ارائه روشی جدید برای برآورد مقاومت بلوک‌های سنگی با استفاده از آزمون غیر مخرب امواج اولتراسونیک

داریوش جوادیان؛ دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکدهٔ معدن
حسن مومیوند*؛ دانشگاه ارومیه، دانشکدهٔ فنی
رسول حمیدزاده مقدم؛ دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکدهٔ معدن

تاریخ: دریافت ۹۲/٤/۱۷ **پذیرش** ۹۳/۱/۲۲

چکیده

استفاده از روش‌های غیرمخرب به‌ویژه سرعت امواج اولتراسونیک برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها به‌علت سادگی، اقتصادی، سرعت و غیرمخرب بودن مورد استقبال زیادی قرار گرفته است. بناهای سنگی به‌طور وسیع از گذشته تاکنون در سطح جهان ساخته شده‌اند. تعیین مقاومت بناهای سنگی مانند آثار باستانی از طریق آزمایش‌های مرسوم مقاومت سنگ امکان‌پذیر نیست زیرا نمی‌توان برای تهیهٔ نمونه آزمایش مقاومت فشاری آن‌ها را تخریب کرد. ارائه روشی ارزان، ساده، غیرمخرب و در عین حال دقیق و کارآمد برای برآورد مقاومت چنین بناهایی کمک بسیار بزرگی است. در این تحقیق آزمایش‌های مقاومت فشاری و اولتراسونیک روی نمونه‌های سنگی که تخریب آن‌ها هیچ مسئله‌ای ندارد، انجام شده است، تا بتوان از نتیجه تحقیق به‌منظور برآورد مقاومت فشاری بناهای سنگی با استفاده از سرعت عبور استفاده کرد. بلوک‌ها و بناهای سنگی دارای شکل و اندازه‌های متفاوتی هستند، در این تحقیق بلوک‌هایی از سنگ‌های مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک دارای اندازه و شکل‌های متفاوت آماده‌سازی شده و سرعت امواج اولتراسونیک در جهات مختلف ابعاد بلوک‌ها و هم‌چنین مقاومت فشاری یک‌محوری مغزه‌های حاصل از آن‌ها نیز اندازه‌گیری شده است. تایج نشان می‌دهد که شکل و اندازهٔ نمونه‌ها بلوک‌های یک پارچه فاقد ناپیوستگی از مقیاس کوچک

* **نویسنده مسئول** h.moomivand@urmia.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

آزمایشگاهی تا قله‌های بزرگ به ابعاد حدود ۲ متر در سرعت عبور موج اثر ندارد. در نهایت روابطی برای برآورد مقاومت فشاری یک‌محوری سنگ‌های بررسی شده با استفاده از سرعت امواج اولتراسونیک ارائه شده است. با استفاده از روابط ارائه شده می‌توان مقاومت بلوک‌ها و بناهای سنگی یک پارچه و فاقد ناپیوستگی از سنگ‌های مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک دارای هر شکل و اندازه‌ای را با آزمون غیرمخرب، ساده، انعطاف‌پذیر و ارزان سرعت امواج اولتراسونیک برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: سرعت امواج اولتراسونیک، شکل، اندازه، بلوک‌های سنگی، مقاومت فشاری یک‌محوری

مقدمه

مقاومت فشاری یک‌محوری از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ است و به‌صورت گسترده‌ای برای پژوهش‌های مکانیک سنگی در پروژه‌های عمرانی و معدنی استفاده می‌شود [۱]. تعیین این ویژگی کاری پرهزینه، زمان‌بر و دشوار است، به‌ویژه انجام این آزمایش روی بناهای سنگی آثار باستانی، به‌صورت مستقیم امکان‌پذیر نیست. ارائه روشی که بتوان با آن ویژگی‌های مکانیکی از جمله مقاومت فشاری یک‌محوری بلوک‌ها و بناهای سنگی را به‌صورت غیرمستقیم برآورد کرد که در آن صدمه‌ای به سازه مورد آزمایش وارد نشود، می‌تواند مفید باشد. استفاده از روش‌های غیرمخرب برای برآورد ویژگی‌هایی مانند درجه هوازدگی، توصیف توده سنگ، تخمین وسعت ناحیهٔ خرد شده و ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی سنگ به‌علت سادگی، اقتصادی، سرعت و غیرمخرب بودن اخیراً گسترش چشم‌گیری داشته است [۲]، [۳]، [٤]، [٥]، [٦]، [۷]. یکی از این روش‌ها سرعت امواج اولتراسونیک است.

