

بررسی اثر عوامل دستگاهی و مشخصات هندسی نمونه بر سرعت موج فشاری در نمونه‌های سنگی تراورتن

سهیل مهاجرانی^۱ و سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*}

^۱دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران
^۲دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰)

چکیده

برآورد شاخص‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها برای طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی مانند شیب‌های سنگی، تونل‌ها، سدها، ترانشه‌های عمیق و مغارها بسیار حائز اهمیت است. روش مستقیمی که با آن بتوان شاخص‌های سنگ را بدون اجرای مراحل پُرزحمت، پُرزهزینه و وقت‌گیر آزمایشگاهی یا برجا تعیین کرد، وجود ندارد. بنابراین به یک روش آسان، با اطمینان قابل‌قبول و غیرمستقیم برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها نیاز است. در بین این روش‌ها از روش فراصوتی به منزله یک راهکار کم‌هزینه، آسان، سریع و با دقتی قابل‌قبول برای تعیین ویژگی‌های سنگ می‌توان بهره جست. در روش فراصوتی با تعیین سرعت موج در نمونه، این امکان وجود دارد که بتوان سایر پارامترهای شاخص سنگ و همچنین کیفیت سنگ را تعیین کرد. اندازه‌گیری سرعت موج فشاری را هم در محیط بزرگ‌مقیاس برجا و هم در محیط آزمایشگاهی می‌توان عملی ساخت. سرعت امواج فشاری در سنگ‌ها با ویژگی‌های سنگ بکر ارتباط نزدیکی دارد و با اندازه‌گیری سرعت موج فشاری در محیط سنگی می‌توان ساختار و بافت سنگ را ارزیابی کرد.

روش سرعت تپ (پالس) یا فراصوتی زمان عبور موج فراصوتی را درون جسم اندازه‌گیری می‌کند. در روش فراصوتی از بعضی مبدل‌های الکترومکانیکی برای ارسال و دریافت امواج کشسان استفاده می‌شود. سرعت موج با تقسیم طول نمونه بر زمان عبور موج اندازه‌گیری شده در نمونه که بین مبدل‌های فرستنده و گیرنده قرار گرفته است، به دست می‌آید. در این تحقیق به اجرای مجموعه‌ای آزمایش فراصوتی روی هجده نمونه متفاوت از سنگ تراورتن اقدام شده است. این آزمایش‌ها روی پارامترهای نسبت طول به قطر نمونه، بسامد و دامنه موج و تکرار تپ در واحد زمان و تأثیر آنها بر سرعت موج فشاری متمرکز شده است. در این تحقیق از دستگاه فراصوتی استفاده شده است که دارای قابلیت ارسال و دریافت امواج فراصوتی فشاری با استفاده از دو نوع مبدل ۷۵ و ۱۲۵ کیلوهرتز است. توانایی تغییر در بسامد موج فشاری ارسال شده، تغییر در دامنه موج و تعداد تپ در واحد زمان از دیگر امکانات این دستگاه به شمار می‌رود. روند اجرای آزمایش‌ها به این صورت است که در هر مرحله، فقط یک پارامتر تغییر می‌کند و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند تا ارزیابی اثر پارامتر مورد بررسی ممکن شود. برای هر یک از مبدل‌ها، نسبت طول به قطر نمونه‌ها در شش سطح از ۰/۵ تا ۳، بسامد موج ارسالی در بازه ۵۰ تا ۲۱۰ هرتز، دامنه موج ارسالی از ۰/۱ تا ۴ ولت و تکرار تپ موج در بازه ۰/۵ تا ۱۶ هرتز تغییر داده و نتایج ثبت شد. شایان ذکر است که نتایج هر آزمایش حاصل میانگین‌گیری عددی از سه بار اجرای آزمایش در هر مرحله است که هدف از این کار، کمینه‌کردن اثر خطاهای گوناگون در حین اجرای آزمایش‌ها است. برای تحلیل نتایج از یک کُد نرم افزاری توسعه داده شده در محیط نرم‌افزار مَتَلَب استفاده شد که امکان تعیین سرعت عبور موج در نمونه با استفاده از ترسیم پوش موج را فراهم می‌آورد. به‌طور کلی روشن شده است که با افزایش نسبت طول به قطر نمونه‌ها، افزایش دامنه موج و کاهش بسامد، سرعت موج فشاری، به‌ترتیب در بازه تقریبی ۳۴۰۰ تا ۴۳۰۰ متر بر ثانیه برای مبدل ۷۵ کیلوهرتز و ۲۲۰۰ تا ۳۸۰۰ متر بر

ثانیه برای مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که با تغییرات تکرار تپ در واحد زمان در یک مقدار مشخص از این پارامتر، سرعت موج فشاری حداکثر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش‌های غیرمخرب، موج فشاری، روش فراصوتی، پارامترهای مکانیکی، نمونه‌های سنگ تراورتن

۱ مقدمه

اهمیت برآورد شاخص‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها در طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی مانند شیب‌های سنگی، تونل‌ها، سدها، ترانشه‌های عمیق و مغارها بر کسی پوشیده نیست. همچنین این شاخص‌ها برای بررسی انفجار سنگ در معادن زیرزمینی، طراحی پایه‌ها و پیش‌بینی شکست توده‌سنگ بسیار حائز اهمیت است. تعیین ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها در آزمایشگاه و همچنین به‌صورت برجا ممکن است زمان‌بر و پرهزینه باشد و قطعاً به دقت زیادی برای آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها نیاز دارد. روش مستقیمی که با آن بتوان شاخص‌های سنگ را بدون طی کردن مراحل پرزحمت، پرهزینه و وقت‌گیر آزمایشگاهی یا برجا تعیین کرد، وجود ندارد. بنابراین نیاز به یک روش آسان اما قابل‌اعتماد غیرمستقیم برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها احساس می‌شود (کندلوالا و رنجیت، ۲۰۱۰).

روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی مدت‌ها است که در عملیات ژئوتکنیک و معدنی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها در صحرا برای تحقیقات ژئوتکنیک و در آزمایشگاه معمولاً برای تعیین خواص دینامیکی سنگ‌ها به کار برده می‌شوند (کارامن، ۲۰۰۲). چون این روش‌ها مخرب نیستند و کاربرد آسانی دارند، تا به حال به‌صورت گسترده مورد استقبال مهندسان ژئوتکنیک قرار گرفته‌اند (شارما و سینگ، ۲۰۰۸). با کاربرد این روش‌ها تلاش‌هایی برای ارزیابی تریق، بررسی گیرداری پیچ‌سنگ‌ها، تعیین کارایی (راندمان) آتشیاری در توده‌سنگ از راه اندازه‌گیری سرعت امواج

لرزه‌ای صورت گرفته است (نیل، ۱۹۷۰؛ پرایس و همکاران، ۱۹۷۰؛ یانگ و همکاران، ۱۹۸۵). پیش‌بینی تغییرشکل توده‌سنگ و نیز گسترش منطقه آسیب دیده در اطراف فضا‌های زیرزمینی از کاربردهای دیگر روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری سرعت امواج لرزه‌ای هستند (اونودرا، ۱۹۶۳؛ هادسون و همکاران، ۱۹۸۰؛ گلاوین، ۱۹۸۲). این تحقیقات و نیز تحقیقات دیگری که در این زمینه صورت پذیرفته است، روشن ساخته‌اند که سرعت صوت رابطه بسیار نزدیکی با شاخص‌های سنگ دارد (دیر و میلر، ۱۹۶۶؛ دی‌اندریا و همکاران، ۱۹۶۵؛ سیتو و همکاران، ۱۹۷۷؛ گاردنر و همکاران، ۱۹۷۴؛ یوآش، ۱۹۷۰؛ لاما و ویتوکوری، ۱۹۷۸؛ اینوئه و اهومی، ۱۹۸۱؛ گاولیو، ۱۹۸۹؛ گاسمن، ۱۹۵۱؛ بایوت، ۱۹۵۶؛ دومینیکو، ۱۹۷۴؛ الجراح، ۲۰۰۹؛ بهرمندی و همکاران، ۲۰۱۲؛ موزر، ۲۰۰۲؛ بری و مک‌براید، ۱۹۹۲؛ گرین، ۱۹۹۱؛ JSRM، ۱۹۷۹).

