

## مطالعه تجربی تاثیر دما بر چقرمگی شکست کششی ملات‌های سیمان حاوی میکروسیلیس

حامد ملادودی<sup>۱\*</sup>؛ علیرضا دولتشاهی<sup>۲</sup>؛ مهدی آرش<sup>۲</sup>؛ محمدمهدی مشایخی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشیار مکانیک سنگ و عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- ۲- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- ۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

(\*نویسنده مسئول: [davoodi@aut.ac.ir](mailto:davoodi@aut.ac.ir))

### چکیده

با توجه به اهمیت سازه‌های پایه سیمانی نظیر بتن و ملات سیمان در مهندسی عمران و معدن، همواره توجه ویژه‌ای به مکانیک شکست این مصالح تحت شرایط محیطی مختلف می‌شود. یکی از مهمترین پارامترهای مکانیک شکستی، مقاومت در برابر رشد ترک است. مصالح شبه‌شکننده نظیر سنگ و مصالح پایه‌سیمانی در کشش ضعیف عمل می‌کنند و ارزیابی عوامل مختلف بر روی ضریب شدت تنش بحرانی حالت کششی این مصالح همواره به محققین و مهندسين این اجازه را می‌دهد تا طراحی‌ها و پروژه‌های موفق‌تری داشته‌باشند. در این مطالعه به بررسی اثر دماهای مختلف از قبیل ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی چقرمگی شکست ۳ نوع ملات سیمان تقویت شده با پوزولان میکروسیلیس با درصد جایگزینی صفر، ۵ و ۱۰٪ وزن سیمان مصرفی در ملات سیمان پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش دما، چقرمگی شکست کششی کاهش می‌یابد. همچنین، جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت در برابر رشد ترک کششی ملات سیمانی شده که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۵/۷٪ و ۹٪ افزایش یافته است.

### واژگان کلیدی

چقرمگی شکست، مصالح شبه‌شکننده، دما، مقاومت کششی، CSTBD.

### ۱- مقدمه

فاصله گرفته و جدا می‌شوند.

- حالت برشی یا لغزشی (mode II) که در آن جابجایی سطوح ترک در صفحه ترک ولی عمود بر جبهه ترک رخ می‌دهد.
- حالت پاره‌شدگی (mode III) که در آن جابجایی وجوه ترک موازی با جبهه ترک می‌باشد.
- اغلب در طبیعت نوع بارگذاری به صورت حالت ترکیبی است. ترکیب حالات بارگذاری به صورت حالت کششی+برشی، برشی+فشاری، کششی+پاره‌شدگی یا ترکیبی

یک سازه سنگی و شبه‌سنگی ممکن است در شرایط بارگذاری متفاوت قرار بگیرد. پاسخ سازه به انواع بارگذاری اعمالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بر اساس آن و شرایط دیگر، مهندسين طرح‌ریزی‌های هوشمندانه‌ای برای یک پروژه انجام خواهند داد. انواع حالات شکست و گسترش ترک روی مصالح بر اساس نوع بارگذاری آن عبارت است از [۱]:

- حالت کششی یا بازشدگی (mode I) که در این حالت، سطوح ترک در جهت عمود بر سطح ترک از یکدیگر

دماهای بیش از ۴۰۰ درجه سانتیگراد مدول یانگ ماسه سنگ با شدت بیشتری کاهش می‌یابد.

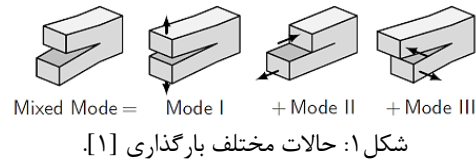
در یک مطالعه دیگر، دویدی و همکاران [۷]، به بررسی اثر دماهای زیر صفر درجه سانتیگراد بر روی چقرمگی شکست کششی ۷ نوع سنگ مختلف از قبیل دولومیت، بازالت، ماسه‌سنگ، دو نوع شیست، آهک و دولومیت پرداختند. آنان با تهیه نمونه دیسک برزلی حاوی ترک فاقدار در مرکز آن تحت بارگذاری فشاری نمونه چقرمگی این سنگ‌ها را بعد از قرارگیری در دماهای ۳۰، ۱۰-، ۲۰-، ۳۰-، ۴۰- و ۵۰- ارزیابی کردند و نشان دادند با کاهش دما مقاومت در برابر رشد ترک‌های کششی سنگ افزوده اما مقاومت فشاری آنان کاهش می‌یابد.

هو و همکاران [۸]، در یک مطالعه تجربی به بررسی اثر دماهای بالا بر چقرمگی شکست کششی سنگ گرانیت پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود نشان دادند با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتیگراد تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد چقرمگی شکست حالت بازشدگی سنگ افزایش یافته و بعد از دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با افزایش دما چقرمگی شکست روند کاهش از خود نشان داده است.

ماهاننا و همکاران [۹]، با بررسی آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دیسک برزلی حاوی ترک در مرکز آنان (CSTBD)، از جنس سنگ‌های دولومیت و دو نوع ماسه‌سنگ مختلف از کشور هندوستان نشان دادند با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد، چقرمگی مود یک سنگ‌ها افزایش و پس از این دما تا دما ۶۰۰ درجه سانتیگراد چقرمگی شکست بازشدگی سنگ‌ها افت می‌کند. علت افت ناگهانی در دمای بیش از ۱۰۰ درجه سانتیگراد در مطالعه آنان، رشد ریزترک‌های ناشی از حرارت و تغییرات دمایی پس از سرد شدن بوده است که برای ارزیابی آن از تصویربرداری الکترونی روبشی (SEM) استفاده کرده‌اند.

زوو و همکاران [۱۰]، با مطالعه بر روی چقرمگی شکست مود اول سیلتستون نشان دادند با افزایش دما از ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد چقرمگی مود اول سیلتستون کاهش یافته و با افزایش دما از ۱۰۰ تا ۱۲۵ درجه سانتیگراد روند تغییرات چقرمگی بطور چشمگیری افزایشی است. با افزایش دما از ۱۲۵ درجه سانتیگراد تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد روند تغییرات چقرمگی کاهش یافته است.

از هر سه حالت کشش+برش+پاره‌شدگی است (شکل ۱).