سرعت عبور امواج به کیفیت بستگی سنگ دارد. از عوامل ذاتی مؤثر بر سرعت امواج اولتراسونیک در یک سنگ می‌توان به نوع سنگ، بافت، اندازه دانه‌ها، چگالی و تخلخل و عوامل خارجی مثل رطوبت و درجه حرارت اشاره کرد. وقتی که سرعت امواج اولتراسونیک نمونهٔ سنگ اندازه‌گیری می‌شود به‌صورت طبیعی نتیجه آزمایش حامل تأثیر عوامل ذاتی (داخلی) نمونه است. عواملی مانند ناهم‌سان‌گردی و میزان تنش (سطح تنش) نیز در سرعت امواج اولتراسونیک توده‌های سنگ برجا مؤثرند. اگر چه تحقیقات متعددی در خصوص اندازه‌گیری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

سرعت امواج اولتراسونیک و مقاومت سنگ سالم نمونه‌های کوچک مقیاس آزمایشگاهی به‌عمل آمده است اما استفاده عملی آن می‌تواند مفید باشد. یکی از کاربردهای سرعت امواج اولتراسونیک برآورد مقاومت بلوک‌ها و بناهای سنگی است. بلوک‌ها و بناهای سنگی دارای شکل و اندازه‌های متفاوتی هستند. قبل از برآورد مقاومت بلوک‌ها و بناهای سنگی لازم است با استفاده از سرعت امواج اولتراسونیک ابتدا تحقیق بنیادی در خصوص تأثیر شکل و اندازه‌های بلوک‌ها و بناهای سنگی در سرعت امواج اولتراسونیک انجام شود، تا نشان داده شود که سرعت امواج اولتراسونیک در جهت‌های مختلف ابعاد شکل یک بلوک سنگ و هم‌چنین تغیر در اندازه‌های آن چگونه است؟ پس از آن می‌توان به‌بررسی برآورد مقاومت فشاری یک محوری با استفاده از سرعت امواج اولتراسونیک پرداخت. در این تحقیق بلوک‌هایی از سنگ‌های مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک دارای اندازه و شکل‌های متفاوت آماده‌سازی شده و سرعت امواج اولتراسونیک در جهات مختلف ابعاد بلوک‌ها و هم‌چنین مقاومت فشاری یک محوری مغزه‌های حاصل از آن‌ها نیز اندازه‌گیری شده است تا بتوان مقاومت بلوک‌ها و بناهای سنگی را با استفاده سرعت امواج اولتراسونیک برآورد کرد..

آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک نمونه‌ها

سنگ‌های بررسی شده شامل مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک مطابق جدول ۱ تهیه شد [۸]. نمونه‌های بلوکی بزرگ مقیاس ۲۵۰×۲۰۰×۱۵۰ سانتی‌متر در کارگاه سنگ‌بری از قله‌های بزرگ انتخاب و آماده‌سازی شدند. بلوک‌های کوچک دارای ابعاد ٤٠×٢٠×١٠ سانتی‌متر با اره سنگ بری از سنگ‌های ذکر شده آماده‌سازی شدند (شکل ۱). نمونه‌های استوانه‌ای نیز بر اساس استاندارد [۹]، [۱۰] از بلوک‌های مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک آماده‌سازی شدند. نمونه‌های بررسی شده و آماده‌سازی شده در ابعاد مختلف مطابق جدول ۲ هستند. دستگاه تعیین سرعت امواج اولتراسونیک و نحوهٔ انجام آزمایش نمونهٔ سنگ در شکل ۲ نشان داده شده است.

بلوک‌های بزرگ مقیاس از سنگ‌های مرمریت و تراورتن انتخاب شدند. وجوه مقابل هم‌دیگر بلوک‌های بزرگ که روی صفحات آن‌ها سرعت موج فشاری (V_p) اندازه‌گیری شده، موازی و صاف تهیه شدند. روی بلوک‌های بزرگ مقیاس سنگ‌های مرمریت و تراورتن نقاطی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

که باید سطح ورارسان‌ها (ترانس دیوسرها یا پروپ‌ها) روی آن‌ها قرار بگیرد، مشخص شدند و سرعت موج فشاری در جهات مختلف ابعاد بلوک‌های بزرگ اندازه‌گیری شد (شکل ۳ و ٤). نتایج آزمایش تعیین سرعت عبور موج اولتراسونیک روی بلوک بزرگ مقیاس مرمریت و تراورتن به روش مستقیم به‌ترتیب در جدول ۳ و ٤ نشان داده شده است.

