نشریه‌ی علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۳۶ تا ۴۲

ارایه قانون مقیاس با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بر روی تیپ سنگی سونگون پورفیری (SP)

محمدحسین احمدی[۱*]؛ حامد ملاداوودی[۲]؛ بتول رستمی[۳]
۱- پسادکتری مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شرکت مهندسی نوآوران مس تهران
۲- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده مهندسی معدن
۳- کارشناس ارشد مهندسی معدن (استخراج)، کارشناس واحد تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه

دریافت : ۱۳۹۹/۰۹/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

چکیده

مقاومت فشاری مواد سنگی تحت بارگذاری استاتیکی معمولا به سرعت بارگذاری وابسته نیست و مقدار ثابتی دارد. برخلاف بارگذاری‌های استاتیکی، رفتار دینامیکی مواد به میزان نرخ کرنش اعمالی وابسته است. برای تعیین تغییرات مقاومت فشاری دینامیکی نسبت به نرخ کرنش اعمالی از قانون مقیاس استفاده می‌شود. در برخی مواد تغییر اندک در میزان نرخ کرنش اعمالی دینامیکی منجر به افزایش محسوس در مقاومت فشاری دینامیکی می‌شود. البته هر ماده‌ای قانون مقیاس مخصوص به‌خود را دارد و برای تعیین قانون مقیاس باید مقاومت فشاری دینامیکی ماده را بازای نرخ‌های کرنش مختلف با اجرای آزمایش ارزیابی نمود. نرخ‌های کرنش اعمالی محدوده‌های مختلفی دارند و برای اعمال هر یک از محدوده‌های نرخ کرنش نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی خاصی می‌باشد. لذا بعد از تعیین مقاومت فشاری دینامیکی ماده بازای مقادیر مختلف نرخ‌های کرنش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی می‌توان یک روند کلی بین پارامترهای نرخ کرنش و مقاومت فشاری دینامیکی تعیین نمود. در این تحقیق قانون مقیاس برروی نمونه‌های تیپ سنگی سونگون پورفیری (SP) با استفاده از دستگاه آزمایش هاپکینسون تعیین شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزایش نرخ کرنش اعمالی به نمونه منجر به افزایش مقاومت فشاری دینامیکی نمونه‌های سنگی تحت ازمایش می‌شود. با افزایش نرخ کرنش اعمالی از یک نقطه خاص، افزایش اندک در میزان نرخ کرنش، منجر به افزایش محسوس در مقاومت فشاری دینامیکی می‌شود که این نقطه به عنوان نرخ کرنش انتقالی تلقی می‌شود. با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی نرخ کرنش انتقالی برای تیپ سنگی SP برابر با ۲/۶ تعیین شد. هم‌چنین قانون مقیاس کلی برای تیپ سنگی SP با برازش منحنی تعیین شد و با استفاده از این قانون می‌توان مقاومت فشاری تیپ سنگی SP را بازای هر نرخ کرنش دلخواه پیش‌بینی نمود.

واژگان کلیدی **مقاومت فشاری دینامیکی، قانون مقیاس، نرخ کرنش، آزمایش هاپکینسون، مجتمع مس سونگون**

۱- مقدمه

مقاومت فشاری مواد سنگی تحت بارگذاری استاتیکی معمولا به سرعت بارگذاری وابسته نیست و مقدار ثابتی دارد. برخلاف بارگذاری‌های استاتیکی، رفتار دینامیکی مواد به میزان نرخ کرنش اعمالی وابسته است. برای تعیین تغییرات مقاومت فشاری دینامیکی نسبت به نرخ کرنش اعمالی از

*نویسنده مسئول: پسادکتری مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر
پست الکترونیک: **m.h.ahmadi@aut.ac.ir**

