

بررسی آزمایشگاهی و عددی روش‌های مرسوم در تعیین چقرمگی شکست مود I بتن

محمدرضا آبروشن^۱؛ مجید نوریان بیدگلی^{۱*}؛ هادی حائری^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- گروه مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرنند، زرنند، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵؛ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

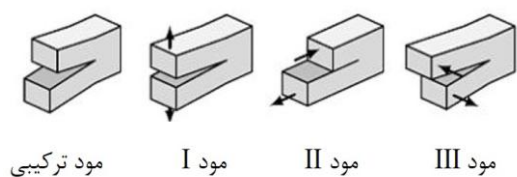
(*نویسنده مسئول: norijan@kashanu.ac.ir)

چکیده

چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی مواد شبه‌سنگی به شمار می‌رود که نقش تعیین‌کننده‌ای در تحلیل پایداری سازه‌های بتنی و سنگی دارد. در سال‌های اخیر، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) چند هندسه مختلف شامل SCB، CB، CCNBD و SR را برای تعیین چقرمگی شکست مود I پیشنهاد کرده است. با این حال، گزارش‌های متعددی نشان داده‌اند که مقادیر به‌دست‌آمده از این روش‌ها یکسان نبوده و اختلاف محسوسی میان آن‌ها وجود دارد. در این پژوهش به‌منظور بررسی دقیق این موضوع، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتنی استاندارد طراحی و اجرا شد و مقادیر چقرمگی شکست تعیین گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر چقرمگی شکست به نوع هندسه وابسته بوده و بیشترین مقدار چقرمگی برای بتن با مقاومت 30 MPa در نمونه CCNBD به میزان $0.5 \text{ MPa m}^{0.5}$ و کمترین مقدار در نمونه SCB به میزان $0.34 \text{ MPa m}^{0.5}$ حاصل شده است که اختلافی در حدود ۲۶.۴ درصد بین این مقادیر وجود داشت. همچنین مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از روش اجزای مجزا در نرم‌افزار YADE انجام شد. پیش از شبیه‌سازی هندسه‌ها، پارامترهای میکروسکوپی مدل از طریق آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و کشش غیرمستقیم (BTS) کالیبره شدند. نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی هندسه‌های مختلف نشان داد که مدل اجزای مجزا قادر است مقادیر چقرمگی شکست و همچنین الگوهای شکست را با دقت بالا بازتولید نماید. اختلاف میان داده‌های آزمایشگاهی و عددی در تمامی هندسه‌ها کمتر از ۲ تا ۳ درصد بود. یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که انتخاب هندسه آزمایش اثر مستقیم و چشمگیری بر مقدار چقرمگی شکست دارد و استفاده از مدل‌سازی عددی می‌تواند ابزاری کارآمد برای تفسیر و تحلیل این اختلافات باشد.

چقرمگی شکست، نمونه‌های SCB، CB، CCNBD و CNSRB، مدل‌سازی عددی، روش اجزای مجزا (DEM)، مکانیک شکست سنگ، مواد شبه سنگی

واژگان کلیدی



شکل ۱- حالات مختلف بارگذاری [۳]

در شرایط واقعی، ترک‌ها اغلب تحت تأثیر ترکیبی از بارگذاری‌ها (مود مختلط) قرار دارند. اما برای سنگ‌ها، حالت *I* اغلب در مقایسه با دو حالت شکست دیگر، بیشتر اتفاق می‌افتد. در طول چند دهه اخیر، پژوهشگران روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود *I* ارائه کرده‌اند. از جمله مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به آزمون دیسک برزیلی با ترک چورون^۱ (CCNBD^۲) [۴]، نمونه دیسک برزیلی با سطوح صاف (FBD^۳) [۵]، و نمونه استوانه-ای با ترک چورون (CB^۴) [۶]، نمونه دیسک برزیلی سوراخ‌دار با سطوح صاف (HFBD^۵) [۷]، نمونه دیسک برزیلی سوراخ‌دار ترک‌دار با سطوح صاف (HCFBD^۶) [۸]، نمونه استوانه کوتاه (SR^۷) [۶] و نمونه نیم‌دایره‌ای با ترک مستقیم (SCB^۸) [۹-۱۳] اشاره کرد. با وجود این، انتظار می‌رود که به دلیل ذاتی بودن پارامتر چقرمگی شکست، مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف برای یک نوع ماده خاص، همخوانی مناسبی داشته باشند. اما شواهد تجربی نشان می‌دهد که نتایج اندازه‌گیری‌ها وابستگی بالایی به نوع نمونه و شرایط آزمایش دارند و اختلاف‌هایی تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد نیز گزارش شده است [۱۴-۱۵].

از این‌رو، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) چند روش استاندارد برای تعیین چقرمگی شکست مود *I* پیشنهاد کرده است. بدین منظور دو روش نمونه استوانه‌ای با ترک چورون (CB) و آزمایش استوانه کوتاه (SR) در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد گردید [۱۴]. در تحقیقی دیگر، تات اوغلو و کلس نیز که بر روی نمونه‌های آندزیت و مرمریت مطالعه می‌کردند،

۱- مقدمه

مکانیک شکست سنگ به‌عنوان چارچوبی بنیادی در شناسایی و پیش‌بینی آغاز و گسترش شکست در سازه‌های سنگی مطرح است. این علم با فراهم‌سازی امکان ارزیابی کمی انتشار ترک‌ها و توزیع تنش، نقشی کلیدی در توسعه راهبردهای افزایش پایداری و ایمنی سازه‌های مهندسی ایفا می‌کند. اهمیت این موضوع تنها به حوزه عمرانی محدود نمی‌شود، بلکه در بهره‌برداری از منابع معدنی به کمک روش‌هایی همچون استخراج مکانیکی، انفجار و شکست هیدرولیکی نیز کاربرد گسترده دارد [۱].

در این میان، ضریب شدت تنش به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترها در مکانیک شکست، بیانگر شرایط تنش در نوک ترک تحت بارگذاری‌های گوناگون است. مقدار بحرانی این ضریب که به‌عنوان چقرمگی شکست شناخته می‌شود، شاخصی از مقاومت ماده در برابر گسترش ترک محسوب می‌گردد. این پارامتر در بهینه‌سازی فرآیندهای خردایش، تحلیل پایداری سازه‌های سنگی و شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای مکانیکی همچون حفاری و برش سنگ کاربردی اساسی دارد [۲].

یک سازه سنگی یا سنگ مانند می‌تواند تحت شرایط بارگذاری متفاوتی قرار گیرد. پاسخ سازه به شرایط بارگذاری مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بر اساس شرایط بارگذاری تعیین می‌شود. انواع شرایط بارگذاری بر روی سنگ بر اساس انتشار ترک عبارتند از (شکل ۱):

الف) حالت کششی یا بازشونده (حالت *I*) که در آن سطوح ترک در جهت عمود بر سطح ترک از یکدیگر جدا می‌شوند.
ب) حالت برشی یا لغزشی (حالت *II*) که در آن سطوح ترک در صفحه ترک جابجا می‌شوند اما عمود بر سطح ترک از هم جدا می‌شوند.
ج) حالت پارگی (حالت *III*) که در آن سطوح ترک به موازات جبهه ترک جابجا می‌شوند.

د) حالت ترکیبی یا مختلط که می‌تواند بر اساس ترکیب حالت‌های بارگذاری از حالت اول تا سوم اتفاق بیافتد [۳].

¹ chevron

² Cracked Chevron Notched Brazilian Disc

³ Flattened Brazilian disc

⁴ Chevron Bend

⁵ Holed-Flattened Brazilian Disc

⁶ Holed-Cracked Flattened Brazilian Disc

⁷ Short Rod

⁸ Semi-Circular Bend

اختلاف‌های معناداری میان نتایج به‌دست‌آمده از این روش‌ها وجود دارد. افزون بر این، بیشتر تحقیقات صرفاً بر داده‌های آزمایشگاهی تکیه داشته‌اند، در حالی که فرآیند گسترش شکست درون نمونه‌ها به‌طور مستقیم قابل مشاهده نیست و تحلیل‌ها عموماً محدود به سطح نمونه باقی می‌مانند. این موضوع موجب شده است که مکانیزم‌های واقعی شکست به‌طور کامل شناخته نشود. در چنین شرایطی، شبیه‌سازی‌های عددی در ردیابی فرآیند شکست پیشرونده در نمونه‌های سنگ و توصیف مکانیسم شکست در نمونه مؤثر هستند [۲۲].

شبیه‌سازی‌های عددی در این زمینه به‌عنوان ابزاری کارآمد مطرح شده‌اند، زیرا امکان اجرای آزمایش‌های مکرر با نمونه‌های دقیقاً مشابه را فراهم کرده و اثر خطاهای هندسی یا ناهمگونی مصالح را حذف می‌کنند. افزون بر این، مدل‌سازی عددی این قابلیت را دارد که پیش از انجام آزمایش‌های واقعی، یک برآورد اولیه از نتایج ارائه دهد و جزئیات فرآیند شکست را در هر لحظه دلخواه حتی در شرایط دینامیکی در دسترس قرار دهد.

روش‌های عددی رایج در مکانیک شکست شامل روش المان محدود (FEM) [۲۳]، روش المان مجزا (DEM) [۲۴]، روش فنر شبکه‌ای مجزا (DLSM^۹) [۲۵] و روش منیفولد عددی (NMM^{۱۰}) [۲۶] هستند. در این میان، روش اجزای مجزا به دلیل ویژگی‌هایی همچون بازتولید شکست مواد شکننده، ادغام ریزترک‌ها و تشکیل ماکروتترک‌ها، شبیه‌سازی مستقیم میکرومکانیسم‌های فیزیکی و سرعت محاسباتی بالا در مقیاس بزرگ [۲۷-۲۸]، به‌عنوان یکی از توانمندترین ابزارها برای تحلیل شکست سنگ‌ها شناخته می‌شود.

در این راستا، بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی بر پایه روش اجزای مجزا، در کنار آزمایش‌های تجربی، رویکردی کارآمد برای ارزیابی تطبیقی روش‌های پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ را فراهم می‌آورد و می‌تواند تصویر روشنی از قابلیت اعتماد هر یک از این روش‌ها ارائه کند.

