

اثر توأم نرخ بارگذاری و طول شکاف در مقاومت کششی برزیلی سنگ

بیام اسدی (کارشناس ارشد)

احمدعلی فخمی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۹۸-۸۷، پژوهشی)

مطالعه‌ی اثر ناپیوستگی‌های سنگ در خصوصیات مکانیکی آن به منظور ارزیابی پایداری سازه‌های در معرض بار دینامیکی ضروری است. در پژوهش حاضر، اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری در مقاومت کششی سنگ با مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها پیکینسون با استفاده از نرم‌افزار CA۳ که یک نرم‌افزار ترکیبی المان محدود - المان گسسته است، بررسی شده است. نمونه‌های برزیلی با قطر ۵۰، ضخامت ۱۰ و طول‌های متفاوت شکاف: ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر آزمایش شدند. نتیجه حاکی از آن است که اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی با اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی متفاوت بوده است و اگرچه در نرخ‌های بارگذاری پایین با افزایش طول شکاف مقاومت کاهش یافته است، اما در نرخ‌های بارگذاری بالا بسته به مقدار نرخ بارگذاری، مقاومت با افزایش طول شکاف توانسته است ثابت بماند و یا افزایش یابد. همچنین نتایج نشان داد که سرعت بارشدگی شکاف، نقش اساسی در موضوع اخیر دارد.

واژگان کلیدی: مکانیک شکست، بارگذاری دینامیکی، اثر طول شکاف، سرعت بارشدگی شکاف.

۱. مقدمه

سنگ‌ها، مصالح طبیعی با ساختار پیچیده هستند و ساختار پیچیده‌ی آن‌ها غالباً با ناپیوستگی‌هایی مانند درز و ترک همراه است. به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها، گسیختگی مصالح سنگی معمولاً به رشد ترک در امتداد شکاف‌های از پیش موجود، منافذ و سایر عیوب اولیه‌ی موجود در ساختار سنگ مرتبط است. در نتیجه مطالعه‌ی کامل اثر ناپیوستگی‌ها در خصوصیات مکانیکی سنگ و نحوه‌ی گسترش ترک برای ارزیابی دقیق پایداری سازه‌های سنگی در پروژه‌های مهندسی سنگ ضروری است. پژوهشگران مختلف، مطالعات گسترده‌ی به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی سنگ و نحوه‌ی ایجاد خرابی در آن تحت بارگذاری استاتیکی و شبه‌استاتیکی انجام داده‌اند. به عنوان مثال، برخی از آنان،^[۱-۵] نحوه‌ی رشد ترک در نمونه‌های سنگی فاقد شکاف را تحت بارگذاری استاتیکی و شبه‌استاتیکی بررسی کرده‌اند. همچنین، برخی دیگر،^[۶-۱۲] با کمک تکنولوژی نشرآوایی، میکروسکوپ الکترونی روبشی و عکس برداری با سرعت بالا، خصوصیات مکانیکی و فرایند رشد ترک در نمونه‌های سنگی دارای شکاف منفرد یا چندگانه را تحت بارگذاری استاتیکی و شبه‌استاتیکی مطالعه و بررسی کرده‌اند.

از طرف دیگر، در شرایط بارگذاری دینامیکی و در نرخ بارگذاری بالا نیز مطالعات

* نویسنده مسئول

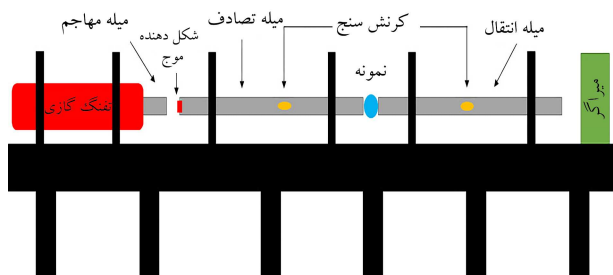
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59263.3038

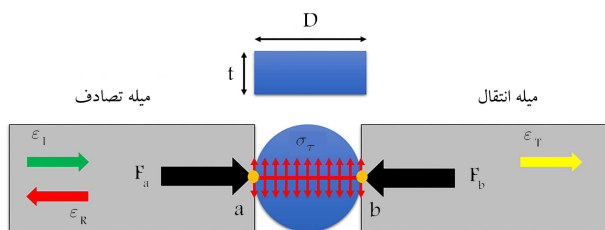
payam_asadi@modares.ac.ir
a.fakhimi@modares.ac.ir

گسترده‌ی بر روی خصوصیات مکانیکی سنگ فاقد شکاف انجام شده است.^[۱۳-۱۸] بررسی اثر نرخ بارگذاری در مقاومت سنگ‌ها، یکی از محورهای اساسی مطالعات انجام شده است. بررسی‌های انجام شده توسط پژوهشگران مختلف نشان داده است که مقاومت نمونه‌ی سنگی با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد. لی و منگ^۱ (۲۰۰۳) و هاو^۲ و همکاران (۲۰۱۳)، این افزایش مقاومت را به افزایش محصورشدگی شعاعی نمونه به دلیل آثار اینرسی نسبت داده‌اند.^[۱۷، ۱۸] علاوه بر آثار ناشی از اینرسی، برخی خصوصیات ویسکوکشسان یا ویسکوخمیری مواد ژئوتکنیکی باعث می‌شود که آن‌ها نسبت به نرخ بارگذاری حساس باشند.^[۱۹] همچنین نحوه‌ی گسترش موج تنش در داخل نمونه‌ی دارای شکاف توسط لی^۳ و همکاران (۲۰۱۱) بررسی شده است.^[۲۰]

با وجود این، مطالعه بر روی نمونه‌های دارای شکاف از پیش موجود تحت بارگذاری دینامیکی به شکل محدودی انجام شده است.^[۲۱-۲۷] در این بین، مطالعات انجام شده عمدتاً بر روی اثر زاویه بین راستای شکاف و راستای بارگذاری متمرکز بوده و یا نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ی دارای شکاف را بررسی کرده‌اند.^[۲۱-۲۳] در طرف مقابل، مطالعات انجام شده بر روی اثر طول شکاف در خصوصیات مقاومتی سنگ تحت بارگذاری دینامیکی بسیار محدود و ناکافی است.^[۲۴-۲۶] به عنوان مثال، کیپ^۴ و همکاران (۱۹۸۰) با استفاده از مدل مکانیک شکستی دینامیکی چن و سیج^۵ (۱۹۷۷)،^[۲۷] که به دلیل استوار بودن بر مبنای یک پایه‌ی تحلیلی مورد



شکل ۱. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش هایپکینسون.



شکل ۲. نمونه‌ی برزیلی و کرنش‌های ایجاد شده در میله‌ها.

انعکاسی (ϵ_R) توسط کرنش‌سنج نصب شده روی میله‌ی تصادف و کرنش انتقالی (ϵ_T) به وسیله‌ی کرنش‌سنج نصب شده روی میله‌ی انتقال ثبت می‌شوند. فرض اساسی در آزمایش هایپکینسون این است که انتشار موج‌ها در داخل میله‌های دستگاه آزمایش، کشسان و یک‌بُعدی است. با این فرض و براساس تئوری موج یک‌بُعدی، هر یک از کرنش‌های تصادف (ϵ_I)، انعکاسی (ϵ_R) و انتقالی (ϵ_T) از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آیند:

$$\epsilon = \frac{1}{c} \dot{u} \quad (1)$$

که در آن، c سرعت انتشار موج در میله‌ی آزمایش و \dot{u} سرعت ذرات سازنده‌ی میله‌ی آزمایش در اثر اعمال موج هستند.

براساس معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر انتشار موج کشسان یک بُعدی و به منظور ارضاء تعادل دینامیکی، رابطه‌ی بین کرنش تصادف (ϵ_I)، کرنش انعکاسی (ϵ_R) و کرنش انتقالی (ϵ_T) مطابق رابطه‌ی ۲ است:

$$(\epsilon_I + \epsilon_R)_a = (\epsilon_T)_b \quad (2)$$

نقاط a و b در رابطه‌ی ۲ و شکل ۲، مبین نقاط تماس دو سر نمونه‌ی برزیلی و میله‌های دستگاه آزمایش هایپکینسون هستند. توجه به این نکته ضرورت دارد که به منظور برقراری تعادل دینامیکی در نمونه، رابطه‌ی ۲ باید در هر لحظه از آزمایش برقرار باشد.^[۲۰] مقدار متوسط نیروی اعمال شده به نمونه در آزمایش هایپکینسون از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$F_{ave} = \frac{F_a + F_b}{2} = \frac{EA}{2} (\epsilon_I + \epsilon_R + \epsilon_T) \quad (3)$$

که در آن، E و A به ترتیب مدول کشسانی و سطح مقطع میله‌ی آزمایش هایپکینسون هستند F_a و F_b نیز براساس شکل ۲ به ترتیب نیروی ایجاد شده در سمت چپ و راست نمونه‌ی مورد بررسی هستند. با ترکیب رابطه‌های ۲ و ۳، رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$F_{ave} = EA \epsilon_T \quad (4)$$