قانون مقیاس استفاده می‌شود. در برخی مواد تغییر اندک در میزان نرخ کرنش اعمالی دینامیکی منجر به افزایش محسوس در مقاومت فشاری دینامیکی می‌شود [۱، ۲، ۳]. البته هر ماده‌ای قانون مقیاس مخصوص به‌خود را دارد و برای تعیین قانون مقیاس باید مقاومت فشاری دینامیکی ماده را بازای نرخ‌های کرنش مختلف با اجرای آزمایش ارزیابی نمود. نرخ‌های کرنش اعمالی محدوده‌های مختلفی دارند و برای اعمال هر یک از محدوده‌های نرخ کرنش نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی خاصی می‌باشد. برای اعمال محدوده نرخ‌های کرنش دینامیکی از دستگاه آزمایش فشاری هاپکینسون استفاده می‌شود. کیمبرلی و همکاران [۴] قانون مقیاس را برای مواد شکننده مختلف از جمله سنگ‌آهک، بازالت و بتن مطالعه کردند. قانون مقیاس را می‌توان به‌صورت تابعی از تنش‌ها و کرنش‌های نرمالیزه‌شده بیان نمود [۵]. مطابق با مطالعات پالیوال و رامش [۶]، قانون مقیاس را می‌توان در قالب منحنی تغییرات نرخ کرنش در مقیاس لگاریتمی نسبت به مقاومت فشاری تعیین نمود. در مطالعه پیش‌رو، قانون مقیاس برای نمونه‌های تهیه‌شده از تیپ سنگی سونگون پورفیری (SP) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مطالعه شده است. نمونه‌های مکعبی‌شکل بازای نرخ‌های کرنش مختلف با استفاده از دستگاه هاپکینسون آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی همدان تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفته و مقاومت فشاری متناسب با هر یک از نرخ‌های کرنش اعمالی تعیین شد. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین قانون مقیاس تیپ سنگی SP بکار گرفته شد. با استفاده از قانون پیشنهادشده می‌توان روند تغییرات مقاومت فشاری دینامیکی تیپ سنگی SP را بازای نرخ‌های کرنش مختلف پیش‌بینی نمود.

۲- آماده‌سازی نمونه و اجرای آزمایش فشاری هاپکینسون

با توجه به این‌که رفتار مواد تحت بارگذاری دینامیکی (بازای نرخ‌های بالای کرنش) کاملاً متفاوت از عکس‌العمل مواد نسبت به بارگذاری استاتیکی می‌باشد، لذا در گستره وسیعی از کاربردهای مهندسی سنگ از جمله استخراج مواد معدنی با روش حفاری و انفجار در معادن روباز، سدسازی، احداث فضاهای زیرزمینی پیش‌بینی رفتار موادسنگی تحت بارگذاری دینامیکی لازم و ضروری است.

برای تعیین مقاومت فشاری تحت بار دینامیکی با استفاده از دستگاه هاپکینسون نمونه مورد آزمایش بین میله‌های اول و دوم قرار داده می‌شود. یک ضربه‌زن الاستیک از داخل یک میله‌ی استوانه‌ای توخالی و بلند توسط هوای فشرده به سمت میله‌ی اول پرتاب می‌شود. در انتهای مسیر هنگامی که میله‌ی ضربه‌زن الاستیک به میله‌ی اول ضربه می‌زند، یک موج تنشی در سطح مشترک میله‌ی ضربه‌زن و میله‌ی اول ایجاد می‌شود که این موج در داخل هر دو میله در جهت‌های مخالف و با سرعت ثابت c که جز ثوابت ماده می‌باشد، منتشر می‌شود. موج تنشی ایجادشده در سطح مشترک به‌صورت فشاری می‌باشد. موجی که در طول میله‌ی ضربه‌زن به طرف عقب بازگشت می‌کند به‌صورت کششی منعکس و دوباره به سطح مشترک بر می‌گردد. از آنجایی‌که موج کششی نمی‌تواند از سطح مشترک منتقل شود، لذا ضربه پایان می‌یابد. طول موج فشاری ایجادشده در اثر ضربه با دو برابر طول میله ضربه‌زن به کاررفته و دامنه‌ی آن نیز با سرعت ضربه‌زن متناسب می‌باشد. موج فشاری تولیدشده در طول میله‌ی اول در جهت رسیدن به نمونه حرکت می‌کند. اگر امپدانس مکانیکی نمونه کم‌تر از امپدانس مکانیکی میله‌ها باشد (البته یکی از شروط اجرای صحیح آزمایش می‌باشد)، قسمتی از این موج فشاری ایجادشده به‌صورت یک موج الاستیک کششی در میله‌ی اول منعکس‌شده و بقیه به‌صورت یک موج الاستیک فشاری بعد از عبور از نمونه به میله‌ی دوم منتقل می‌شود. معمولاً از پالس‌های ضربه‌ی نسبتاً کوتاه استفاده می‌شود تا یک فاصله‌ی زمانی بین انتهای پالس ضربه (پالس ورودی) و شروع پالس برگشتی در مقطع اندازه‌گیری وجود داشته باشد. برای این‌که نمونه‌ی مورد آزمایش به‌صورت غیرالاستیک تغییرشکل بدهد، لازم است دامنه‌ی پالس بارگذاری بیش‌تر از تنش‌تسلیم نمونه باشد.

