

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

Shahrbanou Sayadi^{1*}, Alireza Baghbanan¹, Morteza Javadi², Jordi Delgado-Martin³, Hamid Hashemolhosseini⁴

¹ Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

² Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ School of Civil Engineering, University of A Coruña, Spain

⁴ Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT: Mode I fracture toughness (K_{IC}) is one of the most important parameters in the fracture mechanics of brittle material. Several laboratory methods have been suggested to determine the mode I fracture toughness. However, many of these methods deal 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, a 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 resulting fracture toughness value for each sample has been determined, then the size effect has been evaluated and analyzed. Finally, the 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 the 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.

Review History:

Received: May, 19, 2023

Revised: Feb. 18, 2024

Accepted: Aug. 24, 2024

Available Online: Sep. 20, 2024

Keywords:

Mode I Fracture Toughness

Pseudo-Compact Tension Test

Acoustic Emission Method

Brittle Rock Fracturing Process

Scale Effect

1- Introduction

Fracture toughness has paramount importance in engineering projects involving rock materials, in which cracks are omnipresent [1, 2]. Since the tensile strength of rock material is comparatively lower than its compressive and shearing stresses, the mode I fracture toughness (K_{IC}) arises as the most relevant and studied parameter in rock fracture mechanics. To measure the mode I fracture toughness of rock material, the International Society for Rock Mechanics (ISRM) endorses four suggested methods, namely the short rod (SR), chevron bend (CB), cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD), and semi-circular bend (SCB) methods [3-5]. Some of these methods may be difficult to apply on a routine basis due to a number of issues, such as: a) the small failure initiation and propagation loads require excellent test control; b) a relatively large sample volume is needed (CB); c) cumbersome or difficult sample preparation (SR, CB, and CCNBD); d) imprecisions in the

computation of the stress intensity factor (CCNBD); e) the indirect generation of tensile loads via sample compression (especially in SCB and CCNBD). To overcome some of these limitations, in this contribution we present an alternate simple approach, referred to as *pseudo-compact tension (pCT)*, to measure K_{IC} in rocks using cylindrical single-edge-notched specimens loaded in pure tension.

2- Methodology

Granite specimens originating from Spain were used to assess the specimen size effect on the corresponding K_{IC} obtained by the recently developed *pseudo-compact tension (pCT)* approach. The *pseudo-compact tension test* [6] cell is based on a modification of the compact tension (CT) specimen described in ASTM standard methods [7] for testing metallic materials. The specimen geometry of the test is outlined in Figure 1.

This study investigates the effect of specimen size (diameter) on the corresponding K_{IC} of a crystalline rock.

*Corresponding author's email: s.sayadi@mi.iut.ac.ir

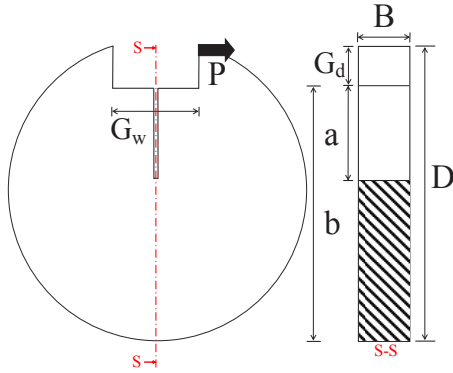


Fig. 1. Identification of the main geometric dimensions of the *p*CT specimen (modified after [6]), D: diameter; B: thickness; a: notch length; G_d: depth of U shaped groove; G_w: width of the U-shaped groove; b: distance from the base of the groove to the bottom of the specimen. The values of a/b, G_d, and G_w are fixed in this study and equal to 0.25, 5, and 10 mm, respectively.

For this purpose, four different diameter sizes were chosen including specimens of 30 mm, 37 mm, 40 mm, and 54 mm diameter. For each one of the diameter sizes, 6 replicate tests were considered and a total of 24 tests were performed. The test specimens were equipped with two wide-band acoustic emission (AE) sensors (Vallen VS700-D; frequency range: 150-800 kHz; peak frequency: 600-800 kHz) attached on both lateral sides of the specimen. The *p*CT specimens were loaded under pure tensile conditions using a specially designed testing device equipped with a 50 kN load cell [6].

Mode I fracture toughness for *p*CT specimens (K_{IC}) is computed using equation (1):

$$K_{IC} = Y'_{pCT} \frac{\sigma_{max}}{bB} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

where, P_{max} is the peak load (N); b is the distance from the base of the groove to the bottom of the specimen (m); B is the specimen thickness (m); a is the length of the straight notch (m); and Y'_{pCT} is the dimensionless intensity factor.

