

اثر تراکم درزه بر سرعت سیر موج طولی

یعقوب زارعی^۱، علی ارومیه‌ای^۲ و محمدرضا نیکودل^۳

^۱دکتر، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۲استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۳دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی اثر تراکم درزه (تعداد و فاصله‌داری) بر سرعت موج طولی در سنگ‌های آذرآواری مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تعیین مشخصات فیزیکی، اندازه‌گیری سرعت موج طولی (Pressure or Longitudinal wave) بر روی نمونه‌های سنگ بکر انجام شد. در ادامه با ایجاد ۱ درزه مصنوعی در نمونه‌ها، آزمون سرعت موج تکرار شد. این عمل تا ایجاد ۵ درزه و با دو آرایش فاصله‌داری ۲ و ۵ سانتی‌متر ادامه یافت و در پایان داده‌های به دست آمده با استفاده از روش آماری تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت موج طولی با افزایش تعداد درزه‌ها در هر دو آرایش فاصله‌داری کاهش یافته است و در این خصوص رابطه خطی معکوسی به دست آمد. با این حال همزمان با افزایش تعداد درزه‌ها، روند کاهشی سرعت موج در دو آرایش فاصله‌داری با هم متفاوت است؛ به گونه‌ای که برای ۱ تا ۳ درزه اول، میزان کاهش سرعت موج در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر بیشتر از فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر می‌باشد؛ اما در تعداد درزه‌های بیشتر از ۳، روند مذکور معکوس شده است. به طور کلی فاصله‌داری کمتر، اثر کاهشی (میرایی) بیشتری بر سرعت موج طولی دارد؛ به گونه‌ای که در مجموع ۵ درزه، میزان کاهش سرعت موج در فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر بیشتر از فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر بوده است.

کلیدواژه‌ها: توده سنگ، تعداد درزه، فاصله‌داری، امواج فراصوتی، سرعت موج طولی، میرایی.

*نویسنده مسئول: یعقوب زارعی

E-mail: zareei@modares.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری با اندازه‌گیری سرعت موج طولی بوده است. El Azhari and El Amrani (2013) نیز بر روی دو سنگ ساختمانی کالکرنایت و مرمر مطالعاتی مبنی بر تأثیر تعداد درزه و زاویه درزه (صفر، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه) بر روی موج طولی انجام دادند. مطالعات آنها نشان داد که با افزایش تعداد درزه سرعت موج کم می‌شود و سرعت موج در زاویه درزه ۴۵ درجه در مقایسه با ۲۵ و ۹۰ درجه مقدار بیشتری نشان می‌دهد.

باید اذعان داشت که تعداد زیادی از پژوهشگران به شناسایی کاربردهای مختلف سرعت موج ورزیدند که به طور مختصر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: سرعت موج در ارزیابی تقویت پیچ‌سنگ (Madenga et al., 2006)، تعیین درجه هوازدگی با استفاده از سرعت موج (Vasconcelos et al., 2008)، بررسی شکستگی، خردشدگی، تخلخل، هوازدگی و نفوذپذیری (Boadu, 1997a, 1997b and 2000)؛ (Vázquez et al., 2010; Abdelaali et al., 2013)؛ ناپیوستگی‌ها در اطراف حفره‌های زیرزمینی (Eitzenberger, 2012; Lee et al., 2009)؛ برآورد مدول تغییر شکل و تنش در توده سنگ (Li and Ma, 2009)، خصوصیات توده سنگ (Guéguen and Schubnel, 2003; Leucci and De Giorgi, 2006)؛ (Liu et al., 2017)؛ ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی (Carrozzo et al., 2008; Yagiz, 2011; Sheraz et al., 2014; Rechlin, 2013)؛ ارزیابی ناهمسانگردی (Kano and Tsuchiya, 2002) و نحوه انتشار موج در سنگ (Watanbe and Sassa, 1995)؛ همچنین عده‌ای از محققین از موج طولی برای برآورد ضخامت هوازدگی در سنگ‌های ساختمانی استفاده کردند (Christaras, 2003)؛ (Vasconcelos et al., 2008)؛ برخی دیگر از پژوهشگران رابطه موج طولی و عرضی را با خصوصیات کانی‌شناسی و نوع کانی‌های سنگ، مقاومت سایشی، اندازه ذرات و سنگدانه‌ها، ویژگی‌های مکانیکی و انرژی ویژه برشی (Ersoy and Atici, 2007)؛ عده‌ای تأثیر دما و ابعاد نمونه را بر سرعت موج (Fener, 2011; Karaman et al., 2015)؛ و بسیاری نیز رابطه موج طولی با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ را مورد بررسی قرار دادند (Sousa et al., 2005; Del Rio et al., 2006)؛ (Khandelwal and Singh, 2009; Khandelwal and Ranjith, 2010)؛ (Onur et al., 2012; Perino and Barla, 2015).

