



## ارزیابی تأثیر دما بر رفتار شکست کششی نمونه‌های ملات سیمانی با هندسه‌های متفاوت

مریم محمدی اوچموش<sup>۱</sup>؛ مهدی آرش<sup>۱</sup>؛ علیرضا دولتشاهی<sup>۱</sup>؛ حامد ملاداودی<sup>۱\*</sup>  
۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶؛ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶  
(\*نویسنده مسئول: [davoodi@aut.ac.ir](mailto:davoodi@aut.ac.ir))

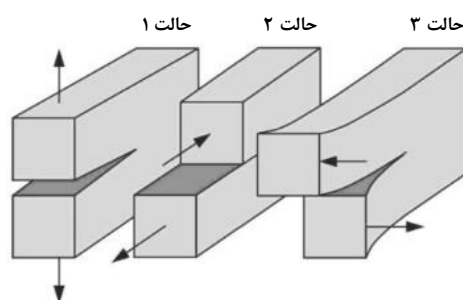
|  | چکیده |
|--|-------|
| <p>کامپوزیت‌های پایه‌سیمانی، اغلب در معرض تغییرات دمایی گسترده‌ای قرار می‌گیرند که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رفتار شکست این مصالح داشته باشد. از آنجا که چقرمگی شکست حالت کششی پارامتری کلیدی در ارزیابی پایداری چنین سازه‌هایی محسوب می‌شود، این پژوهش به بررسی تجربی تأثیر متقابل دما بر چقرمگی شکست حالت کششی در نمونه‌های ملات سیمانی با هندسه‌های مختلف پرداخته است. از این‌روی، چهار هندسه نمونه مختلف (ENDB و SECRBB، SCB، CSTBD) تحت چهار سطح دمایی پس از یک چرخه تکرار مورد آزمایش قرار گرفتند. یافته‌ها الگوی رفتاری دوگانه‌ای را نشان داد. بدین صورت که، در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست در تمامی هندسه‌ها به‌طور میانگین ۱۰/۹ درصد افزایش یافت که بیش‌ترین آن مربوط به نمونه CSTBD با ۱۴/۴۴ درصد افزایش بود. این امر ناشی از افزایش سختی ماتریس سیمان و محدودیت در گسترش ریزترک‌ها در دمای پایین شناسایی شد. در مقابل، با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش پیوسته چقرمگی شکست مشاهده شد که به ایجاد ریزترک‌های حرارتی خمیر سیمان نسبت داده شد. در این شرایط، نمونه‌هایی با هندسه ENDB با ۳۳ درصد کاهش، بیش‌ترین آسیب‌پذیری را نشان دادند. نتایج به وضوح نشان داد که میزان حساسیت به دما به‌طور معناداری در هندسه‌های مختلف، متفاوت است، به‌طوری‌که هندسه‌های CSTBD و SCB بیش‌ترین واکنش را در دمای منفی و هندسه‌های ENDB و SECRBB بیش‌ترین حساسیت را در برابر دماهای بالا نشان دادند. این مطالعه دید ارزشمندی برای طراحی بهینه سازه‌های پایه‌سیمانی در معرض تغییرات دمایی ارائه می‌دهد.</p> |       |

واژگان کلیدی: چقرمگی شکست حالت کششی، اثر دما، هندسه نمونه، مکانیک شکست، ملات سیمانی

ترک در مصالح سنگی بسته به نوع بارگذاری اعمالی می‌تواند در یکی از حالت‌های کششی خالص، برشی خالص، پاره‌شدگی خالص و یا ترکیبی از آن‌ها رخ دهد [۱،۲].  
در اکثر شرایط زمین‌شناسی و کاربردهای مهندسی مانند مهندسی سنگ، تونل‌سازی، حفاری‌های زیرزمینی،

۱- مقدمه  
سازه‌های سنگی و شبه‌سنگی در محیط‌های طبیعی و مهندسی اغلب تحت انواع مختلف بارگذاری قرار می‌گیرند. پاسخ این سازه‌ها به شرایط بارگذاری، نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی، ارزیابی پایداری و اتخاذ تصمیمات مهندسی ایمن دارد. رفتار شکست و گسترش

افزایش ایمنی سازه‌ها، تحلیل پایداری شیب‌ها و بهینه‌سازی عملیات‌های مهندسی ضروری است. شکل ۱ حالت‌های مختلف بارگذاری و حالت‌های شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۱: حالت‌های مختلف شکست (حالت ۱: کششی، حالت ۲: برشی، حالت ۳: پاره‌شدگی) [۳].

ذاتی و ناهمگنی ریزساختاری این مواد، میدان تنش در مجاورت نوک ترک رفتار پیچیده‌تری از خود نشان می‌دهد؛ از این رو استفاده از ضرایب شدت تنش برای توصیف دقیق‌تر تنش‌های متمرکز و تحلیل جامع فرایند شکست ضرورت می‌یابد [۷].

ضرایب شدت تنش بحرانی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل داخلی و محیطی قرار دارند که هر کدام می‌توانند رفتار شکست مواد ترد و شبه‌ترد را به‌طور معناداری تغییر دهند. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به اثر اندازه نمونه، هندسه نمونه، دمای محیط، فرآیندهای هوازدگی فیزیکی و شیمیایی، نرخ بارگذاری و فشار جانبی، اندازه و توزیع ذرات، مواد افزودنی، درصد کوارتز معادل و سایر ویژگی‌های ریزساختاری اشاره کرد [۸-۱۶]. در میان این عوامل، دمای محیط به‌عنوان یک متغیر اجتناب‌ناپذیر محیطی، نقش مهمی در مقاومت مواد در برابر رشد ترک ایفا می‌کند. نوسانات دمایی روزانه، وقوع آتش‌سوزی‌ها، یا چرخه‌های حرارتی متعدد در پروژه‌های معدنی و عمرانی می‌تواند موجب کاهش چقرمگی شکست و استحکام مصالح سنگی و شبه‌سنگی شود. این پدیده زمانی تشدید می‌شود که مواد دارای ریزترک‌ها، ترک‌های موجود، ناهمگنی‌های ذاتی یا ناپیوستگی‌های ساختاری باشند؛ شرایطی که در اغلب

ژئومکانیک نفت و گاز و مهندسی معدن، بارگذاری‌ها به‌صورت ترکیبی هستند. بنابراین شکست ممکن است ترکیبی از حالت‌های کششی-برشی، برشی-فشاری، کششی-پاره‌شدگی یا حتی ترکیبی هم‌زمان از سه حالت باشد. شناخت دقیق این مکانیسم‌ها برای بهبود طراحی،

در چارچوب علم مکانیک شکست، برای هر نوع هندسه و حالت بارگذاری، کمیتی اساسی با عنوان ضریب شدت تنش در نوک ترک معرفی می‌شود. این مفهوم که نخستین بار توسط اروین مطرح گردید، امروزه به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی تحلیل رفتار شکست در مواد ترد و نیمه‌ترد شناخته می‌شود. ضرایب شدت تنش ابزار اصلی برای توصیف میدان تنش متمرکز در مجاورت نوک ترک بوده و شالوده نظریه مکانیک شکست الاستیک خطی و نیز مبنای توسعه رویکردهای پیشرفته‌تر و غیرخطی در تحلیل شکست را تشکیل می‌دهند [۴-۶]. مقادیر بحرانی این ضرایب به‌عنوان چقرمگی شکست شناخته می‌شود که بیانگر مقاومت ماده در برابر شروع یا گسترش ترک است. این پارامتر یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رفتاری در ارزیابی عملکرد مواد ترد و شبه‌ترد، از جمله بتن، محسوب می‌شود.

در حوزه مکانیک شکست بتن و سنگ، تحلیل رفتار ترک تحت شرایط مختلف بارگذاری از اهمیت بالایی برخوردار است. چقرمگی شکست به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی، میزان مقاومت بتن و سنگ در برابر گسترش ترک را مشخص می‌کند و نقشی بنیادی در ارزیابی پایداری سازه، طراحی اجزای سنگی و شبه سنگی و پیش‌بینی مسیر رشد ترک دارد. به دلیل تردی

آن نسبت داده می‌شود. با این حال، مقاومت فشاری با افت همراه است که منشأ آن افزایش تنش‌های داخلی، انبساط حجمی ناشی از تشکیل یخ و ایجاد ریزترک‌های حرارتی درون شبکه سنگی است. این نتایج به روشنی بیانگر نقش تعیین‌کننده دماهای پایین در تغییر رفتار مکانیکی و پاسخ شکست مصالح سنگی است [۱۹]. هو و همکاران در یک پژوهش آزمایشگاهی، اثر دماهای بالا را بر چقرمگی شکست کششی سنگ گرانیت بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست در مود بازشدگی کششی روندی افزایشی دارد. این افزایش اولیه عمدتاً به آزادسازی تنش‌های پسماند، تبخیر رطوبت موجود و بهبود نسبی انعطاف‌پذیری ریزساختار سنگ نسبت داده می‌شود. با این حال، در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست گرانیت با افزایش دما کاهش چشمگیری را تجربه می‌کند. این افت رفتاری ناشی از گسترش و هم‌پیوندی ریزترک‌ها، تخریب ساختار بلوری کانی‌ها، اختلاف ضرایب انبساط حرارتی اجزای معدنی و در نهایت کاهش یکپارچگی مکانیکی سنگ است. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه افزایش دما در بازه محدود می‌تواند به‌طور موقت مقاومت شکست را بهبود بخشد، اما دماهای بالاتر به تسریع آسیب حرارتی و افت محسوس توان سنگ در مقابله با رشد ترک منجر می‌شوند [۲۰]. ماهانتا و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی، چقرمگی شکست کششی نمونه‌های دیسک برزیلی دارای ترک مرکزی ساخته‌شده از سنگ دولومیت و دو نوع ماسه‌سنگ مختلف از هند را تحت شرایط دمایی بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست در مود بازشدگی کششی روندی افزایشی از خود نشان می‌دهد. این افزایش اولیه عمدتاً به آزادسازی تنش‌های پسماند و تغییرات محدود در ریزساختار سنگ نسبت داده شده است. با این حال، با افزایش بیشتر دما و تا حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد،

