

## بررسی نقش خواص ساختاری و مکانیکی سنگ در طراحی دینامیکی مغارها با استفاده از آزمایش میله فشاری هاپکینسون

حسن احمدیان<sup>۱</sup>، علیرضا باغبانان<sup>۲</sup>، حمید هاشم الحسینی<sup>۲</sup>، رضا نقدآبادی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن-مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن-مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک-طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۳۱، پذیرش ۱۳۹۶/۰۸/۱۰)

### چکیده

اهمیت سازه‌های امن و مقاوم، ایجاد مغارهای زیرزمینی در محیط سنگی را ضروری می‌سازد که این موضوع از اصول طراحی ایمن و بهینه در هر کشوری می‌باشد. اما طراحی این سازه‌ها بر عمق روباره، نوع سازه مدفون و پارامترهای طراحی در سطح زمین متمرکز است و رفتار مکانیکی سنگ در بارگذاری دینامیکی، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد و این در حالی است که پارامترهای مکانیکی سنگ نظیر مقاومت فشاری با نرخ کرنش و تنش محصور کننده تغییر می‌کنند. در این مقاله ابتدا جایگاه مطالعات دینامیکی سنگ در چارچوب طراحی بهینه سازه‌های امن، با تاکید بر وقایع تهدید کننده آن‌ها تشریح شد. در ادامه تاثیر خواص میکروساختارها بر رفتار مکانیکی سنگ در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی با استفاده از آزمایش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ مطالعه گردید. ضریب افزایش در مقاومت فشاری با تغییر نوع بارگذاری، نرخ کرنش و تنش محصور کننده در دو نمونه مرمیت با میکروساختارهای متفاوت بررسی شد و همچنین مشخص شد که ضریب افزایش مقاومت سنگ تحت تنش محصور کننده در نرخ کرنش معین، در مرمیت‌های مورد مطالعه تا عمق ۸۵ متری زمین در بارگذاری شبه استاتیکی مقدار ۱/۱۵ و در بارگذاری دینامیکی ۱/۶۵ است. که تبیین کننده وجود رابطه مستقیم بین ضریب افزایش در مقاومت فشاری سنگ و عمق استقرار سازه با لحاظ کردن اثر نرخ کرنش می‌باشد.

### کلمات کلیدی

رفتار دینامیکی، آزمایش میله فشاری هاپکینسون، سازه‌های امن و مقاوم.

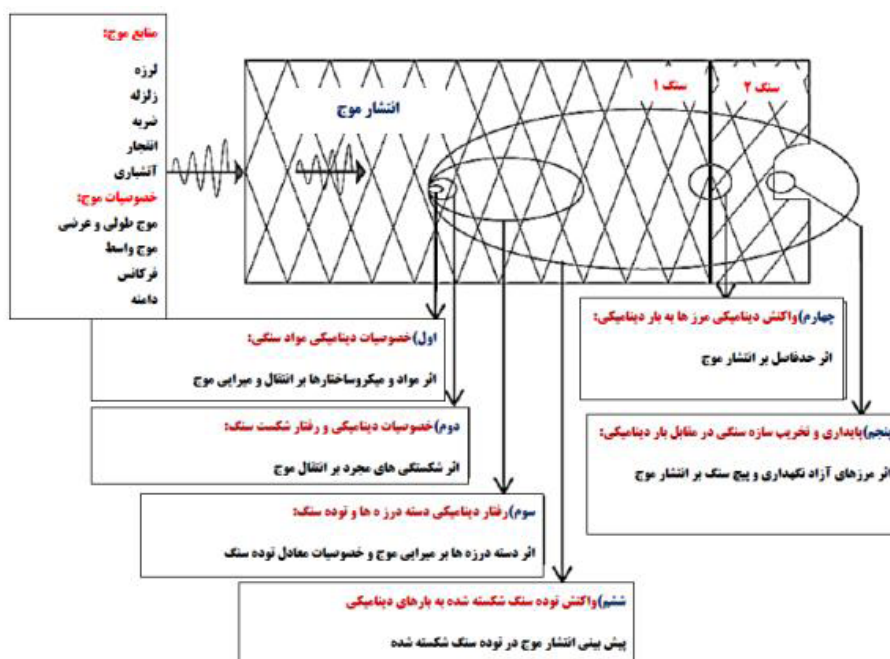
## ۱- مقدمه

مطالعات دینامیکی متعددی روی کنترل لرزش و ضربه تولیدی مجاز آیین‌نامه برای حداکثر سرعت ذره‌ای مجاز در سازه‌های مختلف منتشر شده است. همچنین مطالعاتی روی نحوه انتشار و انعکاس امواج تولیدی در محیط‌های زمین‌شناسی (محیط‌های پیوسته و ناپیوسته) انجام گرفته است [۶-۲]، اما سایر بخش‌های دینامیک سنگ مانند مطالعه روی خصوصیات دینامیکی ماده سنگ در مقیاس آزمایشگاهی به منظور بهینه کردن پارامترهای طراحی کمتر مورد واکاوی قرار گرفته است که این موضوع طی سال‌های اخیر با ورود دستگاه آزمایش دینامیکی و پیشرفت تکنیک‌های اندازه‌گیری، به تدریج در پژوهش‌ها و مطالعات بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است. عمده مسایل اصلی در طراحی مغارهای امن در محیط‌های سنگی در شکل ۱ نمایش داده شده است. شناخت خصوصیات دینامیکی سنگ در اولین گام در طراحی مغارهای امن طی مطالعات متعددی انجام گرفته است [۷] ژیا<sup>۱</sup> و همکاران به بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های گرانیت بار<sup>۲</sup> در سه بازه نرخ کرنشی با استفاده از دستگاه میله فشاری هاپکینسون پرداختند و نوع شکست نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که در بازه نرخ کرنش بالا تنش دینامیکی ماکزیمم به میکرو ترک‌های سنگ وابسته نیست و در بازه

دینامیک سنگ شاخه‌ای از علم مکانیک سنگ است که با بارگذاری، تغییر شکل و گسیختگی سنگ در بستر زمان سر و کار دارد. اهمیت پارامتر زمان به عنوان بعد چهارم منجر به ورود مکانیک سنگ به گستره وسیعی از مسایل مهندسی مانند زمین لرزه، آتشفشانی، انفجار و نفوذ پرتابه‌ها شده است که همگی تاکید بر گسترش مطالعات دینامیک دارند، همچنین به علت نظام‌مند نبودن رفتار مکانیکی سنگ در بارگذاری‌ها به ویژه در بارگذاری دینامیکی، انجام پژوهش‌های متعدد برای فهم دقیق موضوع ضرورت دارد [۱].

