارد.



شکل ۵: نمودار تغییرات چقرمگی شکست مود (I) با قطر (راست)، گستره تغییرات آماری (انحراف از معیار و ضریب تغییرات) چقرمگی شکست مود (I) در قطرهای مختلف.

Figure 5. Mode (I) fracture toughness variations as a function of specimen diameter (right), Statistical parameters variation (standard deviation and coefficient of variation) of Mode (I) fracture toughness of specimens with different diameters.

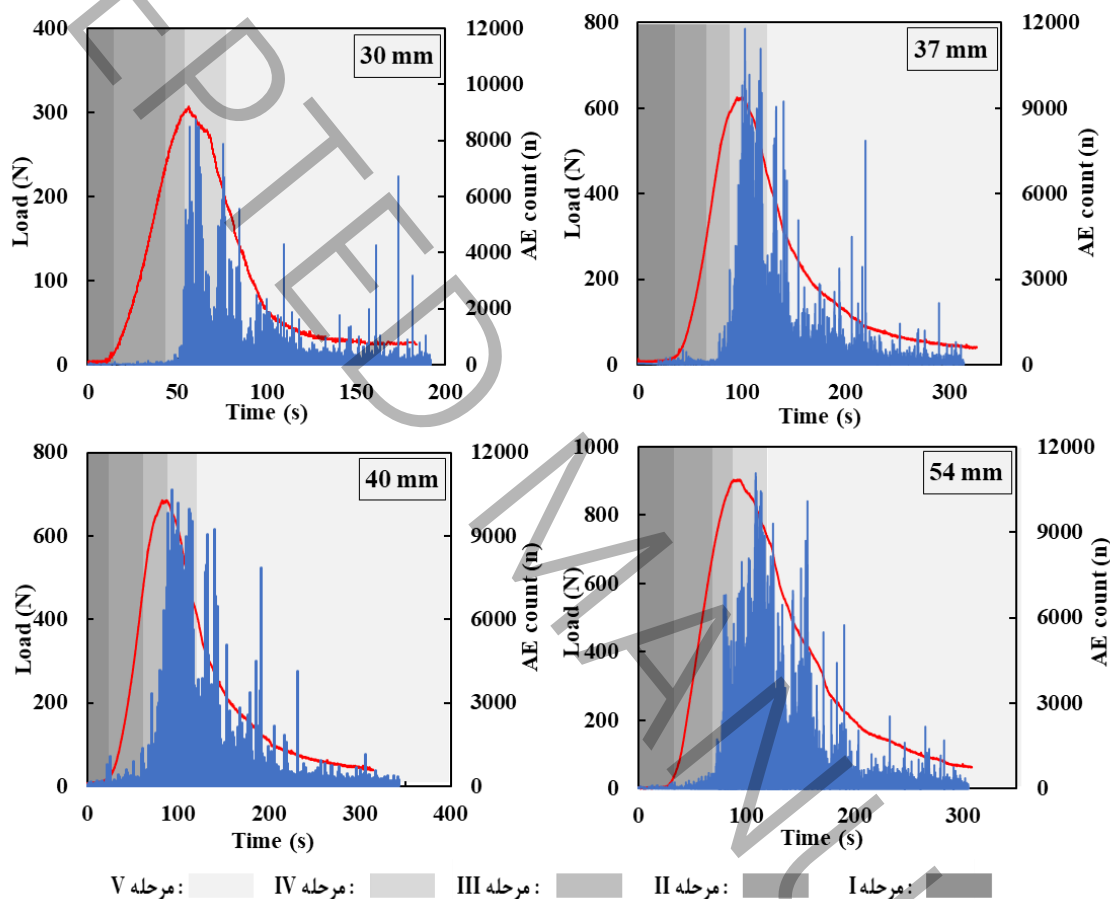


شکل ۶: نمودار بار- زمان و انرژی تجمعی- زمان حاصل از پایش AE در روش pCT برای نمونه‌های با قطر ۳۰ (بالا-چپ)، ۳۷ (بالا-راست)، ۴۰ (پایین-چپ) و ۵۴ (پایین-راست) میلی‌متر؛ (رنگ‌های پس‌زمینه بیانگر تغییرات مرحله‌ای سیگنال‌های آوایی ثبت شده است).

Figure 6. Load- time and cumulative energy- time curves obtained from AE monitoring of *p*CT method for specimens of 30 mm (up- left), 37 mm (up- right), 40 mm (down- left) and 54 mm (down- right); (Background colors indicate each stages of failure).