آزمایش اولتراسونیک روی بلوک‌های کوچک مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک در سه جهت مختلف ابعاد بلوک‌ها انجام و محاسبه شد. نقاطی از صفحات نمونه که باید سطح پروپ روی آن‌ها قرار می‌گرفت مشخص شدند (شکل۵). باید نقاط روی لبه‌های موازی دقیقاً روبروی هم قرار گیرند تا به‌روش مستقیم و به‌صورت ساده سرعت موج اندازه‌گیری شود. چون اگر نقاط روبروی هم نباشند روش محاسبهٔ سرعت صوت به‌روش غیرمستقیم خواهد بود. مکان دقیق این نقاط و فاصلهٔ بین آن‌ها به‌کمک متر نواری مشخص شدند. نقاط مشخص شده روی شش وجه بلوک مطابق شکل ۵ است. آزمایش اولتراسونیک روی هر سه وجه عمود برهم در سه جهت مختلف انجام شد و از مقادیر اندازه‌گیری شده در یک جهت روی هر وجه (صفحه) میانگین گرفته شد و مقدار این میانگین به‌عنوان سرعت صوت در آن جهت تلقی گردید. نتایج سرعت عبور امواج در بلوک‌های کوچک سنگ‌های گرانیت، تراورتن، مرمریت و آهک در جهات مختلف ضخامت(A)، عرض(B) و طول(C) در جدول ۵ نشان داده شده است.

مغزه‌های استوانه‌ای با دستگاه مغزه‌گیر و مغزه بر در آزمایشگاه مکانیک سنگ بر اساس استاندارد [۹]، [۱۰] آماده‌سازی شدند. مغزه‌های استوانه‌ای تهیه شده برای انجام آزمایش‌های سرعت عبور موج در شکل ٦ نشان داده شده‌اند. سرعت امواج فشاری نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ٥٤ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۲ تا ۲/۵ بر اساس استاندارد اندازه‌گیری شد [۹]. مقادیر متوسط سرعت عبور امواج در نمونه‌های سنگ مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک در حالت‌های اشباع، مرطوب و خشک در جدول ٦ نشان داده شده است. با افزایش درصد رطوبت، از حالت خشک به اشباع، سرعت صوت نیز افزایش پیدا می‌کند. و به این دلیل است که در روزنه‌هایی که در حالت خشک هوا وجود داشت، در حالت اشباع آب قرار می‌گیرد و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

با توجه به این‌که سرعت موج فشاری در مایعات بیش‌تر از هوا است بنابراین سرعت موج فشاری در نمونه‌های اشباع بیش‌تر از نمونه‌های خشک است

جدول ۱. نوع و نام محل سنگ‌های مورد تحقیق

نوع سنگ	نام محل تهیه سنگ
گرانیت مشکی	معدن قره‌باغ آذربایجان شرقی
مرمریت کرمی	معدن آباده شیراز
تراورتن کرمی	معدن لمعه دشت خلخال
آهک	معدن آهک خوان لیقوان

جدول ۲. ابعاد نمونه‌های آماده‌سازی شده برای انجام آزمایش‌ها

ردیف	نوع نمونه	ابعاد نمونه
۱	استوانه‌ای	قطر۵/٤ و ارتفاع ۱۳/۵ سانتی‌متر
۲	بلوک کوچک	۱۰×۲۰×٤۰ سانتی‌متر
۳	بلوک بزرگ مقیاس	۱۵۰×۲۰۰×۲۵۰ سانتی‌متر

جدول ۳. نتایج آزمایش تعیین سرعت عبور موج اولتراسونیک روی بلوک بزرگ مقیاس مرمریت به‌روش مستقیم

شماره نقطه	زمان (میلی ثانیه)	سرعت(km/s)
۱	۲۳۷/۱	٦/۰۷
۲	۲۳٦/٦	٦/۰۸
۳	۲٤۱/٤	۵/۹٦
٤	۲۳۵/۲	٦/۱۲
۵	۲٤۵/۲	۵/۸۷
٦	۲۳۸/۲	٦/۰٤
۷	۲۸۵/۲	۵/۰٤
۸	۲۳۵/۵	٦/۱۱
۹	۲۳۵/۷	٦/۱
۱۰	۲۳۰/۱	٦/۲۵
۱۱	۲۳۰/۵	٦/۲٤
۱۲	۲۳۳/٦	٦/۱٦
میانگین	۲٤۰/٤	٦/۰۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