سنگ‌ها و مصالح شبه‌سنگی طبیعی یا مصنوعی مشاهده می‌شود. در چنین حالتی، تغییرات دمایی باعث انبساط و انقباض موضعی شده و میدان تنش درون ماده را تغییر می‌دهد و در نتیجه مقاومت واقعی در برابر رشد ترک کمتر از مقدار تئوریک یا ایده‌آل آن ظاهر می‌شود [۱۷]. پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر دما و هندسه نمونه بر چقرمگی شکست در موده‌های مختلف و نیز بر ویژگی‌های مکانیکی مصالح سنگی و شبه‌سنگی پرداخته‌اند. برای مثال، فنگ و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی، رفتار چقرمگی شکست ماسه‌سنگ را با استفاده از آزمون نیم‌برزیلی در خمش سه‌نقطه‌ای و در بازه دمایی گسترده‌ای از ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش دما، چقرمگی شکست ماسه‌سنگ به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. همچنین کاهش همزمان مدول یانگ و مقاومت فشاری با افزایش دما گزارش شد. افت مدول یانگ در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شدت بیشتری داشته که این امر به بروز تخریب ریزساختاری، تشکیل و گسترش ریزترک‌ها و تغییرات میکروسکوپی در بافت سنگ نسبت داده می‌شود. این فرایندهای حرارتی در مجموع موجب تضعیف استحکام و کاهش توان سنگ در مقابله با رشد ترک می‌شوند [۱۸]. در یک مطالعه دیگر، دویدی و همکاران اثر دماهای زیر صفر را بر چقرمگی شکست کششی هفت نوع سنگ از جمله دولومیت، بازالت، ماسه‌سنگ، دو گونه شیست، آهک و نوعی دیگر از دولومیت مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، نمونه‌های دیسک برزیلی با ترک از پیش‌ساخته در مرکز آماده شده و تحت بارگذاری فشاری برای تعیین چقرمگی شکست آزمایش شدند. نمونه‌ها پس از قرارگیری در دماهای منفی تا حدود ۵۰- درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با کاهش دما، مقاومت سنگ‌ها در برابر رشد ترک کششی افزایش می‌یابد؛ پدیده‌ای که به انجماد آب در ریزفضاهای سنگ و افزایش مقاومت موضعی در ساختار

جامع بررسی شود. این رویکرد به درک بهتر سازوکارهای آسیب حرارتی و نحوه اثرگذاری دما بر شروع و گسترش ترک کمک کرده و می‌تواند مبنایی کاربردی برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر حرارت در سامانه‌های عمرانی و معدنی باشد. شکل ۲ شمای کلی از روند مطالعه حال حاضر را نشان می‌دهد.

## ۲- روش مطالعه

در این پژوهش، تأثیر چهار سطح دمایی شامل ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر رفتار چقرمگی شکست کششی مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی دقیق اثر حرارت، چرخه‌ای حرارتی برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد که طی آن، هر نمونه ۲۴ ساعت در دمای هدف قرار گرفت و سپس ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد. انتخاب این محدوده دمایی به گونه‌ای انجام شده است که شرایطی کمتر و بیشتر از دمای معمول اتاق را در بر گیرد تا امکان مقایسه تغییرات چقرمگی شکست با شرایط مرجع فراهم شود.

وجود رطوبت طبیعی اولیه در نمونه‌های ملات سیمان می‌تواند رفتار آن‌ها را در دماهای ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، در دماهای ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بخشی از انرژی حرارتی صرف تبخیر رطوبت موجود در نمونه می‌شود، که این امر موجب ایجاد خطا و نوسان در نتایج می‌گردد. همچنین قرارگیری نمونه در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد سبب یخ‌زدگی آب محبوس در منافذ ریزساختار و افزایش حجم ناشی از انجماد می‌شود؛ موضوعی که می‌تواند تنش‌های ناخواسته و ترک‌های ثانویه ایجاد کرده و نتایج را مخدوش سازد.

به منظور حذف اثرات رطوبت اولیه، تمام نمونه‌ها پیش از اعمال دماهای مورد بررسی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در گرمخانه قرار داده شدند تا وزن آن‌ها به حالت پایدار برسد. پس از این مرحله، نمونه‌های خشک وارد فرآیند اعمال دمای پژوهش شدند.

چقرمگی شکست کششی کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. پژوهشگران علت این افت پس از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را رشد ریزترک‌های ناشی از شوک حرارتی و تغییرات حجمی داخلی کانی‌ها در طی چرخه‌های گرم و سرد شدن عنوان کردند. به منظور تحلیل دقیق‌تر این رفتار، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد که نشان داد افزایش دما منجر به گسترش و هم‌پیوندی ریزترک‌ها، تخریب موضعی بافت سنگ و کاهش یکپارچگی ساختاری آن می‌شود. این آسیب‌های حرارتی به عنوان عامل اصلی افت محسوس مقاومت سنگ در برابر رشد ترک در دماهای بالا معرفی شدند [۲۱]. چرخه‌های حرارتی با دماهای متوسط تا بالا در شرایط طبیعی و همچنین در رخدادهایی نظیر انفجار، آتش‌سوزی یا عملیات حرارتی مصنوعی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی سازه‌های سنگی و شبه‌سنگی داشته باشند. در بسیاری از پروژه‌های مهندسی معدن و عمران، چه در محیط‌های سطحی و چه در فضا‌های زیرزمینی، مصالح در معرض تنش‌های حرارتی قرار می‌گیرند و این امر می‌تواند سبب تغییر در مقاومت، سختی و چقرمگی شکست آن‌ها شود. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تأثیر دما بر چقرمگی شکست مصالح سنگی الزاماً روندی یکنواخت یا کاهش‌ی ندارد؛ زیرا این گروه از مصالح به دلیل تفاوت در ویژگی‌های کانی‌شناسی، ریزساختار و میزان ناپیوستگی‌های درونی، پاسخ‌های حرارتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. از این‌رو ارزیابی اثر دما نیازمند بررسی دقیق‌تر شرایط هندسی، مکانیزم بارگذاری و نحوه توزیع تنش در اطراف ترک است. در مطالعه حاضر، تمرکز به جای بررسی تأثیر مواد افزودنی، بر بررسی هندسه‌های مختلف نمونه و تحلیل نقش دما بر چقرمگی شکست حالت کششی قرار گرفته است. هدف این پژوهش آن است که با مقایسه رفتار ترک در هندسه‌های گوناگون تحت دماهای متفاوت، نقش شکل نمونه، آرایش هندسی ترک و شرایط مرزی بر پاسخ حالت یک به‌طور



شکل ۲: چارچوب کلی این مطالعه.

همچنین در این تحقیق، چهار نوع هندسه مختلف برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده تا اثر متقابل شکل نمونه و تغییرات دما بر چقرمگی شکست حالت کششی به‌طور جامع مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویکرد امکان تحلیل دقیق‌تری از نقش ترکیبی دما و هندسه در رفتار شکست مصالح پایه سیمانی را فراهم می‌سازد. در ادامه، جزئیات مربوط به نحوه ساخت نمونه‌ها، ویژگی‌های مصالح مورد استفاده و روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری چقرمگی شکست کششی ارائه شده است.

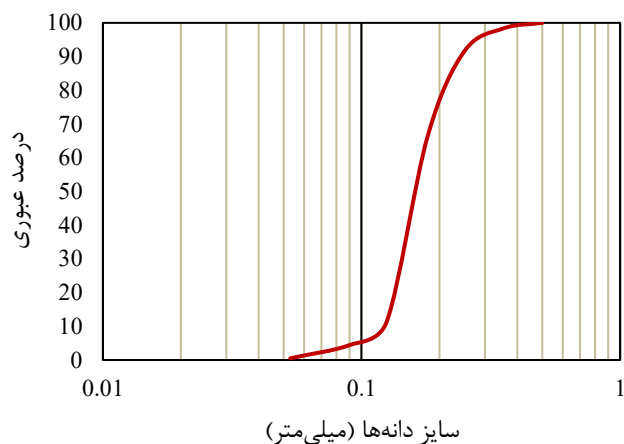
#### ۱-۲- مصالح مصرف شده

در این مطالعه یک طرح ملات سیمان با هدف بررسی تأثیر تغییر دما بر خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. اجزای پایه تشکیل‌دهنده تمامی ملات‌ها شامل سیمان، آب و ماسه بوده و نوع و مشخصات مصالح در تمام نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد. تنها متغیر در این تحقیق افزودن میکروسیلیس با درصد جایگزینی ۵ درصد از وزن سیمان است که باعث تقویت خواص مکانیکی اولیه ملات سیمانی می‌گردد. تهیه و اختلاط کلیه نمونه‌ها مطابق الزامات استاندارد ASTM C305 انجام شد. آب مورد استفاده، آب شهری با اسیدپته معادل ۷ و سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲ بود. از آنجا که در طرح اختلاط ملات سیمان از درشت‌دانه استفاده نمی‌شود، به‌کارگیری روان‌کننده یا فوق‌روان‌کننده ضرورت نداشت [۲۲]. در تمامی طرح‌ها نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد. انتخاب این نسبت

بر اساس پراکندگی بالا و کاربرد گسترده آن در طرح‌های اختلاط متداول و همچنین حساسیت قابل توجه خواص مقاومتی ملات نسبت به نسبت آب به سیمان صورت گرفت. افزون بر این، انتخاب نسبت آب به سیمان ۰/۵ موجب دستیابی به روانی مناسب ملات شده و کنترل موقعیت تیغه ایجادکننده ترک در مرکز قالب را هنگام کوبش تسهیل می‌کند. مشخصات کامل طرح اختلاط در جدول ۱ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در شکل ۳ نمایش داده شده است. ماسه مصرفی دارای ضریب انحنای ۱ و ضریب یکنواختی ۱/۴۷ می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز اکسیدی-اشعه ایکس فلورسانس ماسه مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق با این جدول، ماسه مصرفی دارای نسبت سیلیس فعال بالا می‌باشد.

#### ۲-۲- ساخت نمونه

برای آماده‌سازی نمونه‌ها در این پژوهش، چهار نوع هندسه مختلف شامل نمونه برزیلی با ترک مرکزی (CSTBD)، نمونه استوانه‌ای با ترک لبه‌ای مستقیم (SECRBB)، نمونه نیم‌برزیلی ترک‌دار (SCB) و نمونه برزیلی با درزه قطری (ENDB) ساخته شد. هدف از انتخاب این چهار هندسه، بررسی تأثیر دما بر رفتار ترک در حالت کششی و مقایسه پاسخ انواع آرایش‌های هندسی تحت بارگذاری کششی غیرمستقیم بود. در این مطالعه چهار دمای مختلف در نظر گرفته شد و برای هر دما و هر هندسه سه تکرار مستقل ساخته شد. بنابراین



شکل ۳: منحنی دانه بندی ماسه مصرفی.

