

مطالعه عددی اثر انرژی ورودی بر شکست دینامیکی سنگ در آزمایش هایپکینسون

مجید قائدی تبار^۱، احمدعلی فخمی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Email: A.fakhimi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

چکیده

در مکانیک شکست و خردشدگی سنگ، پژوهشگران همواره به دنبال رابطه‌ای بین انرژی مصرفی در سنگ با نمودار توزیع دانه‌بندی آن در اثر شکست دینامیکی بوده‌اند که به موضوعی قابل بحث تبدیل شده است. این ارتباط برای شناخت و بهینه کردن مصرف انرژی در صنعت تولید سنگ‌دانه‌ها بسیار ضروری است. از این رو مدل‌سازی عددی آزمایش هایپکینسون با استفاده از یک روش ترکیبی المان محدود و المان گسسته انجام شد. با اعمال بارگذاری‌های متفاوت و در نرخ‌های تنش مختلف ثابت شد، چگالی انرژی مصرفی با افزایش نرخ تنش به صورت خطی تغییر می‌کند. همچنین مقاومت دینامیکی سنگ با افزایش چگالی انرژی مصرفی روند افزایشی به خود می‌گیرد. با ترسیم نمودار توزیع دانه‌بندی در نرخ‌های تنش متفاوت نشان داده شد که با افزایش نرخ تنش، توده‌های تشکیل شده پس از شکست نمونه شبیه‌سازی شده، ریزتر شده‌اند. علاوه بر این، نتایج عددی همانند بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که در یک سیستم لگاریتمی، اندازه متوسط دانه‌های سنگ خرد شده با نرخ تنش اعمالی رابطه خطی دارد.

واژگان کلیدی: چگالی انرژی مصرفی، اثر نرخ بارگذاری، آزمایش هایپکینسون، نمودار دانه‌بندی، بارگذاری دینامیکی، المان گسسته، المان محدود

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

منظور برای آنالیز و طراحی سازه‌های زیرزمینی در سنگ، نیاز به شناخت خصوصیات دینامیکی سنگ در نرخ‌های تنش متفاوت بیش از پیش است [1]. ژائو و همکاران به مطالعه تنش‌های موجود در یک سازه سنگی در اعماق زمین پرداختند. این تنش‌ها شامل تنش استاتیکی موجود از طرف روباره و نیروی دینامیکی حاصل از انفجار، زلزله و غیره می‌باشند [2].

با توجه به توسعه روزافزون سازه‌های زیرزمینی و یا گودبرداری‌های عمیق، نیاز بشر به شناخت هرچه بهتر رفتار خاک و یا سنگ در اعماق مختلف افزایش یافته است. این موضوع مخصوصاً در کشورهایی که به لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای کوهستانی واقع شده‌اند حائز اهمیت‌تر است. بدین

مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که مقاومت مواد ترد و یا شبه ترد از قبیل سنگ نسبت به تغییرات نرخ تنش حساس است. این نوع مواد تحت بارگذاری دینامیکی مانند انفجار، ضربه و زلزله رفتاری متفاوت در مقایسه با بارگذاری استاتیکی از خود نشان می‌دهند و مقاومت آن‌ها با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد [3]. در پژوهشی که لی و همکاران انجام دادند افزایش مقاومت را به افزایش محصورشدگی شعاعی نمونه به دلیل اثرات اینرسی نسبت دادند [4]. علاوه بر اثر اینرسی، برخی خصوصیات ویسکو الاستیک یا ویسکو پلاستیک مواد ژئوتکنیکی باعث می‌شود آن‌ها نسبت به نرخ بارگذاری حساس باشند [5]. در مطالعه‌ی دیگری که بر روی چند سنگ کربناته انجام شد، نشان داده شد که مقاومت فشاری دینامیکی از حالت استاتیکی آن بیشتر است که این مقاومت دینامیکی تحت تاثیر چگالی و تخلخل سنگ می‌باشد [6].

در تشریح نحوه شکست یک توده سنگ دو ویژگی بایستی بررسی شود. اولین ویژگی خصوصیات سنگ را شامل می‌شود و توده سنگ از لحاظ توزیع ترک‌ها و شکاف‌ها که خود باعث ایجاد ضعف در منطقه رشد ترک‌ها می‌باشد، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مشخصه دیگر خصوصیات سینماتیکی است که در آن شدت و نرخ بارگذاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه، بررسی شکست دینامیکی و خردشدگی سنگ به شناخت کافی از این دو عامل نیازمند است [7]. خردشدگی سنگ لزوماً فرایندی با مصرف انرژی به شمار می‌رود. بنابراین نگرش کلیدی در آشکارسازی مکانیزم خردشدگی سنگ، تحلیل انرژی مصرفی می‌باشد [8]. هوگان و همکاران با بررسی خردشدگی سنگ گرانیت در محدوده انرژی ضربه ۶ تا ۲۸ ژول متوجه شدند که مواد چگال و موادی که میزان کوارتز در آنها بیشتر است دارای مقدار خردشدگی کمتر، اندازه ذرات بزرگتر و نسبت ابعاد کوچکتر هستند [9]. در پژوهشی دیگر گنگ و همکاران با بررسی شکست سنگ گرانیت در نرخ‌های کرنش متفاوت، یک انرژی ورودی را به عنوان انرژی بحرانی شکست سنگ تعیین نمودند. آنها دریافتند که انرژی مصرفی در نمونه با افزایش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد [10]. با بررسی شکست

دو نمونه سنگ گابرو و ماربل در شرایط استاتیکی و دینامیکی، ژانگ و همکاران به این نتیجه رسیدند که انرژی شکست سنگ در بارگذاری دینامیکی به شکل قابل توجهی از حالت استاتیکی بزرگتر است و همچنین این انرژی شکست با افزایش نرخ بارگذاری، بیشتر می‌شود. این مطالعه نسبتی را از میزان انرژی مصرفی به انرژی ورودی تعریف می‌کند که نشان‌دهنده پایین بودن این نسبت در بخش دینامیکی می‌باشد [11]. آزمایش‌های فیزیکی‌ای که هُنگ و همکاران بر روی سه نمونه ماسه سنگ، سنگ آهک و گرانیت در نرخ‌های کرنش ۴۰ تا ۱۵۰ برثانیه انجام دادند، نشان داد افزایش انرژی مصرفی تاثیر به‌سزایی در خردشدگی سنگ دارد. این پژوهش همچنین نشان داد چگالی انرژی مصرفی در سنگ رابطه‌ای لگاریتمی با مقاومت دینامیکی آن دارد [12].

برای مطالعه آزمایشگاهی شکست سنگ در بارگذاری دینامیکی، ISRM سه روش استاندارد پیشنهاد داده است [13]. هر کدام از این روش‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش هایپکینسون انجام می‌شود. مدل‌سازی عددی آزمایش هایپکینسون توسط چندین پژوهشگر و به شیوه‌های مختلف انجام شده است. این مدل‌سازی‌ها هم در محیط مکانیک پیوسته و هم در محیط مکانیک گسسته انجام شده‌اند. لو و همکاران برای بررسی افزایش مقاومت دینامیکی از یک مدل دراگر-پراگر در آباکوس استفاده کردند [14]. در این بین روش‌های اجزا گسسته و ذرات به‌هم متصل (Bonded Particle Method) به شکلی مطلوب توانسته است سنگ را در حالات استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی نماید. کاندال روش اجزا گسسته را برای شبیه‌سازی برهم‌کنش بلوک‌ها در یک توده سنگی توسعه داد [15]. در پژوهش دیگری، وانگ و تُن از کد اجزا گسسته توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سنگ بهره گرفتند. آنها نشان دادند که با این روش، مقاومت دینامیکی وابسته به نرخ تنش به شکل قابل قبولی شبیه‌سازی می‌شود اما به خوبی قادر به شبیه‌سازی توزیع دانه‌بندی شکست سنگ در مقایسه با بخش آزمایشگاهی نمی‌باشد [16].

