Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Experimental investigation on the effect of loading platen curvature on the failure patterns in the Brazilian test

Reza Mohseni Afkham[1], Mojtaba Bahaaddini[2]✉, Abbas Majdi[3]

1. M.Sc. student, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: r.mohseniafkham@ut.ac.ir
2. Associate Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: m.bahaaddini@ut.ac.ir
3. Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: amajdi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 25 September 2025
Accepted 8 November 2024

Keywords:
Tensile strength, Brittle materials, Brazilian test, Jaw curvature ratio, Failure pattern.

ABSTRACT

Tensile strength is one of the most important mechanical properties of brittle materials and plays a decisive role in the stability of many civil and mining structures. The Brazilian test is the most common indirect method for determining tensile strength and is widely employed. In this test, it is generally assumed that a central tensile crack initiates and propagates along the loading axis. However, the actual fracture process in the Brazilian test remains a controversial issue, and using curved loading platens has been recommended to better concentrate tensile stresses at the center of specimen. This study investigated the influence of platen curvature on the estimated tensile strength and the fracture patterns. To this end, five types of platen with curvature ratios of 0, 0.50, 0.57, 0.67, and 0.80 were prepared. All tests were recorded using a high-speed camera to precisely capture the initiation and propagation of cracks. To minimize the effect of rock heterogeneity and obtain consistent results, synthetic specimens were used, and five samples were tested for each curvature ratio.The results indicated that increasing the platen curvature led to a higher estimated tensile strength. While the increase was negligible for curvature ratios up to 0.67, at the ratio of 0.80 the tensile strength was approximately 48% higher compared to 0.67. Analysis of fracture patterns revealed that at the curvature ratio of 0.80, the fracture mode shifted to an unstable and disturbed pattern, characterized by secondary shear cracks and the irregular propagation of the main crack.

Introduction

Tensile strength is one of the most important mechanical properties of materials and plays a decisive role in various branches of engineering, particularly in rock mechanics, engineering geology, and the design of structures located in rock foundations. As geotechnical and construction materials are much weaker in tension than in compression or shear, accurate measurement of this property is essential for predicting material behaviour and ensuring the safe design of structures. There are various methods of determining tensile strength, which fall into two categories: direct and indirect. Although direct methods provide the most reliable results, they are difficult to implement, which is why indirect methods are more common, especially the Brazilian test, due to its simplicity and ability to provide acceptable results. The validity of the Brazilian test is influenced by various factors, including sample characteristics (shape, size, mechanical properties, and internal cracks) and loading conditions (angle and curvature of the platens, loading rate, and type of contact). Previous studies have shown that the curvature of loading platens significantly affects stress distribution, crack initiation locations, and fracture patterns of specimens. However, a comprehensive investigation of the effect of the contact angle

Cite this article: Mohseni Afkham, R., Bahaaddini, M., Majdi, A., (2025). Experimental investigation on the effect of loading platen curvature on the failure patterns in the brazilian test. Journal of Engineering Geology, 19 (3), 414-429. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1014354

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1014354

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1014354]

between the platen and the specimen on fracture patterns and tensile strength values has not yet been fully conducted.

This study involved carrying out Brazilian tests on rock-like specimens using five types of loading platens with different specimen-to-platen radius ratio. The process of crack initiation and propagation was recorded using high-speed cameras to accurately examine the effect of platen curvature on tensile strength values and fracture patterns.

Materials and Methods

This study involved conducting 25 Brazilian tests were conducted on rock-like specimens with sand-to-cement and water-to-cement ratios of 0.5. The specimens were prepared using Type II Portland cement, fine sand in accordance with ASTM C136-06 (ASTM, 2015), and water. After precise measurement, the mixture was poured into molds and compacted by tamping and vibrating. Specimens were kept in molds for 24 hours, after which they were cured in water for 28 days. All specimens were cut into discs with a thickness-to-diameterratio of 0.6, and their contact surfaces were polished. Tests were carried out using an MTS 815 machine at a loading rate of 0.2 mm/min. Five types of loading platen with specimen-to-platen radius ratios (ρ) of 0, 0.50, 0.57, 0.67, and 0.80 were employed.. All tests were recorded with high-speed cameras, and the videos were analyzed frame by frame to accurately investigate the effect of platen type and loading conditions on fracture patterns and tensile strength values.

Results and discussion

The results showed that with an increase in the jaw curvature ratio (ρ), the peak load and the estimated tensile strength increases. The highest strength was observed in all specimens ρ = 0.80, due to an increase in the contact angle and a greater concentration of compressive stresses in the loading area. The load–displacement curves also indicated that significant change in the behavior of the specimens mainly occurred at ρ = 0.80, where the displacement corresponding to the peak load increased and showed greater scatter.

Four types of fracture patterns were observed in the specimens:

Type 1: A tensile crack that initiates from the centre of the disc and propagates to the platens, representing the standard Brazilian failure pattern.

Type 2: A central tensile crack accompanied by shear cracks near the contact points, the most frequent type observed in experiments.Type 3: The specimen is crushed into multiple fragments due to multiple unstable cracks and a central crack. This was mostly observed in specimens with a higher strength, at ρ = 0.67 and ρ = 0.80.

Type 4: A central tensile crack accompanied by a horizontal crack at the edges of the specimen, which was observed more frequently as ρ increased.

Type 2 failure was dominant in specimens with medium strength. Types 3 and 4 failures exhibited the greatest variability and scatter in the data, attributed to the interplay of tensile and shear stresses, as well as the manner of crack formation.

Conclusions

Specimens with an estimated low tensile strength (less than 3 MPa) mostly exhibited a single central crack. In contrast, specimens with a medium strength (3 to 5 MPa) predominantly exhibited Type 2 failure, consisting of a central crack accompanied by shear cracks. In specimens with an estimated higher strength, particularly at higher radius ratios, boundary failures and multiple fractures were predominant, which could lead to an overestimation of tensile strength. Additionally, a failure mode was observed in which horizontal cracks appeared at the specimen edges simultaneously with the central crack.

A detailed analysis showed that the increase in the jaw curvature ratio had a significant effect on tensile strength, on average. The following

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1014354]

increases were observed: 9.9% for a jaw curvature ratio of 0.50 compared to a flate platen (0.0); about 1.36% for a jaw curvature ratio of 0.57 compared to 0.50; 12.34% for a jaw curvature ratio of 0.67 compared to 0.57; and about 47.7% for a jaw curvature ratio of 0.80 compared to 0.67. However, it was found that a jaw curvature ratio of 0.80 causes a considerable overestimation of tensile strength due to an increase in contact angle and generation of compressive stresses. Therefore, it is not recommended for determining tensile strength.

Overall, the results indicated that, when Type 1 failure does not occur, it is preferable to use the term 'apparent tensile strength'. It is also recommended that numerical analyses with calibrated simulations be conducted to address the practical limitations of the test and the influence of shear cracks fully.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1014354]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

بررسی آزمایشگاهی تأثیر انحنای صفحات بارگذاری بر الگوی شکست در آزمون برزیلی

رضا محسنی افخم[۱]، مجتبی بهاءالدینی[۲]✉، عباس مجدی[۳]

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: r.mohseniafkham@ut.ac.ir
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: m.bahaaddini@ut.ac.ir
۳. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: amajdi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلیدواژه‌ها:
مقاومت کششی، مواد شکننده، آزمایش برزیلی، نسبت انحناء فک‌های بارگذاری، الگوی شکست.