جدول ۱: طرح اختلاط ملات‌های سیمان.

| جرم برای ۱ متر مکعب | نسبت جرمی                        | مصالح مصرفی |
|---------------------|----------------------------------|-------------|
| ۱۰۰۰ کیلوگرم        | نسبت ماسه به سیمان<br>۱          | ماسه        |
| ۵۰۰ کیلوگرم         | نسبت آب به سیمان<br>۰/۵          | آب          |
| ۱۰۰۰ کیلوگرم        | نسبت سیمان به ماسه<br>۱          | سیمان       |
| ۵۰ کیلوگرم          | نسبت میکروسیلیس به سیمان<br>۰/۰۵ | میکروسیلیس* |

\* میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده می‌شود، بدین صورت که در طرح اختلاط مطرح شده به ازای ۱۰۰۰ کیلوگرم ماسه، ۹۵۰ کیلوگرم سیمان و ۵۰ کیلوگرم میکروسیلیس مصرف می‌شود.

جدول ۲: آنالیز اکسیدی ماسه مصرف شده.

| ترکیب                          | درصد فراوانی | ترکیب            | درصد فراوانی |
|--------------------------------|--------------|------------------|--------------|
| 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         |

یکنواخت شامل سیمان، ماسه و مقدار ثابت ۵ درصد میکروسیلیس تهیه شده‌اند. نسبت آب به سیمان در کل نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد تا اثر متغیرهای هندسی و

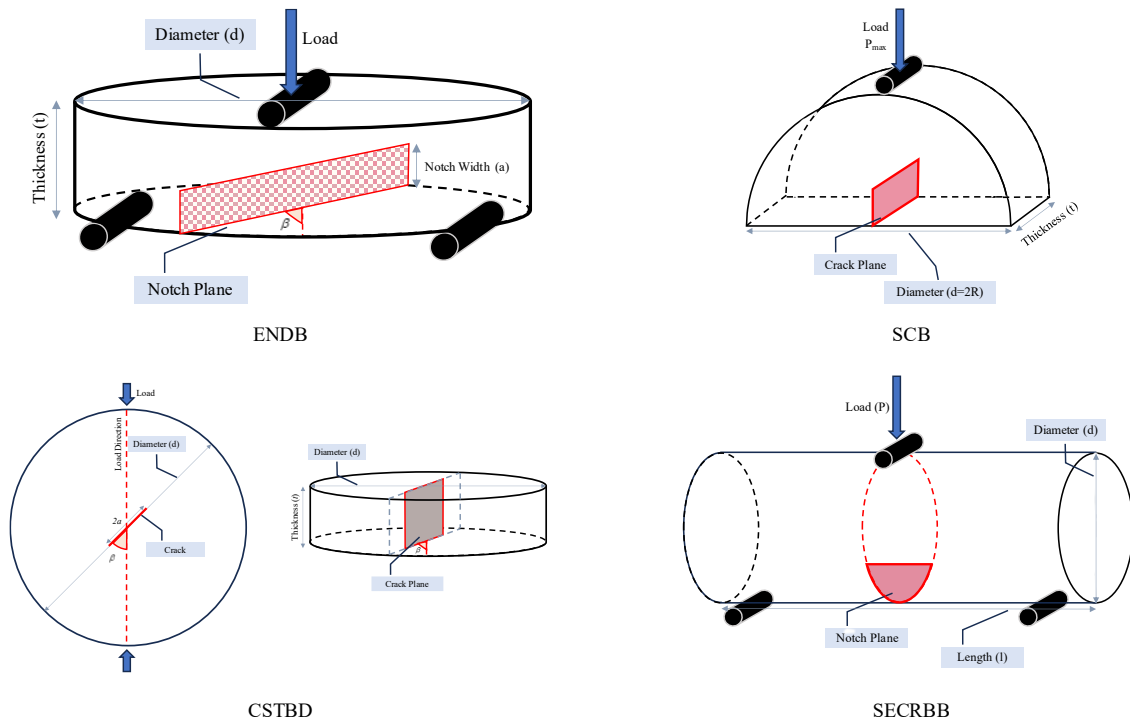
مجموع تعداد نمونه‌های ساخته شده و آزمون شده برابر ۴۸ عدد است در این پژوهش، تمامی نمونه‌ها با یک طرح اختلاط

خارج می‌شوند، در مسیر سرد شدن تا دمای محیط ممکن است بخشی از رطوبت نسبی محیط را جذب کنند و این امر می‌تواند موجب تغییر در جرم، ریزساختار یا رفتار مکانیکی آن‌ها شود. برای حذف این اثر ناخواسته، تمام نمونه‌ها بلافاصله پس از خروج از محیط حرارتی درون دسیکاتور حاوی ماده جاذب رطوبت قرار داده شدند. بدین ترتیب فرآیند رسیدن نمونه‌ها به دمای اتاق در محیطی با حداقل رطوبت انجام شده و نقش متغیر رطوبت در نتایج مطالعه به طور کامل حذف می‌شود. همچنین نرخ بارگذاری برای تمامی نمونه‌ها ۰/۲ میلی-متر بر دقیقه لحاظ شده است تا اثر نرخ بارگذاری بر تمامی آن‌ها ثابت باشد. شکل ۴ شکل شماتیک از نمونه‌های ساخته شده و حالت بارگذاری برای آن‌ها را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۴، هر یک از هندسه‌های مورد استفاده در این پژوهش قابلیت اندازه‌گیری چقرمگی شکست حالت کششی را دارند. تفاوت اصلی میان این نمونه‌ها، علاوه بر ویژگی‌های هندسی، در نوع بارگذاری اعمالی است که منجر به ایجاد مؤلفه کششی در ناحیه ترک می‌شود. در نمونه‌های SCB و SECRBB و ENBD بارگذاری از نوع خمش سه‌نقطه‌ای است. در این حالت، قرارگیری ترک از پیش موجود در مرکز نمونه و نیز انتخاب تقارن هندسی تکیه‌گاه‌ها نسبت به محل ترک، سبب می‌شود که با اعمال بار، میدان تنش ایجاد شده در اطراف نوک ترک عمدتاً از نوع بازشدگی باشد و بنابراین حالت کششی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شود. در مقابل، در نمونه‌های CSTBD و ENDB بارگذاری به‌صورت فشاری اعمال می‌شود. با این حال، به دلیل ماهیت هندسی این نمونه‌ها، بار فشاری اعمال شده به یک مؤلفه کششی مؤثر عمود بر راستای ترک تبدیل می‌شود و بدین ترتیب این هندسه‌ها نیز امکان اندازه‌گیری چقرمگی حالت کششی را فراهم می‌کنند. در این دو هندسه، هنگامی که ترک اولیه دقیقاً در راستای بارگذاری قرار گیرد، نمونه در یک حالت ویژه

حرارتی بدون دخالت عوامل مخلوط‌سازی بررسی شود. میکروسلیس مصرفی در تمامی نمونه‌ها مقدار و ویژگی یکسان داشته و به‌صورت دوغاب یکنواخت ابتدا در آب حل شده و سپس به ترکیب سیمان و ماسه افزوده شد تا از پراکندگی مناسب ذرات ریز و کاهش کلوخه‌شدگی جلوگیری شود. به دلیل حذف درشت‌دانه (شن) در این طرح اختلاط، نیاز به استفاده از روان‌کننده یا فوق‌روان‌کننده وجود نداشت. تمامی مصالح مطابق الزامات استاندارد ASTM C305 و مخلوط شده‌اند تا هماهنگی کامل در تولید نمونه‌ها حاصل شود و تغییرات مشاهده‌شده در نتایج صرفاً ناشی از تفاوت در دما و هندسه باشد، نه اختلاف در ترکیب مواد. برای ایجاد ترک اولیه در هندسه‌هایی که نیازمند شکاف از پیش‌ساخته بودند، تیغه‌ای با ضخامت ۱ میلی‌متر در موقعیت مناسب هندسی قرار داده شد و ملات پس از اختلاط یکنواخت، در قالب ریخته و به‌صورت یکسان در تمامی نمونه‌ها کوبیده شد تا تراکم و شرایط مرزی قالب‌ها مشابه باقی بماند. پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان ریختن ملات، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و بلافاصله در حوضچه آب آهک قرار گرفتند. فرآیند عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز مطابق الزامات استانداردهای ملی و ضوابط عمل‌آوری نمونه‌های پایه سیمانی انجام شد. به منظور حذف اثرات سن نمونه‌ها بر نتایج مکانیکی، زمان عمل‌آوری برای تمامی گروه‌ها یکسان در نظر گرفته شد تا تفاوت‌ها تنها ناشی از متغیرهای مورد بررسی (هندسه و دما) باشد [۲۳].

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، یک چرخه حرارتی تک مرحله‌ای متشکل از چهار دمای مختلف ۱۰-، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر آن‌ها اعمال شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هر یک از این دماها قرار گرفتند و سپس برای انجام آزمون از سردخانه یا گرمخانه خارج شدند. از آنجا که رطوبت محیط آزمایشگاه می‌تواند بر رفتار حرارتی و مکانیکی نمونه‌های سیمانی اثرگذار باشد، کنترل این عامل ضروری است. نمونه‌هایی که از گرمخانه



شکل ۴: شماتیک نمونه‌های مورد مطالعه.

هستند. جدول ۳ مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

محاسبه ضریب شدت تنش بحرانی حالت کششی در نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس معادلات ارائه شده در جدول ۴ انجام شده است.

قرار می‌گیرد که طی آن رشد ترک کاملاً تحت کنترل حالت کششی انجام می‌شود.

