

بررسی آزمایشگاهی تاثیر هندسه نمونه بر ویژگی‌های الاستیک دینامیک و استاتیک سنگ آهک نکاء

سروش فولادچی^۱؛ محمد فاروق حسینی^۲، مجتبی گنجی^۳

۱- دانشگاه تهران - پردیس دانشکده فنی - دانشکده مهندسی معدن - Sfooladchi@gmail.com

۲- دانشگاه تهران - پردیس دانشکده فنی - دانشکده مهندسی معدن - mfarogh@ut.ac.ir

۳- شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک - Mganji@yahoo.com

(دریافت ۲۳ فروردین ۱۳۸۵، پذیرش ۲۵ آذر ۱۳۸۵)

چکیده

امروزه یکی از روش‌های برآورد سریع و ارزان قیمت ثابت‌های الاستیک در مهندسی سنگ استفاده از روش‌های دینامیکی است. لذا باید تمام پارامترهای موثر در نتایج آزمایش‌های آنها را بررسی نمود تا با ایجاد شرایط مناسب بتوان از صحت و دقت نتایج اطمینان حاصل کرد. یکی از پارامترهای موثر در نتایج این آزمایش‌ها شکل یا نسبت طول به قطر (L/D) نمونه‌های مورد آزمایش است. استانداردهای موجود ($ASTM$ و $ISRM$) در مورد آزمایش‌های دینامیک و استاتیک چنان القا می‌کنند که برخلاف تاثیر بسیار زیاد نسبت (L/D) بر نتایج آزمایش استاتیک، این پارامتر تاثیر چندانی در آزمایش دینامیک نخواهد داشت. در این تحقیق با هدف تعیین تاثیر واقعی این نسبت بر نتایج آزمایش‌های استاتیک و دینامیک، بر روی سنگ آهک نکاء در نسبت‌های طول به قطر $1/5$ ، $2/5$ ، $3/5$ و $4/5$ در هر نسبت ۵ آزمایش دینامیک و ۳ آزمایش استاتیک (در مجموع به تعداد ۴۸ آزمایش) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر نسبت (L/D) از $1/5$ تا $3/5$ تاثیر غیر قابل انکاری بر پارامترهای تغییر شکل پذیری (مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون) در هر دو دسته آزمایش مورد اشاره دارد. مقایسه نتایج حاصل، حاکی از تاثیر پذیری بیشتر آزمایش استاتیک نسبت به دینامیک از شکل نمونه است. همچنین با افزایش نسبت (L/D) تا نزدیک ۳ پارامترهای الاستیک دینامیک به سمت مقدار ثابتی می‌رود اما روند نتایج استاتیک همچنان صعودی می‌باشد. به هر حال با توجه به نتایج حاصل می‌توان پیشنهاد نمود که باید در مورد تاثیر شکل نمونه بر نتایج آزمایش‌های دینامیک حتماً تدابیری اندیشیده شود. در مورد آزمایش‌های استاتیک نیز اکتفا به نسبت طول به قطر ارایه شده در استانداردها کافی به نظر نمی‌رسد.

کلمات کلیدی

مدول الاستیسیته استاتیک؛ مدول الاستیسیته دینامیک؛ مدول برشی استاتیک؛ مدول برشی دینامیک؛ ضریب پواسون استاتیک؛ ضریب پواسون دینامیک؛ آزمایش‌های الاستیک؛ آزمایش‌های دینامیک

۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های سنگی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بستر، جزء لاینفک پارامترهای طراحی است. این بدان معناست که برای طراحی روش‌ها و تجهیزات حفاری و نگهداری سازه‌های سنگی باید رفتار الاستیک سنگ منطقه را شناسایی کرد [۱]. مهمترین خواص الاستیک سنگ عبارتند از: مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون که به کمک آزمایش‌های مختلف تعیین می‌شوند. با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد و همچنین مشکلات آزمایش‌های صحرایی، از آزمون‌های آزمایشگاهی به تعداد بیشتر و در مقیاس گسترده تری استفاده می‌شود. تعیین خواص الاستیک سنگ نیز در آزمایشگاه به دو روش استاتیک و دینامیک امکان‌پذیر است.

در روش استاتیک که در حقیقت روش مرسوم و متعارف تعیین این خواص می‌باشد، به کمک بارگذاری تک محوره بر روی نمونه سنگ و اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها (کرنش‌ها) در جهات موازی و عمود بر محور بارگذاری می‌توان خواص الاستیک سنگ را تعیین کرد. روش استاتیک به علت استفاده از حس گر تغییر شکل مانند سنجنده (Gauge) های مکانیکی، سنسورهای LVDT و کرنش سنج‌ها و همچنین شرایط آماده سازی نمونه‌ها، هزینه‌های بالایی را طلب می‌کند، از طرفی در این آزمایش نمونه‌ها به علت بارگذاری و شکست با انجام یک آزمایش از بین می‌روند. این عامل سبب می‌شود که آزمایش‌های استاتیک علاوه بر هزینه بالا در زمره آزمایش‌های مخرب نیز قرار گیرند.

در روش دینامیک با اندازه‌گیری سرعت گذر امواج فراصوتی فشاری و برشی و وزن مخصوص سنگ مورد نظر، خواص الاستیک سنگ تعیین می‌شود. این روش به علت ماهیت آن از یک سو و امکان انجام چندین آزمایش بر روی یک نمونه از سوی دیگر، جزء آزمایش‌های نسبتاً ارزان قیمت و غیر مخرب قرار می‌گیرد. امروزه نیز در جهت صرفه جویی در هزینه‌ها استفاده از آزمایش‌های غیر مخرب ترجیح داده می‌شود.

برای انجام آزمایش‌های تعیین خواص الاستیک استاتیکی سنگ از جمله موارد مهم در مورد مشخصات نمونه مورد آزمایش، شکل و نسبت طول به قطر نمونه است به نحوی که در استاندارد ASTM D 3148 نسبت طول به قطر پیشنهادی نمونه ۲ تا ۲/۵ و در روش ISRM این نسبت ۲/۵ تا ۳ توصیه شده است.