در علم مکانیک شکست، برای هر هندسه و شرایط بارگذاری جسم، ضریب شدت تنش در نوک ترک تعریف می‌شود. ضرایب شدت تنش در نوک ترک اولین بار توسط اروین مطرح شد و این ضرایب در مسائل مکانیک شکست مصالح ترد و شبه‌شکننده بسیار اهمیت دارد که توجه به آن‌ها پایه و اساس مکانیک شکست الاستیک خطی و غیرخطی است. از این‌روی، ضرایب شدت تنش برای سه حالت کششی، برشی و پاره‌شدگی بصورت  $(K_I, K_{II}, K_{III})$  تعریف شده است. مقدار بحرانی این ضرایب را بطور معمول بعنوان چقرمگی شکست یا مقاومت در برابر رشد ترک می‌نامند [۴-۲].

عوامل متعددی بر روی ضرایب شدت تنش بحرانی اثرگذار است که برخی از این عوامل عبارت‌اند از: اثراندازه نمونه، دما محیط، هوازدگی فیزیکی و شیمیایی، نرخ بارگذاری، اثر اندازه ذرات، درصد کوارتز معادل و غیره. دما بعنوان یکی از عوامل محیطی غیراجتناب‌پذیر می‌تواند بر روی مقاومت در برابر رشد ترک مواد شبه‌شکننده مورد استفاده در صنعت معدن و عمران اثر بگذارد. تغییرات چرخه‌ای دما هنگام شب و روز، آتش‌سوزی و سیکل‌های حرارتی متفاوت در برخی از پروژه‌ها سبب می‌شود سنگ و مصالح شبه‌سنگی که بطور ذاتی یا مصنوعی دارای ریزترک، ترک و ناپیوستگی هستند مقاومت در برابر رشد ترک و استحکام متفاوت و کمتری نسبت به حالت تئوریک، از خود نشان دهند [۵].

مطالعات فراوانی بر روی اثر دما بر روی چقرمگی شکست حالات مختلف و استحکام مصالح صورت گرفته است. بعنوان نمونه، فنگ و همکاران [۶]، در یک مطالعه تجربی با بررسی اثر دماهای مختلف، ۲۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد بر روی چقرمگی شکست کششی نمونه نیم‌برزلی تحت خمش سه نقطه‌ای (SCB) ماسه‌سنگ نشان داد با افزایش دما چقرمگی شکست ماسه سنگ کاهش می‌یابد. همچنین آنان نشان دادند با افزایش دما مدول یانگ و مقاومت فشاری ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد و در

ملاحظه است. در پروژه‌های معدنی و عمرانی اعم از سازه‌های سنگی (طبیعی یا ساخته دست بشر) ممکن است اثر حرارت به شیوه‌های مختلف خود را نشان دهد. از سوی دیگر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی اثر دما بر روی چقرمگی شکست سنگ حاکی بر آن است که همواره افزایش دما موجب کاهش چقرمگی شکست، نمی‌شود. مصالح سنگی و شبه‌سنگی بدلیل دارا بودن ترکیبات کانی‌شناسی و ریزساختاری مختلف پاسخ‌های متفاوتی به تغییرات دما می‌دهند. از این‌روی، در این مطالعه به بررسی اثر دماهای مختلف بر روی ۶ نوع ملات سیمان مختلف پرداخته شده است. هدف این مطالعه، بررسی نقش دو عامل درصد مواد افزودنی میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط ملات سیمان در معرض دماهای گوناگون است. شناخت بهتر این موضوع کمک فراوانی به جامعه مهندسی برای ایجاد سازه‌های عمرانی سطحی و زیرزمینی مقاوم در برابر حرارت، می‌کند و نتایج آن می‌تواند راهنمایی برای برخی از تصمیم‌های مهندسی در پروژه‌های مختلف آن‌ها باشد. این مطالعه با هدف بررسی اثر عوامل دخیل در طرح اختلاط ملات سیمان نظیر نسبت‌های مختلف آب به سیمان، استفاده از پوزولان بهبود دهنده خواص مکانیکی و مقاومتی نظیر میکروسیلیس بر روی پاسخ چقرمگی شکست کششی آنان در دماهای مختلف انجام شده است.

## ۲- روش تحقیق

در این مطالعه، اثر چهار دمای مختلف شامل ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی چقرمگی شکست کششی شش نوع ملات سیمان مختلف بررسی شده است. تأثیر دما بر روی نمونه ملات‌های سیمان به صورت یک چرخه حرارتی (۲۴ ساعت حرارت در دمای معین و ۲۴ ساعت قرارگیری در دمای محیط) اعمال شده است. دماها در این مطالعه به گونه‌ای انتخاب شده است تا شامل دماهای کمتر و بیشتر از دمای اتاق شود و بتوان نتایج را با دمای معمول اتاق مقایسه کرد. هنگام قرارگیری نمونه‌ها در محیط با دماهای ۱۰-، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، وجود رطوبت طبیعی اولیه نمونه عاملی محسوب می‌شود که می‌تواند بر نتایج اثرگذار باشد. بعنوان مثال داشتن رطوبت اولیه متفاوت در هر نمونه سبب می‌شود در هنگام قرارگیری نمونه در دمای ۵۰ و ۱۰۰ درجه

تالوکدار و همکاران [۱۱]، در یک مطالعه تجربی به بررسی اثر حرارت از ۲۵ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی خواص مکانیکی و چقرمگی شکست مود اول سنگ کریستالی بازالت و تورمالین پرداختند. ایشان نشان دادند حرارت بر روی چقرمگی شکست سنگ‌ها اثر منفی می‌گذارد. با این حال، از دمای ۲۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت اعمالی بر روی سنگ سبب افزایش استحکام بازالت و چقرمگی شکست کششی آن می‌شود و علت این امر فعالیت‌های رخ داده تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در بافت بازالت است. پس از دمای ۲۰۰ درجه با افزایش دما خواص مکانیکی و شکست بازالت با شدت زیادی روند نزولی خواهد داشت.

قنبری و همکاران [۱۲]، در یک مطالعه تجربی به بررسی اثر دما و فشار محصورکننده بر روی چقرمگی حالت‌های برشی و کششی خالص ملات سیمان پرداختند. نتایج مطالعات آنان نشان داد با افزایش دما چقرمگی شکست کششی و برشی ملات سیمان کاهش می‌یابد و با افزایش فشار محصورکننده ضرایب شدت تنش برشی و کششی ملات سیمان افزایش می‌یابد.