اندازه‌گیری سرعت موج فشاری (V_p) را هم در محیط بزرگ‌مقیاس برجا و هم در محیط آزمایشگاهی می‌توان عملی ساخت. سرعت امواج فشاری (V_p) در سنگ‌ها با ویژگی‌های سنگ بکر ارتباط نزدیکی دارد و با اندازه‌گیری سرعت موج P در محیط سنگی می‌توان ساختار و بافت سنگ را ارزیابی کرد. اثرگذارترین پارامترها روی سرعت موج، اندازه و شکل دانه‌ها، چگالی، تخلخل، ناهمسانگردی، آب منفذی، دما، هوازدهی و دگرگونی، صفحات لایه‌بندی و ویژگی‌های درزه‌ها (زبری، پرشدگی، میزان آب درزه، شیب و امتداد) است (کارامن، ۲۰۰۲). اما به‌طور کلی ویژگی‌های کشسان

برای نمایش شکل سیگنال به نوسان‌نما (اسیلوسکوپ) انتقال داده می‌شوند (گرگوری، ۱۹۷۶؛ ASTM، ۲۰۰۰؛ جامبونتان، ۲۰۰۸). تاکنون آزمایش‌های فراصوتی روی سنگ مرمر را چندین محقق به انجام رسانده‌اند (پرسناکیس و پرسناکیس، ۲۰۰۴؛ پرسناکیس و همکاران، ۲۰۰۰؛ وانوریو و همکاران، ۲۰۰۲؛ سارپان و همکاران، ۲۰۰۵؛ سارپان و کلیکایا، ۲۰۰۶؛ دلایمانلی و همکاران، ۲۰۰۷).

این تحقیقات به‌طور کلی با هدف برآورد مدول کشسانی، مدول برشی و نسبت پواسن سنگ مرمر با امواج فراصوتی تحت فشارهای گوناگون صورت گرفته است (پرسناکیس و پرسناکیس، ۲۰۰۴). پس از آن در تحقیقات مشابهی نیز مقادیر پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ مرمر حاصل از آزمایش‌های غیرمخرب با آزمایش‌های مخرب مقایسه شده است (پرسناکیس و همکاران، ۲۰۰۰؛ وانوریو و همکاران، ۲۰۰۲). برای مثال در یک پژوهش، اندازه میانگین دانه‌های سنگ مرمر با سرعت امواج فراصوتی (سارپان و همکاران، ۲۰۰۵) و روش‌های میرایی نسبی فراصوتی (سارپان و کلیکایا، ۲۰۰۶) برآورد شده است. همچنین داده‌های حاصل از ارتباط پارامترهای فراصوتی و فشار برای سنگ مرمر میل‌اس ترکیه مورد بررسی قرار گرفته است (دلایمانلی و همکاران، ۲۰۰۷).

تحقیقاتی به‌منظور بررسی اثر نسبت طول به قطر نمونه‌های سنگ‌های گوناگون روی پارامترهای دینامیکی و استاتیکی این نمونه‌ها صورت گرفته است. این تأثیر برخلاف فرض استانداردهای ASTM و ISRM قابل توجه ارزیابی شده است. هرچند هیچ ارتباط معناداری بین سرعت موج فشاری و نسبت طول به قطر نمونه‌های گوناگون مشاهده نشده است (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶؛ فولادچی و همکاران، ۱۳۸۵).

با توجه به مطالب فوق، نبود منبع مناسبی که تأثیر پارامترهای گوناگون دستگاه فراصوتی مانند بسامد موج

سنگ با اندازه‌گیری سرعت موج کشسان و چگالی سنگ قابل محاسبه است (میکس، ۱۹۸۷). استفاده از آزمایش‌های سرعت امواج صوتی برای برآورد پارامترهای فیزیکی و مکانیکی محیط متخلخل با استفاده از مدل‌های مکانیکی گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است (وری، ۱۹۹۱؛ چری و همکاران، ۲۰۰۶؛ واسکونسوس و همکاران، ۲۰۰۸).

روش‌های آکوستیکی به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند: سرعت تپ، پژواک (اکو) تپ، بسامد تشدید و برش‌نگاری (توموگرافی) صوتی. روش سرعت تپ یا فراصوتی زمان عبور موج فراصوتی را درون جسم اندازه‌گیری می‌کند (بخورجی، ۲۰۱۰). مقیاس بسامد برای انواع مختلف اندازه‌گیری‌های فراصوتی متفاوت است. برای مثال در اندازه‌گیری‌های لرزه‌نگاری، چاه‌پیمایی صوتی و آزمایش‌های فراصوتی آزمایشگاهی مقیاس بسامد به ترتیب کمتر از ۲۰۰ هرتز، ۱۰ تا ۵۰ کیلوهرتز و ۰/۱ تا ۱ مگاهرتز است (کندلوالا و رنجیت، ۱۹۹۶).

در روش فراصوتی از بعضی مبدل‌های الکترومکانیکی برای ارسال و دریافت امواج کشسان استفاده می‌شود. سرعت امواج با تقسیم طول نمونه بر زمان عبور موج اندازه‌گیری شده در نمونه که بین مبدل‌های فرستنده و گیرنده قرار گرفته است، به دست می‌آید. مبدل‌های فرستنده و گیرنده شامل یک ماده پیزوالکتریک بلوری مانند کوارتز یا یک ماده پیزوالکتریک سرامیکی مانند تیتانات یا زیرکونات - تیتانات است. برای تعیین زمان سیر موج در نمونه، فاصله زمانی بین اولین سیگنال ارسال شده و اولین سیگنال دریافت شده ثبت می‌شود. از تفاضل این دو مقدار، زمان سیر موج حاصل می‌شود. سیگنال‌ها با یک تپ الکتریکی نوارپهن با ولتاژ زیاد ایجاد می‌شوند. دو بلور مبدل به نمونه سنگی متصل می‌شوند. مولد تپ، یک سیگنال الکتریکی تولید می‌کند که پس از ارسال به نمونه و دریافت از آن، هر دو سیگنال با تقویت کننده، تقویت و

این تحقیق روی هجده نمونه تراورتن که مراحل آماده‌سازی آنها در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود و آزمایش‌های فراصوتی موج فشاری روی آنها در آزمایشگاه پردازش تصویر پارک علم و فناوری استان سمنان به انجام رسیده، صورت گرفته است.

تعداد تب در واحد زمان و دامنه موج ارسالی و همچنین اثر پارامتر نمونه مورد آزمایش مثل طول نمونه بر سرعت امواج فشاری را نشان دهد، انگیزه اصلی اجرای تحقیق حاضر بوده است. این تحقیق روی نمونه‌های تراورتن که در دسته سنگ‌های متخلخل قرار می‌گیرد، صورت گرفته است.

۲ روش تحقیق

۱-۲ مراحل آزمایش



شکل ۱. تصاویری از نمونه‌ها و آماده‌سازی آنها.

۲-۱-۱ نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه‌های سنگی مورد آزمایش، نمونه‌هایی بدون درزه و ترک از جنس سنگ تراورتن متخلخل است. نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای و به صورت مغزه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مغزه‌ها با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر ساخت شرکت ماتست (Matest) ایتالیا با اندازه NX (قطر مغزه‌ها ۵۴/۷ میلی‌متر) تهیه و با استفاده از دستگاه برش در طول‌های مورد نظر معادل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ برابر قطر نمونه بریده شده‌اند. برای به حداقل رساندن اثر خطای انتهای نمونه‌ها، سر و ته نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پرداخت نمونه (Grinder) در دو مرحله صیقل داده شد تا میزان ناهمواری‌های موجود در انتهای آنها به کمتر از ۰/۰۱ میلی‌متر و میزان انحراف زاویه‌ای لبه‌های انتهایی نمونه‌ها به کمتر از ۰/۰۱ رادیان برسد. سرانجام از هریک از نسبت‌های طول به قطر تعداد ۳ نمونه (در مجموع تعداد ۱۸ نمونه) آماده شد تا دقت آزمایش با میانگین‌گیری از مقادیر، افزایش یابد. تصویری از نمونه‌ها و آماده‌سازی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۲ آزمایش فراصوتی

دستگاه فراصوتی مورد استفاده در این تحقیق دستگاهی ساخت شرکت NAPTCO مدل UPR-2000 است. این دستگاه دارای قابلیت ارسال و دریافت امواج فراصوتی فشاری با استفاده از دو نوع مبدل ۷۵ و ۱۲۵ کیلوهرتز است. از دیگر امکانات این دستگاه می‌توان به توانایی تغییر در بسامد موج فشاری ارسال شده، تغییر در دامنه موج و تغییر در تعداد تپ در واحد زمان اشاره کرد.