جدول ٤. نتایج آزمایش تعیین سرعت عبور موج اولتراسونیک روی بلوک بزرگ مقیاس تراورتن به‌روش مستقیم

شماره نقطه	زمان (میلی ثانیه)	سرعت (km/s)
۱	۲۸۸/۸	٥/٤
۲	۲۹۰/۳	٥/۳۷
۳	۲۹۲/٥	٥/۳۳
٤	۲۹۷/٥	٥/۲٤
٥	۳۲۸	٤/۷٥
٦	۳۰۱/٥	٥/۱۷
۷	۳۰۱/۳	٥/۱۷
۸	۳۰۳/٦	٥/۱۳
میانگین	۳۰۰/٤٤	٥/۱۹

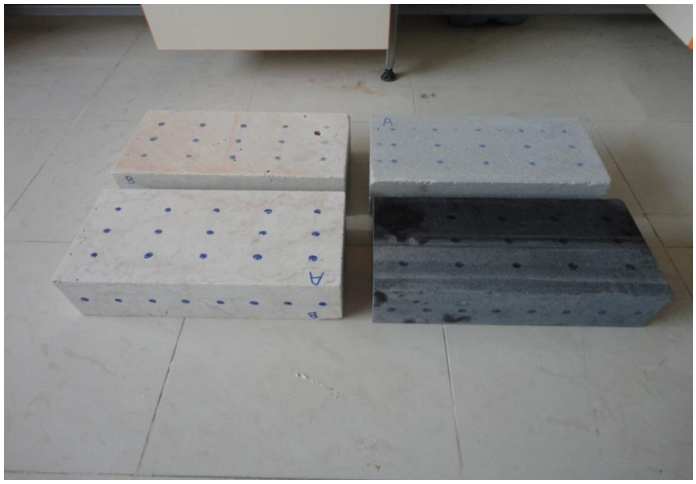
جدول ٥. مقایسه نتایج سرعت عبور امواج در بلوک‌های سنگ گرانیت، تراورتن، مرمریت و آهک در جهات مختلف ضخامت(A)، عرض(B) و طول(C)

نوع سنگ	سرعت موج فشاری در جهت A (km/s)	سرعت موج فشاری در جهت B (km/s)	سرعت موج فشاری در جهت C (km/s)
مرمریت	٦/۱۸	٦/۲۰	٦/۲۲
تراورتن	٥/۰٦	٥/۳۳	٥/۳۷
گرانیت	٦/٥٤	٦/٥٥	٦/٥٥
آهک	۳	۳/۲٥	۳/۲۷

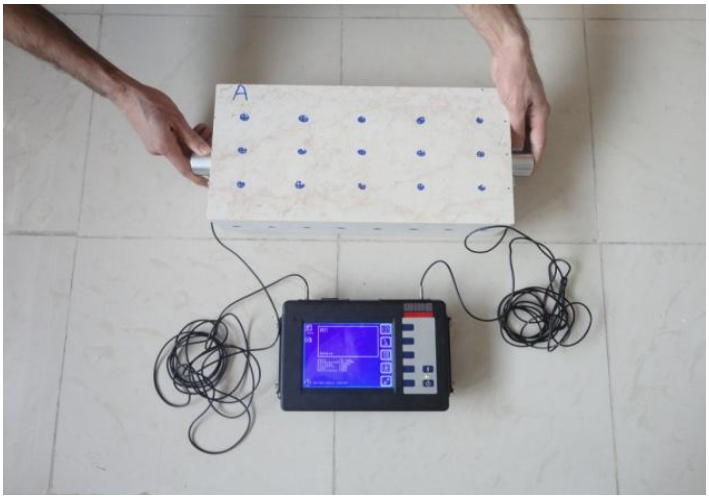
جدول ٦. میانگین نتایج سرعت صوت برای نمونه‌های استوانه‌ای در حالات مختلف بر حسب km/s