چکیده

مقاومت کششی یکی از خواص مکانیکی مواد شکننده است که نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری بسیاری از سازه‌های عمرانی و معدنی ایفا می‌کند. آزمایش برزیلی به‌عنوان رایج‌ترین روش غیرمستقیم تعیین مقاومت کششی مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش فرض بر این است که ترک کششی در مرکز نمونه ایجادشده و در راستای محور بارگذاری گسترش می‌یابد. اما نحوه شکست در این آزمایش، از مباحث چالش‌برانگیز در این آزمون بوده است و استفاده از صفحات دارای انحناء برای متمرکز شدن تنش کششی در مرکز نمونه توصیه شده است. در این پژوهش سعی بر آن است، تأثیر انحنای فک‌های بارگذاری بر مقاومت کششی و الگوهای شکست موردبررسی قرار گیرد. برای این منظور از پنج نوع فک با نسبت انحناء ۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷، ۰/۶۷ و ۰/۸۰ برای تحلیل اثر انحنای فک‌ها استفاده شد و تمامی آزمایش‌ها با دوربین تصویربرداری پرسرعت ثبت گردید تا فرآیند شروع و گسترش ترک‌ها به‌طور دقیق تحلیل شود. نظر به ماهیت ناهمگن مواد سنگی و جهت جلوگیری از تأثیر آن بر نتایج، از نمونه مصنوعی بهره گرفته شد و در هر نسبت انحناء، پنج نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش نسبت انحناء باعث افزایش مقدار مقاومت کششی تخمین زده می‌شود. در نسبت انحناء صفرتا ۰/۶۷، این مقدار افزایش ناچیز بوده، اما در نسبت ۰/۸۰ نسبت به ۰/۶۷ حدود ۴۸ درصد افزایش داشته است. بررسی نحوه شکست نمونه‌ها نشان داد که با افزایش انحناء به نسبت ۰/۸۰ نوع شکست به حالت نامعتبر و آشفته همراه با ترک‌های برشی ثانویه و گسترش نامنظم ترک اصلی تغییر یافت.

مقدمه

مقاومت کششی یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی مواد، بلاخص مواد شکننده می‌باشد که در طراحی و ساخت سازه‌های سنگی نقش مهمی و تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. دقت در اندازه‌گیری این خاصیت، به‌ویژه در طراحی سازه‌های واقع در بستر سنگ، اهمیت فراوانی دارد، زیرا مواد ژئوتکنیکی در برابر کشش بسیار ضعیف‌تر از فشار یا برش هستند (Fairhurst, 1964). برای تعیین مقاومت کششی، روش‌های متعددی وجود دارد که به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. آزمون کشش مستقیم، به‌عنوان معتبرترین روش شناخته می‌شود. اما روش‌های غیرمستقیم به دلیل چالش‌هایی در انجام آزمون کشش مستقیم مانند اتصال مناسب نمونه به فک بارگذاری، احتمال شکست در اثر خمش و همچنین مشکلات اعمال کشش، متداول‌تر می‌باشند (Hudson et al., 2002). روش‌های غیر مستقیم بسیار مختلفی شامل آزمایش برزیلی (Bahaaddini et al., 2019; Serati et al., 2021; Jamshidi, 2024)، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای (Coviello et al., 2005)، آزمایش حلقه (Serati and Williams, 2015)، آزمایش شکست

استناد: محسنی افخم، ر.، بهاءالدینی، م.، مجدی، ع. (۱۴۰۴). بررسی آزمایشگاهی تاثیر انحنای صفحات بارگذاری بر الگوی شکست در آزمون برزیلی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۳)، ۴۱۴-۴۲۹. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1014354

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1014354]

هیدرولیکی (Hubbert and Willis, 1957)، آزمایش دیسک برزیلی کوتاه شده (Serati et al., 2017)، آزمایش دیسک برزیلی تخت‌شده (Wang and Wu, 2004) و آزمایش بار نقطه‌ای (Serati et al., 2019) توصیه شده‌اند. اما از بین روش‌های غیرمستقیم، آزمایش برزیلی به دلیل سادگی تهیه نمونه و انجام آزمایش در مکانیزم فشار، به‌عنوان رایج‌ترین روش برای سنگ‌های شکننده شناخته می‌شود (Hosseini and Abdolghanizadeh, 2017). در این روش، نمونه تحت بار فشاری به‌صورت قطری قرار می‌گیرد و فرض بر این است که شکست با شروع ترک در مرکز نمونه به‌صورت کشش اتفاق می‌افتد. در آزمایش برزیلی، مقاومت کششی تابعی از نیروی شکست (P)، ضخامت نمونه (t) و قطر نمونه (D) است و مطابق رابطه (۱)، محاسبه می‌شود (Hondros, 1959).

$$\sigma_{BTS} = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (۱)$$

اعتبار آزمایش برزیلی در تخمین مقاومت کششی، از زمان معرفی این روش توسط کارنیرو (Carneiro, 1943) و آکازاو (Akazawa, 1943) همواره یک موضوع چالش‌برانگیز بوده است. عوامل مختلف داخلی و خارجی می‌توانند بر اعتبار این آزمایش تأثیر بگذارند. عوامل داخلی مربوط به نمونه شامل شکل و اندازه نمونه، جهت‌گیری و اندازه ریزترک‌های داخلی، خواص مکانیکی مواد و شرایط مرزی هستند (Bahaaddini, 2018). همچنین، عوامل خارجی نیز در این زمینه نقش دارند که شامل: نرخ بارگذاری، زاویه بارگذاری و شکل سطوح بارگذاری می‌باشد. این عوامل می‌توانند بر مکان، شکل و الگوی ترک در نمونه‌های دیسکی تأثیر بگذارند. از سوی دیگر، نحوه تماس نمونه با فک بارگذاری و میزان تماس آن در لحظه شکست، یک پارامتر بسیار مهم دیگر است که می‌تواند بر مکانیزم ایجاد و گسترش ترک تأثیرگذار باشد (Komurlu and Kesimal, 2012; 2015). در این میان، انتقال مسیر شکست و نوع شکست تا حد زیادی به انحنای صفحات بارگذاری وابسته است (Kourkoulis et al., 2013; Xiao et al., 2022). در مطالعات پیشین، الگوهای مختلف شکست در آزمایش برزیلی از جمله شکست کششی مرکزی، شکست ترکیبی (کششی–برشی) و شکست برشی گزارش شده‌اند (Fairhurst, 1964; Serati et al., 2021). مطالعات تجربی نشان می‌دهد که هندسه بارگذاری، ناهمگنی ماده و ویژگی‌های تماس بین فک و نمونه، الگوی شکست را تعیین می‌کند و معمولاً شکست کششی مرکزی به عنوان حالت معتبر آزمون شناخته می‌شود. با این حال، وجود ناهمگنی‌های ذاتی در ساختار سنگ و تغییرات در شرایط بارگذاری، می‌تواند منجر به تغییر محل شروع ترک و در نتیجه بروز الگوهای شکست متفاوت گردد. این عدم قطعیت‌ها از عوامل اصلی پراکندگی نتایج در آزمون برزیلی محسوب می‌شوند.