3- Results and Discussion

Fracture toughness test results were considered valid in specimens in which the crack propagates vertically from the edge of the notch to the lower edge of the specimen. In the valid tests, the K_{IC} value was measured using equation (1). Figure 2 shows the obtained values of K_{IC} using the *p*CT method, in which the K_{IC} increases as the specimen size increases. In fact, there is a clear size effect which is likely related to the presence of heterogeneities in the tested rock.

In terms of fracture behavior, the *p*CT method provides good control of the specimen during the experiments

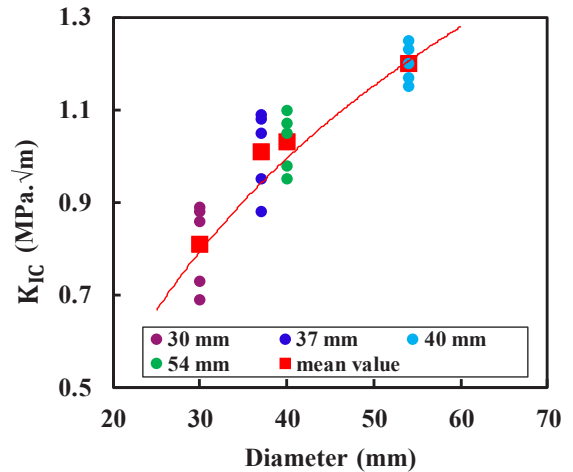


Fig. 2. Mode (I) fracture toughness variations as a function of specimen diameter.

even beyond maximum load. This is proved by the load-displacement curves obtained during the tests, which can be found in the full manuscript of this study.

In this study, an assessment of the cracking process is carried on for each specimen according to the general model of Martin and Chandler (1994), about the progressive failure of brittle rocks, and with respect to the changes of acoustic emission activity distinguished by AE counts and energy characteristics. Accordingly, the failure process of each specimen is divided into five stages (shown in varying shades of green in Fig. 3).

Stage I: Closure of pre-existing flaws and microcracks; Stage II: Development of the material's elastic component, marked by a linear stress-strain relationship; Stage III: Microcracks evolve into mesocracks, leading to accelerated damage and the formation of macrocracks once the load reaches the critical K_{IC} value; Stage IV: Initiated at peak load, the material retains some cohesion but gradually loses strength; Stage V: Advanced interactions between cracks cause the specimen to split.

This five-stage model aligns with AE data. Initially, E_{AE} is minimal, rising slowly during the linear phase as microcracks form. It accelerates significantly during stable crack growth and peaking at the maximum load.

4- Conclusions

In this study, the effect of the specimen size on the fracture toughness of Mode I in a crystalline rock was investigated using the *p*CT method and the AE technique. The results obtained from the fracture toughness test using the *p*CT method indicate that the fracture toughness is a function of specimen size (up to a specific diameter) and increases with an increase in specimen size. The mechanical behavior of during the tests show that the *p*CT method provides a good control of the specimen during the experiments even beyond

