

# بررسی آزمایشگاهی رفتار دینامیکی ماسه سنگ در نرخ‌های کرنش بالا

علیرضا نادی<sup>۱</sup>، کامران گشتاسبی<sup>۲\*</sup>، رضا نقدآبادی<sup>۳</sup>، محمد جواد اشرفی<sup>۴</sup>، جمال ارغوانی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- دانشیار گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- استاد گروه مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- ۴- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
- ۵- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

goshtasb@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۹/۲]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۲/۲۱]

**چکیده**- تعیین دقیق پارامترهای دینامیکی سنگ‌ها در نرخ‌های بارگذاری بالا از جمله موضوعات بسیار مهم و قابل توجه در زمینه‌های کاربردی مختلف دینامیک سنگ است. طیف وسیعی از مسائل مرتبط با مهندسی سنگ شامل انفجار، زلزله، زمین لغزش و نفوذ پرتابه‌ها در ارتباط مستقیم با علم دینامیک سنگ و خواص و رفتار دینامیکی سنگ‌ها است. به منظور طراحی و تحلیل بسیاری از سازه‌های نظامی و دفاعی احداث شده روی سنگ شامل نیروگاه‌های زیرزمینی، پناهگاه‌های زیرزمینی و مغارها، تشخیص دقیق رفتار دینامیکی سنگ‌ها تحت مقادیر مختلف نرخ بارگذاری لازم و ضروری است. مرسومترین و پرکاربردترین فناوری مورد استفاده به منظور تعیین رفتار دینامیکی مواد در نرخ‌های کرنش بالا آزمایش میله فشاری هاپکینسون است. در این فناوری یک موج فشاری با دامنه زیاد به نام موج ورودی حاصل از ضربه مستقیم یک میله ضربه‌زن، به سمت نمونه روانه شده و سپس امواج برگشتی و عبوری از نمونه همراه با موج ورودی به وسیله‌ی کرنش‌سنج‌های نصب شده روی میله‌های دستگاه ثبت می‌شوند. سپس با به کار بردن معادلاتی مشخص که حاکم بر آزمایش هاپکینسون است، منحنی تنش-کرنش دینامیکی نمونه به دست می‌آید. در این پژوهش، ابتدا پارامترهای مقاومتی ماسه سنگ در شرایط شبه‌استاتیکی به دست آمده و سپس آزمایش هاپکینسون در نرخ‌های بارگذاری مختلف روی ماسه سنگ انجام شده است و منحنی تنش-کرنش دینامیکی ماسه سنگ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در نرخ‌های بارگذاری بالا مقاومت ماسه سنگ به مقدار زیادی افزایش پیدا می‌کند به گونه‌ای که با افزایش نرخ کرنش نمونه تا  $10^5 s^{-1}$ ، مقاومت ماسه سنگ از مقدار حدود  $160 MPa$  در شرایط شبه‌استاتیکی به مقدار  $260 MPa$  در شرایط دینامیکی رسیده است.

**واژگان کلیدی:** دینامیک سنگ، نرخ بارگذاری بالا، آزمایش میله فشاری هاپکینسون، ماسه سنگ

## ۱- مقدمه

دینامیکی توده سنگ اطراف سازه در نرخ‌های بارگذاری مختلف لازم و ضروری است. پژوهش‌های بسیاری انجام گرفته است که نشان می‌دهد در نرخ‌های بارگذاری بالا، افزایش مقاومت دینامیکی سنگ ناشی از دو عامل اینرسی و ناهمگنی است. اینرسی نمونه ناشی از افزایش ناگهانی فشار داخلی

دینامیک سنگ به عنوان شاخه‌ای از مکانیک سنگ با رفتار مکانیکی سنگ‌ها در نرخ‌های بارگذاری بالا در ارتباط است. به منظور طراحی سامانه نگه‌داری و پایداری بسیاری از سازه‌های دفاعی و نظامی احداث شده بر یا در سنگ، اطلاع از رفتار

سنگ، همچون یک نیروی محدودکننده جانبی مانع از شکست زودرس سنگ در نرخ‌های بارگذاری بالا می‌شود. همچنین ناهمگنی سنگ از یک طرف روند افزایش نرخ کرنش در نمونه سنگ را شدت بخشیده و از طرف دیگر نیز باعث تعادل دینامیکی زودرس و مناسب‌تر در نمونه می‌شود به گونه‌ای که نمونه قبل از شکست، زمان بیشتری را در نرخ کرنش ثابت طی می‌کند. آزمایش‌های پاپکینسون برای اولین بار به وسیله‌ی کولسکی<sup>[۱]</sup> مورد استفاده قرار گرفت.

مدتی بعد، فناوری SHPB<sup>۲</sup> به وسیله‌ی پژوهشگران برای آزمایش مواد ترد مانند بتن (روس<sup>۳</sup> و همکاران<sup>[۲]</sup>)، چن<sup>۴</sup> و همکاران<sup>[۳]</sup>) و سنگ (فرو<sup>۵</sup> و همکاران<sup>[۴]</sup>)، کریستنسن<sup>۶</sup> و همکاران<sup>[۵]</sup>)، دای<sup>۷</sup> و همکاران<sup>[۶]</sup>) مورد استفاده قرار گرفت. با وجود این، محدودیت‌های اساسی استفاده از این فناوری برای آزمایش مواد ترد تنها در دو دهه قبل مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته است (سابهاش<sup>۸</sup> و همکاران<sup>[۷]</sup>). در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار دینامیکی سنگ‌ها در نرخ‌های بارگذاری بالا، برای اولین بار در ایران از آزمایش میله فشاری هاپکینسون استفاده شده است.