مطالعات مختلفی برای بررسی تأثیر انحنای صفحات بارگذاری بر نتایج آزمایش برزیلی انجام‌شده است (Bouali and Bouassida, 2021; Erarslan et al., 2012; Gutiérrez-Moizant et al., 2018; 2020; Komurlu and Kesimal, 2015; Qiao, 2022; Li et al., 2020; Rajaei Moghaddam et al., 2025; Khavari and Heidari, 2016; Zhang et al., 2023). بر اساس استاندارد مکانیک سنگ (ISRM, 1978)، صفحات بارگذاری بایستی دارای نسبت انحناء (شعاع فک بارگذاری به شعاع دیسک) ۰/۶۷ باشند، تا از بروز شکست‌های نامعتبر جلوگیری شود. در مطالعات آزمایشگاهی ارارسلان و همکاران (Erarslan et al., 2012)، با استفاده از قوس‌های بارگذاری با زوایای مختلف، بهترین شرایط برای ایجاد ترک مرکزی در زاویه تماس $2\alpha = 30^{\circ}$ ایجاد شد و با افزایش زاویه تماس، نیروی لحظه شکست افزایش یافت. اما در این بررسی، در فک استاندارد ISRM بیشترین انحراف و شکست نامعتبر گزارش شد. کومرلو و کسمیل (Komurlu and Kesimal, 2015) نشان دادند که فک‌های انحناء دار، به‌ویژه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]

با زاویه‌های ۲۰ و ۳۰ درجه، تمرکز تنش در لبه‌ها را کاهش داده و شکست یکنواخت‌تر و قابل‌اعتمادتری نسبت به فک تخت را ایجاد می‌کنند. گارسیا و همکاران (García et al., 2017) دریافتند که با افزایش زاویه تماس از ۱۰ به ۲۲ درجه منجر به کاهش پراکندگی نتایج و وقوع شکست در مرکز دیسک شده است. گانگ و همکاران (Gong et al., 2019) با بررسی تأثیر نرخ و زاویه بارگذاری نشان دادند که در نرخ بارگذاری بالا، شکست ناگهانی و انفجاری و در نرخ پایین‌تر شکست بصورت تدریجی رخ می‌دهد. همچنین، زاویه و نوع صفحه بارگذاری (صفحات تخت، صفحات تخت با تماس میله فولادی و صفحات انحناءدار) توزیع تنش و الگوی شکست را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند. لی و همکاران (Li et al., 2020) پنج نوع سنگ را تحت سه روش بارگذاری صفحات تخت، صفحات تخت با تماس میله فولادی و صفحات انحناء دار را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که نوع بارگذاری و ویژگی‌های سنگ تأثیر قابل‌توجهی بر نیروی نهایی و الگوی شکست دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که صفحات انحناء دار تمرکز تنش را کاهش داده و ترک‌ها معمولاً از وسط دیسک شروع می‌شوند.

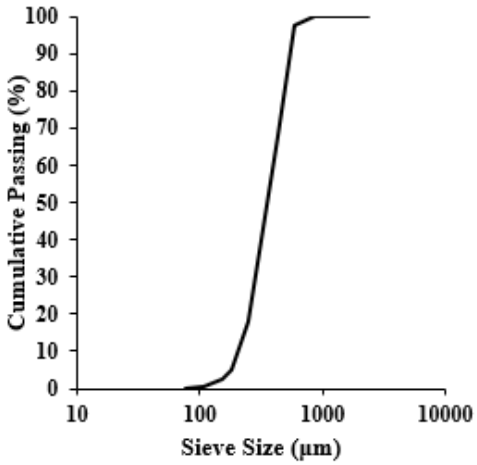
مروری بر تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که با وجود نقش تعیین‌کننده انحناء صفحات بارگذاری در نحوه توزیع تنش و درنتیجه در شکل‌گیری و گسترش شکست، شرایط بارگذاری که منجر به نتایج معتبر و قابل اعتماد در آزمایش برزیلی شود، مشخص نمی‌باشد. همچنین، مکانیزم‌های شکست در آزمون برزیلی در صفحات دارای انحناءهای مختلف، به‌صورت جامع موردبررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، به‌منظور بررسی تأثیر انحنای فک‌های بارگذاری، پنج نوع فک با نسبت شعاع نمونه به شعاع فک برابر با ۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷، ۰/۶۷و ۰/۸۰ طراحی و ساخته شد. انتخاب این نسبت‌ها بر اساس بررسی نسبت‌های به‌کار رفته در مطالعات پیشین و همچنین با هدف مقایسه شرایط استاندارد ISRM ($\rho = 0.67$) و صفحات بارگذاری تخت با حالت‌هایی با نسبت انحناء متفاوت صورت گرفت. تمامی آزمایش‌ها با استفاده از دوربین تصویربرداری با سرعت ثبت بالا ثبت گردید تا فرآیند شروع و گسترش ترک‌ها به‌طور دقیق بررسی شود. پس از انجام آزمایش‌ها، تأثیر انحنای فک بارگذاری بر مقادیر مقاومت کششی به‌دست‌آمده و همچنین بر الگوهای شکست نمونه‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، مجموعاً ۲۵ آزمایش بر روی یک نوع نمونه شبه سنگی انجام شد. ازآنجاکه مواد سنگی دارای ماهیت ناهمگن می‌باشند و وجود ریزترک‌ها در ساختار آن‌ها می‌تواند منجر به پراکندگی نتایج شود، از نمونه مصنوعی بهره گرفته‌شده است. برای ساخت این نمونه‌ها، نسبت ماسه به سیمان و همچنین نسبت آب به سیمان هر دو برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. در فرآیند تهیه نمونه‌ها از سیمان پرتلند نوع ۲، آب شهری و ماسه ریزدانه با دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM C-136-06 (ASTM, 2015) استفاده شد. توزیع دانه‌بندی ماسه ریزدانه‌بر اساس آنالیز سرندی انجام شد و نتایج آن در شکل (۱) آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه مورداستفاده مطابق با استاندارد ASTM C136-06.

Fig. 1. Grain size distribution curve of the sand followed by ASTM C136-06.

بر اساس این استاندارد، ماسه باید کاملاً از الک شماره ۴ (۲/۴ میلی‌متر) عبور کند و دانه‌های آن روی الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) باقی بمانند. در شکل (۲)، فرایند سرند کردن ۱ کیلوگرم ماسه، که به‌عنوان نماینده‌ای از کل ماسه مصرفی در مطالعه انتخاب‌شده است.

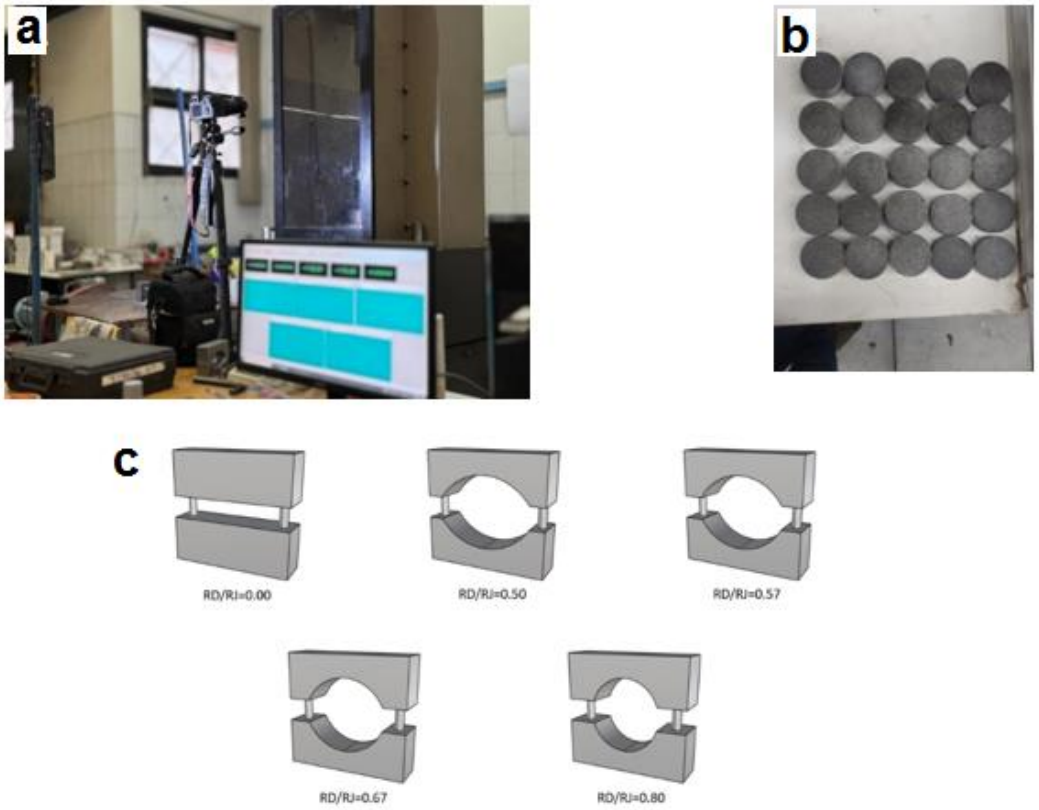


شکل ۲. نمایی از فرایند سرند کردن ماسه مصرفی و ماسه باقی‌مانده بر روی هرسرند.