تصویر دستگاه و مبدل‌های آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این دستگاه خروجی‌ها که شامل شکل موج ارسال و دریافت شده است به صورت رقمی به یک نوسان‌نما فرستاده می‌شود. نوسان‌نمای مورد استفاده نیز از نوع رقمی ساخت شرکت TUM کره جنوبی و دارای

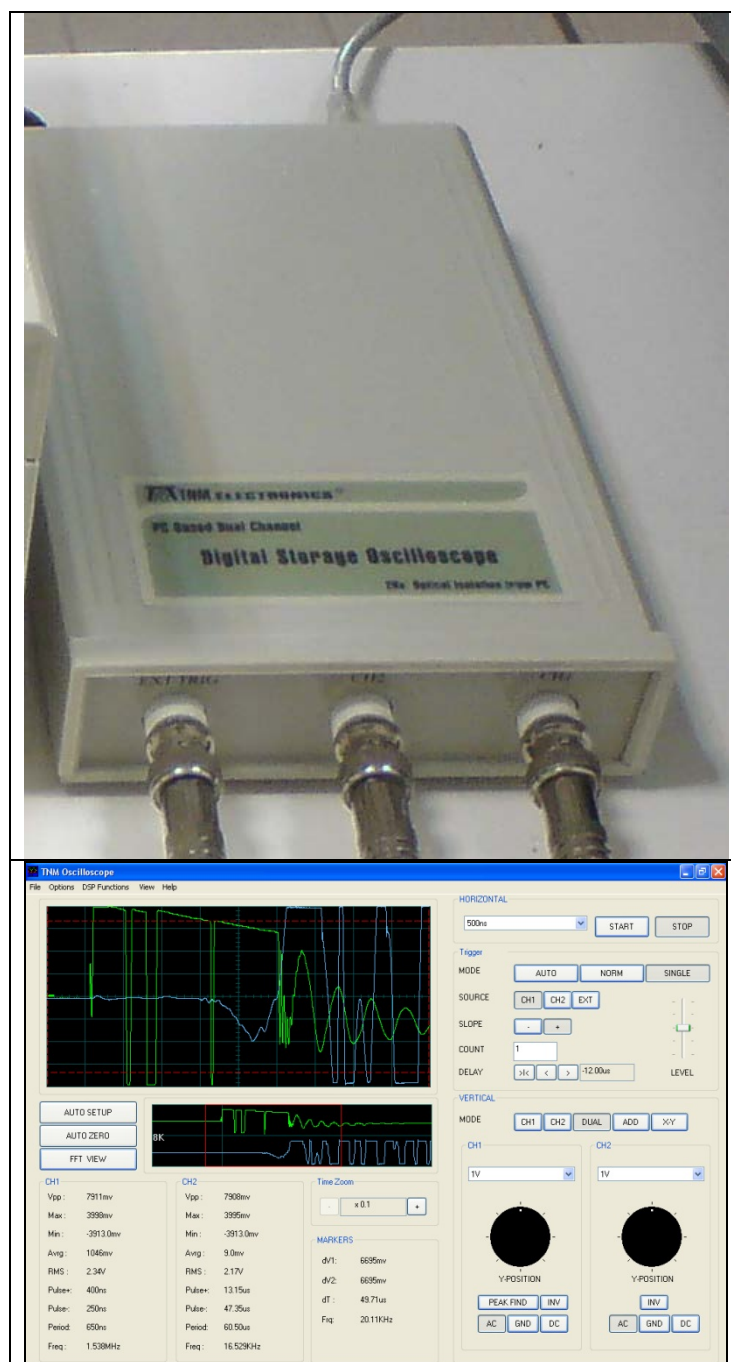
قابلیت اتصال به رایانه از طریق درگاه USB برای نمایش داده‌ها است. نرم‌افزار نوسان‌نما امکان نمایش و ذخیره داده‌ها و تصویر گرافیکی شکل موج را در هر بازه زمانی دلخواه فراهم می‌آورد. تصویری از نوسان‌نما و نرم‌افزار آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

پس از اتصال مبدل‌های دستگاه به دو انتهای نمونه‌ها، اقدام به قرائت و ثبت داده‌های حاصل از زمان سیر موج فشاری در نمونه‌های مورد آزمایش شد. داده‌های خوانده شده برای تفسیر و محاسبه سرعت موج فشاری عبور کرده به یک گد نرم‌افزاری توسعه داده شده در نرم‌افزار مت‌کب انتقال داده شد. تصویری از گد نرم‌افزاری توسعه داده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. این گد نرم‌افزاری با استفاده از شبیه‌سازی مدارهای مقاومت و خازن الکتریکی (R-C) با جریان یک‌طرفه، پوش موج اول را رسم می‌کند. بدین معنی که هنگامی که شیب منحنی ولتاژ دامنه - زمان (شکل موج) به صورت صعودی است، فرض می‌شود که خازن با استفاده از جریان یک‌طرفه در حال پُر شدن است. هنگامی که شیب منحنی پیش‌گفته منفی می‌شود، خازن یک‌باره تخلیه نمی‌شود و مدت زمانی طول می‌کشد تا به صورت تدریجی این اتفاق رخ دهد. میزان کاهش ولتاژ خازن به مقاومت مدار مربوط می‌شود و قابل تنظیم است. پس از تخلیه کامل خازن به علت یک‌طرفه بودن جریان، ولتاژ منفی نخواهد شد و برای مقادیر منفی صفر باقی خواهد ماند. پس از رسم پوش اول، پوش دوم با فرض معنادار بودن تپ‌های بیش از ۰/۲ حداکثر دامنه ثبت شده برای پوش اول (کمتر از این مقدار واپیچش محسوب می‌شود) به صورت تپ مربعی با دامنه‌ای برابر با حداکثر دامنه در بازه مورد بررسی رسم می‌شود.

شکل ۵ تصاویری از شکل موج اصلی، پوش اول و پوش دوم را برای دو موج ارسالی و دریافتی نشان می‌دهد. این روند یک‌بار برای موج ارسالی و یک‌بار برای موج دریافت شده تکرار می‌شود.



شکل ۲. تصاویری از دستگاه فراصوتی و مبدل‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها.



