Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 58(5) (2026) 637-656
DOI: 10.22060/ceej.2026.25804.8454

Effect of Temperature-Specimen Geometry on Pure Shear Crack Resistance of Cemented Rock-Like Materials

Mohammad Mahdi Mashayekhi, Alireza Dolatshahi, Mehdi Arash, Hamed Molladavoodi *

Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Fracture toughness is considered a key parameter for evaluating the mechanical behavior of rock-like materials, particularly when they are subjected to temperature variations. Since many engineering structures, such as tunnels and underground structures, operate over a range of temperatures, investigating the combined effects of temperature and specimen geometry on the fracture behavior of these materials is of particular importance. In this study, the effects of temperature and specimen geometry on the Mode II fracture toughness of cement mortar were experimentally investigated. To this end, tests were conducted on three different specimen geometries, including a centrally cracked Brazilian disc, a modified semi-Brazilian specimen with a pre-existing notch, and a Brazilian disc with a double diagonal crack, at four temperature levels of −10, 25, 50, and 100 °C. In addition to fracture toughness, uniaxial compressive strength and P- and S-wave velocities were measured to evaluate changes in the internal quality of the specimens under the influence of temperature. The results indicate that decreasing the temperature below the reference temperature improves the internal quality of the specimens and increases fracture toughness, whereas increasing the temperature leads to deterioration in internal quality, a reduction in ultrasonic wave velocities, and, ultimately, a decrease in the resistance capacity against crack propagation. Furthermore, comparison of the different specimen geometries revealed that the sensitivity of fracture toughness to temperature variations depends on the stress distribution and crack-tip conditions associated with each geometry.

Review History:

Received: May, 06, 2026
Revised: Jul. 07, 2026
Accepted: Aug. 15, 2026
Available Online: Aug. 17, 2026

Keywords:

Crack Growth Resistance
Temperature Effect
Specimen Geometry Effect
Quality Index, Ultrasonic Pulse Velocity

1- Introduction

Natural and artificial structures are subjected to various loading conditions that influence their mechanical properties and stability. Understanding how these materials respond to different loads is crucial for stability analysis, failure prediction, and optimal design in civil and geotechnical engineering. The initiation and propagation of cracks in rock materials depend on the stress state and can occur in three primary fracture modes (Modes I, II, and III) or their combinations. Under mixed-mode conditions, failure results from multiple fracture modes interacting, affecting crack propagation paths, growth rates, and load-bearing capacity. Thus, a systematic understanding of mixed-mode fracture behavior is vital for slope stability analysis, safe underground structure design, and enhancing engineering efficiency and safety [1–3].

In fracture mechanics, crack behavior in materials depends on specimen geometry, boundary conditions, and applied loading. The stress intensity factor is a key parameter that characterizes the stress field near a crack tip and is crucial for understanding crack initiation and propagation in linear elastic fracture mechanics and advanced nonlinear models. Stress intensity factors are classified into three components based on fracture modes. Fracture toughness, the critical value of the stress intensity factor, quantitatively measures a material's resistance to crack initiation or propagation, making it essential for evaluating the mechanical performance of brittle and quasi-brittle materials, such as concrete and rocks [4–6].

Thermal conditions significantly influence the fracture behavior of materials. Temperature fluctuations, from daily variations to extreme events like fires, can induce damage in rock-like materials, particularly those with inherent defects like microcracks and discontinuities. Differences in thermal expansion among the material phases can increase stress concentrations, promote crack propagation, and reduce resistance to crack growth.

The study investigates how temperature and specimen geometry jointly affect Mode II fracture toughness, considering the roles of microstructural quality, thermal damage, stress distribution, and crack propagation. It aims to clarify thermal damage mechanisms and provide a basis for

*Corresponding author's email: davoodi@aut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

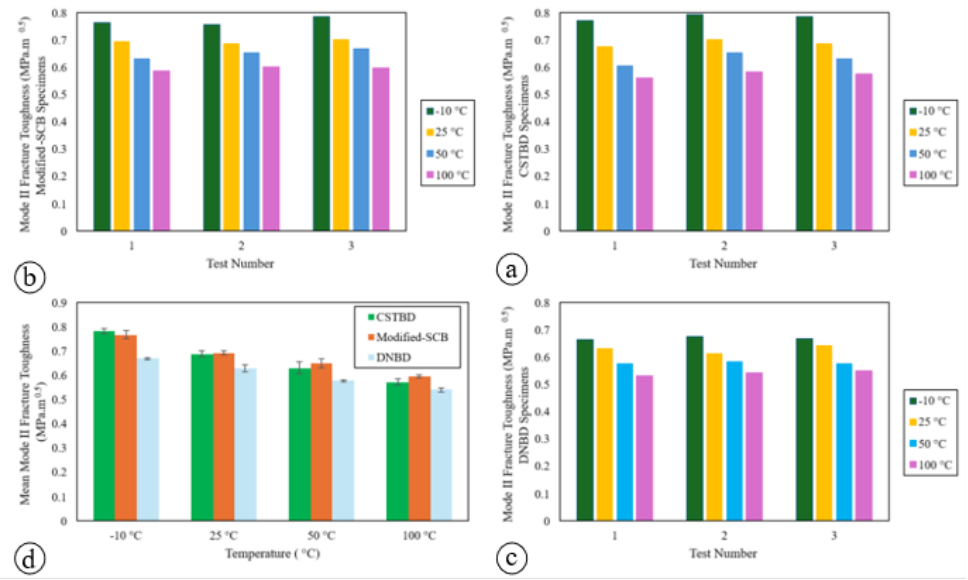


Fig. 1. Overall experimental results for Mode II fracture toughness: (a) centrally straight notched Brazilian disc specimens, (b) modified semi-Brazilian specimens, (c) Brazilian disc specimens with double-edge cracks, and (d) average values.

designing structures exposed to variable thermal conditions.

2- Methodology

This study evaluates the impact of thermal conditions on the mechanical performance of cement mortar using a uniform mix design. The primary mixture comprised Type II Portland cement, fine-grained sand, and water, with all materials kept identical to eliminate secondary factors. The main variable was the addition of 5% micro silica by weight as a cement replacement to enhance microstructure and early-age strength. Specimen preparation followed ASTM C305 standards.

In this study, cylindrical specimens were prepared to examine the effects of thermal conditions on their physical and mechanical behavior. They underwent a single thermal cycle at four temperatures: −10, 25, 50, and 100 °C, each for 24 hours, followed by 24 hours in a laboratory environment. Ultrasonic tests measured P-wave and S-wave velocities to assess microstructural changes, and uniaxial compressive strength tests evaluated the material's strength. This approach linked nondestructive testing results to destructive tests and analyzed the fracture behavior of the cement-based material under the same thermal conditions. This study prepared three types of specimens: the centrally cracked straight-through Brazilian disc (CSTBD), the modified semi-circular Brazilian specimen with a notch (MSCB), and the double-notched Brazilian disc (DNBD). These geometries were designed to investigate fracture response and crack propagation under indirect loading, as well as temperature sensitivity. A total of 36 specimens were tested across different temperature and geometry combinations. For the specimens with pre-existing cracks, a 1-mm blade created the initial notch. The mortar was compacted, and after 24 hours, the specimens were demolded and cured for 28 days in a lime-saturated water bath to standardize conditions.

3- Results and Discussion

Mode II fracture toughness of the centrally cracked Brazilian specimens showed a significant temperature dependence. The mean fracture toughness increased from 0.6879 MPa·m$^{0.5}$at 25 °C to 0.7822 MPa·m$^{0.5}$ at −10 °C, representing a 13.7% increase. In contrast, it decreased to 0.6305 and 0.5724 MPa·m$^{0.5}$ at 50 and 100 °C, corresponding to reductions of 8.3% and 16.8%, respectively. This decrease is mainly attributed to thermal damage, microstructural deterioration, and the development of thermally induced microcracks. The modified semi-Brazilian specimens showed a similar trend. Fracture toughness increased from 0.6928 MPa·m$^{0.5}$ at 25 °C to 0.7675 MPa·m$^{0.5}$ at −10 °C, an increase of 10.8%. At 50 and 100 °C, it decreased to 0.6497 and 0.5954 MPa·m$^{0.5}$, corresponding to reductions of 6.2% and 14%, respectively. For the Brazilian specimens with double-edge cracks, fracture toughness increased from 0.6388 MPa·m$^{0.5}$ at 25 °C to 0.6691 MPa·m$^{0.5}$ at −10 °C, representing a 4.8% increase. At 50 and 100 °C, it decreased to 0.5775 and 0.5206 MPa·m$^{0.5}$, corresponding to reductions of 9.6% and 18.5%, respectively (See Figure 1).

Overall, the reduction in fracture toughness at elevated temperatures is mainly associated with moisture loss, thermal stresses, differential thermal expansion between aggregate and cement paste, and the development of microcracks. Conversely, the increase at −10 °C can be attributed to freeze-induced strengthening, reduced crack-tip stress concentration, and improved aggregate–cement interfacial bonding.

4- Conclusion

Temperature had a significant effect on Mode II fracture toughness. Lowering the temperature to −10 °C increased fracture toughness by about 10–15%, whereas increasing it to 100 °C reduced it by more than 25% in some geometries. The MSCB geometry was more sensitive to high temperatures than CSTBD and DNBD, highlighting the role of crack-tip stress distribution. Uniaxial compressive strength decreased from about 41 MPa at −10 °C to 33 MPa at 100 °C, indicating microstructural deterioration. P and S-wave velocities also decreased with increasing temperature, confirming the development of thermally induced microcracks. The ultrasonic quality index showed a positive correlation with fracture toughness, suggesting that ultrasonic measurements can be used to assess thermal damage and predict changes in fracture toughness. Overall, shear fracture behavior is controlled by the combined effects of temperature, microstructural quality, loading conditions, and specimen geometry.

References

[1] S. Latifi, M. Hosseini, M. Mahdikhani, "Effect of temperature and number of heating–cooling cycles on the Mode I, Mode II and the mixed-mode I-II fracture toughness of concrete", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(1) (2022) 141–164, doi: 10.22060/ceej.2021.18363.6850. (in Persian)

[2] D. Fakhri, M. Hosseini, M. Mahdikhani, "Experimental study of the effect of micro-silica and limestone powder on the fracture toughness of concrete", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(8) (2023) 1625–1644, doi: 10.22060/ceej.2023.20877.7560. (in Persian)

[3] M. Hosseini, A. Hezareh, "The estimation of the Mode I fracture toughness of rocks using brittleness index", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(2) (2018) 391–400, doi: 10.22060/ceej.2017.11813.5085. (in Persian)

[4] E. Ozdemir, D. Eren Sarici, "The effects of some environmental conditions on the mode I fracture toughness of rocks", Acta Geodaetica et Geophysica, 59(1) (2024) 73–91, doi: 10.1007/s40328-024-00435-0.

[5] A. Dolatshahi, H. Molladavoodi, "Specimens size effect on mechanical and fracture properties of rocks: a review", Journal of Mining and Environment, 14(4) (2023) 1273–1293, doi: 10.22044/jme.2023.12948.2350.

[6] ASTM, C305-06 "Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency", ASTM International, West Conshohocken, 2015.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۸، شماره ۵، سال ۱۴۰۵، صفحات ۶۳۷ تا ۶۵۶
DOI: 10.22060/ceej.2026.25804.8454

اثر دما–هندسه نمونه بر مقاومت در برابر رشد ترک برشی خالص مصالح شبه سنگی پایه سیمانی

محمدمهدی مشایخی، علیرضا دولتشاهی، مهدی آرش، حامد ملاداودی*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، تهران.