Fig. 2. View of the sieving process of the sand used and the retained sand on each sieve.

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا مصالح شامل سیمان، ماسه و آب با دقت یک‌صدم گرم اندازه‌گیری شدند. پس از مخلوط شدن، قالب‌ها روی میز لرزان قرار داده شده تا هوای داخل نمونه‌ها خارج و کیفیت استاندارد تضمین شود. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب‌ها نگهداری شدند. پس‌ازاین مدت، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج‌شده و به مدت ۲۸ روز در آب قرار داده شدند تا فرآیند گیرش نهایی و تقویت مقاومت آن‌ها کامل شود تمامی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D3967-16 برای آزمایش برزیلی آماده‌سازی شدند (ASTM, 2016). نمونه‌ها به‌صورت دیسکی برش زده شده (با نسبت ضخامت به قطر ۶/) و سطوح تماس آن‌ها صیقل داده‌شده تا شرایط استاندارد آزمایش فراهم گردد (شکل ۳ -b). آزمایش‌ها تحت شرایط کنترل‌شده با دستگاه MTS 815 و نرخ بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه در انجام شد (شکل ۳ - a). پنج آزمایش برزیلی با استفاده از پنج نوع فک بارگذاری مختلف انجام شد که نسبت شعاع نمونه به شعاع فک (ρ) در آن‌ها به ترتیب برابر با ۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷، ۰/۶۷ و ۰/۸۰ بود (شکل ۳ - c).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]

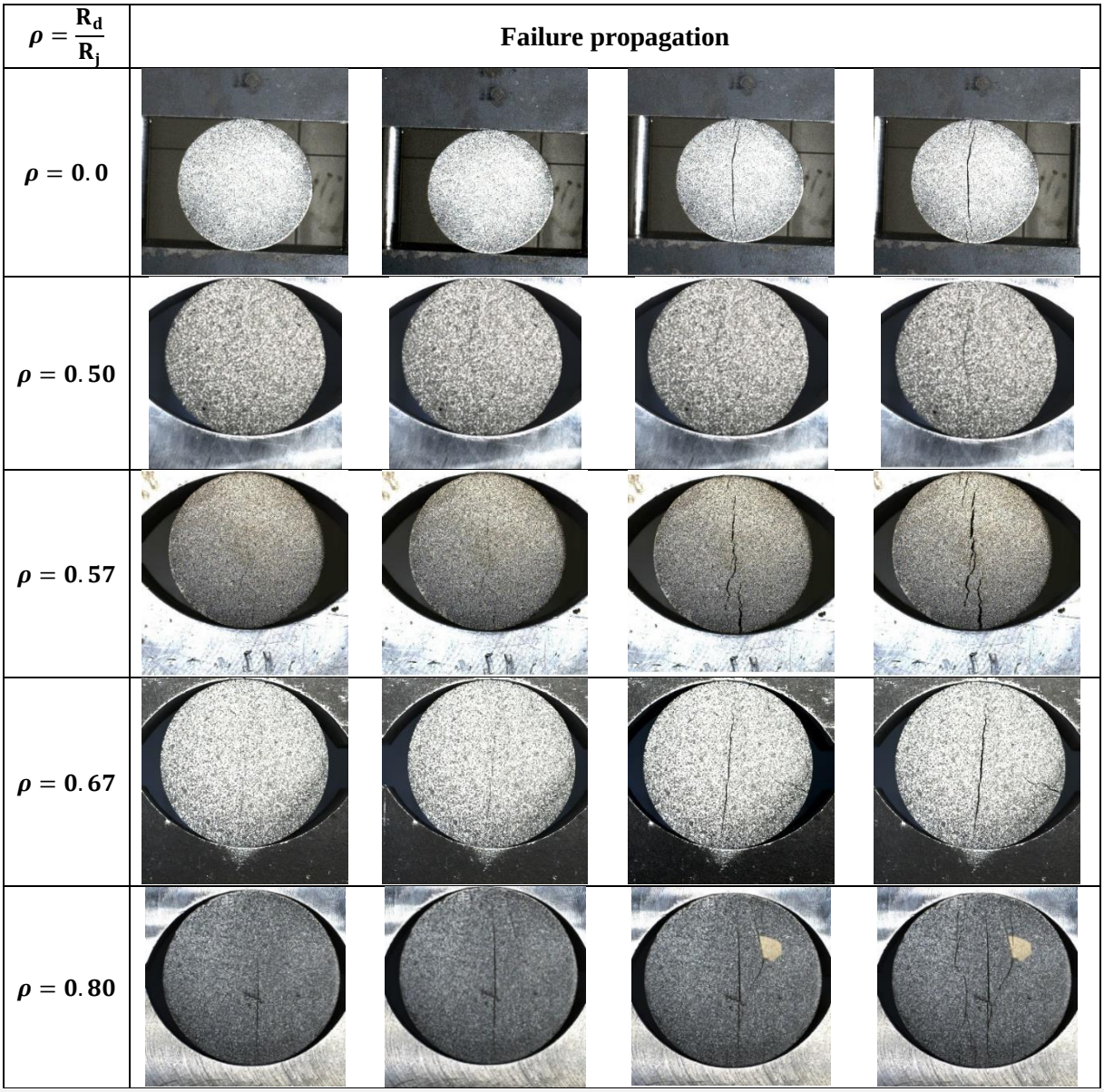


شکل ۳. نمونه‌های آماده‌شده برای انجام آزمایش برزیلی، a) نمایی از دستگاه MTS 815 همراه با تصویربرداری پرسرعت؛ b) انواع فک‌های بارگذاری با نسبت‌های مختلف شعاع نمونه به شعاع فک (۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷، ۰/۶۷ و ۰/۸۰).

Fig. 3. Prepared specimens for the Brazilian test: a) Test set-up for experimental tests using MTS 815 testing machine equipped with high-speed imaging; b) Loading jaws with different jaw curvature ratios (0, 0.50, 0.57, 0.67, and 0.80).