نکته جالب توجه، مشخصات آرایه شده برای نمونه‌ها در آزمایش گذر امواج فراصوتی است به نحوی که استاندارد ASTM در دو نکته به آن بسنده کرده و پیشنهاد می‌کند مسیر گذر موج از پنج برابر بعد جانبی نمونه تجاوز نکرده و همچنین از ۵ برابر میانگین ابعاد دانه‌های سنگ کمتر نباشد [۲] و در روش

پیشنهادی ISRM نیز تنها به ذکر این نکته که مسیر گذر موج از ده برابر میانگین ابعاد دانه‌های سنگ کمتر نباشد اکتفا شده است [۳]. شرایط عنوان شده برای نسبت (L/D) نمونه‌ها چنان القا می‌کند که فقط آزمایش‌های استاتیکی متأثر از این پارامتر می‌باشند و نتایج آزمایش‌های دینامیکی ارتباط چندانی با آن ندارند. در حالی که آزمایش‌هایی که گزارش آنها در این مقاله آورده شده است نشان می‌دهد که نسبت (L/D) پارامتر موثری در تعیین نتایج آزمایش‌های دینامیکی نیز می‌باشد. با توجه به دلایل فوق و عدم وجود منبعی مناسب جهت یکسان سازی شرایط نمونه‌های مورد آزمایش، در این تحقیق سعی شد تا ابتدا تاثیر نسبت طول به قطر بر نتایج آزمایش‌های استاتیک و دینامیک بررسی شده و در نهایت نتایج این دو سری آزمایش در نسبت طول به قطرهای مختلف مقایسه شوند. لازم به ذکر است که این تحقیق می‌توانست در بازه نسبت طول به قطر ۲ تا ۳ (استاندارد موجود در مورد آزمایش‌های استاتیک) انجام شود لکن بررسی تطبیق بازه تغییرات نسبت طول به قطر در آزمایش‌های دینامیک و استاتیک از یک سو و بررسی مناسب بودن بازه ۲ تا ۳ در آزمایش‌های استاتیک باعث شد که این تحقیق در بازه وسیع تری از نسبت طول به قطر (۰/۵ تا ۳) انجام گیرد.

۲- مراحل انجام آزمایش

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

از آنجایی که آزمایش‌های دینامیک در سنگ‌های پردرز و ترک و ناهمگن نتایج قابل قبولی بدست نمی‌دهد از این رو نمونه‌ها از سنگ آهک نکا به علت همگن و همسانگرد بودن بالا و همچنین عدم وجود درزه و ترک در آن، انتخاب شدند [۴]. در جدول ۱ خواص فیزیکی این سنگ نشان داده شده است.

به منظور دسترسی به داده‌های معتبر و دارای دقت کافی و آزمایش بر روی تعداد بیشتری از نمونه‌ها، ۵ سری نمونه با نسبت‌های متفاوت طول به قطر (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳) تهیه شد. ابتدا به کمک دستگاه مغزه گیری Progress ساخت کشور انگلستان از نمونه‌ها مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر تهیه گردید و سپس توسط دستگاه Felker (ساخت آمریکا) سر و ته نمونه‌ها به ترتیب به طول‌های ۲۷، ۵۴، ۸۱، ۹۸، ۱۳۵ و ۱۶۲ میلی‌متر بریده شد. به منظور ایجاد شرایط ذکر شده در استانداردهای موجود در مورد نحوه آماده سازی نمونه‌های مورد آزمایش، سر و ته نمونه‌ها توسط دستگاه صیقل دهنده Struers ساخت دانمارک با مخلوط آب و پودر سیلیکون کاربید ۴۰۰

جدول ۱: خواص فیزیکی سنگ آهک نکا.

نوع سنگ	محل	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	وزن مخصوص اشباع (gr/cm^3)	در صد جذب آب	تخلخل (%)
سنگ آهک	نکا	۲/۸۱۳	۲/۸۱۷	۱/۰	۴/۰

ذکر شده در استاندارد ASTM D2849 به مدت ۷۲ ساعت کاملاً خشک گردیده و آماده آزمایش شدند [۲]. لازم به ذکر است که در مورد آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های استاتیک و دینامیک تمامی دستگاه‌های مورد استفاده با توجه به پیشنهاد کارخانه سازنده آنها (بروشور دستگاه‌ها) کالیبره شدند. بعنوان مثال در مورد گذر امواج فراصوتی دستگاه مذکور می‌بایست پس از هر بار تعویض و رازسان‌ها کالیبره شود که این کار در حین تحقیق صورت گرفت.



شکل ۲: تصویر دستگاه جک خود کنترل ۴۵۰ تنی ساخت شرکت MTS آمریکا

مش ساییده شد به نحوی که سطوح انتهایی علاوه بر اینکه کاملاً با یکدیگر موازی شدند، دارای ناصافی بیش از ۲۵ میکرون نبودند. همچنین سطوح جانبی نمونه‌ها نیز از لحاظ صاف بودن بررسی شد به طوری که از ۰/۵ میلی متر تجاوز نمی‌کرد [۲]. شکل ۱ تصویر یک سری از نمونه‌های تهیه شده در نسبت‌های (L/D) مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تصویر یک سری از نمونه‌های تهیه شده از سنگ آهک نکا در نسبت طول به قطرهای مختلف.

پس از انجام آزمایش‌های دینامیک بر روی همان نمونه‌های سنگی، آزمایش‌های استاتیک به شکل مقاومت فشاری تک محوره همراه با اندازه‌گیری کرنش‌های محوری و جانبی صورت گرفت. این آزمایشها توسط دستگاه جک ۴۵۰ تنی ساخت شرکت MTS آمریکا انجام شد. این دستگاه از نوع خود کنترل است و علاوه بر قابلیت تنظیم سرعت جابجایی یا تنش در حین بارگذاری، کرنش‌های طولی و قطری را به کمک سنسورهای LVDT با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌کند. شکل ۲ تصویر این دستگاه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است کرنش قطری (محیطی) به کمک کمربندی که دور نمونه بسته می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود.