از طرفی با توجه به اینکه کرنش شکست مواد تردی همچون سنگ کوچک است، بنابراین به منظور جلوگیری از شکست زود هنگام و غیریکپارچه سنگ، ناشی از دامنه بسیار زیاد موج تنش، فناوری شکل دهنده‌ی موج<sup>۹</sup> به وسیله‌ی فرو و همکاران<sup>[۴]</sup> پیشنهاد شد. در این فناوری از یک دیسک با قطر و ضخامت خیلی کوچک که از مواد نرم مانند مس ساخته شده، استفاده می‌شود. با استفاده از این فناوری، شیب افزایشی موج تنش از حالت تند و تیز به شیبی ملایم تبدیل می‌شود. در این صورت، تعادل دینامیکی نیروها در نمونه قبل از شکست به شکل مناسبی برقرار خواهد شد و نمونه به صورت یکپارچه و

فراگیر دچار شکست می‌شود. در این حالت می‌توان از روابط تعریف شده بین تنش و کرنش در حالت شبه‌استاتیکی، در حالت دینامیکی نیز استفاده کرد و منحنی تنش-کرنش دینامیکی نمونه در طول زمان انجام آزمایش را به دست آورد.

نقدآبادی و همکاران<sup>[۸]</sup> تأثیر جنس و ابعاد شکل‌دهنده موج را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند و در پایان با انجام آنالیز حساسیت بر بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج آزمایش‌های هاپکینسون، روش طراحی شکل‌دهنده موج را بر اساس نوع و جنس نمونه مورد آزمایش ارائه دادند. ژیبینگ لی<sup>۱۰</sup> و همکاران<sup>[۹]</sup> با انجام طیف وسیعی از آزمایش‌های هاپکینسون بر روی انواع مختلف سنگ به این نتیجه رسیدند که استفاده از شکل‌دهنده موج تا حد بسیار زیادی نوسانات موجود در منحنی تنش-کرنش دینامیکی نمونه را کاهش می‌دهد.

سیریارونچای<sup>۱۱</sup> و همکاران<sup>[۱۰]</sup> با انتخاب دو مدل ماده یکی وابسته به فشار (مدل<sup>۱۲</sup> DP) و دیگری مستقل از فشار (مدل<sup>۱۳</sup> J<sub>2</sub>) به بررسی تغییرات مقاومت دینامیکی بتن تحت نرخ‌های کرنش مختلف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در نرخ‌های کرنش بسیار بالا، اختلاف نتایج دو مدل افزایش می‌یابد به گونه‌ای که نتایج حاصل از مدل ماده DP به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است. در پایان مشخص شد که اثر اینرسی نمونه به عنوان یک محدود کننده جانبی تأثیر زیادی بر افزایش مقاومت دینامیکی نمونه در نرخ‌های کرنش بالا دارد. ژیبینگ لی و همکاران<sup>[۱۱]</sup> با به کار بردن روش المان مجزا و نرم افزار PFC<sup>۱۳</sup> رفتار دینامیکی سنگ تحت نرخ‌های کرنش مختلف را در حالت دو بعدی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در نرخ‌های کرنش بالا، ناهمگنی و اینرسی دو عامل بسیار تأثیرگذار بر افزایش مقاومت دینامیکی نمونه می‌باشند. گنگ<sup>۱۴</sup> و لیو<sup>[۱۲]</sup> با انجام آزمایش‌های هاپکینسون در دو حالت دینامیکی و ترکیب دینامیکی و استاتیکی، رفتار دینامیکی ماسه

سنگ، همچون یک نیروی محدودکننده جانبی مانع از شکست زودرس سنگ در نرخ‌های بارگذاری بالا می‌شود. همچنین ناهمگنی سنگ از یک طرف روند افزایش نرخ کرنش در نمونه سنگ را شدت بخشیده و از طرف دیگر نیز باعث تعادل دینامیکی زودرس و مناسب‌تر در نمونه می‌شود به گونه‌ای که نمونه قبل از شکست، زمان بیشتری را در نرخ کرنش ثابت طی می‌کند. آزمایش‌های پاپکینسون برای اولین بار به وسیله‌ی کولسکی<sup>[۱]</sup> مورد استفاده قرار گرفت.

مدتی بعد، فناوری SHPB<sup>۲</sup> به وسیله‌ی پژوهشگران برای آزمایش مواد ترد مانند بتن (روس<sup>۳</sup> و همکاران<sup>[۲]</sup>)، چن<sup>۴</sup> و همکاران<sup>[۳]</sup>) و سنگ (فرو<sup>۵</sup> و همکاران<sup>[۴]</sup>)، کریستنسن<sup>۶</sup> و همکاران<sup>[۵]</sup>)، دای<sup>۷</sup> و همکاران<sup>[۶]</sup>) مورد استفاده قرار گرفت. با وجود این، محدودیت‌های اساسی استفاده از این فناوری برای آزمایش مواد ترد تنها در دو دهه قبل مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته است (سابهاش<sup>۸</sup> و همکاران<sup>[۷]</sup>). در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار دینامیکی سنگ‌ها در نرخ‌های بارگذاری بالا، برای اولین بار در ایران از آزمایش میله فشاری هاپکینسون استفاده شده است.