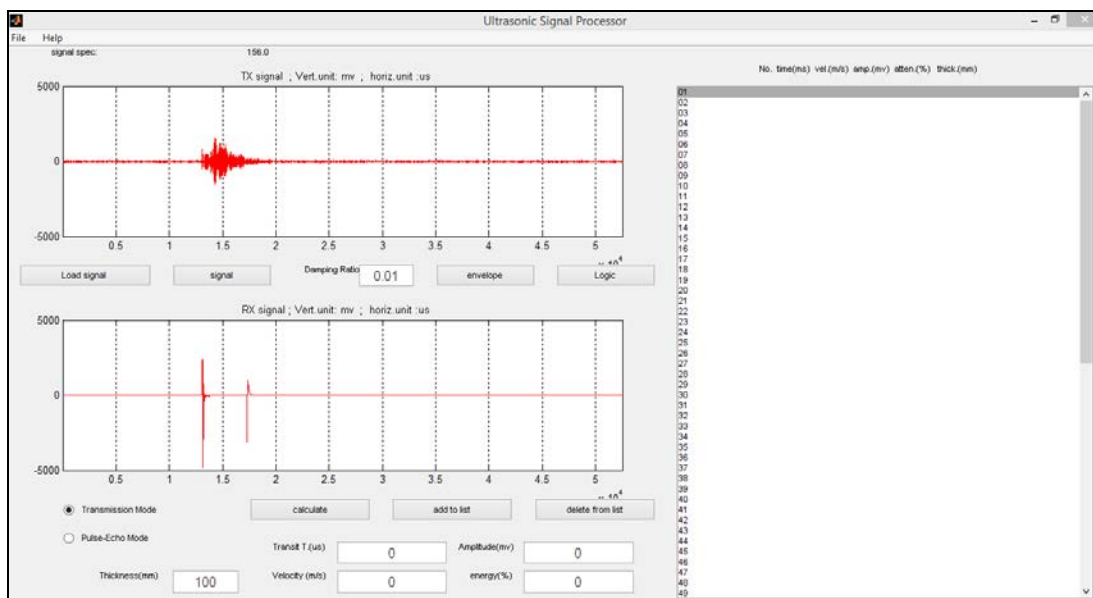
شکل ۳. تصاویری از نوسان‌نمای رقمی و نرم‌افزار رایانه‌ای آن.

فاصله بین مبدل‌ها (طول نمونه) به زمان سیر موج فشاری به‌دست آمده، سرعت موج فشاری در نمونه قابل محاسبه خواهد بود.

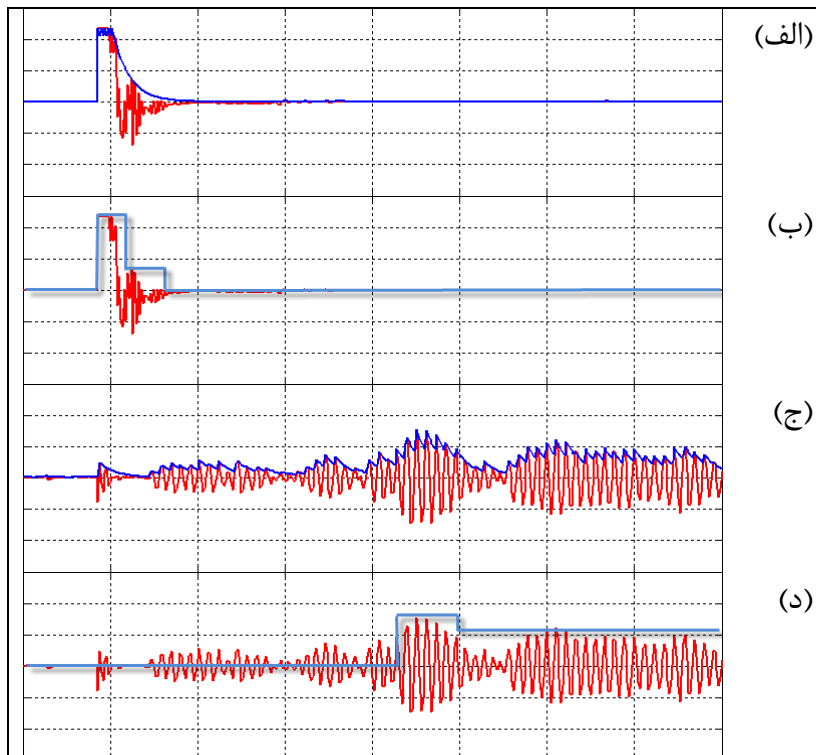
کُد نرم‌افزاری توسعه داده شده در این تحقیق، پس از محاسبه اختلاف زمان وقوع اولین سیگنال پوش دوم موج ارسالی و زمان وقوع اولین سیگنال پوش دوم موج دریافت شده زمان سیر موج در نمونه را محاسبه می‌کند. با تقسیم

پیش از محاسبه سرعت، از زمان سیر موج در نمونه کسر
شود.

برای واسنجیدن دستگاه می باید پیش از انجام آزمایش
مبدل‌ها بدون وجود نمونه با یکدیگر تماس داده شوند تا
میزان زمان تأخیر موج مشخص شود. زمان تأخیر موج باید



شکل ۴. تصویری از کُد نرم‌افزاری توسعه داده شده در تحقیق برای تفسیر آزمایش‌های فراصوتی.



شکل ۵. (الف) تصویری از شکل موج ارسالی به همراه پوش اول. (ب) تصویری از شکل موج ارسالی به همراه پوش دوم. (ج) تصویری از شکل موج دریافتی به همراه پوش اول. (د) تصویری از شکل موج دریافتی به همراه پوش دوم.

۳-۱-۲ طرح انجام آزمایش

برای اجرای آزمایش‌های فراصوتی در این تحقیق، برای هر پارامتر مورد بررسی که شامل نسبت طول به قطر نمونه، بسامد موج، دامنه موج و تعداد تپ در واحد زمان است، یک مقدار ثابت مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. برای هر یک از آزمایش‌ها با توجه به پارامتر مورد بررسی در آن آزمایش، بقیه پارامترها ثابت گرفته و پارامتر مورد نظر در یک بازه مشخص تغییر داده شد. هدف از این طرح آزمایش حداکثر ساختن اثر ناشی از پارامتر مورد بررسی و کاهش تأثیر سایر پارامترها است.

برای هر سری از آزمایش‌ها روی یک پارامتر مورد بررسی، دو سطح از آزمایش - یک‌بار با استفاده از مبدل ۷۵ کیلوهرتزی و یک‌بار با استفاده از مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی - صورت گرفت. برای هر سری از آزمایش‌ها به‌منظور اینکه اثر دما، خطای سامان‌مند دستگاه و خطای انسانی کاهش یابد در هر سطح و برای هر مقدار از پارامتر مورد بررسی، ۳ مرتبه با فواصل زمانی متفاوت اقدام به خوانش داده (تکرار آزمایش) شد و سپس از این سه خوانش، میانگین عددی گرفته شد. این میانگین به‌منزله داده اصلی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

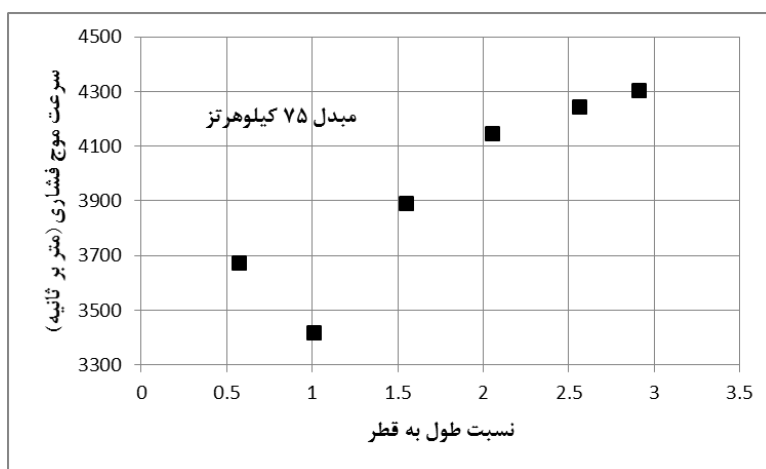
اولین پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق نسبت طول به قطر نمونه‌های سنگی تراورتن است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، نسبت طول به قطر در ۶ سطح ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ تغییر داده و نتایج ثبت شد. پارامتر بعدی بسامد است که در بازه ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. دامنه موج با تغییر در بازه ۰/۱ تا ۴ ولت آزمایش شد و آخرین پارامتر تعداد تپ در واحد زمان است که با تغییر در بازه ۰/۵ تا ۱۶ هرتز مورد آزمایش قرار گرفت. همه این آزمایش‌ها یک‌بار با مبدل ۷۵ کیلوهرتزی و یک بار با مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی صورت گرفت.

جدول ۱. پارامترهای ثابت مورد استفاده در طرح آزمایش.