از آنجایی که هدف نهایی در این تحقیق بررسی تاثیر نسبت (L/D) بر خواص الاستیک سنگ بود از این رو برای از بین بردن تاثیر دیگر پارامترها همچون درصد رطوبت نمونه مورد آزمایش که عامل بسیار تاثیرگذاری بر سرعت امواج است، تمام نمونه‌ها در گرمکن ۶۶ درجه سانتی‌گراد دقیقاً مطابق شرایط

۲-۲- آزمایش‌های دینامیک

آزمایش‌های گذر امواج فراصوتی به کمک دستگاه اولترا سونیک ساخت شرکت OYO ژاپن بدین ترتیب انجام گرفت که در ابتدا هر نمونه بین دو و رازسان دستگاه قرار داده شد. سپس سرعت موج فشاری یا طولی (V_p) و سرعت موج برشی یا عرضی (V_s) اندازه‌گیری شد. با وارد نمودن مقدار وزن مخصوص نمونه مورد

۲-۳- آزمایش‌های استاتیک

آزمایش استاتیک بدین ترتیب انجام شد که نمونه‌ها بین دو فک دستگاه جک خود کنترل MTS تحت بارگذاری تک محوره قرار گرفتند. بعد از شکست نمونه با ترسیم نمودارهای تنش - کرنش محوری و تنش - کرنش قطری، مقادیر ثابت‌های الاستیک استاتیکی محاسبه شد. تمام پارامترهای خواص الاستیک استاتیکی موجود، بر اساس ۵۰ درصد حداکثر میزان باربری سنگ و از نوع تانژانتی (مماسی و بر اساس شیب منحنی تنش-کرنش در نقطه ۵۰ درصد مقاومت نهایی) محاسبه شده اند. شکل ۴ نمونه ای از نحوه محاسبه مدول الاستیسیته و ضریب پوآسون از شیب خط مماس بر نمودارهای تنش کرنش (طولی و عرضی) را نشان می‌دهد. داده‌های موجود در جدول ۲ میانگین نتایج پارامترهای دینامیکی و استاتیکی حاصل از این ۵ سری را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تصویر دستگاه اولتراسونیک و ویرا سان‌های فرستنده و گیرنده موج

آزمایش به عنوان یکی از داده‌های اولیه، نرم افزار موجود در دستگاه با استفاده از این اطلاعات خواص الاستیک دینامیک را مطابق روابط ۱، ۲ و ۳ محاسبه می‌کند. آزمایش بر روی هر ۵ سری نمونه انجام شد و میانگین نتایج حاصل برای آنها به عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد.

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (2)$$

$$\nu_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

در این روابط E_d ، G_d و ν_d به ترتیب نمایانگر مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پوآسون دینامیکی بوده و ρ و V_s ، V_p نیز به ترتیب مقادیر سرعت موج طولی، سرعت موج عرضی و وزن مخصوص نمونه را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است این روابط به کمک قانون دوم نیوتن بر اساس حرکت ذرات سنگ در محدوده الاستیک بدست آمده و در استانداردها موجود هستند [۵]. همچنین این روابط در زمانی معتبر و قابل استناد است که از یک سو نمونه‌ها یکنواخت و همسانگرد باشند و از سوی دیگر نمونه‌ها دارای تخلخل پایین بوده و شکستگی و ترک در نمونه‌ها نیز بسیار جزیی باشد. با توجه به تمامی شرایط ذکر شده جهت اعتبار نتایج داده‌های آزمایش‌های دینامیک، سنگ آهک نکا به علت تخلخل بسیار پایین (کمتر از یک درصد)، همگن و همسان بودن و همچنین عدم وجود درزه و ترک در آن بعنوان نمونه مناسب جهت تحقیق انتخاب شد. شکل ۳ تصویر این دستگاه و ویرا سان‌های فرستنده و گیرنده موج را نشان می‌دهد.

جدول ۲: میانگین نتایج حاصل از آزمایش‌های دینامیک و استاتیک انجام شده بر روی پنج سری نمونه.

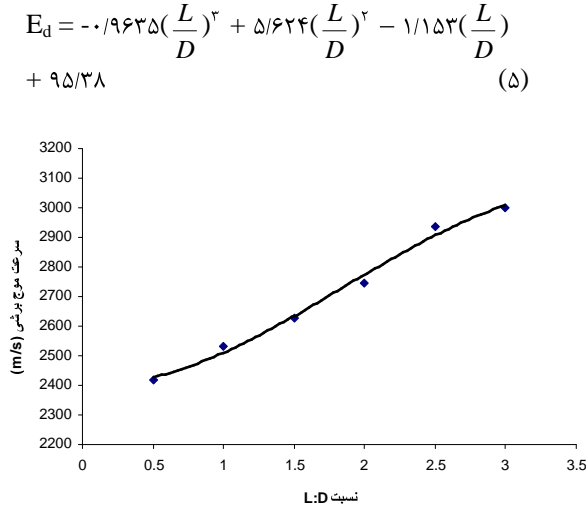
نسبت طول به قطر (L: D)	سرعت موج فشاری Vp(m/s)	سرعت موج برشی Vs(m/s)	ضریب پوآسون دینامیکی ν_d	مدول الاستیسیته دینامیکی Ed (Gpa)	مدول برشی دینامیکی Gd (Gpa)	ضریب پوآسون استاتیکی ν_s	مدول الاستیسیته استاتیکی Es(Gpa)	مدول برشی استاتیکی Gs(Gpa)
۰/۵	۵۶۸۶	۲۴۲۰	۰/۳۹	۴۵/۷۸	۱۶/۴۷	۰/۱۵۶	۱۲/۱	۵/۲
۱	۵۷۴۷	۲۵۳۱	۰/۳۸	۴۹/۷۲	۱۸/۰۲	۰/۲	۱۷/۴	۷/۳
۱/۵	۵۶۳۰	۲۶۲۷	۰/۳۶	۵۲/۸۴	۱۹/۴۱	۰/۲۳	۲۰	۸/۱
۲	۵۵۱۰	۲۷۴۶	۰/۳۳	۵۶/۶۳	۲۱/۲۱	۰/۲۴	۲۳/۵	۹/۵
۲/۵	۵۶۷۲	۲۹۳۸	۰/۳۲	۶۳/۹۴	۲۴/۲۸	۰/۲۷	۲۵/۸	۱۰/۲
۳	۵۶۸۵	۲۹۹۸	۰/۳۱	۶۶/۱۱	۲۵/۲۸	۰/۲۹	۳۱	۱۲