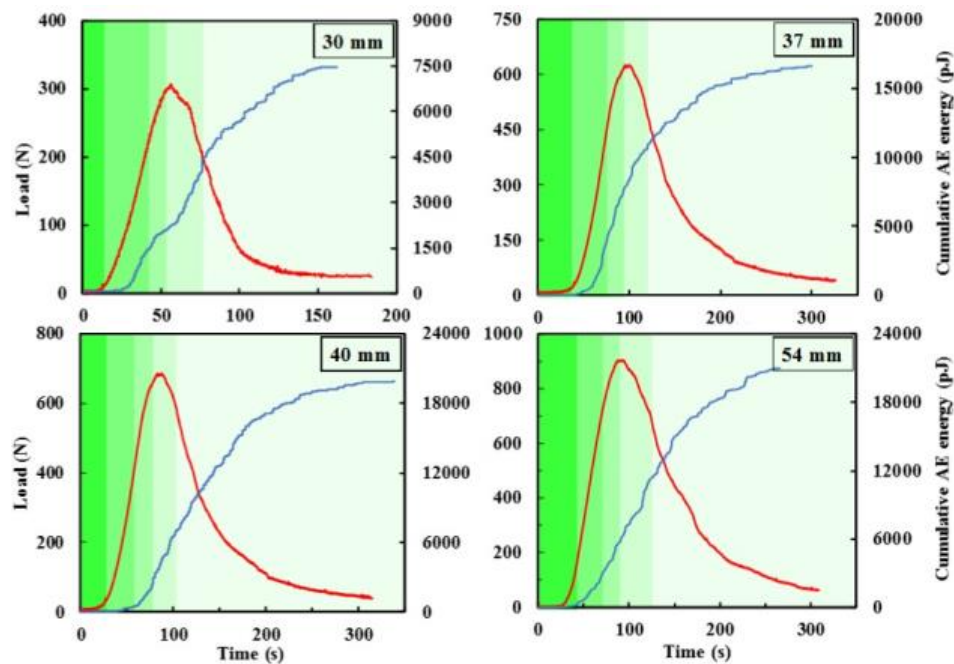


Fig. 3. Load-time and cumulative AE energy-time curves obtained from AE monitoring of *p*CT method for specimens of 30 mm (up-left), 37 mm (up-right), 40 mm (down-left), and 54 mm (down-right) diameter; (Background colors indicate each stage of failure).

the maximum load and proves the suitability of the *p*CT method for evaluating the Mode I fracture toughness of brittle materials. Additionally, this method allows for a complete characterization of fracture behavior, enabling the study of rock behavior at various stages of rock failure using real-time AE monitoring tools during the fracture process.

References

- [1] 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.
- [2] M. Nasser, B. Mohanty, R. Young, Fracture toughness measurements and acoustic emission activity in brittle rocks, *Pure and Applied Geophysics*, 163 (2006) 917-945.
- [3] 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.
- [4] J. Franklin, S. Zongqi, B. Atkinson, P. Meredith, F. Rummel, W. Mueller, Y. Nishimatsu, H. Takahashi, L. Costin, A. Ingraffea, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 25(2) (1988).
- [5] 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.
- [6] A. Muñoz-Ibáñez, J. Delgado-Martín, M. Costas, J. Rabuñal-Dopico, J. Alvarillos-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.
- [7] [7] A. Standard, Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{IC} of metallic materials, *ASTM Book of Standards*, (2012).



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

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

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

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

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اِکرونیا، کرونیا، اسپانیا

۴- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰

کلمات کلیدی:

چقرمگی شکست مود I

آزمایش شبه فشرده کششی (pCT)

روش انتشار آوایی

فرآیند شکست سنگ ترد

اثر اندازه

خلاصه: 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 گرانیتی 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.

۱- مقدمه

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 ضخامت 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 شبه خمشی، فشاری و کششی

استفاده گسترده از توده‌سنگ 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 هر یک 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.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sayadiasal@gmail.com



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 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 بعلت 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^{۱۳} 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.

برای تعیین K_{IC} در سنگ پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش روش میله کوتاه [۱]، آزمون خمش نمونه استوانه‌ای با شیار چورون^۲ [۱، ۲]، نمونه نیم‌دایره‌ای با شیار مستقیم [۳-۶]، نمونه برزلی با شیار مستقیم [۷، ۸]، نمونه برزلی با شیار چورون^۵ [۹، ۱۰]، نمونه نیم‌دایره‌ای با شیار چورون [۱۱] و دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی [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 برزلی 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 گاهاً با مشکلاتی روبرو است. فرآیند آماده‌سازی وقت‌گیر نمونه‌ها، احتمال وقوع شکست زودهنگام^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 تحت‌الشعاع 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^{۱۳} (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

- 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)

۲- 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- 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 (CT) مطابق با استاندارد ASTM E399-12 [۱۹]، توسط مونیز-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:

$$K_{IC} = Y' \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \quad (۱)$$

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:

$$Y'_{pCT} = C_0 + C_1 \left(\frac{a}{b}\right) + C_2 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + C_4 \left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (۲)$$

$C_0 - C_4$ ، ضرایب وابسته به اندازه نمونه، برای محاسبه ضریب شدت تنش است. مقادیر $C_0 - C_4$ ، برای قطرهای ۳۸، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، به عنوان ضرایب مرجع، در جدول ۱ ارائه شده است [۱۵].