### ۳-۲- محاسبه چقرمگی حالت کششی

روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مصالح سنگی مطرح شده است. در این مطالعه از چهار هندسه مختلف استفاده شده است. نمونه‌های استفاده شده در این مطالعه شامل ENDB و SECRBB، SCB، CSTBD می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات هندسی نمونه‌های مورد مطالعه.

| نام نمونه      | قطر نمونه | ضخامت نمونه | عرض ترک | طول نمونه |
|----------------|-----------|-------------|---------|-----------|
| بر حسب میلیمتر |           |             |         |           |
| CSTBD          | ۱۰۰       | ۵۰          | ۳۰      | -         |
| SCB            | ۱۰۰       | ۲۵          | ۱۰      | -         |
| SECRBB         | ۵۸        | -           | ۲۰      | ۱۵۰       |
| ENDB           | ۱۰۰       | ۵۰          | ۲۰      | -         |

جدول ۴: ضرایب شدت تنش بحرانی شکست حالت کششی [۲۴-۲۷].

| نمونه | چقرمگی  | توضیحات   |
|-------|---|---|
| CSTBD | $K_{IC} = \frac{P_{max}\sqrt{a}}{\sqrt{\pi R} \cdot t} N_I$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>a</math>: نصف طول ترک</li> <li>- <math>R</math>: شعاع نمونه</li> <li>- <math>t</math>: ضخامت نمونه</li> <li>- <math>P_{max}</math>: بار در لحظه شکست نمونه ترک‌دار</li> <li>- <math>N_I</math>: ضریب بی بعد که به صورت زیر بدست می‌آید:</li> </ul> $N_I = 1 - 4(\sin \beta)^2 + 4(\sin \beta)^2(1 - 4(\cos \beta)^2) \left(\frac{a}{R}\right)^2$   |
|       |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S</math>: فاصله دو تکیه گاه</li> <li>- <math>D</math>: قطر نمونه</li> <li>- <math>P_{max}</math>: بار در لحظه شکست نمونه ترک‌دار</li> <li>- <math>N_I</math>: ضریب بی بعد که به صورت زیر بدست می‌آید:</li> </ul> $N_I = \frac{2 \left(\frac{D}{S}\right) \left[450.8531 \left(\frac{S/D}{3.33}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^{1.5}\right]^{0.5}}{\left[\left(\frac{a}{D}\right) - \left(\frac{a}{D}\right)^2\right]^{0.25}}$                                 |
| SCB   | $K_{IC} = \frac{P_{max}\sqrt{\pi a}}{2Rt} N_I$              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>a</math>: عرض ترک</li> <li>- <math>R</math>: شعاع نمونه</li> <li>- <math>t</math>: ضخامت نمونه</li> <li>- <math>P_{max}</math>: بار در لحظه شکست نمونه ترک‌دار</li> <li>- <math>N_I</math>: ضریب بی بعد که به صورت زیر بدست می‌آید:</li> </ul> $N_I = -1.297 + 9.516 \left(\frac{S}{R}\right) + \left(-0.47 - 16.457 \left(\frac{S}{R}\right)\right) \left(\frac{a}{R}\right) + \left(1.071 + 34.401 \left(\frac{S}{R}\right)\right) \left(\frac{a}{R}\right)^2$ |
|       |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S</math>: فاصله دو تکیه گاه</li> <li>- شرط <math>a/R \geq 0.2</math> باید صادق باشد</li> </ul>   |
| ENBD  | $K_{IC} = \frac{6P_{max}S\sqrt{\pi a}}{Rt^2} N_I$           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- عرض ترک</li> <li>- <math>R</math>: شعاع نمونه</li> <li>- <math>t</math>: ضخامت نمونه</li> <li>- <math>P_{max}</math>: بار در لحظه شکست نمونه ترک‌دار</li> <li>- <math>S</math>: فاصله دو تکیه گاه</li> </ul>   |
|       |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>N_I</math>: ضریب بی بعد که از نتایج علیها و همکاران [۲۴] قابل تعیین است</li> </ul>   |

### ۳- تحلیل نتایج

به منظور ارزیابی تأثیر دما بر چقرمگی شکست حالت کششی مورد تحلیل و بحث قرار می‌گیرد. بدین منظور،

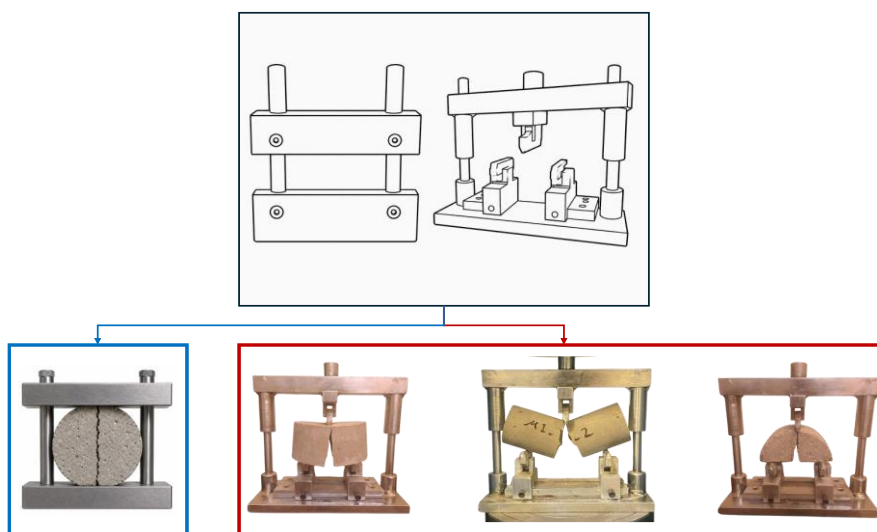
در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده

درصدی را نشان می‌دهد. توزیع پایداری تنش‌های کششی در ناحیه نوک ترک تحت شرایط خمش سه‌نقطه‌ای عامل اصلی این افزایش در دماهای پایین است. با این حال، در دماهای ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی-گراد مقدار چقرمگی به ترتیب به  $0.3263 \text{ MPa.m}^{0.5}$  و  $0.2760 \text{ MPa.m}^{0.5}$  کاهش یافته که به کاهش ۱۳/۳۵ و ۲۶/۷۱ درصدی نسبت به دمای مرجع منجر شده است. این کاهش شدید بیانگر حساسیت بالای نمونه‌های SCB به آسیب‌های حرارتی و افت سختی خمشی ماده در دماهای بالا می‌باشد. میانگین چقرمگی شکست حالت یک در نمونه‌های SECRBB در دمای اتاق برابر  $0.3414 \text{ MPa.m}^{0.5}$  است که با کاهش دما به منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد به  $0.3800 \text{ MPa.m}^{0.5}$  افزایش یافته و حدود ۱۱/۳ درصد بهبود نشان می‌دهد. این افزایش می‌تواند به افزایش مقاومت کششی مؤثر ماده و تأخیر در آغاز رشد ترک نسبت داده شود. در مقابل، با افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار چقرمگی به  $0.2822 \text{ MPa.m}^{0.5}$  و  $0.2518 \text{ MPa.m}^{0.5}$  کاهش می‌یابد که به ترتیب بیانگر کاهش ۱۷/۳ و ۲۶/۲۴ درصدی نسبت به دمای مرجع است. تمرکز تنش بالاتر در نوک ترک جانبی و فعال شدن ریزترک‌های حرارتی اطراف آن نقش کلیدی در افت عملکرد شکست این هندسه در دماهای بالا ایفا می‌کند. نمونه‌های ENDB کمترین حساسیت مثبت به دماهای پایین و بیشترین افت چقرمگی را در دماهای بالا نشان می‌دهند. مقدار میانگین چقرمگی شکست در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با  $0.3400 \text{ MPa.m}^{0.5}$  است که در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد تنها به  $0.3610 \text{ MPa.m}^{0.5}$  افزایش یافته و افزایش محدودی معادل ۶/۱۷ درصد را نشان می‌دهد. با این حال، افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش شدید چقرمگی به  $0.2607 \text{ MPa.m}^{0.5}$  و  $0.2278 \text{ MPa.m}^{0.5}$  شده است که به ترتیب

نتایج اندازه‌گیری شده برای چقرمگی حالت کششی در چهار هندسه مختلف نمونه‌ها و تحت چهار سطح دمایی متفاوت، به‌عنوان مبنای اصلی تحلیل در نظر گرفته شده است (شکل ۵). جدول ۵ مقادیر چقرمگی شکست کششی به‌همراه میانگین و انحراف معیار نتایج حاصل از تکرارهای آزمایشگاهی را ارائه می‌کند که امکان بررسی روند تغییرات چقرمگی با تغییر دما و مقایسه رفتار شکست در هندسه‌های مختلف را فراهم می‌سازد. در ادامه، اثر دما بر چقرمگی شکست حالت یک برای هر یک از هندسه‌ها به‌صورت جداگانه و با در نظر گرفتن دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مطابق با جدول ۵، نتایج نشان می‌دهد که چقرمگی شکست حالت کششی نمونه‌های CSTBD به‌طور محسوسی تحت تأثیر دما قرار دارد. مقدار میانگین چقرمگی در دمای مرجع اتاق برابر با  $0.3683 \text{ MPa.m}^{0.5}$  است، در حالی که در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد این مقدار به  $0.4215 \text{ MPa.m}^{0.5}$  افزایش یافته که بیانگر افزایش حدود ۱۴/۴۴ درصدی می‌باشد. این افزایش را می‌توان به افزایش سختی مؤثر ماده و محدود شدن گسترش ریزترک‌ها در دماهای پایین نسبت داد. با افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست به ترتیب به  $0.3245 \text{ MPa.m}^{0.5}$  و  $0.2887 \text{ MPa.m}^{0.5}$  کاهش می‌یابد که معادل کاهش ۱۱/۸۹ و ۲۱/۶۱ درصدی نسبت به دمای مرجع است. این رفتار ناشی از تضعیف ریزساختار ماده، ایجاد ریزترک‌های حرارتی و کاهش پیوستگی فاز خمیر سیمان در دماهای بالا می‌باشد که ظرفیت مقاومت در برابر رشد ترک را کاهش می‌دهد. در هندسه SCB روند مشابهی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که بیشترین مقدار چقرمگی شکست در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد برابر با  $0.4243 \text{ MPa.m}^{0.5}$  ثبت شده که نسبت به دمای ۲۵ سانتی‌گراد ( $0.3766 \text{ MPa.m}^{0.5}$ ) افزایش ۱۲/۶۶

جدول ۵: نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی.