پس از محاسبه‌ی متوسط نیروی اعمال شده به نمونه، متوسط تنش کششی (تنش

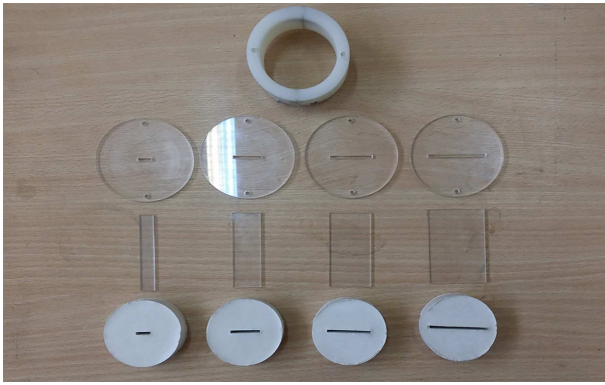
توجه پژوهشگران است، اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی شیل نفتی را بررسی کردند و با استفاده از انتگرال‌گیری عددی و با انجام محاسبات متعدد برای طول شکاف‌های متفاوت و نرخ‌های مختلف کرنش نشان دادند اگرچه در بارگذاری استاتیکی با افزایش طول شکاف مقاومت کاهش می‌یابد، اما در بارگذاری دینامیکی و در نرخ‌های بارگذاری بالا با افزایش طول شکاف، مقاومت ثابت باقی مانده و تغییر طول شکاف تأثیری در مقاومت کششی دینامیکی نداشته است.^[۲۴] وانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۰)، نیز اثر طول شکاف در چقرمگی شکست دینامیکی نمونه‌های برزیلی ساخته شده از سنگ ماربل سفید با قطر ثابت ۸۰ میلی‌متر و طول شکاف متغیر بین ۲۵ تا ۴۱ میلی‌متر را با انجام آزمایش هایپکینسون بررسی کردند و دریافتند که تغییر طول شکاف، تأثیر معناداری در مقدار چقرمگی شکست دینامیکی ندارد.^[۲۵] همچنین لی و همکاران (۲۰۱۷)، با انجام آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $60 \times 60 \times 60$ میلی‌متر و طول شکاف ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر، اثر طول شکاف در مقاومت فشاری دینامیکی نوعی سنگ ماربل را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش طول شکاف، مقاومت کاهش می‌یابد، اما آن‌ها به این نکته توجه نکرده بودند که با افزایش طول شکاف، نرخ تنش در داخل نمونه نیز کاهش می‌یابد و اثر طول شکاف را در یک نرخ تنش ثابت بررسی نکرده بودند.^[۲۶]

پژوهش‌های انجام شده نشان داده‌اند که اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی، متفاوت از اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی سنگ است و ساختار پیچیده‌تری دارد. با این حال مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی سنگ بسیار محدود بوده است. در پژوهش حاضر، با شبیه‌سازی عددی آزمایش هایپکینسون، اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری در مقاومت کششی سنگ دارای شکاف بررسی شده است. مدل‌سازی عددی آزمایش‌های پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار CA۳،^[۲۸] که یک نرم‌افزار سه‌بُعدی ترکیبی آلمان محدود-المان گسسته است، انجام شده است. همچنین نتایج دینامیکی با نتایج استاتیکی حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است.

۲. ساختار و تئوری آزمایش هایپکینسون

دستگاه آزمایش هایپکینسون توسط کلسکی^۷ (۱۹۴۹)،^[۲۹] توسعه داده شد و امروزه به‌طور گسترده به منظور بررسی رفتار دینامیکی مصالح شکننده و شبه‌شکننده مانند سنگ استفاده می‌شود. نوع متداول دستگاه آزمایش هایپکینسون از سه میله تشکیل می‌شود (شکل ۱). در آزمایش هایپکینسون، نمونه‌ی سنگی بین میله‌های تصادف و انتقال قرار می‌گیرد. در ابتدای آزمایش، میله‌ی مهاجم توسط تفنگ گازی شلیک می‌شود و پس از برخورد به میله‌ی تصادف، یک موج تنش فشاری در میله‌ی تصادف تولید می‌کند، که به آن موج تصادف گفته می‌شود. از آنجایی که امیدانس مکانیکی نمونه معمولاً کمتر از میله‌هاست، بخشی از موج تصادف پس از برخورد به نمونه به شکل یک موج کششی به میله‌ی تصادف بر می‌گردد که به آن موج انعکاسی گفته می‌شود و بخش دیگر موج وارد نمونه می‌شود، آن را له می‌کند و سپس به شکل یک موج فشاری وارد میله‌ی انتقال می‌شود و در آن انتشار می‌یابد که به آن موج انتقالی می‌گویند.

موج‌های تنش تولید شده با استفاده از کرنش‌سنج‌های نصب شده روی میله‌های تصادف و انتقال ثبت می‌شوند. سه موج منتشر شده در میله‌ها، هر یک به تنهایی کرنشی را تولید می‌کنند که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. کرنش‌های تصادف (ϵ_I) و



شکل ۳. تصویر قالب و نمونه‌های ساخته شده با طول شکاف‌های متفاوت.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش کششی برزیلی.

قطر نمونه (mm)	طول شکاف (mm)	ضخامت نمونه (mm)	بازشدگی شکاف (mm)
۵۰	۱۰	۱۰	۲/۴
۵۰	۲۰	۱۰	۲/۴
۵۰	۳۰	۱۰	۲/۴
۵۰	۴۰	۱۰	۲/۴

حاصل شود. در ادامه، خمیر گچ داخل قالب ریخته شد. لازم به ذکر است برای ساخت نمونه‌های دارای شکاف، از قالب‌هایی با تیغه‌های از پیش موجود استفاده شده است. بعد از ریختن خمیر گچ در داخل قالب به منظور خارج کردن حباب‌های هوای محبوس در خمیر گچ، قالب برای مدت ۴ دقیقه روی میز لرزان لرزانده شد. حدود ۹ دقیقه بعد از لرزاندن نمونه، تیغه از داخل نمونه خارج شد تا شکاف با طول مورد نظر در داخل نمونه ایجاد شود. بعد از حدود ۱ ساعت، قالب‌ها از نمونه جدا شدند و نمونه حدود ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. در نهایت، نمونه به داخل گرم‌خانه با دمای ۵۰ درجه منتقل شد و تا زمانی که کاملاً خشک شود، در آن باقی ماند.

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی، نمونه‌های برزیلی گچی با قطر ثابت ۵۰ میلی‌متر و طول شکاف‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متری ساخته شدند. ضخامت همه‌ی نمونه‌ها ثابت و برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین میزان بازشدگی شکاف در همه‌ی نمونه‌ها ثابت و برابر با ۲/۴ میلی‌متر بوده است. به علاوه، در پژوهش حاضر، به منظور بررسی گسیختگی مد I، راستای شکاف همواره موازی با راستای بارگذاری در نظر گرفته شد. تصویر قالب و نمونه‌های ساخته شده با طول شکاف متفاوت در شکل ۳ مشاهده می‌شود. مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۳. آزمایش کششی برزیلی

در پژوهش حاضر، با انجام آزمایش کششی برزیلی، اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی نمونه‌های گچی بررسی شده است. به این منظور از یک دستگاه آزمایش یونیورسال استفاده شده است. عملکرد دستگاه مذکور به صورت سروالکترومکانیکال است و برای کنترل بار از بازخورد لودسل و جابه‌جایی دقیق فک استفاده می‌کند. با استفاده از موتور و درایور سرور به‌عنوان محرک، دقت کنترل بالا می‌رود و انجام آزمایش در بازه‌ی گسترده‌ی سرعت (۱ تا ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه) ممکن

کششی اسمی در نمونه‌ی دارای شکاف) در مرکز نمونه‌ی برزیلی از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$\sigma_{\tau} = \frac{2F_{ave}}{\pi Dt} \quad (5)$$

که در آن، D و t به ترتیب قطر و ضخامت نمونه هستند. نرخ تنش در مرکز نمونه‌ی برزیلی (نرخ تنش اسمی در نمونه‌ی دارای شکاف) مطابق رابطه‌ی ۶ تخمین زده می‌شود:

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma_{\tau max}}{\tau l} \quad (6)$$

که در آن، $\sigma_{\tau max}$ بیشینه‌ی تنش کششی در مرکز نمونه (تنش کششی اسمی در نمونه‌ی دارای شکاف) و τl اختلاف زمان بین شروع و پیک موج انتقالی است.

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳.۱. مصالح استفاده شده

از سال‌ها قبل به گچ قالب‌گیری شده به منظور بررسی نحوه‌ی شروع و رشد ترک در سنگ دارای شکاف توجه شده است.^[۲۱] در پژوهش حاضر، به منظور ساخت نمونه‌های فیزیکی برای انجام آزمایش‌های کششی برزیلی استاتیکی، از یک نوع گچ دندان‌پزشکی با نام تجاری «اسنوراک»^۸ استفاده شده است. نمونه‌های گچی در پژوهش حاضر با ترکیب پودر گچ، خاک دیاتومه^۹ و آب ساخته شده‌اند. نسبت جرمی ترکیب پودر گچ به آب بنا به توصیه‌ی شرکت سازنده^[۲۲] ۱۰۰۰ به ۳۰۰ و نسبت جرمی پودر گچ به خاک دیاتومه ۱۰۰۰ به ۸/۵ بوده است. دلیل اضافه کردن خاک دیاتومه به مخلوط آب و گچ این است که خاک دیاتومه موجب کاهش آب انداختن مخلوط آب و گچ می‌شود و از ته‌نشین شدن گچ در آب جلوگیری می‌کند.

خصوصیات ماکرومکانیکی نمونه‌ی گچی استفاده شده در پژوهش حاضر با انجام آزمایش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. از آزمایش فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول کشسانی و ضریب پواسون استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری مقاومت کششی نمونه، آزمایش کششی برزیلی بر روی نمونه‌های برزیلی با قطر ۱۰۰ و ضخامت ۵۰ میلی‌متر انجام شد. مقدار چقرمگی شکست برای ترک‌خوردگی مد I با انجام آزمایش کششی برزیلی روی نمونه‌ی دارای شکاف و با استفاده از روابط ارائه شده توسط اتکینسون^{۱۰} و همکاران (۱۹۸۲)، اندازه‌گیری شد.^[۲۳] خصوصیات ماکرومکانیکی نمونه‌ی گچی استفاده شده در پژوهش حاضر به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های گچی، در گام نخست، آب و پودر خاک دیاتومه خوب در داخل ظرف مخلوط شدند. سپس پودر گچ دندان‌پزشکی به صورت تدریجی در داخل ظرف ریخته و به مدت سه دقیقه خوب مخلوط شد تا خمیری یکدخت

جدول ۱. خصوصیات ماکرومکانیکی نمونه‌ی گچی استفاده شده در پژوهش حاضر.