تمامی آزمایش‌ها با ثبت ویدئویی دقیق به کمک دوربین سرعت‌بالا همراه بودند تا الگوهای شکست و تأثیر نوع فک بر نتایج به‌طور کامل موردبررسی قرار گیرند. برای تحلیل الگوهای شکست، ویدئوهای ثبت‌شده به‌صورت فریم به فریم بررسی شدند تا فریم شروع مشاهده ترک و همچنین فریم نهایی که نمونه کاملاً تخریب‌شده بود، شناسایی شوند. شکل (۴) نمونه‌هایی از فیلم‌های سرعت‌بالای گسترش ترک در نسبت انحناء مختلف را نشان می‌دهد. در تحلیل فریم به فریم، زاویه‌ی گسترش ترک‌ها نسبت به محور بارگذاری مبنای تفکیک ترک‌های کششی و برشی قرار گرفت؛ ترک‌هایی که زاویه قابل‌توجهی با محور بارگذاری داشتند و در نقاط تماس ایجاد می‌شدند، به‌عنوان ترک برشی شناسایی شدند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]



شکل ۴. ثبت مراحل گسترش ترک در نمونه دیسک‌های برزیلی در فک‌های بارگذاری با نسبت انحناء متفاوت.

Fig. 4. Recording crack evolution in Brazilian discs with different jaw curvature ratios.

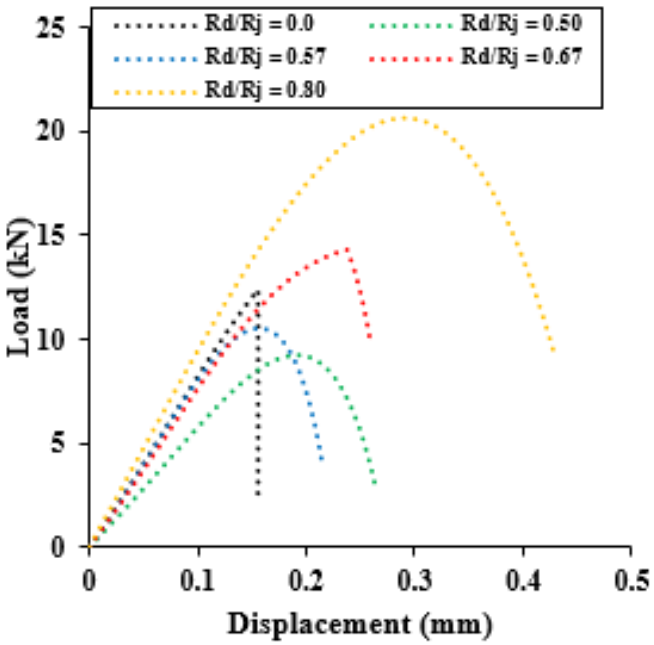
نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های برزیلی با استفاده از پنج نوع فک بارگذاری با نسبت شعاع انحناهای مختلف ارائه می‌شود. هدف، بررسی تأثیر نوع فک و انحنای آن بر مقاومت کششی نمونه‌ها و الگوهای شکست غالب در نمونه شبه سنگی است. نتایج به ترتیب شامل تحلیل تخمین مقاومت کششی، شناسایی الگوهای شکست مشاهده‌شده و بررسی جزئیات شکست برای هر شرایط بارگذاری می‌باشد.

اثر انحنای فک‌ها بر رفتار مکانیکی در آزمایش برزیلی

نمودار نیرو–جابه‌جایی ثبت شده برای یک سری از نمونه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در نسبت‌های انحناء ۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷ و ۰/۶۷ تغییر قابل‌توجهی در رفتار نمودار نیرو–جابه‌جایی قبل از نقطه

پیک مشاهده نمی‌شود. اما در نسبت ۰/۸۰، علاوه برافزایش مقاومت، شیب نمودار نیرو–جابه‌جایی نیز بیشتر شده است. همچنین در حالت صفحات بارگذاری تحت (نسبت انحناء صفر) مکانیزم شکست کاملاً شکننده می‌باشد، در صورتی که با افزایش نسبت انحناء، رفتار شکل‌پذیرتر می‌شود.



شکل ۵. تأثیر تغییر نسبت انحناء صفحات بارگذاری بر نتایج نمودار نیرو – جابه‌جایی

Fig. 5. Effect of the variation in the ratio of specimen radius to jaw radius (ρ) on the Load–displacement response

تأثیر نسبت انحنای فک‌های بارگذاری بر روی نتایج در نقطه پیک در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش نسبت انحناء، مقدار نیروی لحظه شکست و مقاومت کششی تخمین زده شده افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش نسبت انحناء در افزایش مقاومت کششی تخمین زده شده، در نسبت‌های ۰ ، ۰/۵۰ ، ۰/۵۷ و ۰/۶۷ قابل‌توجه نمی‌باشد و اما در نسبت انحناء ۸/ مقدار مقاومت کششی تخمین زده شده به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت ناشی از تأثیر قابل ملاحظه افزایش زاویه تماس در محدوده‌ای خاص می‌باشد که منجر به تمرکز بیشتر تنش‌های فشاری در ناحیه بارگذاری شده است.

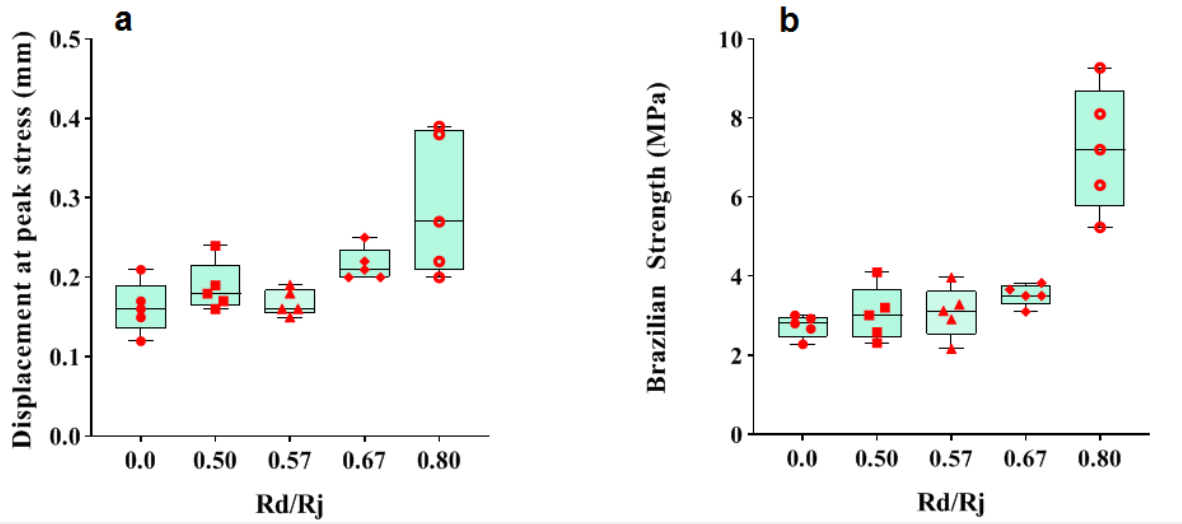
تأثیر انحناء صفحات بارگذاری بر جابجایی متناظر در نقطه پیک در شکل (۶ ب) نشان داده شده است. بررسی این مقادیر نشان‌دهنده‌ی آن است که در نسبت‌های ۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷و ۰/۶۷ تغییر چشمگیری وجود ندارد، درحالی‌که در نسبت ۰/۸۰ جابه‌جایی متناظر با نیروی شکست نه‌تنها افزایش‌یافته بلکه پراکندگی بیشتری نیز از خود نشان داده است.

الگوهای شکست ثبت‌شده

چهار الگوی شکست در این تحقیق در نسبت انحناءهای مختلف ثبت گردید که به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت.

