



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

S. Latifi¹, M. Hosseini^{1*}, M. Mahdikhani²

¹ Department of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

² Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT: In this research, the effects of temperature and number of heating-cooling cycles on mode I, mode II and the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness of concrete were investigated through two series of tests. In the first series of tests, the effect of temperature was studied in a heating-cooling cycle at ambient temperature (25 °C) and 60, 150, 200, 300, 500, and 700 °C. The highest and lowest mode I, mode II and the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness were, respectively, observed at 150 and 700°C. In the second series of tests, the effect of the number of heating-cooling cycles was investigated on mode I, mode II and the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness of concrete specimens at 150°C and a crack inclination angle of 45°. According to the results, mode I, mode II and the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness increased in the first cycle and decreased with increasing the number of heating-cooling cycles. As the crack inclination increased, the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness of the concrete specimens increased. The mode II fracture toughness increased up to a crack inclination angle of 45° and then decreased. Moreover, with increasing the crack inclination angle, the mode I fracture at the inclination angle of 0° was changed into the mixed-mode (tension–shear) fracture at inclination angles smaller than 28.8°. The mixed-mode tension–shear fracture was changed into the mixed-mode compressive–shear fracture at crack inclination angles larger than 28.8°.

Review History:

Received: May, 05, 2020

Revised: Jan. 17, 2021

Accepted: Jun. 11, 2021

Available Online: Jun. 27, 2021

Keywords:

Fracture toughness

Heating-cooling cycle

Mixed-mode

Concrete

Crack inclination angle

1- Introduction

Fracture mechanics is one of the branches of mechanics engineering concerned with the study of the propagation of cracks in concrete. From a microscopic point of view, crack growth occurs due to the separation of molecular bonds at the crack tip. When an external force is applied to the concrete, microcracks are formed and propagated, leading to macrofractures and eventually concrete fracture [1].

According to the fracture mechanics definition, unstable fracture occurs when tension is concentrated near the crack tip. In this case, one of the stress intensity factors, namely the mode I factor (KI), the mode II factor (KII) or the mixed-mode factor, reaches a critical value of KIC or KIIC. This critical value is called fracture toughness.

Various methods are available for determining the fracture toughness of rock specimens. In this research, the conventional test on the cracked straight through Equations (1) and (2) proposed by Atkinson et al. [2] and Eq. (3) suggested by Funatsu et al. [3] were used to calculate the critical stress intensity factors and the mode I, mode II, and mixed-mode I-II fracture toughness.

$$K_{Ic} = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_I \quad (1)$$

$$K_{IIc} = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_{II} \quad (2)$$

$$K_{eff} = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2} \quad (3)$$

Where K_{Ic} , K_{IIc} and K_{eff} represent mode I, mode II and the effective mixed-mode I-II fracture toughness, respectively, R the Brazilian disc radius, B disc thickness, P pressure load at the fracture point, and a half-length of the crack. Moreover, N_I and N_{II} denote the dimensionless intensity factors which are dependent on a/R and β (loading angle relative to the crack direction). Equations (4) and (5) were proposed by Atkinson

*Corresponding author's email: mahdi_hosseini1@eng.ikiu.ac.ir



et al. [2] to determine N_I and N_{II} for $a/R < 0.3$:

$$N_I = 1 - 4(\sin \beta)^2 + 4(\sin \beta)^2 * (1 - 4(\cos \beta)^2) \left(\frac{a}{R} \right)^2 \quad (4)$$

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

In this paper, the effects of temperature and number of heating-cooling cycles on the mode I, mode II and mixed-mode I-II fracture toughness of concrete were investigated through two series of tests. In the first series of tests for physical modeling fire, the concrete undergo a heating and cooling cycle, which means they are exposed to considerable heat first and then cooled after extinguishing the fire. In the fire, the temperature gradually rises, so these 7 temperatures are selected to consider the fracture toughness of concrete at each temperature after extinguishing the fire. In the first series, the effect of temperature was studied in a heating-cooling cycle at the ambient temperature (25°C) and 60, 150, 200, 300, 500, and 700°C. In the second series of tests, the effect of number of heating-cooling cycles was investigated on the mode I, mode II and the mixed-mode I-II fracture toughness of concrete at 150°C and a crack inclination angle of 45°. A review of the literature indicates that most studies have focused on the effect of temperature and number of heating-cooling cycles on the mode I and mode II fracture toughness. The novelty of this study is to investigate the effect of temperature and number of heating-cooling cycles on the mixed-mode I-II fracture toughness, especially the fracture toughness of concrete.

2- Tests conducted on the specimens and the analysis of the results

A number of the discs were prepared to investigate the effect of temperature on the specimens previously subject to the heating-cooling cycle. To this end, the discs were first placed in an oven and heated for 12 h. Three or four sandstone discs were placed in the oven (for modeling the heating process) to conduct the tests at each temperature and loading angle. The heating rate in the electrical furnace was 15 °C/min to simulate. In the heating stage, the discs were heated at 25, 60, 150, 200, 300, 500, and 700 °C, and then removed and cooled down to the ambient temperature. The second series of discs was prepared to investigate the effect of the number of heating-cooling cycles (1, 5, 10, 15, and 20 cycles) on the specimens heated at 150 °C and cooled down to the ambient temperature for modeling hydraulic fracturing. The rate of temperature rise was 1-2 °C/min. In the first series, the tests were performed at each temperature at inclination angles of 0, 15, 28.8, 45, 60, 75 and 90°. In the second series, all tests were performed at a crack inclination angle of 45°.

In the first series of tests, the results show that mode I,

mode II and the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness increase at all angles from the ambient temperature up to 150°C. Up to 150°C, the effective porosity decreased due to the closure of pre-existing cracks. As a result of the closure of the pre-existing cracks, the fracture toughness increased. The fracture toughness of the concrete decreased from 200 to 500°C due to the formation of microcracks. The effective porosity was determined to prove the formation of new microcracks in the concrete specimens. The increase of the effective porosity and decrease of the velocity of the longitudinal wave from 200 to 500°C is due to the formation of new microcracks. As a result of the formation of new micro-crack, the fracture toughness decreased. At 700 °C, evaporation of interstitial water, conversion of CaCO₃ (calcite) to CaO, and CO₂ emissions lead to a change in the color, the formation of microcracks, and rapid reduction of the fracture toughness.

In the second series of tests, the results show that mode I, mode II, and the effective mixed-mode I-II fracture toughness of specimens in the first cycle increase relative to the 0th cycle due to the closure of microcracks and evaporation of pore water. However, the density of microcracks increases from the 5th cycle onwards due to thermal shocks. As a result, the mode I, mode II, and the effective mixed-mode I-II fracture toughness of the specimens after 5, 10, 15, and 20 heating-cooling cycles decreased relative to the 0th cycle.

The fracture toughness varies by changing the loading angle relative to the crack direction. The mode I fracture toughness decreases at 25, 60, 150, 200, 500, and 700 °C with a negative slope. The fracture toughness approaches 0 at all temperatures at a crack inclination angle of 0°. The fracture toughness increases from 0 to 90° with a negative angle, and the maximum fracture toughness is observed at a crack inclination angle of 90° relative to the crack direction. The mode of fracture changes from opening mode (mode I) at the crack inclination angle of zero degree to mixed mode (tension-shear) at the crack inclination angle of less than 90°. The mode of fracture changes from tension-shear to compression-shear (The minus sign behind the fracture toughness values indicates the mode of fracture is compression-shear) at the crack inclination angle of greater than 28.8°.

3- Conclusion

The results of the present paper are as follow:

- The highest and lowest mode I, mode II, and mixed-mode I-II fracture toughness were observed at 150 and 700 °C, respectively.
- The effective mixed-mode I-II fracture toughness increased at all temperatures with increasing the crack inclination angle. The lowest and highest mixed-mode I-II fracture toughness were, respectively, observed at inclination angles of 0 and 90°.
- The effective mixed-mode I-II fracture toughness of the concrete specimens in the first cycle increased relative to the 0th cycle. As the number of heating-cooling cycles increased from 5, 10, 15, and 20, the effective mixed-mode I-II fracture

toughness of the concrete specimens decreased, respectively, relative to the 0th cycle.

References

- [1] Feng, G., Kang, Y., Chen, F., Liu, Y. W., & Wang, X. C. (2018). 'The influence of temperatures on mixed-mode (I+ II) and mode-II fracture toughness of sandstone'. *Engineering Fracture Mechanics*, 189, 51-63.
- [2] Atkinson, C., Smelser, R. E., & Sanchez, J. (1982). 'Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test'. *International Journal of Fracture*, 18(4), 279-291.
- [3] Funatsu, T., Kuruppu, M., & Matsui, K. (2014). 'Effects of temperature and confining pressure on mixed-mode (I-II) and mode II fracture toughness of Kimachi sandstone'. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (67), 1-8.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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 J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 35-38.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18363.6850





اثر درجه حرارت و تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی چقرمگی شکست مود I، مود II و مود ترکیبی (I-II) بتن

شیما لطیفی^۱، مهدی حسینی^{۲*}، مهدی مهدی خانی^۳

۱- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

کلمات کلیدی:

چقرمگی شکست

سیکل گرم شدن - خنک شدن

مود ترکیبی

بتن

زاویه انحراف ترک

خلاصه: بتن همواره در برابر تغییرات محیطی همچون تغییرات دمایی فصل‌ها، تغییرات دمایی شب و روز و آتش سوزی قرار دارد. این شرایط بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و گسترش ترک‌ها و چقرمگی شکست بتن اثر می‌گذارد. در این پژوهش اثر درجه حرارت و تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن روی چقرمگی مود ترکیبی (I-II) بتن مورد بررسی قرار گرفته شده و آزمایش‌ها در دو سری انجام گرفته است. در سری اول آزمایش‌ها، اثر درجه حرارت در یک سیکل گرم شدن - خنک شدن روی چقرمگی شکست تحلیل شد. در مرحله گرمایش، نمونه‌ها تا دمای ۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس در محیط خنک می‌شوند. یک سری آزمایش هم روی نمونه‌هایی که سیکل گرم شدن - خنک شدن را تحمل نکرده‌اند در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج این سری آزمایش‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین میزان چقرمگی شکست مود ترکیبی به ترتیب در دمای ۱۵۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در سری دوم آزمایش‌ها اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی چقرمگی شکست مود ترکیبی بتن در دمای ۱۵۰ درجه و تحت زاویه انحراف ۴۵ درجه بررسی شد نتایج سری دوم آزمایش‌ها نشان داد که در سیکل اول، چقرمگی شکست افزایش و با افزایش تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن میزان چقرمگی شکست مود ترکیبی کاهش می‌یابد. همچنین اثر زاویه بارگذاری نسبت به امتداد ترک در زوایای صفر، ۱۵، ۲۸/۸، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بر روی چقرمگی شکست بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بتن با افزایش زاویه انحراف ترک، مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه انحراف ترک، چقرمگی شکست مود II تا زاویه ۴۵ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد در ضمن با افزایش زاویه انحراف ترک تغییر مود شکستگی از مود I در زاویه انحراف صفر درجه به مود ترکیبی (کشش - برش) برای زاویه انحراف کمتر از ۲۸/۸ درجه اتفاق می‌افتد. برای زاویه انحراف ترک بیش از ۲۸/۸ درجه مود شکست از مود ترکیبی کشش - برش به مود ترکیبی فشار-برش تغییر می‌کند.