نسبت طول به قطر	بسامد (کیلوهرتز)	دامنه (ولت)	تکرار تپ در واحد زمان (هرتز)
۲	۱۲۵	۰/۶۴	۰/۵

۲-۲ نتایج حاصل از آزمایش

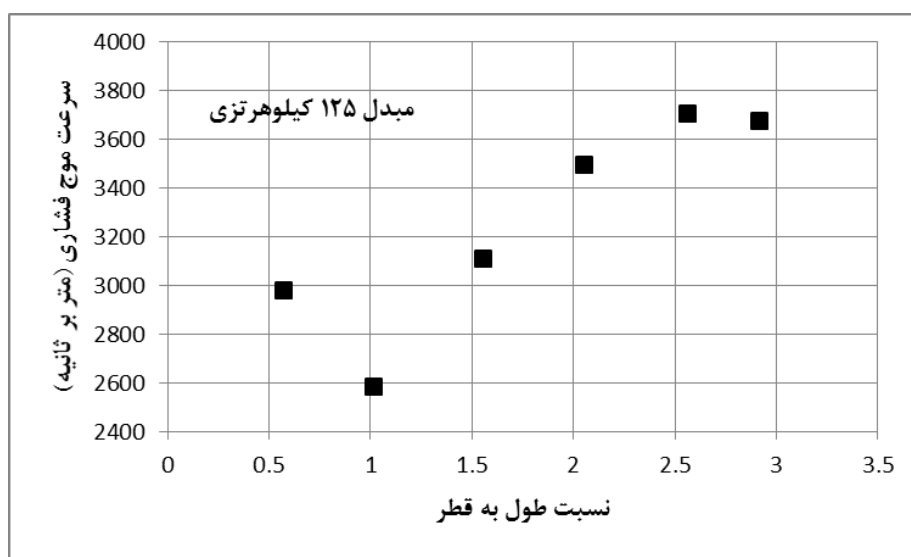
شکل ۶ ارتباط بین سرعت موج فشاری با نسبت طول به قطر را برای مبدل ۷۵ کیلوهرتزی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت طول به قطر، سرعت موج فشاری در نمونه افزایش می‌یابد.



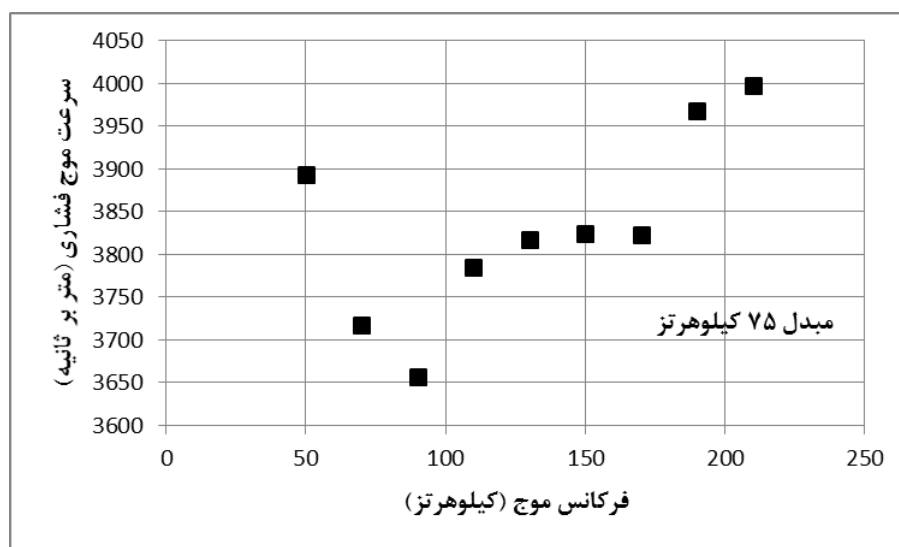
شکل ۶. نمودار نسبت طول به قطر در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۷۵ کیلوهرتزی.

شکل ۸ ارتباط بین سرعت و بسامد موج فشاری را برای مبدل ۷۵ کیلوهرتز نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با وجود پراکندگی زیاد داده‌ها سیر نزولی سرعت موج در برابر بسامد تا حدود ۷۵ کیلوهرتز ادامه می‌یابد و در مقادیر بسامد بیش از ۷۵ کیلوهرتز سرعت موج سیر صعودی از خود نشان می‌دهد.

شکل ۷ نمودار سرعت موج فشاری در برابر نسبت طول به قطر به قطر را برای مبدل ۱۲۵ کیلوهرتز نشان می‌دهد. با توجه به این شکل استنباط می‌شود که در این حالت نیز با افزایش نسبت طول به قطر نمونه، میزان سرعت موج فشاری در نمونه افزایش می‌یابد.



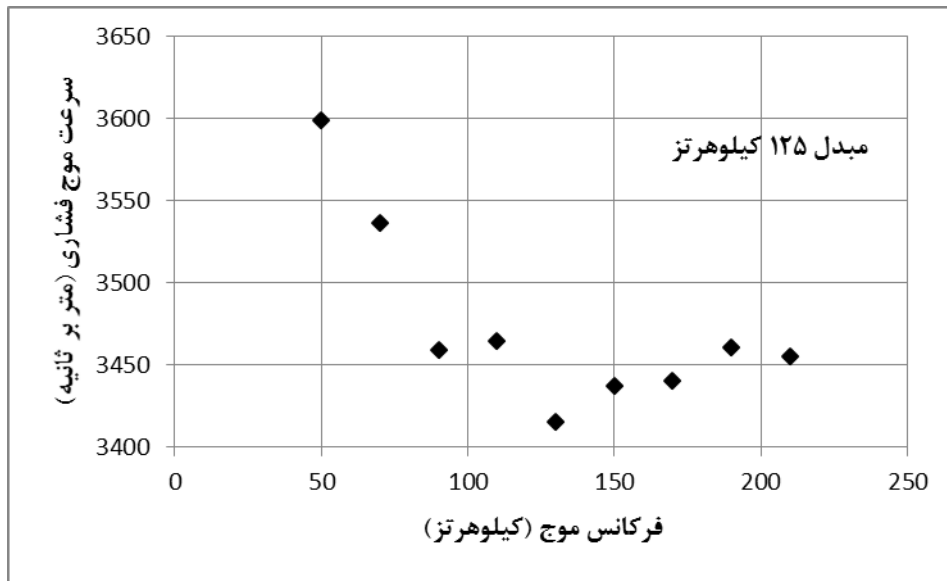
شکل ۷. نمودار نسبت طول به قطر در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۱۲۵ کیلوهرتز.



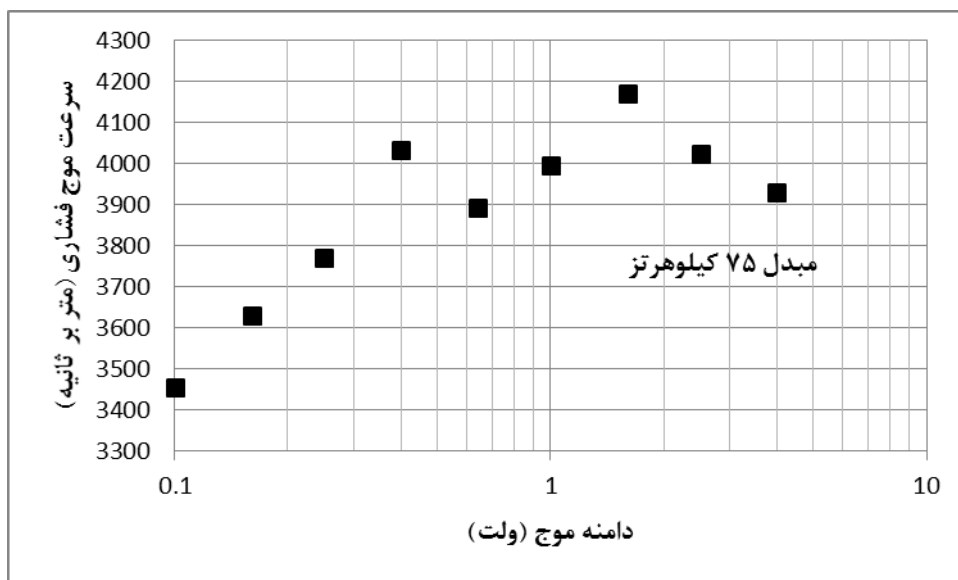
شکل ۸. نمودار بسامد در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۷۵ کیلوهرتز.