درجه رطوبت	سرعت موج فشاری مرمریت (km/s)	سرعت موج فشاری تراورتن (km/s)	سرعت موج فشاری گرانیت (km/s)	سرعت موج فشاری آهک (km/s)
اشباع	٤/٦۷	٤/۷٤	٥/۸۳	٤/۰٤
مرطوب	٤/٦٦	٤/٦۸	٥/۷٥	۳/۸٤
خشک	٤/٥۷	٤/٥٦	٥/۷۱	۳/۸۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]



شکل ۱. بلوک‌های سنگ مرمریت، تراورتن،گرانیت و آهک آماده‌سازی شده



شکل ۲. نحوهٔ انجام آزمایش ستفاده ازبا ا دستگاه اولتراسونیک مدل USG 37300 استفاده شده در این پروژه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

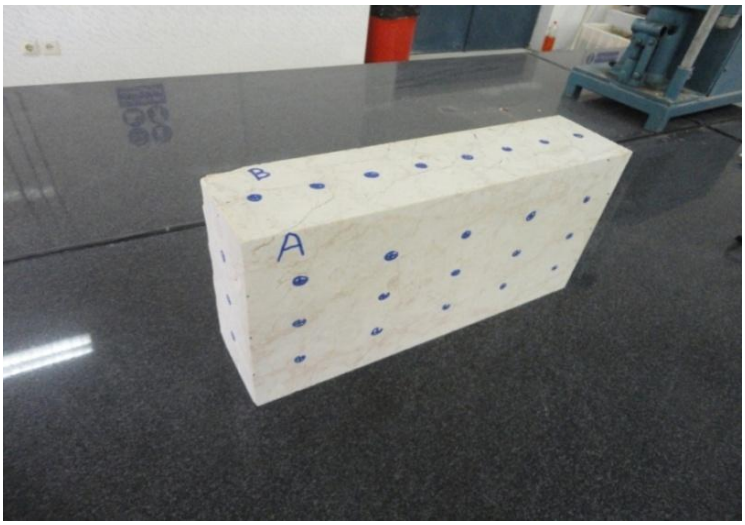


شکل ۳. انجام عملیات آزمایش بزرگ مقیاس سرعت عبور موج در نمونه مرمریت



شکل ٤. انجام عملیات آزمایش بزرگ مقیاس سرعت عبور موج در نمونه تراورتن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]



شکل ۵. نقاط مشخص شده برای تعیین سرعت امواج اولتراسونیک روی سه صفحه در سه جهت متفاوت **A**، **B** و **C**

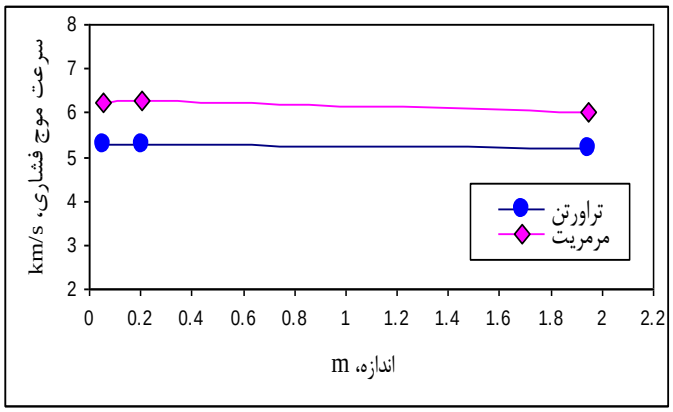


شکل ٦. مغزه‌های استوانه‌ای آماده‌سازی شده برای آزمایش اولتراسونیک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

تأثیر اندازهٔ در سرعت عبور موج فشاری

آزمایش اولتراسونیک روی نمونه‌های سنگ دارای قطر ٥٤ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲ تا ۲/۵ انجام شد. این آزمایش روی بلوک‌های سنگ مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک دارای ابعاد ٤٠×۲٠×۱٠ سانتی‌متر نیز انجام شد. آزمایش اولتراسونیک تنها روی قله‌های بزرگ دو نوع از سنگ‌ها شامل مرمریت و تراورتن به ابعاد در حدود ۲۵٠×۲٠٠×۱۵٠ سانتی‌متر نیز انجام شد، چون تهیه و آماده‌سازی چنین بلوک‌های بزرگی موضوع دشواری است. متوسط سرعت عبور موج فشاری برای اندازه‌های مختلف نمونه‌های سنگ مرمریت و تراورتن در جدول ۷ نشان داده شده است. اگرچه پراکندگی آماری به‌صورت طبیعی در نتایج به‌دست آمده وجود دارد اما متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده برای سنگ‌های دارای اندازه‌های مختلف، تفاوت چشم‌گیری نشان نمی‌دهد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که اندازه نمونه‌های سنگ در سرعت عبور موج مؤثر نیست (شکل۷). علت وجود نداشتن تأثیر اندازه در سرعت عبور موج فشاری سنگ‌های بررسی شده، وجود نداشتن ناپیوستگی در قله‌های بزرگ سنگ می‌تواند باشد. هم‌چنین در بناهای سنگی و آثار باستانی از قله‌های سنگ یک پارچه استفاده شده است و معمولاً دارای ناپیوستگی نیستند.