در این مطالعه، به بررسی مقادیر چقرمگی شکست چهار هندسه پیشنهادی (SR، CB، CCNBD و SCB) برای مواد شبه‌سنگی (بتن) پرداخته شده و میزان تفاوت میان

نشان دادند که مقادیر چقرمگی نمونه‌های نیم دایره ای با شیار مستقیم کمتر از نمونه‌ها دیسکی با شیار چورون است [۱۶].

سپس در سال ۱۹۹۵، آزمایش دیسک برزلی با ترک چورون (CCNBD) به‌عنوان روش پیشنهادی ISRM برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست در حالت I معرفی شدند [۱۷]. این روش به دلیل ویژگی‌های آن، از جمله آماده‌سازی ساده‌تر نمونه، شرایط ساده‌تر آزمایش، بار شکست بالاتر، هندسه‌های نمونه بزرگ‌تر و مناسب بودن برای شکست حالت خالص II یا حالت ترکیبی (یعنی حالت I و حالت II)، به‌طور گسترده برای مطالعات شکستگی سنگ در دو دهه گذشته مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸].

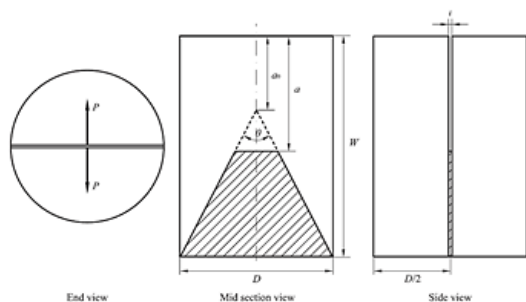
با این حال، بسیاری از نتایج تجربی نشان می‌دهند که داده‌های گزارش‌شده توسط این آزمایش با داده‌های گزارش‌شده توسط آزمایش‌های SR و CB اختلاف دارد. همچنین مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های آزمون استوانه کوتاه از نمونه‌های استوانه‌ای با ترک مستقیم بیشتر است و چنانچه نمونه‌های استوانه‌ای با ترک مستقیم پیش ترک‌دار شوند، نتایجی نزدیک به نمونه‌های استوانه کوتاه که تصحیح غیر خطی دارند بدست می‌آید [۱۹].

نمونه نیم دایره‌ای با ترک مستقیم (SCB) که ابتدا توسط چونگ و همکاران (۱۹۸۴) پیشنهاد شد، اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۲۰]. برخی از مزایای نمونه‌های SCB عبارتند از: آماده‌سازی راحت نمونه (مستقیماً از مغزه‌های سنگ)، هندسه و پیکربندی بارگذاری ساده، روش آزمایش ساده و اعمال بار فشاری، که برای سنگ‌ها مناسب‌تر است. علاوه بر این، SCB نمونه مناسبی برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ در دماهای بالا، نرخ کرنش بالا و فشارهای محصورکننده بالا است [۲۱]. در تحقیقی دیگر مشخص شد مقادیر چقرمگی نمونه‌های نیم دایره‌ای با ترک مستقیم کمتر از نمونه‌های دیسکی با ترک چورون است [۱۶]. بنابراین، بررسی وابستگی مقادیر چقرمگی اندازه‌گیری شده به هندسه نمونه، منجر به تعیین چقرمگی شکست سنگ به‌طور معقول و قابل اعتماد، درک عمیق پدیده شکست سنگ و ارائه مبنای نظری بهتر برای کاربردهای مهندسی مکانیک شکست سنگ می‌شود.

به هر حال، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که همچنان

⁹ Distinct lattice spring model

¹⁰ Numerical Manifold Method



شکل ۲- هندسه و نحوه بارگذاری نمونه SR

جدول ۱- مشخصات ابعاد نمونه در آزمایش SR [۳۱]

پارامتر هندسی	مقدار	میزان خطای مجاز
قطر نمونه (D)	۳۵ تا ۵۰ mm	بزرگتر از ۱۰ برابر اندازه دانه ها
طول نمونه (W)	۱/۴۵D	±۰/۰۲D
فاصله تا نوک شکاف چورون (a ₀)	۰/۴۸D	±۰/۰۲D
زاویه شکاف چورون (θ)	۵۴/۶°	±۱°
طول شکاف چورون (W-a ₀)	۰/۹۷D	±۰/۰۲D
ضخامت ترک (t)	≥ ۰/۰۳D	هر کدام بزرگتر باشد

چقرمگی شکست در این روش با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{SR} = C_K 24 F_{max} / D^{1.5} \quad (1)$$

که در آن، K_{SR} چقرمگی شکست، F_{max} بار شکست، D قطر نمونه و C_k ضریب تصحیح وابسته به ابعاد هندسه است که از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_k = (1 - 0.6\Delta w/D + 1.4\Delta a_0/D - 0.01\Delta\theta) \quad (2)$$

که در آن، Δw ، Δa_0 و $\Delta\theta$ تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر اسمی را نشان می‌دهد.

با وجود استاندارد بودن، آماده‌سازی نمونه SR نسبتاً پیچیده است [۳۲] و در عمل با محدودیت‌هایی همراه است؛ از جمله نیاز به نگهدارنده‌های خاص برای اعمال بار کششی و

آن‌ها ارزیابی گردیده است. بدین منظور، مقادیر چقرمگی شکست ابتدا در آزمایشگاه و بر اساس استاندارد های ISRM محاسبه شد و سپس با استفاده از مدلسازی عددی سه‌بعدی مبتنی بر روش اجزای مجزا در نرم‌افزار YADE تکمیل گردید. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی، علاوه بر سنجش میزان همخوانی این دو رویکرد، امکان تحلیل عمیق‌تر علل اختلاف میان هندسه‌های مختلف را نیز فراهم می‌آورد. این رویکرد می‌تواند درک روشن‌تری از رفتار شکست مواد شبه‌سنگی ارائه کرده و راهنمایی مؤثر برای انتخاب روش مناسب در کاربردهای مهندسی سنگ و سازه‌های زیرزمینی فراهم آورد.

۲- تعیین چقرمگی شکست

آزمایش‌های مکانیک شکست نسبت به سایر آزمون‌های سنگ، ویژگی خاصی دارند؛ زیرا در این آزمایش‌ها نمونه باید دارای ترک اولیه با هندسه مشخص باشد تا اثر گسترش ترک تحت شرایط بارگذاری مختلف بررسی شود. انتخاب روش مناسب برای تعیین چقرمگی شکست به عوامل متعددی از جمله مقاومت سنگ، تجهیزات موجود، سهولت آماده‌سازی نمونه و نوع بارگذاری بستگی دارد [۲۹].

در این پژوهش، چهار نمونه پیشنهادی ISRM شامل SR، CB، CCNBD و SCB با استفاده از بتن ساخته شدند تا مقادیر چقرمگی شکست مود I مورد مقایسه قرار گیرند. از آنجا که نمونه‌ها پس از آزمایش شکسته می‌شوند، برای هر هندسه پنج نمونه آماده و آزمایش شد. تمامی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، تحت بارگذاری قرار گرفتند. در هر آزمایش، ترک اولیه به‌صورت کنترل‌شده در مرکز نمونه ایجاد شد و سپس بارگذاری مطابق با هندسه هر روش اعمال گردید.

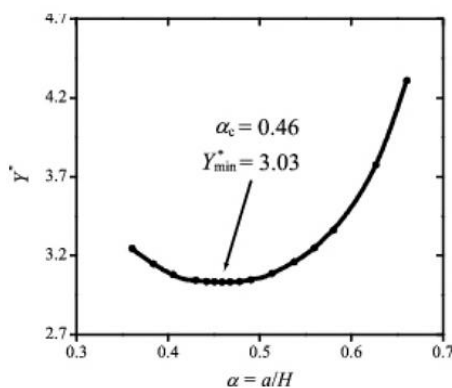
۱-۲ روش استوانه کوتاه (SR)

روش استوانه کوتاه یکی از روش‌های پیشنهادی ISRM است که در آن بار کششی مستقیماً بر سطح دارای شکاف اولیه اعمال می‌شود [۳۰]. این روش نخستین بار توسط بارکر (۱۹۷۷) معرفی و بعدها در سال ۱۹۸۸ توسط ISRM به‌عنوان روش استاندارد اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود I پذیرفته شد. شکل ۲ هندسه و نحوه بارگذاری این نمونه را نشان می‌دهد و مشخصات ابعادی پیشنهادی در جدول ۱ آمده است.

یعنی H, D, a_1 و a_0 بستگی دارد و می‌توان آن را با ابزارهای عددی تعیین کرد. حداقل فاکتور شدت تنش نرمال شده Y_{min}^* نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Y^* = \frac{K_I H \sqrt{D}}{P} \quad (4)$$

بنابراین، فاکتور شدت تنش بحرانی/حداقل نرمال شده (Y_{min}^*) را می‌توان مقدار $3/0.3$ برای نمونه CNSRB تعیین کرد که در آن Y^* فاکتور شدت تنش نرمال شده است. تغییر Y^* در مقابل طول ترک نرمال شده $\alpha (= a/H)$ برای نمونه CNSRB در شکل ۴ نشان داده شده است.



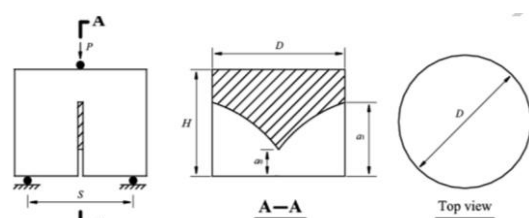
شکل ۴- تغییر فاکتور شدت تنش نرمال شده با طول ترک نرمال شده برای نمونه CNSRB [۳۳]

۲-۲ روش استوانه با ترک چورون (CB)

آزمون CB نخستین بار توسط اوچترلونی (۱۹۸۸) معرفی و در سال ۲۰۰۷ توسط ISRM به‌عنوان یکی از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری چقرمگی شکست پذیرفته شد. در این روش، نمونه استوانه‌ای دارای ترک چورون تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار می‌گیرد. هندسه نمونه در شکل ۵ و ابعاد پیشنهادی در جدول ۳ نشان داده شده است.

حساسیت زیاد به کیفیت تماس میان نمونه و دستگاه آزمایش. همچنین بار شکست در این روش معمولاً پایین است که موجب دشواری در استفاده برای سنگ‌های نرم می‌شود [۱۶].