موج دیده می‌شود. منحنی سرعت در برابر دامنه موج فشاری در شکل ۱۰ برای مبدل ۷۵ کیلوهرتزی نشان داده شده است. سیر صعودی داده‌ها نشان‌دهنده افزایش میزان سرعت موج فشاری با افزایش دامنه آن است.

مطابق شکل ۹ نمودار سرعت موج فشاری در برابر بسامد برای مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی رسم شده است. با توجه به این شکل با وجود پراکندگی به نسبت زیاد داده‌ها، سیر نزولی سرعت موج در برابر بسامد تا حدود ۱۲۵ کیلوهرتز ادامه می‌یابد و پس از آن سیر صعودی سرعت



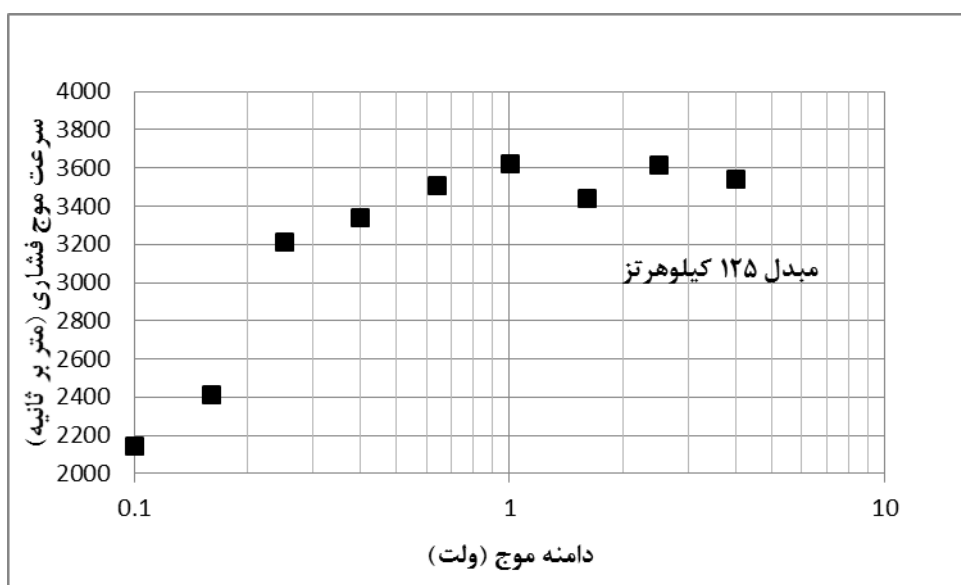
شکل ۹. نمودار بسامد در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی.



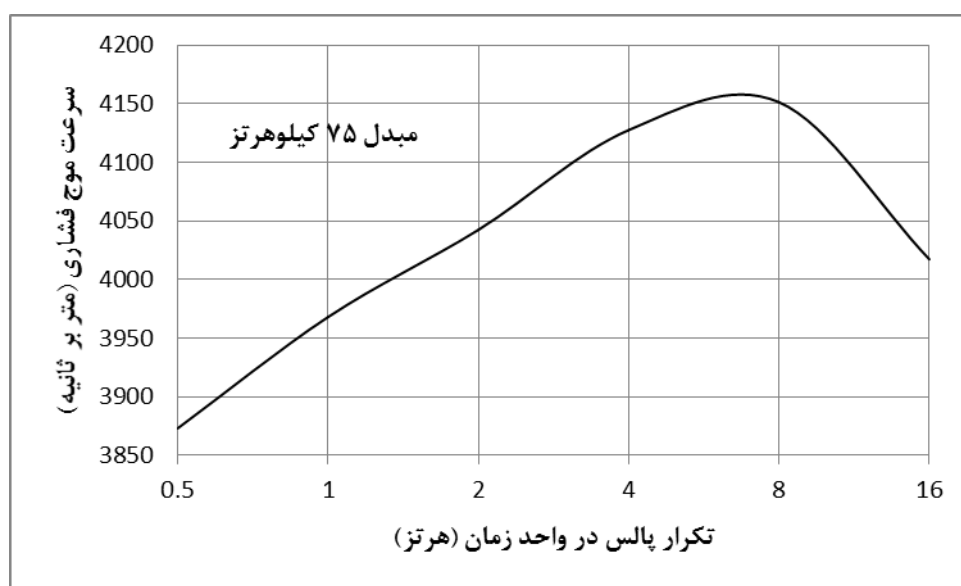
شکل ۱۰. نمودار دامنه در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۷۵ کیلوهرتزی.

است. با توجه به این شکل در محدوده ۴ تا ۸ هرتز، حداکثر سرعت موج فشاری قابل مشاهده خواهد بود. مطابق شکل ۱۳ که منحنی سرعت موج فشاری در برابر تعداد تپ در واحد زمان را برای مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی نشان می‌دهد، در محدوده ۴-۸ هرتز بیشترین میزان سرعت موج فشاری در نمونه به دست می‌آید.

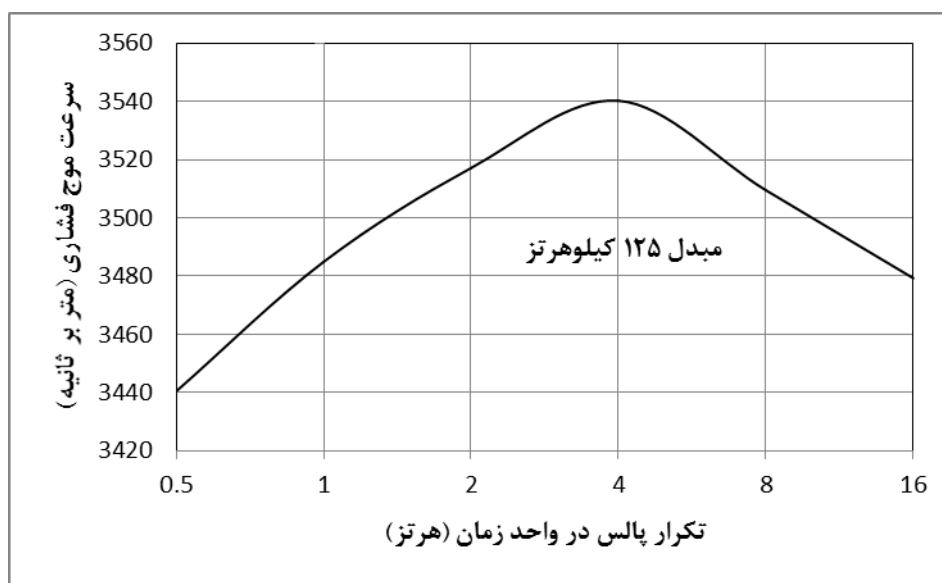
در شکل ۱۱ ارتباط بین سرعت و دامنه موج فشاری برای مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل استنباط می‌شود، افزایش میزان دامنه موجب افزایش سرعت موج فشاری در نمونه شده است. در شکل ۱۲ منحنی سرعت موج فشاری در برابر تعداد تپ در واحد زمان، برای مبدل ۷۵ کیلوهرتزی رسم شده



شکل ۱. نمودار دامنه در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی.



شکل ۱۲. نمودار تکرار تپ در واحد زمان در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۷۵ کیلوهرتزی.



شکل ۱۳. نمودار تکرار تپ در واحد زمان در برابر سرعت موج فشاری برداشت شده با مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی.