مقاومت فشاری کششی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	ضریب پواسون	چقرمگی شکست مد I ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
۴۳/۱	۸/۵	۰/۲۵	۰/۳

بارگذاری دینامیکی تولید کنند، یک مدل میکرومکانیکی جدید بر مبنای تغییر در قیدهای نرمال و برشی ارائه کرده‌اند،^[۲۹] که براساس آن، قیدهای نرمال و برشی در هر گام محاسباتی، با حاصل ضرب مقدار قیدهای نرمال و برشی استاتیکی در یک تابع خاص جایگزین می‌شوند. از آنجایی که افزایش مقاومت دینامیکی نسبت به نرخ بارگذاری خطی نیست، تابع مذکور به صورت نمایی تعریف شده است. پارامترهای دخیل در تابع نمایی اخیر، سرعت نسبی بین دو ذره در محل تماس آن‌ها در هر گام محاسباتی و ضرابی ثابت هستند که توسط کاربر تعریف می‌شوند: (روابط ۷ و ۸)

$$n_b := n_b \times e^{(\beta_n \times V_{nr})} \quad (7)$$

$$s_b := s_b \times e^{(\beta_s \times V_{sr})} \quad (8)$$

که در آن‌ها، V_{sr} و V_{nr} به ترتیب سرعت نسبی نرمال و برشی بین ذرات در محل تماس آن‌هاست و β_n و β_s به ترتیب ثابت‌های افزایش مقاومت نرمال و برشی با واحد s/m هستند. علامت $=$ در روابط ۷ و ۸، به این معناست که در تحلیل دینامیکی، مقادیر استاتیکی قیدهای نرمال و برشی در سمت راست معادله با مقادیر دینامیکی مرتبط در سمت چپ جایگزین می‌شوند. فخمی و همکاران (۲۰۱۸)، آزمایش فشاری تک‌محوری را بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ در نرخ‌های بارگذاری بالا انجام داده‌اند. پس از شبیه‌سازی عددی، نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد که با استفاده از ثابت‌های $s/m = 100 - 40$ ، $\beta_n = \beta_s = 40$ مدل عددی ارائه شده می‌تواند اضافه مقاومت دینامیکی لازم را تولید کند و نتایجی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی را فراهم سازد.^[۲۹] همچنین اسدی و فخمی (۲۰۲۱) و اسدی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند مدل اصلاحی اخیر در حالت کششی برزلی نیز می‌تواند نتایجی منطقی بر نتایج آزمایش‌های فیزیکی تولید کند.^[۳۰،۳۸] بر همین مبنا در پژوهش حاضر نیز از $s/m = 80$ ، $\beta_n = \beta_s = 40$ استفاده شده است.

۲.۴. کالیبراسیون مدل عددی

مدل ذرات به هم متصل در نرم‌افزار CA۳ از المان‌هایی در مقیاس میکرو تشکیل می‌شود. به همین دلیل خصوصیات مکانیکی مدل مذکور نیز با پارامترهای میکرومکانیکی تعریف می‌شود. پارامترهای میکرومکانیکی اخیر باید به شکلی انتخاب شوند که بعد از ساخت نمونه‌های عددی و شبیه‌سازی آزمایش‌های کششی برزلی و فشاری تک‌محوری، پارامترهای میکرومکانیکی نمونه‌ی عددی ساخته شده در نرم‌افزار CA۳ و نمونه‌های آزمایشگاهی بر هم منطبق شوند. فرایند انتخاب پارامترهای میکرومکانیکی نمونه‌ی عددی به شکلی که پارامترهای میکرومکانیکی نمونه‌ی عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی بر هم منطبق شوند، کالیبراسیون نام دارد و در پژوهش حاضر با کمک روش ارائه شده توسط فخمی و ویلگاس^[۳۰] (۲۰۰۷)، انجام شده است. پارامترهای میکرومکانیکی انتخاب‌شده برای نمونه‌ی عددی ساخته شده، در جدول ۳ ارائه شده است. بعد از معرفی پارامترهای میکرومکانیکی جدول ۳ به نمونه‌ی عددی ساخته شده در نرم‌افزار و شبیه‌سازی آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و کششی برزلی، خصوصیات مکانیکی نمونه‌ی عددی اندازه‌گیری و در جدول ۴ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مطابق جدول ۴ مشاهده می‌شود که مدل عددی به خوبی کالیبره شده است و می‌تواند به درستی رفتار نمونه‌ی فیزیکی را مدل کند.

۳.۴. مدل سازی عددی آزمایش کششی برزلی

مدل‌های عددی آزمایش کششی برزلی برای نمونه‌هایی با طول شکاف متفاوت در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. برای ساخت مدل عددی آزمایش کششی برزلی،



شکل ۴. دستگاه آزمایش و نمونه‌ی برزلی قرار داده شده بین دو فک آن.

خواهد بود. سرعت بارگذاری انتخاب شده در پژوهش حاضر، 0.5 میلی‌متر بر دقیقه بوده و شکستن نمونه‌ها حدود 9 دقیقه طول کشیده است تا ترک‌های ایجاد شده در نمونه، فرصت کافی برای رشد کردن داشته باشند. دستگاه آزمایش و نمونه‌ی برزلی قرار گرفته بین فک‌های آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۴. مطالعات عددی

۱.۴. معرفی نرم‌افزار و مدل میکرومکانیکی

مدل ذرات به هم متصل^[۱] یک نسخه‌ی ساده شده از روش المان گسسته است که در آن ماده با استفاده از مجموعه‌ی از ذرات که به هم متصل هستند، مدل‌سازی می‌شود. المان‌ها در مدل ذرات به هم متصل در آنالیز سه‌بعدی با استفاده از ذرات کروی شکل شبیه‌سازی می‌شوند. روش اخیر، در ابتدا توسط کاندال و استراک^[۱۲] (۱۹۷۹)، به منظور مدل کردن رفتار ذرات ماسه معرفی شده است.^[۳۴] در صورتی که امکان چسبیدن ذرات در محل تماس آن‌ها فراهم شود، مدل ذرات به هم متصل می‌تواند رفتار سنگ و بتن را نیز مدل‌سازی کند. مدل مذکور به‌طور گسترده برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی مواد ژئوتکنیکی توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است.^[۳۵-۳۷]

در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار CA۳،^[۲۸] که یک نرم‌افزار سه‌بعدی ترکیبی المان محدود - المان گسسته است، به منظور مدل‌سازی رفتار سنگ استفاده شده است. در نرم‌افزار CA۳ و در محیط المان گسسته، المان‌های کروی با استفاده از فنرهای نرمال و برشی با ثابت‌های K_n و K_s با یکدیگر در تعامل هستند و رفتار کشسان مدل را فراهم می‌کنند. همچنین المان‌های کروی به منظور مقاومت در برابر تنش‌های خارجی از طریق قیدهای نرمال و برشی n_b و s_b به یکدیگر می‌چسبند و در صورت عدم حضور قیدهای نرمال و برشی با ضریب اصطکاک کولمب μ روی هم می‌لغزند. در مدل CA۳، ذرات تا زمانی که مقدار نیروی نرمال و برشی از مقدار قیدهای نرمال و برشی کمتر باشد، به هم متصل می‌مانند. در غیر این صورت، قیدهای نرمال و برشی شکسته می‌شوند و دیگر نیروی کششی را تحمل نخواهند کرد و فقط در صورت وجود نیروی فشاری بین دو ذره، ذرات در مقابل نیروی برشی متناسب با ضریب اصطکاک کولمب μ مقاومت می‌کنند.

براساس توضیحات اخیر، به منظور تعامل ذرات در نرم‌افزار CA۳، پنج پارامتر میکرومکانیکی (K_n, K_s, n_b, s_b, μ) لازم است. اگرچه حضور پنج پارامتر ذکر شده می‌تواند مقاومت سنگ و شکست آن در بارگذاری استاتیکی را به خوبی مدل کند، اما در بارگذاری دینامیکی قادر نیست اضافه مقاومت مشاهده شده در آزمایش‌های فیزیکی را کاملاً تولید کند.^[۲۹]

فخمی و همکاران (۲۰۱۸)، برای اینکه بتوانند اثر نرخ بارگذاری را در شرایط

جدول ۳. ویژگی‌های میکرومکانیکی نمونه‌ی عددی شبیه‌سازی شده.

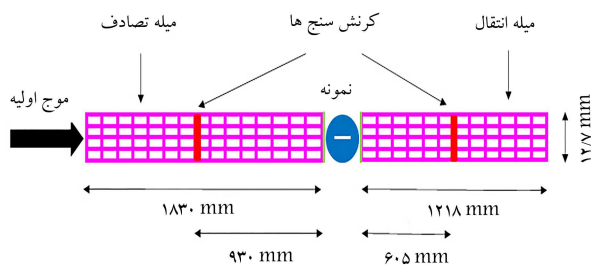
R	شعاع ذرات (mm)	۰/۲۵ - ۰/۳۵
K_n	سختی نرمال (MN/m)	۴/۶
K_s	سختی برشی (MN/m)	۰/۹۲
n_b	قید نرمال (N)	۱
s_b	قید برشی (N)	۲/۵
μ	اصطکاک بین ذرات	۰/۵
ρ	چگالی ذرات (kg/m^3)	۲۵۰۰
σ_c	فشار تشکیل (GPa)	۲/۰

جدول ۵. مشخصات دستگاه آزمایش هاپکینسون.