اهمیت این موضوع منجر به تشکیل کمیته تخصصی دینامیک سنگ در سال ۲۰۰۸ در انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و تشکیل شاخه دینامیک سنگ و مهندسی زلزله در مجله مکانیک سنگ و مهندسی سنگ شد. بعد از تشکیل این شاخه مقیاس کاری این کمیسیون در ۵ شاخه زیر مشخص شد:

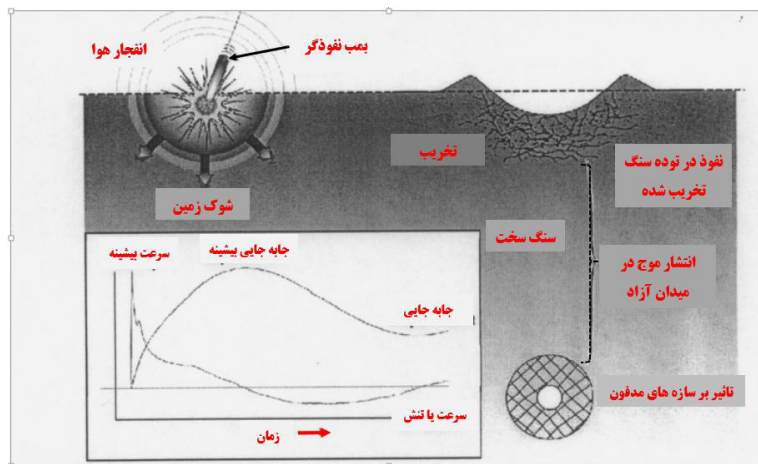
- ۱- شناسایی منابع بارگذاری دینامیکی
- ۲- خصوصیات دینامیکی سنگ و تعیین آن‌ها
- ۳- گسترش موج تنش دینامیکی در محیط‌های زمین‌شناسی
- ۴- معیار شکست سنگ و بررسی‌های آن
- ۵- طراحی دینامیکی نگهداری سنگ [۲].



شکل ۱: مسایل اصلی دینامیک سنگ در طراحی مغارهای امن [۸]



شکل ۲: پارامترهای اساسی در پایداری مغارهای امن

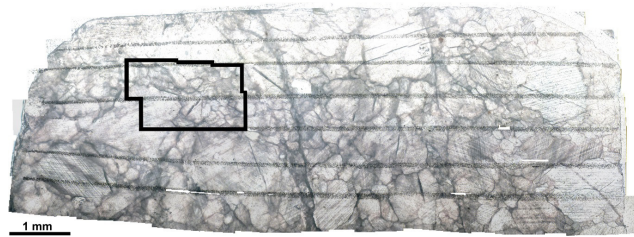


شکل ۳: پدیده‌های اصلی در طراحی ایمن مغارهای زیرزمینی در محیط سنگی [۹]

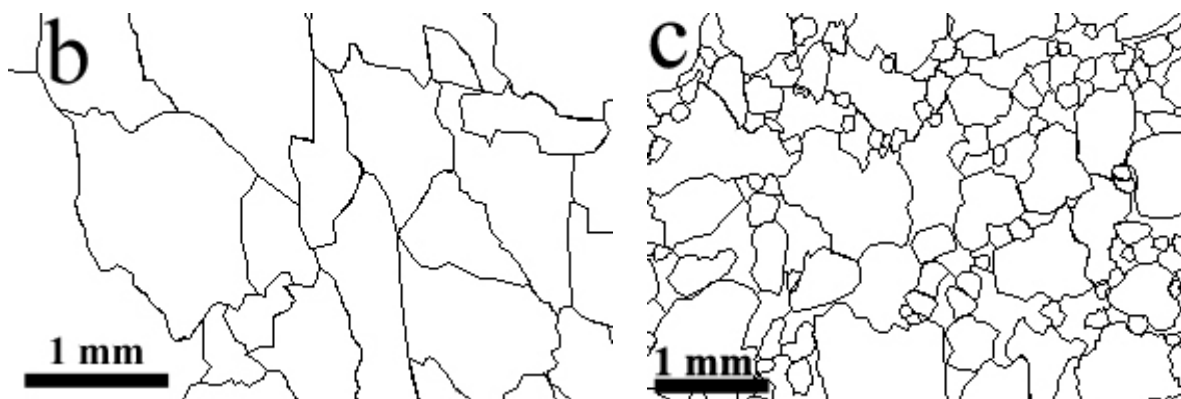
موارد مطرح شده در نمودار شکل ۲ است. با توجه به اهداف و ملاحظات طراحی، احداث مغارهای زیرزمینی عمیق نسبت به مغارهای کم عمق دارای ضرورت دوچندان می باشد که طراحی ایمن این دست از مغارها فقط از طریق مطالعات دقیق دینامیکی سنگ دارای کاربرد خواهد بود. پدیده‌های به وجود آمده برای طراحی ایمن مغارهای زیرزمینی در محیط سنگی مطابق شکل ۳ می باشد. پدیده‌های شاخص رخ داده در حین اصابت یک بمب نفوذگر در سنگ شامل ضربه<sup>۶</sup>، نفوذ<sup>۷</sup>، گسیختگی<sup>۸</sup>، خردایش<sup>۹</sup> و انتقال موج است. تعیین پارامتر ضریب افزایش مقاومت سنگ با افزایش نرخ کرنش و تنش محصورکننده نیز بخشی از فرآیند شناخت رفتار دینامیکی سنگ است که منجر به تعیین عمق بهینه برای احداث یک مغار زیرزمینی در محیط سنگی می شود. تعیین این ضریب به صورت آزمون آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری دینامیکی در سنگ‌هایی با بافت متفاوت با استفاده از دستگاه میله فشاری هاپکینسون در تحقیقات قبلی گزارش نشده است، بنابراین در این مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی دو نمونه مرمریت رایج در کشور با میکروساختارهای متفاوت بررسی

نرخ کرنش پایین تنش دینامیکی ممکن است منجر به تشکیل مجدد ترک‌های کوچک در سنگ شود [۱۰]. فرو<sup>۳</sup> و همکاران با اضافه کردن سلول فشار به دستگاه میله فشاری هاپکینسون و اعمال ۲۰۰ مگاپاسکال فشار جانبی شرایط نرخ کرنش ۴۰۰ بر ثانیه در نمونه‌های آهک را تجربه کردند [۱۱]. هوکا<sup>۴</sup> و همکاران نیز اثر نرخ کرنش را توأم با اثر فشار جانبی در نمونه‌های گرانیتی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقاومت نهایی سنگ در شرایط فشار جانبی پایین در نرخ کرنش بالا رشد بیشتری دارد [۱۲].

اهداف سخت و مدفون<sup>۵</sup> شامل انواع سازه‌های مقاوم سطحی مدفون در سنگ در اعماق کم و زیاد با کاربری مهم است. این اهداف در هر کشوری با توجه به ضرورت‌های دفاعی آن وجود دارد [۱۰]. انتقال به اعماق زمین یکی از گزینه‌های مطلوب برای ارتقا سطح سلامت زیرساخت‌های راهبردی در کشور است. در مطالعاتی متعددی نیز تاکید شده است که وقتی یک سازه امن در عمق مشخصی از زمین قرار گیرد هیچ راهی برای انهدام آن وجود ندارد [۸، ۹]. به طور کلی پارامترهای اساسی در پایداری مغارهای امن شامل



شکل ۴: جانمایی کریستال‌ها در صفحه (xy)



شکل ۵: بخشی از پلی‌گون‌ها در موزاییک‌های باغات (چپ) و مارون (راست) [۱]