با توجه به بازدید میدانی به‌عمل‌آمده از پله‌های استخراجی مجتمع معدن مس سونگون زون‌های N و NW از مقاومت ذاتی و کیفیت بیش‌تری برخوردار بودند و مکانیزم غالب شکست در زون‌های مذکور از نوع رشد ریزترک‌ها و شکست در خود ماده‌سنگ می‌باشد. سنگ‌های درون‌گیر محدوده‌های مورد مطالعه (N و NW) از نوع سونگون

پورفیری (SP) می‌باشند و برنامه‌ای جامع برای مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور تعیین قانون مقیاس بر روی نمونه‌های سنگی تهیه‌شده از مقاطع مذکور طرح ریزی شد.

ابعاد نمونه در آزمایش میله فشاری هاپکینسون نقش مهمی در نتیجه آزمایش دارند، به‌طوری‌که نرخ کرنش نسبت معکوس با ضخامت نمونه دارد. برای رسیدن به نرخ‌های کرنش بالا معمولا ضخامت نمونه را کم‌تر انتخاب می‌کنند. برای مواد شکننده از قبیل سرامیک و سنگ نسبت قطر به طول نمونه را یک در نظر می‌گیرند ($\frac{d}{l}=1$) [۷]. البته اگر دست‌یابی به نرخ‌های بالای کرنش مدنظر باشد، مواد شکننده امکان دارد در جریان شتاب کرنش قبل از رسیدن به نرخ کرنش ثابت دچار شکست شوند. علاوه بر ابعاد نمونه‌ها در آزمایش میله فشاری هاپکینسون، کیفیت سطوح انتهایی نمونه از قبیل سرامیک و سنگ جز پارامترهای مهم و اصلی در اندازه‌گیری مقاومت می‌باشند و لذا تا جایی‌که مقدور است سطوح انتهایی نمونه باید صاف و موازی هم باشند. برای اجرای آزمایش هاپکینسون بر روی تیپ سنگی SP نمونه‌های مکعبی‌شکل با ابعاد تقریبا ۲۵ میلی‌متری توسط دستگاه برش آماده‌سازی و صیقل داده شدند و تا حد ممکن سعی شد که یال‌های مکعب به‌صورت موازی با یک‌دیگر باشند. شکل ۱ نمونه‌های آماده‌شده برای تیپ‌های سنگی SP را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که آزمایش میله فشاری هاپکینسون[1] در دو سری و برای ۲۰ نمونه برای هر یک از تیپ‌های سنگی SP انجام شد. در سری اول نمونه‌ها تحت نرخ کرنش‌های شبه‌دینامیکی ($\dot{\varepsilon}=(10-1000)\ \frac{1}{s}$) با تکرارپذیری (بازای هر نرخ کرنش ۳ نمونه) آزمایش شدند تا صحت نتایج حاصله برای تیپ سنگی اعتبارسنجی شود. در سری دوم ۵ عدد نمونه آماده‌سازی شد و بازای نرخ‌های کرنش بالا (دینامیکی) ($\dot{\varepsilon}=(10^3-10^4)\ \frac{1}{s}$) تحت بارگذاری فشاری آزمایش شدند.

شکل ۱- نمونه‌های مکعبی‌شکل تیپ سنگی SP برای انجام آزمایش هاپکینسون.

شکل ۲ نمایی از سیستم دستگاه آزمایش هاپکینسون مورد استفاده و هم‌چنین نحوه قرارگیری نمونه مکعبی بین میله‌های دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

(الف)

(ب)

شکل ۲- الف) دستگاه آزمایش هاپکینسون ب) نحوه قرارگیری نمونه مکعبی در دستگاه

شکل ۳ جای‌گذاری نمونه تیپ سنگی SP بین میله‌های فشار قبل از اعمال بار و هم‌چنین روند شکست نمونه بعد از اعمال فشار را نشان می‌دهد