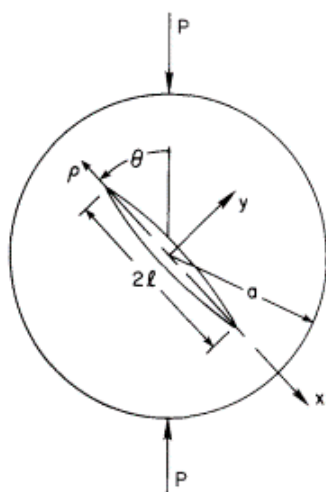
فوناتسو و همکاران [۱۳] با بررسی تغییرات دما بر روی چقرمگی شکست حالت کششی خالص سنگ‌هایی از قبیل توف، آهک و ماسه نشان داد که با افزایش دما از دمای اتاق تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد چقرمگی شکست کششی توف و آهک کاهش می‌یابد. این درحالی است که تغییرات چندانی در چقرمگی شکست کششی ماسه سنگ دیده نمی‌شود.

میتر [۱۴]، نشان داد با اعمال حرارت از ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست کششی گرانیب کاهش می‌یابد.

مطالعات مختلف دیگری مبنی بر اثر دما به صورت چرخه‌ای بر روی چقرمگی شکست حالات مختلف مصالح شبه‌شکننده صورت گرفته است که بطور غالب نتایج حاکی از آن است با افزایش تعداد چرخه ذوب-یخبندان بدلیل تغییرات حرارتی ریزترک‌هایی ناشی از این پدیده رخ داده و سبب کاهش چقرمگی شکست مصالح شبه‌شکننده و ترد نظیر سنگ و مصالح پایه سیمانی از قبیل ملات سیمان و انواع بتن می‌شود [۱۵-۱۸].

اثر چرخه‌های حرارتی با دماهای متوسط به بالا در طبیعت یا هنگام رخدادهایی نظیر انفجار و آتش‌سوزی قابل

باشد [۱۹].



شکل ۲: هندسه نمونه دیسک برزیلی حاوی ترک تحت بارگذاری ترکیبی [۱۹].

در این مطالعه، برای بررسی چقرمگی شکست ملات سیمان از روش نمونه برزیلی حاوی ترک مستقیم در مرکز آن (CSTBD) استفاده شده است. علت انتخاب این روش، سهولت در ساخت نمونه مصنوعی نسبت به سایر روش‌ها است. محاسبه ضریب شدت تنش حالت شکست کششی ( $K_I$ ) در نمونه‌های دیسک برزیلی حاوی ترک مستقیم بر اساس معادله ۱ به صورت زیر، انجام شده است [۱۹].

$$K_I = \frac{P_{max} \sqrt{a}}{\sqrt{\pi R} \cdot t} N_I \quad (1)$$

که در رابطه فوق؛  $a$  بیانگر نصف طول ترک،  $R$  شعاع نمونه،  $t$  ضخامت نمونه،  $P_{max}$  بار در لحظه شکست نمونه ترک‌دار و  $N_I$  ضریب بی‌بعد شده‌ای است که تابع نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه ( $a/R$ ) است.

آتکینسون و همکاران با بررسی عددی، تحلیلی بر روی نمونه‌های CSTBD ضریب بی‌بعد  $N_I$  را برای نمونه‌هایی با نسبت  $\frac{a}{R}$  کمتر و مساوی با  $0/3$  به صورت معادله ۲ ارائه دادند:

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

ضریب بی‌بعد ( $N_I$ ) برابر با یک است و چقرمگی شکست کششی به صورت معادله ۳ قابل محاسبه است [۱۴].

سانتیگراد بخشی از انرژی گرمایی صرف از بین بردن رطوبت اولیه نمونه شود. به علاوه، رطوبت اولیه نمونه می‌تواند هنگامی که در محیط  $10^\circ$ -درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد آب محتوا موجود در حفریات ریزساختار در آن دما متبلور شود و افزایش حجم بلور آب سبب ایجاد خطا در انجام این پژوهش شود. از این روی، ابتدا تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $10.5^\circ$  درجه سانتیگراد در گرمخانه نگهداری شدند تا وزن آن‌ها ثابت و سپس وارد مرحله قرارگیری در دماهای مورد نظر این پژوهش شدند. در ادامه نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و تشریح مصالح مورد استفاده شده به همراه روش آزمایشگاهی مورد استفاده برای محاسبه چقرمگی کششی ملات‌های سیمان ارائه شده است.

### ۲-۱- روش محاسبه چقرمگی کششی

روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مصالح سنگی مطرح شده است. در این پژوهش تجربی، از نمونه دیسک برزیلی حاوی ترک مرکزی مستقیم یا به اختصار (CSTBD) استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها دارای شعاع  $50$  میلی‌متر، نسبت ضخامت به قطر آن‌ها  $0/5$  و نسبت طول ترک به قطر نمونه برای تمامی نمونه‌ها  $0/3$  فرض شده است.

شکل ۲ شماتیک کلی نمونه CSTBD را نشان داده است. روش CSTBD قادر است چقرمگی حالت‌های کششی و برشی خالص و حالت ترکیبی کششی+برشی مصالح شبه‌شکننده را تعیین نماید. فرض کنید، در روش مبتنی بر بارگذاری فشاری CSTBD راستای طول ترک با راستای محور بارگذاری بر روی نمونه زاویه‌ای به نام  $\theta$  بسازد. اگر این زاویه برابر با صفر درجه باشد نمونه تحت بارگذاری در مود کششی خالص قرار می‌گیرد. علاوه بر شرایط بارگذاری حالت کششی، بر اساس نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه، یک زاویه  $\theta$  خاص وجود دارد قادر به ارضا کردن شرایط بارگذاری برشی است. همچنین برای اقلان شرایط بارگذاری ترکیبی I+II کافی است که این زاویه غیر از صفر و زاویه مختص به حالت برشی خالص

در رابطه فوق  $\theta$  بیانگر زاویه ترک با زاویه بارگذاری است. در حالت شکست کششی (هنگامی که  $\theta$  برابر با صفر درجه است)

آب به سیمان‌های بیشتر که سبب می‌شود مصالح روانتر و نیازمند کوبش کمتر شود، استفاده شده است.

برای هر نسبت آب به سیمان مختلف سه طرح ملات سیمان حاوی میکروسیلیس با درصد جایگزینی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ وزن سیمان مصرفی استفاده شده است. جزئیات کامل طرح اختلاطها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: طرح اختلاط ملات‌های سیمان.