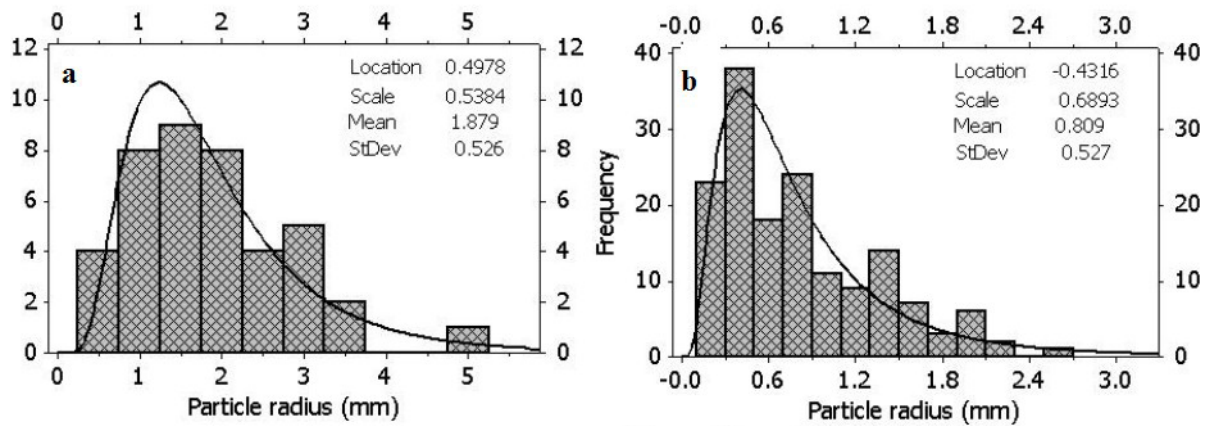
با توجه به نتایج توزیع دانه‌های مرمیت‌های باغات و مارون (شکل‌های ۵ و ۶) مقادیر میانگین و انحراف از معیار شعاع ذرات در باغات و مارون به ترتیب برابر  $1,879 \pm 0,526$  و  $0,809 \pm 0,527$  میلی‌متر به‌دست آمده است. با استفاده از آزمون T دونمونه‌ای شعاع‌های تمام ذرات در هر مرمیت با داده‌های مشابه از مرمیت دیگر مقایسه شده است (جدول ۱). این آزمون آماری نشان می‌دهد که تفاوت بین توزیع دانه‌بندی مرمیت‌ها چشمگیر است، این بدان معناست که هیچ کدام از مرمیت‌های مورد مطالعه توزیع دانه‌بندی مشابه‌ای ندارند. بازه اطمینان ۹۵ درصد برای متفاوت بودن میانگین شعاع ذرات مرمیت‌ها، در آزمون شامل صفر نیست، بنابراین گمان نمی‌رود هیچ کدام از مرمیت‌ها توزیع دانه‌بندی مشابه‌ای داشته باشند. همچنین مقادیر P-Value برای پذیرفتن یا نپذیرفتن شباهت بین توزیع دانه‌بندی مرمیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود مقادیر P-Value به‌دست آمده از آزمون به اندازه کافی کوچک‌اند (کوچکتر از

شد و در ادامه ضریب افزایش مقاومت سنگ در دو بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی با افزایش نرخ کرنش و افزایش تنش محصورکننده به صورت تجربی با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی پیشنهاد شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- شناسایی خواص سنگ

میکروسکوپ پلاریزان با کمک تیغه ژپیس ابزاری رایج برای بررسی و برآورد ابعاد دانه‌ها و میکرو ترک‌ها در مواد مهندسی از جمله سنگ است. در مطالعه با میکروسکوپ پلاریزان ابتدا مقطع نازک کافی از هر دو نمونه تهیه و با استفاده از نرم افزارهای گرافیکی تمام سطح مقطع نازک عکسبرداری شد. این تصاویر به صورت موزاییک‌هایی در ابعاد کریستال در سطح مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴).



شکل ۶: توزیع سطح دانه‌ها با استفاده از منحنی نرمال و برآورد مقادیر میانگین انحراف معیار مقیاس در مرمیت‌های باغات و مارون

جدول ۱: نتایج آزمون T دونمونه‌ای بین مرمیت‌ها

| Difference        | 95% confidence interval for difference | T-value | P-value | Degree of freedom |
|-------------------|--|---------|---------|-------------------|
| $\mu(B) - \mu(M)$ | (۴/۶۴, ۸/۱۶)                           | ۷/۱۹    | ۰       | ۱۴۱               |

جک‌های هیدرولیکی قابل دستیابی است، در محدوده  $10^1$  تا  $10^4$  بر ثانیه نرخ کرنش بالا می‌رود و رفتار دینامیکی مواد مطابق شکل ۷ به وسیله آزمایش میله فشاری هاپکینسون<sup>۱</sup> به دست می‌آید.

جدول ۲: اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در مرمیت‌ها

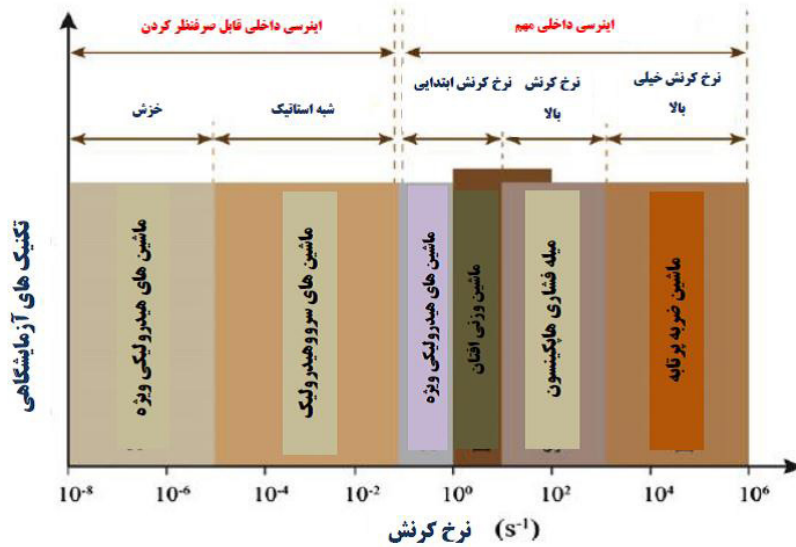
| مارون               | باغات               | نوع مرمیت                          |
|---------------------|---------------------|------------------------------------|
|                     |                     | اندیس دوام                         |
| ۰/۹۷ <sub>۵</sub>   | ۰/۹۸ <sub>۳</sub>   | I <sub>d1</sub>                    |
| ۰/۹۸ <sub>۵</sub>   | ۰/۹۸ <sub>۳</sub>   | I <sub>d2</sub>                    |
| ۵۵/۶۵ <sub>۸۲</sub> | ۵۳/۳۸ <sub>۹۳</sub> | سختی چکش اشمیت                     |
| ۲/۶۷ <sub>۲</sub>   | ۲/۶۷ <sub>۲</sub>   | چگالی                              |
| ۰/۴۶ <sub>۲</sub>   | ۰/۹۹ <sub>۲</sub>   | تخلخل (%)                          |
| ۲/۵۸ <sub>۴</sub>   | ۲/۴۹ <sub>۴</sub>   | اندیس بار نقطه‌ای (مگا پاسکال)     |
| ۷/۹۱ <sub>۵</sub>   | ۸/۴۲ <sub>۶</sub>   | مدول یانگ (گیگاپاسکال)             |
| ۰/۲۱                | ۰/۲۷                | ضریب پواسن                         |
| ۳۲/۶۲ <sub>۵</sub>  | ۴۱/۵۳ <sub>۶</sub>  | مقاومت فشاری تک محوری (مگا پاسکال) |

۰/۵)، بنابراین فرض یکسان بودن توزیع دانه‌بندی مرمیت‌ها، در آزمون پذیرفته نمی‌شود.