میله‌ها باعث ایجاد کرنش‌های به‌خصوصی می‌شود. کرنش‌های ناشی از موج‌های تصادف (ϵ_I)، و انعکاسی (ϵ_R) توسط کرنش‌سنج نصب‌شده بر روی میله‌ی تصادف و کرنش ناشی از موج انتقالی (ϵ_T) توسط کرنش‌سنج روی میله انتقال ثبت می‌شوند [18].

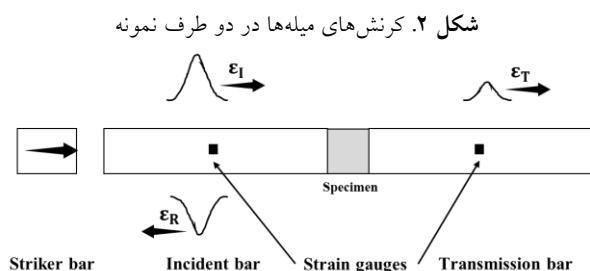


Fig. 2. Strains of the bars at the two sides of the specimen

بر اساس معادلات موج یک‌بعدی و با توجه به شکل (۲)، کرنش‌های تصادف (ϵ_I)، انعکاسی (ϵ_R) و انتقالی (ϵ_T) از روابط زیر قابل محاسبه هستند [19]:

$$\epsilon_I = \frac{-1}{c} \dot{u}_I \quad (1)$$

$$\epsilon_R = \frac{1}{c} \dot{u}_R \quad (2)$$

$$\epsilon_T = \frac{-1}{c} \dot{u}_T \quad (3)$$

در روابط (۱)، (۲) و (۳)، c سرعت موج در میله آزمایش و $\dot{u}_I$ ، $\dot{u}_R$ و $\dot{u}_T$ به ترتیب سرعت ذرات میله در اثر اعمال موج‌های تصادف، انعکاسی و انتقالی هستند. علامت منفی نشان‌دهنده‌ی فشاری بودن و علامت مثبت نشان‌دهنده‌ی کششی بودن کرنش‌ها می‌باشد. نیروهای اعمالی به دو سر نمونه در آزمایش هاپکینسون، در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند.

شکل ۳. نیروهای اعمالی بر دو انتهای نمونه در آزمایش هاپکینسون

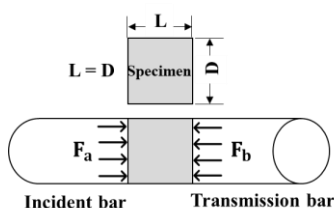


Fig. 3. End forces of the specimen in the Hopkinson test

در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی CA3 [17] و مدل ذرات به‌هم متصل، آزمایش هاپکینسون شبیه‌سازی شد و اثر نرخ تنش بر مقاومت فشاری دینامیکی سنگ بررسی گردید. همچنین با تغییر نرخ تنش، چگالی انرژی مصرفی در نرخ‌های مختلف محاسبه شد و ارتباط آن با مقاومت فشاری دینامیکی ارزیابی شد. در انتها نیز نمودار توزیع دانه‌بندی ترسیم و تغییرات آن با افزایش نرخ تنش مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- آزمایش هاپکینسون

۲-۱- معرفی دستگاه آزمایش

در شکل (۱) دستگاه آزمایش هاپکینسون نشان داده شده است. برای انجام آزمایش، میله‌ی مهاجم (Striker bar) توسط یک تفنگ گازی شلیک می‌شود. در اثر برخورد میله‌ی مهاجم به میله‌ی تصادف (Incident bar) موج تنش فشاری در طول آن منتشر می‌شود. با توجه به اینکه امپدانس مکانیکی نمونه کمتر از میله‌ها است، قسمتی از موج تنش اولیه به صورت یک موج تنش کششی به میله‌ی تصادف باز می‌گردد که به آن موج انعکاسی گفته می‌شود. بخش دیگری از موج تصادف وارد نمونه شده و موجب تغییر شکل آن می‌شود و در ادامه، این قسمت از موج وارد میله انتقال (Transmission bar) شده و در طول آن منتشر می‌شود که به آن موج انتقالی گفته می‌شود.

شکل ۱. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش هاپکینسون

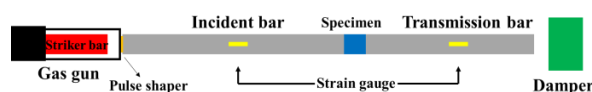


Fig. 1. Schematic view of the Hopkinson bar apparatus

۲-۲- تئوری آزمایش هاپکینسون

فرض اساسی حاکم بر آزمایش هاپکینسون آن است که امواج منتشرشده در طول میله‌های آزمایش به صورت الاستیک و یک‌بعدی است. به همین دلیل از اصول تئوری انتشار موج یک‌بعدی برای اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه مورد آزمایش استفاده می‌شود. انتشار هرکدام از سه موج تشکیل‌شده در طول

[22]. انرژی مصرف شده در نمونه سنگی $W_C(t)$ از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

$$W_C(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \quad (11)$$

همان گونه که در ادامه خواهد آمد، در این پژوهش، تفکیک امواج از یکدیگر بر مبنای نرخ تنش در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$) است. برای بررسی خردشدگی سنگ در نرخ های تنش متفاوت در داخل نمونه ($\dot{\sigma}$)، شیب نمودار تنش-زمان موج ورودی به میله تصادف ($\dot{S}$) تغییر داده شد. نمونه ای از این موج های ورودی و شیب آنها در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین این شکل، موج های انعکاسی در میله تصادف و موج های انتقالی در میله انتقالی را نشان می دهد. این شکل مبین آن است که بخشی از موج تنش وارد بر نمونه در اثر اختلاف امپدانس های میله و نمونه به میله تصادف بازگشته و بخشی از آن به میله انتقالی منتقل شده است.

شکل ۴. تصویر شماتیک ۳ موج وارد بر نمونه با نرخ های بارگذاری متفاوت و موج های انعکاسی و انتقالی متوجه

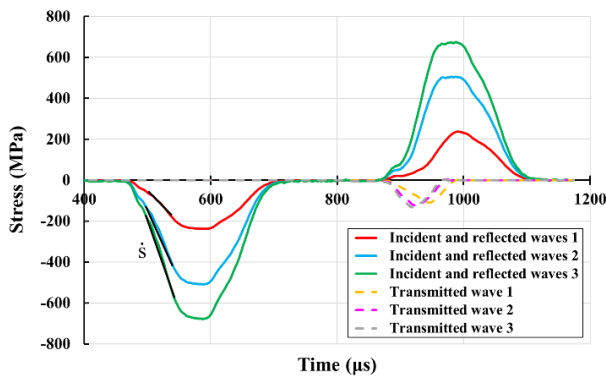


Fig. 4. Schematic view of 3 incident waves with different stress rates ($\dot{S}$) and the resulting reflected and transmitted waves

۳- مدل سازی عددی

۳-۱- معرفی نرم افزار و مدل میکرو مکانیکی

مدل سازی نمونه سنگی و آزمایش هاپکینسون در برنامه CA3 [17] انجام شد. در این برنامه سه بعدی، برای مدل سازی مصالح ژئوتکنیکی از ترکیب روش های اجزا محدود - اجزا گسسته می توان استفاده کرد. شبیه سازی نمونه سنگی مورد استفاده در این نرم افزار در محیط المان یا اجزا گسسته و با

در آزمایش هاپکینسون، طبق روابط (۴) و (۵) نیروهای دو سر نمونه با توجه به موج های کرنش تصادف، انعکاسی و انتقالی قابل محاسبه هستند:

$$F_a = EA (\epsilon_I + \epsilon_R) \quad (4)$$

$$F_b = EA \epsilon_T \quad (5)$$

در رابطه های (۴) و (۵)، A سطح مقطع هر یک از میله ها می باشد که در این مدل سازی سطح مقطع هر دو میله یکسان در نظر گرفته شده است و E مدول الاستیسیته ی میله ها است.