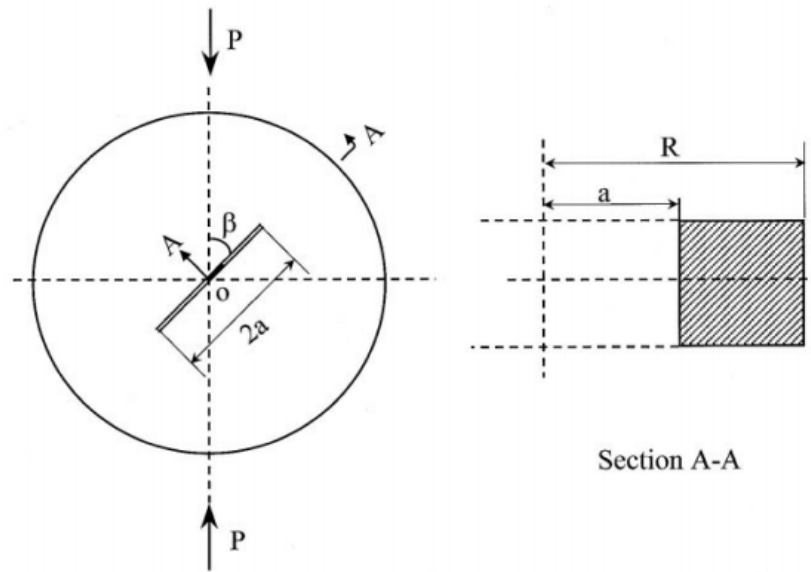
۱- مقدمه

هر ماده است که باعث می‌شود سازه‌ها و یا توده‌های سنگی تحت بارهای مکانیکی یا سایر عوامل محیطی، سریع‌تر گسیخته شوند [۲]. بتن به عنوان سنگ مصنوعی که ساخته دست بشر بوده در ساخت و سازه‌ها استفاده می‌گردد و محققین همواره در طول تاریخ در صدد بالا بردن مقاومت آن در برابر بار و شرایط محیطی بوده است. این ماده شبه سنگی (بتن) همواره در برابر تغییرات محیطی همچون تغییرات دمایی فصل‌ها، تغییرات دمایی شب و روز و آتش سوزی قرار دارد. این شرایط گفته شده طبیعتاً بر روی مقاومت و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و گسترش ترک‌ها و چقرمگی شکست بتن اثر می‌گذارد. در سال‌های اخیر آزمایش‌های تعیین چقرمگی شکست در حال افزایش است. بدون تردید این پیشرفت و رشد در مکانیک شکست سنگ را می‌توان به دلیل

مکانیک شکست علمی است که به بررسی اجسام ترک‌دار می‌پردازد. ایجاد و گسترش ترک برای بسیاری از علوم و مصارف مهندسی مهم است. عملکردهای رشد ترک از دیدگاه میکروسکوپی به دلیل جدایش پیوندهای مولکولی نوک ترک به وقوع می‌پیوندد. شکستگی‌های سنگ به وسیله حضور بسیاری از منافذ و ترک‌ها ایجاد می‌شود. هنگامی که نیروی خارجی اعمال می‌شود، ریز ترک‌ها ایجاد و گسترش می‌یابند و شکستگی‌های ماکرو تشکیل می‌شود و سپس سنگ شکسته می‌شود [۱]. وجود ترک و شکستگی اولیه در سنگ و دیگر مواد مهندسی امری اجتناب‌ناپذیر بوده و از ویژگی‌های خاص

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahdi_hosseini@eng.ikiu.ac.ir





شکل ۱. نمای شماتیک از هندسه نمونه SNBD [۹]

Fig. 1. The schematic representation of the SNBD geometry

و انتشار ترک می‌باشد را چقرمگی شکست می‌نامند. بر اساس نوع بارگذاری، در طول فرایند شکست بسته به هندسه و بارگذاری بر روی نمونه‌ها سه حالت اصلی انتشار ترک وجود دارد: مود I (مود بازشدگی، حالت کششی) که سطوح ترک در جهت عمود بر صفحه ترک از هم جدا می‌شوند، مود II (مود برشی) که در این مود سطوح ترک در جهتی عمود بر لبه جلویی ترک روی هم می‌لغزد و مود III (مود پارگی) سطوح ترک در جهتی موازی با لبه جلویی ترک نسبت به هم حرکت می‌کند. این حالت می‌تواند حالت ترکیبی ایجاد کند؛ هر ترکیبی از سه فرم پایه به عنوان یک حالت ترکیبی در نظر گرفته شده است [۱۰]. روابط ۱ و ۲ ارائه شده توسط اتکینسون و همکاران در سال ۱۹۸۲ و رابطه ۳ توسط فاناتسو در سال ۲۰۱۴ برای محاسبه ضرایب شدت تنش و چقرمگی شکست مود I، II و (I-II) پیشنهاد و استفاده شده است [۷ و ۱۱]:

$$K_{Ic} = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_I \quad (1)$$

$$K_{IIc} = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_{II} \quad (2)$$

طیف وسیعی از مشکلات مهندسی دانست که باعث تقویت آن شده است [۳]. روش‌های متنوعی جهت تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های سنگی متناسب با جنس ماده و شرایط موجود وجود دارد. در این پژوهش از روش متداول آزمایش روی دیسک برزیلی با ترک مستقیم SNBD جهت تعیین چقرمگی شکست مود I، مود II و مود ترکیبی (I-II) استفاده شده است. این روش به طور مستقل توسط آواجی و ساتو در سال ۱۹۷۸ [۴] و سانچز در سال ۱۹۷۹ [۵] بر اساس کارهای قبلی باریمن و سانچز در سال ۱۹۶۶ انجام شده و تحت عنوان دیسک برزیلی با ترک مرکزی مستقیم پیشنهاد داده شده است [۶]. این آزمایش بعداً توسط اتکینسون و همکارانش، [۷] و بعد از آن نیز توسط چونگ و کوروپو در سال ۱۹۸۴ [۸]، برای تعیین چقرمگی شکست تحت عنوان دیسک برزیلی با ترک مستقیم SNBD استفاده و مورد حمایت قرار گرفت. دلیل استفاده از روش SNBD در این تحقیق را می‌توان به استفاده از دیسک برزیلی در به کارگیری در طیف وسیعی از مکانیزم‌های شکست در مود I، مود II و مود ترکیبی (I-II) اشاره کرد (شکل ۱). بر اساس تعریف مکانیک شکست، شکست ناپایدار زمانی رخ می‌دهد که تنش در نزدیکی نوک ترک متمرکز می‌شود و یکی از ضرایب شدت تنش k_I یا k_{II} یا مود ترکیبی (k_{eff}) از آن‌ها به مقدار بحرانی k_{IC} یا k_{IIC} یا k_{eff} برسد که این مقدار بحرانی که در واقع توانایی سنگ برای مقاومت در برابر شروع

برزیلی دارای ترک مرکزی مستقیم در زوایای انحراف ترک (β) صفر، ۳۰، ۴۵ و ۷۰ درجه انجام شد، نشان داد که با افزایش زاویه‌ی انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری ($\beta > 30^\circ$)، محل شروع ترک به سمت مرکز ترک موجود تغییر مکان می‌دهد. در زاویه صفر درجه، ترک، عمود بر تنش کششی ایجاد شده یعنی موازی راستای بارگذاری گسترش می‌یابد. با افزایش زاویه β ، مسیر رشد ترک به صورت منحنی شکل ادامه یافته تا به سمت نقطه بارگذاری گسترش پیدا کند. این ترک‌ها، ترک‌های باله‌ای نامیده می‌شوند. همچنین نشان داده شده است که بیشترین چقرمگی شکست مود یک مربوط به زاویه صفر درجه و برابر $0.3924 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و کمترین چقرمگی شکست مود یک مربوط به زاویه ۷۰ درجه و برابر $0.2896 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد که نشان دهنده این است که با افزایش زاویه انحراف ترک چقرمگی شکست مود یک کاهش یافته است. همچنین بیشترین چقرمگی شکست مود دو در زاویه ۴۵ درجه و برابر $0.6470 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد [۱۳].