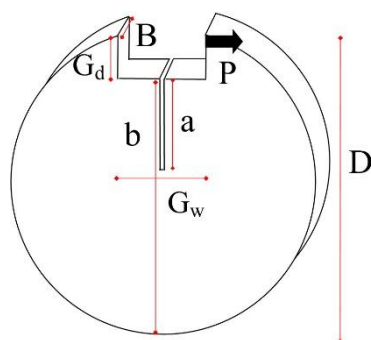
۲-۲- آماده‌سازی نمونه

در این مطالعه از یک گونه سنگ گرانیتی (گرانیت گریس کادالسو^۲) استخراج شده از نواحی شمال غرب اسپانیا، ایالت گالیسیا^۳ 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.

2 Gris Cadalso Granite

3 Galicia

1 Compact Tension test (CT)



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.

Fig. 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.

جدول ۲. مشخصات هندسی نمونه‌ها

Table 2. Tested (pCT) 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

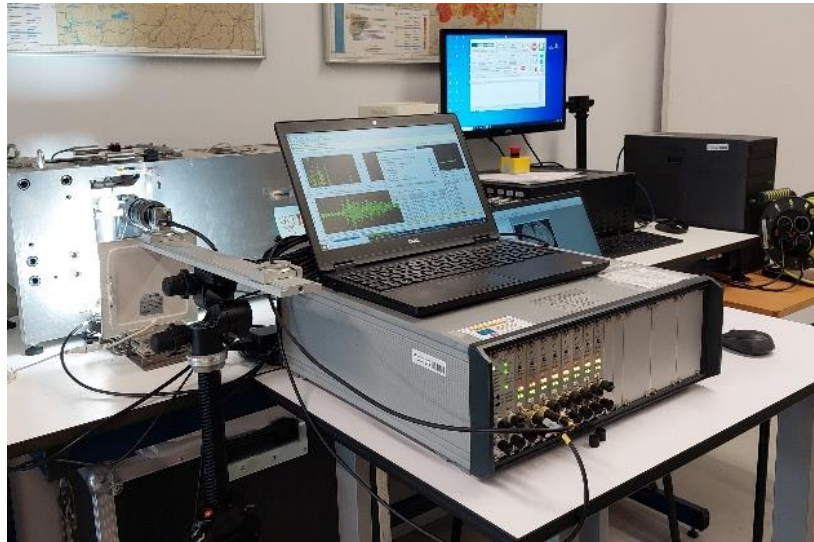
۲-۳- تجهیزات آزمایش

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 صلیبیت 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

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.

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 پهلوی 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.

1 Linear Variable Differential Transducer (LVDT)



شکل ۲. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش.

Fig. 2. Testing equipment designed and built to perform pCT tests.

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 10° بعنوان شکست صحیح در نظر گرفته شد. از میان آزمایش‌هایی که صحت آن‌ها با توجه به معیار ذکر شده به تأیید رسید، یک

[۲۰] با سرعت آهسته و نرخ ثابت بارگذاری معادل 0.1 mm/min (مطابق پیشنهاد [۲۱]) انجام شده است.

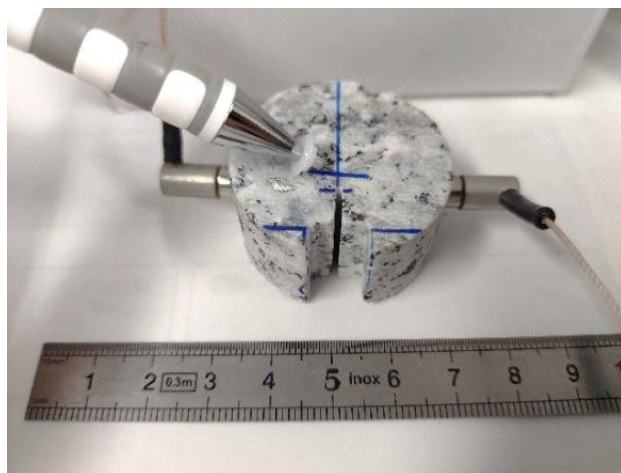
در طول آزمایش نیروی اعمالی بر نمونه و همچنین جابجایی متناظر با فک متحرک فولادی بطور پیوسته ثبت و سپس جهت پایش اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است.

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 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، برداشته‌های انتشار آوایی (AE) با استفاده از سیستم چندکاناله AMSY-6 (Vallen Systeme GmbH)، مجهز به ۸ بُرد ASIP-2 (دو کانال در هر بُرد) با قابلیت پایش سیگنال تا ۱۶ کانال انجام شده است.