همچنین در آزمایش هاپکینسون تنش $\sigma(t)$ و کرنش $\epsilon(t)$ به ترتیب از روابط (۶) و (۷) قابل محاسبه اند.

$$\sigma(t) = \frac{F_a + F_b}{2A_s} = \frac{EA}{2A_s} (\epsilon_I + \epsilon_R + \epsilon_T) \quad (6)$$

$$\epsilon(t) = \frac{c}{L_s} \int_0^t (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) dt \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷)، A_s و L_s به ترتیب سطح مقطع و طول نمونه می باشند.

انرژی های تصادف $W_I(t)$ ، انعکاسی $W_R(t)$ و انتقالی $W_T(t)$ را می توان از روابط زیر محاسبه کرد [20].

$$W_I(t) = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt \quad (8)$$

$$W_R(t) = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt \quad (9)$$

$$W_T(t) = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt \quad (10)$$

در آزمایش هاپکینسون از انرژی جذب شده برای بیان مفهوم انرژی مصرف شده در هنگام ضربه به نمونه استفاده می شود. در حقیقت انرژی جذب شده در نمونه سنگ با انرژی مصرف شده آن در فرایند ضربه برابر است [21]. این انرژی، صرف ایجاد ترک، خرد کردن نمونه و پرتاب ذرات سنگ به اطراف می شود

میکرومکانیکی (K_s, K_n, n_b, s_b, μ) لازم است. با وجود این پارامترها، تنها مقاومت سنگ و شکست آن در بارگذاری استاتیکی مدل می‌شود و برای مدل‌سازی اضافه مقاومت دینامیکی که در آزمایش‌های فیزیکی مشاهده می‌شود نیاز به تعریف پارامتر دیگری می‌باشد. فخمی و همکاران برای اینکه بتوانند اثر نرخ بارگذاری را در مدل عددی آزمایش هاپکینسون ایجاد کنند مدل جدیدی بر مبنای تغییر در قندهای نرمال و برشی ارائه کردند [23]. طبق این مدل، قندهای نرمال و برشی در هر گام محاسباتی، با حاصل ضرب مقدار قندهای نرمال و برشی استاتیکی در تابعی خاص جایگزین می‌شوند. تابع مذکور نمایی تعریف شده است و پارامترهای آن از ضرایبی ثابت (β_n و β_s) که توسط کاربر اعمال می‌شوند و سرعت نسبی بین دو ذره در محل تماس آن‌ها در هر گام محاسباتی تشکیل می‌شوند:

$$n_b := n_b \times e^{(\beta_n \times V_{nr})} \quad (12)$$

$$s_b := s_b \times e^{(\beta_s \times V_{sr})} \quad (13)$$

در روابط (۱۲) و (۱۳)، V_{sr} و V_{nr} به ترتیب سرعت نسبی نرمال و برشی بین توپ‌ها در محل تماس آنهاست و β_s و β_n به ترتیب ثابت‌های نرمال و برشی با واحد $\frac{s}{m}$ می‌باشند. علامت $=$ در روابط (۱۲) و (۱۳) به این معناست که در تحلیل دینامیکی، مقادیر استاتیکی قندهای نرمال و برشی در سمت راست معادله با مقادیر دینامیکی مربوطه در سمت چپ جایگزین می‌شوند. فخمی و همکاران نشان دادند در $\beta_s = \beta_n$ های مختلف می‌توان علاوه بر تولید اضافه مقاومت دینامیکی در مدل عددی، نتایجی نسبتاً منطبق بر نمودارهای آزمایش فیزیکی کسب کرد [23-25]. در این پژوهش $\beta_s = \beta_n = 10 \frac{s}{m}$ در نظر گرفته شد.

۳-۲- کالیبراسیون سنگ مورد استفاده در مدل عددی

همان‌گونه که بیان شد نمونه عددی المان‌گسسته، با استفاده از خصوصیات میکرومکانیکی (K_s, K_n, n_b, s_b, μ) تعریف می‌شود. این خصوصیات میکرومکانیکی باید به گونه‌ای انتخاب شوند تا خصوصیات ماکرومکانیکی مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی برهم منطبق گردند. این فرآیند کالیبراسیون نام

کمک المان‌های توپی شکل انجام شد (مدل اجزا به هم متصل) [15]. این نمونه عددی بر مبنای خصوصیات مکانیکی نمونه ماسه سنگ مسجدسلیمان کالیبره و شبیه‌سازی شد. خصوصیات مکانیکی نمونه ماسه سنگ با انجام آزمایش‌های استاندارد اندازه‌گیری و در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در شکل (۵) خصوصیات مدل عددی آزمایش هاپکینسون که در برنامه CA3 شبیه‌سازی شده است، مشخص است.

جدول ۱. مشخصات ماکرومکانیکی نمونه‌ی ماسه سنگ مسجدسلیمان

Poisson's ratio	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
0.33	28.9	5.8	79.5

Table 1. The macro-mechanical properties of Masjed-Soleyman sandstone specimen

شکل ۵. مدل عددی آزمایش هاپکینسون در نرم افزار CA3

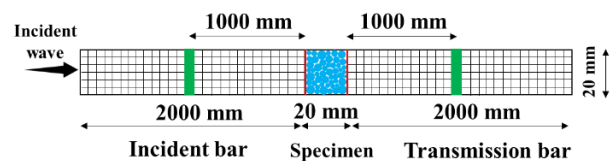


Fig. 5. Numerical modelling of Hopkinson test in CA3

توپ‌ها در نمونه عددی توسط فنرهای نرمال و برشی با ثابت‌های K_s و K_n که خصوصیات الاستیک مدل را فراهم می‌کنند با یکدیگر در تعامل هستند و برای مقاومت در برابر نیروهای خارجی از قندهای نرمال و برشی n_b و s_b استفاده می‌شود. همچنین توپ‌ها در صورت عدم حضور قندهای نرمال و برشی با ضریب اصطکاک کولمب μ روی هم می‌لغزند. در این مدل، ذرات تا زمانی که مقدار نیروی نرمال و برشی از مقدار مقاومت قندهای نرمال و برشی کمتر باشد به هم متصل می‌مانند. در غیر این صورت این قیود شکسته و ذرات دیگر نیروی کششی تحمل نخواهند کرد و تنها در صورت وجود نیروی فشاری بین دو ذره، ذرات در برابر یک نیروی برشی متناسب با ضریب اصطکاک مقاومت می‌کنند. در حالت کلی برای تعامل توپ‌ها در نرم‌افزار CA3، ۵ پارامتر

توپ ۰/۲۵ تا ۰/۵ می باشد و در بخش هایی که اثر اندازه توپ مدنظر بوده است به صراحت بیان شده است.