شکل ۷. متوسط سرعت موج فشاری و تغییرات اندازهٔ دو نوع سنگ تراورتن و مرمریت استفاده شده

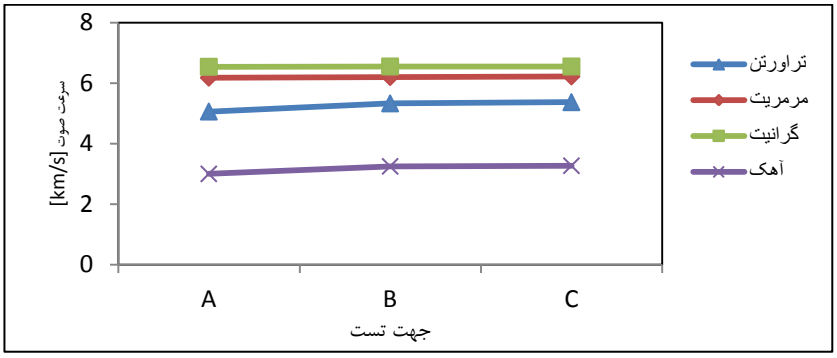
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

جدول۷. متوسط نتایج سرعت عبور موج در سنگ‌های مرمریت و تراورتن در اندازه‌های مختلف

اندازه	سرعت عبور موج در سنگ تراورتن (km/s)	سرعت عبور موج در سنگ مرمریت (km/s)
استوانه‌ای کوچک	۵/۲۷	٦/۲۳
بلوک کوچک	۵/۲۷	٦/۲٦
بلوک بزرگ مقیاس	۵/۱۹	٦/۰۰

تأثیر شکل در سرعت عبور موج فشاری

آزمایش اولتراسونیک روی بلوک‌های سنگ مکعب مستطیل به ابعاد ٤۰×۲۰×۱۰ سانتی‌متر در سه جهت مختلف عمود بر هم انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که سرعت عبور موج در جهت‌های مختلف شکل نمونه دارای پراکندگی تصادفی است و تفاوت چشم‌گیری بین سرعت عبور موج در جهت ضخامت (A)، عرض (B) و طول (C) در بلوک‌های سنگ مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک دیده نمی‌شود (شکل ۸). بنابراین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که سرعت عبور موج فشاری در جهت‌های مختلف بلوک‌های سنگ حدوداً یک‌سان است و شکل در سرعت عبور موج مؤثر نشان نمی‌دهد



شکل ۸. مقایسه سرعت صوت در جهات مختلف A، B و C در بلوک‌های سنگ مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

برآورد مقاومت سنگ با استفاده از امواج اولتراسونیک

فرآیند آماده‌سازی و آزمایش مقاومت فشاری یک‌محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای مغزه‌گیری شده بر اساس استاندارد [۱۰] انجام شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری همراه آزمایش سرعت موج فشاری در جدول ۸ نشان داده شده است. با استفاده از نتایج آزمایش، رابطهٔ بین مقاومت فشاری یک‌محوری و سرعت عبور موج تجزیه و تحلیل شد. رابطه بین سرعت عبور موج و مقاومت فشاری یک محوری برای سنگ‌های مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک در شکل ۹ و جدول ۹ نشان داده شده است. مقاومت فشاری با افزایش سرعت عبور موج عموماً افزایش می‌یابد. اما تغییرات مقاومت به‌عنوان تابعی از تغییرات سرعت عبور موج برای سنگ‌های متعدد، متفاوت است. رابطهٔ کلی بین سرعت عبور موج و مقاومت فشاری یک‌محوری برای چهار نوع سنگ همراه با ضریب تصمیم‌گیری نیز در شکل ۹ نشان داده شده است رابطهٔ کلی بین سرعت عبور موج و مقاومت فشاری یک‌محوری برای سنگ‌های مرمریت، تراورتن، گرانیت و آهک همراه با ضریب تصمیم‌گیری نیز در ردیف ۵ جدول ۹ نشان داده شده است.