حسینی نیز در سال ۲۰۱۷، تأثیر دما و همچنین تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن را بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ مورد بررسی قرار داد. نمونه‌های مورد استفاده شامل توف، آندزیت و بتن بوده است. دو سری آزمایش روی نمونه‌ها انجام شده که در اولین سری از آزمایش‌ها، نمونه‌ها یک چرخه گرم شدن - خنک شدن را تحمل کردند. این آزمایشات در چهار درجه حرارت ۲۵ (دمای محیط)، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. در سری دوم آزمایش‌ها، تأثیر تعداد چرخه‌های گرم شدن - خنک شدن بر سرعت امواج طولی و مقاومت کششی در سه حالت ۵، ۱۰ و ۱۵ سیکل گرم شدن - خنک شدن بررسی شده است. به طوری که در مرحله گرمایش، نمونه‌ها تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس تا دمای محیط خنک می‌شوند. نتایج مطالعه صورت گرفته در سری اول آزمایش‌ها روی چهار نوع سنگ نشان داد که سرعت امواج طولی و مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد، در حالی که تخلخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج سری دوم آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سرعت امواج طولی و مقاومت کششی نمونه‌ها در اثر افزایش تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن کاهش یافته است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خواص بتن در برابر حرارت بالا و سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن به شدت کاهش می‌یابد و این مسئله باید در حین طراحی سیستم‌های نگهداری در تونل‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در غیر این صورت، به دلیل اثر فرآیند مخرب گرم شدن و خنک شدن، بتن می‌تواند آسیب ببیند و تخریب گردد [۱۴]. فوناتسو و همکاران در سال

$$K_{eff} = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2} \quad (3)$$

که در آن K_{Ic} ، K_{IIc} و K_{eff} چقرمگی شکست مود I، مود II و مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II)، شعاع دیسک برزیلی، B ضخامت دیسک، P بار فشاری در لحظه شکست، a نصف طول ترک و N_I و N_{II} ضرایب بدون بعد شدت تنش که وابسته به a/R و β (زاویه بارگذاری نسبت به امتداد ترک) می‌باشد. اتکینستون برای تعیین N_I و N_{II} به ازای $a/R < 0.3$ روابط ۴ و ۵ را ارائه کرد:

$$N_I = 1 - 4(\sin \beta)^2 + 4(\sin \beta)^2 * \left(1 - 4(\cos \beta)^2\right) \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (4)$$

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

از گذشته تاکنون به علت کاربرد فراوان سنگ‌ها در ساخت و ساز و وجود عوامل محیطی مخرب به عنوان عامل مهم در تغییر ویژگی‌های سنگ، همواره انسان‌ها را واداشته که به تحقیقاتی به صورت برجا و یا شبیه‌سازی طبیعت در محیط آزمایشگاهی بپردازند. در ادامه به چند مورد از تحقیقات انجام شده در گذشته در زمینه تأثیر زاویه انحراف ترک، درجه حرارت و تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی چقرمگی شکست و خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و بتن اشاره شده است. از جمله پژوهش زیانکی در سال ۲۰۱۸ در زمینه مطالعه چقرمگی شکست مود I، مود II و مود ترکیبی (I-II) در نمونه‌های گچی در حالتی که راستای ترک با راستای بارگذاری زاویه صفر، ۷، ۱۵، ۲۲، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه تشکیل می‌داد در دماهای مختلف (۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۸۰ درجه سانتی‌گراد) بر روی نمونه دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی انجام داد. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش دما، چقرمگی شکست در نمونه مورد مطالعه کاهش یافته است [۱۲].

اراسلان در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی که بر روی نمونه‌های بتنی دیسک

چقرمگی شکست تحلیل شد. در مرحله گرمایش، نمونه‌ها تا دمای ۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس در محیط خنک می‌شوند. در سری دوم آزمایشات اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی چقرمگی شکست مود ترکیبی بتن در دمای ۱۵۰ درجه و تحت زاویه انحراف ۴۵ درجه بررسی شد. پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌های گذشته روی اثر درجه حرارت و تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر چقرمگی شکست مود I و II انجام شده است و پژوهش‌های انجام شده روی اثر درجه حرارت و تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن روی چقرمگی شکست مود ترکیبی و به خصوص چقرمگی شکست بتن بسیار اندک است که جزو مزیت‌های این پژوهش است.

۲- آماده‌سازی نمونه

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان آبیگ و ماده روان کننده با نام تجاری plasticizer A750 و شن و ماسه استفاده گردید. نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای و دیسکی با طرح اختلاط یکسان (برای تهیه ۱ متر مکعب بتن) که در جدول ۱ آمده است ساخته شد. خمیره بتن آماده شده را در قالب‌هایی به شکل استوانه جهت آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی و قالب‌های دیسکی جهت آزمایش تعیین چقرمگی شکست ریخته شد (شکل‌های ۳ و ۲). همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تیغه‌های متحرکی تعبیه گردید که به کمک آن، دیسک‌های بتنی دارای ترک مستقیم به دست می‌آید. طول ترک ۱۵ میلی‌متر و عرض ترک ۱ میلی‌متر است. خمیره بتنی که در قالب ریخته شده را بعد از ۲۴ ساعت از قالب جدا نموده و به مدت ۲۸ روز در وان محلول آب آهک [۱۸] عمل‌آوری می‌شود (شکل ۵). دو انتهای بتن‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه برای آزمایش فشاری تک محوره ساب زده شده و دیسک‌هایی نیز برای آزمایش برزیلی از این استوانه‌ها برش داده شده و جهت انجام آزمایش تعیین مقاومت کششی برزیلی آماده گردید. شن‌ها از الک شماره $\frac{3}{8}$ با اندازه چشمه‌های ۹/۲۵ میلی‌متر و ماسه‌ها از الک شماره ۴ با اندازه چشمه ۴/۷۵ میلی‌متر عبور داده شد. در شکل ۷ و ۶ مصالح سنگی شامل ماسه و شن مصرفی که بخشی از آن از الک گذشته و بخشی روی الک مانده را مشاهده می‌کنید. بر روی دیسک‌های ترک‌دار به کمک مرکز یاب و نقاله، زاویه بارگذاری نسبت به امتداد ترک مشخص شد. در مجموع حدود ۲۰۰ دیسک بتنی جهت تعیین چقرمگی تحت هفت درجه دمایی متفاوت

۲۰۱۴ در زمینه اثرات دما و فشار محصور کننده بر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) و مود II ماسه سنگ، آزمایشات خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های نیم دایره‌ای در درجه حرارت تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار تا ۵ مگاپاسکال انجام داده است. بر اساس نتایج حاصله در فشار اتمسفر از دمای اتاق تا دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد چقرمگی شکست کاهش و از دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت [۱۱]. فزونیان و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ جهت بررسی گسترش ترک در حالت مود ترکیبی (I-II)، روی نمونه‌های دیسک برزیلی دارای ترک مرکزی مستقیم ساخته شده از سیمان پوزولانی، پلاستر و آب آزمایشاتی انجام دادند. از نتایج حاصل از آزمایشات مشخص گردید که زاویه بارگذاری و K_{IC} با یکدیگر رابطه معکوس دارند و این در حالی است که K_{IIC} در زوایای صفر تا ۴۵ درجه افزایش و سپس با افزایش زاویه بارگذاری یعنی زوایای ۴۵ تا ۹۰ درجه کاهش خواهد یافت. در زاویه ۷۵ درجه ترک‌های باله‌ای با فاصله‌ای از نوک ترک شروع به رشد می‌نمایند؛ با افزایش زاویه بارگذاری یعنی در زاویه ۹۰ درجه این فاصله افزایش و ترک‌های باله‌ای تقریباً از مرکز دیسک شروع به رشد می‌نمایند [۱۵]. الشیعا و خان در سال ۲۰۱۳ آزمایشاتی بر روی نمونه‌های دیسک برزیلی با ترک مستقیم برای بررسی تغییرات چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) در اثر تغییرات دما و فشار انجام دادند. نتایج نشان داده که در تمام شرایط، K_{IC} از K_{IIC} کوچکتر است. همچنین، تغییرات چقرمگی شکست مود (I) و مود (II) با زوایای انحراف ترک نشان می‌دهد که فشار محصور کننده بالا تأثیر فوق العاده‌ای بر روی چقرمگی شکست مود (I) و مود (II) داشته، در حالی که اثر درجه حرارت تا دمای ۱۱۶ درجه سانتی‌گراد بر چقرمگی شکست جزئی است [۱۶]. در پژوهش فنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ فرآیند گرم شدن - خنک شدن نمونه‌های گرانیتی در آب در محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد طی ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ سیکل صورت گرفت و سپس آزمایش خمشی سه نقطه‌ای روی نمونه‌های گرانیت بعد از اعمال سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن با استفاده از سیستم تست هیدرولیک MTS در دانشگاه Wuhan چین انجام شده است. فاصله بین دهانه دو تکیه‌گاه ۳۰/۵ mm در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد چقرمگی شکست موثر سنگ (K_{eff}) با افزایش سیکل‌ها به تدریج کاهش یافت [۱۷]. در این تحقیق اثر درجه حرارت و تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن روی چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) بتن مورد بررسی قرار گرفته شده و آزمایشات در دو سری انجام شده است. در سری اول آزمایشات، اثر درجه حرارت در یک سیکل گرم شدن - خنک شدن روی

جدول ۱. طرح اختلاط بتن

Table 1. The mix design of the concrete

مقدار در هر متر مکعب از بتن (کیلوگرم)	نوع ماده
۳۵۰	سیمان
۱۱۵۰	ماسه
۷۰۰	شن
۱۴۰ (نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴)	آب
۴	افزودنی فوق روان کننده



شکل ۲. نمونه‌های استوانه‌ای پر شده از بتن جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن

Fig. 2. The cylindrical concrete specimens used for determining their physical and mechanical properties

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی

آزمایش‌هایی جهت تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی بتن بر اساس استاندارد ISRM انجام شد. جهت کنترل و صحت درستی انجام این آزمایشات از چندین نمونه در هر آزمایش استفاده شد که متوسط نتایج آزمایشات در جدول ۲ آورده شده است. آزمایش‌های برزیلی [۱۹]، فشاری تک محوره [۲۰]، فشاری سه محوره [۲۱]، تعیین وزن مخصوص و تخلخل موثر [۲۲] و تعیین سرعت

محیط (۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) و هفت زاویه قرارگیری راستای ترک نسبت به راستای بارگذاری (صفر، ۱۵، ۲۸/۸، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه) آماده شد. برای هر حالت مورد مطالعه، سه نمونه یکسان جهت کنترل و اطمینان از صحت نتایج آزمایش استفاده گردید. همچنین ۲۴ دیسک جهت بررسی تاثیر تعداد سیکل گرم شدن - خنک شدن بر روی چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) در دمای ۱۵۰ درجه و تحت زاویه بارگذاری ۴۵ درجه نسبت به امتداد ترک استفاده شد.



شکل ۳. قالب پر شده از بتن جهت تهیه دیسک برزیلی با ترک مستقیم

Fig. 3. The molds filled with concrete for preparation of CSNBD concrete specimens



شکل ۴. تیغه‌های قالب جهت ایجاد ترک مرکزی مستقیم

Fig. 4. Mold blades to create a straight central crack



شکل ۵. وان‌های آب آهک جهت عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

Fig. 5. Water baths for curing concrete samples



شکل ۶. ماسه الک شده

Fig. 6. Sieved sand



شکل ۷. شن الک شده

Fig. 7. Sieved gravel

جدول ۲. میانگین نتایج خواص فیزیکی و مکانیکی

Table 2. The mean physical and mechanical properties

نسبت پواسون	تخلخل موثر (%)	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	سرعت امواج طولی (m/s)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۲۶	۷/۳۲	۲۲/۸۹	۳۴/۹۲	۵/۷۷	۴۸۵۹	۵۵/۲۱	۵/۳۵	۳۶/۸۶

خنک شدن را تحمل نکرده‌اند در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای بررسی علت تغییرات چقرمگی شکست این آزمایش‌ها انجام شده است.