به همین دلیل، وی و همکاران (۲۰۱۸) روش CNSRB را به‌عنوان جایگزینی برای SR پیشنهاد کردند. در این روش، نمونه استوانه‌ای دارای ترک چورون تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار می‌گیرد. این تغییر باعث می‌شود اعمال بارگذاری ساده‌تر شده و مقادیر بار شکست بالاتری نسبت به روش سنتی SR حاصل شود [۳۳]. هندسه و ابعاد این نمونه در شکل (۳) و جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۳- هندسه و نحوه بارگذاری نمونه CNSRB پیشنهاد شده توسط وی و همکاران [۳۳]

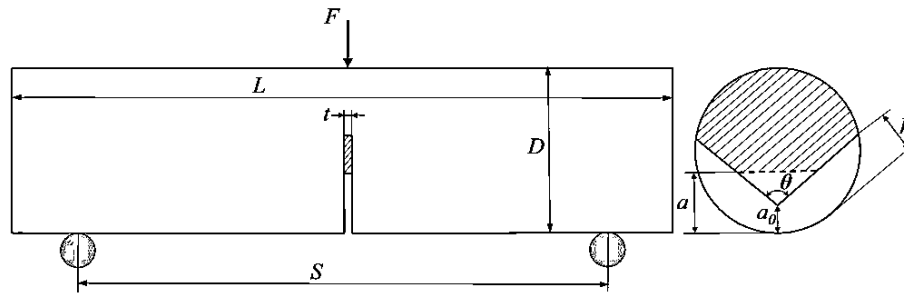
جدول ۲- مشخصات ابعاد نمونه در آزمایش CNSRB [۳۳]

پارامترهای هندسی	مقادیر پیشنهادی
قطر D	50 mm
ارتفاع H	40 mm ($H/D=0.8$)
طول نوک ترک چورون a_0	10 mm ($a_0/D=0.2$)
طول انتهای ترک چورون a_1	27.7 mm ($a_1/D=0.554$)
فاصله تکیه گاهی S	40 mm ($S/D=0.8$)

در این حالت، چقرمگی شکست حالت I را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد [۳۳]:

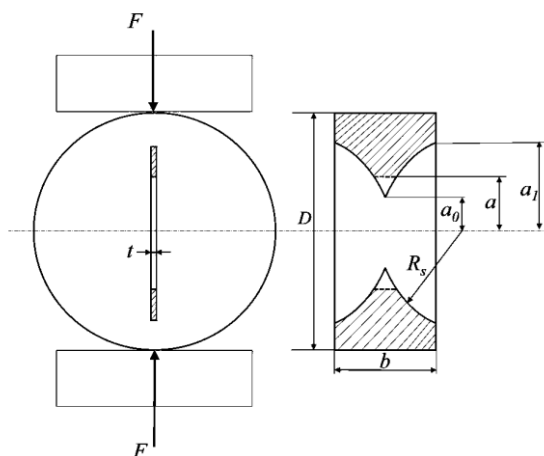
$$k_{Ic} = \frac{p_{max}}{H\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (3)$$

که در آن، p_{max} بار شکست و Y_{min}^* حداقل فاکتور شدت تنش نرمال شده است. مقدار Y_{min}^* به هندسه ی نمونه،



شکل ۵- هندسه و نحوه بارگذاری نمونه CB [۳۱]

۱۹۹۵ به عنوان یکی از روش‌های پیشنهادی ISRM شناخته شد [۱۷]. این آزمون بر اساس هندسه دیسک برزیلی طراحی شده که دارای ترک چورون مرکزی است. هندسه و ابعاد استاندارد این نمونه در شکل ۶ و جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۶- هندسه و نحوه بارگذاری نمونه CCNBD [۱۷]

جدول ۴- ابعاد نمونه استاندارد روش CCNBD [۱۷]

پارامتر هندسی	مقدار	پارامتر بدون بعد متناظر
قطر (D)	۷۵	-
ضخامت (B)	۳۰	$a_B = B/R = 0.8$
طول نوک ترک چورون (a_0)	۹/۸۹	$a_0 = a_0/R = 0.2637$
طول انتهای ترک چورون (a_1)	۲۴/۳۷	$a_1 = a_1/R = 0.65$

در این حالت نیز، چقرمگی شکست در این روش به کمک

جدول ۳- مشخصات ابعاد نمونه در آزمایش CB [۳۱]

پارامتر هندسی	مقدار	میزان خطای مجاز
قطر نمونه (D)	۳۵ تا ۵۰ mm	بزرگتر از ۱۰ برابر اندازه دانه ها
طول نمونه (L)	۴D	بزرگتر از ۳.۵D
فاصله نقاط تکیه گاهی (S)	$2/3D$	$\pm 0.02D$
زاویه شکاف چورون (θ)	90°	$\pm 1^\circ$
طول ترک (a_0)	$0.15D$	$\pm 0.1D$
ضخامت ترک (t)	$0.02D \geq$ یا ۱ mm	هر کدام که بزرگتر باشد

چقرمگی شکست در این روش طبق رابطه زیر محاسبه می شود [۳۱]:

$$K_{CB} = A_{min} F_{max} / D^{1.5} \quad (5)$$

که در آن، K_{CB} چقرمگی شکست نمونه CB، F_{max} بار در لحظه شکست، D قطر نمونه و A_{min} به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_{min} = [1.835 + 7.15a_0/D + 9.85(a_0/D)^2]S/D \quad (6)$$

که در آن، S فاصله بین نقاط تکیه گاهی و a_0 فاصله نوک شکاف چورون از سطح نمونه است.

۲-۳ روش دیسک برزیلی با ترک چورون (CCNBD)

روش CCNBD ابتدا در سال ۱۹۸۵ معرفی شد و از سال

رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$K_{IC} = \left(\frac{P_{max}}{B} \cdot \sqrt{R} \right) \cdot Y_{min}^* \quad (7)$$

که در آن، R شعاع نمونه، B ضخامت نمونه، P_{max} بار فشاری در لحظه شکست و Y_{min}^* ضریب شدت تنش بحرانی بدون بعد می‌باشد. برای محاسبه ضریب شدت تنش بحرانی بدون بعد در نمونه CCNBD رابطه زیر پیشنهاد شده است [۱۸]:

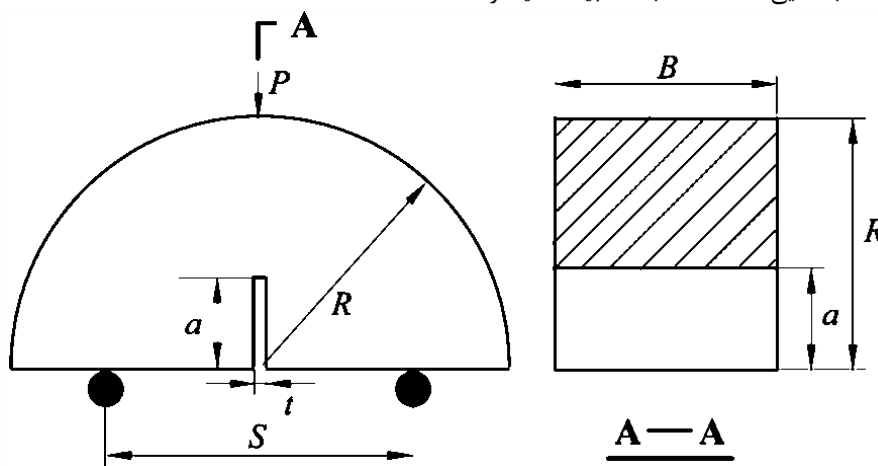
$$Y_{min}^* = u e^{v a_1} \quad (8)$$

که در آن، u و v ثابت‌هایی هستند که با a_0/R و

$a_B = B/R$ محاسبه شده‌اند. به هر حال، این روش به دلیل سادگی آماده‌سازی و قابلیت اعمال بارهای بالا، در مطالعات شکست سنگ به‌طور گسترده استفاده می‌شود.

۴-۲ روش نیم دایره‌ای با ترک مستقیم (SCB)

روش SCB نخستین بار توسط چانگ و کروپو (۱۹۸۴) معرفی و در سال ۲۰۱۴ به‌عنوان یکی از روش‌های پیشنهادی ISRM استاندارد شد [۹]. در این روش، نمونه نیم‌دایره‌ای با ترک مستقیم تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای قرار می‌گیرد (شکل ۷). ابعاد استاندارد نمونه در جدول ۵ آمده است.



شکل ۷- هندسه و نحوه بارگذاری نمونه SCB [۹]

[۹]:

$$K_{IC} = Y^* \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (9)$$

که در آن، P_{max} بار فشاری در لحظه شکست، a طول ترک، R شعاع نمونه، B ضخامت نمونه و Y^* فاکتور بدون بعد شدت تنش است که می‌توان آن را از رابطه زیر محاسبه نمود:

جدول ۵- ابعاد نمونه استاندارد روش SCB [۹]

مقدار	پارامتر هندسی
بزرگتر از ۱۰ برابر اندازه دانه ها یا mm ۷۶	قطر نمونه (D)
بزرگتر از ۰/۴D یا mm ۲۰	ضخامت نمونه (B)
$0.4 \leq \frac{a}{R} (= \beta) \leq 0.6$	طول ترک (a)
$0.5 \leq \frac{S}{2R} \leq 0.8$	فاصله تکیه‌گاهی (S)

چانگ و کروپو در سال ۱۹۸۴ برای نمونه نیمه دیسک رابطه زیر را به منظور تعیین فاکتور شدت تنش ارائه دادند

(سروکنترل) شرکت Matest ایتالیا واقع در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه کاشان انجام شده است. دقت کنترل نیرو در این دستگاه ± 0.5 کیلو نیوتن و دقت اندازه‌گیری جابجایی ± 0.1 میلی‌متر می‌باشد. کلیه آزمون‌ها با سرعت 0.12 میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد تا اثرات نرخ بارگذاری و رفتار دینامیکی بر نتایج به حداقل برسد.

هر آزمایش پنج بار تکرار گردید تا اطمینان کافی از صحت داده‌ها حاصل شود.