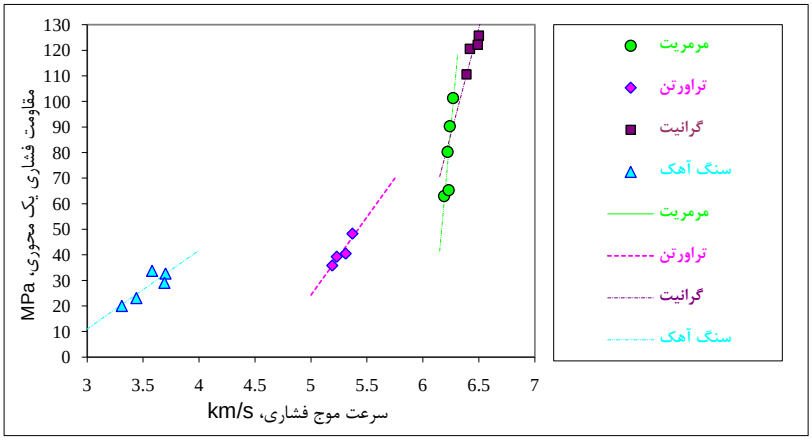
رابطهٔ کلی به‌صورت تابعی توانی نمایی است (ردیف ۵، جدول ۹). نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند که شکل و اندازهٔ نمونه‌ها در سرعت عبور موج مؤثر نیست. بلوک‌ها در بناهای سنگی و آثار باستانی مانند سنگ‌های آزمایش شده در این تحقیق معمولاً یک‌پارچه است و کم‌تر در آن‌ها ناپیوستگی دیده می‌شود. چنین سنگ‌هایی به‌علت ارزش ویژه‌ای که دارند، نمی‌توان به‌منظور مقاومت فشاری، آن‌ها را تخریب و از آن‌ها نمونه تهیه کرد. با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۹ و با در دست داشتن سرعت عبور موج، می‌توان مقاومت فشاری یک‌محوری بلوک‌های استفاده شده در بناهای سنگی و آثار باستانی یک‌پارچه را برآورد کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

جدول ۸. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری همراه آزمایش سرعت موج فشاری نمونه‌های استوانه‌ای شکل دارای قطر ۵/٤ سانتی‌متر و ۱۳/۵ سانتی‌متر

نمونهٔ سنگ	شمارهٔ نمونه	مقاومت فشاری یک‌محوری(MPa)	زمان (μs)	سرعت (km/s)
مرمریت	۱-۱	٦۲/۹٦۱	۲۱/۸	٦/۱۹
	۲-۱	۸۰/۲۲٤	۲۱/۷	٦/۲۲
	۳-۱	۹۰/۳۱	۲۱/٦	٦/۲٤
	٤-۱	٦۵/۲۷۳	۲۱/٦۷	٦/۲۳
	۵-۱	۱۰۱/۳٤۱	۲۱/۵	٦/۲۷
تراورتن	۱-۲	۳۵/۸٤۹	۲٦/۰۱	۵/۱۹
	۲-۲	۳۹/۲۷٦	۲۵/۸	۵/۲۳
	۳-۲	٤۸/۲۷۲	۲۵/۱	۵/۳۷
	٤-۲	٤۰/٤۹۲	۲۵/٤	۵/۳۱
گرانیت	۱-۳	۱۲۰/٦	۲۱	٦/٤۲
	۲-۳	۱٤٦/۲۷۲	۲۰/۵	٦/۵۸
	۳-۳	۱۱۰/۵٦۲	۲۱/۱	٦/۳۹
	٤-۳	۱۲۵/۷٦۲	۲۰/۸	٦/۵
	۵-۳	۱۲۲/۱٦۲	۲۰/۸	٦/٤۹
آهک	۱-٤	۳۳/۷۲	۳۷/۷	۳/۵۸
	۲-٤	۲۰/۰۲۹	٤۰/۸	۳/۳۱
	۳-٤	۳۲/٦٦۹	۳٦/٤	۳/۷
	٤-٤	۲۹/۰۵۲	۳٦/۵	۳/٦۹
	۵-٤	۲۳/۰۹۸	۳۹/۲	۳/٤٤