| نام نمونه | دمای (درجه سانتی-گراد) | چقرمگی حالت کششی (MPa.m <sup>0.5</sup> ) | میانگین | انحراف معیار |
|-----------|------------------------|--|---------|--------------|
| CSTBD     | -۱۰                    | ۰/۴۲۱۶                                   | ۰/۴۱۰۲  | ۰/۰۱۱۳       |
|           | ۲۵                     | ۰/۳۶۵۰                                   | ۰/۳۷۰۱  | ۰/۰۰۳۳       |
|           | ۵۰                     | ۰/۳۳۸۹                                   | ۰/۳۲۱۶  | ۰/۰۰۴۴       |
|           | ۱۰۰                    | ۰/۲۹۶۵                                   | ۰/۲۸۴۷  | ۰/۰۰۶۸       |
| SCB       | -۱۰                    | ۰/۴۱۶۷                                   | ۰/۴۲۲۲  | ۰/۰۰۸۹       |
|           | ۲۵                     | ۰/۳۷۲۱                                   | ۰/۳۷۷۴  | ۰/۰۰۴۱       |
|           | ۵۰                     | ۰/۳۲۰۱                                   | ۰/۳۳۵۸  | ۰/۰۰۸۴       |
|           | ۱۰۰                    | ۰/۲۸۲۷                                   | ۰/۲۸۳۰  | ۰/۰۱۱۷       |
| SECRBB    | -۱۰                    | ۰/۳۷۹۷                                   | ۰/۳۷۹۴  | ۰/۰۰۰۸       |
|           | ۲۵                     | ۰/۳۴۵۲                                   | ۰/۳۳۵۸  | ۰/۰۰۴۹       |
|           | ۵۰                     | ۰/۲۸۶۵                                   | ۰/۲۷۴۶  | ۰/۰۰۶۶       |
|           | ۱۰۰                    | ۰/۲۵۸۹                                   | ۰/۲۴۵۲  | ۰/۰۰۶۹       |
| ENDB      | -۱۰                    | ۰/۳۵۴۷                                   | ۰/۳۵۶۳  | ۰/۰۰۹۶       |
|           | ۲۵                     | ۰/۳۴۴۴                                   | ۰/۳۳۴۵  | ۰/۰۰۵۰       |
|           | ۵۰                     | ۰/۲۷۲۰                                   | ۰/۲۵۹۳  | ۰/۰۱۰۶       |
|           | ۱۰۰                    | ۰/۲۳۰۷                                   | ۰/۲۲۰۷  | ۰/۰۰۶۲       |



شکل ۵: شکست نمونه سیمانی با هندسه‌های مختلف.

الاستیک ماده، تقویت قفل‌شدگی ریزساختاری در ناحیه فصل مشترک خمیر سیمان-سنگدانه و پایداری بیشتر ناحیه فرایند شکست از مهم‌ترین مکانیزم‌هایی هستند که سبب می‌شوند در دماهای زیر صفر آغاز و گسترش ترک دشوارتر شده و مقدار چقرمگی شکست اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌ها افزایش یابد. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش در شرایط خشک قرار داشته‌اند. بنابراین اثر حضور آب درون حفره‌ای و میان‌بافتی در ریزساختار ماده در این مطالعه در نظر گرفته نشده است. در شرایطی که رطوبت درون منافذ وجود داشته باشد، کاهش دما می‌تواند منجر به یخ‌زدگی آب و افزایش حجم آن گردد که این پدیده معمولاً سبب ایجاد تنش‌های داخلی و تخریب ریزساختاری در ماده می‌شود. با توجه به خشک بودن نمونه‌ها در این پژوهش، چنین مکانیزم تخریبی ناشی از انبساط یخ در منافذ رخ نداده و نتایج به‌دست‌آمده صرفاً بیانگر اثر مستقیم دما بر رفتار مکانیکی و شکست ماده می‌باشد. همچنین، کاهش چقرمگی شکست در دماهای بالا را می‌توان با توجه به تغییرات ریزساختاری و مکانیکی بتن در اثر بارگذاری حرارتی توضیح داد. با افزایش دما، اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین خمیر سیمان هیدراته و سنگدانه‌ها موجب ایجاد تنش‌های حرارتی در مقیاس ریزساختاری می‌شود. این تنش‌های ناسازگار در ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه متمرکز شده و به تدریج منجر به ایجاد و فعال شدن ریزترک‌های حرارتی می‌گردد. شکل‌گیری این ریزترک‌ها باعث تضعیف پیوستگی ریزساختار و کاهش یکپارچگی شبکه جامد ماده می‌شود. علاوه بر این، در دماهای بالا برخی تغییرات فیزیکی و شیمیایی در فاز خمیر سیمان رخ می‌دهد که به کاهش سختی و مقاومت کششی مؤثر ماده منجر می‌شود. از جمله این تغییرات می‌توان به کاهش آب پیوندی در محصولات هیدراسیون، ایجاد حفرات ریز ناشی از تبخیر رطوبت و تضعیف پیوند بین فازهای جامد اشاره کرد. این فرایندها موجب کاهش مدول الاستیسیته

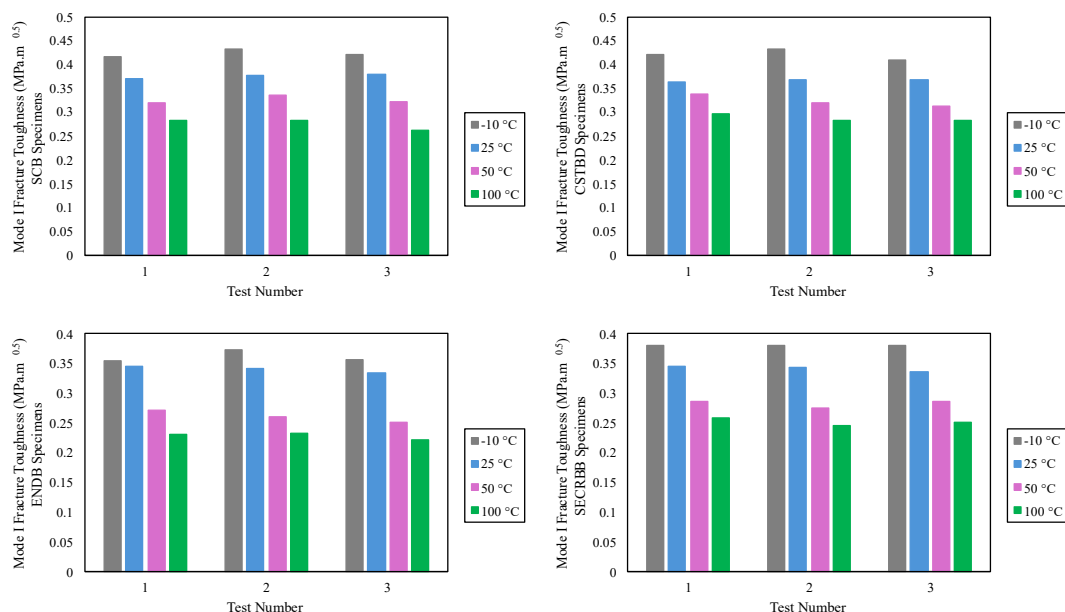
کاهش ۲۳/۳۲ و ۳۳ درصدی نسبت به دمای مرجع را نشان می‌دهد. وجود درزه اولیه در این هندسه به‌عنوان مسیر ترجیحی رشد ترک عمل کرده و در ترکیب با آسیب حرارتی، سبب افت قابل توجه ظرفیت نمونه در مقاومت در برابر رشد ترک در دماهای بالا می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده، افزایش چقرمگی شکست مشاهده‌شده در دماهای زیر صفر را می‌توان با در نظر گرفتن تغییرات ریزساختاری و مکانیکی بتن در دماهای پایین توضیح داد. با کاهش دما، تحرک فازهای خمیر سیمان هیدراته کاهش یافته و رفتار ویسکوالاستیک ماده محدودتر می‌شود. در نتیجه مدول الاستیسیته و سختی مؤثر ماده افزایش می‌یابد. این افزایش سختی سبب می‌شود تغییر شکل‌های موضعی در اطراف نوک ترک کاهش یافته و تمرکز تنش در ناحیه نوک ترک به‌صورت پایداری توزیع شود، به‌گونه‌ای که برای آغاز و گسترش ترک به سطح تنش بالاتری نیاز باشد. از دیدگاه ریزساختاری، کاهش دما موجب افزایش درگیری مکانیکی و اصطکاک در فصل مشترک خمیر سیمان-سنگدانه می‌شود. در دماهای پایین، انقباض حرارتی اجزای مختلف ریزساختار باعث افزایش قفل‌شدگی مکانیکی بین فازها شده و لغزش یا جدایش در این ناحیه را دشوارتر می‌کند. در نتیجه مسیر رشد ترک با موانع بیشتری مواجه شده و ترک برای پیشروی ناچار به انحراف، شاخه‌شدن یا عبور از نواحی مقاوم‌تر می‌شود که این امر انرژی شکست موردنیاز را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، رفتار ناحیه فرایند شکست در اطراف نوک ترک نیز در دماهای پایین دستخوش تغییر می‌شود. در این شرایط رشد و هم‌پیوستگی ریزترک‌ها با سرعت کمتری رخ می‌دهد و پدیده‌هایی مانند پل‌زنی ریزساختاری می‌توانند تا حدی از تمرکز تنش در نوک ترک بکاهند. این مکانیزم‌ها موجب می‌شوند که برای پیشروی ترک اصلی انرژی بیشتری مصرف شود و در نتیجه مقدار چقرمگی شکست اندازه‌گیری‌شده یا همان چقرمگی ظاهری افزایش یابد. بنابراین، افزایش سختی

و افت ظرفیت انتقال تنش در ریزساختار شده و در نتیجه مقاومت ماده در برابر تمرکز تنش در نوک ترک کاهش می‌یابد. از دیدگاه مکانیک شکست نیز با افزایش دما، ناحیه فرایند شکست به دلیل حضور ریزترک‌های حرارتی از پیش ایجاد شده، زودتر فعال می‌شود. این ریزترک‌ها می‌توانند به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و با ترک اصلی هم‌پیوسته شوند، به‌طوری که مسیر رشد ترک با مقاومت کمتری مواجه می‌شود. در چنین شرایطی انرژی موردنیاز برای پیشروی ترک کاهش یافته و ترک می‌تواند با سهولت بیشتری در ریزساختار گسترش یابد. در مجموع، ایجاد و گسترش ریزترک‌های حرارتی، تضعیف پیوستگی ریزساختار در ناحیه میان خمیر سیمان و سنگدانه و کاهش سختی و مقاومت کششی مؤثر خمیر سیمان از مهم‌ترین مکانیزم‌هایی هستند که در دماهای بالا موجب کاهش مقاومت ماده در برابر رشد ترک و در نتیجه کاهش چقرمگی شکست اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌ها می‌شوند.