امواج طولی [۲۳] برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی بتن انجام شده است.

۳-۲- بررسی تاثیر درجه حرارت بر روی خصوصیات بتن

۳-۲-۱- تخلخل موثر
تخلخل موثر شامل حفره‌های متصل به هم می‌باشد که قادر است مایعات را از خود عبور دهد. تخلخل به دلایل مختلفی از جمله شرایط تشکیل (تخلخل اولیه) و فرآیندهای ثانوی مثل هوازدگی، دگرسانی و غیره (تخلخل ثانویه) به وجود می‌آید. برای تعیین تخلخل موثر بعد از هر سیکل

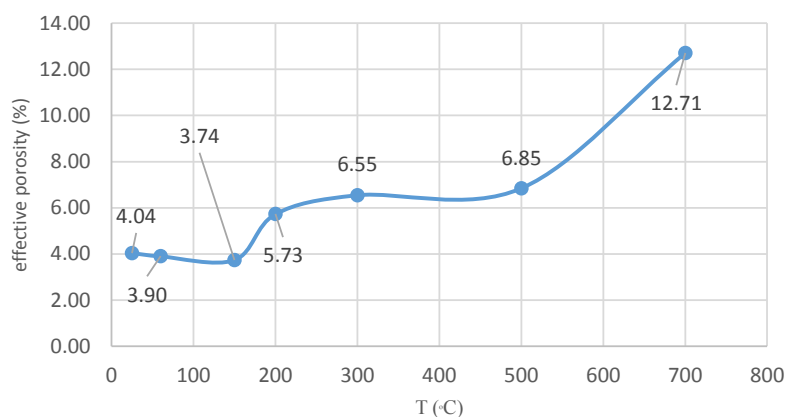
برای بررسی اثر درجه حرارت بر تخلخل موثر و سرعت امواج طولی در یک سیکل گرم شدن- خنک شدن، نمونه‌ها ابتدا تا دمای ۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس در محیط خنک می‌شوند سپس تخلخل موثر و سرعت امواج طولی این نمونه‌ها تعیین می‌شوند. یک سری آزمایش هم روی نمونه‌هایی که سیکل گرم شدن-

جدول ۳. تخلخل موثر بتن در دماهای متفاوت

Table 3. The effective porosity in the concrete at different temperatures

$\frac{\Phi_{et}^*}{\Phi_{e25}}$	تخلخل (%)	دما (°C)
۱	۴/۰۴	۲۵
۰/۹۷	۳/۹۰	۶۰
۰/۹۲	۳/۷۴	۱۵۰
۱/۴۱	۵/۷۳	۲۰۰
۱/۶۲	۶/۵۵	۳۰۰
۱/۷۰	۶/۸۵	۵۰۰
۳/۱۴	۱۲/۷۰	۷۰۰

نمودار تغییرات تخلخل موثر بتن



شکل ۸. اثر درجه حرارت بر روی تخلخل موثر در یک سیکل گرم شدن-خنک شدن

Fig. 8. The effect of temperature on the effective porosity in a heating-cooling cycle

که در آن Φ_e تخلخل موثر و V_e حجم فضای خالی بهم پیوسته و V_t حجم کل است. برای تعیین تخلخل موثر، برای هر حالت ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. میانگین نتایج آزمایش‌ها برای نمونه‌های بتن در جدول ۳ و شکل ۸ آورده شده است. همانطور که از نمودار شکل ۸ مشخص می‌باشد از دمای محیط تا ۱۵۰ درجه به علت تبخیر آب‌های سطحی و بسته شدن درزه‌ها، تخلخل موثر در دمای‌های ۶۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به میزان ۳ و ۸ درصد نسبت به دمای محیط کاهش داشته است. با قرارگیری نمونه‌ها در دماهای بالاتر یعنی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ به دلیل عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی کانی‌های مختلف تمرکز تنش در مرز

گرم شدن-خنک شدن از روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد نمونه استفاده شده است. ابتدا ابعاد نمونه با دقت توسط کولیس اندازه‌گیری می‌شود و به این ترتیب حجم نمونه به دست می‌آید. سپس نمونه در داخل آب به مدت یک ساعت با فشار خلاً کمتر از ۸۰۰ پاسکال اشباع می‌گردد و جرم اشباع به دست می‌آید آن گاه نمونه در داخل گرم‌خانه دارای دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ تا ۷ ساعت نگه داشته می‌شود که پس از آن جرم خشک نمونه اندازه‌گیری می‌شود. تخلخل موثر از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$\Phi_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (6)$$

جدول ۴. سرعت امواج طولی بتن در دماهای مختلف

Table 4. The longitudinal waves velocity in the concrete at different temperatures

سرعت امواج طولی (m/s)	دما (°C)
۴۸۸۳/۸۵	۲۵
۴۹۰۹/۴۲	۶۰
۴۹۳۵/۲۶	۱۵۰
۴۲۸۱/۷۳	۲۰۰
۳۶۹۱/۷۳	۳۰۰
۲۴۴۱/۹۲	۵۰۰
۷۴۲/۴۳	۷۰۰

با فشاری معادل ۱۰ نیوتن بر سانتی‌متر مربع به نمونه فشرده می‌شود و زمان عبور موج قرائت می‌شود [۲۳]. برای به دست آوردن زمان تلف شده در حد فاصل نمونه و ترانس دیوسرها، ترانس دیوسرها را روی هم قرار داده و زمان نشان داده از زمان‌های قرائت شده کم می‌شود. برای به دست آوردن سرعت امواج طولی در نمونه از رابطه (۷) استفاده شد [۲۳].

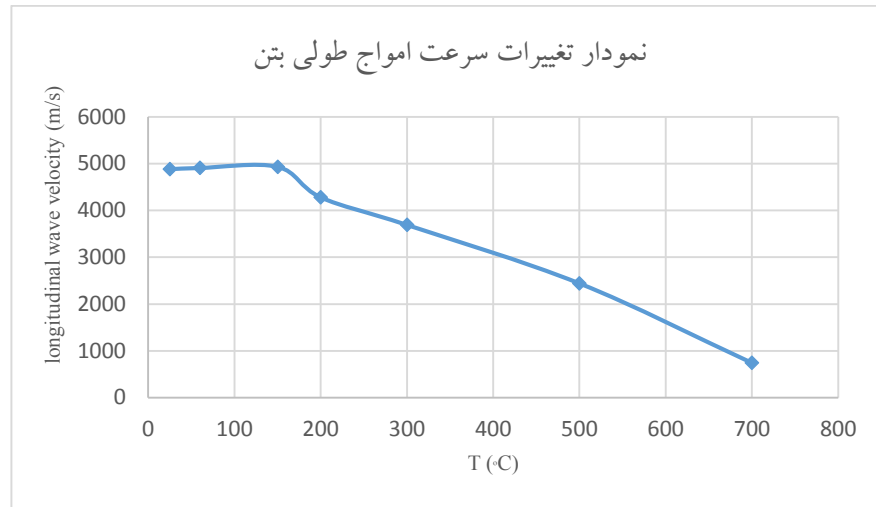
$$V_p = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (7)$$

در این رابطه V_p : سرعت موج فشاری (m/s)، t : زمان گذر موج فشاری (μs) و L : طول نمونه (mm) است. برای تعیین سرعت امواج طولی، برای هر حالت ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. میانگین نتایج آزمایش‌ها برای نمونه‌های بتن در دماهای مختلف در جدول ۴ و شکل ۹ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با قرارگیری نمونه‌ها از دمای محیط تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل کاهش تخلخل موثر امواج، زمان کمتری را در نمونه طی می‌کند و به همین جهت سرعت امواج طولی ۰/۵ درصد نسبت به دمای محیط افزایش یافته است. با قرارگیری نمونه‌ها در دمای ۱۵۰ درجه و بسته شدن درزه‌ها و خارج شدن آب‌های سطحی از این درزه‌ها زمان طی کردن موج کاهش یافته و سرعت امواج در نمونه‌ها ۱ درصد نسب به دمای محیط افزایش یافته است. در دمای ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد سرعت امواج طولی به ترتیب ۱۲/۳، ۲۴/۵، ۵۰ و ۸۵ درصد نسبت به دمای محیط

کافی‌ها ایجاد می‌شود که باعث ایجاد ریز ترک‌های جدید می‌شود همچنین در مرحله خنک شدن نیز به دلیل انقباض نمونه، این ریز ترک‌ها افزایش یافته و همچنین به علت از دست رفتن آب پیوندی به علت تخریب C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) و هیدرات‌های کربوآلومینات و دی هیدروکسی شدن پرتلندیت نمونه‌های بتنی، تخلخل موثر به ترتیب در دماهای مذکور به میزان ۴۱، ۶۲ و ۷۰ درصد نسبت به دمای محیط افزایش یافته است. با قرارگیری نمونه در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت تجزیه پیوندها و رشد شدید ترک‌ها باعث افزایش ۳۱۴ درصد تخلخل موثر بتن نسبت به دمای محیط می‌گردد. همچنین در تحقیقات صورت گرفته توسط لیبیات و بورژوا در سال ۲۰۱۴ به بررسی تخلخل بتن باز یافتی در اثر حرارت بالا پرداخته‌اند. در این تحقیق با اعمال حرارت، شاهد تغییراتی بر روی مقاومت مکانیکی بتن از جمله کاهش مقاومت بتن و افزایش ترک و در نتیجه افزایش تخلخل بوده‌اند [۲۴].