۳-۲- نتایج رفتارسنجی انتشار آوایی در نمونه های *p*CT

پس از تحلیل اطلاعات حاصل از ثبت سیگنال های AE، انرژی و تعداد رویدادها به عنوان دو توصیف گر کمی فرآیند ایجاد و گسترش ترک، در آزمایش های چقرمگی شکست در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته اند. شکل ۶ و شکل ۷ بترتیب نمودار تعداد رویدادها و انرژی تجمعی AE بر حسب زمان و براساس میزان بار اعمال شده بر نمونه را برای هر یک از نمونه های ۳۰، ۳۷، ۴۰ و ۵۴ میلی متری نشان می دهد.



شکل ۷: نمودار بار- زمان و تعداد رویداد آوایی- زمان حاصل از پایش AE در روش *p*CT برای نمونه های با قطر ۳۰ (بالا-چپ)، ۳۷ (بالا-راست)، ۴۰ (پایین-چپ) و ۵۴ (پایین-راست) میلی متر؛ (رنگ های پس زمینه بیانگر تغییرات مرحله ای سیگنال های آوایی ثبت شده است).

Figure 7. Load- time and cumulative energy- time curves obtained from AE monitoring of *p*CT method for specimens of 30 mm (up- left), 37 mm (up- right), 40 mm (down- left) and 54 mm (down- right); (Background colors indicate each stages of failure).

با توجه به شکل ۶ رویدادهای AE، در طی فرآیند بارگذاری، ارتباط نزدیکی با آغاز و گسترش ریزترکها در داخل نمونه و وابستگی شدیدی به سطح تنش در نمونه دارد. مطابق شکل ۶، رویدادهای آوایی در سطوح میانی تنش وارد بر نمونه آغاز شده و در سطوح تنش بالاتر، خصوصاً به هنگام شکل گیری ترک اصلی، افزایش قابل توجهی را به ثبت رسانده اند. مشابه آنچه در بخش ۳-۱ برای تقسیم بندی رفتار مکانیکی شکست در مراحل مختلف ارائه شد؛ می توان هر یک از نمودارهای شکل ۶ و شکل ۷ را از لحاظ رفتار ثبت شده توسط AE به پنج قسمت مجزا تقسیم کرد. مطابق شکل ۶ و ۷، در ناحیه (I) مقدار انرژی AE ثبت شده بسیار اندک و همچنین تعداد کمی رویداد آوایی به وقوع پیوسته است. سیگنال های ثبت شده در این مرحله عموماً مرتبط با بسته شدن ریزترکها و اندکی هم ناشی از قرارگیری فک های بارگذاری است. با آغاز ناحیه (II) در محدوده رفتار الاستیک خطی، تعداد رویدادها و انرژی تجمعی AE هر دو به

تدریج افزایش می‌یابد. این مرحله مطابق آنچه در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده [۳۱، ۳۲] مرتبط با شکل‌گیری ریزترک‌های جدید در ساختار نمونه است. در نمونه‌های با قطر ۳۷، ۴۰ و ۵۴ میلی‌تر، در محدوده الاستیک خطی، تغییرات انرژی AE و شدت رویدادها قابل توجه است. این مشاهده با توجه به نرخ تغییر شکل اندک نمونه‌های ذکر شده در این محدوده می‌تواند حاکی از تشکیل تعداد بسیار زیادی ریزترک در نمونه باشد. در مقابل، نمونه ۳۰ میلی‌متری، با حصول تغییر شکل بیش‌تر در ناحیه الاستیک خطی، تعداد رویداد و همچنین انرژی AE بطور معنادار کم‌تری را به ثبت رسانده است.

با آغاز ناحیه (III) و رسیدن به آستانه رشد پایدار ترک‌ها، تریخس انرژی شتاب بیش‌تری یافته است. این روند همانطور که در نمودارهای انرژی تجمعی در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ بطور پیوسته تا مرحله (IV) ادامه یافته است. تغییر پیوسته شیب نمودار انرژی تجمعی AE در این ناحیه، بیانگر سرعت متغییر گسترش ترک‌ها است. پس از بار بیشینه و در ناحیه (IV) نرخ تغییرات انرژی AE کاهش می‌یابد و در انتهای این مرحله (رشد ناپایدار ترک‌ها) به تدریج از سرعت آن کاسته شده است. در انتها نیز با بهم‌پیوستن ترک‌ها در ناحیه (V) روند تغییر شیب نمودار انرژی تجمعی AE متوقف و سرانجام به مقدار حداکثری ثابت در هر نمودار رسیده است. در مجموع انطباق مناسبی بین مراحل مختلف رفتار مکانیکی در طی شکست (شکل ۵) و مراحل پنج‌گانه حاصل از فعالیت‌های آوایی (شکل ۶ و شکل ۷) مشاهده می‌شود.