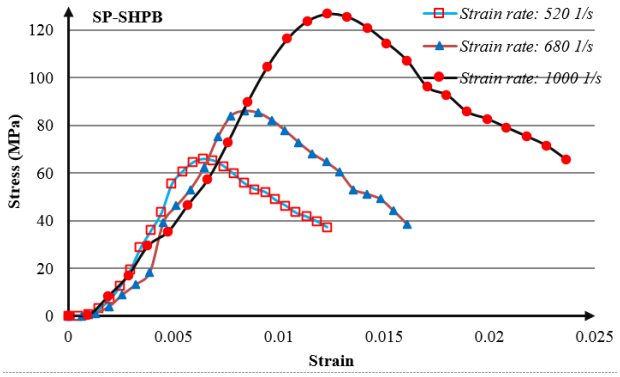
[1] Split Hopkinson Pressure Bar

(ب) (الف)

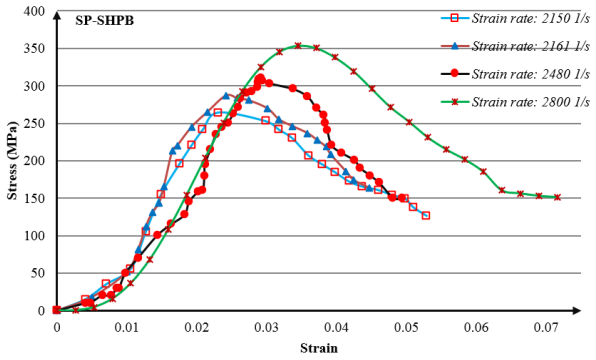
شکل ۳- اجرای آزمایش بر روی نمونه مکعبی‌شکل *SP* الف) نمونه مکعبی بین میله‌های فشاری ب) خردایش نمونه بعد از اعمال بار دینامیکی

مطابق شکل ۳ تحت بار فشاری اعمالی به نمونه از طریق میله فشار، نمونه به‌صورت انفجاری گسیخته‌شده و به قطعات کوچک‌تری تقسیم شده است. هم‌چنین مشاهده روند شکست همه نمونه‌ها بیان‌گر این موضوع است که اغلب شکستگی‌ها تحت بارگذاری دینامیکی در نمونه بکر از مرز دانه‌های ماتریکس سنگ اتفاق می‌افتد.

نمونه‌های آماده‌شده از تیپ سنگی SP بعد از قرارگیری بین میله‌های دستگاه آزمایش هاپکینسون تحت نرخ‌های کرنش شبه‌دینامیکی و دینامیکی آزمایش شدند. منحنی‌های تنش-کرنش بازای هر یک از نرخ‌های کرنش اعمالی در شکل ۴ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

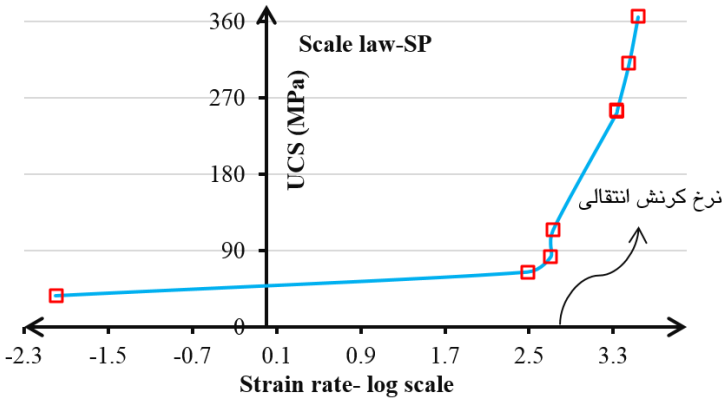
شکل ۴- منحنی تنش-کرنش برای تیپ سنگی *SP* با استفاده از آزمایش *SHPB* الف) نرخ کرنش‌های شبه‌دینامیکی ب) نرخ کرنش‌های دینامیکی

مطابق با شکل ۴ افزایش نرخ کرنش اعمالی به نمونه منجر به افزایش مقاومت فشاری دینامیکی نمونه‌ها می‌شود.

۳- قانون مقیاس

قانون مقیاس با برازش منحنی به نمودار مقاومت فشاری ماده نسبت به نرخ‌های مختلف کرنش در مقیاس لگاریتمی تعیین می‌شود. بعد از یک نرخ کرنش خاصی افزایش جزئی در میزان نرخ کرنش، منجر به افزایش چشم‌گیر در میزان مقاومت فشاری دینامیکی می‌گردد که این نرخ کرنش خاص، نرخ کرنش انتقالی نامیده می‌شود. مقاومت فشاری بازای نرخ‌های مختلف کرنش اعمالی در محدوده نرخ‌های بارگذاری استاتیکی (با استفاده از آزمایش فشاری تک-محوری) تا نرخ‌های بارگذاری شبه‌دینامیکی و دینامیکی (با استفاده از آزمایش فشاری هاپکینسون) برای تیپ سنگی SP تعیین شده است.