خلاصه: چقرمگی شکست یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی رفتار مکانیکی مصالح سیمانی، سنگی و شبه‌سنگی محسوب می‌شود، به‌ویژه در شرایطی که این مصالح در معرض تغییرات دمایی قرار دارند. از آنجا که بسیاری از سازه‌های مهندسی نظیر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی در بازه‌های دمایی مختلف بهره‌برداری می‌شوند، بررسی هم‌زمان اثر دما و هندسه نمونه بر رفتار شکست این مصالح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، تأثیر دما و هندسه نمونه بر چقرمگی شکست حالت برشی ملات سیمانی به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، آزمایش‌ها بر روی سه هندسه مختلف نمونه شامل برزیلی ترک‌دار مرکزی، نمونه نیم‌برزیلی اصلاح شده با شکاف اولیه، و نمونه برزیلی با ترک قطری دوگانه، در چهار سطح دمایی منفی ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. علاوه بر چقرمگی شکست، مقاومت فشاری تک‌محوره و سرعت موج‌های فشاری و برشی نیز اندازه‌گیری شد تا تغییرات کیفیت داخلی نمونه‌ها تحت اثر دما مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش دما نسبت به دمای مرجع موجب بهبود کیفیت داخلی نمونه‌ها و افزایش چقرمگی شکست می‌شود، در حالی که افزایش دما منجر به افت کیفیت، کاهش سرعت موج‌های اولتراسونیک و در نهایت کاهش ظرفیت مقاومت در برابر رشد ترک می‌گردد. همچنین، مقایسه هندسه‌های مختلف نشان داد که میزان حساسیت چقرمگی شکست به تغییرات دما تابعی از توزیع تنش و شرایط نوک ترک در هر هندسه است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶

کلمات کلیدی:
مقاومت در برابر رشد ترک
اثر دما
اثر هندسه نمونه
شاخص کیفیت
سرعت موج اولتراسونی

۱- مقدمه

سازه‌ها طبیعی و مصنوعی متناسب با کاربردشان و شرایط پیرامون خود، همواره در معرض الگوهای متنوعی از شرایط بارگذاری قرار دارند که نوع، شدت و ماهیت این بارها تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی، ظرفیت تاب‌آوری و پایداری آن‌ها دارد. ازاین‌رو، شناخت دقیق پاسخ این مصالح به شرایط بارگذاری مختلف، یکی از ارکان اساسی در تحلیل پایداری، پیش‌بینی گسیختگی و طراحی بهینه سازه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی به منظور دستیابی به پروژه‌ای موفق، به‌شمار می‌رود. فرآیند آغاز، انتشار و مسیر ترک در مصالح سنگی به‌شدت تابع حالت تنش حاکم است و می‌تواند در قالب یکی از حالات اصلی شکست (حالات I، II یا III) یا ترکیبی از آن‌ها بروز یابد. در شرایط ترکیبی، گسیختگی بطورمعمول تحت تأثیر هم‌زمان چند مود شکست رخ می‌دهد و به‌صورت ترکیب‌های پیچیده‌ای از رفتارهای کششی، برشی و پاره‌شدگی ظاهر می‌شود. نقش هم‌زمان مختلف شکست می‌تواند مسیر انتشار ترک، نرخ رشد آن و در نهایت ظرفیت تحمل بار سازه را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، دستیابی به درکی جامع و نظام‌مند از رفتار شکست ترکیبی، نقشی تعیین‌کننده در تحلیل پایداری شیب‌ها، طراحی ایمن سازه‌های زیرزمینی و ارتقای کارایی و ایمنی عملیات‌های مهندسی ایفا می‌کند [۱–۳].

در علم مکانیک شکست، رفتار ترک در مواد تابعی از هندسه نمونه، شرایط مرزی و نوع بارگذاری اعمال‌شده است. برای توصیف میدان تنش در مجاورت نوک ترک و تحلیل رفتار گسیختگی، کمیتی بنیادی با عنوان ضریب شدت تنش معرفی شده است. ضریب شدت تنش بیانگر میزان تمرکز تنش در ناحیه نوک ترک بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در توصیف شرایط آغاز و گسترش ترک در چارچوب نظریه مکانیک شکست الاستیک خطی و همچنین در توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر غیرخطی ایفا می‌کند. بر اساس مکانیزم حاکم بر گسیختگی، ضرایب شدت تنش به سه مؤلفه متناظر با حالات مختلف شکست تقسیم می‌شوند. چقرمگی شکست به‌عنوان مقدار

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: davoodi@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

بحرانی ضرایب شدت تنش، یک معیار کمّی برای سنجش توانایی ماده در مقاومت در برابر آغاز یا گسترش ترک فراهم می‌آورد و از این‌رو، یکی از شاخص‌های اساسی در ارزیابی عملکرد مکانیکی مصالح ترد و شبه‌ترد، از جمله بتن، سایر مصالح سیمانی و سنگ‌ها، محسوب می‌شود [۴-۶].

همچنین باید توجه داشت که مقادیر بحرانی ضرایب شدت تنش کمیت‌هایی ثابت و ذاتی نبوده و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل هندسی، محیطی و ریزساختاری قرار می‌گیرند. از جمله این عوامل می‌توان به ابعاد و هندسه نمونه، شرایط دمایی، فشار محصورکننده، نرخ اعمال بار، فرآیندهای هوازدگی، ویژگی‌های دانه‌بندی و ریزساختار ماده، حضور مواد افزودنی و نیز ترکیب کانی‌شناسی مصالح اشاره کرد. هر یک از این عوامل می‌توانند با تغییر در میدان تنش، مکانیسم‌های آغاز و گسترش ترک و نحوه اندرکنش ترک‌ها، رفتار شکست بتن و سایر مواد ترد و شبه‌ترد را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهند [۶-۱۳].

در میان عوامل مؤثر بر رفتار شکست، شرایط حرارتی محیط به‌عنوان یکی از پارامترهای بنیادین شناخته می‌شود که می‌تواند پاسخ مکانیکی مواد را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد. نوسانات دمایی، از جمله تغییرات دمایی شب-روز تا رخدادهای شدید دمایی نظیر آتش‌سوزی یا چرخه‌های حرارتی مکرر در پروژه‌های عمرانی و معدنی، موجب آسیب ناشی از حرارت در مقیاس‌های مختلف درمصالح شبه‌سنگی می‌شوند. این عامل به‌ویژه در مواد دارای عوارض نظیر ریزترک، ناپیوستگی و ناهمگنی ریزساختاری، مانند بسیاری از مصالح سنگی و شبه‌سنگی، شدیدتر است؛ به‌گونه‌ای که اختلاف انبساط حرارتی اجزای مختلف ماده می‌تواند با افزایش تمرکز تنش حرارتی، فرآیند گسترش ترک و در نتیجه کاهش مقاومت واقعی در برابر پیشروی ترک را تسهیل کند [۱۴].

از سوی دیگر، در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بطور مجزا به بررسی رفتار شکست مصالح ترد و شبه‌ترد تحت شرایط دمایی مختلف و با در نظر گرفتن تأثیر هندسه و نوع بارگذاری پرداخته‌اند. این مطالعات، نشان داده‌اند که تغییرات دما می‌تواند به‌طور معناداری بر چقرمگی شکست و عملکرد گسترش ترک اثرگذار باشد. به‌عنوان مثال، حسینی و همکاران، با انجام آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شیاردار از ماسه‌سنگ لوشان و با استفاده از روش برش پانچ، اثر دما و تعداد چرخه‌های حرارتی بر چقرمگی شکست حالت برشی و انرژی شکست را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش تعداد چرخه‌های گرم-سرد شدن موجب کاهش قابل‌توجه چقرمگی شکست برشی و انرژی شکست می‌شود، به‌گونه‌ای که تأثیر چرخه‌های حرارتی بر رفتار شکست از اثر صرف افزایش دما قوی‌تر گزارش شده است. این یافته‌ها بیانگر نقش مخرب تکرار تنش‌های حرارتی در تضعیف مقاومت برشی سنگ هستند [۱۵]. قنبری و همکاران با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی ملات سیمان، اثر دما را بر چقرمگی شکست حالت برشی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دما تا حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست برشی روند افزایشی دارد، اما با افزایش بیشتر دما تا بازه ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، این پارامتر به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. آزمایش‌ها در دماهای ۲۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و تحت شرایط دمایی ثابت انجام شده و اندازه‌گیری چقرمگی شکست با استفاده از نمونه برزیلی دارای ترک فاقدار صورت گرفته است [۱۶]. فانگ و همکاران[1] با تمرکز بر رفتار شکست حالت برشی در خمیر سیمانی تثبیت‌شده، تأثیر دمای عمل‌آوری را بر چقرمگی شکست برشی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که افزایش دما موجب افزایش چقرمگی شکست حالت کششی می‌شود که این رفتار به تسریع فرآیند هیدراسیون سیمان و پدیده خشک‌شدگی ذاتی نسبت داده شده است. آزمایش‌ها در دماهای ۲، ۲۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد و تحت شرایط دمایی ثابت انجام شد و ارزیابی چقرمگی شکست با استفاده از آزمون خمش نیم‌دایره‌ای صورت گرفت. همچنین نتایج بیانگر آن بود که نسبت آب به سیمان و ترکیب شیمیایی، در کنار دما، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان چقرمگی شکست این مصالح ایفا می‌کنند [۱۷]. آلنیسن و همکاران[2] نقش تنش حرارتی را بر چقرمگی شکست کششی و برشی سنگ‌های با ماهیت متفاوت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در گل‌سنگ، اعمال دما موجب بهبود قابل‌توجه چقرمگی شکست می‌شود که این رفتار به خشک‌شدن کانی‌های رسی نسبت داده شده است. در مقابل، در گرانیت افزایش دما تا حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش چقرمگی شکست به دلیل مهار رشد ترک‌ها می‌شود، اما با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، گسترش ریزترک‌های حرارتی منجر به کاهش چقرمگی شکست می‌گردد. آزمایش‌ها روی ۱۸ نمونه نیم‌دایره‌ای تحت بارگذاری سه نقطه‌ای در دماهای محیط اتاق، ۲۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. همچنین نتایج نشان داد که نسبت چقرمگی شکست حالت برشی به حالت کششی با افزایش دما رشد می‌کند که بیانگر تأثیرپذیری بیشتر رفتار شکست برشی نسبت به حالت کششی تحت شرایط حرارتی است [۱۸]. عبدی و همکاران تأثیر دماهای بالا را بر رفتار شکست بتن پلیمری مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های

1. Fang et al.
2. Alneasan et al.

آن‌ها نشان داد که افزایش دما موجب رشد قابل‌توجه چقرمگی شکست و انرژی شکست این ماده می‌شود، به‌طوری‌که بیشینه مقادیر در بازه دمایی ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است. این نتایج بر اساس آزمون خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار به دست آمده و بیانگر حساسیت بالای رفتار شکست بتن پلیمری به شرایط حرارتی و نقش مؤثر دما در بهبود مقاومت آن در برابر گسترش ترک است [۱۹].