یکی از مؤلفه‌های تعیین‌کننده پارامترهای مهندسی توده سنگ، درزه‌ها هستند که تأثیر مهمی بر سرعت انتشار امواج دارند. با تعیین سرعت سیر موج در توده سنگ و آگاهی از نحوه تأثیر مشخصات درزه بر این سرعت، تخمین دقیق‌تری از کیفیت توده سنگ به دست می‌آید. مطالعات متعددی در خصوص به کارگیری امواج فراصوتی در برآورد خصوصیات مهندسی مواد و یا به عبارتی جهت کشف ارتباط بین پارامترهای مختلف مهندسی مواد و نحوه انتشار امواج صورت گرفته است (Phani, 2007)؛ (Wang et al., 2014; Kurtulus et al., 2016; Mahdevari and Maarefvand, 2017; Potapov and Makhov, 2018; Chawre, 2018)؛ (Kahraman, 2001) تأثیر تعداد درزه را روی سرعت موج طولی در سه سنگ تراورتن، مرمر و گرانیت انجام داد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد درزه سرعت کم می‌شود و سنگ‌هایی که مقاومت بیشتری دارند شاخص سرعت صوت (Sound Velocity Index) بیشتری نشان می‌دهند (Kahraman, 2001). همچنین مطالعاتی جهت بررسی تأثیر زیری درزه‌ها بر سرعت موج طولی انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش سرعت موج طولی با افزایش درجه زبری (FRC) است (Kahraman, 2002; Li et al., 2011 and 2017)؛ (Li and Zhu, 2012; Mohd-Nordin et al., 2014; Chen et al., 2015)؛ (Yasar and Erdogan (2004) بیان کردند که می‌توان مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ و چگالی را در سنگ‌های مختلف با استفاده از سرعت موج طولی و عرضی تخمین زد.