نوع ۱: در نمونه‌های دارای این نوع شکست، یک ترک کششی مستقیم از مرکز نمونه شروع‌شده و به سمت فک‌های بارگذاری گسترش می‌یابد. این نوع، الگوی استاندارد شکست در آزمایش برزیلی است و نمونه را به دو نیمه تقسیم می‌کند (شکل ۷ – a).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]



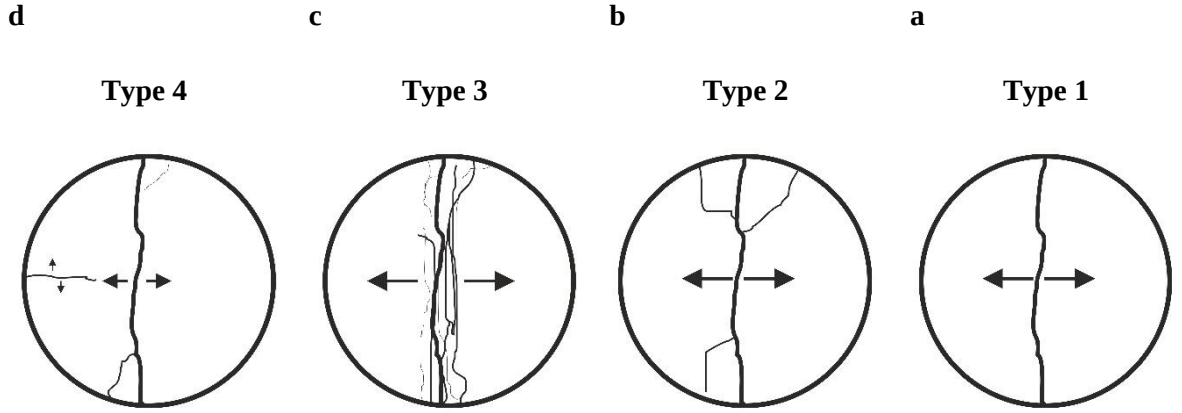
شکل ۶. تأثیر تغییر نسبت شعاع نمونه به شعاع فک (ρ) در آزمایش برزیلی بر نتایج الف) مقادیر مقاومت کششی تخمین زده، ب) جابه‌جایی متناظر با حداکثر بار

Fig. 6. Effect of the variation in jaw curvature ratio (ρ) in the Brazilian test on the results: (a) Estimated tensile strength values, (b) Displacement at the peak load

نوع ۲: ترک مرکزی کششی همانند نوع ۱ تا لبه‌های نمونه گسترش می‌یابد و در نزدیکی نقاط تماس، ترک‌های برشی در نمونه ایجاد می‌شود (شکل ۷ - b).

نوع ۳: این الگو باعث خرد شدن نمونه به قطعات متعدد می‌شود که ناشی از ترک‌های متعدد ناپایدار، ترک‌های برشی ناخواسته در تماس‌ها و یک ترک مرکزی است. رشد ترک در این نوع انفجاری و شدید است و امکان پیروی کامل از روش استاندارد آزمایش برزیلی وجود ندارد (شکل ۷ -c).

نوع ۴: در این نوع شکست هم‌زمان با ایجاد ترک کششی از مرکز نمونه یک ترک افقی در لبه‌های کناری نمونه تشکیل می‌شود (شکل ۷ -d).



شکل ۷. الگوهای شکست مشاهده‌شده در آزمایش‌ها

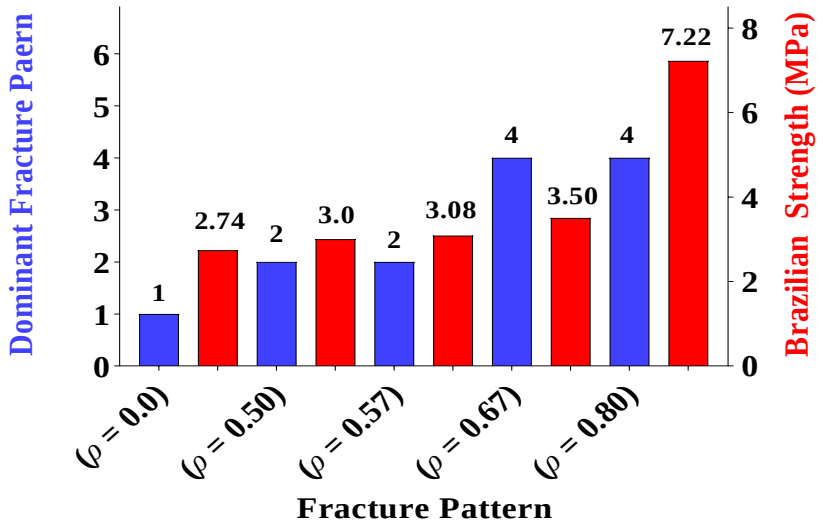
Fig. 7. Observed failure patterns in the experiments

تأثیر نسبت شعاع نمونه به فک بر نتایج الگوهای شکست ثبت‌شده

الگوی شکست غالب مشاهده‌شده و توزیع الگوها را برای ۲۵ نمونه‌ی آزمایش‌شده با فک‌های بارگذاری مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10014354]

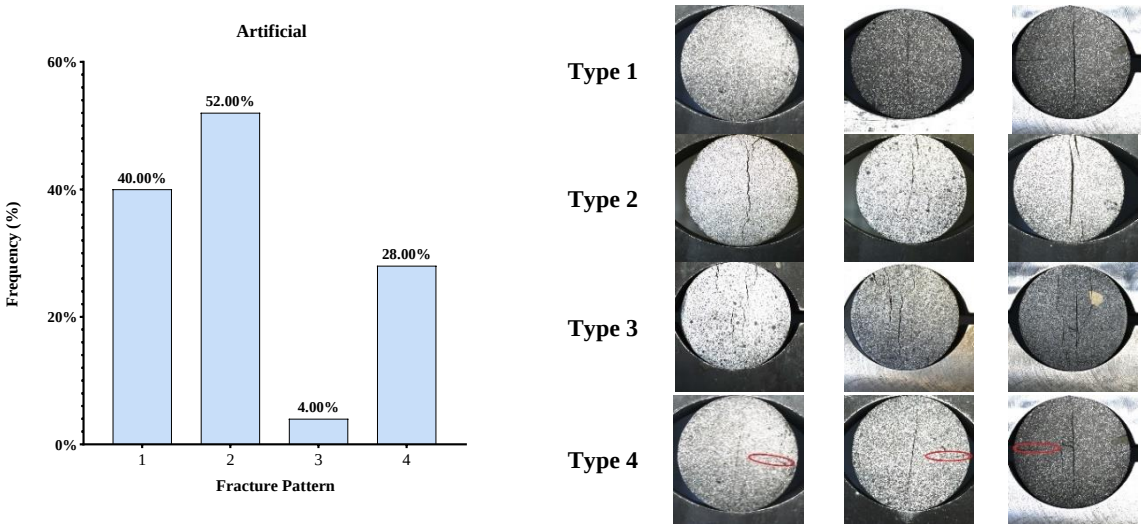
(۹)، شکست نوع ۱ بیشتر در نمونه‌هایی با مقاومت کششی تخمین زده شده کمتر از ۳ مگا پاسکال و یا در نسبت‌های انحناء بزرگ‌تر مشاهده‌شده است. شکست نوع ۲ بیشترین فراوانی را داشته و عمدتاً در مقاومت کششی تخمین زده شده بین ۳ تا ۵ مگا پاسکال اتفاق افتاده است. در مقاومت تخمین زده شده بالا، به‌ویژه در نسبت ۰/۸۰ (که مقاومت تخمینی بیشتری را نشان می‌دادند)، شکست نوع ۳ غالب بوده است. شکست نوع ۴ با افزایش نسبت انحناء بیشتر اتفاق افتاده است.



شکل ۸. ارتباط بین نوع شکست، مقاومت کششی برزیلی تخمین زده شده و نسبت انحناء فک بارگذاری.