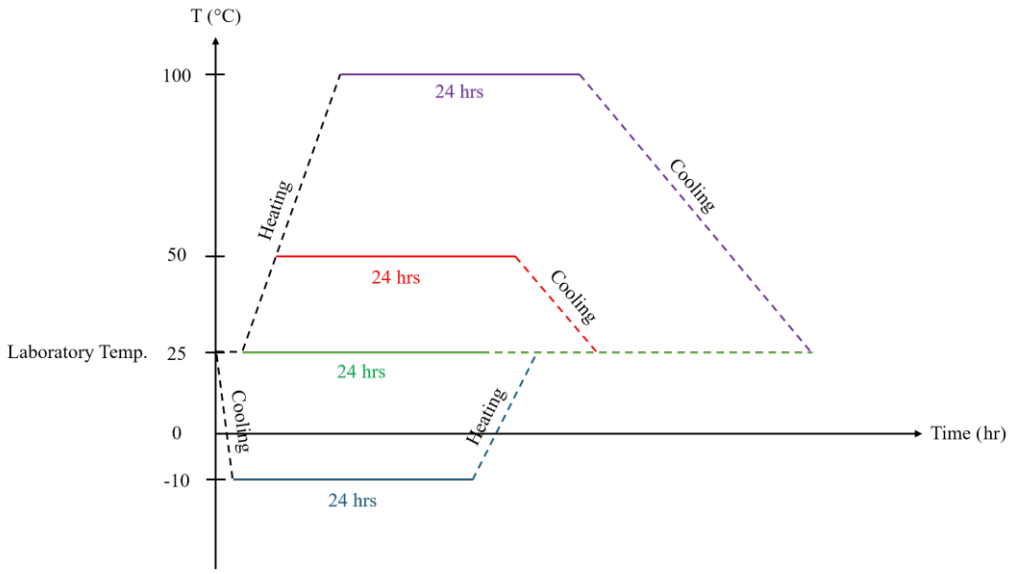
در بسیاری از پروژه‌های مهندسی عمران و معدن، این مصالح در محیط‌های سطحی و زیرزمینی در معرض تنش‌ها و گرادیان‌های حرارتی قرار دارند که می‌تواند بر پارامترهای مکانیکی آن‌ها، به‌ویژه ویژگی‌های مرتبط با گسیختگی و گسترش ترک، اثرگذار باشد. با این حال، تأثیر دما بر رفتار شکست این مواد همواره یکنواخت نبوده و به عواملی نظیر ویژگی‌های ریزساختاری، میزان تخلخل، حضور ریزترک‌ها و ناهمگنی‌های درونی وابسته است. با وجود پیشرفت‌های حاصل در این زمینه، در اغلب پژوهش‌های موجود اثر دما و هندسه نمونه به‌صورت مستقل بررسی شده و تعامل هم‌زمان این دو عامل در تعیین رفتار شکست کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر تلاش شده است اثر توأمان شرایط حرارتی و هندسه نمونه بر رفتار شکست، با تمرکز بر چقرمگی شکست برشی، مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، ضمن ارزیابی کیفیت ریزساختاری نمونه‌های ساخته‌شده در شرایط دمایی مختلف، ارتباط میان تغییرات ریزساختار، توزیع تنش و پاسخ شکست برشی تحلیل شده است. این رویکرد امکان درک دقیق‌تر سازوکارهای آسیب حرارتی و نقش شدت حساسیت هندسه در تغییر الگوی تمرکز تنش حرارتی و گسترش ترک را فراهم می‌آورد و می‌تواند مبنایی علمی برای ارزیابی و طراحی سازه‌ها و سامانه‌های مهندسی در معرض شرایط دمایی متغیر فراهم سازد.

۲- روش مطالعه

در این پژوهش، نمونه‌هایی با هندسه استوانه‌ای ساخته شدند تا اثر شرایط حرارتی بر رفتار فیزیکی و مکانیکی آن‌ها به‌صورت منظم و قابل مقایسه بررسی شود. نمونه‌ها تحت یک تک چرخه حرارتی در چهار سطح دمایی شامل منفی ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، به‌طوری‌که هر نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای هدف نگهداری شد تا یکنواختی حرارتی در کل حجم آن حاصل شود. پس از پایان این مرحله و خروج نمونه‌ها از محیط حرارتی (و قرارگیری در محیط به مدت ۲۴ ساعت برای هم دما شدن با دمای آزمایشگاه)، ابتدا آزمون‌های اولتراسونیک (تعیین سرعت موج فشاری و برشی) بر روی آن‌ها انجام شد تا تغییرات ناشی از دما در کیفیت ریزساختاری، پیوستگی داخلی و ویژگی‌های انتشار موج مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه، همان نمونه‌ها تحت آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری قرار داده شدند تا اثر دما بر مقاومت فشاری تک‌محوره این مصالح به‌طور مستقیم بررسی شود. این رویکرد مرحله‌ای، امکان برقراری ارتباط میان تغییرات ریزساختاری آشکارشده از طریق آزمون‌های غیرمخرب و نتایج آزمون‌های مخرب را فراهم کرده و زمینه تحلیل جامع‌تری از اثر دما و چرخه حرارتی منفرد بر عملکرد نمونه‌های استوانه‌ای فراهم می‌سازد. همچنین، رفتار شکست مصالح پایه سیمانی تحت تأثیر شرایط حرارتی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و چهار تراز دمایی شامل ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان سطوح آزمون انتخاب شدند. برای اعمال یکنواخت اثر دما، نمونه‌ها در قالب یک چرخه حرارتی منفرد مورد ارزیابی قرار گرفتند؛ به‌گونه‌ای که هر نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای تعیین‌شده نگهداری شد و پس از آن، برای هم‌دما شدن با شرایط آزمایش، ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفت. این بازه دمایی به‌نحوی انتخاب شده است که هم شرایط سردتر و هم گرم‌تر از دمای مرجع اتاق را شامل شود و امکان مقایسه مستقیم پاسخ مکانیکی نمونه‌ها نسبت به حالت مرجع فراهم گردد. شکل ۱ فرآیند چرخه دمادهی به نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

وجود رطوبت اولیه در مصالح سیمانی می‌تواند نقش مهمی در رفتار مکانیکی آن‌ها تحت شرایط حرارتی ایفا کند. حضور آب در حفرات موئینه و منافذ داخلی باعث می‌شود که در مواجهه با تغییرات دما، پدیده‌هایی مانند تبخیر آب در دماهای بالا یا انجماد آب حفره‌ای در دماهای پایین رخ دهد. در دماهای بالا، تبخیر آب موجود در منافذ می‌تواند منجر به افزایش فشار بخار در فضای حفرات، ایجاد تنش‌های داخلی و در برخی موارد گسترش ریزترک‌ها در ماتریس سیمانی شود. از سوی دیگر، در دماهای زیر صفر، انجماد آب حفره‌ای با افزایش حجم همراه است که این افزایش حجم می‌تواند تنش‌های فشاری و کششی موضعی در ریزساختار ایجاد کرده و بر رفتار شکست نمونه‌ها اثرگذار باشد. بروز این پدیده‌ها می‌تواند میدان تنش داخلی ماده را تغییر داده و در نتیجه بر مقادیر اندازه‌گیری‌شده چقرمگی شکست و نحوه گسترش ترک تأثیر بگذارد.

به منظور حذف یا به حداقل رساندن این اثرات و ایجاد شرایط اولیه یکنواخت برای تمامی نمونه‌ها، پیش از اعمال چرخه‌های حرارتی، نمونه‌ها تحت فرآیند خشک‌سازی قرار داده شدند. در این راستا، تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا



شکل ۱. فرآیند دمادهی به نمونه‌ها.

Fig. 1. Process of heating-cooling.

رطوبت آزاد و بخش عمده آب موجود در منافذ آن‌ها تبخیر شده و نمونه‌ها به وزن پایدار برسند. رسیدن به وزن پایدار نشان‌دهنده خروج رطوبت قابل تبخیر از ساختار نمونه‌ها است. این اقدام باعث می‌شود اثرات ناشی از تبخیر یا انجماد آب در طول آزمایش‌ها به حداقل برسد و تغییرات مشاهده‌شده در رفتار مکانیکی نمونه‌ها عمدتاً ناشی از شرایط دمایی اعمال‌شده و ویژگی‌های ذاتی ماده باشد. علاوه بر این، به‌منظور بررسی جامع‌تر رفتار شکست، چند هندسه متفاوت برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد تا اثر هم‌زمان تغییرات دما و ویژگی‌های هندسی بر پاسخ شکست برشی تحلیل شود. این رویکرد امکان تبیین دقیق‌تری از نقش توأمان شرایط حرارتی و شکل نمونه در چقرمگی شکست برشی (حالت II خالص) مصالح سیمانی فراهم می‌سازد. در ادامه، فرآیند ساخت نمونه‌ها، مشخصات مواد مصرفی و روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده تشریح می‌شود.

۲- ۱- مصالح مصرفی و مشخصات آن

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی اثر شرایط حرارتی بر عملکرد مکانیکی ملات سیمانی، یک طرح اختلاط یکنواخت به‌عنوان مبنای ساخت تمامی نمونه‌ها انتخاب شد. ترکیب اصلی ملات شامل سیمان پرتلند تیپ۲، ماسه ریزدانه و آب بوده و به‌منظور حذف اثر عوامل جانبی، ویژگی‌ها و نوع مصالح مصرفی در تمام نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. عامل متغیر در برنامه آزمایش‌ها، استفاده از میکروسیلیس به میزان ۵ درصد وزنی به‌جای بخشی از سیمان بود که با هدف بهبود ریزساختار و ارتقای مقاومت اولیه ملات به طرح اختلاط افزوده شد. فرآیند ساخت و اختلاط نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ASTM C305 انجام گرفت. آب مصرفی از شبکه آب شهری با pH نزدیک به خنثی (۶/۷) انتخاب شده است. با توجه به ماهیت ملات و عدم حضور سنگدانه‌های درشت، استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب یا فوق‌روان‌کننده ضروری تشخیص داده نشد [۱۴]. در کلیه طرح‌ها، نسبت آب به سیمان مقدار ۰/۵ تعیین شده است؛ نسبتی که ضمن تأمین کارایی مناسب، به‌طور گسترده در مطالعات مشابه به‌کار رفته و تأثیر آن بر خواص مقاومتی ملات به‌خوبی شناخته شده است. همچنین این مقدار امکان دستیابی به یکنواختی مناسب مخلوط و سهولت در جای‌گذاری تیغه ایجاد ترک در مرکز قالب طی مرحله تراکم را فراهم می‌سازد. جزئیات کامل طرح اختلاط و مقادیر اجزای مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

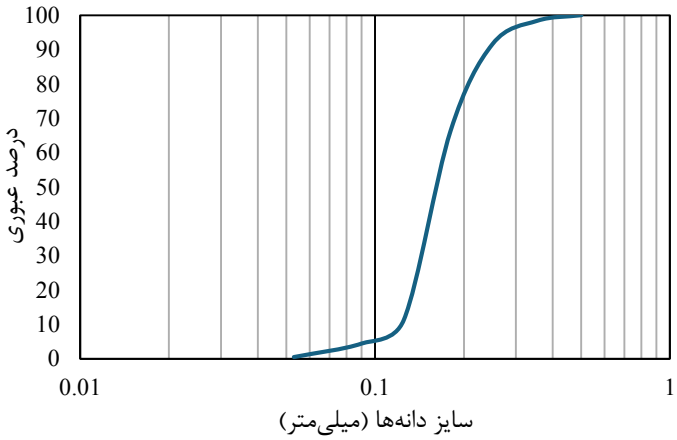
منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در شکل۲ نمایش داده شده است. ماسه مصرفی دارای ضریب انحنا ۱ و ضریب یکنواختی ۱/۴۷ می‌باشد.

همچنین آنالیز اکسیدی–اشعه ایکس فلورسانس ماسه مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. مطابق با این جدول، ماسه مصرفی دارای نسبت سیلیس فعال بالا می‌باشد.

جدول ۱. طرح اختلاط ملات‌های سیمان.

Table 1. Mix design of the cement mortars.

مصالح مصرفی	نسبت جرمی	جرم برای ۱ متر مکعب
ماسه	نسبت ماسه به سیمان ۱	۱۰۰۰ کیلوگرم
آب	نسبت آب به سیمان ۰/۵	۵۰۰ کیلوگرم
سیمان	نسبت سیمان به ماسه ۱	۱۰۰۰ کیلوگرم
میکروسیلیس	نسبت میکروسیلیس به سیمان ۰/۰۵	۵۰ کیلوگرم



شکل ۲. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی.

Fig. 2. Particle size distribution curve of the sand used.

جدول ۲. آنالیز اکسیدی ماسه مصرف شده.

Table 2. Oxide composition analysis of the sand used.

ترکیب	درصد فراوانی	ترکیب	درصد فراوانی
SiO_2	۷۱/۲۰	MnO	۰/۱۲
Fe_2O_3	۷/۵۲	MgO	۰/۲۲
Al_2O_3	۱۴/۱۳	K_2O	۰/۰۸
Na2O	۰/۵۱	L.O.I	۴/۹۰

۲- ۲- فرایند ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، در این تحقیق سه آرایش هندسی متفاوت شامل نمونه برزیلی ترک‌دار مرکزی (CSTBD)، نمونه نیم‌برزیلی اصلاح شده با شکاف اولیه (MSCB)، و نمونه برزیلی با ترک قطری دوگانه (DNBD)، در نظر گرفته شد. انتخاب این هندسه‌ها با هدف بررسی پاسخ شکست و رفتار گسترش ترک تحت بارگذاری غیرمستقیم و مقایسه حساسیت هر آرایش نسبت به تغییرات دمایی صورت گرفت. برنامه آزمایش‌ها به‌گونه‌ای طراحی شد که برای هر ترکیب از دما و هندسه، تعداد سه نمونه تهیه و آزمون شود. در مجموع ۳۶ نمونه ساخته شد که این تعداد امکان تحلیل آماری مناسب و مقایسه قابل اعتماد نتایج را فراهم می‌کند. تمامی برای ایجاد ترک اولیه در نمونه‌هایی که نیازمند ترک از پیش‌ساخته بودند، از تیغه‌ای با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است که در موقعیت هندسی مشخص در قالب قرار گرفتند. ملات تازه پس از ریخته‌شدن در قالب‌ها، تحت شرایط یکسان متراکم شد تا تفاوتی در دانسیته و شرایط مرزی نمونه‌ها ایجاد نگردد. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به‌مدت ۲۸ روز در شرایط عمل‌آوری استاندارد در حوضچه آب آهک نگهداری شدند. یکنواختی زمان و شرایط عمل‌آوری برای تمامی نمونه‌ها رعایت شده است تا اثر سن نمونه حذف شده و تغییرات مشاهده‌شده در نتایج تنها منتج از تفاوت هندسه و شرایط دمایی اعمال‌شده باشد.