۳- نتایج آزمایش‌ها

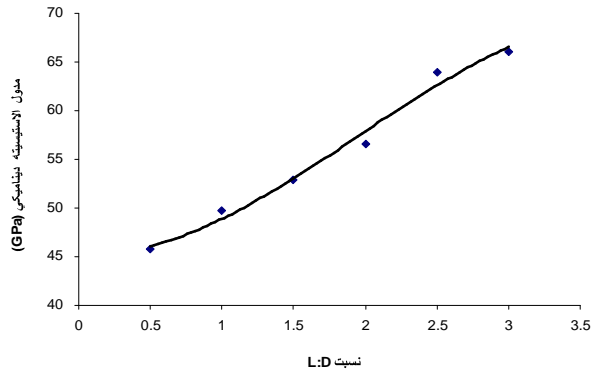
۳-۱- آزمایش‌های دینامیک

۳-۱-۱- سرعت موج برشی (V_s)

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ آهک نکا نشان داد که سرعت موج برشی در ارتباط بسیار خوب و نزدیکی با نسبت (L/D) قرار دارد به نحوی که با افزایش نسبت طول به قطر سرعت موج برشی نیز افزایش می‌یابد. نمودار شکل ۵ ارتباط نسبت (L/D) و سرعت موج برشی را نشان می‌دهد. بهترین منحنی گذرنده از نقاط بدست آمده از نتایج آزمایش‌ها تابعی درجه ۳ است.



شکل ۵: ارتباط سرعت موج برشی و نسبت طول به قطر نمونه.

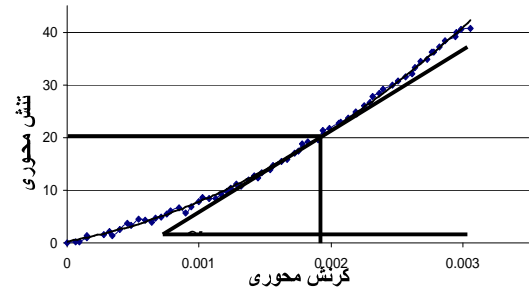


شکل ۶: ارتباط مدول الاستیسیته دینامیکی و نسبت طول به قطر نمونه.

۳-۱-۳- مدول برشی دینامیکی (G_d)

مدول برشی نیز همانطور که از شکل ۷ مشخص است، در ارتباط بسیار خوب و نزدیکی با نسبت (L/D) قرار دارد. بهترین ارتباط ممکن بین این دو پارامتر از نوع درجه ۳ با ضریب همبستگی ۰/۹۹ بوده که به صورت زیر می‌باشد:

$$G_d = -0.15169 \left(\frac{L}{D}\right)^3 + 2.1999 \left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1/4 \left(\frac{L}{D}\right) + 16/611 \quad (6)$$



شکل ۴ نمونه ای از نحوه محاسبه مدول الاستیسیته و ضریب پواسون از شیب خط مماس بر نمودارهای تنش کرنش

در این نمودار ضریب همبستگی (R^2) برابر ۰/۹۹۱ و رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

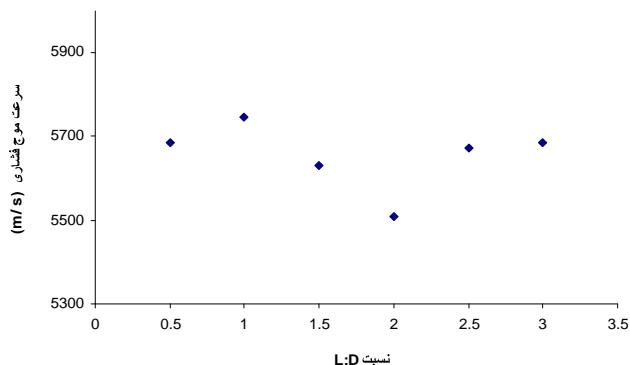
$$V_s = -32/222 \left(\frac{L}{D}\right)^2 + 178/38 \left(\frac{L}{D}\right) - 45/897 \left(\frac{L}{D}\right) + 2410 \quad (4)$$

۳-۱-۲- مدول الاستیسیته دینامیکی (E_d)

نتایج آزمایش گذر امواج فراصوتی از نمونه‌ها حاکی از وجود ارتباط قوی بین مدول الاستیسیته و نسبت (L/D) است. بهترین خط گذرنده از این داده‌ها نیز یک تابع درجه ۳ می‌باشد. نمودار شکل ۶ ارتباط مدول الاستیسیته دینامیکی و

۳-۱-۵- سرعت موج طولی (V_p)

سرعت امواج طولی بدست آمده از آزمایش‌ها در نسبت طول به قطرهای ۰/۵ تا ۳ سنگ در نمودار شکل ۹ آورده شده است. همانطور که پیداست بر خلاف دیگر پارامترهای دینامیک، هیچ رابطه معینی بین سرعت موج طولی و نسبت (L/D) مشاهده نمی‌شود.



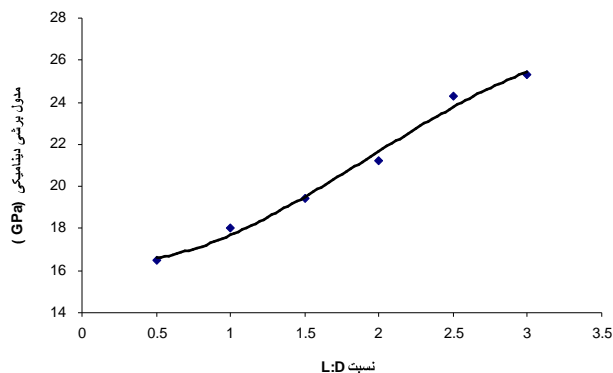
شکل ۹: ارتباط سرعت موج فشاری و نسبت طول به قطر نمونه.