امواج پیوسته با نرخ ثبت داده ۱۰ MHz ضبط و جهت حذف فرکانس‌های ناخواسته مربوط به نویز سیستم یا محیط، حد آستانه‌ای ۴۰ dB 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

1 Real-time monitoring
2 Hsu-Nielsen source



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

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

تشکیل می‌شود. پس از آن و در مرحله (IV)، با کاهش بار در نتیجه تشکیل ترک اصلی در صفحه لیگامان^۳، رفتار نمودار در مرحله^۴ پس از شکست (V)، بصورت نرم‌شونده^۴ ادامه یافته است. مقایسه نمودار بار-جابجایی مربوط به هریک 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.

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^۵ (σ) و ضریب تغییرات^۶ (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 تا حدودی پراکندگی داخلی در بین نتایج مشاهده می‌شود. این میزان از پراکندگی با توجه به تکرار شونده‌گی موجود در هر قطر

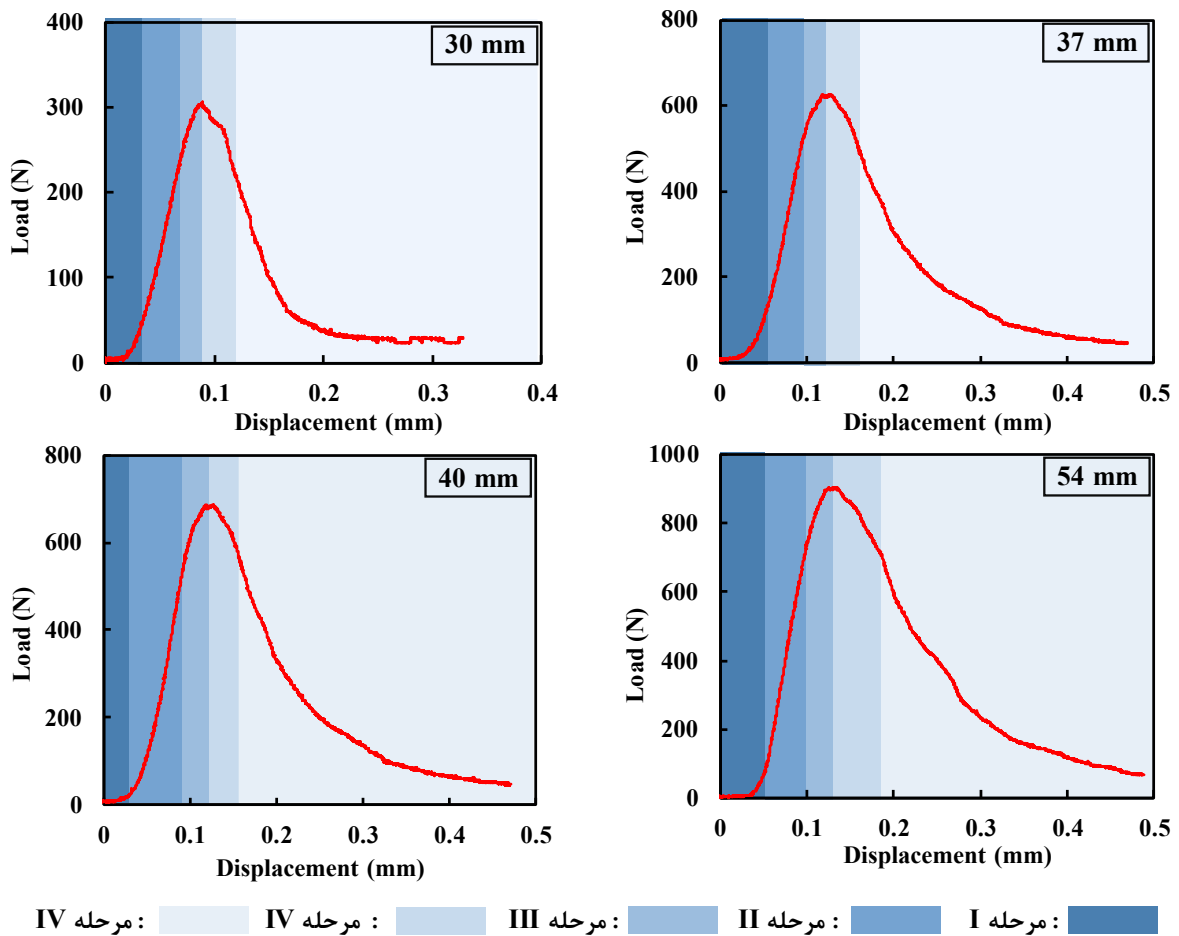
آزمایش در هر یک از قطرها به عنوان منتخب، گزینش شده و از این پس (بمنظور اجتناب از تکرار) تشریح رفتار نمودارها بصورت مجزا تنها برای نمونه منتخب در هر قطر ارائه شده است.