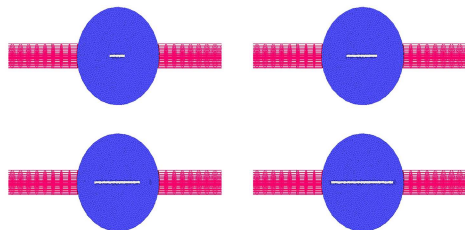
۸۱۰۰	چگالی میله‌ها (kg/m^3)
۲۰۰	مدول کشسانی میله‌ها (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون میله‌ها
۴۹۷۰	سرعت موج در داخل میله‌ها (m/s)
۱۸۳۰	طول میله‌ی تصادف (mm)
۱۲۱۸	طول میله‌ی انتقال (mm)
۱۲/۷	قطر میله‌ها (mm)

جدول ۴. مقایسه‌ی ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ی عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CA۳ و نمونه‌ی آزمایشگاهی.

پارامتر	مقدار	آزمایشگاهی	عددی
مقاومت فشاری (MPa)	۴۳/۱	۴۱/۸	
مقاومت کششی (MPa)	۴/۰	۴/۱	
مدول کشسانی (GPa)	۸/۵	۸/۵	
ضریب پواسون	۰/۲۵	۰/۲۴	
چقرمگی شکست I ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	۰/۳	۰/۳۴	



شکل ۶. تصویر شماتیک و شرایط مرزی مدل عددی آزمایش هاپکینسون.

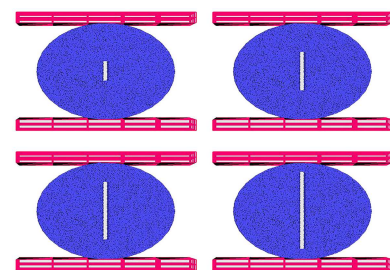


شکل ۷. مدل عددی آزمایش هاپکینسون برای نمونه‌های با طول شکاف متفاوت.

المان گسسته و با استفاده از مدل ذرات به هم متصل و میله‌های تصادف و انتقال در محیط المان محدود مدل‌سازی شده‌اند. برای میله‌ها رفتار کشسان خطی در نظر گرفته شد. ابعاد و پارامترهای مکانیکی دستگاه آزمایش مدل شده در پژوهش حاضر، مطابق با دستگاه فیزیکی آزمایش هاپکینسون استفاده شده در پژوهش فخمی و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۹] بوده و در جدول ۵ ارائه شده است.

تصویر شماتیک مدل عددی دستگاه آزمایش هاپکینسون در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در مدل‌سازی پژوهش حاضر، همه‌ی قسمت‌های دستگاه به جز میله‌ی مهاجم، دقیقاً مدل‌سازی شده‌اند. همچنین در محل تماس نمونه و میله‌ها، دیواره تعریف شده است تا ارتباط دو محیط المان محدود و المان گسسته را برقرار سازد. در داخل میله‌ها در محل کرنش‌سنج‌ها، المان‌هایی به منظور ذخیره‌ی تغییرات تنش در نظر گرفته شده است. در نتیجه، مدل عددی به شرایط واقعی نزدیک بوده است. مدل‌های عددی ساخته شده برای نمونه‌های با طول شکاف متفاوت در شکل ۷ مشاهده می‌شوند.

در پژوهش حاضر، موج اولیه در انتهای آزاد میله‌ی تصادف به صورت یک موج تنش با نرخ بارگذاری مشخص (\dot{S}_I) اعمال شده است. تعدادی از موج‌های تصادف به کار رفته در پژوهش حاضر در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن به منظور تغییر نرخ تنش در میله‌ی تصادف (\dot{S}_I) با ثابت نگه داشتن زمان بارگذاری، پیک موج تغییر داده شده است.

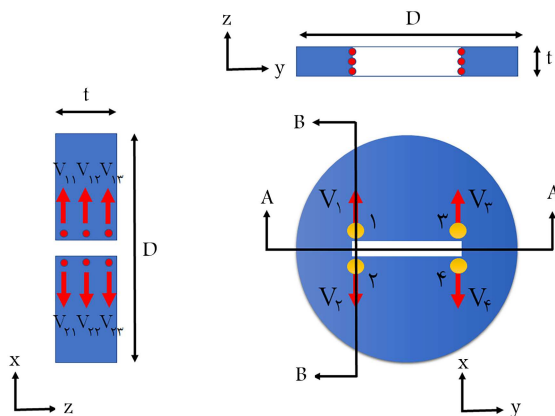


شکل ۵. مدل عددی آزمایش برزلی برای نمونه‌های با طول‌های متفاوت شکاف.

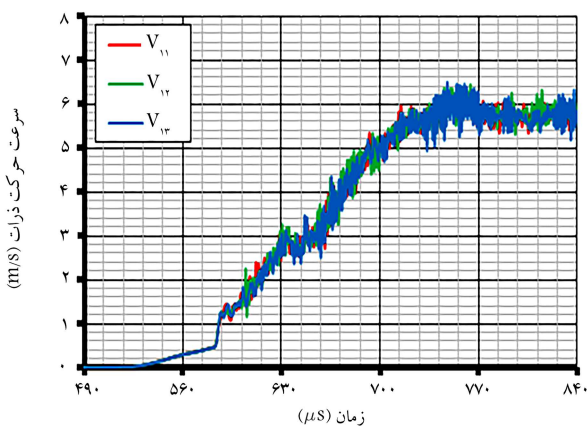
نمونه‌ها در محیط المان گسسته و با استفاده از مدل ذرات به هم متصل ساخته شدند. همچنین دو صفحه برای بارگذاری نمونه در راستای عمود بر محور نمونه در محیط المان محدود ساخته شدند. رفتار صفحات، کشسان در نظر گرفته شد و پارامترهای فولاد برای آن‌ها تعریف شد. برای برقراری ارتباط بین دو بخش المان محدود و المان گسسته از دیواره استفاده شده است. جابه‌جایی صفحه‌ی پایینی بسته و تغییرات نیروی اعمال شده به نمونه در طول تحلیل ذخیره شد.

۴.۴. مدل‌سازی عددی آزمایش هاپکینسون

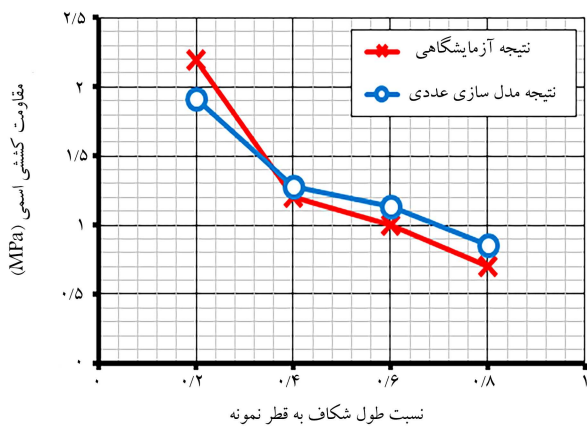
در گروهی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی آزمایش هاپکینسون، شرایط مرزی مانند موج تنش را مستقیماً به نمونه‌ی بررسی شده اعمال می‌کردند که میله‌های تصادف و انتقال در آن‌ها کاملاً مدل‌سازی نمی‌شدند.^[۴۱] در نرم‌افزار CA۳، نمونه و میله‌های تصادف و انتقال را می‌توان کاملاً و با طول واقعی مدل‌سازی کرد. مزیت اخیر نرم‌افزار CA۳، منجر به بروز رفتار واقع‌گرایانه‌تر در مدل می‌شود و کمک می‌کند تا فرایند گسترش موج تنش در داخل میله‌ها و نمونه کاملاً بررسی شود. در مدل‌سازی آزمایش هاپکینسون، نمونه در محیط



شکل ۱۰. برش عرضی نمونه‌ی دارای شکاف و نقاط اندازه‌گیری سرعت ذرات.



شکل ۱۱. سرعت حرکت ذرات انتخاب شده در نقطه‌ی ۱ در لحظات مختلف.

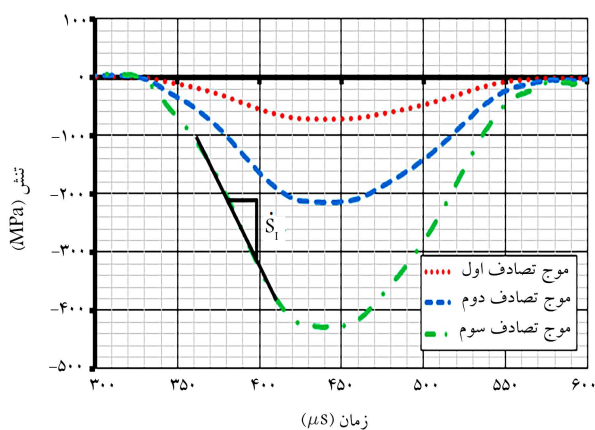


شکل ۱۲. اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی.

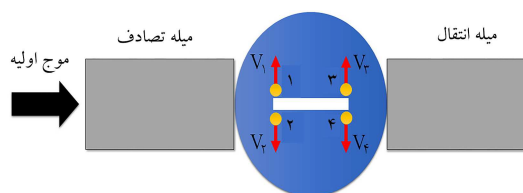
۵. بررسی نتایج

۱.۱.۵. بررسی نتایج استاتیکی

۱.۱.۵.۱. بررسی اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی
 نتیجه‌ی بررسی اثر طول شکاف در مقاومت کششی استاتیکی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. مقاومت کششی اسمی نمونه‌های دارای شکاف با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه شده است. مطابق شکل ۱۲، با افزایش طول شکاف، مقاومت کششی کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود نتایج عددی و آزمایشگاهی به شکل



شکل ۸. تصویر شماتیک موج‌های تصادف به‌کار رفته در پژوهش حاضر.