از طرفی با توجه به اینکه کرنش شکست مواد تردی همچون سنگ کوچک است، بنابراین به منظور جلوگیری از شکست زود هنگام و غیریکپارچه سنگ، ناشی از دامنه بسیار زیاد موج تنش، فناوری شکل دهنده‌ی موج<sup>۹</sup> به وسیله‌ی فرو و همکاران<sup>[۴]</sup> پیشنهاد شد. در این فناوری از یک دیسک با قطر و ضخامت خیلی کوچک که از مواد نرم مانند مس ساخته شده، استفاده می‌شود. با استفاده از این فناوری، شیب افزایشی موج تنش از حالت تند و تیز به شیبی ملایم تبدیل می‌شود. در این صورت، تعادل دینامیکی نیروها در نمونه قبل از شکست به شکل مناسبی برقرار خواهد شد و نمونه به صورت یکپارچه و

1. Kolsky
2. Split Hopkinson Pressure Bar
3. Ross
4. Chenn
5. Frew
6. Christensen
7. Dai
8. Subhash
9. Pulse shaping technique

10. Xibing Li
11. Sirijaroonchai
12. Drucker-Prager
13. Particle Flow Code
14. Gong
15. Liu

سنگها در وسط میله‌های ورودی و عبوری نصب می‌شود. امواج ثبت شده به وسیله‌ی کرنش سنج‌ها و تقویت کننده‌ها به داخل یک اسپلوسکوپ<sup>۷</sup> فرستاده شده و در پایان منحنی امواج تنش بر حسب زمان به دست می‌آیند. با فرض تعادل نیروهای دینامیکی در نمونه در طول انجام آزمایش و با در دست داشتن منحنی امواج، تاریخچه نرخ کرنش  $\dot{\epsilon}(t)$ ، کرنش  $\epsilon(t)$  و تنش  $\sigma(t)$  داخل نمونه به صورت روابط (۱) تا (۳) تعریف می‌شوند:

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C}{L} \epsilon_r \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C}{L} \int_0^t \epsilon_r dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_0} E \epsilon_t \quad (3)$$

که در روابط بالا،  $\epsilon_r$  کرنش حاصل از موج برگشتی،  $\epsilon_t$  کرنش حاصل از موج عبوری،  $C$  سرعت موج طولی در میله‌های دستگاه،  $E$  مدول الاستیسیته میله‌های دستگاه،  $A$  سطح مقطع میله‌های دستگاه،  $L$  طول نمونه و  $A_0$  سطح مقطع نمونه است [۱۳].

### ۳- مشخصات دستگاه هاپکینسون مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور انجام آزمایش SHPB از دستگاه هاپکینسون موجود در آزمایشگاه مکانیک ضربه و نفوذ دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است. نمایی از دستگاه مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است. تمامی میله‌های دستگاه از جنس فولاد ۴۳۴۰ بوده و ابعاد آنها نیز بدین صورت است که طول میله ضربه‌زن ۲۰ cm، طول میله ورودی ۱۵۳ cm، طول میله خروجی ۱۲۰ cm و قطر تمامی میله‌ها نیز برابر mm ۱۹/۷ است. چگالی میله‌های دستگاه برابر  $7850 \text{ kg/m}^3$  و سرعت انتشار موج در آنها نیز برابر  $5153 \text{ m/s}$  است. در این پژوهش، شکل دهنده موج از جنس مس نرم و با ضخامت mm ۱ و قطر mm ۱۰ انتخاب شده است.

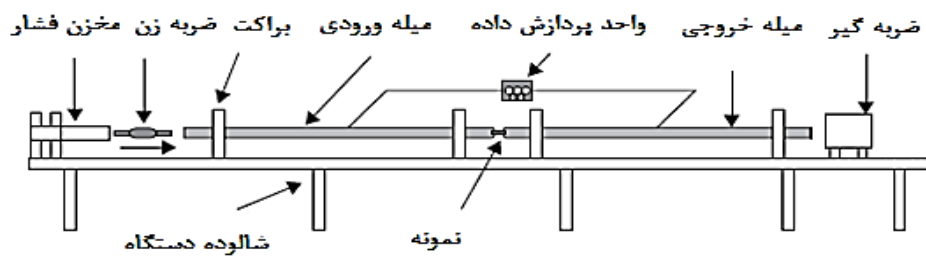
سنگ با مقاومت تک محوری  $115 \text{ MPa}$  را در نرخ‌های کرنش بالا مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد در نرخ کرنش  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ، مقاومت دینامیکی ماسه سنگ نسبت به مقاومت استاتیکی آن به میزان ۱۳۷٪ در آزمایش دینامیکی و ۲۹۲٪ در آزمایش ترکیبی (حالتی که نمونه، با استفاده از قابلیت دستگاه، قبل از انجام آزمایش دینامیکی تحت تنش استاتیکی فشارشی قرار دارد) افزایش نشان می‌دهد.