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^۱ و کندلر^۲ [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 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

3 Ligament
4 Softening
5 Standard deviation
6 Coefficient of variation

1 Martin
2 Chandler



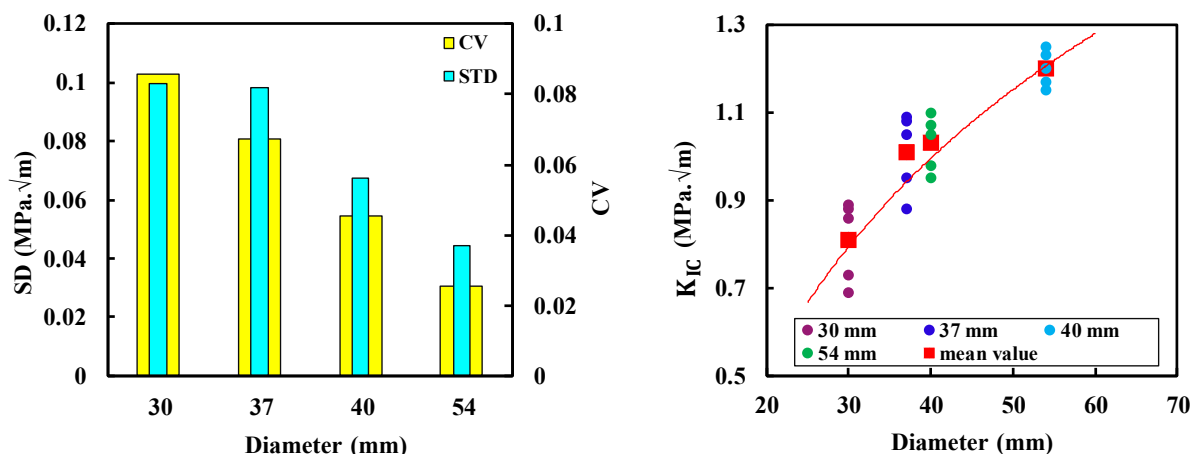
شکل ۴. نمودار بار-جابجایی حاصل از روش pCT برای نمونه‌های با قطر ۳۰ (بالا-چپ)، ۳۷ (بالا-راست)، ۴۰ (پایین-چپ) و ۵۴ (پایین-راست) میلی‌متر؛ (رنگ‌های پس‌زمینه بیانگر هر یک از مراحل پنج‌گانه فرآیند شکست است).

Fig. 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).

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. \sqrt{m})	μ (MPa. \sqrt{m})	σ (MPa. \sqrt{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



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.

Fig. 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.