شکل ۹. تصویر شماتیک نمونه، نقاط و راستای اندازه‌گیری سرعت ذرات.

۱.۴.۴. بررسی سرعت بازشدگی شکاف در مدل‌های عددی آزمایش هاپکینسون

در پژوهش حاضر، برای تفسیر نتایج، سرعت بازشدگی شکاف در نمونه‌های با طول‌های متفاوت شکاف بررسی شده است. به این منظور و براساس شکل ۹، سرعت حرکت تعدادی از ذرات سازنده نمونه در پیرامون نوک سمت چپ و راست شکاف در نقاط ۱ تا ۴ (نقاط نارنجی رنگ) و در راستای فلش قرمز رنگ در لحظات مختلف ذخیره شده است. $V_{(Right)}$ و $V_{(Left)}$ به ترتیب سرعت بازشدگی نوک سمت چپ و راست شکاف هستند که از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آیند.

$$|V_1 - V_2| = V_{(Left)}$$

$$|V_2 - V_3| = V_{(Right)} \quad (9)$$

لازم به ذکر است براساس شکل ۱۰، مقدار هر یک از سرعت‌های V_1 ، V_2 ، V_3 و V_4 ، میانگین سرعت حرکت سه ذره‌ی مختلف در نقاط ۱ تا ۴ هستند و مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه شده‌اند.

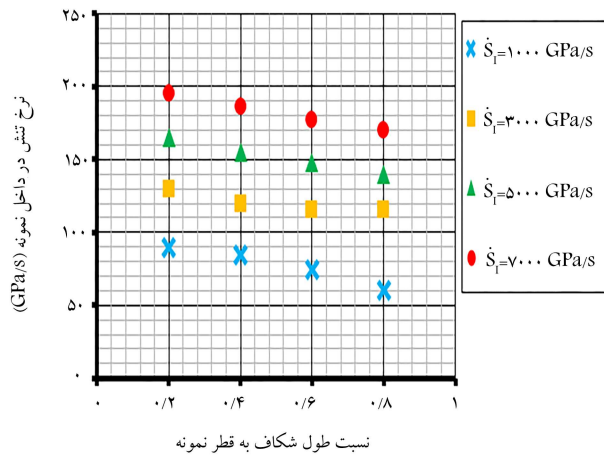
$$\frac{V_{11} + V_{12} + V_{13}}{3} = V_1$$

$$\frac{V_{21} + V_{22} + V_{23}}{3} = V_2$$

$$\frac{V_{31} + V_{32} + V_{33}}{3} = V_3$$

$$\frac{V_{41} + V_{42} + V_{43}}{3} = V_4 \quad (10)$$

در شکل ۱۱، یک نمونه از سرعت حرکت سه ذره‌ی انتخاب شده در نقطه‌ی ۱ در نمونه‌ی با نسبت طول شکاف به قطر ۰/۸ در لحظات مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، سرعت حرکت ذرات انتخاب شده در نقطه‌ی ۱ برهم منطبق است. همین انطباق در نقاط ۲ تا ۴ نیز مشاهده شده است. انطباق سرعت حرکت ذرات بررسی شده در هر یک از نقاط ۱ تا ۴ نشان می‌دهد که روابط ارائه شده برای محاسبه‌ی سرعت بازشدگی شکاف قابل قبول هستند.



شکل ۱۴. ارتباط بین نرخ تنش در میله‌ی تصادف ($\dot{\sigma}_T$) و نرخ تنش در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) برای نمونه‌های با طول‌های متفاوت شکاف.

جدول ۶. میزان جابه‌جایی امواج نسبت به زمان.

موج	فاصله (mm)	زمان جابه‌جایی (μs)
تصادف	۹۳°	+۱۸۷/۱۵
انعکاسی	-۹۳°	-۱۸۷/۱۵
انتقالی	-۶۰۵	-۱۲۰/۷۴

۲.۲.۵. بررسی تعادل دینامیکی نمونه‌ها

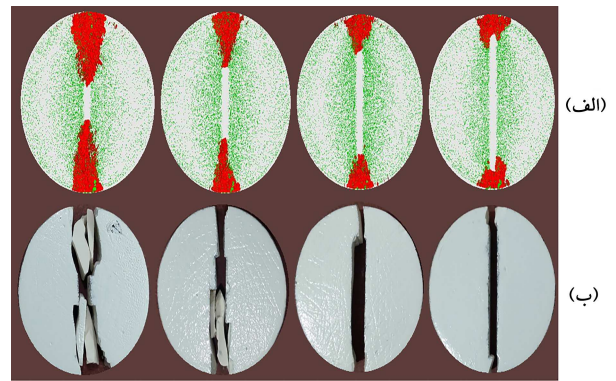
در آزمایش‌ها پکینسون، برقراری تعادل دینامیکی در نمونه ضروری است. برای بررسی تعادل دینامیکی در پژوهش حاضر، موج‌های تصادف، انتقالی، و انعکاسی نسبت به زمان جابه‌جا می‌شوند تا امکان محاسبه‌ی تنش در دو سر نمونه (نقاط a و b در شکل ۲) فراهم شود. زمان جابه‌جایی هر یک از موج‌ها براساس فاصله‌ی کرنش‌سنج‌ها تا دو سر نمونه براساس شکل ۶ و سرعت حرکت موج در میله‌ها $c = 4970 \text{ m/s}$ محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

لازم به ذکر است برای برقراری تعادل دینامیکی، رابطه‌ی ۲ باید برقرار باشد و مجموع کرنش‌ها یا تنش‌های تصادف و انعکاسی در نقطه‌ی a با کرنش یا تنش انتقالی در نقطه‌ی b برابر باشند. یک نمونه از موج‌های تنش تولید شده در مدل عددی آزمایش‌ها پکینسون (شکل ۱۵ الف) و همچنین یک نمونه از تعادل دینامیکی (شکل ۱۵ ب) در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که مطابق آن تعادل دینامیکی به شکل نسبتاً مطلوبی برقرار است. توجه به این نکته ضرورت دارد که در شبیه‌سازی‌های عددی در پژوهش حاضر، تعادل دینامیکی در نمونه‌های با طول‌های متفاوت شکاف و در نرخ‌های بارگذاری مختلف، همواره به شکل قابل قبولی برقرار بوده است.

۳.۲.۵. بررسی اثر نرخ بارگذاری در مقاومت کششی

به منظور بررسی اثر نرخ بارگذاری در مقاومت کششی، نمودار نسبت مقاومت دینامیکی به مقاومت استاتیکی (DIF) در برابر نرخ تنش در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که مطابق آن، نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهشگران مقایسه شده است. [۲۲-۲۵]

در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که نتایج عددی نمونه‌ی فاقد شکاف در پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهشگران مطابقت دارد. همچنین مدل میکرومکانیکی ارائه شده توسط فخمی و همکاران (رابطه‌های ۷ و ۸)، قادر است اضافه مقاومت ناشی از اثر نرخ بارگذاری را به شکل مطلوبی تولید کند. همچنین مطابق شکل ۱۶، نمونه‌های دارای شکاف در مقایسه با نمونه‌ی فاقد شکاف نسبت



الف) شبیه‌سازی عددی در نرم افزار CA3؛ ب) آزمایش‌های فیزیکی.

شکل ۱۳. الگوی شکستن نمونه‌های با طول شکاف متفاوت تحت بارگذاری استاتیکی.

قابل قبولی نزدیک به هم هستند و مدل ذرات به هم متصل به خوبی توانسته است نتایج مشابه نتایج آزمایشگاهی تولید کند.

۲.۱.۵. بررسی الگوی شکستن نمونه تحت بارگذاری استاتیکی

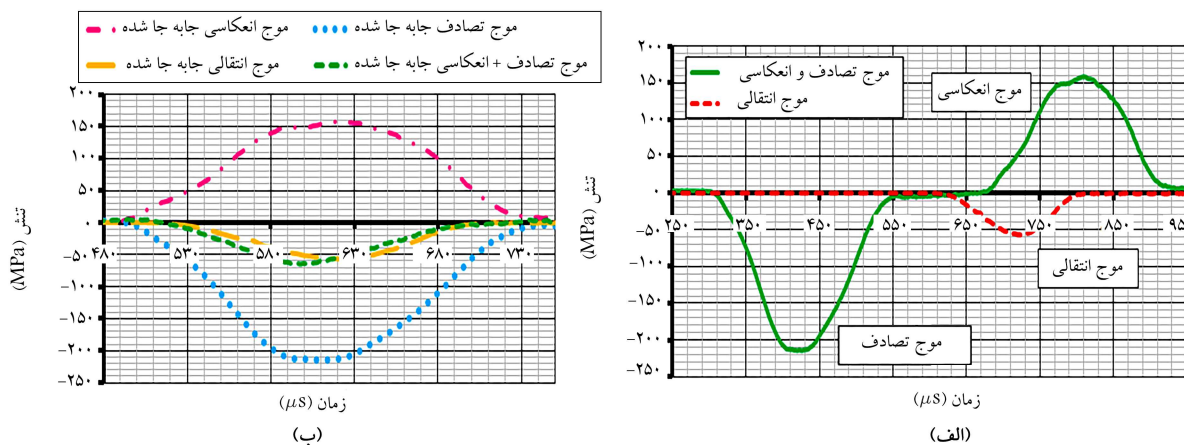
نتیجه‌ی بررسی الگوی شکستن نمونه‌های با طول‌های متفاوت شکاف در آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی عددی تحت بارگذاری استاتیکی در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. در شکل ۱۳ الف که مربوط به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی است، ریزترک‌ها با رنگ قرمز و شدت نیروی بین ذرات با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در همه‌ی نمونه‌ها، به دلیل وجود تمرکز تنش در نوک شکاف، شکست نمونه در راستای شکاف افتاده است. همچنین نتیجه نشان می‌دهد الگوی شکستن نمونه در آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی عددی مشابه یکدیگر است.