عیار سیمان	W/C	S/C	micro-silica (%)
۳۵۰ (kg/m <sup>3</sup> )	۰/۵	۱	۰٪
	۰/۵		۵٪
	۰/۵		۱۰٪
	۰/۴		۰٪
	۰/۴		۵٪
	۰/۴		۱۰٪

در جدول فوق:

نسبت ماسه به سیمان: S/C

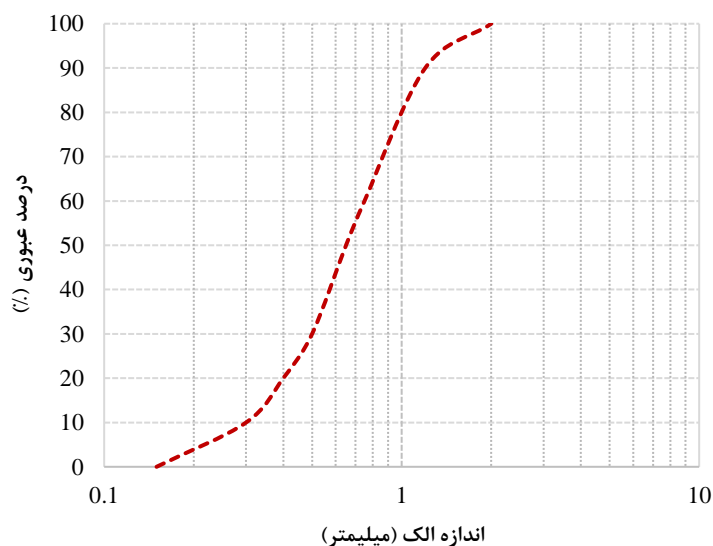
نسبت آب به سیمان: W/C

منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در شکل ۳ نمایش داده شده است. ماسه مصرفی دارای ضریب انحنای (C<sub>c</sub>) و ضریب یکنواختی (C<sub>u</sub>) به ترتیب برابر با ۱/۱۷ و ۲/۳۶ می‌باشد. ضریب نرمی ماسه مصرفی ۲/۶ می‌باشد.

$$K_{Ic} = \frac{P_{max}\sqrt{a}}{\sqrt{\pi R} \cdot t} \quad (3)$$

## ۲-۲- مصالح مصرفی

در این مطالعه ۶ نوع ملات سیمان مختلف تهیه شده است. اجزا پایه‌ای تشکیل‌دهنده ملات سیمان (سیمان+آب+ماسه) برای تمامی مصالح یکسان است. تنها تفاوت نمونه‌ها در نسبت آب به سیمان و درصد جایگزینی میکروسیلیس بعنوان بخشی از سیمان مصرفی ملات سیمان است. مصالح و ساخت نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C305 انجام شده است [۲۰]. آب مورد استفاده برای تهیه ملات سیمان آب شهری با اسیدیته نرمال تقریباً برابر با ۷ است. سیمان مصرفی نیز از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ بوده است. بدلیل عدم حضور درشت‌دانه در طرح اختلاط ملات سیمان (عدم وجود شن) از روان‌کننده یا فوق روان‌کننده در ملات سیمان استفاده نشده است. در این مطالعه دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴ مورد بررسی شده است. علت انتخاب عامل نسبت آب به سیمان اثرگذاری زیاد و رایج بودن آن در بسیاری از طرح‌های اختلاط مرسوم و پرکاربرد عمرانی است. همچنین با افزایش نسبت آب به سیمان، مقادیر خصوصیات مقاومتی و مکانیکی ملات سیمان افت می‌کند. از این رو برای مقایسه نتایج حاصل از مطالعه، اثر عامل نسبت آب به سیمان بررسی شد. همچنین برای آن‌که آماده‌سازی نمونه راحت‌تر باشد و هنگام کوبش، تیغه پدیدآورنده ترک در مرکز قالب‌ها تکان نخورد از نسبت



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی.

از مدت زمان مشخص ۲۴ ساعت نمونه‌های ملات‌های سیمان از گرمخانه یا سردخانه خارج می‌شوند. یکی از عوامل اثرگذار بر روی نتایج مطالعه، رطوبت محیط آزمایشگاه است. پس از خروج نمونه‌ها از گرمخانه ممکن است نمونه‌ها حین رسیدن به دمای محیط (سرد شدن)، رطوبت اطراف خود را جذب کنند. به منظور حذف عامل رطوبت محیط آزمایشگاهی، نمونه‌ها پس از خروج از گرمخانه برای رسیدن به دمای محیط (سرد شدن) درون دسیکاتور حاوی ماده جاذب رطوبت قرار گرفتند تا رطوبت محیط کمترین اثر را داشته باشد. در شرایطی که ترک مرکزی نمونه‌های ملات سیمان به شکل دیسک برزیلی (CSTBD) منطبق بر بارگذاری محوری باشد، بارگذاری با نرخ ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه اعمال می‌شود. تصویری از نمونه ملات سیمان حاوی ترک مرکزی قبل و بعد از شکست در شکل ۴ نشان داده شده است.



نمونه دیسک برزیلی حاوی ترک مرکزی ملات سیمان قبل . بعد از شکست

شکل ۴: نمونه دیسک برزیلی حاوی ترک مستقیم در مرکز قبل و بعد از شکست.

### ۳- نتایج و بحث

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، چرخه حرارتی مشابه با آنچه پیش‌تر در روش تحقیق بیان شد اعمال شد. بعد از آن با دستگاه بارگذاری تک‌محوری با نرخ بارگذاری استاتیکی و یکسان، تمامی نمونه‌ها آزمایش شدند. خلاصه نتایج حاصل از بخش تجربی در جدول ۳ گزارش شده است. میانگین چقرمگی شکست کششی با انجام سه تکرار برای هر نوع ملات سیمان در هر دما متفاوت و همچنین انحراف معیار داده‌ها در جدول ۳ گزارش شده است.

نتایج مطالعه تجربی اثر دماهای ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد بر چقرمگی شکست کششی سه نوع ملات سیمان

همچنین آنالیز اکسیدی - اشعه ایکس فلورسانس (XRF) ماسه مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. ماسه مصرفی دارای نسبت سیلیس فعال بالاست.

جدول ۲: آنالیز XRF ماسه مصرفی.