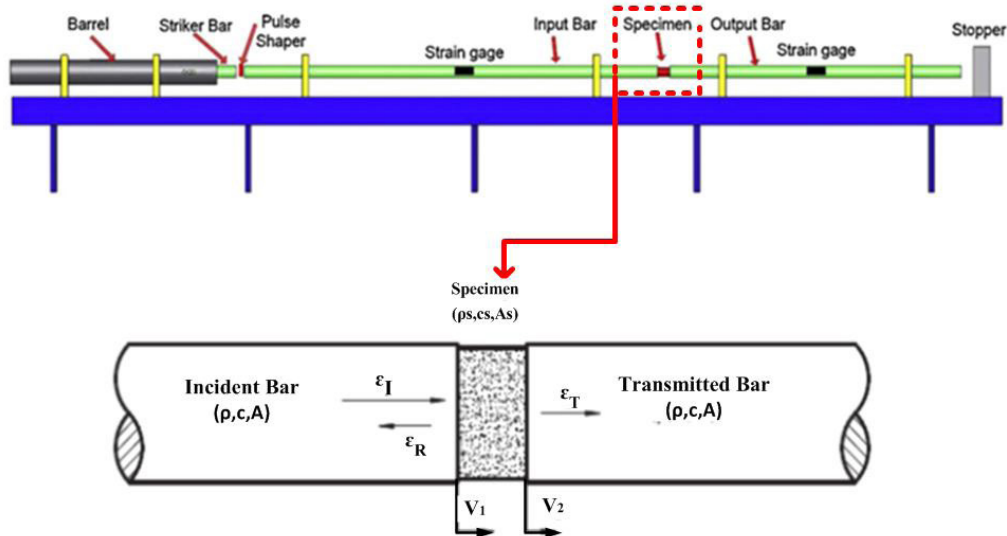
برای بررسی خصوصیات سنگ ابتدا از بلوک‌های سنگ به تعداد کافی مغزه با قطرهای ۶۳ و ۵۴ میلی‌متر تهیه شد، سپس با رعایت استانداردهای مکانیک سنگ [۱۳] نمونه‌ها برای هر آزمایش در ابعاد مشخص و تعداد کافی تولید شدند. برخی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی دو نمونه مرمیت باغات و مارون در آزمایشگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و نتایج آن همراه با تعداد تکرارپذیری هر پارامتر (عدد زیرنویس) در جدول ۲ قید شده است. نکته قابل توجه پایین بودن پارامترهای مقاومتی مانند اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت تراکم تک محوری مرمیت‌های مارون نسبت به مرمیت‌های نوع باغات است.

## ۲-۲- تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ در بارگذاری استاتیکی و دینامیکی

ابزارهای بارگذاری برای تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ تغییرات زیادی در نرخ کرنش دارد، نرخ کرنش ۱۰ تا ۱۰-۱ بر ثانیه رفتار شبه استاتیکی تلقی می‌شود که این نرخ کرنش با



شکل ۷: تکنیک‌های اصلی بارگذاری برای تعیین خصوصیات مکانیکی مصالح در گستره نرخ



شکل ۸: نمای شماتیک دستگاه میلۀ فشاری هایپکینسون

یک سیستم SHPB<sup>۱۰</sup> استاندارد مطابق شکل ۸ از یک میلۀ ضربه‌زن، میلۀ ورودی، میلۀ خروجی، ضربه‌گیر، تفنگ گازی و سیستم ثبت داده، تشکیل می‌شود که نمونه بین میلۀ ورودی و میلۀ خروجی به صورت فشرده قرار می‌گیرد. بعد از رهاسازی تفنگ گازی میلۀ ضربه‌زن به انتهای آزاد میلۀ ورودی ضربه می‌زند که تولید یک موج فشاری طولی می‌کند که این

بر اساس پیشنهاد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی نمونه‌های مرمریت باغات و مارون در این مطالعه به ترتیب با استفاده از دستگاه تراکم تک محوری سنگ ساخت شرکت ELE و دستگاه میلۀ فشاری هایپکینسون در آزمایشگاه ضربه و نفوذ دانشگاه صنعتی شریف انجام گرفته است.

جدول ۳: مشخصات دستگاه میله فشاری هاپکینسون مورد استفاده

| میل          | ضریب پواسن | مدول یانگ (گیگاپاسکال) | قطر (میلی متر) | طول (میلی متر) | سرعت موج (متر بر ثانیه) |
|--------------|------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------------|
| ضربه زن      | ۰/۳۳       | ۷۱/۷                   | ۶۳             | ۳۰۰            | ۵۰۵۰                    |
| ورودی        | ۰/۳۳       | ۷۱/۷                   | ۶۳             | ۲۵۰۰           | ۵۰۵۰                    |
| انتقال دهنده | ۰/۳۳       | ۷۱/۷                   | ۶۳             | ۱۵۰۰           | ۵۰۵۰                    |
| شکل دهنده    | ۰/۳۳       | ۷۱/۷                   | ۸              | ۱              | ۳۷۹۴                    |

موج بارگذاری ایجاد شده در سیستم معمولی SHPB برای آزمایش دینامیکی مواد در نرخ‌های کرنش بالا به شکل دوزنقه‌ای است که نوسان‌های بسیار زیادی دارد که باعث به وجود آمدن شیب بسیار تند در موج ورودی می‌شود که منجر به عدم برقراری تعادل تنش دینامیکی می‌شود که از پیش نیازهای اصلی حصول نتیجه معتبر است.

برای رفع این مشکل تکنیک‌های متعددی به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به تکنیک شکل‌دهندگی موج اشاره کرد که یک روش کم هزینه‌تر و عمومی است بدین ترتیب که بین انتهای میله ضربه‌زن و میله ورودی موج از یک دیسک نازک و کوچک از جنس آلومینیوم، برنج و یا مس استفاده می‌شود. در بارگذاری دینامیکی مواد ترد با استفاده از دستگاه هاپکینسون، برای تعدیل شکل موج ورودی و دستیابی بهتر به تعادل باید از تکنیک شکل‌دهنده موج استفاده کرد [۱۴] که در این پژوهش از شکل‌دهنده موج (pulse shaper) مسی دیسکی شکل به قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر استفاده شده است. مشخصات دستگاه میله فشاری هاپکینسون مورد استفاده مطابق جدول ۳ است.