جدول ۳. مقایسه خصوصیات ماکرومکانیکی نمونه عددی ساخته شده در نرم افزار CA3 و نمونه آزمایشگاهی

Parameters	Numerical simulation	Experimental
Uniaxial compressive strength (MPa)	78.8	79.5
Tensile strength (MPa)	6.1	5.8
Elastic modulus (GPa)	29	28.9
Poisson's ratio	0.32	0.33

Table 3. Comparison of macromechanical properties of numerical and physical specimens

۳-۳- مدل سازی آزمایش های پکینسون

برنامه ها و کدهایی که در مدل سازی آزمایش های پکینسون مورد استفاده قرار می گیرند عمدتاً دارای اشکالاتی می باشند. این برنامه ها یا قادر به مدل سازی کامل میله های تصادف و انتقال نمی باشند [27] و یا در ارتباط با شرایط مرزی، موج تنش را مستقیماً به خود نمونه وارد می نمایند [28]. از مزایای مهمی که می توان برای نرم افزار CA3 در مدل سازی آزمایش های پکینسون برشمرد، مدل سازی میله ها با طول واقعی آنهاست که نتایج واقع گرایانه تری در پی دارد. در این پژوهش، برای میله های مدل شده به روش المان محدود رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته شد. خصوصیات هندسی و نحوه انجام آزمایش های پکینسون عددی در شکل (۵) نشان داده شده است. در مدل سازی آزمایش های پکینسون در نرم افزار CA3، تمام قسمت های دستگاه به جز میله ی مهاجم، دقیقاً مدل سازی شدند. همچنین در محل تماس نمونه و میله ها که به رنگ قرمز در شکل (۵) مشخص است، دیواره تعریف شد که ارتباط دو محیط المان محدود و المان گسسته را برقرار می نماید. در داخل میله ها و در محل کرنش سنج ها، المان هایی برای ذخیره ی تغییرات نیرو، جابجایی و تنش در نظر گرفته شد. این المان ها با رنگ سبز در شکل (۵) نشان داده شده اند. برای اعمال بار خارجی، موج اولیه در انتهای آزاد میله تصادف به صورت

دارد و معمولاً به روش سعی و خطا انجام می پذیرد. در این پژوهش با کمک روش ارائه شده توسط فخمی و همکاران فرایند کالیبراسیون با شتاب و دقت بیشتری انجام شد [26]. خصوصیات میکرومکانیکی نمونه عددی ساخته شده در جدول (۲) ارائه شده است. در جهت شبیه سازی واقعی تر رفتار مدل عددی، پارامتری به نام فشارتشکیل (σ_0) تعریف می شود. این پارامتر یکی دیگر از پارامترهای دخیل در سیستم است که شاخصی برای میزان همپوشانی کوچک اولیه توپ ها در مدل المان گسسته در نرم افزار CA3 است [26].

جدول ۲. خصوصیات میکرومکانیکی نمونه عددی

R	Radius of spherical particles (mm)	0.25-0.5
N	Number of balls	48000
K_n	Normal spring stiffness (MN/m)	16
K_s	Shear spring stiffness (MN/m)	5.9
n_b	Normal bond (N)	1.35
s_b	Shear bond (N)	6.75
μ	Coefficient of friction at contact points	0.5
ρ	Density (Kg/m ³)	2700
σ_0	Genesis pressure (GPa)	6.64

Table 2. The micro-mechanical parameters for the numerical model

با شبیه سازی آزمایش های فشاری تک محوره و کششی برزلی و اعمال خصوصیات میکرومکانیکی جدول (۲) به مدل عددی، خصوصیات ماکرومکانیکی نمونه عددی اندازه گیری شد. این اعداد با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد که دقت بالای کالیبراسیون را نشان می دهد (جدول ۳). لازم به ذکر است که خصوصیات مکانیکی ماسه سنگ ارائه شده در جداول ۱ و ۳، توسط نویسندگان این مقاله اندازه گیری شدند.

در این پژوهش برای مطالعه دقیق تر اثر انرژی ورودی بر شکست دینامیکی سنگ، نمونه های عددی با توپ های با شعاع ۰/۱۲۵ تا ۰/۲۵ و ۰/۵ تا ۱ میلیمتر نیز ساخته شدند که کالیبراسیون آنها مطابق آنچه در قسمت بالا بیان شد، صورت پذیرفت. بخش عمده نتایج براساس نمونه های با اندازه شعاع

شکست نمونه نمی‌باشند. در واقع تا زمان شکست نمونه، ریزترک‌ها صرفاً با مصرف انرژی در جهت افزایش مقاومت گسیختگی ماکروسکوپی عمل می‌نمایند. بنابراین مقاومت نمونه تقریباً به صورت خطی با چگالی انرژی مصرفی افزایش می‌یابد [34]. در شکل (۷) نمودار تغییرات چگالی انرژی مصرفی (نسبت W_C در معادله (۱۱) به حجم نمونه) در برابر نرخ تنش در نمونه نمایش داده شده است و نشان می‌دهد که با افزایش نرخ تنش، چگالی انرژی مصرفی در نمونه به شکل خطی افزایش می‌یابد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که افزایش اندازه دانه در مدل عددی، چگالی انرژی مصرفی را افزایش می‌دهد و این افزایش در نرخ‌های تنش بالاتر، بزرگتر است.

شکل (۷). نمودار تغییرات چگالی انرژی مصرفی با افزایش نرخ تنش

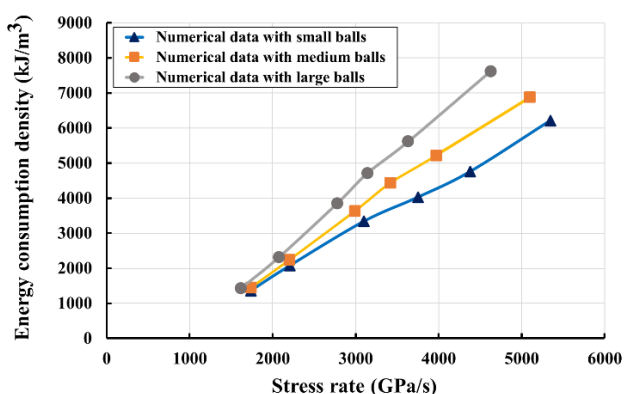


Fig. 7. Consumed energy density versus stress rate in the specimen

در شکل (۸) نمودار مقاومت دینامیکی در برابر چگالی انرژی مصرفی ترسیم شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش چگالی انرژی مصرفی در نمونه، مقاومت دینامیکی روند افزایشی پیدا می‌کند. این روند با نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی دیگران مقایسه شده است و حاکی از آن است که مقادیر به دست آمده در این پژوهش در میانه نتایج آنها می‌باشد [12, 34].

پالس تنش با نرخ بارگذاری مشخص در نظر گرفته شد (شکل‌های ۴ و ۵).

۴- بررسی نتایج

۴-۱- اثر نرخ بارگذاری بر مقاومت دینامیکی

به منظور بررسی اثر افزایش نرخ بارگذاری بر مقاومت فشاری دینامیکی، نمودار نسبت مقاومت فشاری دینامیکی به مقاومت فشاری استاتیکی (DIF) در مقابل نرخ تنش در داخل نمونه (۶) ترسیم و با نتایج پژوهشگران دیگر مقایسه شده است (شکل (۶)).

شکل ۶. مقایسه نمودار DIF برحسب لگاریتم نرخ تنش در این پژوهش با نتایج پژوهشگران دیگر

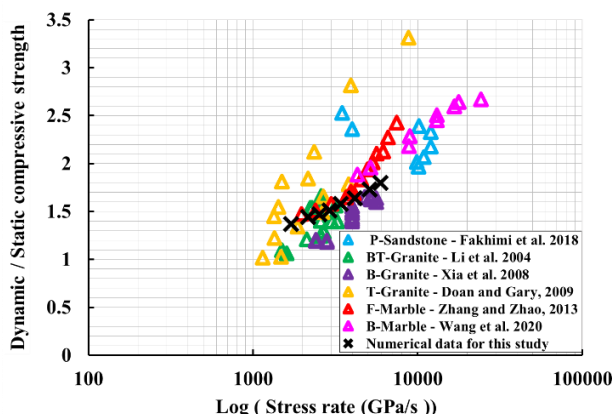


Fig. 6. Comparison of DIF versus stress rate in this work with results of other researchers

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نرخ تنش در نمونه، مقاومت فشاری دینامیکی نمونه افزایش می‌یابد که همسو با داده‌های پژوهشگران دیگر است [23, 29-33].