۲.۵. بررسی نتایج دینامیکی

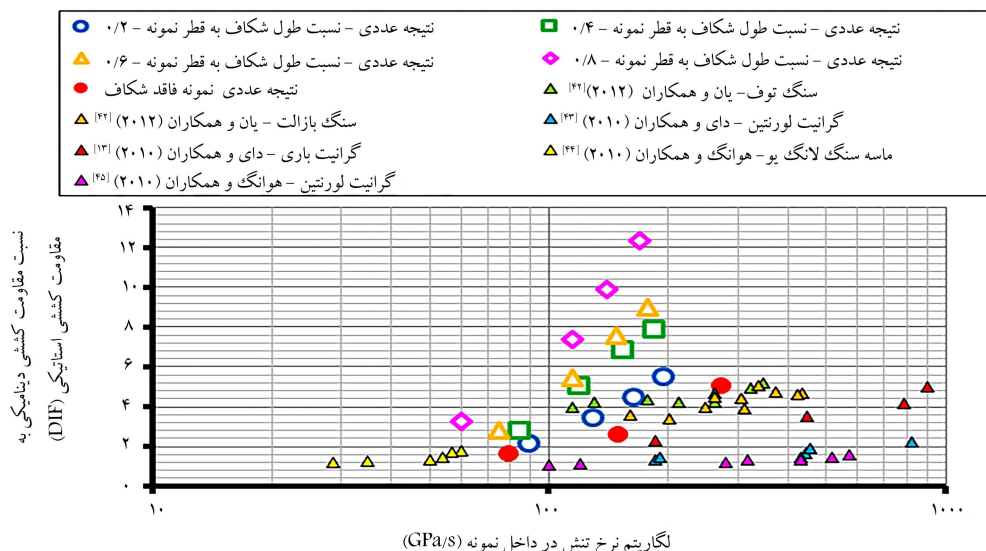
۱.۲.۵. بررسی ارتباط بین نرخ تنش در میله‌ی تصادف ($\dot{\sigma}_T$) و نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$)

هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر توأم طول شکاف و نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) در مقاومت بوده است. در نتیجه، رابطه‌ی بین نرخ تنش در میله‌ی تصادف ($\dot{\sigma}_T$) که توسط کاربرد به مدل عددی اعمال می‌شود، نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) و طول شکاف باید بررسی شود، تا بتوان اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی را در یک مقدار ثابت از نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) بررسی کرد. نتیجه‌ی بررسی انجام شده در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش طول شکاف به ازاء یک مقدار ثابت برای نرخ تنش در میله‌ی تصادف ($\dot{\sigma}_T$)، نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) کاهش یافته است، که دلیل آن، کاهش سختی نمونه با افزایش طول شکاف بوده است.

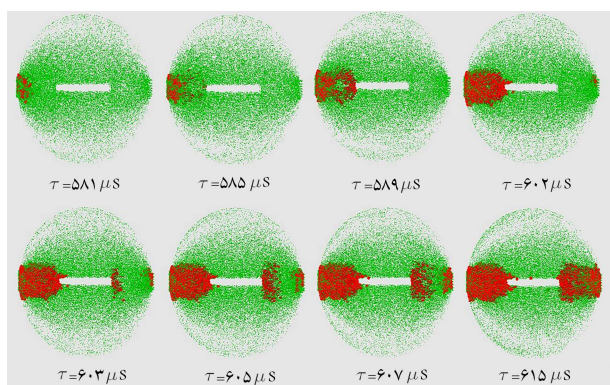
در پژوهش آزمایشگاهی انجام شده توسط لی و همکاران (۲۰۱۷)، نیز نتیجه مشابهی حاصل شده است. [۲۶] ایشان نشان دادند که با اعمال یک موج تصادف ثابت به نمونه‌هایی با طول‌های متفاوت شکاف، با افزایش طول شکاف، نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) کاهش یافته است. [۲۶] با توجه به تأثیرپذیری نرخ تنش اسمی ($\dot{\sigma}$) ایجاد شده در داخل نمونه از طول شکاف، تعداد زیادی آزمایش عددی با موج‌های تصادف متفاوت انجام شد تا بتوان اثر طول شکاف بر مقاومت کششی دینامیکی را به ازاء مقادیر ثابتی از نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) بررسی کرد.



شکل ۱۵. الف) یک نمونه از موج‌های تنش تولید شده در مدل عددی آزمایش هاپکینسون، ب) یک نمونه‌ی تعادل دینامیکی در نمونه‌ی عددی.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط سایر پژوهشگران در خصوص اثر نرخ بارگذاری در مقاومت دینامیکی.



شکل ۱۷. الگوی رشد ترک در نمونه‌ی دارای شکاف تحت آزمایش هاپکینسون.

۵.۲.۵. بررسی اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری

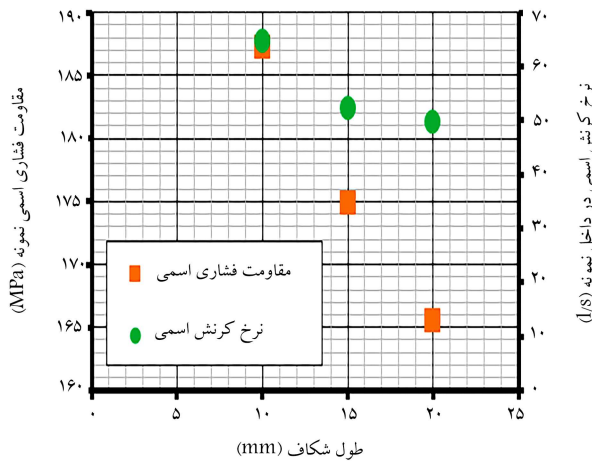
برای بررسی اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری در مقاومت کششی دینامیکی، آزمایش هاپکینسون بر روی نمونه‌هایی با طول‌های متفاوت شکاف و در نرخ‌های بارگذاری متفاوت شبیه‌سازی شده است، که نتیجه‌ی آن در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

به نرخ بارگذاری، حساسیت بیشتری از خود نشان داده‌اند. این حساسیت بیشتر را می‌توان به وجود تمرکز تنش در نوک شکاف و بالاتر بودن نرخ تنش در محل نوک شکاف نسبت داد که موجب حساسیت بیشتر نمونه‌ی دارای شکاف نسبت به نرخ بارگذاری شده است. به علاوه مشاهده می‌شود که با افزایش طول شکاف، حساسیت نمونه نسبت به نرخ بارگذاری نیز بیشتر شده است.

۴.۲.۵. الگوی رشد ترک در نمونه در آزمایش هاپکینسون

به منظور بررسی الگوی رشد ترک در نمونه‌ی دارای شکاف تحت بارگذاری دینامیکی، ریزترک‌های ایجاد شده در نمونه در لحظات مختلف آزمایش در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. در بررسی انجام شده، نرخ تنش در داخل نمونه، 90° گیگاپاسکال بر ثانیه و نسبت طول شکاف به قطر نمونه، $0/4$ بوده است.

مطابق شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که ریزترک‌ها ابتدا از سمت چپ و در محل تماس نمونه و میله‌ی تصادف شروع شده‌اند، اما پس از مدت کوتاهی، ریزترک‌ها در نوک سمت چپ شکاف شکل گرفته و توسعه یافته‌اند. در ادامه، ریزترک‌ها در نوک سمت راست شکاف ایجاد شده و به تدریج رشد کرده‌اند، تا در نهایت نمونه در راستای شکاف موجود در داخل نمونه گسیخته شود.



شکل ۲۰. اثر طول شکاف در مقاومت فشاری دینامیکی و نرخ کرنش اسمی داخل نمونه بر مبنای پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷). [۲۶]

پایین، افزایش طول شکاف تأثیر چندانی در افزایش سرعت بازشدگی شکاف نداشته است، اما در نرخ‌های بارگذاری بالاتر با افزایش طول شکاف، سرعت بازشدگی نوک سمت چپ شکاف افزایش یافته است. به علاوه مشاهده می‌شود که در نرخ‌های بارگذاری بالاتر، تغییر طول شکاف تأثیر بیشتری در سرعت بازشدگی نوک شکاف داشته است. به عبارت دیگر، با افزایش نرخ بارگذاری، میزان تغییر سرعت بازشدگی شکاف با تغییر طول شکاف افزایش یافته است.

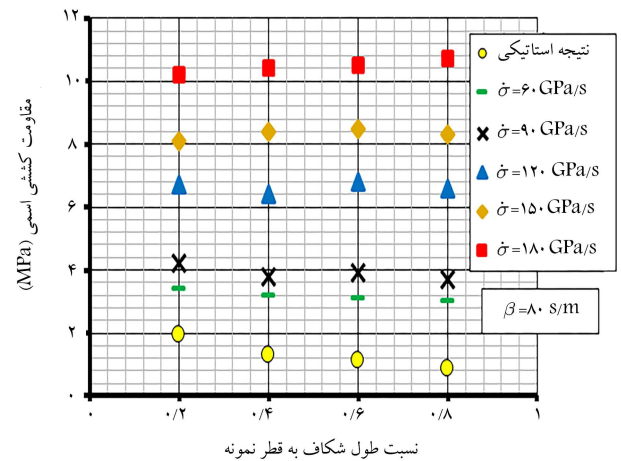
۶. بحث در نتایج

اگرچه مطالعات انجام شده در زمینه اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی سنگ بسیار محدود است، اما نتایج پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط برخی پژوهشگران قابل مقایسه است. لی و همکاران (۲۰۱۷)، اثر طول شکاف در مقاومت فشاری دینامیکی نوعی سنگ ماربل را بررسی کرده‌اند، [۲۶] که نتیجه‌ی آن در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود.