۳-۲-۲- بررسی تاثیر درجه حرارت بر روی تغییرات سرعت امواج طولی

در این پژوهش سرعت امواج طولی نیز در دماهای مختلف تعیین شده است. برای تعیین سرعت امواج طولی، ترانس دیوسرهای فرستنده و گیرنده را طوری روی سطوح انتهایی نمونه علامت گذاری می‌شود که محل عبوری از مراکز آن‌ها با محور مرکزی نمونه بیش از ۲ درجه اختلاف نداشته باشد. سپس مسافت حرکت موج که فاصله مرکز تا مرکز ترانس دیوسرهاست اندازه‌گیری می‌شود. یک لایه نازک از وازلین در محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها مالیده می‌شود تا انرژی عبوری از ترانس دیوسرها کاهش پیدا نکند. ترانس دیوسرها در محل علامت زده شده قرار گرفته و فرستنده



شکل ۹. اثر درجه حرارت بر روی سرعت امواج طولی بتن در یک سیکل گرم شدن-خنک شدن

Fig. 9. The effect of temperature on the longitudinal waves velocity in a heating-cooling cycle

۶۰، ۷۵ و ۹۰ آزمایش انجام گرفته است. جهت اطمینان و صحت نتایج در هر یکی از حالت‌ها از تعداد سه الی چهار نمونه استفاده شده است. نتایج چقرمگی شکست با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ به دست آمده است. نتایج در جداول ۵، ۶ و ۷ و شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

همانطور که از شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ و جداول ۵، ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد با افزایش دما از محیط تا ۱۵۰ درجه شاهد افزایش چقرمگی شکست به دلیل فرار و تبخیر آب‌های منفذی و همچنین بسته شدن ریز ترک‌ها و حذف آب از قسمتی از هیدرات‌های کربوآلومینات اتفاق می‌افتد [۲۷-۲۹]. در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت ایجاد ریز ترک‌ها و از دست رفتن آب پیوندی به علت تخریب C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) و هیدرات‌های کربوآلومینات و دی‌هیدروکسی شدن پرتلندیت چقرمگی شکست کاهش می‌یابد اما به علت از بین رفتن آب‌های میان بافتی با شیب کم این تغییرات به وقوع می‌پیوندد. با قرارگیری نمونه‌های بتنی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت تبخیر و غلبه بر آب‌های میان بافتی و تجزیه CaCO_3 به CaO و گاز CO_2 و دکرناتی شدن کرنات کلسیم باعث کاهش شدید چقرمگی شکست می‌شود. همچنین با مقایسه نتایج مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) نمونه‌های بتنی در شکل ۱۲ می‌توان

کاهش پیدا کرده است. بیشترین مقدار کاهش را همانطور که مشاهده می‌گردد متعلق به دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است که به علت ایجاد ترک‌های فراوان می‌باشد. طبق مشاهدات صورت گرفته و نتایج به دست آمده کاهش سرعت امواج طولی با افزایش دما اتفاق می‌افتد که می‌توان این کاهش سرعت امواج طولی را به دلیل افزایش تخلخل و ایجاد خلل و فرج و ریز ترک‌ها و ایجاد فاصله بین ذرات سازنده و کاهش چسبندگی سیمان دانست [۲۶ و ۲۵].

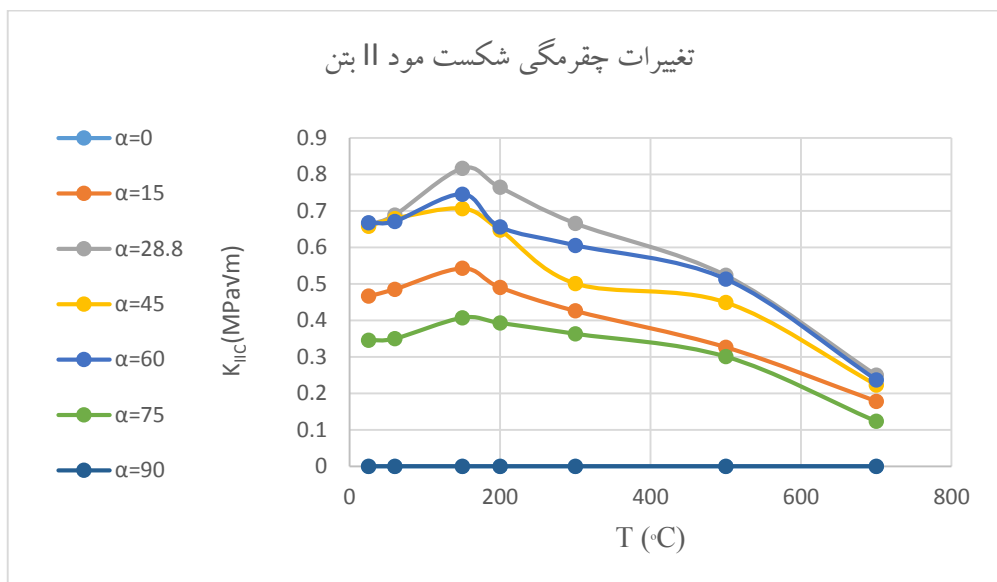
۳-۳- بررسی نتایج آزمایشات تاثیر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I، II و ترکیبی (I-II)

در این تحقیقات بر روی حدود ۲۰۰ نمونه بتنی جهت تعیین اثر حرارت بر روی چقرمگی شکست انجام شده است. برای بررسی اثر درجه حرارت بر چقرمگی شکست در یک سیکل گرم شدن-خنک شدن، نمونه‌ها ابتدا تا دمای ۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس در محیط خنک می‌شوند. یک سری آزمایش هم روی نمونه‌هایی که سیکل گرم شدن-خنک شدن را تحمل نکرده‌اند در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ۷ درجه دمایی ۲۵، ۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و در ۷ زاویه انحراف ترک متفاوت شامل صفر، ۱۵، ۲۸/۸، ۴۵،



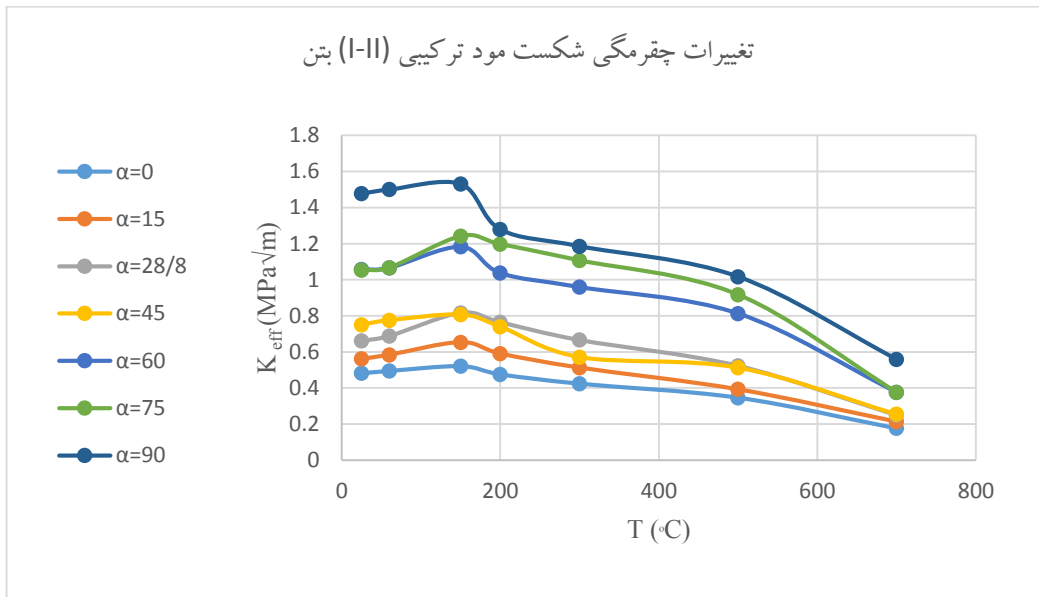
شکل ۱۰. اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I

Fig. 10. The effect of temperature on the mode I fracture toughness



شکل ۱۱. اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود II

Fig. 11. The effect of temperature on the mode II fracture toughness



شکل ۱۲. اثر درجه حرارت بر روی مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II)

Fig. 12. The effect of temperature on the effective mixed-mode I-II fracture toughness

جدول ۵. نسبت تغییرات چقرمگی شکست مود I

Table 5. The ratio of changes in the mode I fracture toughness

$\frac{K_{IC700}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC500}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC300}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC200}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC150}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC60}}{K_{IC25}}$	زاویه انحراف ترک (°)
۰/۳۷	۰/۷۲	۰/۸۸	۰/۹۹	۱/۰۸	۱/۰۳	۰
۰/۳۸	۰/۷۰	۰/۹۸	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۰۴	۱۵
•	•	•	•	•	•	۲۸/۸
۰/۳۴	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۹۸	۱/۰۷	۱/۰۳	۴۵
۰/۳۶	۰/۷۷	۰/۹۱	۰/۹۸	۱/۱۲	۱/۰۱	۶۰
۰/۳۶	۰/۸۷	۱/۰۵	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۰۱	۷۵
۰/۳۸	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۸۷	۱/۰۴	۱/۰۱	۹۰

جدول ۶. نسبت تغییرات چقرمگی شکست مود II

Table 6. The ratio of changes in the mode II fracture toughness

$\frac{K_{IC700}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC500}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC300}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC200}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC150}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC60}}{K_{IC25}}$	زاویه انحراف ترک (°)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۳۸	۰/۷۰	۰/۹۱	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۰۴	۱۵
۰/۳۸	۰/۷۹	۱/۰۱	۱/۱۶	۱/۲۳	۱/۰۴	۲۸/۸
۰/۳۴	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۹۸	۱/۰۷	۱/۰۳	۴۵
۰/۳۶	۰/۷۷	۰/۹۱	۰/۹۸	۱/۱۲	۱/۰۱	۶۰
۰/۳۶	۰/۸۷	۱/۰۵	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۰۱	۷۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۰

جدول ۷. نسبت تغییرات مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II)

Table 7. The ratio of changes in effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness

$\frac{K_{IC700}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC500}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC300}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC200}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC150}}{K_{IC25}}$	$\frac{K_{IC60}}{K_{IC25}}$	زاویه انحراف ترک (°)
۰/۳۷	۰/۷۲	۰/۸۸	۰/۹۹	۱/۰۸	۱/۰۳	۰
۰/۳۸	۰/۷۰	۰/۹۱	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۰۴	۱۵
۰/۳۸	۰/۷۹	۱/۰۱	۱/۱۶	۱/۲۳	۱/۴	۲۸/۸
۰/۳۴	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۹۸	۱/۰۷	۱/۰۳	۴۵
۰/۳۶	۰/۷۷	۰/۹۱	۰/۹۸	۱/۱۲	۱/۰۱	۶۰
۰/۳۶	۰/۸۷	۱/۰۵	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۰۱	۷۵
۰/۳۸	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۸۷	۱/۰۴	۱/۰۱	۹۰



شکل ۱۳. نمونه بتنی در هنگام آزمایش

Fig. 13. Concrete specimen during testing

۳-۴-۱- بررسی تاثیر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی تخلخل موثر

برای بررسی اثر تعداد سیکل گرم شدن - خنک شدن بر روی تخلخل موثر بایستی نمونه‌ها با توجه به تعداد سیکل‌ها در دمای ۱۵۰ درجه به مدت ۱۰-۱۲ ساعت قرار گرفته و هر بار در دمای محیط به صورت تدریجی سرد شوند. نتایج تغییرات تخلخل موثر نمونه‌های بتنی در جدول ۸ و نمودار شکل ۱۵ ارائه شده است. همانطور که از نمودار و جدول مشخص می‌باشد در سیکل اول به دلیل بسته شدن ترک‌ها تخلخل کاهش می‌یابد و بعد از سیکل‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به دلیل تاثیر انقباض و انبساط در سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن، ترک‌ها گسترش یافته و تخلخل موثر نمونه‌های بتنی افزایش یافته است.