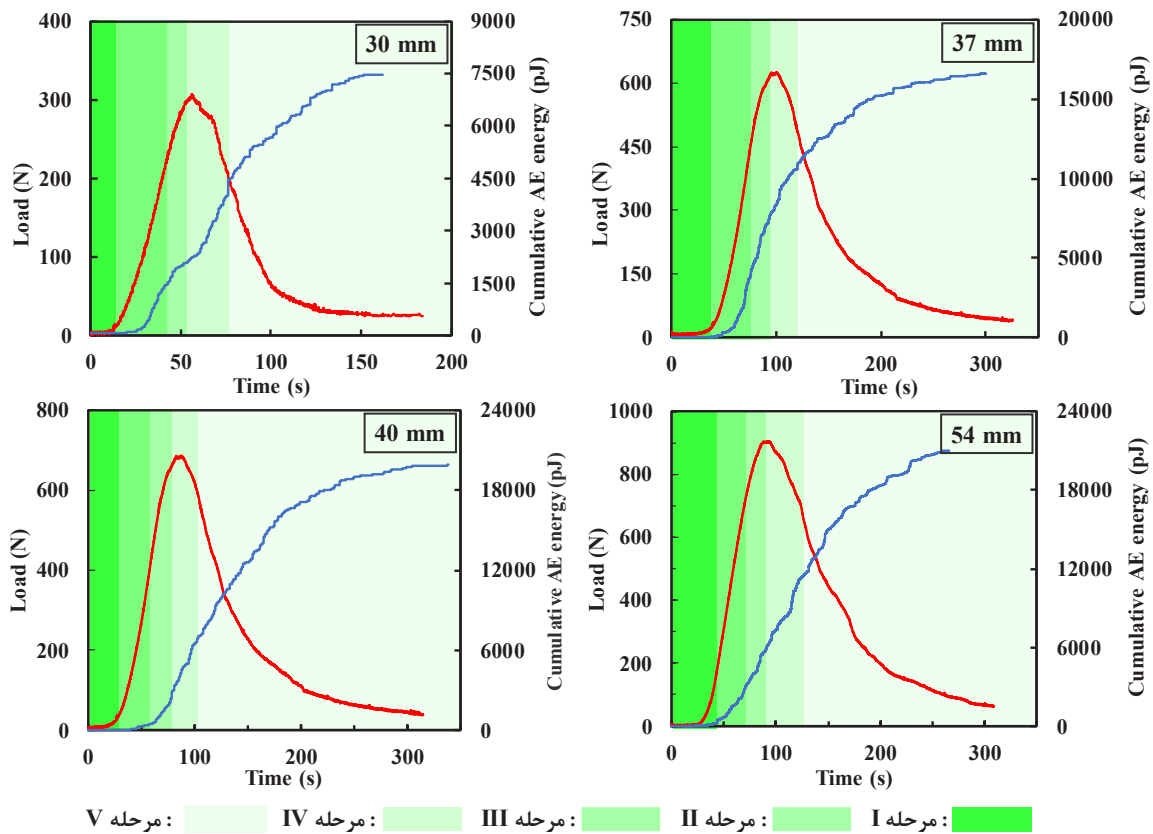
از نمونه را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که؛ نمونه‌های بزرگ‌تر به میزان انرژی بیشتری برای گسترش ترک آغاز شده از شیار اولیه نیاز دارند. به عبارتی در نمونه‌های با قطر کوچک‌تر (با فرض ثابت بودن طول شیار اولیه) طول لیگامان (برابر با $D-b-G_0$ در شکل ۱) کوتاه‌تر بوده و در نتیجه میزان انرژی لازم برای گسترش شکست 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 تغییراتی 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

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 هتروژنیته 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



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).

Fig. 6. Load- time and cumulative energy- time curves obtained from AE monitoring of 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).

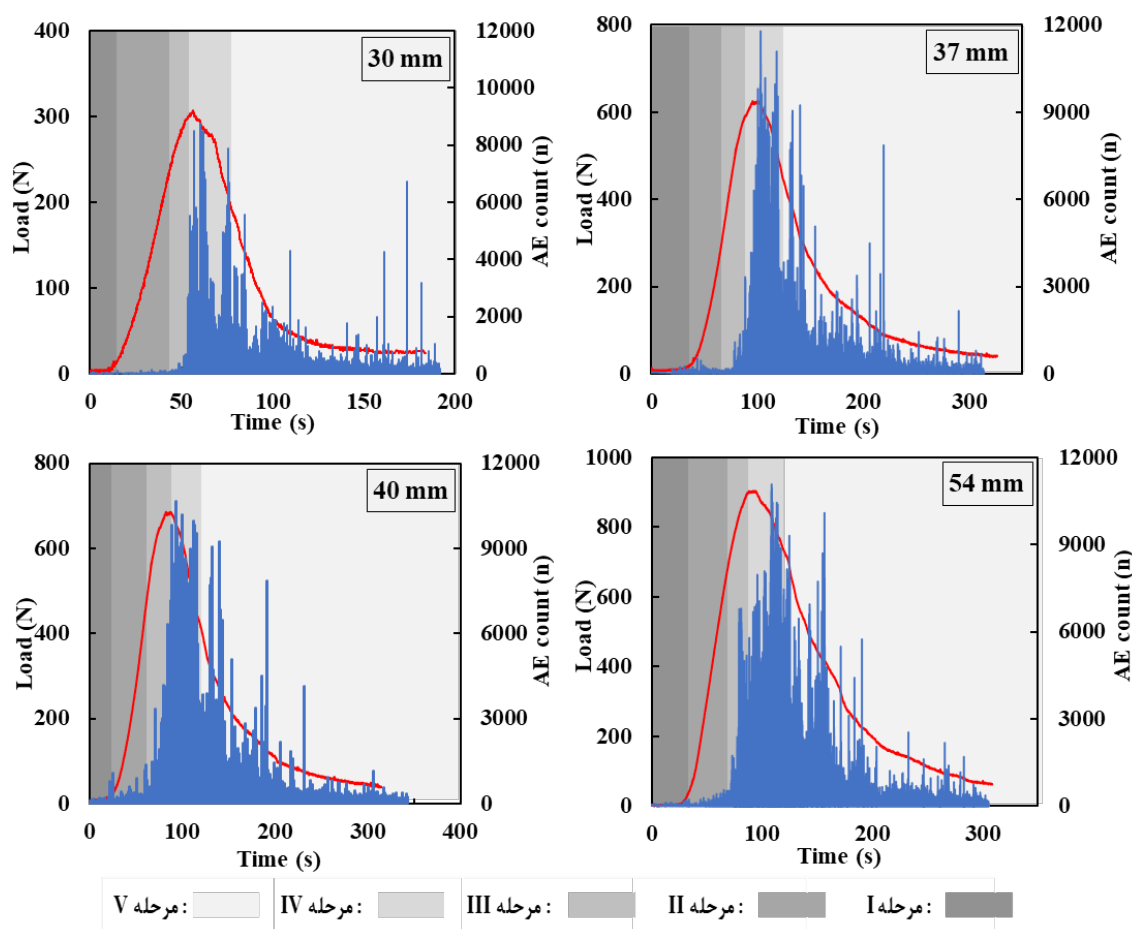
بر این دو مدعا، به‌نظرمی‌رسد مقدار چقرمگی شکست در آزمایش pCT انجام‌شده در این مطالعه با شروع کاهش نرخ تغییر در قطر ۵۰ میلی‌متر، برای نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر از ۵۴ میلی‌متر تمایل به همگرا شدن K_{IC} به مقدار تقریباً ثابتی از خود نشان خواهد داد. بدین ترتیب دور از انتظار نیست که با تکرار آزمایش برای قطرهای (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.