ترکیب	میزان %	ترکیب	میزان %
SiO <sub>2</sub>	۷۱/۲۰	MnO	۰/۱۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷/۵۲	MgO	۰/۲۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۴/۱۳	K <sub>2</sub> O	۰/۰۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۵۱	L.O.I	۴/۹۰

### ۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

#### ۲-۴

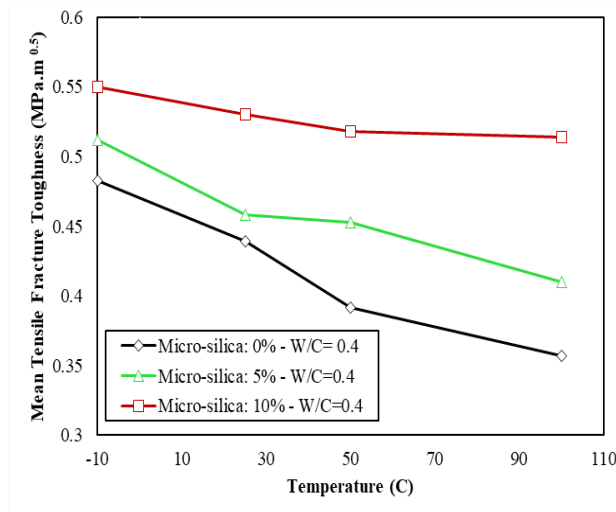
برای آماده‌سازی نمونه‌ها متناسب با هر طرح اختلاط برای هر دما ۳ نمونه دیسک برزیلی حاوی ترک مستقیم در مرکز آن ساخته شده است. در مجموع تعداد کل آزمون‌های این مطالعه آزمایشگاهی ۷۲ عدد بوده است. برای ساخت نمونه شاهد بدون میکروسیلیس آب با سایر ترکیبات (ماسه+سیمان) ترکیب شده است. مواد در نمونه‌هایی که در مرکز آن‌ها تیغه به ضخامت ۱ میلی‌متر قرار گرفته است پس از ترکیب به صورت همگن ریخته شده و کوبیده می‌شود. در هر مرحله، میزان کوبش و ریختن ملات در قالب برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

در ساخت نمونه‌های میکروسیلیس‌دار، ابتدا آب با میکروسیلیس ترکیب شده و به صورت دوغاب به سایر ترکیبات ملات سیمان (ماسه+سیمان) افزوده شده است. بعد از گذشت ۲۴ ساعت از قرارگیری ملات درون قالب‌ها، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج و پس از آن وارد حوضچه آب آهک شده و به مدت ۲۸ روز در حوضچه عمل‌آوری قرار گرفته‌اند. بدلیل آن‌که با افزایش سن مصالح پایه سیمانی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی مصالح بعلت انجام کامل هیدراسیون سیمان، بهبود می‌یابد، سن تمامی آزمون‌ها یکسان فرض شده است تا از اثر نامطلوب تفاوت سنی نمونه‌ها بر روی نتایج مقاومت مصالح حین آزمایش صرف نظر شود. همچنین لازم به ذکر است که، نحوه عمل‌آوری نمونه‌ها متناسب با استانداردهای پیشنهادی سازمان ملی استاندارد صورت پذیرفته است [۲۱-۲۳].

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تک چرخه حرارتی (دمای ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد) بر نمونه‌ها اعمال شده و بعد

ملات سیمان در شکل ۵ نشان داده شده است.

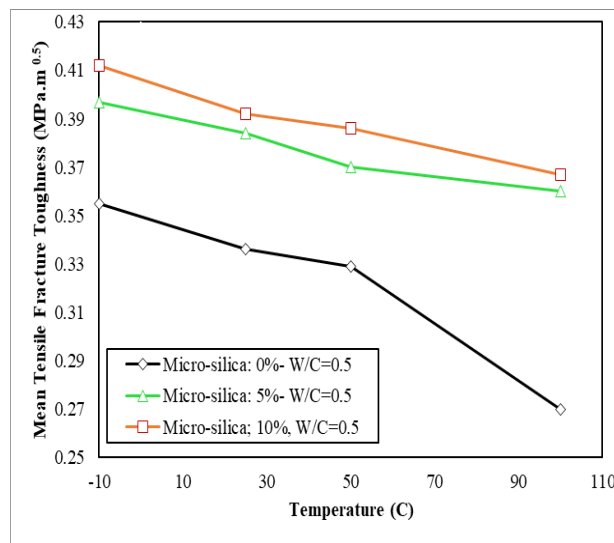
با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ با درصد میکروسیلیس‌های معادل با صفر، ۵٪ و ۱۰٪ جایگزینی سیمان تشکیل‌دهنده



شکل ۵: اثر دماهای مختلف بر میانگین مقاومت در برابر رشد ترک کششی ملات‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴.

شکست ملات سیمان ۴/۷٪ کاهش یافته است. در چنین تغییرات دمایی میزان اختلاط و کاهش چقرمگی در ملات‌های سیمان حاوی ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس به نسبت ملات سیمان شاهد (بدون میکروسیلیس) کمتر بوده و میزان حساسیت چقرمگی شکست به دما کمتر دیده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مواد پوزولانی و افزودنی میکروسیلیس سبب تأخیر ترک‌های ریزساختاری ناشی از حرارت و سبب تقویت استحکام کششی ملات سیمان می‌شود. تغییرات چقرمگی شکست مود اول نسبت به دماهای مختلف برای سه نوع ملات سیمان حاوی صفر، ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس بعنوان مواد افزودنی جایگزین بخشی از سیمان پرتلند با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ در شکل ۶ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۵ و جدول ۳ مشخص می‌شود ملات سیمان شاهد (بدون ماده افزودنی میکروسیلیس) با درصد آب به سیمان ۴۰٪ نسبت به دو نوع ملات سیمان دیگر ضعیف‌تر عمل کرده و با افزایش دما چقرمگی شکست کششی کاهش بیشتری می‌یابد. در نمونه ملات سیمان معمولی بدون میکروسیلیس با کاهش دما از دمای محیط معمولی (۲۵ درجه سانتیگراد) به دمای ۱۰- درجه سانتیگراد چقرمگی شکست کششی (مود اول) به میزان ۴/۴٪ افزایش یافته است. با جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس بجای سیمان پرتلند تشکیل‌دهنده ملات سیمان در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، چقرمگی شکست مود اول بترتیب ۱/۹٪ و ۹/۱٪ نسبت به چقرمگی مود اول ملات سیمان شاهد افزایش یافته است. در ملات سیمان شاهد با تغییرات دمایی ۲۵ درجه سانتیگراد از دمای محیط به دمای ۵۰ درجه سانتیگراد چقرمگی



شکل ۶: اثر دماهای مختلف بر میانگین مقاومت در برابر رشد ترک کششی ملات‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۵.