### ۲- شرح مسأله

همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، دستگاه هاپکینسون از یک مخزن فشار گاز، میله ضربه‌زن<sup>۱</sup>، میله ورودی<sup>۲</sup>، میله عبوری<sup>۳</sup> و ضربه‌گیر<sup>۴</sup> تشکیل می‌شود. نمونه مورد آزمایش بین دو میله ورودی و میله عبوری به صورت فشرده قرار می‌گیرد. شکل دهنده موج نیز در انتهای میله ورودی قرار می‌گیرد. با تنظیم مخزن فشار گاز، فشار لازم به منظور راندن میله ضربه‌زن به سمت جلو تأمین می‌شود. با آزادسازی فشار ذخیره شده، میله ضربه‌زن به سمت جلو رانده شده و به سطح میله ورودی که شامل شکل دهنده موج است، برخورد می‌کند. با این برخورد یک موج فشارشی با دامنه مشخص در میله ورودی منتشر می‌شود و به سمت نمونه حرکت می‌کند. زمانی که این موج فشارش به سطح تماس میله ورودی با نمونه میرسد به دو قسمت تقسیم می‌شود؛ قسمت اول به داخل میله ورودی بازگشت داده می‌شود که با نام موج برگشتی<sup>۵</sup> ثبت می‌شود، اما قسمت دوم موج از داخل نمونه عبور کرده و در داخل میله عبوری منتشر خواهد شد که به نام موج عبوری<sup>۶</sup> شناخته می‌شود. به منظور ثبت امواج ورودی و برگشتی از یک کرنش سنج نصب شده بر روی میله ورودی استفاده می‌شود. همچنین به منظور ثبت موج عبوری نیز از یک کرنش سنج نصب شده روی میله عبوری استفاده می‌شود. بیشتر کرنش

1. Striker Bar
2. Incident Bar
3. Transmitted Bar
4. Buffer
5. Reflected Wave
6. Transmitted Wave

7. Oscilloscope

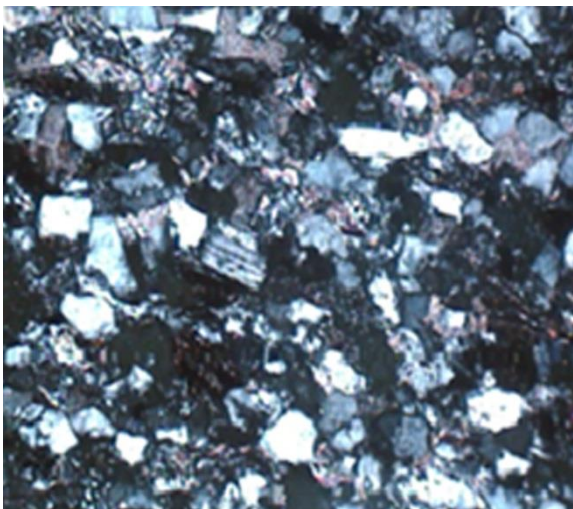


شکل (۱) شمای کلی دستگاه هاپکینسون و اجزای آن در آزمایش SHPB [۱۳]

کلریت و سایر کانی‌های رسی و ورقه‌ای که میان کانی‌های کوارتز و فلدسپار را پر کرده‌اند (۲۰٪) ۵- کانی‌های تیره (۵٪). نمونه از نظر بلوغ بافتی نابالغ بوده و بیش از ۱۵ درصد رس داشته و ماتریکس<sup>۱</sup> و سیمان سنگ از نوع کانی‌های ورقه‌ای سریت و کلریت و ریزدانه است. نام سنگ از نظر سنگ شناسی، متا ساب لیتارنایت ساب مچور با سیمان آهکی است (شکل (۳)).



شکل (۲) دستگاه هاپکینسون مورد استفاده در پژوهش



شکل (۳) مقطع نازک سنگ در زیر میکروسکوپ

با انجام آزمایش تک محوری و برزیلی روی نمونه‌های ماسه سنگ بر طبق استاندارد<sup>۲</sup> ISRM [۱۴]، پارامترهای مکانیک سنگی ماسه سنگ شامل مقاومت نهایی، مدول یانگ، ضریب پواسون و مقاومت کششی در شرایط شبه‌استاتیکی مطابق جدول (۱) به دست آمده‌اند.

#### ۴- نمونه سنگ انتخاب شده در پژوهش

در این پژوهش، ماسه سنگ انتخابی از رخنمون‌های سازند شمشک دارای بیشینه عمق ۱۲ متری در ناحیه پروژه تعریض جاده جمع‌آوری شد. به منظور بررسی و شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده نمونه سنگ، مقاطع نازک از نمونه‌ها تهیه شد و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان، کانی‌های تشکیل دهنده مورد بررسی قرار گرفتند. شکل دانه‌های تشکیل دهنده اغلب زاویه‌دار بوده که در متن آن دانه‌های تقریباً گرد شده نیز مشاهده می‌شود. اندازه و قطر دانه‌های سنگ از ۰٫۲۵ تا ۰٫۶۲۶ میلی‌متر با ابعاد ماسه ریز تا بسیار ریز متغیر است. انواع کانی‌های قابل مشاهده در مقاطع نازک میکروسکوپی عبارتند از: ۱- کوارتز (مونو کریستال-پلی کریستال با خاموشی تا اندازه‌ای دودی و یا مستقیم که برخی دارای انکلوژیون است به میزان ۵۰٪) ۲- چرت (۵٪) ۳- فلدسپار: قلیایی و پلاژیوکلاز با ماکل پلی سنتتیک (۲۰٪) ۴- مسکویت - بیوتیت و سریت،