۳-۳ نتایج رفتارسنجی انتشار آوایی در نمونه های pCT

پس از تحلیل اطلاعات حاصل از ثبت سیگنال‌های AE، انرژی و تعداد رویدادها به عنوان دو توصیف‌گر کمی فرآیند ایجاد و گسترش ترک، در آزمایش‌های چقرمگی شکست در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۶ و شکل ۷ بترتیب نمودار تعداد رویدادها و انرژی تجمعی AE بر

گسترش ناحیه فرآیند شکست (FPZ) باشد. FPZ دربرگیرنده یک ناحیه با تغییرشکل‌های به شدت موضعی شده ناشی از گسترش ریزترک‌ها است [۶]. در صورتی‌که FPZ در اطراف نوک ترک، در مقایسه با ابعاد نمونه به‌قدر 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

1 Fracture Process Zone (FPZ)



شکل ۷. نمودار بار- زمان و تعداد رویداد آوایی- 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).

Fig. 7. Load- time and cumulative count- time curves obtained from AE monitoring of *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).

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. سیگنال‌های ثبت شده در این مرحله عموماً مرتبط با بسته‌شدن ریزترک‌ها و اندکی هم ناشی از قرارگیری فک‌های 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 [۳۲، ۳۱] 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

حسب زمان و براساس میزان بار اعمال شده بر نمونه را برای هر یک از نمونه‌های ۳۰، ۳۷، ۴۰ و ۵۴ میلی‌متری نشان می‌دهد.

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 شکل‌گیری ترک اصلی، افزایش قابل توجهی را به ثبت رسانده‌اند. مشابه آنچه در بخش ۳-۱ برای تقسیم‌بندی رفتار مکانیکی شکست در مراحل مختلف ارائه شد؛ می‌توان هر یک از نمودارهای شکل ۶ و شکل ۷ را از لحاظ

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 برحسب جابجایی و زمان و همچنین نمودارهای تعداد رویدادها و انرژی تجمعی AE، بطور مجزا مورد بررسی قرار گرفت.

روش pCT برخلاف سایر روش‌های متوال 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 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.

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 متغیر 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 بین دانه‌های 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

- [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*
- [1] J. Franklin, S. Zongqi, B. Atkinson, P. Meredith, F. Rummel, W. Mueller, Y. Nishimatsu, H. Takahashi, L. Costin, A. Ingraffea, 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. Aliha, 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.

- 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. Saporá, 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. Nasserí, 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.
- 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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh. Sayadi, A. R. Baghbanan, M. Javadi, J. Delgado-Martin, H. Hashemolhosseini, Mode I fracture toughness determination of granite specimens using pseudo-compact tension method, Amirkabir J. Civil Eng., 56(10) (2025) 1275-1290.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22419.7967](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22419.7967)