برای تعیین مرز بین نرخ کرنش‌های شبه دینامیکی و دینامیکی لازم است که نمودار مقاومت فشاری دینامیکی نسبت به نرخ‌های کرنش متناظر در مقیاس لگاریتمی رسم شود. شیب منحنی بازای نرخ‌های کرنش شبه‌دینامیکی تقریبا ملایم و صاف می‌باشد ولی بعد از یک نرخ کرنش خاصی (نرخ کرنش انتقالی) شیب نمودار به‌طور آنی بیش‌تر می‌شود. بازای نرخ‌های کرنش بالاتر از نرخ کرنش انتقالی افزایش نامحسوس در میزان نرخ کرنش منجر به افزایش چشم‌گیر مقاومت دینامیکی ماده می‌شود. برای تعیین نرخ کرنش انتقالی تیپ سنگی SP نمودار مقاومت فشاری دینامیکی نسبت به نرخ کرنش در مقیاس لگاریتمی مطابق با **Error! Reference source not found.** رسم شده است.

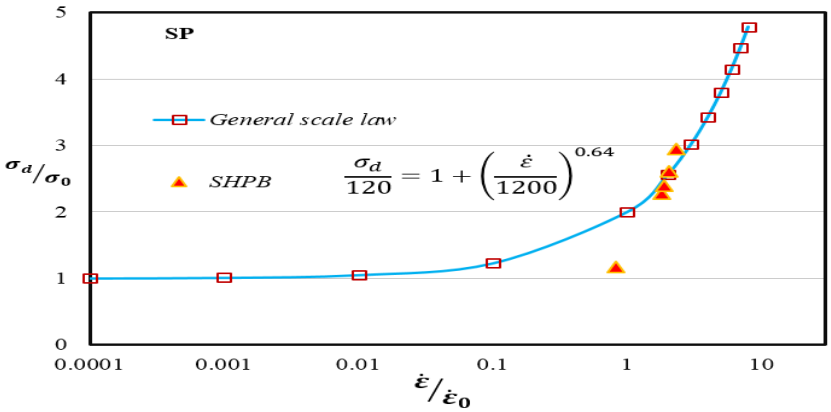


شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری دینامیکی نسبت به نرخ کرنش اعمالی برای تیپ سنگی *SP*

مطابق با شکل ۵ با افزایش نرخ کرنش از میزان نرخ کرنش استاتیکی ($10^{-2}\frac{1}{s}$) تا نرخ کرنش انتقالی ($400\frac{1}{s}$) معادل با ۲/۶ در مقیاس لگاریتمی، میزان مقاومت حداکثر تقریبا به‌صورت خطی و با شیب ملایم افزایش پیدا می‌کند. برای تعیین قانون مقیاس ابتدا مقادیر مقاومت فشاری دینامیکی (σ_f) نسبت به مقاومت فشاری در محدوده مقاومت فشاری شبه‌دینامیکی (σ_0) نرمالیزه می‌شود. از آنجائی‌که تغییرات مقاومت فشاری در نرخ‌های کرنش پایین-تر از نرخ کرنش انتقالی تقریبا خطی با شیب خیلی کم می-باشد، لذا با تقسیم نرخ‌های کرنش اعمالی ($\dot{\varepsilon}$) بر مقدار نرخ کرنش مقیاس ($\dot{\varepsilon}_0$)، مقادیر نرخ کرنش نرمالیزه‌شده تعیین می‌شود. با ترسیم منحنی مقاومت فشاری نرمالیزه‌شده به نرخ کرنش نرمالیزه‌شده قانون مقیاس تعیین می‌شود. فرم کلی قانون مقیاس را می‌توان در قالب رابطه ذیل بیان نمود [۴]:

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{\chi} \quad (۱)$$

مقدار عددی توان χ بیان‌گر هم‌بستگی معقول بین تنش و نرخ کرنش نرمالیزه‌شده می‌باشد. برای مواد سنگی مقدار عددی χ کم‌تر از یک پیشنهاد شده است.