1. Matrix

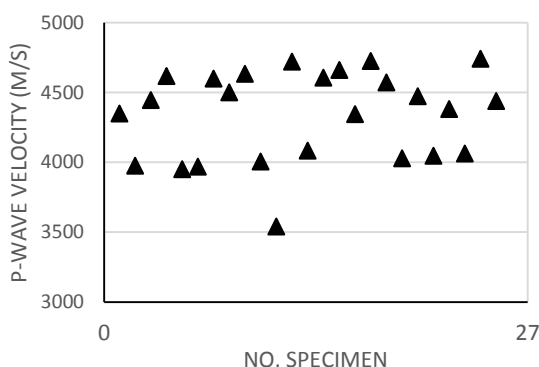
2. International Society for Rock Mechanics

قرارگیری نمونه در دستگاه هاپکینسون، لازم و ضروری است که سطوح انتهایی نمونه‌های تهیه شده کاملاً موازی یکدیگر و عمود بر محور نمونه قرار بگیرند تا سطح تماس بین نمونه و میله‌های دستگاه به طور کامل برقرار شود. این امر با کالیبراسیون دقیق دستگاه ساب امکان‌پذیر خواهد بود.



شکل (۵) نمونه‌های ماسه سنگ تهیه شده برای آزمایش هاپکینسون در سه نسبت منظر ۱، ۱٫۵ و ۲

در شکل (۵)، نمونه‌های ماسه سنگ تهیه شده در سه نسبت منظر ۱، ۱٫۵ و ۲ نشان داده شده‌اند. با توجه به اینکه لازم است نمونه‌های ماسه سنگ تهیه شده، از لحاظ ساختار داخلی خود یکسان و مشابه یکدیگر باشند تا بتوان نتایج آزمایش در حالت‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد، بنابراین آزمایش فراصوتی روی نمونه‌های ماسه سنگ انجام شد تا نمونه‌هایی که سرعت صوت در آنها مشابه باشد، برای آزمایش هاپکینسون انتخاب شوند. در شکل (۶)، نمودار پراکنندگی مقدار سرعت صوت در نمونه‌های ماسه سنگ تهیه شده نشان داده شده است که در نهایت نمونه‌هایی که سرعت صوت در آنها در محدوده  $4600-4400$  m/s قرار گرفت، انتخاب شدند.

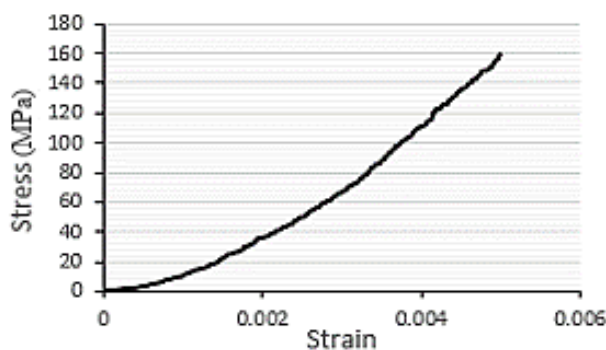


شکل (۶) نمودار پراکنندگی مقادیر سرعت صوت اندازه‌گیری شده در نمونه‌های ماسه سنگ با نسبت منظر ۲

جدول (۱) مقادیر پارامترهای مکانیکی ماسه سنگ

مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	مقاومت فشاری نهایی (MPa)
۱۱/۶	۰/۱۳	۳۹/۶	۱۵۹/۱

همچنین منحنی تنش-کرنش ماسه سنگ در شرایط شبه‌استاتیکی<sup>۱</sup> در شکل (۴) آمده است.



شکل (۴) منحنی تنش-کرنش ماسه سنگ در شرایط شبه‌استاتیکی

## ۵- آماده سازی نمونه‌های ماسه سنگ برای انجام آزمایش هاپکینسون

با توجه به اینکه قطر میله‌های دستگاه هاپکینسون مورد نظر حدوداً برابر  $20$  mm است، بنابر این باید نمونه‌های ماسه سنگ دارای نزدیکترین قطر به قطر میله‌های دستگاه باشند. از آنجایی که در بین مته‌های حفاری موجود در بازار، نزدیکترین قطر برابر  $21/5$  mm است، بنابر این نمونه‌های ماسه سنگ با استفاده از همین مته، مغزه‌گیری شدند. همچنین با توجه به اینکه محدوده مناسب برای نسبت منظر (نسبت طول به قطر یا  $L/D$ ) نمونه در آزمایش هاپکینسون از  $0,5$  تا  $2$  تعریف شده است، در این پژوهش، نسبت منظر نمونه‌ها برابر  $2$  انتخاب شد و با استفاده از دستگاه برش، نمونه‌های ماسه سنگ با ابعاد یاد شده برش داده شدند و سپس با استفاده از دستگاه ساب سطوح انتهایی نمونه‌ها ساب داده شد و در پایان با استفاده از پودر گارنت، سطوح انتهایی نمونه‌ها صیقل نیز داده شدند. تمامی مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس استاندارد *ISRM* انجام گرفته‌اند. نکته قابل گفتن این است که با توجه به وضعیت