لازم به تأکید است که تغییرات مشاهده‌شده در چقرمگی شکست صرفاً ناشی از اثر دما نیست، بلکه هندسه نمونه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه توزیع تنش و در نتیجه در مقاومت شکست ایفا می‌کند. در هر یک از هندسه‌های بررسی‌شده، شرایط مرزی، مسیر بارگذاری و هندسه ترک اولیه باعث ایجاد الگوهای متفاوتی از تمرکز تنش در ناحیه نوک ترک می‌شوند. این تفاوت‌ها مستقیماً بر مقدار فاکتور شدت تنش بحرانی و میزان انرژی لازم برای آغاز و گسترش ترک اثر می‌گذارند. در هندسه‌هایی مانند CSTBD و SCB، میدان تنش به‌گونه‌ای توزیع می‌شود که تمرکز تنش در نوک ترک تحت شرایط بارگذاری خمشی یا کششی نسبتاً پایدارتر و یکنواخت‌تر است؛ بنابراین تغییرات چقرمگی با دما بیشتر منعکس‌کننده اثر مستقیم تغییرات ریزساختاری ماده است. در مقابل، در هندسه‌هایی نظیر ENDB وجود شکاف اولیه و مسیر ترجیحی رشد ترک سبب افزایش حساسیت هندسه به تمرکز تنش شده و

ترک را به سمت گسترش سریع‌تر هدایت می‌کند. در چنین حالتی، حتی تغییرات مشابه دمایی نیز می‌تواند منجر به پاسخ شکست متفاوتی نسبت به سایر هندسه‌ها شود. از منظر مکانیک شکست، هندسه نمونه با تغییر در ضریب بی‌بعد (تابع هندسه و ترک از پیش موجود)  $Y$  و در نتیجه در رابطه  $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$  بر مقدار فاکتور شدت تنش مؤثر است. بنابراین، برای یک سطح تنش و طول ترک یکسان، مقدار  $K_I$  در هندسه‌های مختلف متفاوت خواهد بود و این اختلاف مستقیماً بر آغاز ترک و نرخ رشد آن تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، بخشی از تفاوت‌های مشاهده‌شده در چقرمگی شکست بین نمونه‌ها را باید ناشی از تفاوت در تمرکز تنش و شرایط موضعی نوک ترک در هر هندسه دانست. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که دما و هندسه به‌صورت هم‌افزا بر رفتار شکست اثر می‌گذارند؛ به‌طوری‌که دما از طریق تغییر سختی و یکپارچگی ریزساختار بر مقاومت ذاتی ماده در برابر رشد ترک اثر دارد، در حالی که هندسه با کنترل میدان تنش و تمرکز تنش در نوک ترک، شدت این پاسخ را تعدیل می‌کند. از این رو، بخش قابل توجهی از تفاوت‌های مشاهده‌شده در چقرمگی شکست باید در چارچوب برهم‌کنش میان اثر حرارتی و اثر هندسی تفسیر شود، نه صرفاً به دما نسبت داده شود.

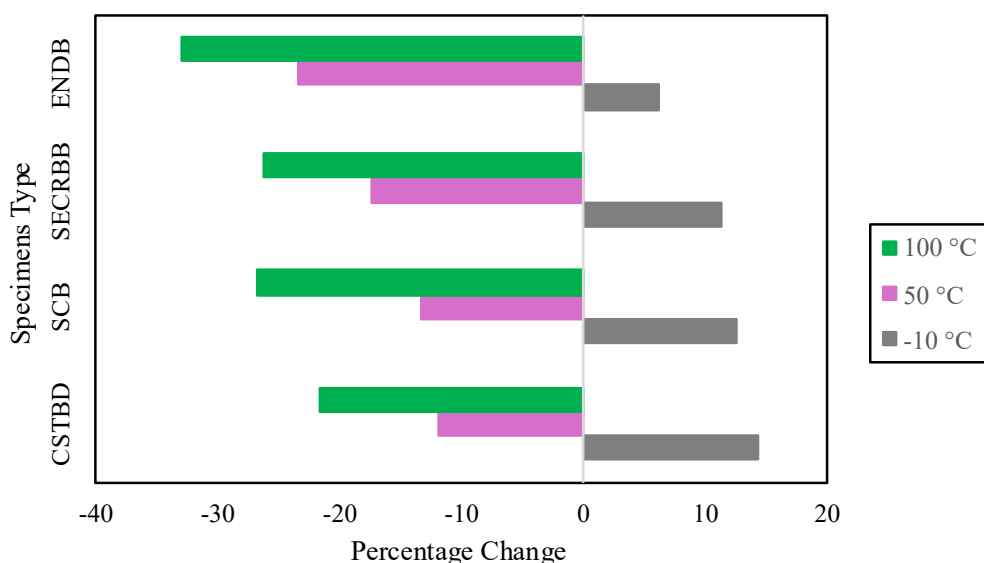
به‌منظور نمایش شفاف‌تر نتایج و تسهیل درک روند تغییرات، مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۵ به‌صورت نمودارهای ستونی نیز ارائه شده‌اند. شکل ۶ نتایج فوق را در قالب نمودارهای گرافیکی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات چقرمگی شکست حالت کششی به‌خوبی قابل تشخیص است، به‌طوری‌که افزایش چقرمگی در دماهای پایین‌تر از دمای اتاق و کاهش تدریجی آن در دماهای بالاتر از دمای اتاق به‌طور واضح نمایان است. این نمایش گرافیکی امکان مقایسه بهتر رفتار شکست نمونه‌ها در هندسه‌های مختلف و تحت شرایط دمایی متفاوت را فراهم می‌سازد. به‌منظور ارزیابی تطبیقی حساسیت هندسه‌های



شکل ۶: نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی.

سانتی‌گراد، نمودار کاهش مشخصی در چقرمگی شکست برای تمامی هندسه‌ها نشان می‌دهد، با این تفاوت که نرخ کاهش در هندسه‌ها متفاوت است. هندسه ENDB بیش‌ترین افت درصدی را در این دما تجربه کرده است که حاکی از حساسیت بالای این نمونه به افزایش دماهای متوسط می‌باشد. پس از آن، نمونه‌های SECRBB و CSTBD قرار می‌گیرند، در حالی‌که هندسه SCB کاهش نسبی کم‌تری را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر آن است که هندسه SCB در برابر آسیب‌های حرارتی اولیه از پایداری بیش‌تری برخوردار است. با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، روند کاهش چقرمگی شکست در تمامی هندسه‌ها تشدید می‌شود که در نمودار درصد تغییرات به‌وضوح نمایان است. در این دما، بیش‌ترین کاهش مربوط به هندسه‌های ENDB و SCB است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالاتر این نمونه‌ها در دماهای بالا می‌باشد. این افت شدید می‌تواند ناشی از ایجاد ریزترک‌های حرارتی، تضعیف پیوستگی خمیر سیمان و افزایش ناپیوستگی‌های ریزساختاری در این هندسه‌ها باشد.

مختلف نسبت به دما، یک نمودار تکمیلی در شکل ۷ ارائه شده است. این نمودار امکان مقایسه مستقیم و بصری پاسخ هر هندسه به شرایط دمایی مختلف نسبت به دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد را فراهم می‌کند و به‌صورت واضح نشان می‌دهد کدام هندسه بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات دما از خود بروز داده است. بر اساس شکل ۷، در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد تمامی هندسه‌ها افزایش چقرمگی شکست حالت یک را نسبت به دمای مرجع نشان می‌دهند، اما شدت این افزایش در هندسه‌ها یکسان نیست. بیش‌ترین افزایش درصدی مربوط به نمونه‌های CSTBD و SCB است که بیانگر حساسیت بالاتر این هندسه‌ها به دماهای پایین می‌باشد. این رفتار را می‌توان به تمرکز تنش کششی مؤثرتر در نوک ترک و تأثیر انقباض حرارتی ریزساختار در این هندسه‌ها نسبت داد که منجر به افزایش مقاومت در برابر گسترش ترک می‌شود. در مقابل، هندسه‌های SECRBB و ENDB افزایش ملایم‌تری را تجربه کرده‌اند که نشان‌دهنده پاسخ پایدارتر آن‌ها در برابر سرماپیش است. در دمای ۵۰ درجه



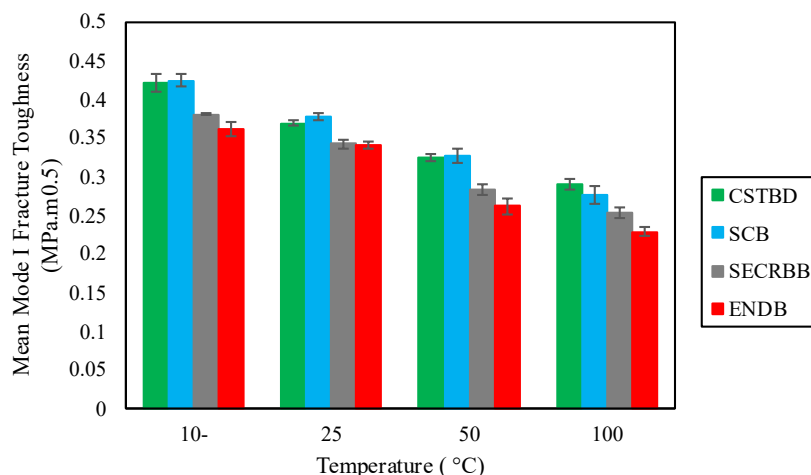
شکل ۷: درصد حساسیت هندسه‌های مختلف به تغییرات دمایی.

پاسخ نمونه‌ها و پایداری نتایج آزمایشگاهی بوده و افزایش آن می‌تواند حاکی از حساسیت بالاتر رفتار شکست به دما، ناهمگنی ریزساختاری و یا تشدید رشد ریزترک‌های حرارتی باشد. بنابراین، این نمودار علاوه بر مقایسه مستقیم سطح چقرمگی شکست هندسه‌های مختلف در دماهای گوناگون، اطلاعات ارزشمندی در خصوص قابلیت اعتماد نتایج و میزان عدم قطعیت رفتاری هر هندسه تحت شرایط حرارتی مختلف ارائه می‌دهد.