شکل ۶- برازش منحنی حاصل از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به نتایج آزمایش فشاری هاپکینسون برای تیپ سنگی SP

با توجه به این‌که مقدار مقاومت فشاری دینامیکی (σ_f) بازای مقادیر نرخ کرنش دینامیکی اعمالی به ماده مقادیر متفاوتی دارد، لذا بازای مقادیر تنش نرمالیزه‌شده ($\frac{\sigma_f}{\sigma_0}$) با محاسبه مقادیر متناظر ($\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$) می‌توان پارامتر ($\chi$) و قانون مقیاس را تعیین کرد. در مباحث مهندسی سنگ نسبت ($\frac{\sigma_f}{\sigma_0}$) را اصطلاحا فاکتور افزایش دینامیکی[۲] (DIF) می‌نامند [۸]. بمنظور تعیین قانون مقیاس کلی برای تیپ سنگی SP ، منحنی قانون مقیاس حاصل از نتایج شبیه‌سازی عددی به مقادیر مقاومت فشاری حاصل از نتایج آزمایش هاپکینسون برازش شد. لذا تابع عمومی قانون مقیاس بازای ($\chi = 0.64$)، نرخ کرنش مقیاس ($\varepsilon_0 = 1200\ \frac{1}{S}$) و مقاومت فشاری شبه‌دینامیکی ($\sigma_0 = 120\ MPa$) برای تیپ سنگی SP به‌صورت ذیل تعیین می‌شود:

$$\frac{\sigma_f}{120} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1200}\right)^{0.64} \quad (۲)$$

شکل۶ منحنی نرمالیزه‌شده مقاومت فشاری نسبت به نرخ کرنش را برای تیپ سنگی SP نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

- مقاومت فشاری دینامیکی به نرخ کرنش اعمالی حساس است و با افزایش نرخ کرنش دینامیکی، میزان مقاومت فشاری دینامیکی نیز افزایش می‌یابد.
- برای تعیین روند تغییرات مقاومت فشاری دینامیکی با نرخ بارگذاری اعمالی، قانون مقیاس برای تیپ سنگی SP براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشنهاد شده است. هم‌چنین نرخ کرنش انتقالی برای نمونه‌های سنگی با استفاده از قانون مقیاس به‌طور مجزا تعیین شده است. با افزایش نرخ کرنش اعمالی تا مرز نرخ کرنش انتقالی، میزان مقاومت فشاری دینامیکی به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. با عبور از مرز نرخ کرنش انتقالی، تغییر اندک در نرخ کرنش اعمالی منجر به افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری می‌شود و شیب نمودار قانون مقیاس به‌صورت تند افزایش پیدا می‌کند. نرخ کرنش انتقالی با استفاده از نتایج آزمایش فشاری هاپکینسون برای تیپ سنگی SP برابر با ۲/۶ در مقیاس لگاریتمی تعیین شد.

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مادی و معنوی شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شده است که جا دارد در پایان این تحقیق از مدیرعامل محترم شرکت ملی صنایع مس ایران جناب آقای دکتر اردشیر سعدمحمدی، مدیر امور پژوهش شرکت مس مستقر در مجتمع مس سرچشمه و مجتمع مس سونگون (مهندس ناصر میرزاپور) و هم‌چنین مدیریت شرکت مهندسی نوآوران مس تهران (دکتر محمدرضا حسین زاده) تقدیر و تشکر گردد.

[2] Dynamic increasing factor

۶- منبع‌ها

[1] Nemat-Nasser, S., Deng, H. “Strain-rate effect on brittle failure in compression” ActaMetallurgicaetMaterialia, 42, pp. 1013-1024, 1994.

[2] G.Hua, K.T.Ramesh, B.Cao, J.W.McCauley; “The compressive failure of aluminum nitride considered as a model advanced ceramic” Journal of the Mechanics and Physics of Solids 59, 1076–1093, 2011.

[3] Nemat-Nasser, S., Deng, H. “Strain-rate effect on brittle failure in compression” ActaMetallurgicaetMaterialia, 42, pp. 1013-1024, 1994.

[4] J.Kimberley, K.T.Ramesh, N.P.Daphalapurkar; “A scaling law for the dynamic strength of brittle solids” J. Acta Mater. 61, 3509–3521, 2013.

[5] C.Z.Katcoff, L.L.Graham-Brady; “Modeling dynamic brittle behavior of materials with circular flaws or pores” International Journal of Solids and Structures 51, 754–766, 2014.

[6] B. Paliwal, K.T. Ramesh; “An interacting micro-crack damage model for failure of brittle materials under compression” Journal of the Mechanics and Physics of Solids 56, 2008.

[7] W.Weinong, B.Song; “Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications” Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.

[8] Z. Zhang; “Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications” University Centre in Svalbard, Longyearbyen, Svalbard, NORWAY, 2016.