۳-۲ تفسیر نتایج

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که سرعت موج فشاری در اثر افزایش نسبت طول به قطر در نمونه تراورتن افزایش می‌یابد. در نسبت طول به قطر ۰/۵، سرعت موج فشاری نسبت به روند کلی داده‌ها دارای تفاوت فاحشی است، این بی‌هنجاری می‌تواند به علت نزدیکی بیش از حد مبدل‌ها به یکدیگر و ایجاد یک خطای سامان‌مند در دستگاه و یا تداخل امواج سطحی در سطوح خارجی نمونه با موج فشاری اولیه باشد. با صرف‌نظر از نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته روی نمونه‌های با نسبت طول به قطر ۰/۵، می‌توان به‌طور کلی روندی را مشاهده کرد که در آن با افزایش نسبت طول به قطر نمونه، سرعت موج فشاری تا حد مشخصی افزایش می‌یابد.

این حد مشخص که پس از آن دیگر با افزایش نسبت طول به قطر نمونه، سرعت موج فشاری در نمونه تغییر نخواهد کرد و ثابت می‌ماند به حجم عنصر معرف (REV) سنگ موسوم است. در خصوص افزایش سرعت موج با

افزایش نسبت طول به قطر نمونه می‌توان گفت که برای یک مبدل مشخص با بسامد معین با توجه به سرعت عبور موج در نمونه، یک طول موج مشخص وجود دارد که در این آزمایش‌ها بین ۲ تا ۴ سانتی‌متر محاسبه می‌شود. به این ترتیب این گونه به‌نظر می‌رسد که سرعت عبور موج در یک نمونه مشخص هنگامی به حداکثر میزان خود می‌رسد که طول نمونه، اجازه پیمایش حداقل یک طول موج کامل را به موج بدهد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ و علم به اینکه با افزایش بسامد موج طول موج کاهش می‌یابد، مشاهده می‌شود که در حالت مبدل ۱۲۵ کیلوهرتزی حداکثر سرعت در طول نمونه کوتاه‌تری نسبت به مبدل ۷۵ کیلوهرتزی حاصل شده است. در بعضی از تحقیقات صورت گرفته سایر محققان روی نمونه‌های سنگی دیگر نیز چنین روندی مشاهده می‌شود؛ هرچند علت واضحی برای آن ذکر نشده است (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶؛ فولادچی و همکاران، ۱۳۸۵).

با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که تا مقدار بسامد مشخصی (بسامد مبدل) روند ارتباط بین سرعت

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه موج، سرعت موج افزایش می‌یابد. این افزایش ابتدا به صورت شدید است و سپس روند تدریجی به خود می‌گیرد. علت این پدیده را می‌توان با افزایش انرژی موج در اثر افزایش دامنه که باعث کرنش‌های کشسان کششی و فشاری شدیدتری در نمونه می‌شوند مرتبط دانست. با توجه به معادله‌های معمولی حرکت موج (رابطه (۱)) به راحتی استنباط می‌شود که در شرایط ثابت بودن همه پارامترها، با افزایش دامنه، سرعت موج افزایش می‌یابد:

$$v(x, t) = A \omega \cos(kx - \omega t - \varphi), \quad (1)$$

که φ فاز، ω بسامد زاویه‌ای، k عدد موج، A دامنه، t زمان، x جابه‌جایی و v سرعت است.

با توجه به تغییرات شیب منحنی در قسمت اول و دوم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت که برای هر نمونه سنگ یک میزان آستانه دامنه موج برای رسیدن موج به حداکثر سرعت نیاز است. با نگاهی به این شکل‌ها مشخص می‌شود که بیشترین سرعت موج فشاری در شرایطی که از مبدل ۷۵ کیلوهرتز استفاده شود، در دامنه موج ۱/۵ ولتی و در شرایطی که از مبدل ۱۲۵ کیلوهرتز استفاده شود، در دامنه موج ۱ ولتی به دست خواهد آمد.

مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به نظر می‌رسد که با افزایش تعداد تپ در واحد زمان، سرعت موج در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. حداکثر مقدار سرعت برای مبدل‌های ۷۵ و ۱۲۵ کیلوهرتز به ترتیب در بازه‌های ۴ تا ۸ و ۲ تا ۸ هرتز اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد علت اصلی این پدیده تقویت ریزتپ‌ها و اثربخشی بیشتر آنها در تشخیص تپ اولیه ارسال و دریافت شده باشد. به هر حال آزمایش‌های بیشتری برای تعیین ارتباط دقیق‌تر بین سرعت موج و تکرار تپ در واحد زمان لازم است.

موج فشاری و افزایش بسامد ابتدا به صورت کاهشی و پس از بسامد مبدل به صورت افزایشی خواهد بود. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ که برای مبدل‌های ۷۵ و ۱۲۵ کیلوهرتز ثابت شده است، مقدار کمینه سرعت موج فشاری در بسامدی که معادل بسامد اسمی مبدل‌ها است، به دست آمده است، یعنی به ترتیب حدود ۷۵ و ۱۲۵ کیلوهرتز.

به طور کلی در بسامدهای کمتر از بسامد آزمایش‌های فراصوتی مشخص شده است که تغییرات این پارامتر تأثیری روی سرعت امواج در نمونه ندارد (اسپنسر، ۱۹۸۱). در حالی که در محدوده بسامدهای فراصوتی با افزایش بسامد اسمی مبدل طول موج کوچک‌تر می‌شود و بنابراین از ابعاد دانه‌های سنگ، منافذ و ریز ترک‌ها اثرپذیری بیشتری خواهد داشت. این عامل سبب می‌شود که پراکندگی و میرایی موج بیشتر و لذا سرعت موج در مبدل‌های با بسامد اسمی بیشتر، کاهش یابد (جامبوناتان، ۲۰۰۸؛ وینکلر، ۱۹۸۳؛ توتونکو و همکاران، ۱۹۹۸).

همان‌گونه که در شکل‌های ۸ و ۹ ملاحظه می‌شود، سرعت موج فشاری با استفاده از مبدل ۷۵ کیلوهرتز برابر ۳۶۵۰ متر بر ثانیه و در شرایط استفاده از مبدل ۲۵ کیلوهرتز ۳۴۲۰ متر بر ثانیه به دست آمده است.

با توجه به مطالب فوق این نکته استنباط می‌شود که مبدل‌هایی که به صورت اسمی ۷۵ و ۱۲۵ کیلوهرتز نامیده شده‌اند، می‌توانند تا این مقدار مشخص، افزایش بسامد را تحمل کنند. به عبارت دیگر تا حداکثر این مقدار بسامد، نتایج با دقت زیادی ثبت می‌شود. اما اگر بسامد از میزان قابل تحمل مبدل بیشتر شود، پراکندگی و نبود دقت در نتایج به وجود خواهد آمد. همان‌طور که در آزمایش‌هایی که پارامتر مورد بررسی بسامد نبوده، از بسامد ثابت ۱۲۵ کیلوهرتز استفاده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که مبدل‌های ۱۲۵ کیلوهرتز در این آزمایش‌ها نتایج دقیق‌تری نسبت به مبدل‌های ۷۵ کیلوهرتز به دست داده‌اند.

۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های صوتی و با کاربرد دستگاہ فراصوتی مولد امواج فشاری روی نمونه‌های سنگ تراورتن صورت گرفت. پارامترهای مورد بررسی نسبت طول به قطر، بسامد موج، دامنه موج و تعداد تپ در واحد زمان بودند. در هر مرحله پارامتر منفرد مورد بررسی، با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در قالب نمودارهایی عرضه شد. از بررسی آزمایش‌های فوق به‌طور کلی مشخص می‌شود که با افزایش نسبت طول به قطر، افزایش دامنه موج و کاهش بسامد، سرعت موج فشاری در نمونه تراورتن افزایش می‌یابد. همچنین سرعت موج فشاری با تغییرات تکرار تپ در واحد زمان در مقدار مشخصی حداکثر می‌شود. برای همه موارد اشاره شده در این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که آزمایش‌های گسترده‌تری صورت گیرد تا نتایج دقیق‌تری از تغییرات سرعت با توجه به تغییرات پارامترهای پیش‌گفته حاصل شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات بی‌دریغ جناب آقای مهندس سید جواد رضویان و سرکار خانم مریم تربتیان در پارک علم و فناوری استان سمنان، آقای مهندس علیرضا منتظر در شرکت NAPTCO و آقای مهندس محمدحسن کریمی در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشند.