۳-۴-۲- بررسی تاثیر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی سرعت امواج طولی

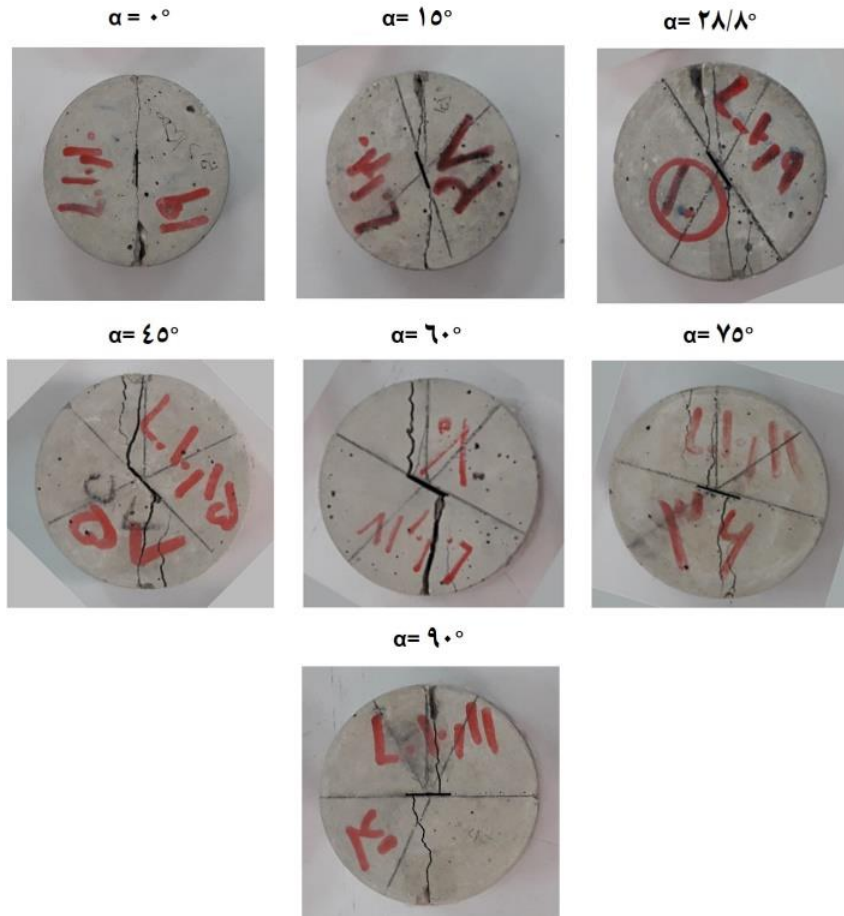
در اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن به علت گسترش ترک‌ها، نوساناتی در سرعت امواج طولی ایجاد می‌شود. این نتایج در جدول ۹ و نمودار شکل ۱۶ ارائه شده است. اعداد جدول و نمودار نشان می‌دهد در سیکل اول به دلیل بسته شدن ترک‌ها و کاهش تخلخل موثر مدت زمان رسیدن امواج کاهش یافته و در نتیجه سرعت امواج طولی ۰/۴ درصد نسبت به سیکل صفر

به این نتیجه دست یافت که با افزایش دما در بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در همه زوایای انحراف ترک میزان مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳ یکی از نمونه‌ها در هنگام بارگذاری نشان داده شده است. بیشترین مقدار چقرمگی شکست در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار چقرمگی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. با افزایش دما بتن‌ها از رنگ خاکستری به رنگ قهوه‌ای به علت پخته شدن رس‌های موجود در بتن تبدیل شده است.

تصویر نمونه‌ها بعد از بارگذاری در زاویه‌های مختلف نسبت به امتداد ترک در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۳-۴-۳- بررسی تغییرات خصوصیات بتن بر اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن

در این نتایج آزمایش‌هایی که برای بررسی اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر تخلخل موثر و سرعت امواج طولی انجام شده ارائه می‌شود. در این بررسی صورت گرفته نمونه‌های آماده شده را ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سیکل تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم کرده و سپس در محیط خنک می‌شود و در نهایت بر روی این نمونه‌ها آزمایش انجام می‌شود. یک سری آزمایش نیز روی نمونه‌های سیکل صفرم انجام شده است. منظور از نمونه‌های آماده شده برای سیکل صفرم نمونه‌هایی است که سیکل گرم شدن - خنک شدن را تحمل نکرده‌اند.



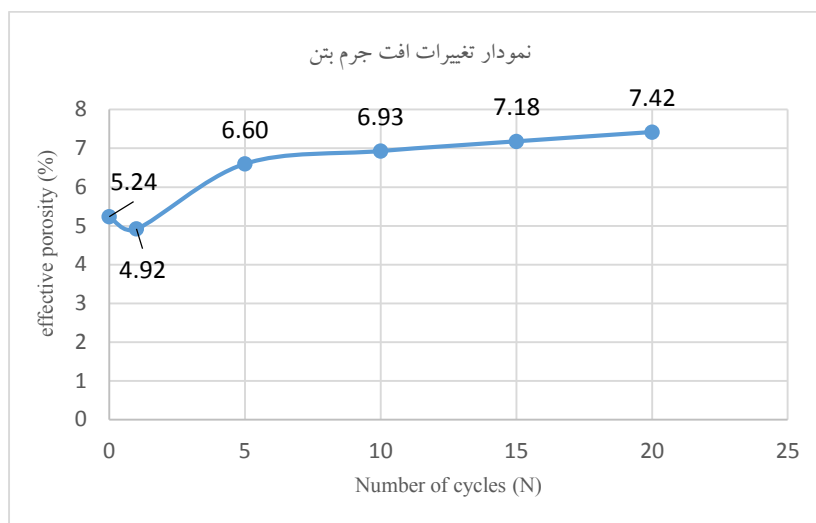
شکل ۱۴. گسترش ترک در نمونه‌های بتنی بعد از بارگذاری

Fig. 14. Crack propagation in the concrete specimens after loading

جدول ۸. تاثیر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی تخلخل موثر بتن

Table 8. Effect of number of heating-cooling cycles on the effective porosity of concrete

تعداد سیکل	تخلخل موثر (%)
۰	۵/۲۴
۱	۴/۹۲
۵	۶/۶۰
۱۰	۶/۹۳
۱۵	۷/۱۸
۲۰	۷/۴۲



شکل ۱۵. اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی تخلخل موثر بتن

Fig. 15. Effect of number of heating-cooling cycles on the effective porosity

جدول ۹. تاثیر تعداد سیکل گرم شدن - خنک شدن بر روی سرعت امواج طولی

Table 9. Effect of number of heating-cooling cycles on the longitudinal waves velocity

تعداد سیکل	سرعت امواج طولی (m/s)
۰	۴۹۰۰/۷۱
۱	۴۹۱۸/۲۸
۵	۴۳۵۶/۱۹
۱۰	۴۳۲۸/۷۰
۱۵	۴۳۱۵/۰۹
۲۰	۴۳۰۱/۵۶

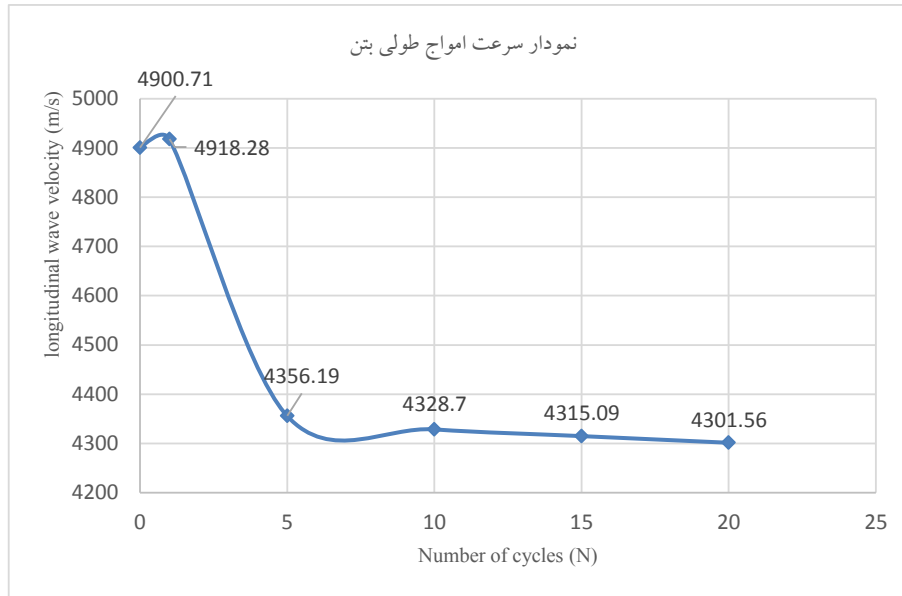
روابط (۱-۳) استفاده شد. زاویه بین راستای بارگذاری و امتداد ترک در این آزمایش‌ها ۴۵ درجه بوده است. متوسط قطر و ضخامت نمونه‌ها به ترتیب برابر ۷۴ و ۲۴ میلی‌متر می‌باشد. در ضمن جهت اطمینان و صحت انجام کار در هر سیکل از ۳ نمونه استفاده شده است. میانگین نتایج چقرمگی شکست در سیکل‌های متفاوت در جدول ۱۰ و نمودار شکل ۱۷ آورده شده است. با توجه به جداول ۱۰ و نمودار شکل ۱۷ مشاهده می‌شود چقرمگی شکست بعد از سیکل اول به دلیل تبخیر آب‌های منفذی و کاهش تخلخل موثر، چقرمگی شکست مود I، مود II و مود ترکیبی (I-II) به میزان ۱۳

افزایش یافته اما با بالا رفتن تعداد سیکل‌ها و افزایش تخلخل موثر به علت انقباض و انبساط نمونه و ایجاد ترک، سرعت امواج طولی در سیکل‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب به میزان ۱۱/۱۱، ۱۱/۶۷، ۱۱/۹۴ و ۱۲/۲۲ درصد نسبت به سیکل صفرم کاهش یافته است.