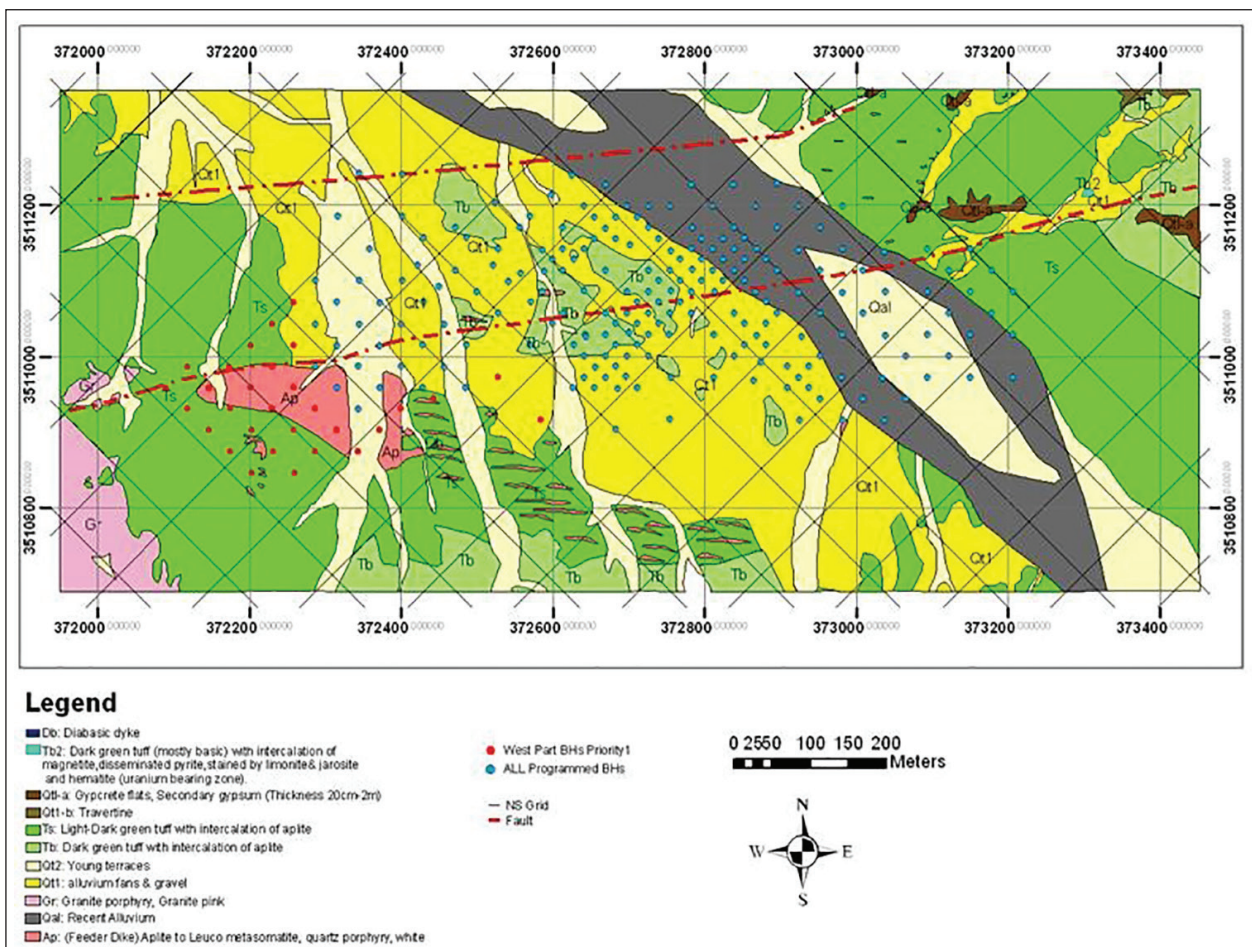
Sharma and Singh (2007) به بررسی ارتباط بین سرعت موج طولی و سه پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص دوام و ارتنگی (Slake durability index) و شاخص مقاومت به ضربه (Impact strength index) بر روی سه نوع سنگ رسوبی، آذرین و دگرگونی پرداختند. در ادامه (Lande and Gadewar (2012) و (Kewalramani and Gupta (2012) با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، مقاومت فشاری تک‌محوری و وجود نقاط ضعیف و حفرات در بتن را با اندازه‌گیری سرعت موج طولی پیش‌بینی کردند. (Altindag (2012) نیز تمامی مطالعات انجام شده بر روی ارتباط بین سرعت موج و خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها را بازبینی کرد و از بین مطالعات انجام شده به تجزیه و تحلیل مطالعات انجام شده بر روی سنگ‌های رسوبی پرداخت. در این تحقیق تأکید وی بیشتر بر

پالئوزوئیک زیرین به خوبی نمود یافته است. اغلب محققان، سنگ‌های آذرین این منطقه را به پرکامبرین پسین و کامبرین نسبت داده‌اند؛ اما بلاغی و همکاران (۱۳۸۹) سن کامبرین - اردوویسین را برای مجموعه توف (بخش فوقانی سری ریزو) و دولومیت قرار گرفته روی آن تعیین نموده‌اند (مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، ۱۳۹۴). پس از بررسی‌های دفتری و بازدید از ساختگاه و انبار کارگاه، حدود ۵۰۰ نمونه سنگ توف همگن از مغزه‌های حاصل از گمانه‌های حفاری شده یا بلوک‌های سنگی در آزمایشگاه بریده و صیقل داده شدند. سطح (سر و ته) نمونه‌ها باید به اندازه‌ای صاف باشد که وقتی ترانسدیوسر دستگاه موج فراصوتی به طور مستقیم روی آن قرار می‌گیرد نتوان صفحه نازکی به ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر را از بین آنها عبور داد. همچنین دو سطح انتهایی نمونه باید کاملاً تخت و با دقت ۱ میلی‌متر در هر ۱۰ سانتی‌متر طول نمونه با هم موازی باشند (Aydin, 2013). طول نمونه‌های استوانه‌ای (مغزه) تهیه شده بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر و قطر آنها ۴۴، ۴۶، ۶۱ و ۶۳ میلی‌متر است. همچنین حدود ۵۰ نمونه از مغزه‌های مربوط به ساختگاه برای انجام بررسی پتروگرافی و آنالیز XRD بریده و آسیاب شدند. مطالعات انجام شده در این خصوص، نشان‌دهنده یک سنگ آذرآواری یا توف (کریستال توف) است که عمده کانی‌های آن را بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز، دولومیت، کلینوکلر، کمی آلکالی فلدسپات و کلسیت تشکیل می‌دهند. (شکل‌های ۳ و ۴).