### ۳- نتایج

آزمایش بارگذاری دینامیکی روی ۲۵ نمونه از مرمیتهای باغات و مارون، در بازه نرخ کرنش (پایین و بالا) انجام گرفت و نمودارهای تنش-کرنش آنها حاصل شد (شکل ۹) که با تامل در آنها، بالاتر بودن مقاومت فشاری نمونه‌های باغات نسبت به نمونه‌های مارون قابل توجه است. اختلاف در مقاومت فشاری مرمیتهای با تغییر نوع بارگذاری از ۲۲ درصد در بارگذاری استاتیکی به ۱۲ درصد در بارگذاری دینامیکی رسیده است که نشان دهنده نقش خواص ریزساختاری سنگ در رفتار مکانیکی آن است.

موج در طول میله منتشر شده و به نمونه می‌رسد. زمانی که موج به سطح تماس بین نمونه و میله ورودی موج می‌رسد، قسمتی از آن برگشته و قسمت دیگر به داخل نمونه وارد شده و بعد از آن به داخل میله خروجی منتقل شده و تا نزدیک ضربه‌گیر منتشر می‌شود. برای ثبت کرنش‌ها در طول آزمایش و تحلیل نتایج، کرنش‌سنج‌هایی روی میله‌های دستگاه نصب شده است که به فاصله مشخصی از سطوح تماس نمونه با میله‌های دستگاه قرار گرفته است که وظیفه آنها ثبت امواج ورودی، برگشتی و عبوری است. تاریخچه نرخ کرنش و تنش داخل نمونه در آزمایش فشاری دینامیکی به ترتیب از رابطه‌های ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_e}{L_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_e}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_e}{2A_s} E_e (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (3)$$

که در آن

$\varepsilon_i$  کرنش ورودی

$\varepsilon_r$  کرنش برگشتی

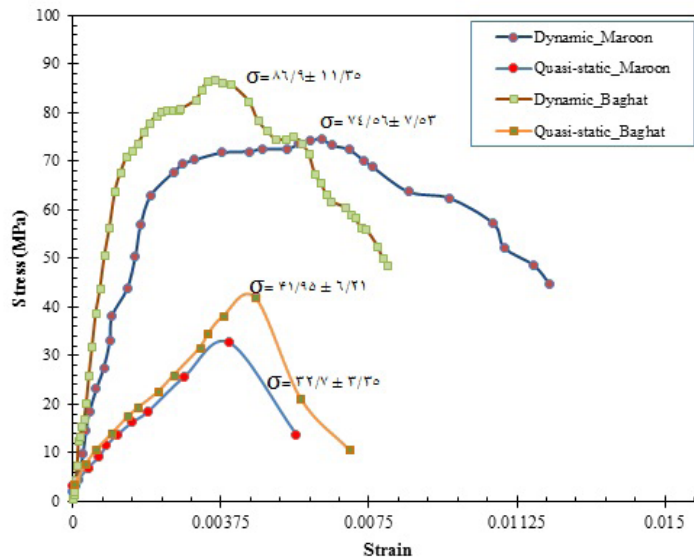
$\varepsilon_t$  کرنش منتقل شده

$L_s$  طول نمونه

$A_s$  سطح مقطع نمونه

$A_e$  سطح مقطع میله‌ها

$E_e$  مدول الاستیسیته میله‌ها



شکل ۹: منحنی معادل تنش - کرنش مرمیت‌های مارون و باغات در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی

بر حسب زمان در مرمیت‌های مارون و باغات در شکل های ۱۰ و ۱۱ ترسیم شده است. با توجه به جدول ۴ با دو برابر شدن مقدار نرخ کرنش در نمونه‌های مرمیت باغات مقدار افزایش در میزان مقاومت فشاری دینامیکی سنگ ۱/۵۲ برابر شده است، اما در نمونه‌های مرمیت مارون با سه برابر شدن مقدار نرخ کرنش مقدار افزایش در میزان مقاومت فشاری دینامیکی سنگ ۱/۴۵ برابر شده است. این نشان می‌دهد نمونه‌های درشت دانه مرمیت باغات به نرخ کرنش وابسته‌تر هستند.

### ۳-۳- بررسی رفتار مکانیکی سنگ‌ها در تنش محصور

از پارامترهای مورد نیاز طراحی مغارهای امن فهم درست از وضعیت تنش‌های برجا و چگونگی رفتار مکانیکی سنگ در اعماق مختلف است که پارامتر استراتژیک عمق نقش خود را در میزان بازدارندگی و ارتقا پایداری سازه از طریق افزایش میزان مقاومت سنگ ایفا می‌کند. در این پژوهش بارگذاری استاتیکی از دستگاه فشار سه محوره همراه سلول هوک و در بارگذاری دینامیکی نیز با اعمال ابتکار نصب سلول هوک روی دستگاه میله فشاری هاپکینسون بارگذاری سه محوره مطابق شکل ۱۲ میسر شد. در بارگذاری شبه استاتیکی تعداد ۱۵ نمونه از مرمیت‌های باغات و مارون در بازه تنش‌های جانبی صفر تا ۳٫۵ مگاپاسکال مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین تعداد ۲۵ نمونه از هر دو مرمیت نیز در بازه تنش‌های جانبی

### ۳-۱- ضریب افزایش مقاومت دینامیکی

ضریب افزایش مقاومت دینامیکی ( $DIF^{(1)}$ ) پارامتری است که بیان‌کننده نسبت افزایش مقاومت تک محوری سنگ در بارگذاری دینامیکی نسبت به بارگذاری شبه استاتیکی است [۱۵].

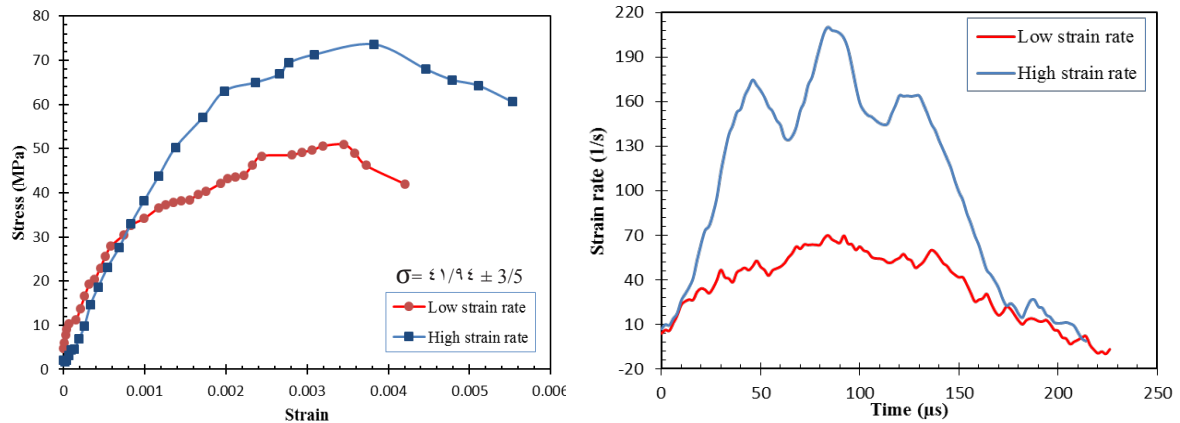
با توجه به شکل ۹ نسبت افزایش مقاومت فشاری با تغییر بارگذاری از شبه استاتیکی به دینامیکی در نمونه‌های باغات ۱٫۹۳ و در نمونه‌های مارون برابر ۲٫۲۵ شده است. تفاوت در مقدار ضریب افزایش مقاومت دینامیکی موبد این مطلب است که نقش میکروترک‌ها در رفتار دینامیکی کمتر از نقش آن در رفتار شبه استاتیکی در این دو نمونه سنگ است.