۳-۲- آزمایش‌های استاتیکی (مقاومت فشاری تک محوره)

۳-۲-۱- مدول الاستیسیته استاتیکی (E_s)

انجام آزمایش تک محوره بر روی نمونه‌های سنگ آهک نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته استاتیکی تاثیر پذیری بسیار زیادی از تغییرات نسبت (L/D) دارد. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است همانند مدول الاستیسیته دینامیکی، رابطه نتایج مدول الاستیسیته استاتیکی و نسبت طول به قطر نیز از نوع درجه ۳ با ضریب همبستگی ۰/۹۹۷ می‌باشد که به وسیله رابطه ۸ توصیف می‌شود. جالب توجه است که اگر رابطه کاهش نسب طول به قطر در بارگذاری تک محوری را با افزایش فشار جانبی در آزمایش بارگذاری سه محوری متناسب [۶] بدانیم از این رو با توجه به تحقیق‌هایی که در گذشته انجام شده و ثابت گردیده که با افزایش فشار جانبی (کاهش نسبت طول به قطر)، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد، از این رو نتایج بدست آمده در این قسمت از تحقیق نیازمند بررسی بیشتر و انجام آزمایش‌های گسترده تری خواهد بود. زیرا نتیجه بدست آمده بیانگر روندی معکوس از آنچه که در بالا ذکر شد، می‌باشد.

$$E_s = 1/6 \cdot 74 \left(\frac{L}{D}\right)^3 - 1/56 \left(\frac{L}{D}\right)^2 + 20/2 \left(\frac{L}{D}\right) + 3/97 \quad (8)$$

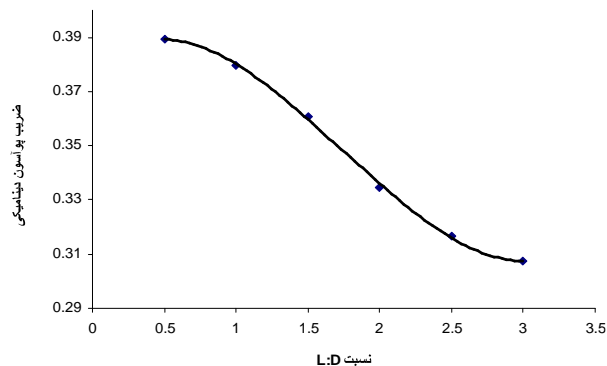


شکل ۷: ارتباط مدول برشی دینامیکی و نسبت طول به قطر نمونه.

۳-۱-۴- ضریب پواسون دینامیکی (ν_d)

نتایج حاصل در مورد سنگ آهک نکا نشان می‌دهد که بر خلاف نتایج سه مورد اول (سرعت موج برشی، مدول الاستیسیته دینامیک و مدول برشی دینامیک) روند تغییر نتایج ضریب پواسون دینامیکی با افزایش نسبت (L/D)، نزولی است. ارتباط ضریب پواسون دینامیکی با نسبت (L/D) در نمودار شکل ۸ مشخص است. همانطور که ملاحظه می‌شود وجه اشتراک این نمودار با نمودار شکل‌های ۴، ۵ و ۶، درجه ۳ بودن آنها است. رابطه این دو پارامتر با یکدیگر بسیار نزدیک می‌باشد به نحوی که بالاترین ضریب همبستگی در نمودارها متعلق به این نمودار و برابر ۰/۹۹۹۵ می‌باشد. منحنی شکل ۸ را رابطه ۷ توصیف می‌نماید.

$$\nu_d = 0.1 \left(\frac{L}{D}\right)^3 - 0.0524 \left(\frac{L}{D}\right)^2 + 0.4227 \left(\frac{L}{D}\right) + 0.3798 \quad (7)$$



شکل ۸: ارتباط ضریب پواسون دینامیکی و نسبت طول به قطر نمونه.

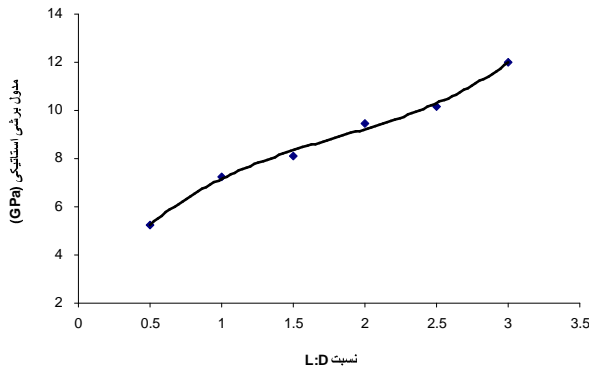
۳-۲-۲- ضریب پواسون استاتیکی (U_s)

مدول الاستیسیته و ضریب پواسون است. مدول برشی استاتیکی به کمک رابطه ۱۰ تعیین گردید:

$$G_s = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

مدول‌های برشی بدست آمده نشان از وجود ارتباطی مستقیم با نسبت (L/D) دارند. همانطور که در نمودار شکل ۱۲ مشخص است مدول برشی استاتیکی با نسبت طول به قطر با تابعی درجه ۳ در ارتباط است. رابطه ۱۱ با ضریب همبستگی ۰/۹۹۵۳ ارتباط آن را نشان می‌دهد.

$$G_s = 0.16055 \left(\frac{L}{D}\right)^3 - 3/2922 \left(\frac{L}{D}\right)^2 + 7/7081 \left(\frac{L}{D}\right) + 0.0893 \quad (11)$$

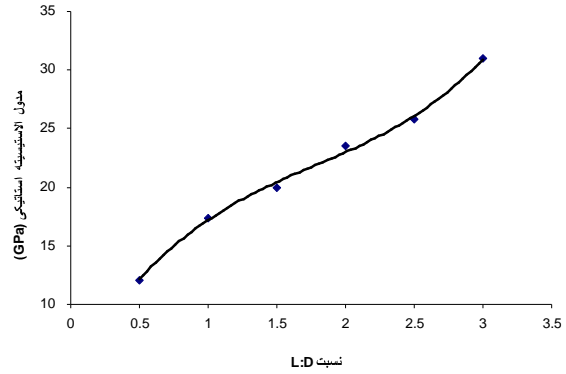


شکل ۱۲: ارتباط مدول برشی استاتیکی و نسبت طول به قطر نمونه.