Fig. 8. Relationship between fracture type, Brazilian tensile strength of specimens, and jaw curvature ratio

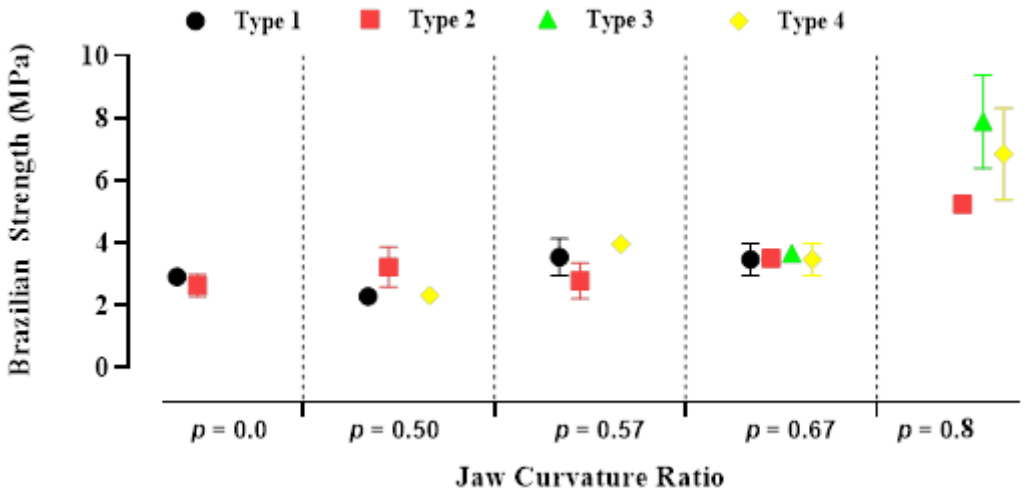
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10014354]



شکل ۹. انواع الگوهای شکست و توزیع آن‌ها در بین ۲۵ نمونه شبه سنگی با فک‌های بارگذاری مختلف

Fig. 9. Types of fracture patterns and their distribution among 25 rock-like specimens with different loading jaws

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۰)، شکست نوع ۱ بیشتر در حالتی که مقاومت کششی پایین تخمین زده شده است، دیده می‌شود. بیشتر شکست‌های نمونه‌ها با مقاومت برزیلی تخمین زده شده متوسط در نوع ۲ قرار می‌گیرد و همچنین آزمایش‌هایی که مقاومت تخمینی بالایی نشان می‌دهند، در دسته ۳ قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه افزایش نسبت انحناء فک بارگذاری باعث افزایش مقاومت آزمایش برزیلی می‌شود، شکست نوع ۳ در نسبت انحناء فک بارگذاری ۰/۶۷ و ۰/۸۰ بیشتر دیده می‌شود. در شکست نوع ۴ و با افزایش نسبت انحناء، تعداد دفعات این نوع شکست بیشتر می‌شود.



شکل ۱۰. توزیع انواع نوع شکست در نسبت‌های مختلف انحنای فک بارگذاری.

Fig. 10. Distribution of failure types at different loading jaw curvature ratios

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]

در نمونه‌های بررسی‌شده، عمدتاً شکست نوع ۲ اتفاق افتاده است، که می‌تواند منجر به برآورد بیش‌ازحد مقاومت کششی برزیلی شود. تأثیر تنش برشی ایجادشده بر افزایش برآورد مقاومت در این نمونه‌ها در مطالعات آینده توصیه می‌شود. عمدتاً شکست نوع ۳ در فک با شعاع ۰/۸۰و در مواردی با فک ۰/۶۷ اتفاق افتاده است. بنابراین استفاده از این نوع فک برای تخمین مقاومت کششی باید با احتیاط صورت گیرد. بیشترین نوسان و پراکندگی داده‌ها نیز در شکست‌های نوع ۳ و ۴ مشاهده‌شده است. دلیل این پراکندگی می‌تواند ماهیت ترک ترکیبی از تنش کششی و برشی باشد؛ نحوه اعمال تنش برشی و روند شکل‌گیری ترک باعث ایجاد پراکندگی در نتایج شده است. از آنجاکه آزمون کشش مستقیم بعنوان مبنا در جهت سنجش مقاومت کششی مواد می‌باشد، انجام این آزمون جهت درک بهتر تأثیر صفحات بارگذاری و الگوی شکست در تحقیقات آتی توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

تمرکز این پژوهش بر بررسی الگوی شکست و تأثیر انحنای فک‌های بارگذاری در آزمون برزیلی است. برای این منظور، ۲۵ نمونه با پنج نوع فک بارگذاری و نسبت شعاع نمونه به فک‌های ۰، ۰/۵۰، ۰/۵۷، ۰/۶۷ و ۰/۸۰ مورد آزمایش قرار گرفت. نحوه شکست با دوربین با تعداد فریم برداشت بالا تحلیل شد و ۴ الگوی شکست شناسایی گردید. نتایج نشان داد که انحنای فک بارگذاری تأثیر قابل‌توجهی بر نوع الگوی شکست دارد. در نمونه‌های موردبررسی، مشاهده شد که الگوی شکست بسته به مقدار مقاومت کششی اندازه‌گیری شده و شرایط بارگذاری تغییر می‌کند. در حالت تخمین مقاومت کششی کمتر از ۳ مگا پاسکال، غالباً یک ترک مرکزی واحد ایجاد شد. در بازه تخمین مقاومت‌های میانی (حدود ۳ تا ۵ مگا پاسکال)، الگو بیشتر از نوع ۲ بود که در آن ترک کششی مرکزی همراه با ترک‌های برشی مشاهده گردید. در مقادیر تخمینی بالاتر مقاومت (بیش از ۵ مگا پاسکال) و به‌ویژه تحت شرایطی با نسبت انحناء بالا، الگو به سمت ترک‌های مرزی و شکست‌های ناگهانی تغییر یافت (شکست نوع ۳). این تنوع در الگوهای شکست موجب می‌شود که نتایج آزمایش برزیلی در برخی موارد از الگوی کلاسیک شکست انحراف پیدا کند؛ به‌طوری‌که وجود شکست چندگانه می‌تواند منجر به بیش برآورد مقاومت کششی گردد. همچنین در بعضی نمونه‌ها، نوع خاصی از شکست مشاهده شد که طی آن هم‌زمان با تشکیل ترک مرکزی، ترک‌های افقی در جوانب نمونه پدیدار شدند. بررسی دقیق‌تر نشان داد که به‌طور میانگین، نسبت انحناء فک بارگذاری ۰/۵۰ نسبت به صفحات تخت، حدود ۹/۹ درصد، نسبت ۰/۵۷ نسبت به ۰/۵۰ حدود ۱/۳۶ درصد، نسبت ۰/۶۷ نسبت به ۰/۵۷ حدود ۱۲/۳۴ درصد و نسبت ۰/۸۰ نسبت به ۰/۶۷ حدود ۴۷/۷ درصد افزایش داشته است. استفاده از نسبت ۰/۸۰ باعث برآورد بالا مقاومت کششی می‌شود که علت آن افزایش زاویه تماس و ایجاد تنش‌های فشاری در نمونه است. با توجه به تأثیر ترکیبی تنش‌های کششی و برشی و بیش برآورد ناشی از حضور ترک‌های برشی، استفاده از روش تحلیل به روش کرنش در مرکز نمونه، که در مطالعات آتی نویسندگان در حال بررسی است، می‌تواند مقدار دقیق‌تری از مقاومت کششی واقعی ارائه دهد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت بنیاد ملی علم ایران (INSF) تحت گرنت شماره ۴۰۳۵۹۳۰ انجام شده است.