ابعاد نمونه‌ها مطابق با استانداردهای ISRM انتخاب شد:

- نمونه CNSRB با قطر 50 میلی‌متر، ارتفاع 40 میلی‌متر و طول ترک 10 میلی‌متر (شکل ۸-الف).
- نمونه CB با قطر 54 میلی‌متر، طول 216 میلی‌متر و طول ترک چورون 8.1 میلی‌متر (شکل ۸-ب).
- نمونه CCNBD با قطر 75 میلی‌متر، ضخامت 30 میلی‌متر و طول ترک چورون $9/89$ میلی‌متر (شکل ۸-ج).
- نمونه SCB با قطر 75 میلی‌متر، ضخامت 30 میلی‌متر، فاصله تکیه‌گاهی 60 میلی‌متر و طول ترک $37/5$ میلی‌متر (شکل ۸-د).

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، تعداد نسبتاً محدود نمونه‌ها (5 عدد برای هر هندسه) است. اگرچه این تعداد مطابق با استانداردها و پژوهش‌های پیشین بوده و نتایج تکرارپذیری مناسبی نشان دادند، اما به منظور افزایش قابلیت تعمیم، توصیه می‌شود در تحقیقات آتی از تعداد نمونه‌های بیشتری استفاده شود تا تحلیل‌های آماری دقیق‌تری امکان‌پذیر گردد.

شایان ذکر است که در فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها، امکان دارد که اختلاف جزئی در ضخامت ایجاد شود. به همین دلیل، پیش از انجام آزمون‌ها، ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری و کنترل گردید و نمونه‌هایی که اختلاف آن‌ها از محدوده مجاز فراتر بود حذف شدند. لذا، اختلاف‌های موجود در نمونه‌های آزمایش‌شده کمتر از چند درصد بوده و مطابق دستورالعمل ISRM، تأثیر معناداری بر نتایج آزمون نداشت.

در این پژوهش، تمامی شرایط مربوط به جنس نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد. با این حال، لازم به ذکر است که نسبت پارامترهای هندسی نظیر طول شیار لبه‌ای در تمامی هندسه‌ها یکسان انتخاب نگردید. دلیل این موضوع آن است که هر یک از روش‌های مرسوم مورد استفاده در این مطالعه

$$Y^* = -1.297 + 9.516 \left(\frac{s}{2R} \right) - (0.47 + 16.457(s/2R))\beta + (1.071 + 34.401(s/2R))\beta^2 \quad (10)$$

به هر حال، این روش به دلیل سادگی آماده‌سازی و کاربردپذیری بالا در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است، هرچند برخی مطالعات نشان داده‌اند که مقادیر چقرمگی شکست در این روش کمتر از سایر هندسه‌هاست [۱۶].

۳- آزمون‌های آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه‌های بتنی مورد استفاده در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ II، ماسه سیلیسی و آب شرب استفاده شد. با توجه به مطالعات پیشین، طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس نسبت حجمی ماسه به سیمان $1:1$ و نسبت آب به سیمان 0.5 در نظر گرفته شد [۳۴]. لازم به ذکر است، در این پژوهش اثر اندازه ذرات به‌طور مستقیم بررسی نگردید. با این حال، به‌منظور جلوگیری از تأثیر این عامل بر نتایج، دانه‌بندی ماسه انتخابی کنترل شده و در تمامی نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد. بنابراین اختلاف در مقادیر چقرمگی شکست صرفاً ناشی از تفاوت هندسه و نحوه بارگذاری نمونه‌ها بوده است.

فرآیند آماده‌سازی نمونه طبق استاندارد ASTM C305-14 انجام شد. بدین ترتیب، ابتدا سیمان به آب افزوده و مخلوط به مدت 30 ثانیه هم زده شد. سپس ماسه به تدریج اضافه گردید و عملیات اختلاط به مدت 30 ثانیه دیگر ادامه یافت. در مرحله بعد، ملات چسبیده به دیواره ظرف به داخل مخلوط بازگردانده شد و هم‌زدن به مدت یک دقیقه دیگر با سرعت متوسط ادامه یافت. ملات آماده‌شده بلافاصله در قالب‌های استاندارد ریخته شد و برای تراکم و حذف حباب‌های هوا، قالب‌ها به آرامی بر سطح سخت کوبیده شدند. نمونه‌ها پس از 24 ساعت از قالب جدا شده و به مدت 28 روز در داخل آب مطابق الزامات استاندارد ملی ایران شماره 17040 ، در دمای 2 ± 23 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند [۳۵].

برای ایجاد ترک مصنوعی در مرکز نمونه‌ها، از تیغه فلزی با ضخامت 1 میلی‌متر استفاده شد. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفتند. بارگذاری با دستگاه جک اتومات

بارگذاری، حتی در صورت یکسان بودن سایر عوامل، می‌تواند منجر به اختلاف معنادار در مقادیر چقرمگی شکست گردد. بنابراین، نتایج این مطالعه بیانگر آن است که انتخاب هندسه آزمون نقش اساسی در تعیین مقدار چقرمگی شکست دارد.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۸- نحوه بارگذاری و شکست نمونه از نوع الف) CNSRB ب) CB، ج) CCNBD و د) SCB

جدول ۶ مقادیر بار شکست و چقرمگی شکست به دست آمده از آزمایش‌های چهار هندسه مختلف را ارائه می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار چقرمگی شکست مربوط به نمونه CCNBD بوده حال آنکه، نمونه SCB کمترین مقدار چقرمگی شکست را نشان داد. همچنین

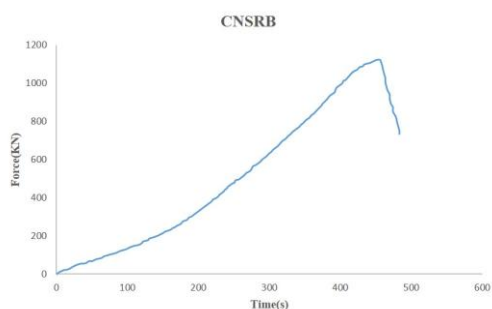
(SCB، CB، CCNBD و CNSRB) دارای الزامات و دستورالعمل‌های استاندارد خاص خود بوده و این نسبت‌ها مطابق با همان دستورالعمل‌ها تعریف و اجرا شدند. بنابراین، تفاوت در نتایج نهایی تنها ناشی از اختلاف ذاتی در هندسه و شرایط بارگذاری این روش‌ها است. هدف از این کار نشان دادن این واقعیت است که حتی با یکسان بودن شرایط اصلی آزمایش، تغییر در هندسه و نحوه بارگذاری در روش‌های مرسوم می‌تواند منجر به اختلاف معنادار در مقادیر چقرمگی شکست گردد.

در شکل ۸، نحوه بارگذاری و الگوی شکست مشاهده شده برای چهار هندسه مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه CNSRB (شکل ۸-الف)، ترک از نوک شکاف چورون آغاز شده و به صورت یکنواخت به سمت لبه نمونه گسترش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده کارایی ترک چورون در هدایت مسیر شکست و کاهش حساسیت به شرایط لبه‌ای است. همچنین در نمونه CB (شکل ۸-ب)، ترک از نوک شکاف چورون به سمت بالا رشد کرده و در میانه طول نمونه مسیر خود را ادامه داده است. شکست در این هندسه غالباً پایدار بوده و بار شکست نسبتاً بالایی ثبت شده است. در نمونه CCNBD (شکل ۸-ج)، ترک از مرکز دیسک آغاز شده و به طور تقریباً متقارن به طرفین گسترش یافته است. این الگو بیانگر توزیع متقارن تنش کششی در نمونه و توانایی بالای این روش در ایجاد شکست پایدار است. همچنین در نمونه SCB (شکل ۸-د)، ترک مستقیم از شکاف اولیه به سمت پایین رشد کرده و در محدوده تکیه‌گاه‌ها منجر به شکست نهایی نمونه شده است. در این هندسه، تمرکز تنش در نوک ترک مستقیم موجب بار شکست پایین‌تر نسبت به سایر روش‌ها گردید.

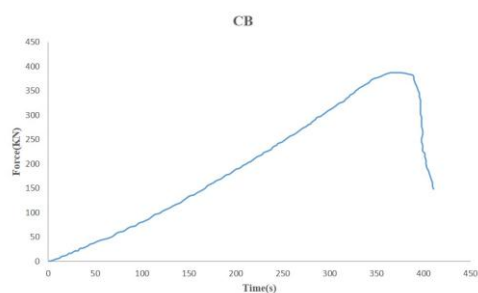
در مجموع این مشاهدات نشان می‌دهد که نوع هندسه نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه آغاز و گسترش ترک دارد و می‌تواند علت اصلی اختلاف در مقادیر چقرمگی شکست میان روش‌های مختلف باشد. لازم به تأکید است که هندسه‌ها و نسبت‌های هندسی در روش‌های مرسوم ISRM یکسان نبوده و این موضوع ناشی از تفاوت‌های ذاتی میان دستورالعمل‌های استاندارد است. در این پژوهش، هدف اصلی نه یکسان‌سازی کامل شرایط هندسی، بلکه بررسی این واقعیت بود که همین تفاوت‌ها در هندسه و شرایط

شکل ۹ منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش‌های چهار هندسه مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌ها در ابتدای بارگذاری رفتاری تقریباً خطی از خود نشان داده‌اند که بیانگر خاصیت الاستیک ماده تا نزدیکی بار شکست است. پس از رسیدن به حداکثر بار، افت ناگهانی در نمودار رخ داده و نمونه‌ها به صورت ترد گسیخته‌اند.

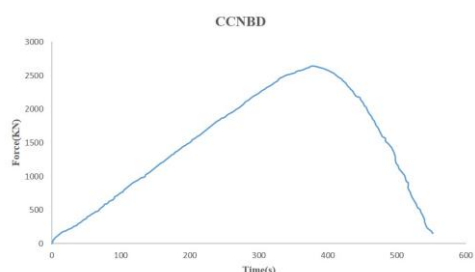
به‌طور کلی، تحلیل منحنی‌های بار-جابجایی نشان می‌دهد که هندسه نمونه بر مقدار بار شکست، نیز اثرگذار است. همچنین، تفاوت در شیب اولیه و مقدار بار حداکثر میان هندسه‌های مختلف، بیانگر تأثیر هندسه و شرایط بارگذاری بر سختی مؤثر و مقاومت شکست نمونه‌هاست.