۳-۵- بررسی تاثیر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی

چقرمگی شکست مود II، I و ترکیبی (I-II)

برای تعیین چقرمگی شکست دیسک‌های برزلی دارای ترک مستقیم از



شکل ۱۶. اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی سرعت امواج طولی بتن

Fig. 16. The effect of number of heating-cooling cycles on the longitudinal waves velocity



شکل ۱۷. تغییرات چقرمگی شکست بتن با تعداد سیکل‌های گرم شدن-خنک شدن در حالت زاویه انحراف ترک ۴۵ درجه

Fig. 17. The fracture toughness of the concrete specimens as a function of the number of heating-cooling cycles at a crack inclination angle of 45°

جدول ۱۰. تغییرات چقرمگی شکست بتن با تعداد سیکل‌های گرم شدن-خنک شدن نسبت به سیکل صفر در حالت زاویه ۴۵ درجه

Table 10. The changes in the fracture toughness of the concrete specimens with the number of heating-cooling cycles relative to the 0th cycle at a crack inclination angle of 45°

سیکل	چقرمگی شکست مود I	چقرمگی شکست مود II	چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II)
کاهش چقرمگی شکست اولین سیکل نسبت به سیکل صفر	٪ +۱۳	٪ +۱۳	٪ +۱۳
کاهش چقرمگی شکست پنجمین سیکل نسبت به سیکل صفر	٪ -۳	٪ -۳	٪ -۳
کاهش چقرمگی شکست دهمین سیکل نسبت به سیکل صفر	٪ -۶/۳	٪ -۶/۳	٪ -۶/۳
کاهش چقرمگی شکست پانزدهمین سیکل نسبت به سیکل صفر	٪ -۱۲	٪ -۱۲	٪ -۱۲
کاهش چقرمگی شکست بیستمین سیکل نسبت به سیکل صفر	٪ -۱۹	٪ -۱۹	٪ -۱۹

می‌شود، و از زاویه ۲۸/۸ درجه تا ۹۰ درجه مقدار چقرمگی شکست افزایش می‌یابد. در نمودار چقرمگی شکست مود II در زاویه صفر درجه دارای مقدار صفر و با شیب مثبت تا زاویه ۴۵ درجه روبه افزایش بوده و بیشترین مقدار چقرمگی شکست مود II را در همه دماها در زاویه ۴۵ درجه می‌توان مشاهده کرد. همچنین همانطور که مشاهده می‌گردد میزان چقرمگی شکست مود II از زاویه ۴۵ درجه تا ۹۰ درجه با شیب منفی رو به کاهش می‌باشد. و در زاویه ۹۰ درجه نیز مقدار چقرمگی شکست مود II صفر می‌شود. در نمودار شکل ۲۰ مشاهده می‌شود در همه دماها با افزایش زاویه انحراف ترک، مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) افزایش می‌یابد به طوری که کمترین و بیشترین میزان چقرمگی مربوط به زاویه صفر و ۹۰ درجه می‌باشد.

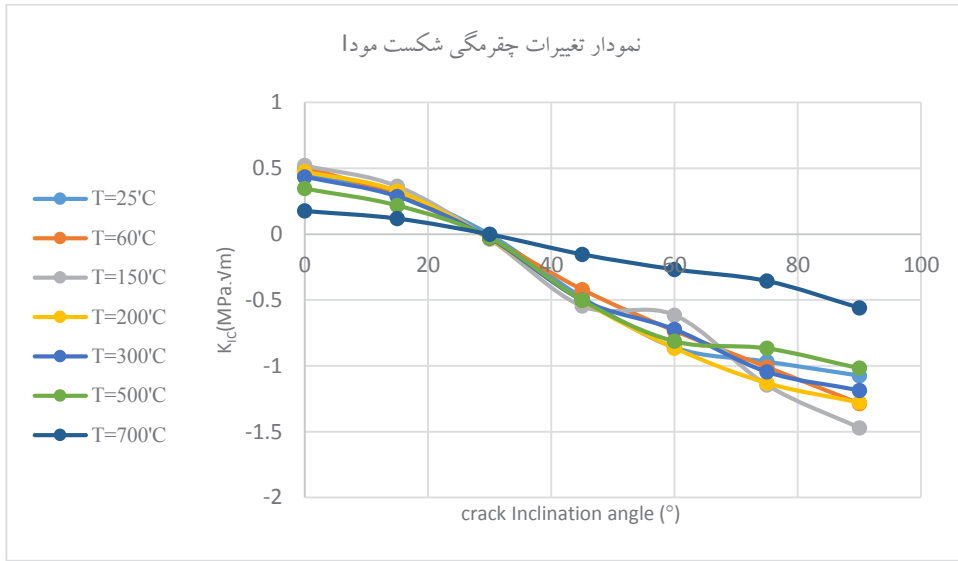
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشات در دوسری انجام شده است که به شرح زیر می‌باشد: در سری اول آزمایشات، اثر درجه حرارت در یک سیکل گرم شدن-خنک شدن در دماهای محیط، ۶۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و در زوایای انحراف ترک صفر، ۱۵، ۲۸/۸، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه بر چقرمگی شکست بررسی شده است. در تمام زوایا مشاهده شد که:

درصد نسبت به سیکل صفر افزایش یافته اما بعد از سیکل‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به دلیل انبساط و انقباض بر اثر گرم شدن - خنک شدن، ریزترک‌ها افزایش و چقرمگی شکست به ترتیب به میزان ۳، ۶، ۱۲ و ۱۹ درصد نسبت به سیکل صفرم کاهش داشته است. در اثر افزایش دانسیته میکروتراک‌ها، سرعت امواج طولی و چقرمگی شکست کاهش می‌یابد چقرمگی با سرعت امواج طولی رابطه مستقیم دارد. همچنین در تحقیق صورت گرفته توسط فتاح و هاموش بر روی بتن در سال ۱۹۹۷ [۳۰] در زمینه اثر حرارت نتایج نشان می‌دهد که چقرمگی شکست با افزایش تعداد چرخه گرمایش و سرمایش کاهش می‌یابد.

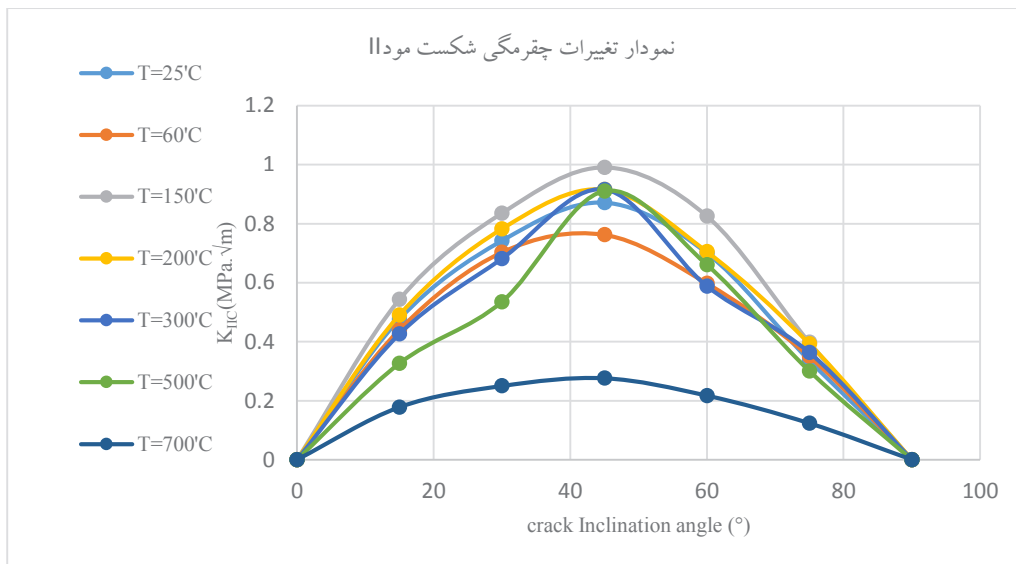
۳-۶- تاثیر زاویه انحراف ترک بر روی چقرمگی شکست

با تغییر زاویه بارگذاری نسبت به امتداد ترک تغییراتی در مقدار چقرمگی شکست در دماهای ثابت اتفاق می‌افتد. زاویه‌های قرارگیری شامل صفر، ۱۵، ۲۸/۸، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ درجه می‌باشد. در نمودارهای شکل ۱۸، ۱۹ و ۲۰ تغییرات چقرمگی شکست در زوایای متفاوت نشان داده شده است. همانطور که از نمودارهای شکل‌های مشاهده می‌گردد؛ در همه دماها نمونه‌ها رفتار مشابه از خود نشان می‌دهند به طوری که چقرمگی شکست مود I از زاویه صفر درجه تا ۲۸/۸ درجه با شیب منفی به صفر متمایل