سانتیگراد) در ملات سیمان حاوی میکروسیلیس ۵٪ و ۱۰٪ با نسبت آب به سیمان ۰/۵ مشخص می‌شود. با استناد به جدول ۳، شکل‌های ۴ و ۵ مشخص می‌شود در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد میانگین چقرمگی شکست مود یک هر شش نوع ملات سیمان مورد استفاده شده در این پژوهش بیشترین افت را داشته است. در این دما (۱۰۰ درجه سانتیگراد) در طرح اختلاط‌های ملات سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴ استفاده ۵٪ میکروسیلیس جایگزین بخشی از سیمان پرتلند سبب شده است میانگین چقرمگی مود اول ملات‌ها بترتیب ۹٪ و ۳/۵٪ نسبت به ملات شاهد بهبود یابد.

در صورتی که نسبت جایگزینی میکروسیلیس ۱۰٪ وزنی سیمان پرتلند استفاده شده در ملات سیمان باشد، در صورتی که نسبت آب به سیمان بترتیب ۰/۵ و ۰/۴ باشد در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد میانگین چقرمگی مود اول ملات‌های سیمان بترتیب ۹٪ و ۱۵/۷٪ نسبت به ملات شاهد بهبود می‌یابد.

علاوه بر بررسی چقرمگی شکست کششی به کمک نمونه‌های CSTBD، مقاومت کششی برزلی (BTS) هر شش نوع ملات سیمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقاومت کششی برزلی هر شش نوع ملات‌های سیمان مورد بررسی در این پژوهش در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

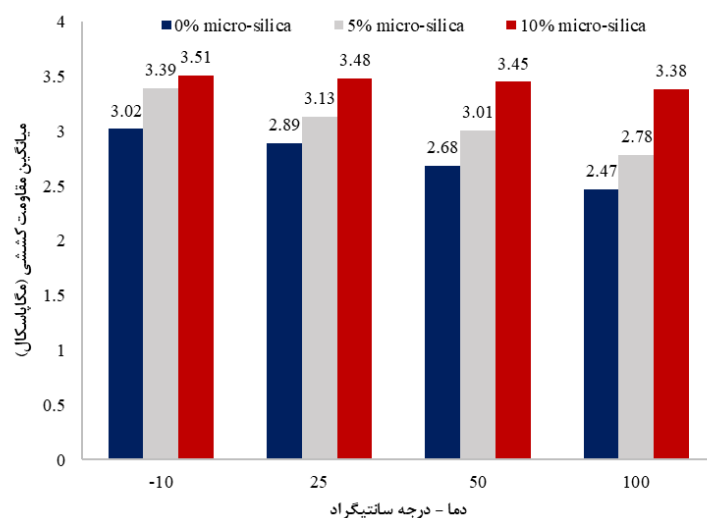
با توجه به شکل ۶ و جدول ۳ مشخص می‌شود با افزایش ۲۵٪ نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۵، میزان چقرمگی شکست ملات‌های سیمان شاهد و حاوی میکروسیلیس کاهش یافته است. بطوریکه در دما معمولی (دمای ۲۵ درجه سانتیگراد) با افزایش ۲۵٪ نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۵، میانگین چقرمگی شکست کششی نمونه‌های ملات سیمان شاهد (بدون میکروسیلیس) ۱۰/۳٪ کاهش یافته است. تغییر نسبت آب به سیمان ۰/۴ به ۰/۵ سبب شده است در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد میانگین چقرمگی مود یک ملات سیمان حاوی ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس در طرح اختلاط خود بترتیب ۷/۴٪ و ۱۳/۸٪ کاهش یابد.

میکروسیلیس موجود در ملات سیمان به دلیل ریزدانه بودن و داشتن سطح تماس بالا قادر به استفاده آب مازاد در طرح اختلاط ملات سیمان است. این ماده افزودنی قادر است بخش اعظم آبی را که در هیدراسیون سیمان بکارگرفته نمی‌شود مصرف کند از این روی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی بتن و مصالح پایه سیمانی را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، میکروسیلیس بعلت داشتن درصد بالای سیلیس فعال در واکنش شیمیایی عامل تضعیف در بتن و ملات سیمان (هیدروکسید کلسیم) را به فرآورده‌ای مستحکم‌تر (سیلیکات کلسیم) مبدل می‌سازد [۲۴].

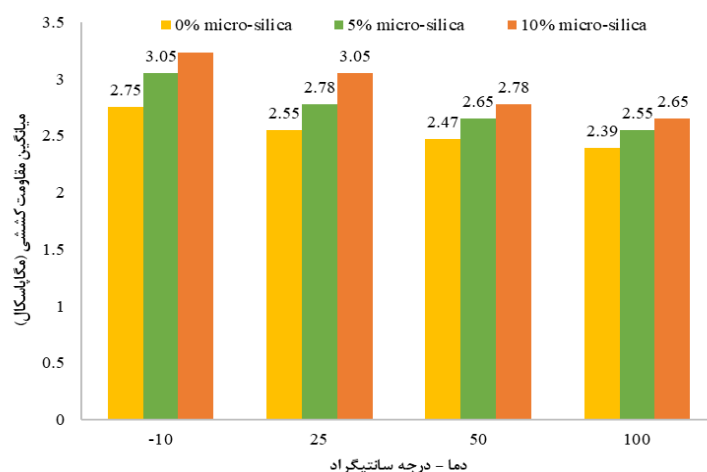
با توجه به آنچه که ذکر شد علت تغییرات ناچیز در کاهش چقرمگی شکست کششی در دماهای بالا (۵۰ و ۱۰۰ درجه

جدول ۳: نتایج مطالعه آزمایشگاهی اثر دما بر میانگین چقرمگی شکست کششی ملات‌های سیمان.