(الف)



(ب)



(ج)

مقادیر چقرمگی شکست برای دو هندسه CB و CNSRB در بازه‌ای بین این دو حد قرار گرفته‌اند و اختلاف نسبتاً کمی با یکدیگر دارند. این امر نشان می‌دهد که هر دو روش می‌توانند مقادیری نزدیک به میانگین رفتار واقعی ماده ارائه دهند. به هر حال، اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار چقرمگی شکست حدود ۲۶ درصد برآورد شد که رقم قابل توجهی است و تأثیر مستقیم انتخاب هندسه نمونه را بر نتایج آزمایش‌ها تأیید می‌کند.

جدول ۶- مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های بتنی

انحراف معیار	میانگین چقرمگی	چقرمگی ی	نیروی شکست (N)	شمار ه	هندسه نمونه
	ی	ی	(MPa m ^{0.5})	آزمو	ن
CB	۰/۱۶۰۳۶	۰/۳۶	۰/۳۷	۳۹۶/۷	۱
	۰/		۰/۳۵	۳۷۵/۳	۲
			۰/۳۸	۴۰۷/۴	۳
			۰/۳۶	۳۸۶	۴
			۰/۳۴	۳۶۴/۵	۵
CNSRB	۰/۱۴۴۹۳	۰/۳۸	۰/۳۸	۱۱۲۱/۷	۱
	۰/		۰/۴۰	۱۱۸۰/۷	۲
			۰/۳۷	۱۰۹۲/۲	۳
			۰/۳۹	۱۱۵۱/۳	۴
			۰/۳۶	۱۰۶۱/۶	۵
CCNBD	۰/۱۵۱۰۸	۰/۴۳	۰/۴۲	۲۵۸۳/۶	۱
	۰		۰/۴۵	۲۷۶۲/۳	۲
			۰/۴۱	۲۵۱۶/۶	۳
			۰/۴۳	۲۶۳۹/۳	۴
			۰/۴۴	۲۷۰۱/۷	۵
SCB	۰/۱۳۵۷۶	۰/۳۴	۰/۳۶	۵۰۲/۲	۱
	۰/		۰/۳۴	۴۷۴/۴	۲
			۰/۳۳	۴۶۰/۴	۳
			۰/۳۲	۴۴۶/۳	۴
			۰/۳۵	۴۸۸/۲	۵

به‌طور کلی، داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهند که چقرمگی شکست یک پارامتر مطلق و یکتا نیست و به هندسه نمونه و شرایط آزمایش وابسته است. این موضوع اهمیت مقایسه نتایج آزمایشگاهی با شبیه‌سازی عددی را دوچندان می‌سازد تا بتوان علل واقعی این اختلاف‌ها را شناسایی کرد.

معنی که F_t از نظر بزرگی به صورت زیر محدود می‌شود:

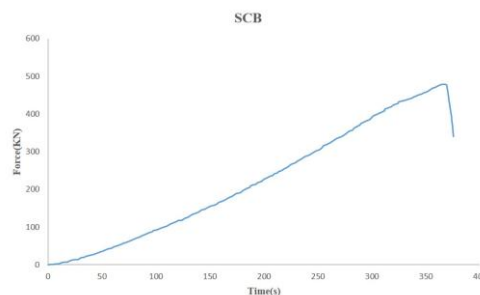
$$|F_t| \leq |F_n| \tan \varphi \quad (13)$$

که در آن φ زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد [۳۶]. رفتار مکانیکی ماده از تعامل این ذرات و پیوندها ناشی می‌شود. شکست نیز زمانی رخ می‌دهد که نیروهای کششی یا برشی از ظرفیت پیوندها فراتر رود. این ویژگی امکان بازتولید ریزترک‌ها و ادغام آن‌ها در قالب ترک‌های ماکروسکوپی را فراهم می‌کند. DEM علاوه بر سادگی در تعریف قوانین شکست، قابلیت شبیه‌سازی مستقیم فرآیندهای میکرومکانیکی را داراست و می‌تواند رفتار واقعی شکست مواد شبه‌سنگی را با دقت مناسبی بازسازی کند.

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار YADE انجام شده است. این نرم‌افزار یک کد متن‌باز مبتنی بر روش اجزای مجزا است که قابلیت ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از نمونه‌ها را فراهم می‌آورد. دلیل انتخاب این نرم‌افزار شامل؛ انعطاف‌پذیری، سرعت شبیه‌سازی و تطابق با اهداف تحقیق بوده است. در YADE، پیوندهای بین ذرات بر اساس مدل JCFPM^{۱۱} تعریف شدند؛ این مدل برای شبیه‌سازی سنگ و بتن (مواد چسبنده‌ای که شکننده بوده و پس از شکست اصطکاک دارند) استفاده می‌شود.

برای اطمینان از دقت مدل‌سازی، پارامترهای عددی شامل مدول یانگ، کرنش الاستیک کششی، کرنش شکست، زاویه اصطکاک تماسی و چسبندگی با استفاده از آزمون‌های فشاری تک‌محوری و کششی غیرمستقیم بتن کالیبره شدند. معیار کالیبراسیون تطابق نیرو-جابجایی کلی مدل با منحنی‌های حاصل از آزمایش بود. این مرحله باعث شد که رفتار عددی نمونه‌ها با رفتار واقعی بتن مورد استفاده در آزمایش‌ها هماهنگ شود.

در این مرحله، چهار هندسه آزمایشگاهی شامل CNSRB، CB، CCNBD و SCB به‌طور دقیق در محیط YADE بازسازی شدند. برای هر هندسه، ترک اولیه مطابق با ابعاد استاندارد ایجاد شد. سپس بارگذاری مشابه آزمایشگاه تعریف گردید. به طوری که، در روش‌های CB، SCB و CNSRB بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای اعمال شد. همچنین، در روش



(د)

شکل ۹- منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های الف) CNSRB ب) CB، ج) CCNBD و د) SCB

۴- مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی فرآیند شکست در این مطالعه از روش اجزای مجزا (DEM) استفاده شد. در این روش، ماده به‌صورت مجموعه‌ای از ذرات کروی در نظر گرفته می‌شود که از طریق پیوندهای تماسی به یکدیگر متصل هستند. مدل تماس، جابجایی نسبی (یا همپوشانی) را به نیروی تماسی که بر برهمکنش بین دو ذره عمل می‌کند، مرتبط می‌کند. نیروی تماس دارای یک مؤلفه عمودی و یک مؤلفه مماسی است. مدل تماس معمولی از یک مدل فنر خطی تشکیل شده است. از این رو، نیروی تماسی عمودی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

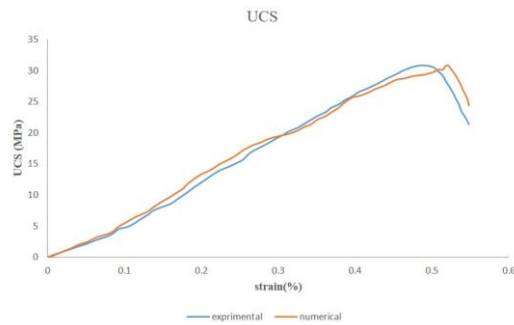
$$F_n = K_n u_n \quad (11)$$

که در آن K_n سختی تماسی و u_n جابجایی نسبی بین ذرات برهمکنش‌کننده است. فنر معمولی فقط در حالت فشاری فعال است، یعنی زمانی که ذرات روی هم قرار می‌گیرند و هیچ نیروی کششی ایجاد نمی‌شود. نیروی تماس مماسی F_t به جابجایی مماسی u_t به صورت زیر مرتبط است:

$$F_t = K_t u_t \quad (12)$$

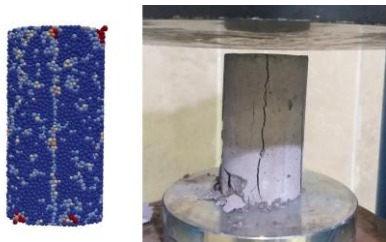
که در آن K_t نشان دهنده سختی تماس مماسی بین ذرات برهمکنش‌کننده است. نیروی مماسی کل F_t در هر گام زمانی به صورت افزایشی به‌روزرسانی می‌شود. یک مدل لغزش کولمب مانند در جهت مماسی اعمال می‌شود، به این

^{۱۱} Jointed Cohesive Frictional Particulate Model



شکل ۱۰- منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمون فشاری تک محوری (UCS) بر روی بتن مورد استفاده برای کالیبراسیون مدل عددی

برای بررسی صحت کالیبراسیون، الگوی شکست نمونه در آزمون UCS به صورت آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۱۱). همان طور که مشاهده می شود، در هر دو حالت ترک های قطری غالب شده و شکست نهایی به صورت برشی-قطری رخ داده است. این تطابق بیانگر توانایی مدل اجزای مجزا در بازتولید مکانیزم واقعی شکست و تأییدکننده دقت پارامترهای کالیبره شده می باشد.



شکل ۱۱- نحوه شکست نمونه در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به روش آزمایشگاهی و عددی

در ادامه برای ارزیابی بیشتر دقت مدل، آزمون کشش غیرمستقیم (BTS) نیز شبیه سازی شد و منحنی بار-جابجایی عددی با داده های آزمایشگاهی مقایسه گردید (شکل ۱۲). تطابق مناسب بین دو منحنی، به ویژه در مقدار بار حداکثر، نشان دهنده صحت کالیبراسیون پارامترهای مدل است. این همخوانی بیانگر آن است که مدل کالیبره شده نه تنها در آزمون فشاری (UCS)، بلکه در آزمون کششی غیرمستقیم نیز قادر به بازتولید رفتار واقعی ماده هستند.

CCNBD، بارگذاری فشاری بر روی دیسک ترک دار در امتداد قطر صورت گرفت. در تمام موارد، شرایط مرزی به گونه ای تنظیم شده است که رفتار تماس میان نمونه و تکیه گاه ها به خوبی شبیه سازی گردد.