شکل ۹ تغییرات مقاومت فشاری و کششی ملات اولیه را بر حسب دما نشان می‌دهد. همچنین در این شکل، تغییرات بار در لحظه شکست نرمال شده و شاخص تردی نیز ارائه شده است. به‌منظور نرمال‌سازی این مقادیر، مقدار هر پارامتر در هر دما بر مقدار متناظر همان پارامتر در دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقسیم شده است؛ بدین ترتیب امکان مقایسه نسبی تغییرات رفتار مکانیکی و پارامترهای شکست نمونه‌ها در دماهای مختلف فراهم می‌شود. شاخص تردی نیز با نسبت مقاومت فشاری تک محوری ملات اولیه به مقاومت کششی تک محوره آن بدست می‌آید. بر اساس شکل ۹، روند تغییرات مقاومت فشاری و

در مقابل، نمونه SECRBB کاهش ملایم‌تری را نشان داده که بیانگر پایداری نسبی این هندسه در شرایط حرارتی شدید است. این نمودار به‌خوبی نشان می‌دهد که پاسخ چقرمگی شکست حالت کششی به دما، علاوه بر ویژگی‌های مصالح، به هندسه نمونه و نحوه اعمال و انتقال تنش نیز به‌شدت وابسته است. اختلاف دامنه درصد تغییرات میان هندسه‌ها بیانگر آن است که برخی پیکربندی‌های هندسی ابزار مناسب‌تری برای آشکارسازی اثرات دما بر رفتار شکست هستند و می‌توانند در مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با تحلیل شکست‌های حرارتی نقش کلیدی ایفا کنند.

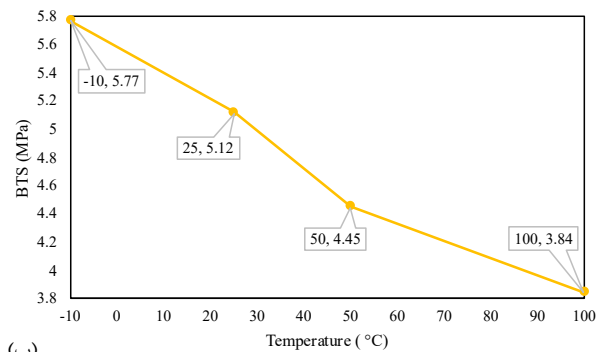
در شکل ۸، مقادیر میانگین چقرمگی شکست مورد کششی برای هر یک از هندسه‌های مورد بررسی در دماهای مختلف از منفی ۱۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نمایش داده شده است و میله‌های خطای ترسیم‌شده بر روی هر ستون، انحراف معیار نتایج حاصل از تکرار آزمون‌ها را نشان می‌دهند. این انحراف معیار بیانگر میزان پراکندگی داده‌ها و درجه تکرارپذیری آزمایش‌ها برای هر هندسه در یک دمای مشخص است، به‌طوری که مقادیر کوچک‌تر انحراف معیار نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر



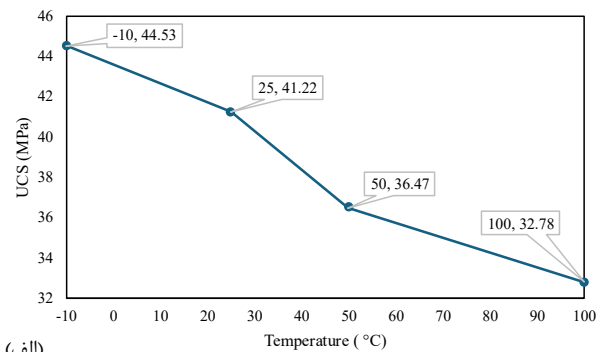
شکل ۸: مقایسه چقرمگی شکست حالت کششی برای هندسه‌های آزمایش شده در دماهای متفاوت.

۴/۲ درصدی). این روند بیانگر آن است که ماده در دماهای بالا رفتار شکننده‌تری از خود نشان می‌دهد، در حالی که در دماهای پایین کمی نرم‌تر و مقاوم‌تر نسبت به رشد ترک عمل می‌کند. شکل ۱۰ روند تغییرات شعاع ناحیه صدمه‌دیده در نوک ترک و چقرمگی نرمال‌شده نسبت به دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) را نشان می‌دهد. شعاع ناحیه صدمه‌دیده نوک ترک از رابطه‌ی  $R_{FPZ} = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t}\right)^2$  بدست می‌آید [۲۸]. بر اساس نتایج شکل ۱۰، هر دو پارامتر یعنی چقرمگی کششی نرمال‌شده و شعاع ناحیه صدمه‌دیده نوک ترک در دماهای زیر صفر بیشترین مقدار خود را نشان می‌دهند و با افزایش دما روندی کاملاً کاهشی دارند. در دمای منفی ۱۰ درجه هر چهار هندسه رفتار مقاوم‌تری از خود نشان داده و مقادیر چقرمگی و اندازه شعاع ناحیه صدمه‌دیده نوک ترک بزرگ‌تر است. با رسیدن به دمای مرجع ۲۵ درجه، مقادیر هر دو پارامتر به سطح میانی می‌رسد. افزایش بیشتر دما تا ۵۰ درجه موجب کاهش محسوس و یکنواخت این دو شاخص می‌شود و در نهایت در دمای ۱۰۰ درجه کمترین مقدار برای چقرمگی نرمال‌شده و کوچک‌ترین شعاع ناحیه صدمه‌دیده مشاهده می‌شود. این روند کلی بیانگر آن است که رفتار شکست ماده در دماهای پایین‌تر چقرمه‌تر و در دماهای بالا تردتر می‌شود

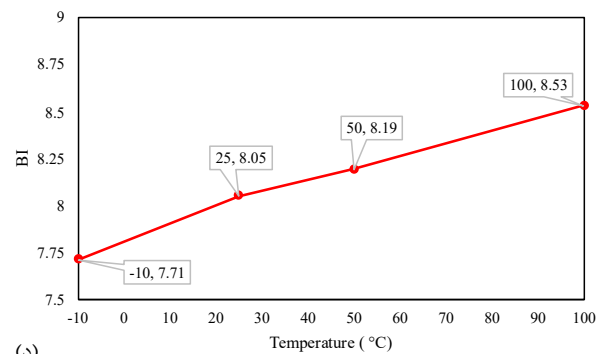
کششی ملات اولیه، بار نرمال‌شده در لحظه شکست و شاخص تردی با دما رفتار منظم و قابل پیش‌بینی را نشان می‌دهد. با کاهش دما از ۲۵ به منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری از ۴۱/۲۲ به ۴۴/۵۳ مگاپاسکال افزایش یافته و حدود ۸ درصد بهبود نشان می‌دهد. مقاومت کششی نیز از ۵/۱۲ به ۵/۷۷ مگاپاسکال رسیده که معادل افزایش ۱۲/۷ درصدی است. این افزایش‌ها بیانگر سخت‌تر شدن ریزساختار و پایداری بیشتر پیوندهای داخلی در دماهای پایین می‌باشد. برعکس، با افزایش دما تا ۵۰ و سپس ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری به ترتیب ۱۱/۵ و ۲۰/۵ درصد، و مقاومت کششی به ترتیب ۱۳/۱ و ۲۵ درصد کاهش یافته است که ناشی از فعال شدن ریزترک‌های حرارتی و کاهش پیوستگی فاز خمیر سیمان در دماهای بالا است. بار نرمال‌شده نیز رفتاری مشابه مقاومت فشاری داشته و در دمای منفی ۱۰ درجه افزایش حدود ۸ درصدی و در دمای ۱۰۰ درجه کاهش ۲۱ درصدی را نسبت به دمای مرجع نشان می‌دهد. در مقابل، شاخص تردی (نسبت مقاومت فشاری به کششی) با افزایش دما روند افزایشی دارد و از ۸/۰۵ در دمای ۲۵ درجه به ۸/۵۳ در دمای ۱۰۰ درجه می‌رسد (افزایش ۶ درصدی)، در حالی که در دمای زیر صفر به ۷/۷۱ کاهش یافته (کاهش



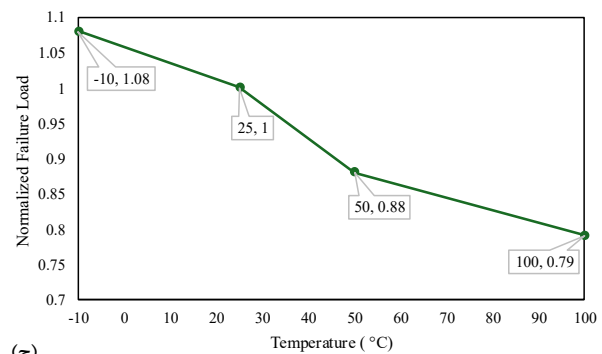
(ب)



(ف)

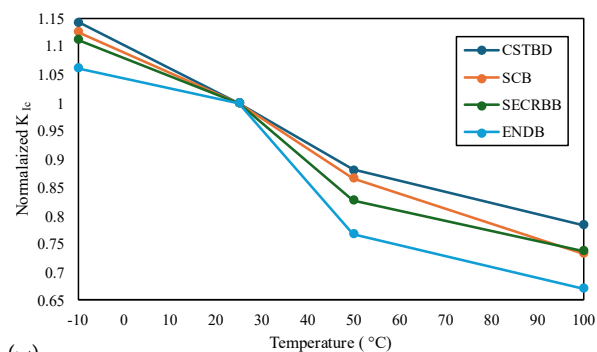


(د)

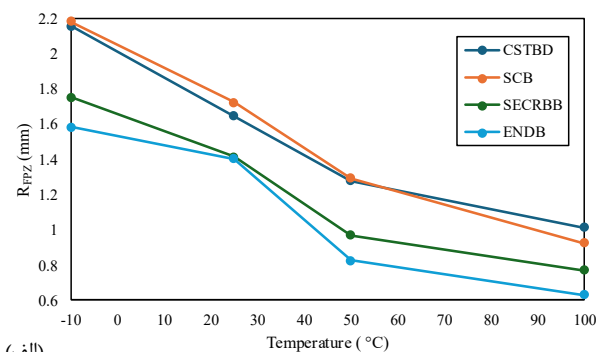


(ج)

شکل ۹: تغییرات الف) مقاومت فشاری و ب) کششی ملات اولیه بر حسب دما و ج) مقادیر نرمال شده بار در لحظه شکست و د) شاخص تردی نسبت به دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی گراد



(ب)



(ف)

شکل ۱۰: روند تغییرات شعاع ناحیه صدمه دیده و چقرمگی کششی نرمال شده.