مقایسه نمودارهای انرژی تجمعی AE در شکل ۶ بیانگر افزایش میزان انرژی تجمعی آزاد شده با افزایش قطر نمونه است. بطوریکه از مقدار 7500 pJ در نمونه با قطر ۳۰ میلی‌متر به بالغ بر حدود 22000 pJ در نمونه با قطر ۵۴ میلی‌متر رسیده است. همچنین، برای هر یک از نمونه‌ها، مقدار انرژی تجمعی نهایی پس از شکست، افزایش تقریباً دو برابری نسبت به انرژی تجمعی در لحظه پیک را از خود نشان داده است. مقایسه نمودار تعداد رویدادهای AE ثبت‌شده در قطرهای مختلف حاکی از افزایش تعداد رویدادها با افزایش قطر نمونه است. بدیهی است که با افزایش اندازه نمونه، از یک طرف تعداد نواحی تماس^۱ بین‌دانه‌ای افزایش می‌یابد و از طرف دیگر احتمال وقوع ریزترک‌ها در ابعاد بزرگ‌تر بیش‌تر است. بنابراین بروز رابطه مستقیم بین افزایش قطر و تعداد رویداد منطقی بنظر می‌رسد. این پدیده بصورت افزایش تراکم نمودار رویدادهای AE در نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر در شکل ۷ قابل مشاهده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله چقرمگی شکست مود I با استفاده از روش شبه‌فشرده کششی برای نمونه‌های سنگی، مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های گرانیته با چهار قطر مختلف، بمنظور تعیین نحوه تأثیرگذاری اندازه نمونه بر ویژگی چقرمگی شکست حاصل از روش pCT تحت بارگذاری قرار گرفت. همچنین، بطور همزمان از روش انتشار آوایی برای ثبت سیگنال‌های صوتی انتشار یافته ناشی از توسعه ترک و شکست نمونه استفاده شد. برای هر یک از نمونه‌ها، نمودارهای بار بحسب جابجایی و زمان و همچنین نمودارهای تعداد رویدادها و انرژی تجمعی AE، بطور مجزا مورد بررسی قرار گرفت.

روش pCT ، برخلاف سایر روش‌های متداول در تخمین چقرمگی شکست، با اعمال بار کششی بصورت مستقیم بر نمونه، امکان بررسی رفتار چقرمگی شکست مود I را بدون احتساب پیش‌فرض‌های موجود در روش‌های بارگذاری غیرمستقیم فراهم می‌کند. همچنین با ایجاد کنترل مناسب بر نمونه، پس از رسیدن به بار بیشینه، امکان بررسی بیش‌تر پدیده‌های درگیر در گسترش شکستگی پس از شکست را فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از آزمایش چقرمگی شکست به روش pCT در این مطالعه نشان می‌دهد که، مقدار چقرمگی شکست تابعی از اندازه نمونه بوده و با افزایش اندازه نمونه، افزایش می‌یابد؛ سپس بتدریج با شیبی کاهنده به مقداری ثابت و مشخص همگرا می‌شود. بطور همزمان با افزایش اندازه نمونه انحراف استاندارد و ضریب تغییرات چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. این موضوع به معنای کاهش اثر هتروژنیته روی رفتار چقرمگی شکست است. بنظر می‌رسد عواملی همچون نحوه توزیع دانه‌بندی و اندازه دانه‌ها در مقدار قطر حداقلی برای همگرایی چقرمگی شکست اثرگذار است.

از لحاظ رفتار مکانیکی نمونه‌های تحت بارگذاری کششی، روند توسعه شکست در نمونه‌ها مطابق با مراحل پنجگانه شکست سنگ ترد در مدل مارتین و کندلر [۲۲] بوده است. همچنین، به لحاظ آکوستیکی انطباق مناسبی بین مراحل شکست و تغییر کمی انرژی و تعداد رویدادهای ثبت شده حین شکست مشاهده شده است. بطوریکه، افزایش قابل توجهی در داده‌های انتشار آوایی از سطوح میانی

¹ Contact

تنش آغاز و سپس با تغییر مرحله‌ای فرآیند شکست، روند افزایشی ادامه یافته است. همچنین، با افزایش اندازه نمونه، انرژی تجمعی AE و همچنین تعداد رویدادها مطابق آنچه انتظار می‌رفت، افزایش یافته‌اند.