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

نتایج بدست آمده از آزمایش‌های دینامیک نشان می‌دهد که سرعت موج برشی کاملاً متأثر از نسبت (L/D) می‌باشد در حالی که در مورد سرعت موج طولی ارتباط مشخصی وجود ندارد. ارایه نظر قطعی در مورد تاثیرپذیری سرعت موج طولی از نسبت طول به قطر و همچنین ذکر دلایل عدم تاثیرپذیری آن نیازمند تحقیقات گسترده‌تری در این زمینه است. نکته حایز اهمیت این است که استانداردهای تدوین شده برای آزمایش‌های دینامیک، برخلاف آنچه برای آزمایش‌های استاتیک تاکید کرده‌اند، نقشی برای نسبت (L/D) در نتایج کار قایل نمی‌باشند. این در حالی است که داده‌های حاصل از آزمایش دینامیک (نمودار شکل ۱۳) نشان می‌دهند که با تغییر نسبت (L/D) از ۰/۵ تا ۳ سرعت موج برشی ۲۴٪، مدول الاستیسیته دینامیک ۴۵٪ و مدول برشی دینامیک ۵۳٪ افزایش و ضریب پواسون دینامیک ۲۱٪ کاهش داشته‌اند که بسیار فراتر از مقادیری هستند که بتوان از آنها صرف نظر کرد.

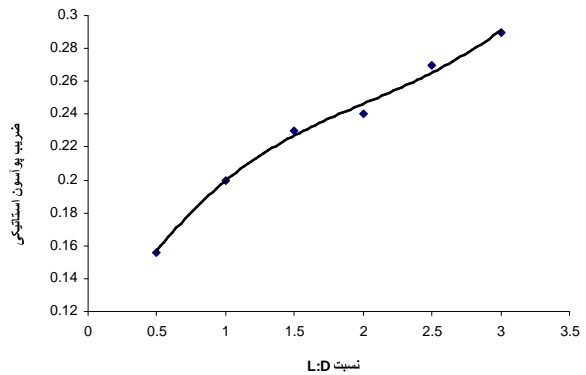
نتایج آزمایش‌های استاتیک گواه بر این مطلب است که برخلاف نتایج آزمایش‌های دینامیک، ضریب پواسون استاتیکی در ارتباط مستقیم با نسبت (L/D) قرار دارد. نمودار شکل ۱۱ نمایانگر این ارتباط است. ضریب همبستگی بدست آمده برای



شکل ۱۰: ارتباط مدول الاستیسیته استاتیکی و نسبت طول به قطر نمونه.

این تابع برابر ۰/۹۹۴ است و رابطه آن توسط معادله ۹ نشان داده شده است.

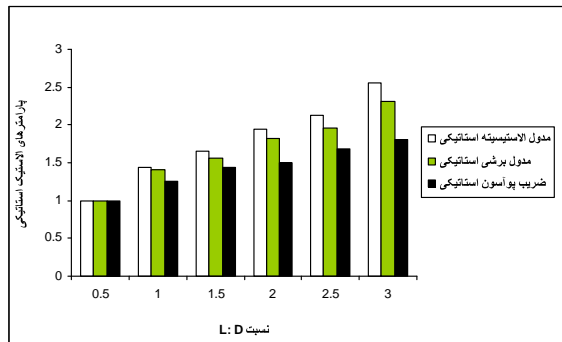
$$U_s = 0.101 \left(\frac{L}{D}\right)^3 - 0.063 \left(\frac{L}{D}\right)^2 + 0.163 \left(\frac{L}{D}\right) + 0.0893 \quad (9)$$



شکل ۱۱: ارتباط ضریب پواسون استاتیکی و نسبت طول به قطر نمونه.

۳-۲-۳- مدول برشی استاتیکی (G_s)

با توجه به محاسبه مستقیم مقدار مدول برشی دینامیک از نتایج سرعت گذر موج‌های فشاری و برشی مطابق رابطه ۲، برای مقایسه نتایج آنها با نتایج آزمایش‌های استاتیک و نظر به اینکه مطابق قوانین هوک، مدول برشی دارای ارتباطی با مقادیر



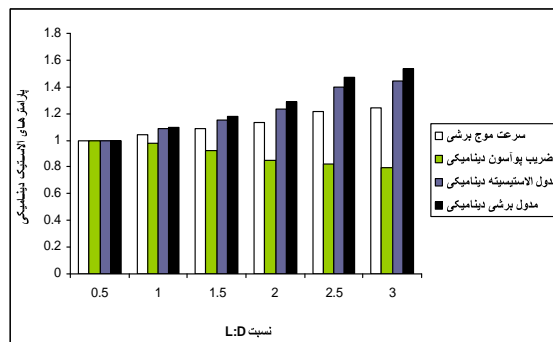
شکل ۱۴: درصد تغییرات پارامترهای الاستیک استاتیکی با تغییر شکل نمونه.

در مورد مدول برشی نیز نتایج دینامیک و استاتیکی با افزایش نسبت طول به قطر دارای سیری صعودی هستند. البته با توجه به اینکه مدولهای برشی مذکور به ترتیب به کمک روابط ۲ و ۱۰ بدست آمده اند، از این رو وجود ارتباط بین مدول برشی استاتیکی و نسبت (L/D) از پیش قابل انتظار بود.