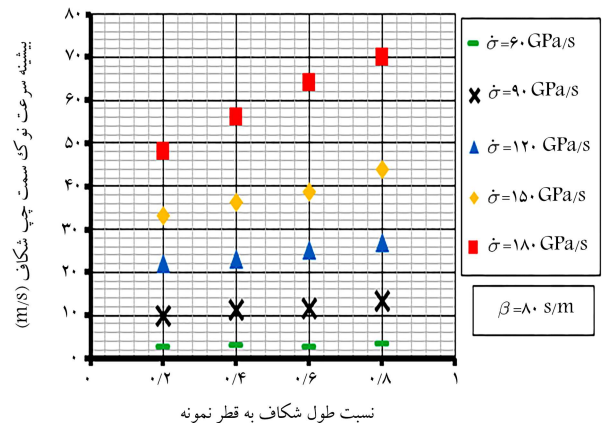
نتیجه‌ی بررسی لی و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد با افزایش طول شکاف، مقاومت فشاری دینامیکی تا حدودی کاهش یافته است، اما آن‌ها در پژوهش خود نرخ کرنش کاملاً ثابتی را به کار نبردند. مطابق شکل ۲۰ می‌توان این طور استنباط کرد که در صورتی که اثر طول شکاف در یک نرخ کرنش نسبتاً ثابت بررسی شود، مقاومت نمونه تغییر زیادی نمی‌کند.

کیپ و همکاران (۱۹۸۰)، با استفاده از مدل مکانیک شکستی دینامیکی چن و سیچ (۱۹۷۷)، [۲۷] اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی شیل نفتی را با استفاده از انتگرال‌گیری عددی و با انجام محاسبات متعدد برای طول‌های متفاوت شکاف و نرخ‌های مختلف کرنش بررسی کرده‌اند. [۲۴] مدل ایشان در یک محیط دو بُعدی با ابعاد بی‌نهایت اعمال شد. نتیجه‌ی بررسی آن‌ها در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن، اگرچه در حالت استاتیکی با افزایش طول شکاف، مقاومت نمونه کاهش یافته است، اما در حالت بارگذاری دینامیکی، با افزایش طول شکاف، مقاومت دینامیکی ثابت باقی مانده است (برای طول شکاف‌های زیاد).

در پژوهش حاضر نیز مطابق شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که در نرخ بارگذاری پایین، مانند حالت استاتیکی با افزایش طول شکاف مقاومت کششی کاهش یافته است. اما با افزایش نرخ بارگذاری این روند تغییر کرده و در نرخ‌های بارگذاری بالاتر، با افزایش طول



شکل ۱۸. اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری در مقاومت کششی.

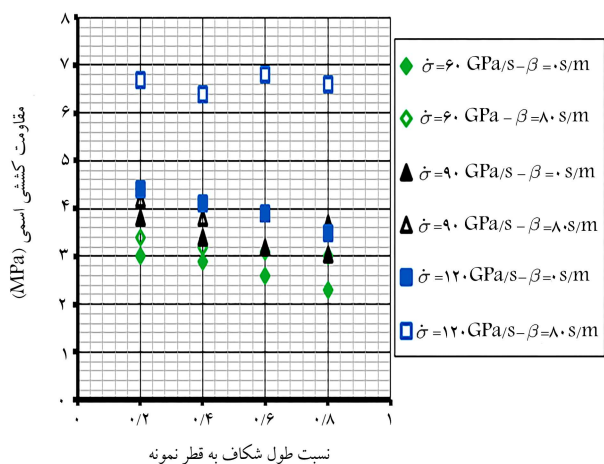


شکل ۱۹. اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری در سرعت بازشدگی نوک سمت چپ شکاف موجود در نمونه.

لازم به ذکر است که هر یک از نمادهای به کار رفته در شکل ۱۸، نشان‌دهنده‌ی یک مقدار مشخص از نرخ تنش اسمی در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) هستند.

نتیجه‌ی بررسی نشان می‌دهد که در نمونه‌های با طول‌های ثابت شکاف، با افزایش نرخ تنش، مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که در نرخ بارگذاری پایین، با افزایش طول شکاف، مقاومت نمونه کاهش یافته و این روند کاهش با نتیجه‌ی بررسی اثر طول شکاف در مقاومت کششی در حالت استاتیکی هم‌خوانی داشته است. اما با افزایش نرخ بارگذاری شرایط تغییر کرده و مشاهده شده است که در نرخ بارگذاری بالاتر، با افزایش طول شکاف، مقاومت تقریباً ثابت باقی مانده و طول شکاف تأثیری در مقاومت کششی نداشته است. در ادامه و با افزایش بیشتر نرخ بارگذاری، نتیجه به شکل دیگری رقم خورده و با افزایش طول شکاف، مقاومت نمونه تا حدی افزایش پیدا کرده است، که نتیجه‌ی به‌دست آمده برعکس نتیجه در حالت استاتیکی است.

به منظور بررسی بیشتر نتایج حاصل شده، سرعت بازشدگی نوک سمت چپ شکاف تحت بارگذاری دینامیکی بررسی شده است. بیشینه‌ی سرعت بازشدگی نوک سمت چپ شکاف در نمونه‌های با طول‌های متفاوت شکاف و در نرخ‌های بارگذاری متفاوت در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. نتیجه نشان می‌دهد که در نمونه‌ی با طول شکاف ثابت، بیشینه‌ی سرعت بازشدگی نوک سمت چپ شکاف با افزایش نرخ بارگذاری، افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که اگرچه در نرخ بارگذاری



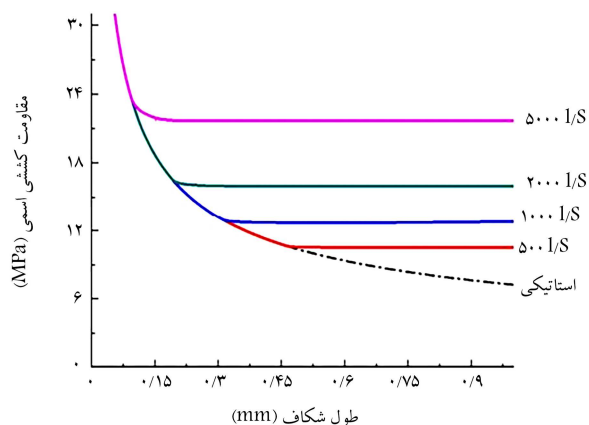
شکل ۲۲. اثر توأم پارامتر β و طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی سنگ.

مدل ارائه شده توسط روابط ۷ و ۸ انجام داده است. در نتیجه، مدل میکرومکانیکی نوشتار حاضر، مدلی مفید در بررسی شکست دینامیکی مواد ترد است.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار CA^۳ که یک نرم‌افزار سه‌بعدی ترکیبی آلمان محدود - آلمان گسسته است، آزمایش هابکینسون مدل‌سازی و اثر توأم طول شکاف و نرخ بارگذاری در مقاومت کششی دینامیکی سنگ دارای شکاف بررسی شده است. نتایج حاصل با نتیجه‌ی استاتیکی (عددی و آزمایشگاهی) مقایسه شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. نتیجه‌ی مطالعه‌های عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش طول شکاف، مقاومت کششی استاتیکی کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که مدل ذرات به هم متصل توانسته است به خوبی رفتار سنگ دارای شکاف تحت بارگذاری استاتیکی را شبیه‌سازی کند.
۲. در بارگذاری دینامیکی، اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی، متفاوت از اثر آن در مقاومت کششی استاتیکی بوده و بسته به نرخ بارگذاری اعمال شده، با افزایش طول شکاف، مقاومت یا کاهش یافته، یا ثابت مانده و یا افزایش یافته است که دلیل آن به سرعت بازشدگی شکاف مرتبط است.
۳. به دلیل وجود تمرکز سرعت بازشدگی و تنش در اطراف نوک شکاف موجود در نمونه، مقاومت نمونه‌های دارای شکاف در مقایسه با مقاومت نمونه‌های فاقد شکاف، حساسیت بیشتری نسبت به نرخ بارگذاری داشته و این حساسیت با افزایش طول شکاف افزایش یافته است.
۴. مدل اصلاحی ارائه شده توسط فخمی و همکاران به خوبی می‌تواند رفتار دینامیکی سنگ را شبیه‌سازی و اضافه مقاومت تولید شده در آزمایش‌های فیزیکی را تولید کند. همچنین مدل ارائه شده به خوبی می‌تواند اثر ناشی از سرعت حرکت ذرات در نوک شکاف را شبیه‌سازی کند.



شکل ۲۱. اثر طول شکاف در مقاومت کششی دینامیکی شیل نفتی. [۲۴] (اعداد روی نمودار نشان‌دهنده‌ی مقدار نرخ کرنش برای هر یک از منحنی‌هاست).