1. Quasi-static



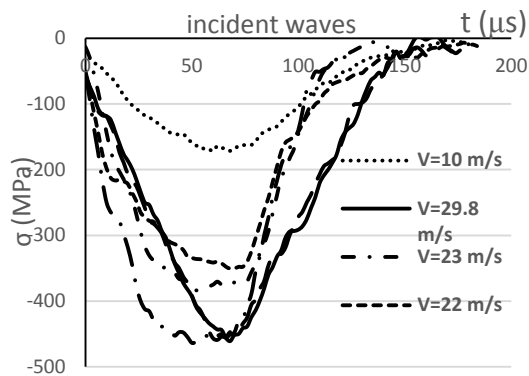
## ۶- نتایج آزمایشگاهی

پس از آماده‌سازی کامل نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مقدماتی لازم، نمونه‌های مناسب ماسه سنگ با نسبت منظر ۲ انتخاب شدند. به منظور جلوگیری از تأثیر اصطکاک سطوح انتهایی نمونه بر نتایج آزمایش، قبل از جایگذاری آن در دستگاه، از مقداری گریس برای روانسازی استفاده شد. سپس با تنظیم مخزن فشار گاز دستگاه و آماده‌سازی بخش الکتریکی، آزمایش هایپکینسون روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. در شکل (۷) نمایی از نمونه مورد آزمایش همراه با سایر قسمت‌های دستگاه نشان داده شده است.

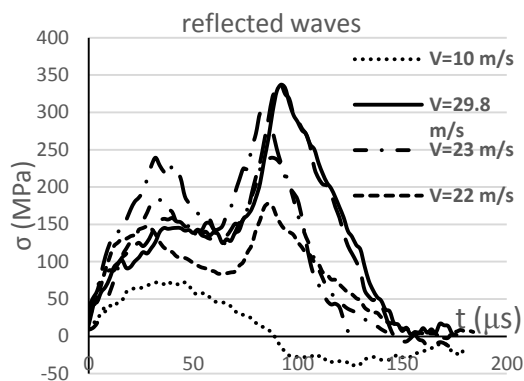


شکل (۷) نمایی از دستگاه هایپکینسون همراه با نمونه مورد آزمایش

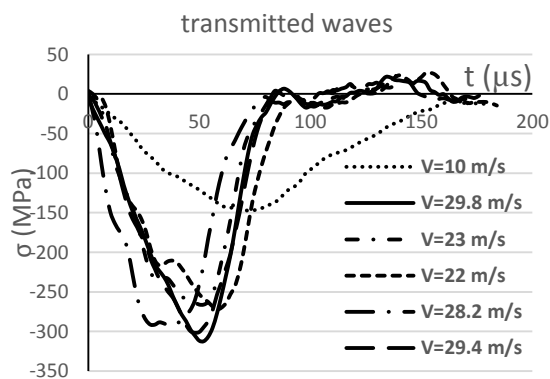
نتایج حاصل از انجام آزمایش به صورت منحنی امواج ورودی، امواج برگشتی، امواج عبوری به دست می‌آیند که به صورت تنش بر حسب زمان است. منحنی‌های تنش با به کار بردن قانون هوک، از روی منحنی‌های کرنش ثبت شده به وسیله‌ی کرنش‌سنج‌ها به دست می‌آیند. سپس با استفاده از روابط ۱ تا ۳، منحنی نرخ کرنش نمونه بر حسب زمان و منحنی تنش - کرنش دینامیکی نمونه به دست می‌آیند. نتایج فوق به ترتیب در شکل‌های (۸) تا (۱۲) آورده شده است.



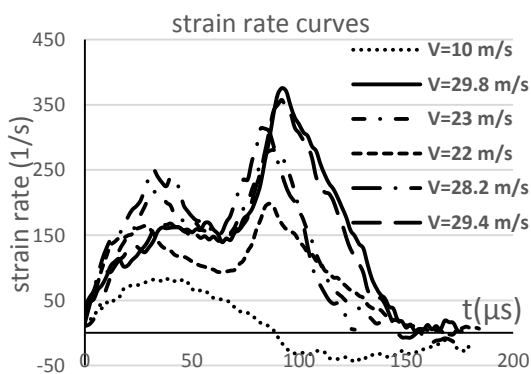
شکل (۸) منحنی امواج ورودی برای سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن



شکل (۹) منحنی امواج برگشتی برای سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن



شکل (۱۰) منحنی امواج عبوری برای سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن



شکل (۱۱) منحنی نرخ کرنش نمونه بر حسب زمان در طول انجام آزمایش

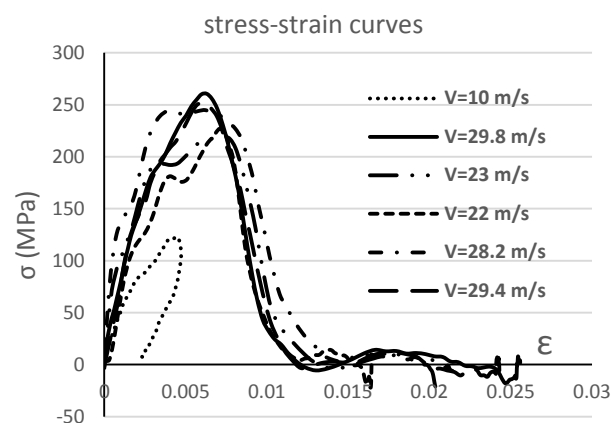
تنها دارای یک قله خواهد بود.