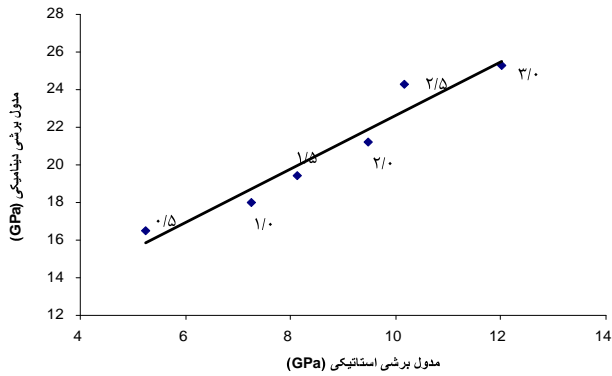
همچنین نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم توصیه اکید استانداردها به مقدار نسبت (L/D) که معمولاً بین ۲ تا ۳ است، نتایج خواص الاستیک در این بازه نیز به سمت مقدار ثابتی میل نکرده اند. مطلب حایز اهمیت در تمام نمودارهای ۴ تا ۱۱، توابع بدست آمده برای آنها است به صورتی که در همه آنها بهترین منحنی گذرنده از داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، درجه ۳ می‌باشد. می‌توان درجه ۳ بودن این توابع را با توجه به روند، شکل و وجود نقطه عطف در آنها بررسی نمود. همانطور که در نمودارها پیداست تغییرات پارامترها ابتدا در نسبت‌های (L/D) پایین تقریباً جزئی بوده و در محدوده بین ۱ تا ۲/۵ حداکثر تغییرات را شاهد هستیم. همچنین با رسیدن مقدار (L/D) به ۳ به نظر می‌رسد مقادیر کم کم به سمت مقدار ثابتی در حال میل کردن هستند (اختلاف داده‌ها در نسبت طول به قطر مختلف گواه این مطلب است). البته این روند تنها در نتایج دینامیک بوضوح مشخص است و نتایج آزمایش‌های استاتیکی دال بر این موضوع است که نتایج استاتیکی در نسبت (L/D) برابر ۳ نیز هنوز به سمت مقدار ثابتی میل نکرده‌اند و این ثابت شدن ممکن است در نسبت طول به قطرهای بزرگتر اتفاق بیفتد (اختلاف میان داده‌های بدست آمده حاکی از کوچک شدن این اختلاف‌ها نیست). این نتیجه حاصل شده با آنچه در استانداردها وجود دارد مطابقت ندارد از این رو به نظر می‌رسد تحقیقات گسترده‌تر راه حل مناسبی جهت نیل به نتایج واقعی‌تر باشد. البته می‌توان بجای توابع درجه ۳ تمامی روابط را

آزمایش‌های استاتیکی نیز به نوبه خود حاوی مطالب قابل توجهی هستند. همچنان که در نمودار شکل ۱۴ نشان داده شده است با تغییر نسبت (L/D) از ۰/۵ تا ۳ مقدار ضریب پواسون استاتیکی ۰/۸۱، مدول الاستیسیته استاتیکی ۱۵۶٪ و مدول برشی استاتیکی ۱۳۰٪ افزایش یافته اند که در مقایسه با نتایج آزمایش‌های دینامیک تاثیر پذیری بیشتری را از شکل نمونه نشان می‌دهند.

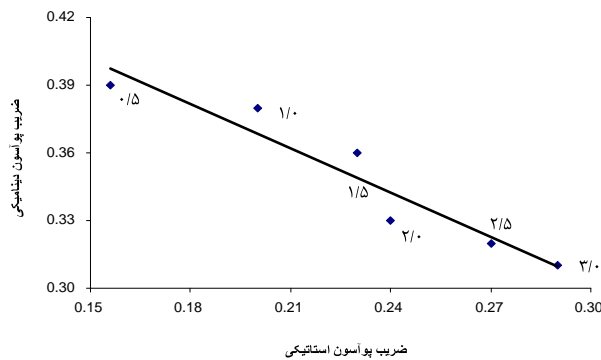
مدول الاستیسیته استاتیکی نیز مانند مقادیر دینامیک آن با افزایش نسبت (L/D) روندی صعودی دارد ولی روند تغییرات ضریب پواسون استاتیکی بر خلاف نتایج دینامیک در مقابل نسبت طول به قطر، صعودی و مستقیم است. می‌توان علت افزوده شدن مقدار ضریب پواسون استاتیکی را با افزایش نسبت (L/D) متاثر از تاثیر سطوح انتهایی نمونه‌ها در حین آزمایش تک محوره دانست. همانطور که می‌دانیم با افزایش نسبت (L/D) نمونه مورد آزمایش از تاثیر سطوح انتهایی کاسته می‌شود. این بدان معناست که در نسبت‌های (L/D) پایین، تاثیر سطوح انتهایی مانع از ایجاد تغییر شکل‌های واقعی در جهت عمود بر محور بارگذاری شده و در نتیجه سبب می‌شود مقدار ضریب پواسون کمتر از مقدار واقعی آن گردد. با افزایش نسبت طول به قطر و کاسته شدن اثر این سطوح مقدار ضریب پواسون افزایش یافته و به مقدار واقعی نزدیک تر می‌شود. در مورد سنگ آهک نکا صرف نظر از روند صعودی یا نزولی تغییرات ضرایب پواسون دینامیکی و استاتیکی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت (L/D) مقادیر ضرایب پواسون استاتیکی و دینامیکی به یکدیگر و همچنین به مقدار ضریب پواسون قابل انتظار این سنگ نزدیک می‌شوند.



شکل ۱۳: درصد تغییرات پارامترهای الاستیک دینامیکی با تغییر شکل نمونه.



شکل ۱۶: ارتباط مدول برشی دینامیکی و استاتیکی در نسبت طول به قطرهای مختلف.



شکل ۱۷: ارتباط ضریب پواسون دینامیکی و استاتیکی در نسبت طول به قطرهای مختلف.

۵- نتیجه گیری و پیشنهاد

۱- علی‌رغم عدم تأکید خاص در استاندارد آزمایش‌های مکانیک سنگ در مورد نقش نسبت طول به قطر نمونه‌ها در آزمایش تعیین سرعت گذر امواج فراصوتی، با تغییر نسبت (L/D) مقادیر حاصل از این آزمایش تغییرات زیادی نشان می‌دهند.

۲- سرعت موج برشی در ارتباطی بسیار خوب و مستقیم با نسبت (L/D) است در حالی که سرعت موج طولی از این قاعده مستثنی است.

۳- مدول‌های الاستیسیته و برشی دینامیکی در ارتباط مستقیم و ضریب پواسون دینامیکی در ارتباط عکس با نسبت (L/D) قرار دارند.