۴-۲- اثر نرخ بارگذاری بر انرژی مصرفی و رابطه آن

با مقاومت دینامیکی

با افزایش نرخ تنش در نمونه، تنش در اکثر ذرات و دانه‌ها از مقاومتی که ذرات را به هم متصل کرده است بیشتر می‌شود و در نتیجه ریزترک‌های بیشتری در نمونه شکل می‌گیرد. تا زمان شکل‌گیری ترک‌های اصلی در نمونه، این ریزترک‌ها قادر به

شکل (۹). نمونه شکسته شده در نرخ تنش ۱۷۰۰ GPa/s (a) نمای روبرو (b) نمای جانبی

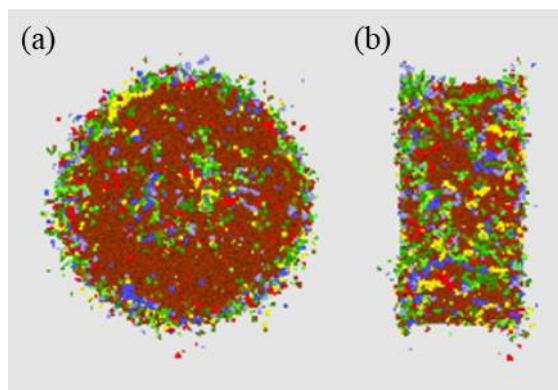


Fig. 9. Fractured specimen at a stress rate of 1700 GPa/s (a) front view, (b) side view

شکل (۱۰). نمونه شکسته شده در نرخ تنش ۲۹۰۰ GPa/s (a) نمای روبرو (b) نمای جانبی

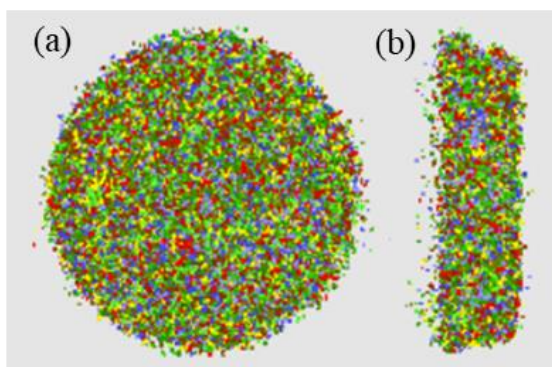


Fig. 10. Fractured specimen at a stress rate of 2900 GPa/s (a) front view, (b) side view

مقایسه بزرگترین توده های تشکیل شده از نمونه پس از شکست دینامیکی در مدل سازی عددی به تشخیص میزان خردشدگی در نمونه کمک می کند. در نمونه خرد شده با نرخ تنش ۱۷۰۰ GPa/s بزرگترین توده ایجاد شده شامل ۳۴۶۴۶ عدد توپ می باشد. یعنی بزرگترین تکه ایجاد شده از شکست نمونه، ۷۲ درصد از تعداد توپ های نمونه را شامل می شود. در این حالت تعداد کل توده های ایجاد شده نیز ۵۵۹۹ توده می باشد. در شکل (۱۱) بزرگترین توده های جدا شده از نمونه به همراه باقیمانده نمونه که شامل توده های کوچکتری است نشان داده شده اند.

شکل (۸). مقایسه اثر چگالی انرژی مصرفی بر مقاومت دینامیکی در این پژوهش با نتایج محققین دیگر

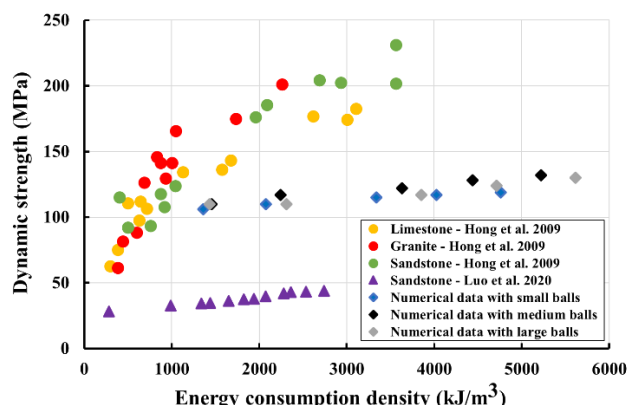


Fig. 8. Comparison of the effect of energy consumption density on dynamic strength in this work with the results of other researchers

۴-۳- مفهوم خردشدگی در شبیه سازی عددی

نمونه عددی پس از آزمایش هاپکینسون و در اثر تولید ترک ها خرد می شود و از تعدادی توده تشکیل می شود که هر توده شامل یک یا چند توپ متصل به هم است. برای تشخیص اندازه توده های ایجاد شده از مفسر (Compiler) پرشیا که قادر به دسترسی به متغیرهای داخلی برنامه است و به تازگی به برنامه CA3 اضافه شده است استفاده گردید. برای این منظور و با کدنویسی در پرشیا، در ساختار اطلاعاتی توپ ها و تماس های بین آنها جستجو صورت گرفت تا توده های مجزا تشخیص داده شوند.

۴-۴- اثر نرخ بارگذاری بر خردشدگی

شکل (۹) نمونه شکسته شده در نرخ تنش ۱۷۰۰ GPa/s و شکل (۱۰) نمونه شکسته شده در نرخ تنش ۲۹۰۰ GPa/s را از دو نمای متفاوت نشان می دهند. در این شبیه سازی ها، توده های تشکیل شده پس از شکست با استفاده از توانایی های پرشیا به رنگ های مختلفی درآمده اند تا تشخیص هر توده به راحتی امکان پذیر باشد. با مقایسه این دو شکل می توان به این نتیجه رسید که با افزایش نرخ تنش، نمونه شکسته شده خردتر و توده های تشکیل شده ریزتر شده اند. همچنین مقایسه قسمت (ب) هر کدام از دو شکل، نشان دهنده میزان له شدگی بیشتر نمونه در نرخ تنش بالا می باشد.

گرفت که شعاع آن شاخصی برای اندازه توده است. رابطه (۱۴) حجم جامد یک توده حاوی N عدد توپ را محاسبه می‌کند:

$$V_{\text{solid}} = \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi R_i^3 \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، R_i شعاع هر یک از توپ‌ها است. با کمک مفسر پرشیا میزان پوکی (n) در نمونه عددی ۲/۴ درصد محاسبه شد. بنابراین حجم کل توده از طریق رابطه (۱۵) بدست آمد:

$$V_{\text{total}} = \frac{V_{\text{solid}}}{1 - n} \quad (15)$$

که از آن برای محاسبه شعاع معادل توده استفاده شد:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V_{\text{total}}} \quad (16)$$

با تفکیک اندازه توده‌ها، نمودار توزیع دانه‌بندی نمونه شکسته‌شده در مدل‌سازی عددی برای دو نرخ تنش متفاوت و سه اندازه توپ ترسیم شد (شکل (۱۳)). در شکل (۱۳)، زیرنویس‌های sb و mb و lb به ترتیب بیانگر توپ‌های ریز، متوسط و درشت می‌باشند.