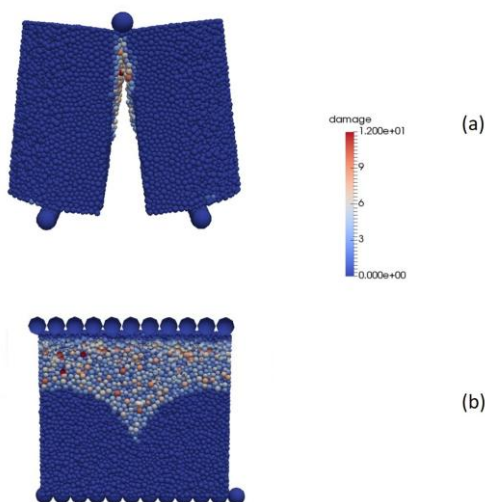
جدول ۷ پارامترهای مکانیکی استفاده شده در مدل اجزای مجزا در فرآیند کالیبراسیون مدل را نشان می دهد. این پارامترها شامل ویژگی های ذرات و پیوندها هستند که رفتار کلان بتن را بازتولید می کنند. تطابق مناسب میان منحنی عددی و آزمایشگاهی در شکل ۱۰ تأیید می کند که پارامترهای جدول ۷ به درستی کالیبره شده اند. این موضوع امکان استفاده از مدل برای شبیه سازی هندسه های مختلف و استخراج چقرمگی شکست عددی را فراهم می سازد.

جدول ۷- پارامترهای مکانیکی مدل کالیبره شده DEM

پارامتر	شرح	مقدار
E (Gpa)	مدول یانگ	۳۰
ν	نسبت پواسون	۰/۲
ϵ_0	کرنش الاستیک کششی	$1e^{-4}$
ϵ_f	کرنش شکست	$20\epsilon_0$
ϕ_c (radians)	زاویه اصطکاک تماسی	۰/۱۸
C_0 (Mpa)	چسبندگی	۴

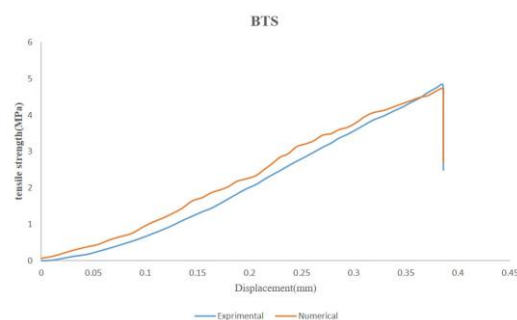
شکل ۱۰ مقایسه ای بین منحنی های تنش-کرنش حاصل از آزمون فشاری تک محوری بر روی بتن مورد استفاده را نشان می دهد که مبنای کالیبراسیون پارامترهای میکروسکوپی مدل DEM در YADE بوده است. این منحنی ها، همبستگی قوی بین مدول الاستیک نمونه های بتنی واقعی و مدل سازی را نشان می دهد.

است. که شعاع آن ها 0.7 ± 0.2 میلی متر می باشد. بار حداکثری که موجب شکست نمونه می شود $1147/5$ نیوتون بوده که مقدار چقرمگی شکست در این نمونه با مدل سازی عددی $0.39 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ محاسبه گردید که اختلافی در حدود ۲ درصد با روند تحلیلی دارد. بر این اساس در مدل بارگذاری محوری بر روی نمونه استوانه‌ای اعمال شده است. ترک از نوک شکاف چورون آغاز شده و به صورت تدریجی به سمت بیرون گسترش یافته است. مسیر شکست بازتولید شده در مدل عددی کاملاً مشابه الگوی مشاهده شده در آزمایش بوده و پایداری مناسبی در فرآیند شکست ایجاد کرده است (شکل ۱۴).



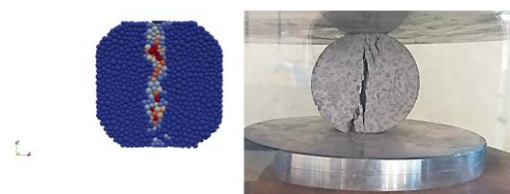
شکل ۱۴- نحوه شکست (a) و بارگذاری (b) مدل سازی چقرمگی نمونه CNSRB

در مدل سازی نمونه استوانه ای با ترک چورون از 27.927 المان استفاده شد که پس از اعمال باری در حدود $377/2$ نیوتون شکسته شده و مقدار چقرمگی شکست در این نمونه با مدل سازی عددی $0.35 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ محاسبه گردید که اختلافی در حدود ۲ درصد با روند تحلیلی دارد. در این مدل نیز، بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای اعمال شده است. ترک از نوک شکاف چورون شروع شده و به صورت نسبتاً مستقیم به سمت بالای نمونه ادامه یافته است (شکل ۱۵). این رفتار با نتایج آزمایشگاهی همخوانی داشته است.



شکل ۱۲- منحنی تنش- جابجایی آزمایش برزیلی بدست آمده از روش آزمایشگاهی و عددی

همچنین در شکل ۱۳، الگوی شکست نمونه در آزمون BTS نیز در دو حالت آزمایشگاهی و عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو حالت ترک اصلی از مرکز نمونه آغاز شده و در امتداد قطر بارگذاری رشد کرده است. این تطابق بار دیگر دقت کالیبراسیون پارامترهای مدل را تأیید می‌کند.

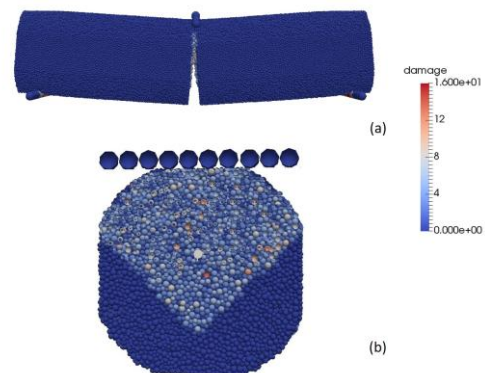


شکل ۱۳- نحوه شکست نمونه در آزمایش برزیلی و روش آزمایشگاهی و عددی

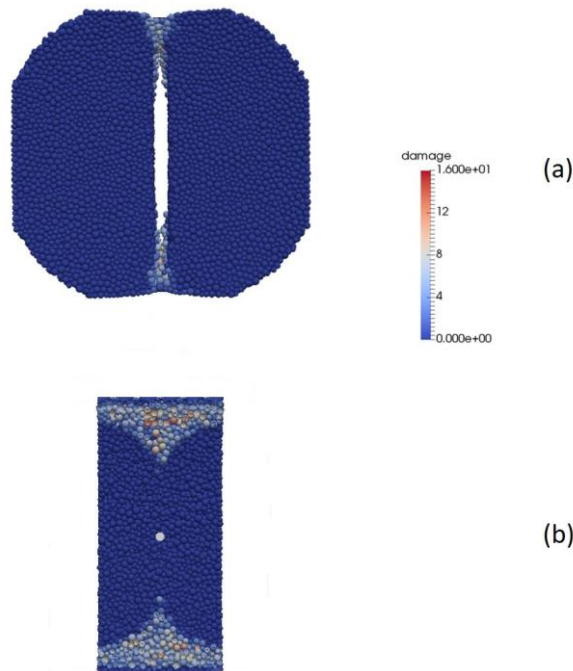
شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نحوه بارگذاری و الگوهای شکست عددی مربوط به چهار هندسه مختلف شامل؛ CNSRB، CB، CCNBD و SCB را نشان می‌دهند. در این شبیه‌سازی‌ها، شرایط مرزی و نحوه بارگذاری به‌گونه‌ای تعریف شده‌اند که بیشترین تطابق با آزمایش‌های آزمایشگاهی حاصل شود.

به منظور مدل سازی نمونه های استوانه کوتاه از ابعادی مشابه آزمون های انجام شده استفاده شد. المان های مورد استفاده در این آزمون به منظور مدل سازی 57570 المان

نمونه CCNBD، با 52965 المان مدل شد. بار حداکثری که موجب شکست نمونه گردید $2597/7$ نیوتون بود که مقدار چقرمگی شکست در این نمونه با مدل سازی عددی $0/42 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ محاسبه گردید که اختلافی در حدود 2 درصد با روند تحلیلی دارد. بارگذاری فشاری بر روی دیسک با ترک چورون در امتداد قطر انجام شده است. بر این اساس، ترک اصلی از مرکز دیسک آغاز شده و به طور متقارن به طرفین گسترش یافته است (شکل ۱۶). مقدار چقرمگی شکست این هندسه بیشترین مقدار در بین هندسه‌های بررسی شده بود.



شکل ۱۵- نحوه شکست (a) و بارگذاری (b) مدل سازی چقرمگی نمونه CB

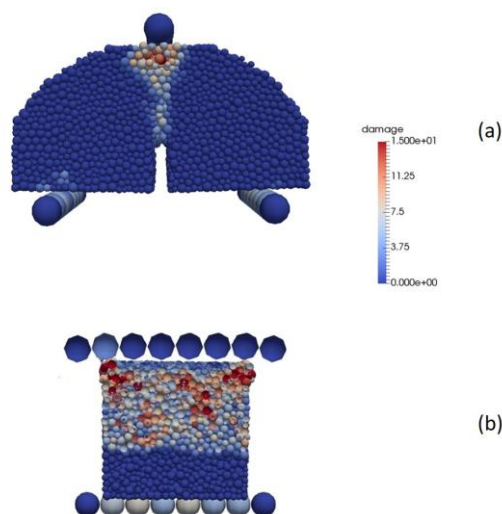


شکل ۱۶- نحوه شکست (a) و بارگذاری (b) مدل سازی چقرمگی نمونه CCNBD

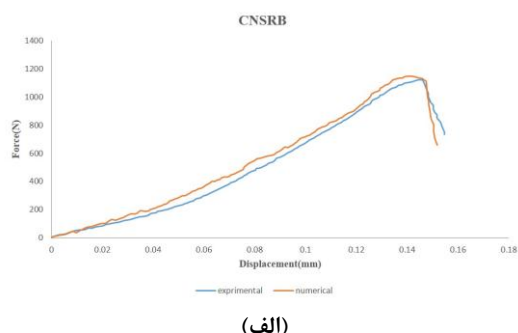
روی نیم دایره با ترک مستقیم اعمال گردید. ترک از نوک شکاف اولیه به سمت پایین رشد کرده و در ناحیه تکیه‌گاه‌ها منجر به شکست سریع و ناپایدار نمونه شده است (شکل ۱۷). این الگو با داده‌های آزمایشگاهی تطابق داشته و دلیل اصلی پایین‌ترین مقدار چقرمگی شکست در این روش است.