بطور کلی، نتایج بیانگر قابلیت مناسب روش pCT در ارزیابی چقرمگی شکست مود I است. همچنین، این روش با توجه به امکان دستیابی به نمودار کامل رفتار شکست، مطالعه رفتار سنگ در مراحل مختلف شکست سنگ را با استفاده از ابزار رفتارسنجی حین شکست، میسر می‌نماید.

۵- مراجع

- [1] J. Franklin, S. Zongqi, B. Atkinson, P. Meredith, F. Rummel, W. Mueller, Y. Nishimatsu, H. Takahashi, L. Costin, A. Ingrassia, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 25(2) (1988).
- [2] T. Funatsu, N. Shimizu, M. Kuruppu, K. Matsui, Evaluation of mode I fracture toughness assisted by the numerical determination of K-resistance, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48 (2015) 143-157.
- [3] M.D. Kuruppu, Y. Obara, M.R. Ayatollahi, K. Chong, T. Funatsu, ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47 (2014) 267-274.
- [4] M. Wei, F. Dai, N. Xu, T. Zhao, K. Xia, Experimental and numerical study on the fracture process zone and fracture toughness determination for ISRM-suggested semi-circular bend rock specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 154 (2016) 43-56.
- [5] M.-D. Wei, F. Dai, N.-W. Xu, T. Zhao, Y. Liu, An experimental and theoretical assessment of semi-circular bend specimens with chevron and straight-through notches for mode I fracture toughness testing of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 99 (2017) 28-38.
- [6] S. Ghouli, B. Bahrami, M.R. Ayatollahi, T. Driesner, M. Nejati, Introduction of a scaling factor for fracture toughness measurement of rocks using the semi-circular bend test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(8) (2021) 4041-4058.
- [7] M. Alijani, A. Bahmani, Rock fracture toughness study under mixed mode I/III loading, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50 (2017) 1739-1751.
- [8] M.-D. Wei, F. Dai, N.-W. Xu, Y. Liu, T. Zhao, Fracture prediction of rocks under mode I and mode II loading using the generalized maximum tangential strain criterion, *Engineering fracture mechanics*, 186 (2017) 21-38.
- [9] R. Fowell, J. Hudson, C. Xu, X. Zhao, Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, pp. 322A.
- [10] M.D. Wei, F. Dai, Y. Liu, N.W. Xu, T. Zhao, An experimental and theoretical comparison of CCNBD and CCNSCB specimens for determining mode I fracture toughness of rocks, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(5) (2018) 1002-1018.
- [11] M. Kuruppu, Fracture toughness measurement using chevron notched semi-circular bend specimen, *International journal of fracture*, 86(4) (1997) L33-L38.
- [12] H. Amrollahi, A. Baghbanan, H. Hashemolhosseini, Measuring fracture toughness of crystalline marbles under modes I and II and mixed mode I-II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(7) (2011) 1123-1134.
- [13] C.-H. Chen, C.-S. Chen, J.-H. Wu, Fracture toughness analysis on cracked ring disks of anisotropic rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41 (2008) 539-562.
- [14] Z. Zhang, An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 39(3) (2002) 401-406.