۴- روند تغییرات نرخ کرنش نمونه بر حسب زمان ناشی از شکل موج ورودی می‌باشد. به‌طوریکه هرچه شیب افزایشی موج ورودی زیاد شود، شیب افزایشی نرخ کرنش در نمونه افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شده است که با افزایش سرعت میله ضربه‌زن، نقطه اوج منحنی نرخ کرنش افزایش می‌یابد که نشان از افزایش شدت شکست سنگ دارد (شکل ۱۱).

۵- با افزایش سرعت میله ضربه‌زن، نقطه اوج منحنی تنش-کرنش دینامیکی ماسه سنگ افزایش می‌یابد که نشان از افزایش مقاومت دینامیکی ماسه سنگ با افزایش سرعت ضربه دارد. همانطور که نشان داده شده است با افزایش سرعت ضربه از  $10 \text{ m/s}$  (نرخ کرنش  $80 \text{ s}^{-1}$ ) به  $29.8 \text{ m/s}$  (نرخ کرنش  $170 \text{ s}^{-1}$ )، مقاومت دینامیکی ماسه سنگ از  $125 \text{ MPa}$  به  $260 \text{ MPa}$  (۱۶۵٪ افزایش نسبت به مقاومت شبه استاتیکی) رسیده است که نشان از وابستگی قابل توجه مقاومت دینامیکی ماسه سنگ به نرخ بارگذاری دارد (شکل ۱۲).

به منظور درک بهتر نتایج حاصل از آزمایش دینامیکی و مقایسه آن با نتایج شبه‌استاتیکی، ضریب افزایش دینامیکی یا به اختصار  $DIF^2$  به صورت نسبت مقاومت دینامیکی به دست آمده نمونه بر مقاومت شبه‌استاتیکی آن تعریف می‌شود. سپس مقادیر به دست آمده برای ضریب  $DIF$  ماسه سنگ بر حسب سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن در شکل (۱۳) آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، با افزایش سرعت میله ضربه‌زن و به دنبال آن افزایش نرخ بارگذاری، ضریب  $DIF$  افزایش می‌یابد و یا به عبارت دیگر مقاومت دینامیکی به دست آمده برای ماسه سنگ فزونی می‌یابد. در واقع با افزایش نرخ بارگذاری، همان‌گونه که در بخش‌های قبل بحث شد، تأثیر دو عامل اینرسی و ناهمگنی سنگ، مخصوصاً عامل اینرسی، بر افزایش مقاومت به دست آمده برای ماسه سنگ شدت پیدا می‌کند که البته هرچه نرخ بارگذاری بالاتر رود، تأثیر عامل اینرسی بر افزایش مقاومت نمونه در برابر



شکل (۱۲) منحنی تنش-کرنش دینامیکی نمونه‌های ماسه سنگ برای سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن

از مشاهده شکل‌های (۸) تا (۱۲) می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود:

۱- با افزایش سرعت میله ضربه‌زن، موج فشارشی با دامنه بزرگتری در میله ورودی به وجود می‌آید. تفاوت موجود بین امواج ورودی تولید شده در قسمت افزایشی دامنه آنها، ناشی از تفاوت اندک در ابعاد شکل‌دهنده موج مورد استفاده می‌باشد (شکل ۸).

۲- با افزایش سرعت میله ضربه‌زن، دامنه موج عبوری تولید شده در میله عبوری افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه موج عبوری نشان از میزان تنش ایجاد شده در نمونه می‌باشد، بنابراین با افزایش سرعت میله ضربه‌زن، تنش ایجاد شده در نمونه افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).

۳- همان‌گونه که از منحنی موج برگشتی پیداست، این منحنی از دو قله<sup>۱</sup> تشکیل می‌شود. قله اول مربوط به زمانی است که نمونه از نظر نرخ کرنش به یک مقدار ثابت رسیده است و در نتیجه از لحاظ تنش دینامیکی در تعادل است. سپس چنانچه تنش در نمونه به اندازه کافی بالا باشد، شکست نمونه سنگ آغاز خواهد شد که در این حالت نرخ کرنش نمونه دوباره افزایش پیدا می‌کند تا منحنی به قله دوم خود برسد و بعد از آن نیز نمونه به صورت کامل دچار گسیختگی می‌شود. آشکار است که چنانچه نمونه دچار شکست نگردد، منحنی نرخ کرنش

تأثیر نرخ کرنش بر رفتار دینامیکی ماسه سنگ دارد.