پس از تکمیل فرآیند ساخت و عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت یک برنامه حرارتی ساده و غیرتکرارشونده قرار گرفتند که شامل چهار سطح دمایی ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. در این مرحله، هر نمونه تنها یک‌بار در دمای تعیین‌شده قرار گرفت و مدت ماندگاری در هر سطح دما ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد تا شرایط حرارتی یکنواخت در کل حجم نمونه برقرار گردد. پس از پایان این بازه زمانی، نمونه‌ها مستقیماً از محیط سردکننده یا گرم‌کننده خارج و برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی آماده شدند. با توجه به حساسیت مصالح پایه سیمانی نسبت به تغییرات رطوبت محیط، تمهیدات ویژه‌ای برای جلوگیری از تبادل رطوبتی ناخواسته اتخاذ شد. نمونه‌هایی که از دماهای بالا به شرایط محیطی بازمی‌گردند، در صورت تماس مستقیم با هوای آزمایشگاه ممکن است رطوبت جذب کرده و دچار تغییرات موضعی در جرم و ریزساختار شوند. به‌منظور جلوگیری از این پدیده، بلافاصله پس از خروج نمونه‌ها از محیط حرارتی، نمونه‌ها درون دسیکاتور مجهز به ماده جاذب رطوبت قرار داده شدند تا فرآیند هم‌دما شدن با محیط در شرایط رطوبتی کنترل‌شده انجام گیرد. این اقدام سبب شد اثر رطوبت به‌عنوان یک عامل مزاحم از نتایج نهایی حذف شود. شکل ۳ شکل شماتیک از نمونه‌های ساخته شده و حالت بارگذاری برای آنها را نشان می‌دهد.

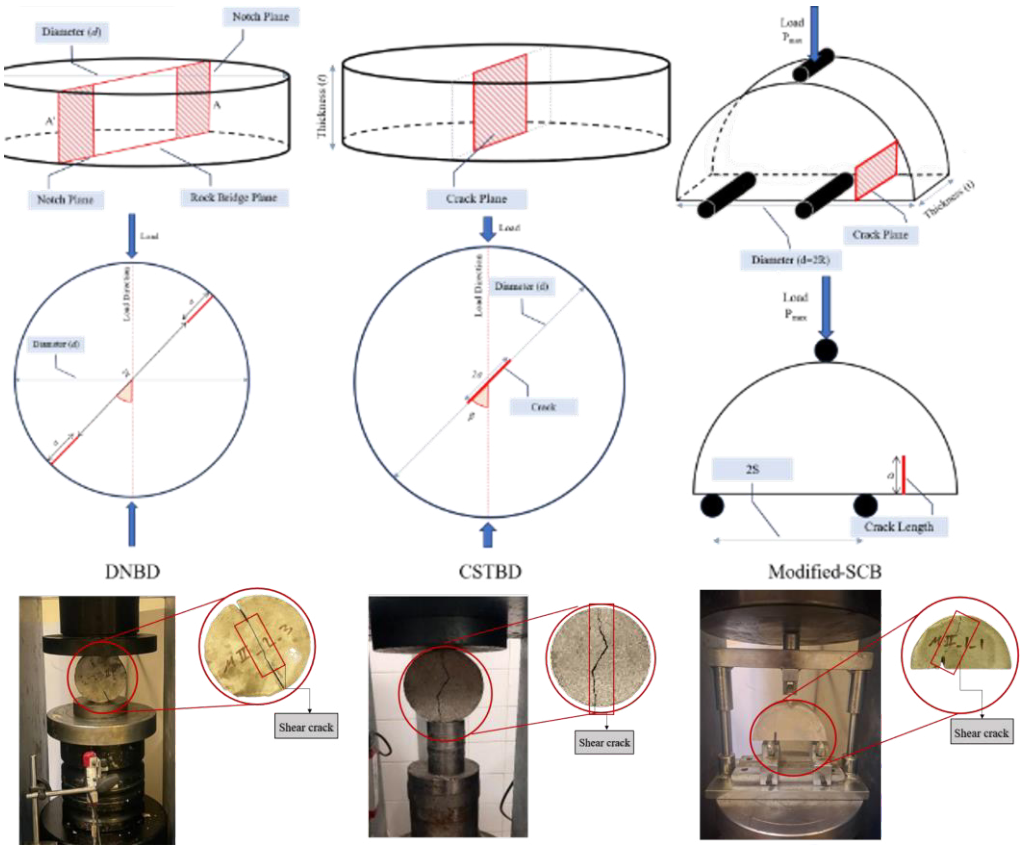
همان‌گونه که در شکل ۳ نمایش داده شده است، هر سه هندسه به‌کاررفته در این مطالعه، یعنی CSTBD[1]، MSCB[2] و DNBD[3]، قابلیت استخراج چقرمگی شکست برشی را دارند، با این تفاوت که سازوکار ایجاد میدان تنش غالب در اطراف نوک ترک در آن‌ها یکسان نیست. تمایز اصلی میان این هندسه‌ها، علاوه بر شکل و آرایش ترک، به شیوه اعمال بار بازمی‌گردد. در نمونه نیم برزیلی اصلاح شده، بارگذاری به‌صورت خمش سه‌نقطه‌ای انجام می‌شود. در این حالت، وجود ترک از پیش‌ساخته در موقعیت مشخص نسبت به دهانه تکیه‌گاه‌ها باعث می‌شود که با افزایش بار خمشی، بیشترین تنش کششی در ناحیه زیر ترک ایجاد شده و گسترش ترک عمدتاً تحت اثر مؤلفه بازشدگی رخ دهد. در مقابل، در نمونه‌های برزیلی با ترک مرکزی و برزیلی با ترک قطری دوگانه بار به‌صورت فشاری اعمال می‌شود؛ با این حال، به دلیل هندسه خاص نمونه و جهت‌گیری ترک‌ها، بار فشاری به میدان تنشی ترکیبی تبدیل شده که شامل یک مؤلفه کششی مؤثر در مجاورت نوک ترک است. نکته قابل‌توجه آن است که نحوه قرارگیری ترک‌ها در این سه هندسه متفاوت بوده و همین موضوع منجر به تفاوت در توزیع تنش و مسیر گسترش ترک می‌شود. در نمونه برزیلی با ترک مرکزی، ترک در مرکز نمونه و در زاویه‌ای خاص با محور بارگذاری قرار دارد، در نمونه نیم برزیلی اصلاح شده ترک (شیار) به‌صورت لبه‌ای در نمونه نیم‌دایره‌ای تعبیه شده و در نمونه برزیلی با ترک قطری دوگانه ترک‌ها با زاویه مشخص نسبت به راستای بار اعمالی قرار می‌گیرند. این تفاوت‌های هندسی و بارگذاری سبب می‌شود که هر نمونه، مسیر متفاوتی برای ایجاد و تمرکز تنش مؤثر در نوک ترک داشته باشد، در حالی که همگی امکان ارزیابی چقرمگی شکست را فراهم می‌کنند.

۲- ۳- محاسبه چقرمگی حالت برشی

روشهای آزمایشگاهی متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مصالح سنگی مطرح شده است. جدول ۳ مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

در این مطالعه از سه هندسه CSTBD، DNBD و MSCB برای ارزیابی تاثیر نوع هندسه و چرخه دمایی استفاده شده است. رابطه محاسبه چقرمگی شکست حالت برشی برای دو هندسه اول مطابق رابطه ۱ و برای

1. Cracked straight through Brazilian disc (CSTBD)
2. Modified semi-circular bending (MSCB)
3. Double-notch Brazilian disc (DNBD)



شکل ۳. شماتیک و نمونه‌های واقعی ملات سیمان با هندسه‌های مختلف در این مطالعه.

Fig. 3. Schematic and realistic illustration of the investigated specimen geometries in this study.

جدول ۳. مشخصات هندسی نمونه‌های مورد مطالعه.

Table 3. Geometrical specifications of the investigated specimens.

نام نمونه	قطر نمونه	ضخامت نمونه	طول ترک
CSTBD	۱۰۰	۵۰	۳۰
MSCB	۱۰۰	۵۰	۱۰
DNBD	۱۰۰	۵۰	۴۰

هندسه سوم مطابق رابطه ۲ به ترتیب ارائه شده است [۲۲–۲۰]:

$$K_{IIC} = \frac{P_{\max}\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}.R.B} Y_{II} \quad (۱)$$

$$K_{IIC} = \frac{P_{\max}\sqrt{a\pi}}{2R.B} Y_{II} \quad (۲)$$

که در این روابط، a نصف طول ترک در هندسه CSTBD و طول ترک در سایر هندسه‌ها، R شعاع نمونه، B ضخامت نمونه، $P_{\max}$ بار در لحظه شکست و Y_{II} ضریب هندسی بی بعد است که به صورت رابطه ۳ قابل تعیین است.

$$Y_{II} = \left[2 + (8\cos^2\theta - 5)(\frac{a}{R})^2\right]\sin 2\theta \quad (۳)$$

همچنین مقدار ضریب هندسی بی بعد برای هندسه DNBD از مطالعات بهرامی و همکاران [۲۲-۲۳] و برای هندسه MSCB مطابق مطالعات عامری و همکاران [۲۰] قابل تعیین است.

۳- تحلیل و بحث

۳- ۱- ارائه ریز نتایج

در این بخش، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده با هدف بررسی تأثیر دما بر چقرمگی شکست حالت برشی مورد تحلیل و بحث قرار می‌گیرد. بدین منظور، مقادیر چقرمگی حالت برشی به‌دست‌آمده از سه هندسه مختلف نمونه‌ها و تحت شرایط دمایی گوناگون به‌عنوان مبنای اصلی تحلیل انتخاب شده‌اند. علاوه بر چقرمگی شکست، مقاومت فشاری تک‌محوره و سرعت موج اولتراسونیک نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شده است تا امکان بررسی هم‌زمان تغییرات مکانیکی و ریزساختاری مصالح در اثر دما فراهم شود. جدول ۴ مقادیر میانگین و انحراف معیار نتایج آزمایشگاهی را ارائه می‌دهد که مبنایی مناسب برای مقایسه رفتار شکست برشی، مقاومت فشاری و پاسخ

جدول ۴. نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی.

Table 4. Experimental results obtained from the laboratory investigations.