$$DIF = \frac{\sigma_c^{Dyn}}{\sigma_c^{Q-S \text{ or UCS}}} \quad (4)$$

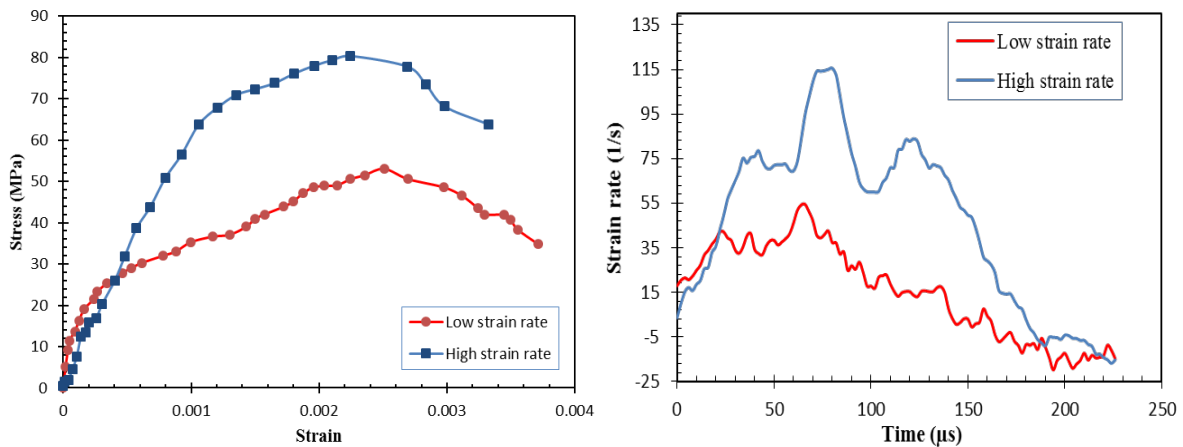
### ۳-۲- اثر نرخ کرنش

به منظور بررسی اثر تغییر نرخ کرنش روی پارامترهای مکانیکی مرمیت‌های باغات و مارون از طریق تغییر در سرعت میله ضربه‌زن ۳۰۰ میلی‌متری، ۸ آزمایش بارگذاری دینامیکی به وسیله دستگاه میله فشاری هاپکینسون روی نمونه‌های Nx با نسبت طول به قطر یک در نرخ کرنش بالا و پایین انجام گرفت. نمودارهای تنش-کرنش و نمودار تغییرات نرخ کرنش





شکل ۱۰: رفتار دینامیکی مرمیت‌های مارون در نرخ کرنش پایین و بالا



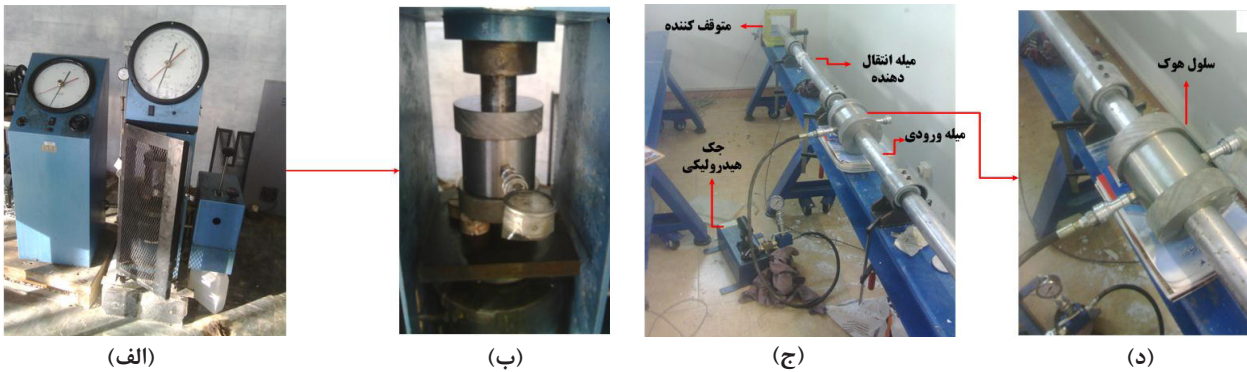
شکل ۱۱: رفتار دینامیکی مرمیت‌های باغات در نرخ کرنش پایین و بالا

جدول ۴: تغییر پارامترهای مقاومتی با تغییر نرخ کرنش در مرمیت‌های باغات و مارون در بارگذاری دینامیکی

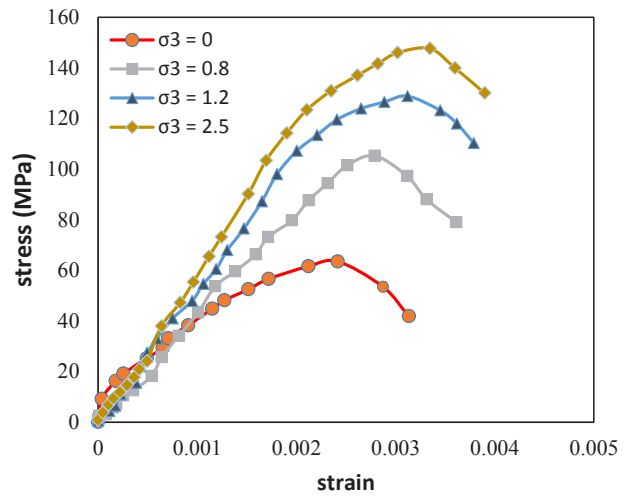
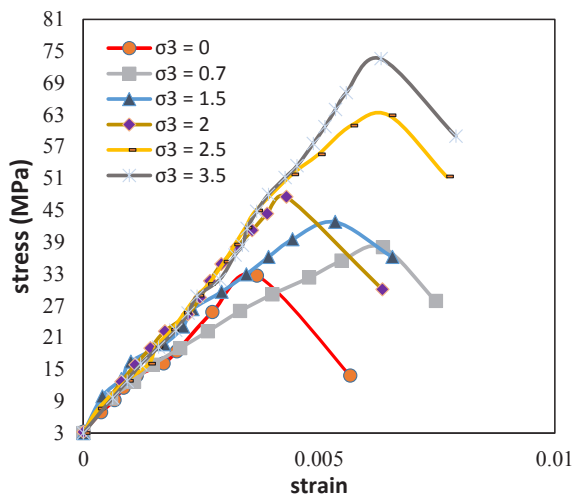
| نرخ کرنش (یک بر ثانیه) | مدول یانگ (گیگاپاسکال) | مقاومت فشاری (مگاپاسکال) | نمونه       |
|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------|
| ۴۲/۵۳                  | ۱۲/۶۹                  | ۵۳/۰۴۸                   | باغات       |
| ۸۳/۶۱                  | ۲۵/۴۱                  | ۸۰/۴۶                    |             |
| ۱/۹                    | ۲                      | ۱/۵                      | ضریب افزایش |
| ۵۲/۷۷                  | ۷/۲۴                   | ۵۰/۹۴                    | مارون       |
| ۱۵۲/۶۹                 | ۱۰/۸۵                  | ۷۳/۵۹                    |             |
| ۲/۸۹                   | ۱/۴۹                   | ۱/۴۵                     | ضریب افزایش |

محصولکننده مختلف در مرمیت‌های باغات و مارون، در دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ است.