- [15] A. Muñoz-Ibáñez, J. Delgado-Martín, M. Costas, J. Rabuñal-Dopico, J. Alvarellós-Iglesias, J. Canal-Vila, Pure Mode I Fracture Toughness Determination in Rocks Using a Pseudo-Compact Tension (p CT) Test Approach, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(7) (2020) 3267-3285.
- [16] J. Delgado-Martín, A. Muñoz-Ibáñez, M. Herbon-Penabad, R. Juncosa-Rivera, Impact of saturating fluids on mode-I fracture toughness of a porous siliceous sandstone and a granitic rock, in: *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2019, pp. MR41C-0064.
- [17] A. Muñoz-Ibáñez, J. Delgado-Martín, R. Juncosa-Rivera, Size effect and other effects on mode I fracture toughness using two testing methods, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 143 (2021) 104785.
- [18] Y. Obara, K. Nakamura, S. Yoshioka, A. Sainoki, A. Kasai, Crack front geometry and stress intensity factor of semi-circular bend specimens with straight through and chevron notches, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53 (2020) 723-738.
- [19] A. Standard, Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials, *ASTM Book of Standards*, (2012).
- [20] T. Backers, O. Stephansson, ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness, in: *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, Springer, 2014, pp. 45-56.
- [21] T. Backers, N. Fardin, G. Dresen, O. Stephansson, Effect of loading rate on mode I fracture toughness, roughness and micromechanics of sandstone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3) (2003) 425-433.
- [22] C. Martin, N. Chandler, The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, in: *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, Elsevier, 1994, pp. 643-659.
- [23] Q. Xie, X. Liu, S. Li, K. Du, F. Gong, X. Li, Prediction of mode I fracture toughness of shale specimens by different fracture theories considering size effect, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(11) (2022) 7289-7306.
- [24] S. Zhang, D. An, X. Zhang, B. Yu, H. Wang, Research on size effect of fracture toughness of sandstone using the center-cracked circular disc samples, *Engineering Fracture Mechanics*, 251 (2021) 107777.
- [25] S. Zhang, H. Wang, X. Li, X. Zhang, D. An, B. Yu, Experimental study on development characteristics and size effect of rock fracture process zone, *Engineering Fracture Mechanics*, 241 (2021) 107377.
- [26] E. Hoek, E.T. Brown, Practical estimates of rock mass strength, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8) (1997) 1165-1186.
- [27] S.S. Jeong, K. Nakamura, S. Yoshioka, Y. Obara, M. Kataoka, Fracture toughness of granite measured using micro to macro scale specimens, *Procedia engineering*, 191 (2017) 761-767.
- [28] M. Nejati, S. Ghouli, M.R. Ayatollahi, Crack tip asymptotic field and K-dominant region for anisotropic semi-circular bend specimen, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109 (2020) 102640.
- [29] A.C. Correias, M. Corrado, A. Sapore, P. Cornetti, Size-effect on the apparent tensile strength of brittle materials with spherical cavities, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 116 (2021) 103120.
- [30] Z. Hashin, Finite thermoelastic fracture criterion with application to laminate cracking analysis, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(7) (1996) 1129-1145.
- [31] M. Nasser, B. Mohanty, R. Young, Fracture toughness measurements and acoustic emission activity in brittle rocks, *Pure and Applied Geophysics*, 163 (2006) 917-945.
- [32] J. Zhang, Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks, *Shock and Vibration*, 2018(1) (2018) 3057628.

Mode I fracture toughness determination of granite specimens using *pseudo-compact tension* method

Shahrbanou Sayadi^{a,1}, Alireza Baghbanan^a, Morteza Javadi^b, George Jordi Delgado-Martin^c, Hamid Hashemolhosseini^d

^a Department of Mining Eng., Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

^b Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

^c School of Civil Eng., University of A Coruña, Coruña, Spain

^d Department of Civil Eng., Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Mode I fracture toughness (K_{IC}) is one of the most important parameters in fracture mechanics of brittle material. Several laboratory methods have been suggested to determine the mode I fracture toughness. However, many of these methods are dealing with the lengthy sample preparation procedure, premature failure of samples, and difficulties in obtaining the precise value of the fracture toughness property. In this paper, recently proposed *pseudo-compact tension* method is used to evaluate mode I fracture toughness of a middle-grain granite benefiting the advantages of this method including; simplicity of the test, high level of test control and high accuracy of the K_{IC} value. For this purpose, granite samples in four different diameters and with six test repeats per diameter have been prepared and tested using the *pseudo-compact tension* method. For each sample, in addition to recording the load and displacement data, the acoustic events during the loading process were also recorded simultaneously by an acoustic emission equipment. First, the resulted fracture toughness value for each sample have been determined, then the size effect has been evaluated and analyzed. Finally, results of the acoustic emission method, as the monitoring tool in the fracturing process of tested samples, have been analyzed. The qualitative evolution of acoustic emission parameters well illustrates the mechanical process occurring in the tested samples with well-matched coinciding with the mechanical transitions observed in samples during loading process. Experimental results show that mode I fracture toughness is positively related to the specimen size and there is a noticeable size effect in K_{IC} value up to a certain diameter.

KEYWORDS

Mode I fracture toughness, pseudo-compact tension test, acoustic emission method, brittle rock fracturing process, scale effect.

¹ Corresponding Author: Email: sayadial@gmail.com; s.sayadi@mi.iut.ac.ir.