شکل (۱۳). نمودار توزیع دانه‌بندی در نرخ تنش و اندازه توپ‌های متفاوت

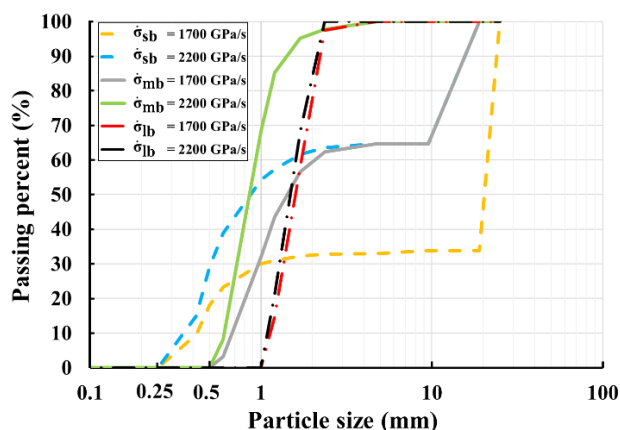


Fig. 13. Gradation curves for numerical specimens with different particle sizes under stress rates of 1700 and 2200 GPa/s

برای توصیف توزیع ذرات در شکل (۱۳) از پارامتر D_{50} استفاده شد. نسبت D_{50} برای نمونه شکسته شده با اندازه توپ ۰/۲۵ تا ۰/۵ و نرخ تنش ۲۲۰۰ GPa/s به D_{50} آن در

شکل (۱۱). (a) باقیمانده نمونه پس از جدا کردن سه توده بزرگتر (b)، (c) و (d) به ترتیب بزرگترین توده‌های جدا شده از نمونه در نرخ تنش ۱۷۰۰ GPa/s هستند

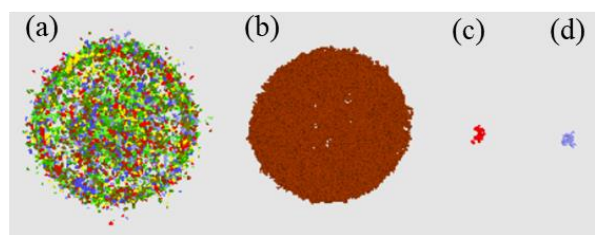


Fig. 11. (a) The remaining parts of the specimen after removing the largest three clusters, (b), (c) and (d) are respectively, the largest clusters separated from the specimen. The stress rate was 1700 GPa/s

با افزایش نرخ تنش به ۲۹۰۰ GPa/s، بزرگترین توده تشکیل شده تنها شامل ۷۳ عدد توپ شد که ۰/۱۵ درصد نمونه است. همچنین در این نرخ تنش تعداد توده‌های ایجاد شده نیز بیش از ۶ برابر شد و به تعداد ۳۶۸۰۹ رسید. شکل (۱۲) بزرگترین توده‌هایی را که در نرخ تنش ۲۹۰۰ GPa/s تشکیل شده‌اند نشان می‌دهد. همچنین نمونه با توده‌های باقی‌مانده نیز در این نرخ تنش نمایش داده شده است.

شکل (۱۲). (a) باقیمانده نمونه پس از جدا کردن سه توده بزرگتر (b)، (c) و (d) به ترتیب بزرگترین توده‌های جدا شده از نمونه در نرخ تنش ۲۹۰۰ GPa/s هستند

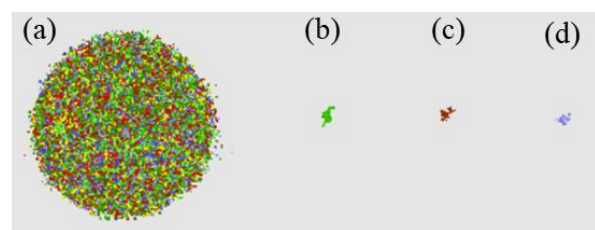


Fig. 12. (a) The remaining parts of the specimen after removing the largest three clusters, (b), (c) and (d) are respectively, the largest clusters separated from the specimen. The stress rate was 2900 GPa/s

جهت رسم نمودار توزیع دانه‌بندی بایستی معیاری را برای دسته‌بندی توده‌های با تعداد توپ مختلف در نظر گرفت. برای این منظور، حجم توپ‌های موجود در یک توده محاسبه شد تا حجم قسمت جامد توده به دست آید. حجم به دست آمده را می‌توان با در نظر گرفتن پوکی، معادل با حجم یک کره در نظر

در پژوهش دیگری، لو و همکاران آزمایشاتی با نرخ کرنش‌های متفاوت بر روی ماسه سنگ انجام دادند و با استفاده از کد جریان ذرات به مدل‌سازی دو بعدی آزمایش هاپکینسون برای بررسی خصوصیات مکانیکی و مودهای شکست در بارگذاری دینامیکی پرداختند [34]. شکل (۱۵) نمودارهای آزمایشگاهی تنش-کرنش را در پژوهش لو و همکاران نشان می‌دهد و مبین آن است که با افزایش نرخ کرنش و یا تنش، به علت محصورشدگی در اثر نیروهای اینرسی و اثرات ویسکو پلاستیک، نمونه رفتار انعطاف‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۵) دیده می‌شود که این پدیده در مدل عددی کار حاضر نیز بخوبی شبیه‌سازی شده است.

شکل (۱۵). مقایسه نمودار تنش-کرنش در پژوهش لو و همکاران با نتایج پژوهش حاضر که بیانگر انعطاف‌پذیری بیشتر نمونه‌های فیزیکی و عددی با افزایش نرخ بارگذاری است

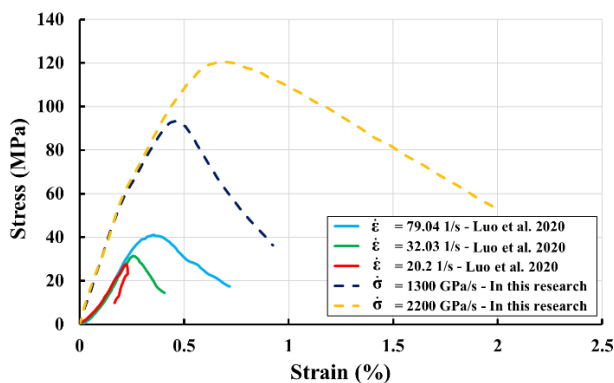


Fig. 15. Stress versus strain curves for sandstone (Luo et al. [34]) and numerical specimens. The material becomes more ductile as the loading rate increases

گریزی و کیپ با انجام آزمایش‌های مختلف و همینطور استفاده از نتایج پژوهش Forrestal et al. [35]، در یک سیستم لگاریتمی نشان دادند که اندازه ذرات نمونه‌های شکسته‌شده با افزایش نرخ کرنش، به صورت خطی کاهش می‌یابند (شکل (۱۶)) و نمونه‌های سنگ شیل در نرخ کرنش‌های بالا به تکه‌های کوچک‌تر و ریزتری تبدیل می‌شوند [7].

نرخ تنش 1700 GPa/s ، مقدار 0.09 را نشان می‌دهد که به معنی ریزدانه‌تر شدن نمونه شکسته‌شده در نرخ تنش بالاتر می‌باشد.