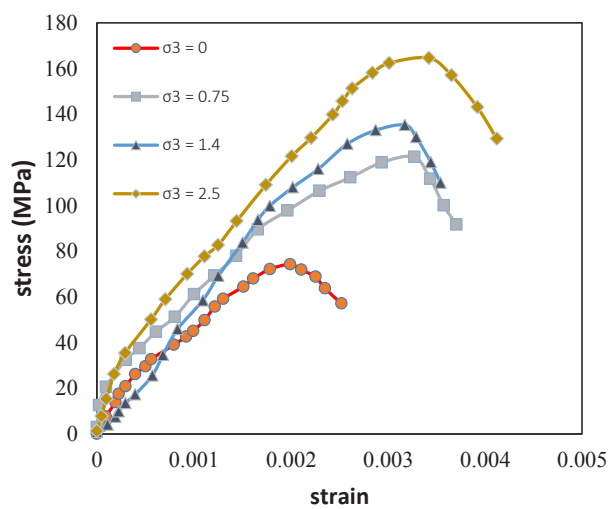
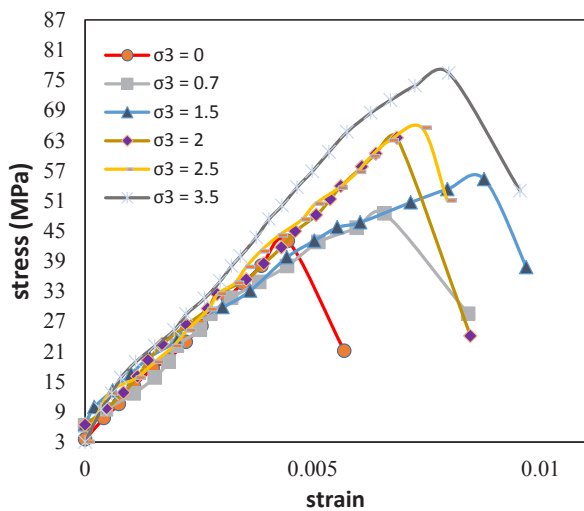
صفر تا ۲٫۵ مگاپاسکال مورد بارگذاری دینامیکی قرار گرفت. نسبت طول به قطر نمونه طبق استاندارد مکانیک سنگ بین ۲ و ۲٫۵ در نظر گرفته شد. نمودارهای تنش-کرنش در تنش‌های



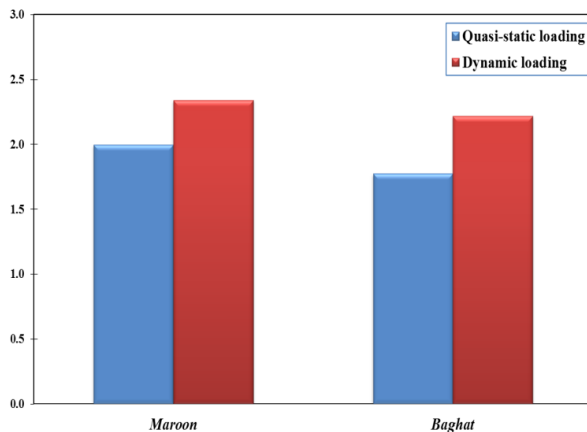
شکل ۱۲: بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی با اعمال تنش محصورکننده با استفاده از سلول هوک (الف تا د)



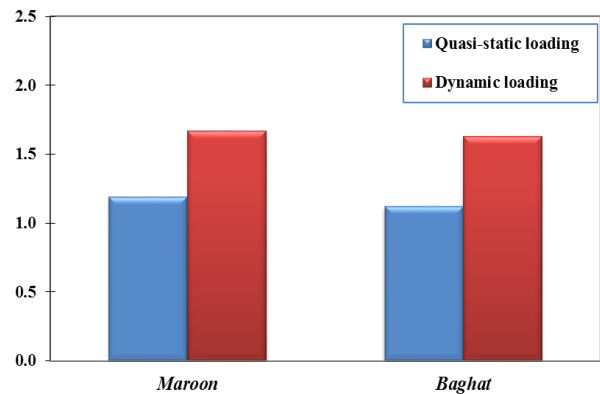
شکل ۱۳: منحنی تنش - کرنش مرمیت‌های مارون در بارگذاری شبه استاتیکی (چپ) و دینامیکی (راست)



شکل ۱۴: منحنی تنش - کرنش مرمیت‌های باغات در بارگذاری شبه استاتیکی (چپ) و دینامیکی (راست)



شکل ۱۶: نسبت افزایش مقاومت فشاری در فشار محصورکننده ۰٫۷۵ مگاپاسکال در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی در مرمیت‌های باغات و مارون



شکل ۱۵: نسبت افزایش مقاومت فشاری در حداکثر فشار محصورکننده در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی در مرمیت‌های باغات و مارون

تنش محصور، در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی این دو سنگ مطابق شکل ۱۶ با اعمال این تنش محصورکننده، در بارگذاری شبه استاتیکی به طور متوسط در مجموع دو سنگ مقدار ۱۵ درصد و در بارگذاری دینامیکی به مقدار ۶۵ درصد افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد بارگذاری دینامیکی نسبت به بارگذاری شبه استاتیکی به تنش محصورکننده حساس‌تر است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته رفتار دینامیکی سنگ، برای طراحی مغارهای زیرزمینی کمتر مورد واکاوی قرار گرفته است که این خود منجر به طراحی‌های محافظه‌کارانه، غیراقتصادی و در بعضی موارد غیر ایمن می‌شود. طی سال‌های اخیر استفاده از دستگاه میله فشاری هاپکینسون برای آزمایش دینامیکی مواد گسترش یافته است، از این رو ضرورت استفاده از این دستگاه برای تعیین خواص مکانیکی سنگ در بارگذاری دینامیکی اثبات می‌شود که با تعیین پارامترهای موثر در رفتار شکست ماده سنگ بتوان به شناخت جامعی از رفتار شکست دینامیکی توده سنگ در اطراف مغارهای امن عمیق دست یافت.