W/C	درصد میکروسیلیس	حرارت (درجه)	چقرمگی شکست کششی	انحراف معیار
			MPa. $\sqrt{m}$	
۰/۴	شاهد (صفر)	-۱۰	۰/۴۸۳	۰/۰۱۸
		۲۵	۰/۴۳۹	۰/۰۲۴
		۵۰	۰/۳۹۲	۰/۰۱۲
		۱۰۰	۰/۳۵۷	۰/۰۱۹
	%۵	-۱۰	۰/۵۱۲	۰/۰۱۳
		۲۵	۰/۴۵۸	۰/۰۴۶
		۵۰	۰/۴۵۳	۰/۰۳۰
		۱۰۰	۰/۴۱۰	۰/۰۱۹
	%۱۰	-۱۰	۰/۵۵۰	۰/۰۳۷
		۲۵	۰/۵۳۰	۰/۰۲۹
		۵۰	۰/۵۱۸	۰/۰۱۵
		۱۰۰	۰/۵۱۴	۰/۰۲۲
۰/۵	شاهد (صفر)	-۱۰	۰/۳۵۵	۰/۰۰۹
		۲۵	۰/۳۳۶	۰/۰۱۷
		۵۰	۰/۳۲۹	۰/۰۳۳
		۱۰۰	۰/۲۷۰	۰/۰۴۳
	%۵	-۱۰	۰/۳۹۷	۰/۰۲۲
		۲۵	۰/۳۸۴	۰/۰۳۱
		۵۰	۰/۳۷۰	۰/۰۲۲
		۱۰۰	۰/۳۶۰	۰/۰۱۱
	%۱۰	-۱۰	۰/۴۱۲	۰/۰۲۷
		۲۵	۰/۳۹۲	۰/۰۱۲
		۵۰	۰/۳۸۶	۰/۰۱۵
		۱۰۰	۰/۳۶۷	۰/۰۱۹



شکل ۷: مقاومت کششی برزلی ملات‌های سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۴.



شکل ۸: مقاومت کششی برزلی ملات‌های سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۵.

در مرکز شش نوع ملات سیمان که عبارت اند از؛ ملات‌های سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۵ با سه حالت صفر، ۵ و ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس بجای بخشی از سیمان مصرفی در تهیه ملات سیمان و ملات‌های سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۴ با سه حالت صفر، ۵ و ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس بجای بخشی از سیمان مصرفی در تهیه ملات سیمان ساخته شده است. سپس نمونه‌ها به مدت زمان ۲۴ ساعت در دماهای مورد نظر قرار گرفتند. پس از آن ۲۴ ساعت در دمای معمول اتاق قرار گرفتند تا به دمای اولیه بازگردند سپس مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بررسی ادبیات فنی موضوع

با افزایش نسبت آب به سیمان و دما مقاومت کششی برزلی ملات سیمان کاهش می‌یابد و با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس بجای بخشی از سیمان پرتلند ملات سیمان مقاومت کششی برزلی ملات‌های سیمان افزایش می‌یابد.

### ۳- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی اثر دما بر روی چقرمگی شکست کششی ملات‌های سیمان از روش CSTBD استفاده کرده است و دماهای ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ را بررسی نموده است. در این پژوهش نمونه‌های دیسک برزلی حاوی ترک مستقیم

- نشان داد، رفتار مصالح شبه‌شکننده نظیر سنگ و مصالح پایه سیمانی همواره متفاوت است و نمی‌توان تنها با استناد به یک اصل کلی آن را به تمامی مصالح تعمیم داد. از این روی، این آزمایش صورت گرفت و نتایج آن حاکی از آن بود که؛
- با افزایش نسبت آب به سیمان به میزان ۲۵٪ از ۰/۴ به ۰/۵ چقرمگی شکست هر شش نوع ملات سیمان کاهش می‌یابد.
  - با افزایش دما چقرمگی شکست مود اول تمامی مصالح پایه سیمانی مورد مطالعه در این پژوهش، کاهش می‌یابد.
  - جایگزینی ۵ و ۱۰٪ میکروسیلیس بجای بخشی از سیمان مصرفی در تهیه ملات‌های سیمان سبب بهبود مقاومت در برابر رشد ترک‌های کششی در ملات‌های سیمان می‌شود.
  - مقاومت کششی برزیلی ملات‌های سیمان با نسبت آب به سیمان و حرارت رابطه عکس و با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس به ازای ۵ و ۱۰٪ رابطه مستقیم دارد.
  - حساسیت میانگین چقرمگی مود اول ملات‌های سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۵ به افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتیگراد نسبت به ملات سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۴ کمتر است. علت این امر وجود آب بیشتر در طرح اختلاط بتن است. بخش اعظمی از حرارت صرف خشک کردن نمونه می‌شود و ظهور ترک‌های ناشی از حرارت را اندکی به تأخیر می‌اندازد.
  - در این مطالعه تنها دو نسبت ۵ و ۱۰٪ میکروسیلیس مورد بررسی قرار گرفته است پیشنهاد می‌شود محققین در مطالعات آتی در صورت علاقه درصد بهینه جایگزینی میکروسیلیس را به گونه ای که اثرات سوء بر روی چقرمگی شکست کششی و یا سایر حالات شکست ندارد را بررسی کنند.