۵- بحث در نتایج

به منظور ارزیابی یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص مدل‌سازی عددی شکست دینامیکی سنگ، این نتایج با نتایج برخی محققین مقایسه شد. وانگ و تون [16] از یک برنامه المان گسسته سه‌بعدی برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سنگ استفاده کردند. نتیجه بررسی آنها نشان داد، نرخ تنش تاثیر بسزایی بر مقاومت دینامیکی و نمودار توزیع دانه‌بندی دارد. همچنین از مقایسه نمودار توزیع دانه‌بندی مدل عددی آن‌ها با آزمایش‌های فیزیکی می‌توان دریافت که شبیه‌سازی عددی در آن پژوهش نتوانسته به خوبی نمودار دانه‌بندی را با بخش آزمایشگاهی انطباق دهد و به همین جهت نیاز به کار بیشتر در این راستا وجود دارد (شکل (۱۴)). در پژوهش حاضر، از یک مدل میکرومکانیکی متفاوت برای شبیه‌سازی شکست سنگ استفاده شد و نمودارهای توزیع دانه‌بندی برای سه اندازه متفاوت شعاع توپ‌ها ترسیم شد. در این ارتباط و برای صحت‌سنجی توزیع دانه‌بندی نمونه عددی، به انجام آزمایشات فیزیکی نیاز است که امیدواریم در آینده انجام گردند. البته روند کلی نتایج بدست آمده با توجه به شکل (۱۳) امیدوار کننده است و مبین کاهش اندازه ذرات با افزایش نرخ تنش است.

شکل (۱۴). نمودار توزیع دانه‌بندی آزمایشگاهی و عددی در پژوهش وانگ و تون در نرخ کرنش 80.1 s^{-1} بر ثانیه

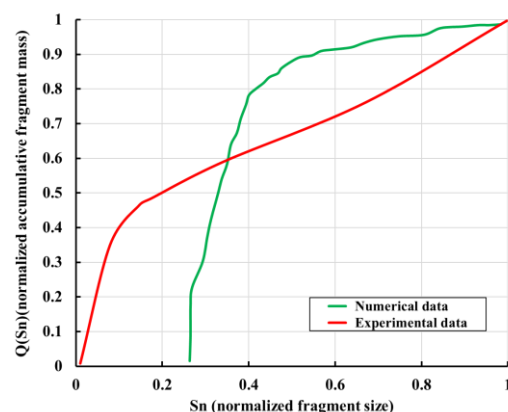


Fig. 14. Experimental and numerical particle size distribution curves in Wang and Tonon's research [16]. The strain rate was 80.1 s^{-1}

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم افزار سه بعدی CA3 که یک نرم افزار ترکیبی المان محدود - المان گسسته می باشد، آزمایش هایپکینسون مدل سازی و اثر نرخ بارگذاری بر مقاومت فشاری دینامیکی، انرژی مصرفی و خرد شدن نمونه عددی بررسی شد. اهم نتایج حاصل به این شرح است:

۱. نرخ بارگذاری ارتباط آشکاری با مقاومت دینامیکی فشاری و انرژی مصرف شده در نمونه طی فرایند شکست دینامیکی سنگ دارد. نتایج نشان می دهد که افزایش نرخ بارگذاری منجر به افزایش مقاومت دینامیکی فشاری و چگالی انرژی مصرفی می شود.

۲. در اثر افزایش انرژی ورودی، نمونه عددی به ذرات ریزتری تقسیم می شود و بنظر می رسد که رابطه ای لگاریتمی بین نرخ تنش و اندازه متوسط ذرات سنگ خرد شده وجود دارد.

۳. مدل اصلاحی ارائه شده توسط فخمی و همکاران به خوبی اثر نرخ بارگذاری بر مقاومت دینامیکی را مدل می کند.

۷- قدردانی

مفسر پرشیا توسط آقای مهندس رجب دوست، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس در برنامه CA3 قرار داده شد و بدین وسیله از زحمات ایشان قدردانی می شود.

منابع

- [1]. Li, X.B., Lok, T.S. and Zhao, J., 2005. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(1), pp.21-39.
- [2]. Zhao, J., Zhou, Y.X., Hefny, A.M., Cai, J.G., Chen, S.G., Li, H.B., Liu, J.F., Jain, M., Foo, S.T. and Seah, C.C., 1999. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(4), pp.513-526.
- [3]. Li Q. M., Meng H., 2003. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test, *International Journal of Solids and Structures*. vol. 40, no. 2, pp. 343-36.
- [4]. Li X. B., Lok T. S., Zhao J., Zhao P. J. 2000. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus

شکل (۱۶). اثر نرخ کرنش بر روی اندازه ذرات سنگ خرد شده در آزمایشات فیزیکی گریدی و کیپ [7]

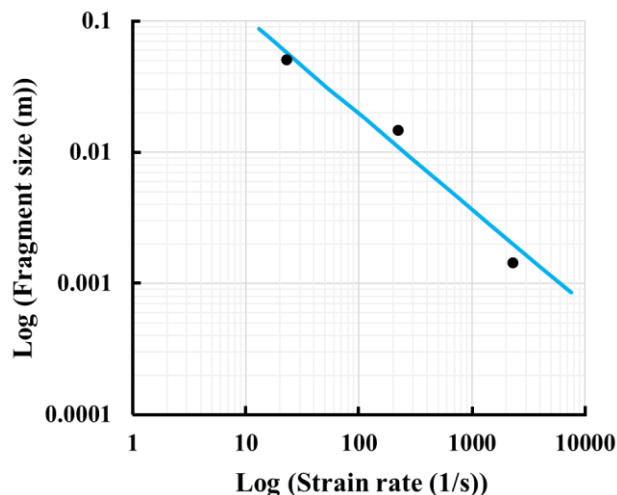


Fig. 16. Effect of strain rate on the particle size of the physical specimens in the work of Grady and Kipp [7]

در پژوهش حاضر نیز مطابق شکل (۱۷)، تغییرات پارامتر D50 نمونه شکسته شده در نرخ تنش های مختلف نشان داده شده است.

از این شکل دیده می شود که در یک سیستم لگاریتمی، رابطه ای تقریباً خطی بین نرخ تنش و اندازه متوسط توده های نمونه عددی خرد شده وجود دارد که با نتایج آزمایشات فیزیکی ارائه شده در شکل (۱۶) هماهنگی دارد.