نام نمونه	دما (°C)	نتایج آزمایشگاهی			میانگین	انحراف معیار
چقرمگی حالت برشی (مودII) ($MPa.m^{0.5}$)						
CSTBD	-۱۰	۰/۷۶۹۵	۰/۷۹۲۸	۰/۷۸۴۳	۰/۷۸۲۲	۰/۰۱۱۷۹
	۲۵	۰/۶۷۶۲	۰/۶۹۹۵	۰/۶۸۸۱	۰/۶۸۷۹	۰/۰۱۱۶۵
	۵۰	۰/۶۰۶۲	۰/۶۵۲۹	۰/۶۳۲۴	۰/۶۳۰۵	۰/۰۲۳۴۱
	۱۰۰	۰/۵۵۹۶	۰/۵۸۲۹	۰/۵۷۴۹	۰/۵۷۲۴	۰/۰۱۱۸۴
MSCB	-۱۰	۰/۷۶۳۲	۰/۷۵۴۸	۰/۷۸۴۵	۰/۷۶۷۵	۰/۰۱۵۳۱
	۲۵	۰/۶۹۲۷	۰/۶۸۴۵	۰/۷۰۱۲	۰/۶۹۲۸	۰/۰۰۸۳۵
	۵۰	۰/۶۳۱۵	۰/۶۵۱۴	۰/۶۶۶۴	۰/۶۴۹۷	۰/۰۱۷۵۱
	۱۰۰	۰/۵۸۷۴	۰/۶۰۰۱	۰/۵۹۸۷	۰/۵۹۵۴	۰/۰۰۶۹۶
DNBD	-۱۰	۰/۶۶۴۵	۰/۶۷۴۱	۰/۶۶۸۹	۰/۶۶۹۱	۰/۰۰۴۸۶
	۲۵	۰/۶۳۱۵	۰/۶۱۳۵	۰/۶۴۱۵	۰/۶۲۸۸	۰/۰۱۴۱۵
	۵۰	۰/۵۷۴۸	۰/۵۸۱۴	۰/۵۷۶۳	۰/۵۷۷۵	۰/۰۰۳۴۵
	۱۰۰	۰/۵۳۱۵	۰/۵۴۱۷	۰/۵۴۸۷	۰/۵۴۰۶	۰/۰۰۷۲۹
مقاومت فشاری تک محوری (MPa)						
Cylinderal	-۱۰	۴۱/۵۶	۴۱/۸۷	۴۰/۶۷	۴۱/۳۶	۰/۶۱۴
	۲۵	۳۷/۵۱	۳۶/۴۳	۳۶/۷۴	۳۶/۸۹	۰/۵۶۵
	۵۰	۳۸/۴۵	۳۸/۶۳	۳۹/۱۴	۳۸/۷۴	۰/۳۵۵
	۱۰۰	۳۳/۲۴	۳۴/۱۵	۳۲/۹۱	۳۳/۴۳	۰/۶۲۵
سرعت موج فشاری (m/s)						
Cylinderal	-۱۰	۴۲۵۱/۲۵	۴۲۳۵/۴۷	۴۳۰۱/۱۴	۴۲۶۲/۶۲	۳۳/۷۸
	۲۵	۳۸۹۳/۳۶	۳۸۸۸/۴۵	۳۹۰۴/۱۵	۳۸۹۵/۳۲	۸/۶
	۵۰	۴۰۱۲/۲۵	۴۰۲۳/۶۹	۴۰۲۵/۱۴	۴۰۲۰/۳۶	۷/۰۶
	۱۰۰	۳۵۱۴/۱۵	۳۵۲۴/۳۶	۳۶۰۱/۱۴	۳۵۴۶/۵۵	۴۸/۱۲
سرعت موج برشی (m/s)						
Cylinderal	-۱۰	۲۱۸۰/۴۷	۲۱۸۵/۴۵	۲۱۷۹/۸۴	۲۱۸۱/۹۲	۳/۳۵
	۲۵	۱۹۹۸/۲۵	۱۹۹۵/۴۵	۱۹۹۹/۴۷	۱۹۹۷/۷۲	۲/۱۱
	۵۰	۲۰۲۵/۱۵	۲۰۲۸/۱۴	۲۰۳۰/۲۴	۲۰۲۷/۸۲	۲/۵۶
	۱۰۰	۱۸۷۰/۴۵	۱۸۷۴/۲۵	۱۸۴۳/۲۵	۱۸۶۲/۶۵	۱۶/۴۹

اولتراسونیک در هندسه‌های مختلف و در دماهای متفاوت فراهم می‌سازد.

۳- ۲- تفسیر نتایج

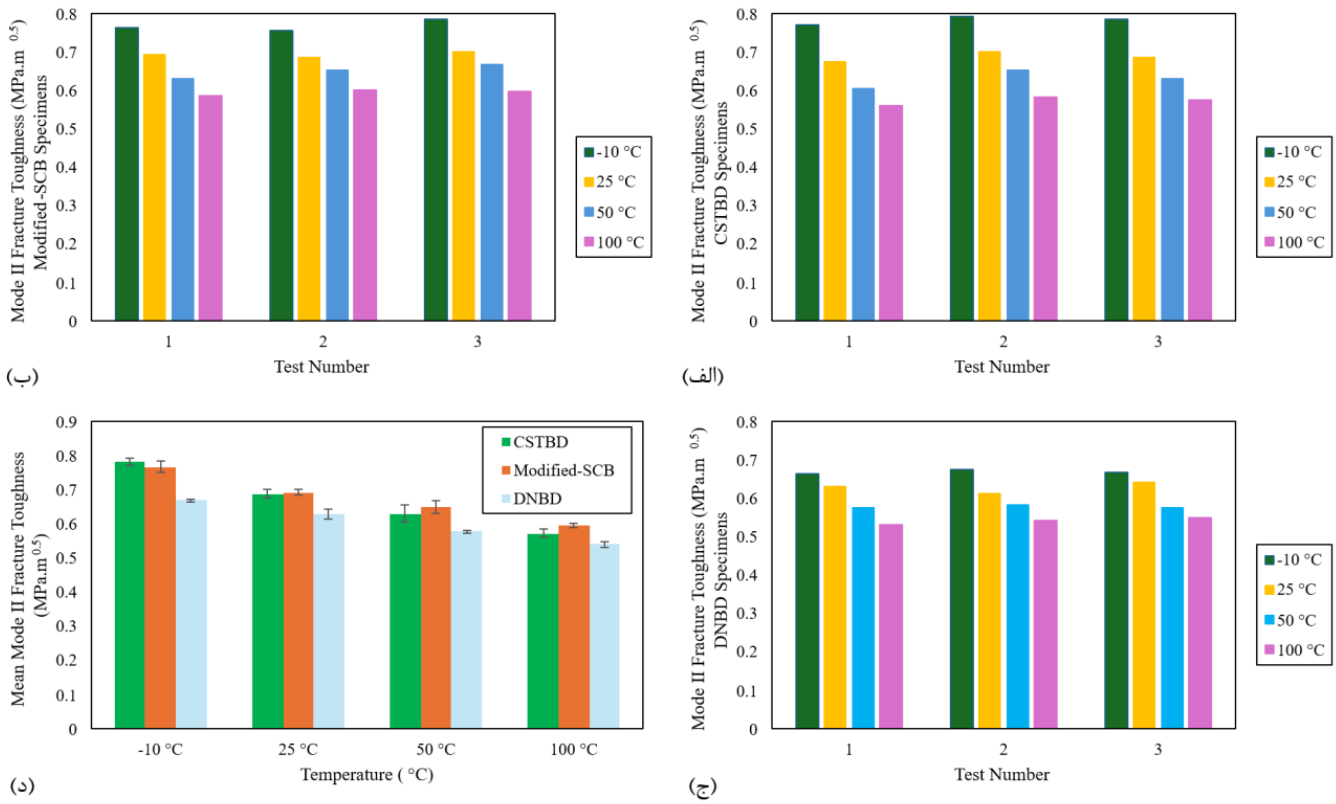
در تحلیل نتایج حاضر، توجه به چند نکته ضروری است. نخست آنکه در این پژوهش برای هر حالت آزمایش، سه نمونه تکرار گردید. اگرچه این تعداد بر اساس استانداردهای متداول در مکانیک شکست سنگ و بتن برای استخراج میانگین چقرمگی شکست پذیرفته شده است، اما برای تحلیل‌های دقیق آماری و بررسی عدم‌قطعیت‌های ریزساختاری، تعداد نمونه‌های بیشتر می‌تواند قابلیت تعمیم نتایج را بهبود بخشد. نکته دوم مربوط به نحوه اعمال بار حرارتی است؛ در این مطالعه اثر یک مرحله حرارت‌دهی تا دمای هدف بررسی شد. در کاربردهای واقعی مهندسی، مصالح سنگی و سیمانی بطور غالب تحت چرخه‌های مکرر گرم و سرد شدن (سیکل‌های حرارتی) قرار می‌گیرند. این چرخه‌ها می‌توانند به دلیل پدیده خستگی حرارتی، آسیب‌های به‌مراتب گسترده‌تری در مقایسه با یک بار حرارت‌دهی ایجاد کنند. بنابراین، بررسی اثر توأمان هندسه و چرخه‌های مکرر حرارتی به‌عنوان گامی مهم برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود تا درک جامع‌تری از پایداری بلندمدت سازه‌ها در شرایط محیطی سخت حاصل گردد.

مطابق با داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴، چقرمگی شکست حالت برشی نمونه‌های برزیلی دارای ترک مرکزی مستقیم وابستگی قابل‌توجهی به دما نشان می‌دهد. مقدار میانگین چقرمگی این هندسه در دمای مرجع (۲۵ درجه سانتی‌گراد) برابر با $0.6879\ MPa.m^{0.5}$ است، در حالی‌که با کاهش دما به منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد، این مقدار به $0.7822\ MPa.m^{0.5}$ افزایش می‌یابد که بیانگر رشد حدود ۱۳/۷ درصدی نسبت به شرایط مرجع است. این بهبود رفتاری را می‌توان به افزایش سختی مؤثر خمیر سیمان و کاهش تحرک ریزترک‌ها در دماهای پایین نسبت داد. در مقابل، با افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست حالت برشی به‌ترتیب به ۰/۶۳۰۵ و $0.5724\ MPa.m^{0.5}$ کاهش یافته است که معادل افت ۸/۳ و ۱۶/۸ درصدی نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این روند کاهشی ناشی از آسیب‌های حرارتی، تضعیف پیوستگی ریزساختار و فعال‌شدن ریزترک‌های حرارتی در دماهای بالاتر است که ظرفیت ماده در مقاومت در برابر لغزش برشی ترک را کاهش می‌دهد.

در نمونه‌های نیم برزیلی اصلاح شده نیز روند کلی مشابهی مشاهده می‌شود. مقدار میانگین چقرمگی شکست برشی در دمای اتاق برابر با $0.6928\ MPa.m^{0.5}$ گزارش شده است، در حالی‌که در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد این مقدار به $0.7675\ MPa.m^{0.5}$ افزایش یافته و افزایشی در حدود ۱۰/۸ درصد را نشان می‌دهد. توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های برشی در ناحیه نوک ترک تحت شرایط خمش سه‌نقطه‌ای و افزایش سختی مؤثر ماده در دماهای پایین از عوامل اصلی این بهبود محسوب می‌شوند. با این حال، افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش چقرمگی حالت برشی به $0.6497\ MPa.m^{0.5}$ و $0.5954\ MPa.m^{0.5}$ شده است که به‌ترتیب افت ۶/۲ و ۱۴ درصدی نسبت به دمای مرجع را نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر حساسیت قابل‌ملاحظه این هندسه به تخریب حرارتی و کاهش مقاومت برشی در دماهای بالا است.

برای هندسه برزیلی با ترک دوگانه لبه‌ای، مقدار میانگین چقرمگی شکست حالت برشی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با $0.6388\ MPa.m^{0.5}$ به‌دست آمده است. کاهش دما به ۱۰- درجه سانتی‌گراد سبب افزایش این مقدار به $0.6691\ MPa.m^{0.5}$ شده که تنها ۴/۸ درصد بهبود را نسبت به حالت مرجع نشان می‌دهد و بیانگر حساسیت کمتر این هندسه به دماهای پایین است. در مقابل، با افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی حالت برشی به‌ترتیب به $0.5775\ MPa.m^{0.5}$ و $0.5206\ MPa.m^{0.5}$ کاهش یافته که معادل افت ۹/۶ درصدی و ۱۸/۵ درصدی نسبت به دمای مرجع می‌باشد. تمرکز تنش‌های برشی در امتداد ترک و گسترش ریزترک‌های حرارتی در این آرایش هندسی نقش مؤثری در کاهش مقاومت برشی نمونه‌های برزیلیا ترک دوگانه لبه‌ای در دماهای بالا ایفا می‌کند.