در این پژوهش به موارد اساسی برای مطالعه جامع رفتار دینامیکی سنگ در طراحی مغارهای امن اشاره شد، بدیهی است در سنگ‌های مقاوم سرعت انتقال موج فشاری بیشتر از سنگ‌های ضعیف است، اما عامل مقاومت تاثیر

در تنش‌های محصورکننده بالا رفتار سنگ از حالت شکنندگی به شکل‌پذیری تغییر می‌یابد، در بیشتر آزمایش سه محوره از مقدار ۵۰ مگاپاسکال به بعد این رخ می‌دهد از آنجا که در این آزمایش‌ها میزان تنش محصورکننده در سطح پایینی قرار داشت، بنابراین تغییر رفتار در نتایج آزمایش‌ها در هر دو بارگذاری مشاهده نمی‌شود، اما در مطالعات هوکا و همکاران روی گرانیب با اعمال فشار محصورکننده بالاتر از مقدار ۵۰ مگاپاسکال تغییر رفتار در سنگ تجربه شده است. با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مرمیت‌های نوع باغات که دانه درشت‌تر بوده، در فشار محصورکننده در بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به مرمیت‌های مارون از خود نشان می‌دهند و نیز نسبت افزایش مقاومت فشاری با اعمال فشار محصورکننده حداکثر نسبت به حالت بدون تنش محصورکننده در بارگذاری دینامیکی و بارگذاری شبه استاتیکی در نمودار شکل ۱۵ آمده است. با مقایسه نتایج با سایر نتایج مطالعات مشابه هوکا و همکاران مشخص شد که در شرایط فشار محصورکننده با اعمال نرخ کرنش با تغییر بارگذاری از شبه استاتیکی به دینامیکی، نسبت افزایش در مقاومت فشاری سنگ با رشد بیشتری افزایش می‌یابد [۱۲، ۱۱].

مطابق نتایج برای یک مغار زیرزمینی مدفون در عمق ۸۵ متری زمین در این سنگی با وزن مخصوص ۲٫۷ و ضریب پواسون ۰٫۲۵، مقدار تنش محصورکننده برابر ۰٫۷۵ مگاپاسکال خواهد شد. نسبت افزایش مقاومت فشاری در قیاس با حالت بدون

- [3] Amiri, M., Bakhshandeh Amnieh, H., Hasanipanah, M., and Mohammad Khanli, L. (2016). "A New Combination of Artificial Neural Network and K-nearest Neighbors Models to Predict Blast-Induced Ground Vibration and Air-Overpressure". *Engineering with Computers*, 32: 631-644.
- [4] Chen, S., and Zhao, J. (1998). "A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35: 93-99.
- [5] Nateghi, R. (2011). "Prediction of Ground Vibration Level Induced by Blasting at Different Rock Units". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Scienc*, 48: 899-908.
- [6] Khandelwal, M., and Singh, TN. (2009). "Prediction of Blast-Induced Ground Vibration Using Artificial Neural Network". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 289: 22-46.
- [7] Zhang, Q. B., and Zhao, J. (2014). "Quasi-static and Dynamic Fracture Behavior of Rock Materials: Phenomena and Mechanisms". *International Journal of Fracture*, 189: 1-32.
- [8] Zhou, Y., and Zhao, J. (2011). "Advances in rock dynamics and applications: CRC Press". P.O. Box 447, 2300 AK Leiden, The Netherlands.
- [9] Antoun, T., Glenn, L., Walton, O., Goldstein, P., Lomov, I., and Liu, B. (2006). "Simulation of hypervelocity penetration in limestone". *International Journal of Impact Engineering*, 33: 45-52.
- [10] 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: 879-87.
- [11] Frew, D., Forrestal, M. J., and Chen, W. (2001). "A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials". *Experimental Mechanics*, 41: 40-46.
- [12] Hokka, M., Black, J., Tkalich, D., Fourmeau, M., Kane, A., and Hoang, N-H. et al. (2016). "Effects of strain rate and confining pressure on the compressive behavior of Kuru granite". *International Journal of Impact Engineering*, 91: 183-193.
- [13] Standards RM. 2007-2014. ISRM Suggested Methods, Basic Rock Sample Preparation.
- [14] Naghdabadi, R., Ashrafi, M., and Arghavani, J. (2012). "Experimental and Numerical Investigation of Pulse-Shaped Split Hopkinson Pressure Bar Test". *Materials*

بیشتری در مقاومت نهایی مغارهای زیرزمینی دارد که در سایر پژوهش‌ها نیز مورد تایید قرار گرفته است. بنابراین در بخش تعیین مشخصات دینامیکی سنگ با اعمال نرخ کرنش در مطالعات جامع رفتار دینامیکی سنگ، پارامتر ضریب افزایش مقاومت نهایی سنگ به عنوان یک فاکتور طراحی پیشنهاد شد و در ادامه فاکتور افزایش مقاومت با اعمال تاثیر نرخ کرنش و تنش محصورکننده در دو نمونه سنگ با ابعاد دانه‌بندی متفاوت با یکدیگر مقایسه و نتایج زیر حاصل شد:

- ضریب افزایش مقاومت سنگ با تغییر بارگذاری از استاتیکی به دینامیکی بسته به خواص سنگ‌ها متغیر است تا جایی که در دو مرمیت درشت‌دانه و ریزدانه متشکل از یک نوع کریستال (کلسیت) این ضریب از ۱٫۹۳ تا ۲٫۲۵ تغییر کرد.

- ضریب افزایش مقاومت سنگ با افزایش نرخ کرنش بسته به پارامترهای ذاتی به طور گسترده تغییر می‌کند، با دو برابر شدن مقدار نرخ کرنش در نمونه‌های مرمیت باغات مقدار افزایش در میزان مقاومت فشاری دینامیکی سنگ مقدار ۱٫۵۲ برابر شده است، اما در نمونه‌های مرمیت مارون با سه برابر شدن مقدار نرخ کرنش مقدار افزایش در میزان مقاومت فشاری دینامیکی سنگ مقدار ۱٫۴۵ برابر شده است که تاکید بر این موضوع دارد که نمونه‌های درشت دانه مرمیت باغات به نرخ کرنش وابسته‌تر است.

- ضریب افزایش مقاومت سنگ تحت تنش محصورکننده روی مرمیت‌های مورد مطالعه تا عمق ۸۵ متری زمین در بارگذاری شبه استاتیکی مقدار ۱٫۱۵ و در بارگذاری دینامیکی ۱٫۶۵ حاصل شد که تاکید بر این موضوع دارد که بارگذاری دینامیکی نسبت به بارگذاری شبه استاتیکی به تنش محصورکننده حساس‌تر است.

## ۵- مراجع

- [1] Amrollahi, H., Baghbanan, A., and Hashemolhosseini, H. (2011). "Measuring Fracture Toughness of Crystalline Marbles Under Modes I and II and Mixed Mode I-II Loading Conditions Using CCNBD and HCCD Specimens". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48: 432-439.
- [2] Aliabadian, Z., Sharafisafa, M., Mortazavi, A., and Maarefvand, P. (2014). "Wave and Fracture Propagation in Continuum and Faulted Rock Masses: distinct element modeling". *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 5021-5035.

- <sup>۳</sup> Frew Science and Engineering: A., 539: 285-93.
- <sup>۴</sup> Hokka
- <sup>۵</sup> Hard and Deeply Buried Targets (HDBT)
- <sup>۶</sup> Impact
- <sup>۷</sup> Penetration
- <sup>۸</sup> Fracture
- <sup>۹</sup> Fragmentation
- <sup>۱۰</sup> Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)
- <sup>۱۱</sup> Dynamic increasing factor (DIF)
- [15] Ross, C. A., and Tedesco, J. (1989). "Split-Hopkinson Pressure-bar Tests on Concrete and Mortar in Tension and Compression". Materials Journal, 86: 475-481.
- 
- <sup>۱</sup> Xia
- <sup>۲</sup> Barre Granite