افزایش چقرمگی شکست مشاهده شده در نمونه‌های آزمایش شده هم‌راستا با گزارش سایر پژوهشگران است که آن را ناشی از افزایش چقرمگی، قفل‌شدگی ساختاری و تأخیر در رشد ترک دانسته‌اند. از سوی دیگر، رفتار نمونه‌ها در دماهای بالاتر از دمای محیط نیز مشابه نتایج فنگ (در ماسه‌سنگ)، هو (در گرانیت) و ماهانتا (در

و توان ماده برای ایجاد ناحیه فرآیند شکست گسترده‌تر به صورت پیوسته با افزایش دما تضعیف می‌شود.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر در خصوص رفتار چقرمگی شکست تحت تأثیر دما، به‌خوبی با یافته‌های پژوهش‌های پیشین از جمله مطالعات فنگ [۱۸]، هو [۲۰] و ماهانتا [۲۱] تطابق دارد. در دماهای پایین‌تر،

سانتی‌گراد باعث کاهش قابل توجه چقرمگی شد که دلیل اصلی آن ایجاد ریزترک‌های حرارتی، تخریب تدریجی خمیر سیمان و کاهش پیوستگی ریزساختار معرفی می‌شود.

• تأثیر هندسه نمونه: پاسخ چقرمگی شکست حالت کششی به تغییرات دما به شدت تحت تأثیر هندسه نمونه قرار داشت:

○ نمونه‌های CSTBD و SCB بیش‌ترین حساسیت را به دماهای پایین (منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد) از خود نشان دادند و به ترتیب ۱۴/۴۴ و ۱۲/۶۶ درصد افزایش در چقرمگی داشتند.

○ نمونه‌های ENDB و SECRBB بیش‌ترین آسیب‌پذیری را در برابر دماهای بالا نشان دادند، به طوری که در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۳۳ و ۲۶/۲۴ درصد کاهش چقرمگی را تجربه کردند. این امر نشان می‌دهد که هندسه‌های با تمرکز تنش بالا (مانند ENDB) در دماهای بالا بسیار آسیب‌پذیرتر هستند.

• رفتار غیر یکنواخت: رابطه بین دما و چقرمگی شکست حالت کششی یکنواخت نبود و وابستگی شدیدی به نوع هندسه و مکانیسم بارگذاری داشت. این یافته بر ضرورت در نظر گرفتن اثر متقابل هندسه-دما در مدل‌سازی و طراحی سازه‌ها تأکید می‌کند.

دولومیت و ماسه‌سنگ) بوده است؛ به گونه‌ای که در تمامی موارد، چقرمگی شکست تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد روند افزایشی جزئی نشان داده و سپس با افزایش بیشتر دما، کاهش قابل توجهی در چقرمگی و گسترش ریزترک‌ها رخ داده است. در مطالعه حاضر نیز مشاهده شد که با افزایش دما، چقرمگی شکست نمونه‌ها کاهش یافته و ناحیه فرآیند شکست محدودتر می‌شود، که این رفتار کاملاً با مکانیزم‌های آسیب (خرابی) ناشی از حرارت، کاهش یکپارچگی ریزساختار و افت مدول گزارش شده در تحقیقات فنگ، هو و ماهانتا هم‌خوان است. به بیان دیگر، نتایج این پژوهش نه تنها در روند کلی افزایش چقرمگی در دماهای پایین و کاهش آن در دماهای بالا با مطالعات گذشته سازگار است، بلکه از منظر مکانیزم‌های فیزیکی حاکم بر رفتار شکست نیز انطباق قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تجربی تأثیر دما و هندسه نمونه بر چقرمگی شکست حالت کششی در ملات سیمانی پرداخته است. یافته‌های اصلی را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

• تأثیر دما: نتایج به وضوح نشان داد که دما یک پارامتر کلیدی مؤثر بر چقرمگی شکست است. به طور کلی، کاهش دما به ۱۰- درجه سانتی‌گراد منجر به افزایش چقرمگی شکست در تمامی هندسه‌ها شد که این امر ناشی از افزایش سفتی موضعی و محدودیت در گسترش ریزترک‌ها است. در مقابل، افزایش دما به ۵۰ و ۱۰۰ درجه

#### ۵- منابع

- [1] H. Qiu, Z. Zhu, M. Wang, F. Wang, Y. Ma, L. Lang, P. Ying, Study on crack dynamic propagation behavior and fracture toughness in rock-mortar interface of concrete, Eng Fract Mech 228 (2020) 106798.
- [2] 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, (2024).
- [3] Y. Saadati, J.-F. Chatelain, G. Lebrun, Y. Beauchamp, P. Bocher, N. Vanderesse, A study of the interlaminar fracture toughness of unidirectional flax/epoxy composites, Journal of Composites Science 4

- (2020) 66.
- [4] T.L. Anderson, T.L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, CRC press, 2005.
- [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 (2024) 73–91.
- [6] Fu, Jinwei, et al. Determination of mode I fracture toughness of brittle materials with a new method. *Acta Mechanica Sinica* 40.2 (2024): 423236.
- [7] Haeri, H. Simulating the crack propagation mechanism of pre-cracked concrete specimens under shear loading conditions. *Strength of Materials* 47.4 (2015): 618-632.
- [8] 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, *Eng Fract Mech* 296 (2024) 109830. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109830>.
- [9] T. Zhou, X. Yin, C. Zhou, P. Guo, J. Zhou, Influences of water saturation and strain rate on the mechanical and failure behavior of sandstone under direct shear test with constant normal pressure, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 175 (2024) 105684.
- [10] J. Jin, L. Wang, Z. Yan, G. Li, J. Wang, Effects of strain rate and bedding on shale fracture mechanisms, *Int J Mech Sci* 277 (2024) 109398.
- [11] 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.
- [12] H. Wang, L. Zhou, Z. Zhu, J. Chen, L. Ma, X. Shui, H. Zhang, Investigation of fracture characteristics of cracked granite suffered from different thermal treatments and water-cooling time, *Journal of Materials Research and Technology* 29 (2024) 286–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.060>.
- [13] 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.
- [14] 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 (2025) 79. <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00973-z>.
- [15] 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.
- [16] A. Dolatshahi, M. Arash, H. Molladavoodi, Recycled aggregate size effect on shear and tensile fracture toughness of SCB Eco-friendly cemented specimens, *Sci Rep* (2025).
- [17] J. Justo, J. Castro, S. Cicero, M.A. Sánchez-Carro, Influence of temperature on the fracture toughness of several rocks, in: *International Symposium on Energy Geotechnics*, Springer, 2018: pp. 352–359.
- [18] G. Feng, Y. Kang, T. Meng, Y. Hu, X. Li, The influence of temperature on mode I fracture toughness and fracture characteristics of sandstone, *Rock Mech Rock Eng* 50 (2017) 2007–2019.
- [19] R.D. Dwivedi, A.K. Soni, R.K. Goel, A.K. Dube, Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37 (2000) 1267–1275.
- [20] Y. Hu, Y. Hu, G. Zhao, P. Jin, Z. Zhao, C. Li, 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 (2022) 801–816.
- [21] B. Mahanta, T.N. Singh, P.G. Ranjith, Influence of thermal treatment on mode I fracture toughness of certain Indian rocks, *Eng Geol* 210 (2016) 103–114.
- [22] A. ASTM, C305-06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM Int, West Conshohocken (2015).
- [23] P.K. Mehta, *Advancements in concrete technology*, Concrete International 21 (1999) 69–76.
- [24] M.R.M. Aliha, A. Bahmani, S. Akhondi, Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration, *Mater Des* 86 (2015) 863–871.
- [25] K. Khan, N.A. Al-Shayea, Effect of specimen geometry and testing method on mixed mode I–II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia, *Rock Mech Rock Eng* 33 (2000) 179–206.
- [26] C. Atkinson, R.E. Smelser, J. Sanchez, Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test, *Int J*

- Fract 18 (1982) 279–291.
- [27] F. Mehri Sofiani, B. V Farahani, J. Belinha, Fracture toughness determination on an SCB specimen by meshless methods, *Applied Sciences* 12 (2022) 2633.
- [28] Bazant, Zdenek P., and Jaime Planas. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. Routledge, (2019).



## **Evaluation of temperature effect on the tensile fracture behavior of cementitious specimens with different geometries**

Maryam Mohammadi Ochmush; Mehdi Arash; Alireza Dolatshahi; Hamed Molladavoodi

1- Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 26 April 2026 Accepted: 06 June 2026

(\*Corresponding author: [davoodi@aut.ac.ir](mailto:davoodi@aut.ac.ir))

---

### **Keywords**

Tensile fracture toughness;  
Temperature effect;  
Specimen geometry;  
Fracture mechanics;  
Cement mortar

---

### **Abstract**

Cement-based composites in natural environments are often exposed to wide temperature fluctuations, which can significantly influence their fracture behavior. Since the mode-I fracture toughness is a key parameter in assessing the structural stability of such materials, this study experimentally investigates the coupled effect of temperature variation and specimen geometry on the mode-I fracture toughness of cement mortar. To this end, four different specimen geometries (CSTBD, SCB, SECRBB, and ENDB) were tested under four temperature levels within a thermal cycle. The results revealed a dual behavioral pattern: at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the fracture toughness increased by an average of 10.9% across all geometries, with the CSTBD specimen exhibiting the highest increase at 14.44%. This enhancement was attributed to the increased stiffness of the cementitious matrix and the restricted propagation of microcracks at low temperatures. In contrast, a continuous reduction in fracture toughness was observed as the temperature rose to  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which was associated with the formation of thermal microcracks and the gradual degradation of the cement paste. Under these conditions, the ENDB geometry showed the greatest vulnerability, with a 33% reduction. The findings clearly demonstrate that temperature sensitivity is strongly dependent on specimen geometry: CSTBD and SCB geometries exhibited the highest responsiveness to low temperatures, whereas ENDB and SECRBB geometries showed the greatest sensitivity to elevated temperatures. This study provides valuable insight for the optimal design of engineering structures exposed to thermal fluctuations.

---