تغییرات چقرمگی شکست در بازه دمایی مورد مطالعه، ریشه در دگرگونی‌های فیزیکی و شیمیایی ریزساختار ملات سیمانی دارد. در دماهای بالا (تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، کاهش چقرمگی شکست را می‌توان به پدیده آسیب حرارتی نسبت داد. در این مرحله، تبخیر آب آزاد و بخشی از آب‌های پیوندی در حفرات منجر به انقباض خشک‌شدگی و ایجاد تنش‌های کششی داخلی می‌شود. از سوی دیگر، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی میان سنگدانه‌ها و خمیر سیمان منجر به تمرکز تنش در ناحیه انتقال فاز شده و باعث تشکیل ریزترک‌های شعاعی و محیطی در اطراف سنگدانه‌ها می‌گردد. این ریزترک‌ها با پیوستن به یکدیگر در نوک ترک اصلی، ناحیه فرآیند شکست را تضعیف کرده و انرژی مورد نیاز برای پیشروی ترک را کاهش می‌دهند. در مقابل، افزایش چقرمگی در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد ناشی از مکانیزم سخت‌شدگی ناشی از یخزدگی است. در این حالت، انجماد آب موجود در حفرات اشباع، نوعی فشار هیدرواستاتیک داخلی ایجاد می‌کند که در کوتاه‌مدت می‌تواند با پر کردن فضای خالی حفرات، مقاومت ماتریس سیمانی



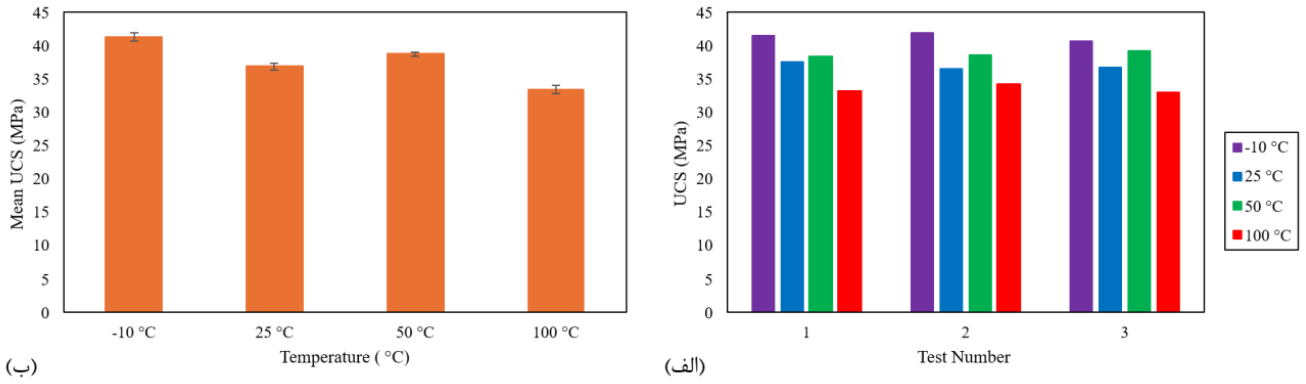
شکل ۴. نتایج کلی بدست آمده برای چقرمگی حالت برشی از مطالعات آزمایشگاهی: الف) نمونه‌های برزیلی با ترک مستقیم مرکزی ب) نمونه‌های نیم برزیلی اصلاح شده ج) نمونه‌های برزیلی با ترک دوگانه لبه‌ای د) مقادیر میانگین.

Fig. 4. Overall experimental results for Mode II fracture toughness: (a) centrally straight notched Brazilian disc specimens, (b) modified semi Brazilian specimens, (c) Brazilian disc specimens with double-edge cracks, and (d) average values.

را افزایش داده و از تمرکز تنش در لبه ریزترک‌ها جلوگیری کند. همچنین، کاهش دما منجر به افزایش چسبندگی در سطح مشترک سنگدانه و سیمان شده که در نهایت مقاومت ماده در برابر آغاز حرکت ترک را ارتقا می‌دهد.

برای درک بیشتر داده‌ها و برجسته‌سازی الگوی تغییرات، نتایج عددی ارائه‌شده در جدول ۵ به شکل نمودارهای ستونی بازنمایی شده‌اند. این نمودارها که در شکل ۴ ارائه شده‌اند، تصویر روشنی از رفتار چقرمگی شکست در شرایط دمایی مختلف فراهم می‌کنند. بررسی بصری نمودارها نشان می‌دهد که مقادیر چقرمگی در دماهای پایین‌تر از دمای مرجع اتاق افزایش یافته و با عبور از این دما، روندی کاهشی و منظم را دنبال می‌کنند. چنین ارائه‌ای امکان مقایسه مستقیم پاسخ شکست نمونه‌ها در هندسه‌های گوناگون و در دامنه‌های مختلف دمایی را فراهم کرده و درک تفاوت حساسیت هندسه‌ها نسبت به تغییرات دما را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تسهیل می‌کند.

مطابق با نتایج ارائه‌شده در جدول مربوطه، مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های استوانه‌ای نیز به‌طور معناداری تحت تأثیر تغییرات دما قرار گرفته است. مقدار میانگین مقاومت فشاری در دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با حدود ۳۶/۸۹ MPa به‌دست آمده است. با کاهش دما به منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری به حدود ۴۱/۳۶ MPa افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایشی در حدود ۱۲ درصد نسبت به دمای مرجع است. این افزایش را می‌توان به افزایش سختی ماتریس سیمانی، کاهش تحرک رطوبت باقیمانده و محدود شدن گسترش ریزترک‌ها در دماهای پایین نسبت داد. در مقابل، با افزایش دما به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، میانگین مقاومت فشاری به حدود ۳۸/۷۴ MPa می‌رسد که تغییر آن نسبت به دمای اتاق محدود بوده و بیانگر پایداری نسبی مقاومت فشاری در این بازه دمایی است. با این حال، در دما ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش محسوسی در مقاومت فشاری مشاهده



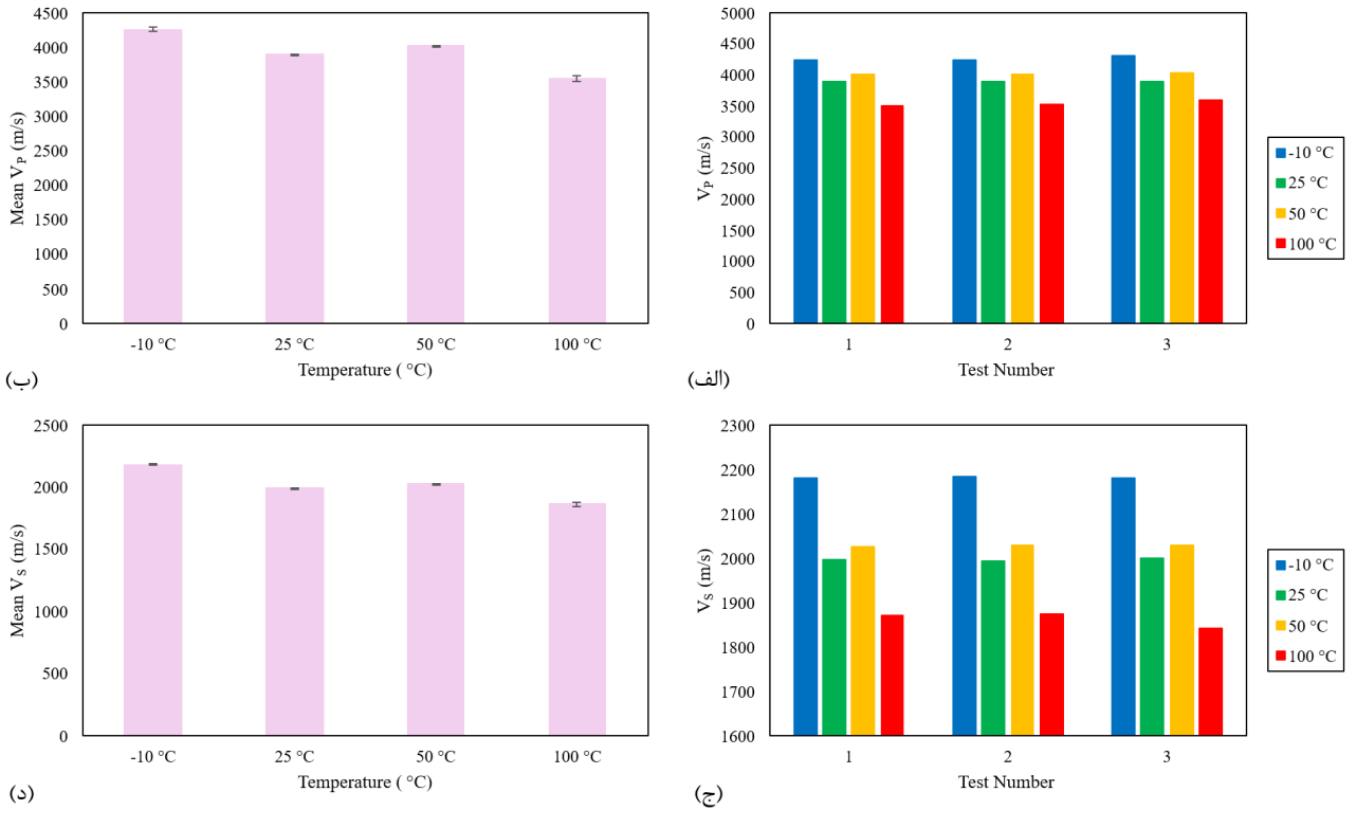
شکل ۵. نتایج کلی بدست آمده برای مقاومت فشاری تک محوری از مطالعات آزمایشگاهی: الف) تکرار آزمایش‌ها ب) مقادیر میانگین.

Fig. 5. Overall experimental results for uniaxial compressive strength obtained from laboratory tests: (a) repeated test results, and (b) average values.

می‌شود، به‌طوری‌که مقدار میانگین به حدود MPa ۳۳/۴۳ کاهش یافته است که معادل افتی در بطور تقریبی ۹ درصد نسبت به دمای مرجع می‌باشد. این کاهش مقاومت فشاری را می‌توان به تبخیر آب محبوس، افزایش تخلخل مؤثر، ایجاد ریزترک‌های حرارتی و تضعیف پیوستگی خمیر سیمان نسبت داد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک‌محوره، مشابه چقرمگی شکست، در دماهای پایین بهبود یافته و در دماهای بالاتر از دمای اتاق دچار افت تدریجی می‌شود که بیانگر حساسیت خواص مکانیکی ملات سیمانی به اثرات حرارتی است. به‌منظور نمایش بصری و مقایسه آسان‌تر نتایج، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره به‌دست‌آمده در دماهای مختلف به‌صورت نمودار شماتیک نیز در شکل ۵ ارائه شده است.

برای بررسی دقیق‌تر اثر دما بر وضعیت ریزساختاری نمونه‌ها، اندازه‌گیری سرعت موج‌های فشاری و برشی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای در سطوح دمایی مختلف انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو سرعت موج به‌طور معناداری به تغییرات دما حساس هستند و روندی منسجم با سایر شاخص‌های مکانیکی از خود نشان می‌دهند. در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد، افزایش سرعت موج‌های فشاری و برشی نسبت به دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که می‌توان آن را ناشی از افزایش سختی مؤثر ماتریس سیمانی، بسته‌تر شدن ریزترک‌های موجود و کاهش تغییرشکل‌پذیری فاز خمیر سیمان در دماهای پایین دانست. این وضعیت موجب بهبود قابلیت انتشار امواج الاستیک در محیط ماده می‌شود. در مقابل، با افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش تدریجی و قابل توجه سرعت هر دو نوع موج ثبت شده است. این افت بیانگر تشدید آسیب‌های حرارتی، ایجاد و گسترش ریزترک‌های ناشی از انبساط حرارتی ناهمگون اجزا و تضعیف پیوستگی بین فازهای مختلف ملات سیمانی است که در نهایت باعث کاهش سرعت انتشار امواج می‌شود. هم‌خوانی روند تغییرات سرعت موج‌های اولتراسونیک با نتایج مقاومت فشاری تک‌محوره و چقرمگی شکست نشان می‌دهد که پارامترهای اولتراسونیک ابزار مناسبی برای ارزیابی غیرمخرب کیفیت ریزساختار و پیش‌بینی تغییرات خواص مکانیکی ملات سیمانی تحت شرایط دمایی مختلف محسوب می‌شوند. برای نمایش بصری نتایج حاصل از تغییرات سرعت موج‌های فشاری و برشی در دماهای مختلف، داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌صورت نمودارهای شماتیک ارائه شده‌اند. شکل ۶ به‌طور خلاصه روند تغییرات سرعت امواج الاستیک را در نمونه‌های استوانه‌ای تحت سطوح دمایی مختلف نشان می‌دهد و امکان مقایسه مستقیم اثر دما بر رفتار اولتراسونیک نمونه‌ها را فراهم می‌سازد.