منابع

- شماره ۳، ۳۳۳-۳۴۲.
- فولادچی، س.، حسینی، م.، گنجی، م.، ۱۳۸۵، بررسی آزمایشگاهی تاثیر هندسه نمونه بر ویژگی‌های الاستیک دینامیک و استاتیک سنگ آهک نکاء: نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، دوره اول، شماره ۱، ۱-۱۰.
- Al Jarrah, F., 2009, Methods of Fitting Compressional and Shear Wave Velocities Versus Saturation Curves and the Interpretation of Laboratory Velocity Measurements in Partially Saturated Rocks: M.Sc. Thesis, University of Houston.
- ASTM, 2000, ASTM Annual Book of ASTM Standards: Vol 04.08, USA.
- Bahremandi, M., Mirshahanim M., Saemi, M., 2012, Using of compressional-wave and shear-wave velocities ratio in recognition of reservoir fluid contacts case study: A Southwest Iranian oil field: J. Scientific Research and Reviews, 1(2), 15-19,
- Bakhorji, A. M., 2010, Laboratory Measurements of Static and Dynamic Elastic Properties in Carbonate, Ph.D. Thesis, University of Alberta, Department of Physics, Canada.
- Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solids. II. Higher frequency range: J. Acoust. Soc. Am., 28, 179-191.
- Bray, D. E., McBride, D., 1992, Nondestructive Testing Technique, John Wiley and Sons Press, ISBN 0-471 52513-8, New York, USA.
- Chary, K. B., Sarma, L. P., Prasanna Lakshmi, K. J., Vijayakumar, N. A., Naga Lakshmi, V., and Rao, M. V. M. S., 2006, Evaluation of Engineering Properties of Rock Using Ultrasonic Pulse Velocity and Uniaxial Compressive Strength: Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Hyderabad, India, 379-385.
- D'Andrea, D. V., Fischer, R. L., Fogelson, D. E., 1965, Prediction of compressive strength from other rock properties: US
- حسینی، م.، فولادچی، س.، گنجی، م.، ۱۳۸۶، چگونگی تاثیر ابعاد نمونه بر ویژگی‌های الاستیک دینامیک سنگ: نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۴۱،

- ISRM, 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.*, **16**(2), 141–156.
- Jambunathan, V., 2008, Study of Mechanical Properties of Carbonates: M.Sc. Thesis, University of Oklahoma.
- Kahraman, S., 2002, Estimating the direct P-wave velocity value of intact rock from indirect laboratory measurements: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **39**, 101–104.
- Khandelwal, M., Ranjith, P. G., 1996, Correlating index properties of rocks with P-wave measurements: *Ultrasonics*, **34**, 421–423.
- Khandelwala, M., Ranjith, P. G., 2010, Correlating index properties of rocks with P-wave measurements: *J. Appl. Geophys.*, **71**, 1–5
- Knill, T. L., 1970, The application of seismic methods in the interpretation of grout takes in rock: *Proceedings of the Conference on In Situ Investigation in Soils and Rocks*, British Geotechnical Society, London, 93–100.
- Lama, R. D., Vutukuri, V. S., 1978, *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*: 2nd Ed., Trans. Tech. Publications, Switzerland.
- Mix, P. E., 1987, *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*: John Wiley and Sons Press, ISBN 0-471-83126-3, New York, USA.
- Moozar, P. L., 2002, *Non-destructive Appraisal of Paste Backfill*: Ph.D. Thesis, Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal, Canada.
- Onodera, T. F., 1963, Dynamic investigation of foundation rocks, in situ: *Proceedings of the Fifth US Symposium on Rock Mechanics*, Pergamon Press, New York, 517–533.
- Prassianakis, I. N., Kourkoulis S. K., Vardoulakis I., 2000, Marble monuments examination using the NDT method of ultrasounds: 15th WCNDT, Roma.
- Bureau of Mines Report of Investigations, 6702.
- Deere, D. U., Miller, R. P., 1966, Engineering classification and index properties for intact rock: Air Force Weapons Lab. Tech. Report, AFWL-TR 65-116, Kirtland Base, NM.
- Deliormanli A. H., Burlini L., Yavuz A. B., 2007, Anisotropic dynamic elastic properties of Triassic Milas marbles from Mugla region in Turkey: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **44**, 279–288.
- Domenico, S. N., 1974, Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale: *Geophysics*, **39**, 759–769.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L.W., Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density: the diagnostic basis for stratigraphic: *Geophysics*, **39**, 770–780.
- Gassmann, F., 1951, U ber die elastizita t poro sermedien, *Vierteljahrsschrift der Natur forschenden Gesellschaft in Zurich*, **96**, 1–23.
- Gaviglio, P., 1989, Longitudinal waves propagation in a limestone: The relationship between velocity and density: *Rock Mech. Rock Eng.*, **22**, 299–306.
- Gladwin, M. T., 1982, Ultrasonic stress monitoring in underground mining: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **19**, 221–228.
- Green, R. E., 1991, *Introduction to Ultrasonic Testing in: Ultrasonic Testing*: Birks, A. S., Green, R. E., and McIntyre, P., (Eds.), American Society for Nondestructive Testing, Metals Park, Ohio, 1–21.
- Gregory, A. R., 1976, Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks: *Geophysics*, **41**, 895–921.
- Hudson, J. A., Jones, E. T. W., New, B. M., 1980, P-wave velocity measurements in a machine bored chalk tunnels: *Quart. J. Eng. Geol.*, **13**, 33–43.
- Inoue, M., Ohomi, M., 1981, Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock: *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*, Tokyo, 9–13.

- Tutuncu, A. N., Podio, A. L., Gregory, A. R., and Sharma, M. M., 1998, Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part 1, Effect of frequency and strain amplitude: *Geophysics*, **63**(1), 184–194.
- Vanorio T., Prasad M., Patella D., Nur A., 2002, Ultrasonic velocity measurements in volcanic rocks, correlation with microstructure: *Geophysics*, **149**, 22–36.
- Vary, A., 1991, Material Property Characterization in: *Ultrasonic Testing*: Birks, A. S., Green, R. E., and McIntyre, P., (Eds)., American Society for Nondestructive Testing, Metals Park, Ohio, 383–431.
- Vasconcelos, G., Lourenco, P. B., Alves, C. A. S., and Pamplona, J., 2008, Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites: *Ultrasonics*, **48**(5), 453–466..
- Winkler, K. W., 1983, Frequency dependent ultrasonic velocities of high porosity sandstones: *J. Geophysical Res.*, **88**, 9493–9499.
- Youash, Y., 1970, Dynamic physical properties of rocks: Part 2, Experimental result: *Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics*: Beograd, **1**, 185–195.
- Young, R. P., Hill, T. T., Bryan, I. R., Middleton, R., 1985, Seismic spectroscopy in fracture characterization: *Quart. J. Eng. Geol.*, **18**, 459–479.
- Prassianakis, I. N., Prassianakis N. I., 2004, Ultrasonic testing of non-metallic materials, concrete and marble: *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **42**, 191–198.
- Price, D. G., Malone, A.W., Knill, T. L., 1970, The application of seismic methods in the design of rock bolt system: *Proceedings of the First International Congress*, Vol. 2., International Association of Engineering Geology, 740–752.
- Saito, T., Mamoru, A. B. E., Kundri, S., 1974, Study on weathering of igneous rocks: *Rock Mech. Jpn.* **2**, 28–30.
- Sarpün, I. H., Kılıçkaya M. S., 2006, Mean grain size determination in marbles by ultrasonic first backwall echo height measurements: *NDT&E International*, **39**, 82–86.
- Sarpün, I. H., Kılıçkaya M. S., Tuncel S., 2005, Mean grain size determination in marbles by ultrasonic velocity techniques: *NDT& E International*, **38**, 21–25.
- Sharma, P. K., Singh, T. N., 2008, A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength: *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **67**, 17–22.
- Spencer, J. W., 1981, Stress relaxation at low frequencies in fluid saturated rocks, attenuation and modulus dispersion: *Geophysics, Res.*, **86**, 1803–1812.