در نهایت نمونه SCB، با 17155 المان مدل سازی شد. بار حداکثری شکست این نمونه در حدود $465/2$ نیوتون بدست آمد که مقدار چقرمگی شکست در این نمونه با مدل سازی عددی $0/33 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ محاسبه گردید که اختلافی در حدود 3 درصد با روند تحلیلی دارد. بارگذاری سه نقطه‌ای بر

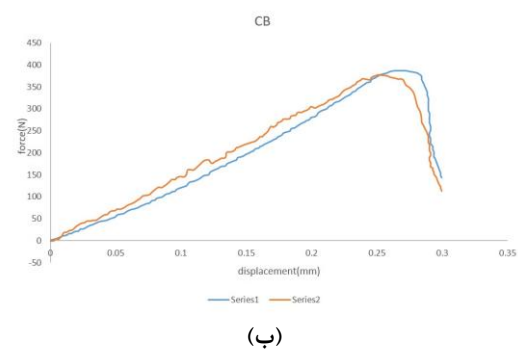
بارگذاری باعث ایجاد تنش کششی اصلی در مرکز نمونه می‌شود و از تمرکز تنش‌های غیرمحوری جلوگیری می‌کند، در نتیجه نمونه دیرتر دچار شکست می‌شود و مقدار مقاومت محاسبه شده بالاتر گزارش می‌شود. این تحلیل با بررسی توزیع تنش نرمال و برشی در مدل عددی و مقایسه با سایر روش‌ها تأیید شده است.



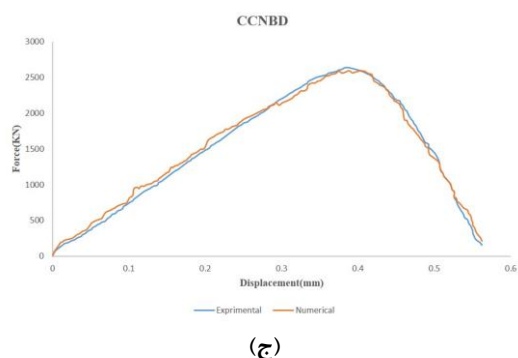
شکل ۱۷- نحوه شکست (a) و بارگذاری (b) مدل‌سازی چقرمگی نمونه SCB



(الف)



(ب)



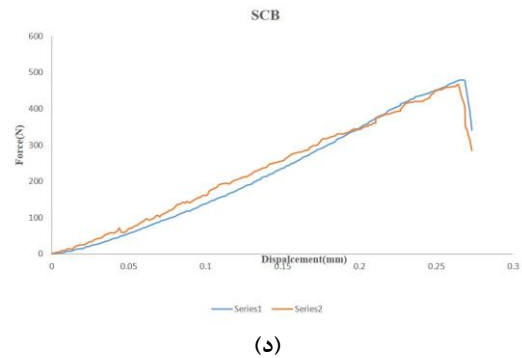
(ج)

به طور کلی، مسیر رشد ترک‌ها در تمامی هندسه‌ها با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. به‌ویژه در هندسه‌های آزمایشگاهی CB و CCNBD، مدل عددی توانسته الگوهای شکست را با دقت بالایی بازسازی کند، در حالی که در هندسه SCB، گسترش سریع ترک و ناپایداری شکست نیز مشابه رفتار آزمایشگاهی به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی علاوه بر پیش‌بینی مقادیر چقرمگی شکست، قادر به بازتولید مکانیزم واقعی شکست نیز می‌باشد.

منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمایش‌های تجربی ای که نزدیکترین حالت به مدلسازی عددی را داشتند برای چهار هندسه مختلف در شکل ۱۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، نمونه CCNBD بالاترین مقدار تنش اوج و سختی را نشان داده، در حالی که نمونه SCB کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. مقادیر مربوط به CB و CNSRB در بازه‌ای میانی قرار گرفته‌اند. این نتایج روند مشاهده شده در داده‌های آزمایشگاهی را بازتولید کرده و دقت مدل عددی در پیش‌بینی رفتار مکانیکی هندسه‌های مختلف را تأیید می‌نماید.

مقادیر بالاتر حاصل از آزمون CCNBD نه تنها به دلیل پایداری و بارگذاری متقارن نمونه‌ها است، بلکه ناشی از توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در طول نمونه و مکانیزم شکست کنترل‌شده توسط ترک مرکزی می‌باشد. در این روش،

CCNBD است. این هندسه به دلیل بارگذاری متقارن و توسعه پایدار ترک، توانسته بالاترین مقاومت را در برابر گسترش ترک نشان دهد. همچنین، کمترین مقدار به هندسه SCB اختصاص دارد، که ناشی از رشد سریع و ناپایدار ترک به سمت تکیه‌گاه‌هاست. مقادیر مربوط به CNSRB و CB در بازه‌های میانی قرار دارند و اختلاف نسبتاً کمی با یکدیگر دارند. به هر حال، اختلاف میان نتایج عددی و آزمایشگاهی در همه هندسه‌ها کمتر از چند درصد بوده و روند تغییرات نیز مشابه است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل اجزای مجزا علاوه بر پیش‌بینی دقیق مقادیر چقرمگی شکست، قادر به بازتولید تفاوت‌های ناشی از هندسه نمونه نیز می‌باشد.



شکل ۱۸- منحنی نیرو-جابجایی آزمایشگاهی نمونه‌های نمونه‌های الف) CNSRB (ب) CB، ج) CCNBD و د) SCB بدست آمده از روش آزمایشگاهی و عددی

جدول ۸ مقادیر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی را در چهار هندسه مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین مقدار چقرمگی شکست مربوط به هندسه

جدول ۸- مقادیر چقرمگی انواع نمونه در روش‌های آزمایشگاهی و عددی

درصد اختلاف مقادیر چقرمگی نسبت به نمونه <i>SCB</i>	درصد اختلاف مقادیر چقرمگی آزمایشگاهی و عددی	چقرمگی شکست محاسبه شده با مدل سازی عددی	چقرمگی شکست محاسبه شده با آزمون آزمایشگاهی	هندسه پیشنهادی
۱۱٪/۷	۲٪	۰/۳۹	۰/۳۸	CNSRB
۵٪/۸	۲٪	۰/۳۵	۰/۳۶	CB
۲۶٪/۴	۲٪	۰/۴۲	۰/۴۳	CCNBD
-	۳٪	۰/۳۳	۰/۳۴	SCB

مرزی، هندسه نمونه و نوع ترک در هر هندسه بود. برای تحلیل دقیق‌تر علل این اختلافات، شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای مجزا در نرم‌افزار YADE انجام شد. پارامترهای میکروسکوپی مدل بر اساس آزمون‌های UCS و Brazilian کالیبره گردید و سپس هندسه‌های مختلف تحت بارگذاری مشابه آزمایشگاهی شبیه‌سازی شدند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل اجزای مجزا توانایی بالایی در بازتولید مقادیر چقرمگی شکست و همچنین الگوهای شکست دارد. اختلاف میان نتایج دو روش کمتر از چند درصد بود و روند تغییرات در تمامی هندسه‌ها

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی و عددی چقرمگی شکست مدل I در بتن به‌عنوان ماده‌ای شبه‌سنگی پرداخته شد. چهار هندسه آزمایشگاهی پیشنهادی توسط ISRM شامل SCB، CB، CCNBD و CNSRB انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر چقرمگی شکست به‌طور محسوس و وابسته به نوع هندسه هستند؛ به‌طوری که هندسه CCNBD بیشترین مقدار چقرمگی شکست و هندسه SCB کمترین مقدار را به خود اختصاص داد. این تفاوت‌ها ناشی از نوع بارگذاری، شرایط

مشابه گزارش شد. افزون بر این، تصاویر شکست عددی همخوانی قابل قبولی با الگوهای شکست آزمایشگاهی داشتند که نشان‌دهنده صحت کالیبراسیون و قابلیت مدل در بازسازی مکانیزم واقعی شکست است.

بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب هندسه آزمایش نقش اساسی در تعیین مقدار چقرمگی شکست دارد و مدل‌سازی عددی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل برای تفسیر نتایج آزمایشگاهی و درک عمیق‌تر فرآیند شکست مواد شبه‌سنگی مورد استفاده قرار گیرد.

لازم به ذکر است که این پژوهش نیز همانند سایر مطالعات آزمایشگاهی و عددی با محدودیت‌هایی همراه بوده است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به تعداد محدود نمونه‌ها، دقت دستگاه بارگذاری، و تمرکز صرف بر مود I شکست اشاره کرد. همچنین استفاده از بتن به‌عنوان ماده شبه‌سنگی ممکن است تمامی ویژگی‌های سنگ طبیعی را بازتاب ندهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، علاوه بر افزایش تعداد نمونه‌ها، بررسی مود II و مودهای ترکیبی شکست نیز مدنظر قرار گیرد و از نمونه‌های سنگ طبیعی متنوع برای افزایش تعمیم‌پذیری نتایج استفاده شود.