مطابق با مطالعاتی نظیر[۸]، به‌منظور ارزیابی غیرمخرب کیفیت مصالح سنگی و شبه‌سنگی، یک شاخص کیفیت مبتنی بر نتایج آزمون‌های اولتراسونیک معرفی شده است. این شاخص با تکیه بر سرعت انتشار امواج الاستیک در ماده (امواج فشاری و برشی)، تعریف می‌شود و به‌عنوان معیاری کمی برای سنجش وضعیت ریزساختاری، میزان پیوستگی داخلی، وجود ریزترک‌ها و درجه آسیب‌دیدگی حرارتی یا مکانیکی نمونه‌ها به کار می‌رود. از آنجا که سرعت امواج اولتراسونیک به‌طور مستقیم تحت تأثیر مدول‌های الاستیک، چگالی مؤثر و سلامت پیوستگی فازهای داخلی ماده قرار دارد،



شکل ۶. نتایج کلی بدست آمده برای سرعت موج از مطالعات آزمایشگاهی: الف) سرعت موج فشاری ب) مقادیر میانگین سرعت موج فشاری ج) سرعت موج برشی د) مقادیر میانگین سرعت موج برشی.

Fig. 6. Overall experimental results for wave velocity obtained from laboratory tests: (a) compressional wave velocity, (b) average compressional wave velocity, (c) shear wave velocity, and (d) average shear wave velocity.

تغییرات این پارامتر می‌تواند بازتاب‌دهنده تغییرات کیفی نمونه در اثر عوامل محیطی نظیر دما باشد. بر این اساس، دولتشاهی و همکاران با نرمال‌سازی نتایج اولتراسونیک نسبت به شرایط مرجع، رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه شاخص کیفیت ارائه کرده‌اند که امکان مقایسه کمی کیفیت نمونه‌ها در شرایط مختلف و برقراری ارتباط میان پاسخ اولتراسونیک و خواص مکانیکی، از جمله چقرمگی شکست، را فراهم می‌سازد. روابط ریاضی پیشنهادی برای محاسبه این شاخص کیفیت در ادامه و مطابق رابطه ۴ ارائه می‌شود.

$$\begin{cases} QI_P = \dfrac{V_{PT}}{V_{\Pr}} - 1 \\ QI_S = \dfrac{V_{ST}}{V_{Sr}} - 1 \end{cases} \quad (۴)$$

که در این رابطه، QI_P و QI_S به ترتیب شاخص کیفیت بر اساس سرعت موج فشاری و برشی است. همچنین V_P و V_S به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی می‌باشد. در این روابط اندیس T و r به ترتیب بیانگر دما و مقدار مرجع (۲۵ درجه سانتی‌گراد) است. مقادیر شاخص کیفیت در بازه مقادیر مثبت تا منفی تغییر می‌کند. هرچقدر این مقدار بزرگ‌تر باشد (نسبت به حالت مرجع) نشان می‌دهد که نمونه مورد نظر از لحاظ ریز ساختاری بهبود یافته است. همچنین اگر این مقدار نسبت به مقدار صفر (شاخص کیفیت نمونه مرجع) کم‌تر باشد نشان می‌دهد که نمونه تحت شرایط تعریف شده آزمایشگاهی دچار افت کیفیت شده است. مقادیر بدست آمده برای شاخص کیفیت نمونه‌های استوانه‌ای آزمایش شده مطابق جدول ۵ ارائه شده است.

مطابق با جدول ۵، مقادیر شاخص کیفیت مبتنی بر سرعت موج فشاری و موج برشی برای نمونه‌های استوانه‌ای در دماهای مختلف ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر شاخص کیفیت در دماهای مختلف.

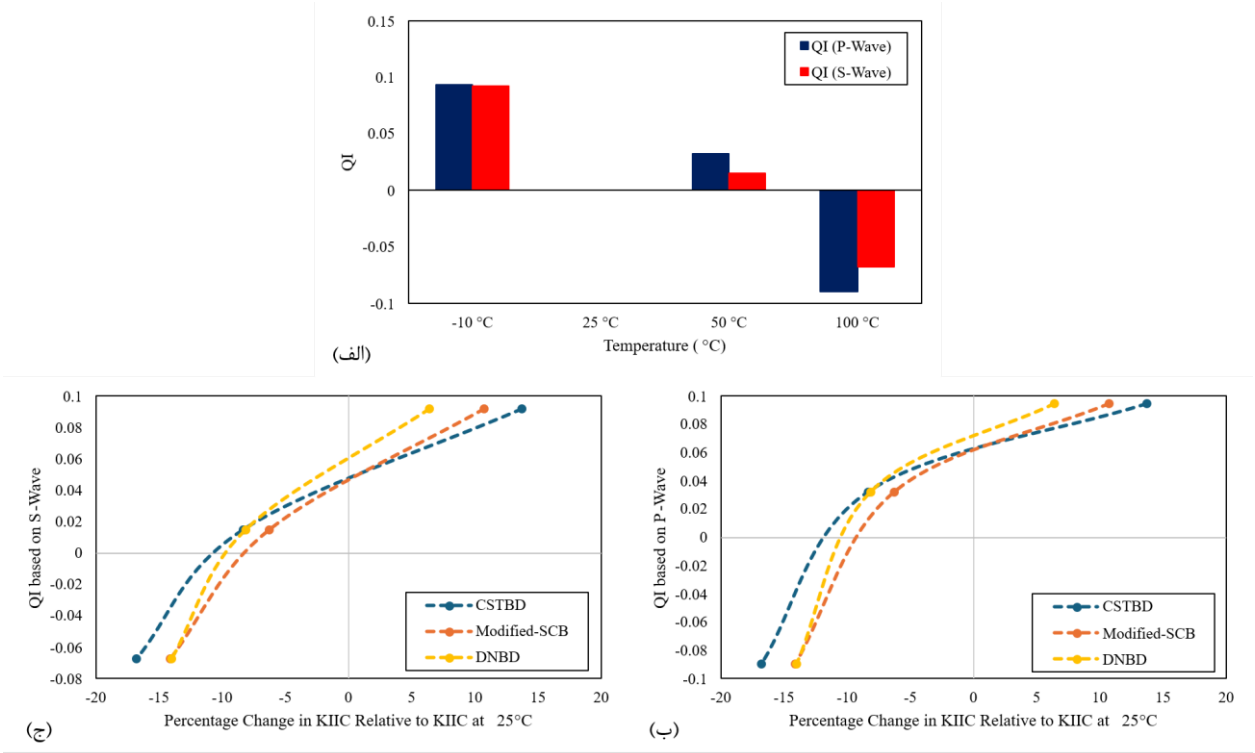
Table 5. Quality index values at different temperatures.

نام نمونه	دما (°C)	QI_P	QI_S
Cylinderal	-۱۰	۰/۰۹۴۲	۰/۰۹۲۲
	۲۵	۰	۰
	۵۰	۰/۰۳۲۱	۰/۰۱۵
	۱۰۰	-۰/۰۸۹۵	-۰/۰۶۷۶

با توجه به این‌که مقدار مرجع شاخص کیفیت برابر صفر در نظر گرفته شده است، مقادیر مثبت بیانگر بهبود کیفیت و مقادیر منفی نشان‌دهنده افت کیفیت نمونه نسبت به حالت مرجع می‌باشند. در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد، هر دو شاخص مقادیر مثبتی را نشان می‌دهند که حاکی از بهبود کیفیت نمونه در مقایسه با شرایط مرجع است. این بهبود را می‌توان به کاهش فعالیت ریزترک‌ها، افزایش سختی مؤثر و بهبود پیوستگی داخلی ماده در دماهای پایین نسبت داد که در نهایت منجر به افزایش سرعت انتشار امواج اولتراسونیک می‌شود. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقادیر هر دو شاخص برابر صفر گزارش شده‌اند که مطابق با تعریف شاخص، بیانگر وضعیت مرجع نمونه است. در این شرایط، نمونه از نظر کیفی نه بهبود و نه افت محسوسی را تجربه نکرده و رفتار آن به‌عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته می‌شود. با افزایش دما به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، شاخص کیفیت مبتنی بر موج فشاری همچنان مقدار مثبتی دارد، در حالی که مقدار برشی آن کاهش یافته و به مقدار کوچکی نزدیک می‌شود. این اختلاف رفتار نشان می‌دهد که امواج برشی نسبت به تغییرات ریزساختاری و آغاز آسیب‌های حرارتی حساسیت بیشتری دارند و می‌توانند زودتر نشانه‌های اولیه افت کیفیت را آشکار سازند، حتی زمانی که تغییرات در موج فشاری هنوز چندان محسوس نیست. در نهایت، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، هر دو شاخص مقادیر منفی قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که بیانگر افت کیفیت محسوس نمونه نسبت به حالت مرجع است. این کاهش کیفیت را می‌توان به گسترش ریزترک‌ها، تضعیف پیوندهای خمیر سیمان و افزایش ناپیوستگی‌های داخلی در اثر بارگذاری حرارتی نسبت داد که بطور مستقیم باعث کاهش سرعت انتشار امواج اولتراسونیک می‌شود. به‌طور کلی، نتایج ارائه‌شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که شاخص کیفیت اولتراسونیک قادر است به‌خوبی تأثیر دما بر وضعیت داخلی نمونه را منعکس کند؛ به‌گونه‌ای که در دماهای پایین‌تر از دمای اتاق بهبود کیفیت و با افزایش دما، به‌ویژه در سطوح بالاتر، افت تدریجی و سپس محسوس کیفیت نمونه مشاهده می‌شود. این روند با تغییرات گزارش‌شده در خواص مکانیکی و رفتار شکست مصالح سازگار بوده و کارایی شاخص کیفیت معرفی‌شده را به‌عنوان یک ابزار غیرمخرب و قابل اعتماد برای ارزیابی سلامت مصالح تأیید می‌کند.

به‌منظور بررسی ارتباط میان کیفیت داخلی نمونه‌ها و رفتار شکست آن‌ها، یک تحلیل هم‌بستگی میان شاخص کیفیت اولتراسونیک و درصد تغییرات چقرمگی شکست نسبت به دمای مرجع انجام شده است که در شکل ۷ ارائه شده است.

تحلیل کیفی نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که بین درصد تغییرات چقرمگی شکست نسبت به دمای مرجع و شاخص کیفیت اولتراسونیک (مبتنی بر موج فشاری و موج برشی) یک رابطه‌ی غیرخطی اما کاملاً معنادار برقرار است. در هر دو نمودار، روند کلی منحنی‌ها صعودی است؛ به این معنا که با افزایش شاخص کیفیت، چقرمگی شکست نیز نسبت به مقدار مرجع افزایش می‌یابد و برعکس، افت کیفیت با کاهش چقرمگی همراه است. در ناحیه‌ی مقادیر منفی شاخص کیفیت (سمت چپ نمودار)، که متناظر با کاهش کیفیت نمونه‌ها نسبت به حالت مرجع است، شیب منحنی‌ها به نسبت تند می‌باشد. این رفتار نشان می‌دهد که در این محدوده، تغییرات کوچک در کیفیت داخلی ماده می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجهی در چقرمگی شکست شود. به بیان دیگر، چقرمگی شکست در شرایط افت کیفیت، حساسیت بالایی نسبت به وضعیت ریزساختاری نمونه دارد. با نزدیک شدن به ناحیه‌ی شاخص کیفیت صفر و عبور از آن، شیب منحنی‌ها به‌تدریج کاهش می‌یابد و روند تغییرات ملایم‌تر می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که در محدوده‌ی کیفیت متوسط تا خوب، افزایش بیشتر کیفیت منجر به افزایش چقرمگی می‌شود، اما نرخ این افزایش نسبت به ناحیه‌ی افت کیفیت کمتر است. در واقع، پس از رسیدن نمونه‌ها به یک سطح معین از کیفیت،



شکل ۷. نتایج کلی بدست آمده برای شاخص کیفیت: الف) شاخص کیفیت در دماهای مختلف ب) چقرمگی حالت برشی بر حسب شاخص کیفیت وابسته به موج فشاری ج) چقرمگی حالت برشی بر حسب شاخص کیفیت وابسته به موج برشی.