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]



شکل۹. رابطهٔ بین مقاومت فشاری یک‌محوری و سرعت عبور موج فشاری در چهار نوع سنگ

جدول ۹. رابطهٔ بین و مقاومت فشاری یک محوری (σ_{c50}) و سرعت عبور موج فشاری (V_p) برای سنگ‌های مرمریت تراورتن، گرانیت و آهک همراه با ضریب هم‌بستگی (R)

ردیف	نوع سنگ	رابطهٔ بین σ_{c50} و V_p	ضریب هم‌بستگی (R)
۱	مرمریت	$\sigma_{c50} = 481.1\ V_p - 2917$	0.858
۲	تراورتن	$\sigma_{c50} = 60.88\ V_p - 280.1$	0.935
۳	گرانیت	$\sigma_{c50} = 166.0\ V_p - 950.3$	0.941
٤	آهک	$\sigma_{c50} = 30.77\ V_p - 81.32$	0.864

نتیجه‌گیری

آزمون غیرمخرب تعیین سرعت موج در بلوک‌های بزرگ سنگ به‌صورت برجا مانند نمونه کوچک آزمایشگاهی آسان و کم‌هزینه است و می‌توان آن را در صحرا انجام داد.

نتایج آزمایش‌ها و تحلیل نتایج نشان داد در صورتی که سنگ درزه مشهودی نداشته باشد، اندازه و شکل نمونه‌ها در سرعت عبور موج اثر ندارد و اندازه‌گیری سرعت عبور موج در هر جهتی از ابعاد بلوک سنگ دارای شکل‌های مختلف یک‌سان است. این نتایج برای تحقیقات در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

مورد برآورد مقاومت فشاری یک‌محوری با استفاده از سرعت عبور موج به‌صورت بنیادی نیز و مفید است.

با استفاده از رابطهٔ بین مقاومت فشاری یک‌محوری سنگ و سرعت عبور موج، ضمن اندازه‌گیری تنها سرعت عبور موج با آزمایش غیرمخرب التراسونیک، می‌توان مقاومت فشاری یک‌محوری بلوک‌های استفاده شده در بناهای سنگی و آثار باستانی یک پارچه و فاقد ناپیوستگی از تراورتن، مرمریت، گرانیت و آهک با هر شکل و اندازه‌ای را برآورد کرد. هم‌چنین مقاومت برآورد شده در چنین روشی، مبین ضعف سنگ ناشی از هوازدگی و غیره است.

منابع

1. Moomivand H., "Development of a new method for estimating the indirect uniaxial compressive strength of rock using schmidt hammer", Journal of BHM (Berg-und Hüttenmännische Monatshefte) Vol. 156, No. 4 (2011) 142-146.
2. Khandelwal M., Singh, T.N., "Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity", International Journal of Coal Geology,Vol. 49 (2009) 55-60.
3. Yasar E.Y., Erdogan Y., "Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol. 41, (2004) 871-875.
4. Gaviglio P., "Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocity and density", Rock Mech Rock Eng., Vol. 22 (1989) 299-306.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]

5. Facaoaru I., Lungnani C., "Contributions to the diagnosis of stone and concrete by structures by using non-destructive techniques, Conservation of Stone and Other Materials", Vol. II, (1993) 238-251.

٦. ستاری ق.، دهقان س.، شهریار ک.، *کاربرد روش غیرمخرب سرعت موج طولی برای تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری، مدول الاستیسیته و تخلخل تراورتن محلات*، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، یزد (۱۳۸۸).

۷. قزوینیان ع.، فتحی ع.، رشیدی م.، *کاربرد روش‌های غیرمخرب در اندازه‌گیری برخی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مارن های زاگرس*، کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران (۱۳۸۳).

۸. جوادیان د.، *بررسی روشی نوین برای برآورد مقاومت بناهای سنگی با استفاده از سرعت امواج اولتراسونیک*، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی سهند (۱۳۹۰).

9. ASTM, "Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic constants rock, ASTM Annual Book of Standards", D 2845–08 (2008).

10. ASTM, "Standard test method for uniaxial compressive strength of intact core specimens, ASTM Annual Book of Standards", D2938-95 (1997) 279-281.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.3.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3271]