## ۵- منبع‌ها:

- [1]. Jorbat, M. H., Hosseini, M., & Mahdikhani, M. (2020). Effect of polypropylene fibers on the mode I, mode II, and mixed-mode fracture toughness and crack propagation in fiber-reinforced concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109, 102723.
- [2]. Dolatshahi, A., & Molladavoodi, H. (2023). Specimens Size Effect on Mechanical and Fracture Properties of Rocks: a Review. *Journal of Mining and Environment*, 14(4), 1273-1293.
- [3]. Anderson, T. L. (2017). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press. pp 102-169.
- [4]. Ozdemir, E., & Eren Sarici, D. (2024). The effects of some environmental conditions on the mode I fracture toughness of rocks. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 59(1), 73-91.
- [5]. Justo, J., Castro, J., Cicero, S., & Sánchez-Carro, M. A. (2019). Influence of temperature on the fracture toughness of several rocks. In *Energy Geotechnics: SEG-2018* (pp. 352-359). Springer International Publishing.
- [6]. Feng, G., Kang, Y., Meng, T., Hu, Y. Q., & Li, X. H. (2017). The influence of temperature on mode I fracture toughness and fracture characteristics of sandstone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 2007-2019.
- [7]. Dwivedi, R. D., Soni, A. K., Goel, R. K., & Dube, A. K. (2000). Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(8), 1267-1275.
- [8]. Hu, Y., Hu, Y., Zhao, G., Jin, P., Zhao, Z., & Li, C. (2022). Experimental investigation of the relationships among P-wave velocity, tensile strength, and mode-I fracture toughness of granite after high-temperature treatment. *Natural Resources Research*, 31(2), 801-816.
- [9]. Mahanta, B., Singh, T. N., & Ranjith, P. G. (2016). Influence of thermal treatment on mode I fracture toughness of certain Indian rocks. *Engineering Geology*, 210, 103-114.
- [10]. Zuo, J. P., Xie, H. P., Dai, F., & Ju, Y. (2014). Three-point bending test investigation of the fracture behavior of siltstone after thermal treatment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70, 133-143.
- [11]. Talukdar, M., Roy, D. G., & Singh, T. N. (2018). Correlating mode-I fracture toughness and mechanical properties of heat-treated crystalline rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(1), 91-101.
- [12]. Ghanbari, N., Hosseini, M., & Saghafiyazdi, M. (2019). Effects of temperature and confining pressure on the mode I and mode II fracture toughness of cement mortar. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 104, 102361.
- [13]. 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.
- [14]. Meier, T. (2009, June). The influence of temperature on Mode II fracture toughness using the Punch-Through Shear with Confining Pressure experiment. In *71st EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009* (pp. cp-127). European Association of Geoscientists & Engineers.
- [15]. Deng, Z., Zhan, X., Zeng, W., Yang, S., & Wu, J. (2021). A degradation model of mode-I fracture toughness of rock under freeze-thaw cycles. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 115, 103073.
- [16]. Abdolghanizadeh, K., Hosseini, M., & Saghafiyazdi, M. (2020). Effect of freezing temperature and number of freeze-thaw cycles on mode I and mode II fracture toughness of sandstone. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 105, 102428.
- [17]. Wang, Y., Zhang, B., Gao, S. H., & Li, C. H. (2021). Investigation on the effect of freeze-thaw on fracture mode classification in marble subjected to multi-level cyclic loads. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 111, 102847.
- [18]. Han, T., & Li, Z. (2021). Mechanical characteristics and failure modes for mode-I sandstone and rock-like cracked sample exposed to freeze thawing cycle. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(9), 6937-6953.
- [19]. Atkinson, C., Smelser, R. E., & Sanchez, J. (1982). Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *International Journal of Fracture*, 18, 279-291.
- [20]. ASTM, A. (2015). C305-06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes

and Mortars of Plastic Consistency, ASTM Int. West Conshohocken.

[21]. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 2015, Concrete aggregates-properties, Standard No. 302. [In Persian].

[22]. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2013). Mixing room, moist chamber, moist room, and water ponds used in hydraulic testing of cement and concretes, Standard No. 17040. [In Persian].

[23]. Mehta, P. K. (1999). Advancements in concrete technology. Concrete International, 21(6), 69-76.

[24]. Hosseini, M., Dolatshahi, A., & Ramezani, E. (2023). Effect of Acidic Water on Physico-Mechanical Properties of Concrete Containing Micro-Silica. Journal of Mining and Environment, 14(2), 653-666



## Experimental study on temperature effect on the tensile fracture toughness of cement mortars containing micro-silica

Hamed Molladavoodi<sup>1\*</sup>; Alireza Dolatshahi<sup>1</sup>; Mehdi Arash<sup>1</sup>; Mohammad Mahdi Mashayekhi<sup>1</sup>  
1- Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 08 April 2024    Accepted: 19 June 2024  
(\*Corresponding author: davoodi@aut.ac.ir)

### *Keywords*

Fracture toughness,  
Quasi-brittle materials,  
Temperature,  
Tensile strength,  
CSTBD

### *Final English Abstract*

#### **Summary**

Given the importance of cement-based structures such as concrete and cement mortar in civil and mining engineering, special attention is always paid to the fracture mechanics of these materials under different environmental conditions. One of the most important parameters of fracture mechanics is the resistance to crack growth. Semi-brittle materials such as stone and cement-based materials operate in weak tension, and evaluating various factors on the critical stress intensity factor of the tensile state of these materials always allows researchers and engineers to have successful designs and projects. In this study, the effect of different temperatures such as -10, 25, 50 and 100 degrees Celsius on the fracture toughness of 3

types of cement mortars reinforced with micro-silica pozzolan with a replacement percentage of 0, 5 and 10% of the weight of cement used in the cement mortar has been investigated. The results of this study showed that with increasing temperature, tensile fracture toughness decreases, and with increasing micro-silica by 5 and 10%, the resistance to tensile crack growth of cement mortar at the temperature of 100 degrees Celsius examined in this study increases by a maximum of 15.70 and 9%.

#### **Introduction**

In the fields of mining and construction, including projects involving stone structures—whether natural or man-made—the effects of heat can manifest in various forms. Research has demonstrated that an increase in temperature does not consistently correlate with a decrease in the fracture toughness of rock. This variability arises from the distinct mineralogical and microstructural compositions of different stone and rock-like materials, which respond differently to temperature changes.

#### **Methodology**

This study aims to investigate the effects of varying temperatures on six distinct types of cement mortars. Specifically, it examines the roles of two critical factors in the mixing design of cement mortar exposed to different temperatures: the percentage of micro-silica additives and the water-to-cement ratio. By enhancing understanding in this area, the study will significantly benefit the engineering community's efforts to develop heat-resistant surface and underground civil structures. The results are anticipated to inform various engineering decisions across multiple projects. The research specifically addresses how different water-to-cement ratios, along with the incorporation of pozzolans such as micro-silica—which can enhance mechanical properties—impact the tensile fracture toughness response of cement mortars at varying temperatures.

#### **Results**



- An increase in the water-cement ratio by 25%, from 0.4 to 0.5, leads to a reduction in the fracture toughness of all six types of cement mortars examined.
  - Elevated temperatures are associated with a decrease in the mode I fracture toughness of all cement-based materials investigated in this study.
  - The substitution of 5% to 10% of the cement with micro-silica in the preparation of cement mortars enhances their resistance to the propagation of tensile cracks.
  - The Brazilian tensile strength of cement mortars exhibits an inverse relationship with both the water-cement ratio and temperature, while it demonstrates a direct relationship with an increase in the percentage of micro-silica replacement at 5% and 10%.
-