Fig. 7. Overall results obtained for the quality index: (a) quality index at different temperatures; (b) Mode II fracture toughness as a function of the quality index based on compressional wave velocity; (c) Mode II fracture toughness as a function of the quality index based on shear wave velocity.

تأثیر بهبودهای بیشتر بر چقرمگی شکست تا حدی اشباع می‌شود. مقایسه‌ی هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد که هرچند روند کلی برای نمونه‌های MSCB،CSTBD و DNBD مشابه است، اما شیب منحنی‌ها و میزان انحنای آن‌ها متفاوت می‌باشد. به‌طور کلی، نمونه‌های DNBD در بازه‌ی کیفیت‌های مثبت، شیب بیشتری را نسبت به دو هندسه‌ی دیگر نشان می‌دهند که حاکی از حساسیت بالاتر چقرمگی شکست این هندسه به بهبود کیفیت داخلی است. در مقابل، نمونه‌های MSCB در برخی بازه‌ها رفتار یکنواخت‌تری داشته و تغییرات چقرمگی آن‌ها با افزایش کیفیت، تدریجی‌تر صورت گرفته است. همچنین مقایسه‌ی نمودار مبتنی بر شاخص کیفیت وابسته به موج برشی و طول نشان می‌دهد که هر دو شاخص توانایی مناسبی در تبیین تغییرات چقرمگی شکست دارند، با این تفاوت که منحنی‌های مبتنی بر موج برشی در برخی نواحی از پیوستگی و یکنواختی بیشتری برخوردارند که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالاتر موج برشی به آسیب‌های ریزساختاری مرتبط با فرآیند شکست باشد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر دما و هندسه نمونه بر رفتار شکست برشی ملات سیمانی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. چقرمگی شکست حالت برشی در چهار سطح دمایی ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری گردید. همچنین، به‌منظور ارزیابی کیفیت داخلی نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوره و پارامترهای اولتراسونیک شامل سرعت موج‌های فشاری و برشی مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان جمع‌بندی‌های زیر را ارائه داد:

- نتایج نشان داد که تغییر دما اثر مستقیم و قابل‌توجهی بر چقرمگی شکست حالت برشی ملات سیمانی دارد. در تمامی هندسه‌ها، کاهش دما از ۲۵ به ۱۰- درجه سانتی‌گراد منجر به افزایش چقرمگی شکست شد؛ به‌گونه‌ای که این افزایش در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به دمای مرجع مشاهده گردید. در مقابل، افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش تدریجی چقرمگی شکست شد، به‌طوری‌که افت چقرمگی

در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در برخی هندسه‌ها به بیش از ۲۵ درصد نسبت به دمای مرجع رسید.

- مقایسه هندسه‌های مختلف نشان داد که حساسیت چقرمگی شکست به تغییرات دما وابسته به نوع بارگذاری و آرایش هندسی ترک است. به‌طور مشخص، نمونه MSCB که تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار دارد، افت شدیدتری در چقرمگی شکست در دماهای بالا نشان داد، در حالی که هندسه‌های CSTBD و DNBD تحت بارگذاری فشاری رفتار پایدارتر و شدت کاهش کمتری را تجربه کردند. این تفاوت رفتاری بیانگر نقش مؤثر میدان تنش ایجادشده در اطراف نوک ترک در کنترل رشد ترک برشی است.
- نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره نشان داد که مقاومت فشاری ملات سیمانی نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مقدار مقاومت فشاری از حدود ۴۱ مگاپاسکال در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد به حدود ۳۳ مگاپاسکال در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت که نشان‌دهنده افتی در حدود ۲۰ درصد است. این روند کاهشی هم‌راستایی مناسبی با افت چقرمگی شکست نشان می‌دهد و بیانگر تضعیف کلی ریزساختار ماده در دماهای بالا است.
- تحلیل نتایج آزمون‌های اولتراسونیک نشان داد که سرعت موج‌های فشاری و برشی با افزایش دما کاهش می‌یابد. سرعت موج فشاری از مقادیری در حدود ۴۳۰۰ متر بر ثانیه در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد به حدود ۳۵۰۰ متر بر ثانیه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید، در حالی که سرعت موج برشی نیز کاهش مشابهی را تجربه کرد. این افت سرعت امواج نشان‌دهنده افزایش ناپیوستگی‌ها و گسترش ریزترک‌های حرارتی در ساختار ملات سیمانی است.
- شاخص کیفیت مبتنی بر نتایج اولتراسونیک نشان داد که در دماهای پایین‌تر از دمای مرجع، مقدار این شاخص مثبت بوده و بیانگر بهبود کیفیت داخلی نمونه‌ها است، در حالی که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر منفی برای شاخص کیفیت ثبت شد که نشان‌دهنده افت محسوس کیفیت ریزساختاری است. مقایسه این شاخص با درصد تغییرات چقرمگی شکست نشان داد که با افزایش شاخص کیفیت، چقرمگی شکست حالت برشی نیز به‌طور معناداری افزایش می‌یابد و یک همبستگی کیفی واضح میان این دو پارامتر برقرار است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رفتار شکست برشی ملات سیمانی تحت اثر دما، حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای میان کیفیت ریزساختاری، شرایط بارگذاری و هندسه نمونه است. یافته‌های عددی این پژوهش تأیید می‌کند که شاخص‌های غیرمخرب مبتنی بر اولتراسونیک می‌توانند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی تغییرات چقرمگی شکست در مواد پایه سیمانی تحت شرایط حرارتی مختلف باشند.

منابع

[1] S. Latifi, M. Hosseini, M. Mahdikhani, “Effect of temperature and number of heating–cooling cycles on the Mode I, Mode II and the mixed-mode I-II fracture toughness of concrete”, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(1) (2022) 141–164, doi: 10.22060/ceej.2021.18363.6850. (in Persian)

[2] D. Fakhri, M. Hosseini, M. Mahdikhani, “Experimental study of the effect of micro-silica and limestone powder on the fracture toughness of concrete”, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(8) (2023) 1625–1644, doi: 10.22060/ceej.2023.20877.7560. (in Persian)

[3] H. Molladavoodi, A. Dolatshahi, M. Arash, M. M. Mashayekhi, “Experimental study on temperature effect on the tensile fracture toughness of cement mortars containing micro-silica”, Journal of Rock Mechanics, 8(1) (2024) 51–65, doi: 10.22034/IRSRM.2024.515881.1026. (in Persian)

[4] M. Hosseini, A. Hezareh, “The estimation of the Mode I fracture toughness of rocks using brittleness index”, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(2) (2018) 391–400, doi: 10.22060/ceej.2017.11813.5085. (in Persian)

[5] E. Ozdemir, D. Eren Sarici, “The effects of some environmental conditions on the mode I fracture toughness of rocks”, Acta Geodaetica et Geophysica, 59(1) (2024) 73–91, doi: 10.1007/s40328-024-00435-0.

[6] A. Dolatshahi, H. Molladavoodi, “Specimens size effect on mechanical and fracture properties of rocks: a review”, Journal of Mining and Environment, 14(4) (2023) 1273–1293, doi: 10.22044/jme.2023.12948.2350.

[7] D. Zhang, G. Lu, Y. Song, W. Nie, P. G. Ranjith, “Experimental study of the effect of ultralow temperature

on the fracture toughness of sandstone", Engineering Fracture Mechanics, 296 (2024) 109830, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109830.

[8] A. Dolatshahi, M. Arash, H. Molladavoodi, "Recycled aggregate size effect on shear and tensile fracture toughness of SCB eco-friendly cemented specimens", Scientific Reports, 16 (2026) 1391, doi: 10.1038/s41598-025-31318-1.

[9] H. Rouhani, M. Arash, E. Farrokh, "Investigating the effects of confining pressure and loading rate on damage propagation and mode I stress intensity factor of granite using the RHT constitutive model", Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 11(1) (2025) 79, doi: 10.1007/s40948-025-00973-z.

[10] A. Dolatshahi, M. Arash, H. Molladavoodi, "Experimental investigation on temperature effects on modes II and III fracture toughness of conventional and boosted cement mortars", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, (2025) 105109, doi: 10.1016/j.tafmec.2025.105109.

[11] C. Noël, B. Fryer, P. Baud, M. Violay, "Water weakening and the compressive brittle strength of carbonates: Influence of fracture toughness and static friction", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 177 (2024) 105736, doi: 10.1016/j.ijrmms.2024.105736.

[12] J. Ren, M. Li, Z. Zhao, H. Lu, X. Tong, Y. Xu, D. Li, "Effects of moisture contents, fracture modes, and temperatures on fracture toughness and crack distribution of asphalt concrete at low-temperature", Case Studies in Construction Materials, 21 (2024) e03647, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03647.

[13] M. Mohammadi Ochmush, M. Arash, A. Dolatshahi, H. Molladavoodi, "Evaluation of temperature effect on the tensile fracture behavior of cementitious specimens with different geometries", Journal of Rock Mechanics, 10(1) (2026) 1–21, doi: 10.22034/IRSRM.2026.501404.0709. (in Persian)

[14] ASTM, C305-06, "Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency", ASTM International, West Conshohocken, 2015.

[15] M. Hosseini, A. R. Khodayari, "Effects of temperature and confining pressure on mode II fracture toughness of rocks (case study: Lushan Sandstone)", Journal of Mining and Environment, 9(2) (2018) 379–391, doi: 10.22044/jme.2018.6450.1463.

[16] N. Ghanbari, M. Hosseini, M. Saghafiyazdi, "Effects of temperature and confining pressure on the mode I and mode II fracture toughness of cement mortar", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 104 (2019) 102361, doi: 10.1016/j.tafmec.2019.102361.

[17] K. Fang, L. Ren, H. Jiang, "Development of Mode I and Mode II fracture toughness of cemented paste backfill: Experimental results of the effect of mix proportion, temperature and chemistry of the pore water", Engineering Fracture Mechanics, 258 (2021) 108096, doi: 10.1016/j.engfracmech.2021.108096.

[18] M. Alneasan, A. K. Alzo'ubi, M. Behnia, O. Mughieda, "Experimental observations on the effect of thermal treatment on the crack speed and mode I and II fracture toughness in brittle and ductile rocks", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 121 (2022) 103525, doi: 10.1016/j.tafmec.2022.103525.

[19] A. A. Aghdam, M. Hassani Niaki, "Influence of high temperatures on modes I and II fracture toughness and energy of nanoclay-reinforced polymer concrete", Magazine of Concrete Research, 76(11) (2024) 591–599, doi: 10.1680/jmacr.23.00163.

[20] M. Ameri, A. Mansourian, S. Pirmohammad, M. R. M. Aliha, M. R. Ayatollahi, "Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures", Engineering Fracture Mechanics, 93 (2012) 153–167, doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.06.015.

[21] T. Meier, "The influence of temperature on Mode II fracture toughness using the Punch-Through Shear with Confining Pressure experiment", 71st EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009, European Association of Geoscientists & Engineers,

(2009) CP-127, doi: 10.3997/2214-4609.201400344.

[22] B. Bahrami, M. Nejati, M. R. Ayatollahi, T. Driesner, "Theory and experiment on true mode II fracturing of rocks", Engineering Fracture Mechanics, 240 (2020) 107314, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107314.

[23] B. Bahrami, S. Ghouli, M. Nejati, M. R. Ayatollahi, T. Driesner, "Size effect in true mode II fracturing of rocks: Theory and experiment", European Journal of Mechanics-A/Solids, 94 (2022) 104593, doi: 10.1016/j.euromechsol.2022.104593.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. M. Mashayekhi, A. R. Dolatshahi, M. Arash, H. Molladavoodi, Effect of Temperature-Specimen Geometry on Pure Shear Crack Resistance of Cemented Rock-Like Materials, Amirkabir J. Civil Eng., 58(5) (2026) 637-656.

DOI: 10.22060/ceej.2026.25804.8454