References

Akazawa, T. (1943). New Test Method for Evaluating Internal Stress Due to Compression of Concrete (the Splitting Tension Test) (Part 1). Journal of Japanese Civil Engineering Institute, 29, 777–87.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10143354]

ASTM. (2016). Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In ASTM D3967-16. United States, ASTM International. doi: 10.1520/D3967-16

ASTM. (2015). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. In ASTM C136-06. Uniterd States, ASTM International. doi:10.1520/C0136-06

Bahaaddini, M. (2018). Scale Effect on the Tensile Strength in the Brazilian Test. Journal of Engineering Geology, 11(4), 319-341. doi:10.18869/acadpub.jeg.11.4.319

Bahaaddini, M., Serati, M., Masoumi H., & Rahimi, E. (2019). Numerical Assessment of Rupture Mechanisms in Brazilian Test of Brittle Materials. International Journal of Solids and Structures, 180–181, 1–12. doi:10.1016/j.ijsolstr.2019.07.004.

Bouali, M. F., & Bouassida, M. (2021). Numerical Simulation of the Effect of Loading Angle on Initial Cracks Position Point: Application to the Brazilian Test. Applied Sciences (Switzerland), 11(8), 3573. doi:10.3390/app11083573.

Carneiro, F. L. L. B. (1943). A New Method to Determine the Tensile Strength of Concrete. In The 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules, Sao Paulo, Brazil, 126–29.

Coviello, A., R. Lagioia & R. Nova. (2005). On the Measurement of the Tensile Strength of Soft Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 38(4), 251–73. doi:10.1007/s00603-005-0054-7.

Erarslan, N., Liang Z. Z., & Williams D. J. (2012). Experimental and Numerical Studies on Determination of Indirect Tensile Strength of Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(5), 739–51. doi:10.1007/s00603-011-0205-y.

Fairhurst, C. (1964). On the Validity of the 'Brazilian' Test for Brittle Materials. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and omechanics Abstracts, 1(4), 535–46. doi:10.1016/0148-9062(64)90060-9.

García, V. J., Márquez C. O., Zúñiga-Suárez, A. R., Zuñiga-Torres, B. C., & Villalta-Granda, L. J. (2017). Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights. International Journal of Concrete Structures and Materials, 11, 343–63.

Gong, F., Zhang, L. & Wang, S. (2019). Loading Rate Effect of Rock Material with the Direct Tensile and Three Brazilian Disc Tests. Advances in Civil Engineering, 2019(1), 6260351. doi:10.1155/2019/6260351.

Gutiérrez-Moizant, R., Ramírez-Berasategui, M. Santos-Cuadros, S., & García-Fernández, C. J. R. M. 2018. Computational Verification of the Optimum Boundary Condition of the Brazilian Tensile Test. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(11), 3505–19. doi:10.1007/s00603-018-1553-7.

Gutiérrez-Moizant, R., Ramírez-Berasategui, M., Santos-Cuadros, S., & García-Fernández. C. C. (2020). A Novel Analytical Solution for the Brazilian Test with Loading Arcs. Mathematical Problems in Engineering, 2935812, 1–19. doi:10.1155/2020/2935812.

Hondros, G. (1959). The Evaluation of Poisson's Ratio and Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete, Australian Journal of Applied Science, 10(3), 243–68.

Hosseini, M., & Abdolghanizadeh, K. (2017). Representing an Empirical Relationship for the Estimating Mode I Fracture Toughness of Rock Obtained from Testing on SCB Specimen using Tensile Strength. Journal of Engineering Geology, 11(2), 157-174. doi: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.157

Hubbert, M. K., & Willis, D. G. (1957). Mechanics of Hydraulic Fracturing. Transactions of the AIME, 210(01), 153–68.

Hudson, J. A., Harrison, J. P., & Popescu, M.E. (2002). Applied Mechanics Reviews Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles, Pergamon, Oxford UK, doi:10.1115/1.1451165.

ISRM. (1978). Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. Part 2: Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 15(3): 99–103. doi: 10.1016/0148-9062(78)90003-7

Jamshidi, A. (2024) Investigating the Role of Physical and Strength Characteristics on the Durability of Building Stones Subjected to Deterioration Processes. Journal of Engineering

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1014354]

Geology, 18(4), 543-564. doi: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407

Komurlu, E., & Kesimal, A. (2012). Jaw Effects on Indirect Tensile Strength Test Disk Failure Mechanism. In ISRM Regional Symposium - 7th Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS 2012, ISRM, 624–37.

Komurlu, E., & Kesimal, A. (2015). Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks Using Different Types of Jaws. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(4), 1723–30. doi:10.1007/s00603-014-0644-3.

Kourkoulis, S. K., Markides, Ch F., & Chatzistergos, P. E. (2013). The Standardized Brazilian Disc Test as a Contact Problem. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 57, 132–41. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.07.016.

Qiao, L., Liu J., & Zhao, G. (2022). Numerical Study of the Brazilian Tensile Test: 2D and 3D Simulations. Chinese J Eng, 44(1), 131– 142.

Li, D., Li, B., Han, Z., & Zhu, Q. (2020). Evaluation on Rock Tensile Failure of the Brazilian Discs under Different Loading Configurations by Digital Image Correlation. Applied Sciences (Switzerland), 10(16), 5513. doi:10.3390/app10165513.

Rajaei Moghaddam, N., Bahaaddini, M., Jalalifar, H., & Serati, M. (2025). Numerical Assessment of the Rupture Mechanisms in Brazilian Test of Brittle Materials. Computational Particle Mechanics, 12(3), 1861–81. doi:10.1007/s40571-025-00903-6.

Khavari, P., & Heidari M. (2016). Numerical and Experimental Studies on the Effect of Loading Angle on the Validity of Flattened Brazilian Disc Test. Journal of Geology and Mining Research, 8(1), 1–12. doi:10.5897/jgmr15.0243.

Serati, M., Bahaaddini, M., Roshan, H., Zhang, T. T., & Bryant, N. (2021). On Assessing the Tensile Cracking Pattern in Brittle Rocks and Solids. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(7), 5867-79. doi: 10.1007/s10064-021-02249-8

Serati, M., Masoumi, H., Williams, D. J., & Alehossein, H. (2017). Modified Brazilian Test for Indirect Measurement of Tensile Strength of Brittle Materials. In 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2017, ARMA, 2983–87.

Serati, M., Williams, D. J., & Song, S. (2019). A Validation Study for the Estimation of Point Load Index at Varying Slenderness Ratio. In 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future, YSRM 2019, ISRM, 215–19.

Serati, M., & Williams, D. J. 2015. Michell-Fourier Analytical Treatment of Stresses in the Ring Test under Parabolic Compression. In 49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2015, ARMA, 2875–80.

Wang, Q. Z., & Wu., L. Z. (2004). The Flattened Brazilian Disc Specimen Used for Determining Elastic Modulus, Tensile Strength and Fracture Toughness of Brittle Rocks: Experimental Results. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(SUPPL. 1), 26–30. doi:10.1016/j.ijrmms.2004.03.015.

Xiao, P., Zhao, G., & Liu, H. (2022). Failure Transition and Validity of Brazilian Disc Test under Different Loading Configurations: A Numerical Study. Mathematics, 10(15), 2681. doi:10.3390/math10152681.

Zhang, X. P., Zhang, P. Y. Ji, P. Q., Zhang, H., & Zhang, Q. (2023). The Applicability of Brazilian Test Loading with Different Platens to Measure Tensile Strength of Rock: A Numerical Study. Rock Mechanics and Rock Engineering, 57(1), 233–60. doi:10.1007/s00603-023-03566-y.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.4.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1014354]