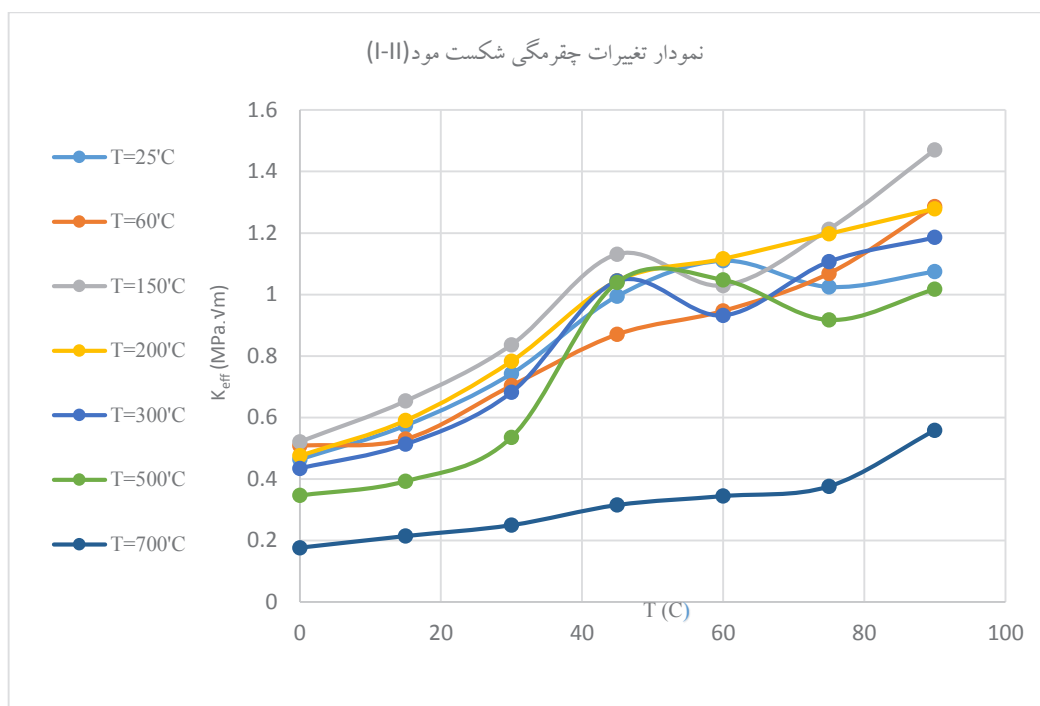
شکل ۱۸. اثر زاویه انحراف ترک بر روی چقرمگی شکست مود I

Fig. 18. The effect of crack inclination angle on the mode I fracture toughness



شکل ۱۹. اثر زاویه انحراف ترک بر روی چقرمگی شکست مود II

Fig. 19. The effect of crack inclination angle on the mode II fracture toughness



شکل ۲۰. اثر زاویه انحراف ترک بر روی مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II)

Fig. 20. The effect of crack inclination angle on the effective value of the mixed-mode I-II fracture toughness

با صفر می‌باشد و با افزایش زاویه، مقدار چقرمگی شکست مود II افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد ترک مشاهده می‌شود و با افزایش زاویه از ۴۵ درجه، میزان چقرمگی شکست کاهش می‌یابد، به طوری که مقدار چقرمگی شکست مود II در زاویه ۹۰ درجه، برابر با صفر می‌باشد.

- مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) در تمامی دماها با افزایش زاویه انحراف ترک، افزایش می‌یابد، به طوری که کمترین و بیشترین مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) به ترتیب در زاویه‌های صفر و ۹۰ درجه مشاهده می‌شود. در سری دوم آزمایشات اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن بر روی چقرمگی شکست مود I، مود II و ترکیبی (II-I) در بتن در دمای ۱۵۰ درجه و تحت زاویه انحراف ۴۵ درجه بررسی شده است، نتایج نشان می‌دهد که: در سیکل اول، مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) در بتن ۱۳ درصد نسبت به سیکل صفرم افزایش و با افزایش تعداد سیکل‌های گرم شدن - خنک شدن در سیکل‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (I-II) در بتن به

- بیشترین و کمترین میزان چقرمگی شکست مود I، مود II و مقدار موثر مود ترکیبی (I-II) به ترتیب در دمای ۱۵۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.
- در دمای ۶۰ درجه و ۱۵۰ درجه به علت بسته شدن ریز ترک‌ها و کاهش تخلخل موثر، چقرمگی شکست مود I، مود II و مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (II-I) افزایش می‌یابد، که این مقدار افزایش در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به بیشترین مقدار خود می‌رسد.
- در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت از بین رفتن آب‌های میان‌بافتی چقرمگی شکست تغییرات زیادی نداشته و با شیب کم، چقرمگی شکست مود I، مود II و مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی (II - I) کاهش می‌یابد و این کاهش چقرمگی شکست بتن به علت ایجاد ریز ترک‌ها و انبساط حرارتی می‌باشد.
- در تمامی دماها با افزایش زاویه انحراف ترک چقرمگی شکست مود I با شیب منفی رو به کاهش بوده و در زاویه ۲۸/۸ درجه به صفر متمایل شده و از زاویه ۴۵ درجه تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد با شیب منفی رو به افزایش می‌باشد.
- چقرمگی شکست مود II در زاویه صفر درجه دارای کمترین مقدار و برابر

- [8]. Chong K, Kuruppu M (1984). 'New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials'. *Int J Fract* 26, 59–62.
- [9]. Aliha, M.R.M., Mahdavi, E. and Ayatollahi, M.R., 2017. 'The influence of specimen type on tensile fracture toughness of rock materials'. *Pure and Applied Geophysics*, 174(3), 1237-1253.
- [10]. Kundu, T. (2008). 'Fundamentals of fracture mechanics'. CRC press.
- [11]. Funatsu, T., Kuruppu, M., & Matsui, K. (2014). 'Effects of temperature and confining pressure on mixed-mode (I-II) and mode II fracture toughness of Kimachi sandstone'. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (67), 1-8.
- [12]. Xiankai, B., Meng, T., & Jinchang, Z. (2018). 'Study of mixed mode fracture toughness and fracture trajectories in gypsum interlayers in corrosive environment'. *Royal Society open science*, 5(1), 171374.
- [13]. Erarslan, N. (2019). Analysing mixed mode (I-II) fracturing of concrete discs including chevron and straight-through notch cracks. *International Journal of Solids and Structures*, 167, 79-92.
- [14]. Hosseini, M. (2017). 'Effect of temperature as well as heating and cooling cycles on rock properties'. *Journal of Mining and Environment*, 8(4), 631-644.
- [15]. Ghazvinian, Abdolhadi, Hamid Reza Nejati, Vahab Sarfarazi, and Mir Raouf Hadei. 'Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials'. *Arabian Journal of Geosciences* 6, no. 11 (2013), 4435-4444.
- [16]. Al-Shayea, N. A., & Khan, K. (2001). 'Fracture Toughness Envelope of a Limestone Rock at High Confining Pressure and Temperature'. In *ICF10, Honolulu (USA)*.
- [17]. Feng, G., Wang, X., Wang, M., & Kang, Y. (2020). 'Experimental investigation of thermal cycling effect on fracture characteristics of granite in a geothermal-energy reservoir'. *Engineering Fracture Mechanics*, 235, 107180.
- [18]. National Standard Organization of Iran, (2013). ترتیب ۳، ۶/۳ و ۱۲ و ۱۹ درصد نسبت به سیکل صفر کاهش می‌یابد. • اثر زاویه بارگذاری نسبت به امتداد ترک در زوایای صفر، ۱۵، ۲۸/۸، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بر روی چقرمگی شکست بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه انحراف ترک، چقرمگی شکست مود II تا زاویه ۴۵ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد در ضمن با افزایش زاویه انحراف ترک تغییر مود شکستگی از مود I در زاویه انحراف صفر درجه به مود ترکیبی (کشش - برش) برای زاویه انحراف کمتر از ۲۸/۸ درجه اتفاق می‌افتد. برای زاویه انحراف ترک بیش از ۲۸/۸ درجه مود شکست از مود ترکیبی کشش - برش به مود ترکیبی فشار - برش تغییر می‌کند.

منابع

- [1]. Feng, G., Kang, Y., Chen, F., Liu, Y. W., & Wang, X. C. (2018). 'The influence of temperatures on mixed-mode (I+ II) and mode-II fracture toughness of sandstone'. *Engineering Fracture Mechanics*, 189, 51-63.
- [2]. Ayatollahi, M. R., & Aliha, M. R. M. (2008). 'On the use of Brazilian disc specimen for calculating mixed mode I-II fracture toughness of rock materials'. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(16), 4631-4641.
- [3]. Lim, I. L., Johnston, I. W., & Choi, S. K. (1994). 'Assessment of mixed-mode fracture toughness testing methods for rock'. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 31(3), 265-272.
- [4]. Awaji, H. and Sato, S. (1978). 'Combined Mode Fracture Toughness Measurement by the Disc Test, *J. of Engng. Materials and Tech.*, 100, 175-182.
- [5]. Sanchez, E. (1979). 'Inverses of fuzzy relations. Application to possibility distributions and medical diagnosis'. *Fuzzy sets and systems*, 2(1), 75-86.
- [6]. Khan, K. (1998). 'Fracture toughness investigation of an indigenous limestone rock formation'. (Doctoral dissertation, King Fahd University of Petroleum and Minerals).
- [7]. Atkinson, C., Smelser, R. E., & Sanchez, J. (1982). 'Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test'. *International Journal of Fracture*, 18(4), 279-291.

- microwave heated-concrete'. KONA Powder and Particle Journal, 31, 247-264.
- [25]. Sadri Mumtazi, A., Nosrati, H., Tahmoursi, m. (2013). 'Evaluation of fibrous concrete properties containing recycled aggregates using non-destructive methods', Journal of Concrete Research, 6(1) 73-76 (in persian).
- [26]. Hejazi, M. Hashemi, M. Batawani, M. (2013). 'The effect of steel fibers on mechanical properties and performance against heat and frost of self-compacting lightweight concrete', Concrete Research, 6(1) 47-63 (in persian).
- [27]. Khoury, G. (1992). 'Compressive strength of concrete at high temperatures'. a reassessment, Magazine of concrete Research 44(161), 291-300.
- [28]. Grattan-Bellew, P. E. (1996). 'Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes'. Construction and building materials, 10(1), 3-16.
- [29]. Zhou, Q., & Glasser, F. P. (2001). 'Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 C. Cement and Concrete Research', 31(9), 1333-1339.
- [30]. Abdel-Fattah, H., & Hamoush, S. A. (1997). 'Variation of the fracture toughness of concrete with temperature'. Construction and Building Materials, 11(2), 105-108.
- 'Mixing chamber, humidity chamber, humidity chamber and water baths used in the test of hydraulic cement and concrete', Standard No. 17040 (in persian)
- [19] Ulusay, R., & Hudson, J. A. (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 99-103.
- [20] Bieniawski, Z. T., & Bernede, M. J. (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, Int J Rock Mech Min Sci, 16, 138-140.
- [21] Vogler, U., Kovari, K. (1978). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 47-51.
- [22] Franklin, J. A. (1979). Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties, Int J Rock Mech Min Sci, 16, 141-156.
- [23] Rummel, F., Van Heerden, W. (1978). Suggested methods for determining sound velocity, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 53-58.
- [24]. Lippiatt, N. R., & Bourgeois, F. S. (2014). 'Recycling-oriented investigation of local porosity changes in

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

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 J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 141-164.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18363.6850