شکاف، مقاومت کششی تقریباً ثابت باقی مانده است. همچنین با افزایش بیشتر نرخ بارگذاری مشاهده می‌شود که با افزایش طول شکاف، مقاومت افزایش یافته است. دلیل این اتفاق به سرعت بازشدگی شکاف در نمونه بر می‌گردد. از نتیجه‌ی بررسی سرعت بازشدگی نوک سمت چپ شکاف در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که در نرخ بارگذاری پایین با افزایش طول شکاف، بیشینه‌ی سرعت بازشدگی شکاف چندان تغییر نکرده و مقدار آن تقریباً ثابت باقی مانده است. همین امر موجب مشاهده‌ی رفتاری مشابه حالت استاتیکی شده و در نرخ بارگذاری پایین، مقاومت نمونه با افزایش طول شکاف کاهش یافته است. اما در نرخ‌های بارگذاری بالاتر، با افزایش طول شکاف، سرعت بازشدگی شکاف افزایش یافته است. افزایش سرعت بازشدگی شکاف، موجب تولید مقاومت اضافی در نمونه‌های با طول شکاف بیشتر شده است. این اضافه مقاومت، اثرکاهشی افزایش طول شکاف در مقاومت کششی نمونه را خنثی کرده و در نتیجه در نرخ‌های بارگذاری بالا با افزایش طول شکاف، مقاومت کششی نمونه تقریباً ثابت باقی مانده است. در ادامه و با افزایش بیشتر نرخ بارگذاری، شیب خطوط در شکل ۱۹ افزایش یافته و همین مسئله موجب افزایش مقدار اضافه مقاومت تولید شده به دلیل افزایش سرعت بازشدگی شکاف شده است. نهایتاً اثر مثبت اضافه مقاومت تولید شده، بیشتر از اثر منفی افزایش طول شکاف شده و به این ترتیب در نرخ‌های بارگذاری خیلی بالا، مقاومت نمونه با افزایش طول شکاف تا حدی افزایش یافته است. در شکل ۲۲، اثر پارامتر β در نتایج پژوهش حاضر بررسی شده است که مطابق آن در عدم حضور پارامتر β ($\beta = 0$ s/m)، علی‌رغم آنکه نمونه تحت بارگذاری دینامیکی با نرخ بارگذاری بالا قرار گرفته است، اما مدل عددی نتوانسته است افزایش مقاومت موردانتظار را تولید کند. همچنین در عدم حضور پارامتر β ، ثابت ماندن مقاومت نمونه با افزایش طول شکاف نیز اتفاق نیفتاده و کاهش مقاومت دینامیکی با افزایش طول شکاف مشاهده شده است. از بحث اخیر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای آنکه سرعت بازشدگی نوک شکاف بتواند اثر معنادار و نزدیک به واقعیت در مقاومت دینامیکی کششی سنگ بگذارد، باید در سطح میکروسکوپی سرعت نسبی ذرات منجر به تولید اضافه مقاومت در نقطه‌ی تماس بین ذرات شود و این دقیقاً همان کاری است که

پانوشتها

1. Li & Meng

2. Hao
3. Li
4. Kipp
5. Chen & Sih

6. Wang
7. Kolsky
8. Snow rock
9. diatomaceous earth
10. Atkinson
11. bonded particle model
12. Cundall & Strack
13. Villegas

منابع (References)

1. Tang, C.A., Liu, H., Lee, P.K.K. and et al. "Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression-part I: Effect of heterogeneity", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **37**(4), pp. 555-569 (2000).
2. Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P.K. and Martin, C.D. "Modelling brittle failure of rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**(6), pp. 731-741 (2002).
3. Cai, M. "Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries insight from numerical modeling", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **45**(5), pp. 763-772 (2008).
4. Li, D., Li, C.C. and Li, X. "Influence of sample height-to-width ratios on failure mode for rectangular prism samples of hard rock loaded in uniaxial compression", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **44**(3), pp. 253-267 (2011).
5. Yang, S.Q., Jing, H.W. and Wang, S.Y. "Experimental investigation on the strength, deformability, failure behavior and acoustic emission locations of red sandstone under triaxial compression", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**(4), pp. 583-606 (2012).
6. Sagong, M. and Bobet, A. "Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**(2), pp. 229-241 (2002).
7. Li, Y.P., Chen, L.Z. and Wang, Y.H. "Experimental research on pre-cracked marble under compression", *International Journal of Solids and Structures*, **42**(9-10), pp. 2505-2516 (2005).
8. Park, C.H. and Bobet, A. "Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**(5), pp. 819-829 (2009).
9. Wong, L.N.Y. and Einstein, H.H. "Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 2-microscopic observations and interpretation", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **42**(3), pp. 513-545 (2009).
10. Lee, H. and Jeon, S. "An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression", *International Journal of Solids and Structures*, **48**(6), pp. 979-999 (2011).
11. Yang, S.Q. and Jing, H.W. "Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression", *International Journal of Fracture*, **168**(2), pp. 227-250 (2011).
12. Yin, P., Wong, R.H.C. and Chau, K.T. "Coalescence of two parallel pre-existing surface cracks in granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **68**, pp. 66-84 (2014).
13. Dai, F., Huang, S., Xia, K. and et al. "Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**(6), pp. 657-666 (2010).
14. Huang, S., Xia, K. and Dai, F. "Establishment of a dynamic Mohr-Coulomb failure criterion for rocks", *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, **13**(1), pp. 55-60 (2012).
15. Zhang, Q.B. and Zhao, J. "Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **60**, pp. 423-439 (2013).
16. Zhao, G.F., Russell, A.R., Zhao, X. and et al. "Strain rate dependency of uniaxial tensile strength in Gosford sandstone by the distinct lattice spring model with X-ray micro-CT", *International Journal of Solids and Structures*, **51**(7-8), pp. 1587-1600 (2014).
17. Li, Q.M. and Meng, H. "About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test", *International Journal of Solids and Structures*, **40**(2), pp. 343-360 (2003).
18. Hao, Y., Hao, H., Jiang, G.P. and et al. "Experimental confirmation of some factors influencing dynamic concrete compressive strengths in high-speed impact tests", *Cement and Concrete Research*, **52**, pp. 63-70 (2013).
19. Li, Y.S. and Xia, C.H. "Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **37**(3), pp. 467-475 (2000).
20. Li, J., Ma, G. and Zhao, J. "Analysis of stochastic seismic wave interaction with a slippery rock fault", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **44**(1), pp. 85-92 (2011).
21. Li, H. and Wong, L.N.Y. "Influence of flaw inclination angle and loading condition on crack initiation and propagation", *International Journal of Solids and Structures*, **49**(18), pp. 2482-2499 (2012).
22. Li, D., Cheng, T., Zhou, T. and et al. "Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble specimens with a single hole under impact loading", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **34**(2), pp. 249-260 (2015).
23. Zou, C. and Wong, L.N.Y. "Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading", *Engineering Geology*, **173**, pp. 19-31 (2014).
24. Kipp, M.E., Grady, D.E. and Chen, E.P. "Strain-rate dependent fracture initiation", *International Journal of Fracture*, **16**(5), pp. 471-478 (1980).
25. Wang, Q.Z., Zhang, S. and Xie, H.P. "Rock dynamic fracture toughness tested with holed-cracked flattened Brazilian discs diametrically impacted by SHPB and its size effect", *Experimental Mechanics*, **50**(7), pp. 877-885 (2010).

26. Li, X., Zhou, T. and Li, D. "Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-Hopkinson pressure bar", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **50**(1), pp. 29-44 (2017).
27. Chen, E.P. and Sih, G.C. "Elastodynamic Crack Problems", ed. G.C. Sih, Noordhoff (1977).
28. Fakhimi, A. "A hybrid discrete-finite element model for numerical simulation of geomaterials", *Computers and Geotechnics*, **36**(3), pp. 386-395 (2009).
29. Kolsky, H. "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading", *Proceedings of the physical society Section B*, **62**(11), pp. 676-700 (1949).
30. Fakhimi, A., Azhdari, P. and Kimberley, J. "Physical and numerical evaluation of rock strength in split Hopkinson pressure bar testing", *Computers and Geotechnics*, **102**, pp. 1-11 (2018).
31. Einstein, H.H. and Hirschfeld, R.C. "Model studies on mechanics of jointed rock", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, **99**(3), pp. 229-248 (1973).
32. MUNGYO Company, www.snowrock.com/en (1946).
33. Atkinson, C., Smelser, R.E. and Sanchez, J. "Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test", *International Journal of Fracture*, **18**(4), pp. 279-291 (1982).
34. Cundall, P.A. and Strack, O.D. "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, **29**(1), pp. 47-65 (1979).
35. Fakhimi, A. and Lanari, M. "DEM-SPH simulation of rock blasting", *Computers and Geotechnics*, **55**, pp. 158-164 (2014).
36. Lanari, M. and Fakhimi, A. "Numerical study of contributions of shock wave and gas penetration toward induced rock damage during blasting", *Computational Particle Mechanics*, **2**(2), pp. 197-208 (2015).
37. Tarokh, A., Kao, C.S., Fakhimi, A. and et al. "Insights on surface spalling of rock", *Computational Particle Mechanics*, **3**(3), pp. 391-405 (2016).
38. Asadi, P. and Fakhimi, A. "Numerical modeling of effect of specimen size on dynamic tensile strength of rock", In 55th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, OnePetro (2021).
39. Asadi, P., Ashrafi, M.J. and Fakhimi, A. "Physical and numerical evaluation of effect of specimen size on dynamic tensile strength of rock", *Computers and Geotechnics*, **142**, p.104538 (2022).
40. Fakhimi, A. and Villegas, T. "Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **40**(2), pp. 193-211 (2007).
41. Rougier, E., Knight, E.E., Sussman, A.J. and et al. "The combined finite-discrete element method applied to the study of rock fracturing behavior in 3D", In 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, One Petro (2011).
42. Yan, F., Feng, X.T., Chen, R. and et al. "Dynamic tensile failure of the rock interface between tuff and basalt", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**(3), pp. 341-348 (2012).
43. Dai, F., Xia, K. and Tang, L. "Rate dependence of the flexural tensile strength of Laurentian granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **47**(3), pp. 469-475 (2010).
44. Huang, S., Xia, K., Yan, F. and et al. "An experimental study of the rate dependence of tensile strength softening of Longyou sandstone", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**(6), pp. 677-683 (2010).
45. Huang, S., Chen, R. and Xia, K. W., "Quantification of dynamic tensile parameters of rocks using a modified Kolsky tension bar apparatus", *Journal of rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **2**(2), pp. 162-168 (2010).