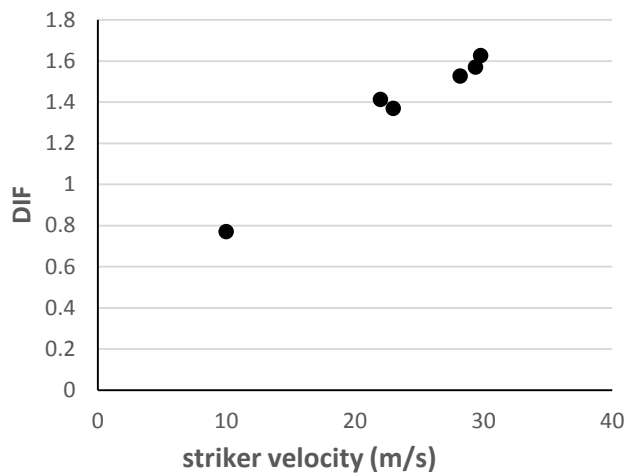
## ۸- فهرست واژگان لاتین

میله فشاری هاپکینسون	<i>SHPB</i>
نرخ کرنش	$\dot{\epsilon}$
کرنش	$\epsilon$
تنش	$\sigma$
سرعت موج طولی	$C$
طول نمونه	$L$
سطح مقطع نمونه	$A_0$
سطح مقطع میله‌های دستگاه هاپکینسون	$A$
مدول یانگ	$E$
جامعه بین‌المللی مکانیک سنگ	<i>ISRM</i>
ضریب افزایش دینامیکی	<i>DIF</i>
موج برگشتی	$\epsilon_r$
موج عبوری	$\epsilon_t$

## ۹- مراجع

- [1] H. Kolsky, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading," Proceedings of the Physical Society. Section B, vol. 62, no. 11, pp. 676, 1949.
- [2] C. A. Ross, "Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression," ACI Materials Journal, vol. 86, no. 5, 1989.
- [3] W. Chen, and G. Ravichandran, "Dynamic compressive failure of a glass ceramic under lateral confinement," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 45, no. 8, pp. 1303-1328, 1997.
- [4] D. Frew, M. J. Forrestal, and W. Chen, "A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials," Experimental Mechanics, vol. 41, no. 1, pp. 40-46, 2001.
- [5] R. Christensen, S. Swanson, and W. Brown, "Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure," Experimental Mechanics, vol. 12, no. 11, pp. 508-513, 1972.
- [6] F. Dai, S. Huang, K. Xia, and Z. Tan, "Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar," Rock mechanics and rock engineering, vol. 43, no. 6, pp. 657-666, 2010.
- [7] G. Subhash, and G. Ravichandran, "Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Ceramics," Materials Park, OH:

گسیختگی بیشتر می‌شود. به بیان دیگر، در نرخ‌های بارگذاری بالا، عامل اینرسی منجر به افزایش ناگهانی فشار داخلی سنگ شده که همین افزایش فشار داخلی همچون یک نیروی محدود کننده جانبی، محوریت مرکزی نمونه سنگ را با قدرت بیشتری حفظ کرده که همین امر موجب بالا رفتن مقاومت کلی سنگ شده و مانع شکست زودرس و گسیختگی آنی نمونه می‌گردد که در نهایت مقاومت نهایی سنگ افزایش می‌یابد.



شکل (۱۳) نمودار مقادیر *DIF* برای نمونه‌های ماسه سنگ در سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن

## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش بعد از انجام آزمایش شبه‌استاتیکی و به دست آوردن پارامترهای مکانیکی ماسه سنگ در شرایط شبه‌استاتیکی، آزمایش هاپکینسون به منظور تعیین پارامترهای دینامیکی ماسه سنگ روی نمونه‌های ماسه سنگ انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که در نرخ‌های بارگذاری بالا، مقاومت دینامیکی ماسه سنگ به شدت افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش سرعت میله ضربه‌زن از  $10 \text{ m/s}$  (نرخ کرنش  $80 \text{ s}^{-1}$ ) به  $29/8 \text{ m/s}$  (نرخ کرنش  $170 \text{ s}^{-1}$ ) مقاومت دینامیکی ماسه سنگ از  $MPa$   $125$  به  $260 \text{ MPa}$  می‌رسد به شکلی که مقدار ضریب *DIF* (نسبت مقاومت دینامیکی به مقاومت شبه‌استاتیکی) از  $0/8$  به  $1/65$  (از  $80\%$  به  $165\%$ ) افزایش می‌یابد که نشان از چگونگی



compression,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 141-149, 2010.

[11] X. Li, Y. Zou, and Z. Zhou, “Numerical Simulation of the Rock SHPB Test with a Special Shape Striker Based on the Discrete Element Method,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 1-17, 2013.

[12] S.-Y. Chang, S. K. Al Bahar, and J. Zhao, *Advances in Civil Engineering and Building Materials* : CRC Press, 2012.

[13] Y. Zhou, and J. Zhao, *Advances in rock dynamics and applications*: CRC Press/Balkema, 2011.

[14] E. T. Brown, “Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods,” 1981.

ASM International, 2000., pp. 497-504, 2000.

[8] R. Naghdabadi, M. Ashrafi, and J. Arghavani, “Experimental and numerical investigation of pulse-shaped split Hopkinson pressure bar test,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 539, pp. 285-293, 2012.

[9] X. Li, T. Lok, J. Zhao, and P. Zhao, “Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37, no. 7, pp. 1055-1060, 2000.

[10] K. Sirijaroonchai, S. El-Tawil, and A. E. Naaman, “Numerical simulation of the Split Hopkinson Pressure Bar test technique for concrete under