شکل (۱۷). تغییرات پارامتر D50 در برابر نرخ تنش برای نمونه های عددی

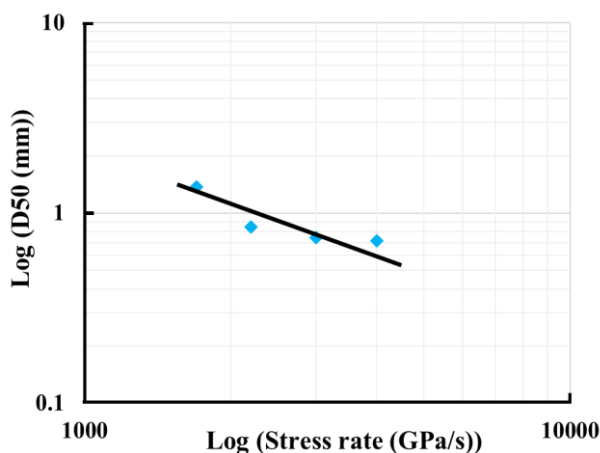


Fig. 17. Variation of D50 parameter against stress rate for numerical specimens

- fragmentation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4), pp.535-545.
- [17]. Fakhimi A. 2009. A hybrid discrete-finite element model for numerical simulation of geomaterials. *Comput Geotech* 36:386-395.
- [18]. Davies R. M. 1948. A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 240(821), pp. 375-457.
- [19]. Kolsky, H., 1963. *Stress waves in solids* (Vol. 1098). Courier Corporation.
- [20]. Lundberg, B., 1976, June. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 13(6), pp. 187-197.
- [21]. Gong, F. and Hu, J., 2020. Energy dissipation characteristic of red sandstone in the dynamic Brazilian disc test with SHPB setup. *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- [22]. Xie, H., Li, L., Peng, R. and Ju, Y., 2009. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1(1), pp.11-20.
- [23]. Fakhimi A., Azhdari P., Kimberley J. 2018. Physical and numerical evaluation of rock strength in Split Hopkinson Pressure Bar testing. *Comput Geotech* 102:1-11.
- [24]. Majedi, M.R., Afrazi, M. and Fakhimi, A., 2020, June. FEM-BPM simulation of SHPB testing for measurement of rock tensile strength. In 54th US rock mechanics/geomechanics symposium. Golden, Colorado.
- [25]. Asadi, P., Ashrafi, M.J. and Fakhimi, A., 2022. Physical and numerical evaluation of effect of specimen size on dynamic tensile strength of rock. *Computers and Geotechnics*, 142, p.104538.
- [26]. Fakhimi A., Villegas T. 2007 Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture. *Rock Mech Rock Eng* 40: 193-211.
- [27]. Rougier, E., Knight, E.E., Sussman, A.J., Swift, R.P., Bradley, C.R., Munjiza, A., Broome, S.T., 2011, June. The Combined Finite-Discrete Element Method Applied to the Study of Rock Fracturing Behavior In 3D. 45th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, California.
- [28]. Li X., Zou Y., Zhou Z. 2014. Numerical Simulation of the Rock SHPB Test with a Special Shape Striker Based on the Discrete Element Method, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 47, no. 5, pp. 1693-1709.
- [29]. Li, X.B., Lok, T.S. and Zhao, J., 2005. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(1), pp.21-39.
- [30]. Xia, K., Nasser, M.H.B., Mohanty, B., Lu, F., Chen, R. and Luo, S.N., 2008. Effects of microstructures on dynamic compression of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(6), pp.879-887.
- and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(7), pp. 1055-1060.
- [5]. Bazant Z. P., Kazemi M. T., Hasegawa T. 1991. Size effect in brazilian splitcylinder tests: measurements and fracture analysis, *ACI Material Journal*, vol.88, pp.325-332.
- [6]. Demirdag, S., Tufekci, K.E.N.A.N., Kayacan, R., Yavuz, H. and Altindag, R., 2010. Dynamic mechanical behavior of some carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2), pp.307-312.
- [7]. Grady, D.E. and Kipp, M.E., 1980, June. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 17(3), pp. 147-157.
- [8]. Whittles, D.N., Kingman, S., Lowndes, I. and Jackson, K., 2006. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation. *Minerals Engineering*, 19(14), pp.1418-1429.
- [9]. Hogan, J.D., Rogers, R.J., Spray, J.G. and Boonsue, S., 2012. Dynamic fragmentation of granite for impact energies of 6-28 J. *Engineering Fracture Mechanics*, 79, pp.103-125.
- [10]. Gong, F., Jia, H., Zhang, Z., Hu, J. and Luo, S., 2020. Energy dissipation and particle size distribution of granite under different incident energies in SHPB compression tests. *Shock and Vibration*, 2020.
- [11]. Zhang, Z.X., Kou, S.Q., Jiang, L.G. and Lindqvist, P.A., 2000. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), pp.745-762.
- [12]. Hong, L., Zhou, Z.L., Yin, T.B., Liao, G.Y. and Ye, Z.Y., 2009. Energy consumption in rock fragmentation at intermediate strain rate. *Journal of Central South University of Technology*, 16(4), pp.677-682.
- [13]. Zhou, Y.X., Xia, K.W., Li, X.B., Li, H.B., Ma, G.W., Zhao, J., Zhou, Z.L. and Dai, F., 2011. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials. In *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pp. 35-44). Springer, Cham.
- [14]. Lu, Y.B., Li, Q.M. and Ma, G.W., 2010. Numerical investigation of the dynamic compressive strength of rocks based on split Hopkinson pressure bar tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(5), pp.829-838.
- [15]. Cundall, P.A., 1971. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. In *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, 1971.
- [16]. Wang, Y. and Tonon, F., 2011. Dynamic validation of a discrete element code in modeling rock

- [34]. Luo, Y., Wang, G., Li, X., Liu, T., Mandal, A.K., Xu, M. and Xu, K., 2020. Analysis of energy dissipation and crack evolution law of sandstone under impact load. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 132, p.104359.
- [35]. Forrestal, M.J., Grady, D.E. and Schuler, K.W., 1978. Experimental method to estimate the dynamic fracture strength of oil shale in the 103 to 104 s⁻¹ strain rate regime. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 15(5).
- [31]. Doan, M.L. and Gary, G., 2009. Rock pulverization at high strain rate near the San Andreas fault. *Nature Geoscience*, 2(10), pp.709-712.
- [32]. Zhang, Q.B. and Zhao, J., 2013. 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.
- [33]. Wang, F., Liu, S. and Cao, L., 2020. Research on dynamic compressive behaviors of marble under high strain rates with split Hopkinson pressure bar. *Journal of Structural Geology*, 138, p.104095.

Numerical Study of Effect of Input Energy on Dynamic Rock Fragmentation using SHPB Test

M. Qaedi Tabar¹, A. Fakhimi^{2*}

1- M.Sc. Student, School of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Majidqaeditabar@modares.ac.ir

*2- Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
A.fakhimi@modares.ac.ir

Abstract:

In mechanics of rock fracture and comminution, researchers have always been looking for a relationship between the consumed energy and the particle size distribution of the disintegrated rock specimen. This relationship has important industrial applications considering the fact that comminution of rock is a very energy demanding process and its efficiency is very low. Furthermore, investigating the damage evolution of rock under different loading rates, helps to better understand and more accurately design rock structures such as tunnels, rock slopes and foundations subjected to dynamic loading. In this work, a hybrid finite-discrete element numerical model was used to simulate rock disintegration under different loading rates in the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system. The rock and the steel bars in the SHPB apparatus were simulated by the Bonded Particle Model (BPM) and finite element model, respectively. BPM is a simplified version of the discrete element method in which the discrete particles are spherical in shape. Spherical particles or balls in the BPM are very useful in reducing the computational time; the contact detection of the spherical particles is computationally very fast. The computer program CA3, which is a 3D code for static, dynamic and nonlinear simulation of geomaterials was used for the numerical analysis. To capture the rate dependent behavior of rock, a micromechanical model was utilized in which the bond strength at a contact point increases as a function of relative velocity of involved particles. The numerical model was calibrated to mimic the mechanical behavior of Masjed Soleyman sandstone. To facilitate and expedite the calibration process of the BPM system, the curves and dimensionless parameters introduced in the literature were used. Input pulses with different intensities were applied to the specimen in the numerical modeling of the SHPB system. The input energy and the energy consumed to disintegrate the numerical rock specimen were evaluated by the numerical integration. Different particle sizes in the BPM system were used to investigate the impact of combined particle size and input energy on the rock disintegration. The results suggest that the energy consumption density for rock crushing changes linearly with the stress rate. Furthermore, it is shown that the dynamic strength of the rock increases with the increase in the consumed energy density. The disintegrated numerical specimen was carefully inspected and its particle size distribution was obtained. This was achieved by using a searching algorithm to identify the clusters in the damaged specimen; each cluster was made of one or several spherical particles. The volume of each cluster was calculated by finding the volume of its constituent particles and the porosity of the specimen. This volume was used to obtain the equivalent radius of the cluster; the cluster shape was imagined as a sphere to identify the equivalent particle or cluster size. The mean particle size (D50) of the damaged numerical specimen shows a linear relationship with the stress rate in a logarithmic coordinate system, which is consistent with the physical test results reported in the literature.

Keywords:

Consumed energy density, Loading rate effect, Split Hopkinson Pressure Bar, Particle size distribution, Dynamic loading, Discrete element method, Finite element method