۶- منبع‌ها

- [1] Liu HW (1983) On the fundamental basis of fracture mechanics. *Eng Fract Mech* 17:425–438.
- [2] Mahanta B, Tripathy A, Vishal V, Singh T N and Ranjith P G (2017) EAects of strain rate on fracture toughness and energy release rate of gas shales; *Eng. Geol.* 218 39–49.
- [3] Molladavoodi, H. , Dolatshahi, A. , Arash, M. and Mashayekhi, M. M. (2024). Experimental study on temperature effect on the tensile fracture toughness of cement mortars containing micro-silica. *JOURNAL OF ROCK MECHANICS*, 8(1), 51-65. doi: 10.22034/IRSRM.2024.515881.1026.
- [4] Ma, G., Li, J., Zhou, X., Chen, J., Zhang, Y., & Qiu, P. (2022). Experimental and numerical investigations on fracture behaviours of cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) sandstone specimen under cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 271, 108673.
- [5] Yu, H., Andersen, D. H., He, J., & Zhang, Z. (2021). Is it possible to measure the tensile strength and fracture toughness simultaneously using flattened Brazilian disk?. *Engineering Fracture Mechanics*, 247, 107633.
- [6] Dai, F., Wei, M. D., Xu, N. W., Zhao, T., & Xu, Y. (2015). Numerical investigation of the progressive fracture mechanisms of four ISRM-suggested specimens for determining the mode I fracture toughness of rocks. *Computers and Geotechnics*, 69, 424-441.
- [7] Yan, Z. H. O. U., Cai-gui, Z. H. A. N. G., Jing-rui, Y. A. N. G., & Qi-zhi, W. A. N. G. (2015). Comprehensive Calibration of the Stress Intensity Factor for the Holed Flattened Brazilian Disc With an Inner Single Crack or Double Cracks. *Applied Mathematics & Mechanics* (1000-0887), 36(1).
- [8] Akbardoost, J., Ghadirian, H. R., & Sangsefidi, M. (2017). Calculation of the crack tip parameters in the holed-cracked flattened Brazilian disk (HCFBD) specimens under wide range of mixed mode I/II loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(9), 1416-1427.
- [9] Kuruppu M D, Obara Y, Ayatollahi M R, Chong K P and Funatsu T (2014) ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen; *Rock Mech. Rock Eng.* 47 267–274.
- [10] Wong L N Y and Guo T Y (2019) Microcracking behavior of two semi-circular bend specimens in mode I fracture toughness test; *Eng. Fract. Mech.* 106565.
- [11] Li J L, Wei X D and Zhao G F (2023) An integrated experimental and numerical study of size eAect on the mode I fracture toughness of rock; *Eng. Fract. Mech.* 287 109327.
- [12] Torabi, A. R., Jabbari, M., & Akbardoost, J. (2020). Scaling effects on notch fracture toughness of graphite specimens under mode I loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 235, 107153.
- [13] Erarslan, N., & Aliha, M. R. M. (2025). Fracture and Damage Analysis of Cement Stabilized Fine and Coarse Grain Soils Under Static and Cyclic Loading Using Chevron-Notched SCB Specimen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 48(6), 2708-2724.
- [14] Ouchterlony F. (1988) ISRM commission on testing methods. Suggested methods for determining fracture toughness of rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 25:71–96.
- [15] Iqbal, M.J., and Mohanty, B. (2007). Experimental calibration of ISRM suggested fracture toughness measurement techniques in selected brittle rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 40: 453-475.
- [16] Tutluoglu, L. and Keles, C., (2011), Mode I fracture toughness determination with straight notched disk, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 48, pp. 1248-1261.
- [17] Fowell, R. J., Hudson, J. A., Xu, C., & Zhao, X. (1995). Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 7, No. 32, p. 322A).
- [18] Fowell, R.J., Xu, C., and Dowd, P.A. (2006). An update on the fracture toughness testing methods related to the cracked chevron-notched Brazilian disk (CCNBD) specimen. *Pure and applied geophysics*. 163: 1047-1057.
- [19] Sun, Z. and Ouchterlony, F., (1986) Fracture toughness of stripa granite cores, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 23, pp. 399-409.
- [20] Chong, K. P., & Kuruppu, M. D. (1984). New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. *International Journal of Fracture*, 26(2), R59-R62.
- [21] Kuruppua MD, Chong KP (2012) Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen. *Eng Fract Mech* 91:133–150.

- [22] Xu, N. W., Dai, F., Wei, M. D., Xu, Y., & Zhao, T. (2016). Numerical observation of three-dimensional wing cracking of cracked chevron notched Brazilian disc rock specimen subjected to mixed mode loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), 79-96.
- [23] Li QM, Lu YB, Meng H (2009) Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part II: numerical simulations. *Int J Impact Eng* 36:1335–1345.
- [24] Li XB, Zou Y, Zhou ZL (2014) Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method. *Rock Mech Rock Eng* 47(5):1693–1709
- [25] Zhao GF, Fang JN, Zhao J (2011) A 3D distinct lattice spring model for elasticity and dynamic failure. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 35:859–885
- [26] Wu ZJ, Ngai L, Wong Y (2014) Investigating the effects of micro- defects on the dynamic properties of rock using Numerical Manifold method. *Constr Build Mater* 72:72–82
- [27] Cundall PA, Strack ODL (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29(1):47–65
- [28] Potyondy DO, Cundall PA (2004) A bonded-particle model for rock. *Int J Rock Mech Min Sci* 41:1329–1364.
- [29] Alkılıçgil, Ç. (2010). Development of specimen geometries for mode I fracture toughness testing with disc type rock specimens (*Doctoral dissertation*, Middle East Technical University (Turkey)).
- [30] Ouchterlony, F. and ISRM Working Group Coordinator, Swedish Detonic Research Foundation, SveDeFo (1990) 'Fracture Toughness Testing Of Rock With Core Based Specimens', *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 35, no. 1/2/3, pp. 351-366.
- [31] Ouchterlony F. (1988) ISRM commission on testing methods. Suggested methods for determining fracture toughness of rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* ;25:71–96.
- [32] Chang, S.-H., Lee, C.-I., and Jeon, S., (2002) Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens, *Engineering geology*, vol. 66, no. 1-2, pp. 79-97.
- [33] Wei, M. D., Dai, F., Xu, N. W., Liu, Y., & Zhao, T. (2018). A novel chevron notched short rod bend method for measuring the mode I fracture toughness of rocks. *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 1-15.
- [34] Sabri, M., Ghazvinian, A., Nejati, H. (2015). Experimental and numerical investigation of crack propagation in particle size heterogeneous rock like material. *Modares Civil Engineering journal*, 15(5), 169-180.
- [35] Institute of Standards & Industrial Research of Iran, mixing room, moist chamber, moist room, and water ponds used in hydraulic testing of cement and concretes, Standard No. 17040.(2013). (In Persian)
- [36] Thoeni, K., Giacomini, A., Lambert, C., Sloan, S. W., & Carter, J. P. (2014). A 3D discrete element modelling approach for rockfall analysis with drapery systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68, 107-119.



Experimental and Numerical Investigation of Conventional Methods for Determining Mode I Fracture Toughness of Concrete

Mohammad Reza Abroshan¹; Majid Noorian-Bidgoli^{1*}; Hadi Haeri²

1- Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Iran.

2- Department of Mining Engineering, Higher Education Complex of Zarand, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Received: 14 April 2025 Accepted: 21 June 2025

(*Corresponding author: noriyan@kashanu.ac.ir)

Keywords

Fracture toughness
SCB, CB, CCNBD, and CNSRB samples
Numerical modeling
Discrete element method (DEM)
Fracture mechanics of rocks
Rock-like materials

Abstract

Summary

Fracture toughness is one of the most important mechanical properties of rock-like materials and plays a decisive role in the stability analysis of concrete and rock structures. In recent years, the International Society of Rock Mechanics (ISRM) has proposed several standardized specimen geometries, including SCB, CB, CCNBD, and SR, to determine Mode I fracture toughness. However, numerous reports have shown that the values

obtained from these methods are not consistent, with significant differences between them. In this study, to investigate this issue in detail, a series of laboratory tests were designed and performed on standard concrete samples to determine their fracture toughness values. The experimental results showed that the fracture toughness values are highly dependent on the specimen geometry. For concrete with a strength of 30 MPa, the highest toughness value was obtained for the CCNBD specimen at $0.43 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, while the lowest value was obtained for the SCB specimen at $0.34 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$. This represents a difference of approximately 26.4 percent. Additionally, three-dimensional numerical modeling was performed using the Discrete Element Method (DEM) in the YADE software. Prior to simulating the fracture tests, the model's microscopic parameters were calibrated based on uniaxial compressive strength (UCS) and Brazilian tensile strength (BTS) tests. The numerical results from simulating the different geometries showed that the discrete element model can accurately reproduce both the fracture toughness values and the fracture patterns. The difference between the experimental and numerical data for all geometries was less than 2 to 3 percent. The findings of this study indicate that the choice of test geometry has a direct and significant effect on the measured fracture toughness value. Furthermore, numerical modeling has been demonstrated to be an efficient tool for interpreting and analyzing these differences.

Introduction

Fracture toughness is a key mechanical property of quasi-brittle materials such as concrete and rock, as it governs the initiation and propagation of cracks under loading. Reliable determination of fracture toughness is therefore essential for the safe design and stability analysis of civil and mining structures. In recent years, the International Society for Rock Mechanics (ISRM) has suggested several standardized testing methods and specimen geometries, including SCB, CB, CCNBD, and CNSRB, for evaluating Mode I fracture toughness. Nevertheless, different studies have reported noticeable variations in the values obtained from these methods, raising questions about their consistency and reliability. To address this issue, combining laboratory experiments with advanced numerical modeling approaches, such as the Discrete Element Method (DEM), provides a powerful framework for understanding the fracture mechanisms and interpreting the differences among testing geometries.



Methodology and Approaches

In this study, a combined experimental and numerical approach was adopted to investigate the Mode I fracture toughness of quasi-brittle materials. Laboratory tests were conducted on standard concrete specimens using four ISRM-suggested geometries, namely SCB, CB, CCNBD, and CNSRB, to determine the fracture toughness values and assess their variations. To complement the experiments, three-dimensional numerical simulations were performed using the Discrete Element Method (DEM) implemented in YADE software. The microscopic parameters of the DEM model were calibrated through uniaxial compressive strength (UCS) and Brazilian tensile tests to ensure realistic representation of the material behavior. Subsequently, the calibrated model was employed to simulate the fracture processes of the different specimen geometries, enabling direct comparison between experimental results and numerical predictions in terms of both fracture toughness values and crack propagation patterns.

Results and Conclusions

The experimental results demonstrated that the measured Mode I fracture toughness strongly depends on the specimen geometry, with the CCNBD geometry yielding the highest values and the SCB geometry the lowest. Numerical simulations using the calibrated DEM model reproduced both the fracture toughness values and the crack propagation patterns with high accuracy, showing discrepancies of less than a few percent compared to laboratory tests. The strong agreement between experimental and numerical results confirms the validity of the DEM approach in simulating fracture processes of quasi-brittle materials. Overall, the findings highlight that the choice of testing geometry plays a critical role in determining fracture toughness, and that numerical modeling can serve as an effective complementary tool for interpreting experimental observations and improving the reliability of fracture toughness evaluation.