۴- مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون استاتیکی دارای ارتباطی بسیار نزدیک و مستقیم با نسبت (L/D) هستند.

به شکل خطی (درجه یک) نیز ترسیم نمود که این کار نیز به تحقیقات و مطالعات گسترده تری در این زمینه نیاز دارد تا روند واقعی تغییرات پارامترهای الاستیک در قبال تغییرات نسبت (L/D) تعیین گردد. در سنگ آهک مورد مطالعه در این تحقیق، تغییر نوع تابع از درجه ۳ به نوع خطی با تغییرات جزئی در میزان ضرایب همبستگی همراه است. با هدف مقایسه نتایج آزمایش‌های دینامیک و استاتیک در نسبت‌های (L/D) ۰/۵ تا ۳ نمودار شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به ترتیب در مورد مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون رسم گردید. این توابع نیز همگی درجه یک می‌باشند و روند طی شده در همگی آنها حاکی از تغییرات بیشتر نتایج استاتیک، هم در محدوده (L/D) از ۰/۵ تا ۳ و هم در نسبت‌های (L/D) بالاتر از آن است.

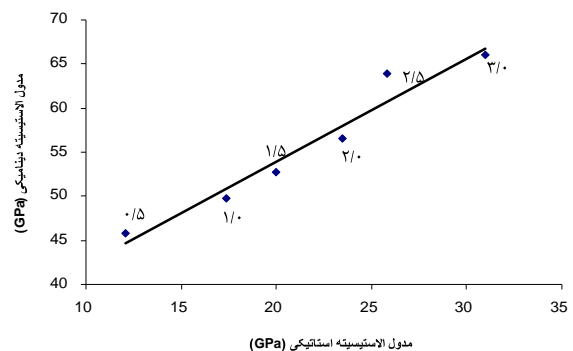
نمودار شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب دارای ضرایب همبستگی ۰/۹۴۸، ۰/۹۳۷، ۰/۹۱۵ و معادله‌های آنها به صورت روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ می‌باشند:

$$E_d = 1/1714E_s + 30/475 \quad (12)$$

$$G_d = 1/4238G_s + 8/3816 \quad (13)$$

$$\nu_d = -0/6555\nu_s + 0/4998 \quad (14)$$

علی‌رغم وجود روندهای معکوس در مورد ضرایب پواسون دینامیک و استاتیک با افزایش نسبت (L/D)، این دو پارامتر با یکدیگر رابطه نزدیکی داشته و در تقابل خوبی قرار دارند.



شکل ۱۵: ارتباط مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی در نسبت طول به قطرهای مختلف.

[5] Hudson, J.A., Harrison, J.P., "Engineering rock mechanics an introduction to the principles", pergamon, 1997, PP. 207-235.

[۶] حسینی، محمدفاروق؛ گنجی، مجتبی و فولادچی، سروش، (۱۳۸۵)، " مقایسه تاثیر نسبت ابعاد نمونه و فشار جانبی بر مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره سنگ"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۴۰، شماره پیاپی ۹۵، صفحه ۵۵-۴۷.

[۷] حسینی، محمد فاروق، "درآمدی بر مکانیک سنگ"، انتشارات نشر کتب دانشگاهی، چاپ دوم، تهران، ۱۳۷۹.

[8] Vutukuri, V.S., Lama, R.D., "Handbook on mechanical properties of rock", 1st ed, 1978, Vol 2, TrancTech Publication.

[9] Al-Shayea, N.A., "Effect of testing method and condition on the elastic properties of limestone rock", Engineering Geology, 2004, Vol.74, PP. 139-156.

[۱۰] فولادچی، سروش، "ارتباط خواص الاستیک دینامیک و استاتیک در برخی از سنگ‌های کربناته ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

[۱۱] گنجی، مجتبی، "بررسی تاثیر شکل بر مقاومت سنگ"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.

۵- رابطه ضریب پواسون با نسبت طول به قطر در آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی عکس یکدیگر هستند که (L/D) می‌تواند ناشی از سطوح انتهایی نمونه در آزمایش‌های استاتیکی باشد.

۶- ویژگی‌های الاستیک استاتیکی تاثیرپذیری بیشتری از نسبت طول به قطر نمونه‌ها نسبت به ویژگی‌های دینامیکی دارند.

۷- توابع بدست آمده برای تمام ویژگی‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی و حتی مقایسه آنها همگی از نوع درجه ۳ هستند ولی با توجه به اینکه روابط خطی نیز دارای ضرایب تصمیم‌گیری بالایی برای این پارامترها هستند، شاید بتوان با تحقیقات گسترده‌تر روند واقعی این تغییرات را بهتر مشخص نمود.

۸- توابع بدست آمده برای خواص الاستیک دینامیک حکایت از میل این مقادیر به میزان ثابت در نسبت‌های (L/D) بالای ۳ دارند لکن خواص الاستیک استاتیک در نسبت $(L/D) = 3$ نیز هنوز به مقدار ثابتی نمی‌رسد.

۹- با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق به نظر می‌رسد که در مورد تاثیر شکل نمونه‌های آزمایشی بر نتایج خواص الاستیک استاتیک و دینامیک بازنگری لازم باشد که البته این مهم انجام آزمایش‌های جامع تری را طلب می‌کند.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از همکاری‌های بی دریغ و صمیمانه آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری و آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران در خصوص انجام آزمایش‌های فوق‌الاشاره سپاس‌گزاری نمایند.

۷- منابع

[1] Starzec, P., "Dynamic elastic properties of crystalline rocks from South-West Sweden", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999, Vol.36, PP.265-272.

[2] ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", 2003, Vol 04.08 & 04.09, USA.

[3] International Society for Rock Mechanics, "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomech. Abst, 1979, Vol. 16, PP. 135-140.

[۴] یزدان پناه، شهرام؛ بری دیزجی، رضا و فرازمنده، علیرضا، "تاثیر ناهمسانگردی بر روی پارامترهای دینامیکی سنگ"، دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳، صفحه ۵۵۶ - ۵۴۵.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.