در خصوص متدولوژی آزمون‌های سرعت صوت باید ذکر کرد که (Amaral et al. 2005) طی پژوهشی آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که نتایج روش رزونانس (فرکانس تشدید) نسبت به روش‌های فراصوتی وابستگی کمتری به زبری سطح و درزه‌ها، اندازه و هندسه نمونه دارد. اگر چه مطالعه توده سنگ با استفاده از سرعت موج فراصوتی توسط محققین زیادی انجام شده است؛ اما برخی از مشخصات توده سنگ می‌بایست همزمان مورد بررسی قرار گیرد. هدف از این تحقیق، ارزیابی اثر تراکم (تعداد و فاصله‌داری) درزه بر سرعت سیر موج طولی است. نتایج این بررسی علاوه بر ارائه روابط تجربی، به تفسیر بهتر نحوه سیر موج فراصوتی در توده سنگ و میزان میرایی آن کمک می‌کند.

۲- نمونه مورد مطالعه

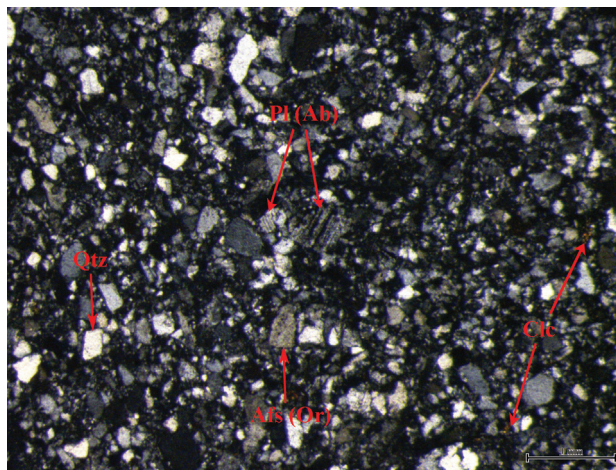
در این پژوهش از سنگ‌های آذرآواری محدوده معدنی نارینگان در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهر بافق یزد (توف‌های سری ریزو) استفاده شده است (شکل‌های ۱ و ۲). محدوده برداشت نمونه‌ها از نظر جایگاه زمین‌شناسی در واحد ایران مرکزی و بلوک پشت بادام و در محدوده فلززایی بافق قرار دارد. از نظر تکنیکی این محدوده در زون آتشفشانی - نفوذی کاشمر کرمان قرار دارد. در منطقه بافق شواهد کافت‌زایی



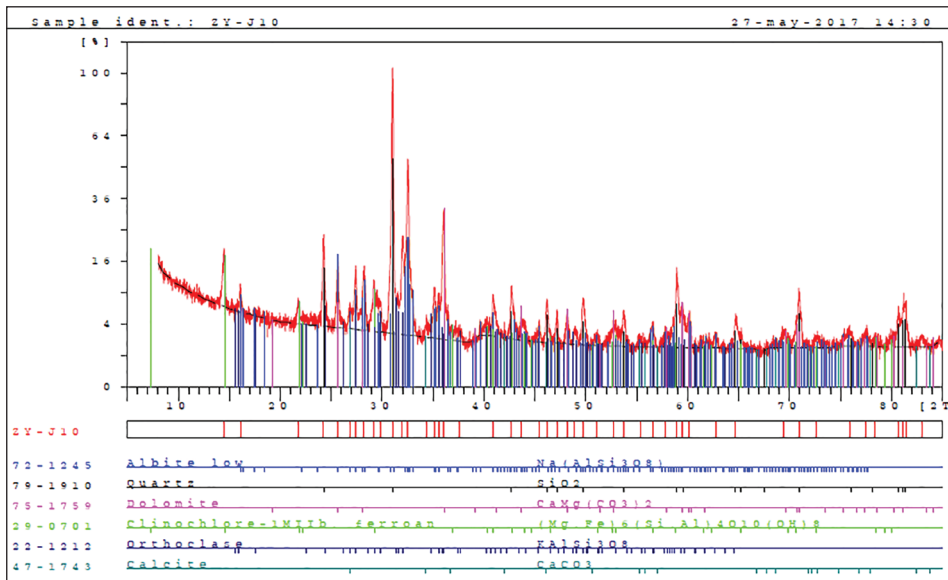
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی همراه با موقعیت محل گمانه‌ها (مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، ۱۳۹۴).



شکل ۲- نمایی از سنگ‌های آذرآواری مورد مطالعه (توف).



شکل ۳- نمای میکروسکوپی از مشخصات سنگ‌شناسی توف مورد مطالعه.



شکل ۴- نتایج آنالیز XRD و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ مورد مطالعه.

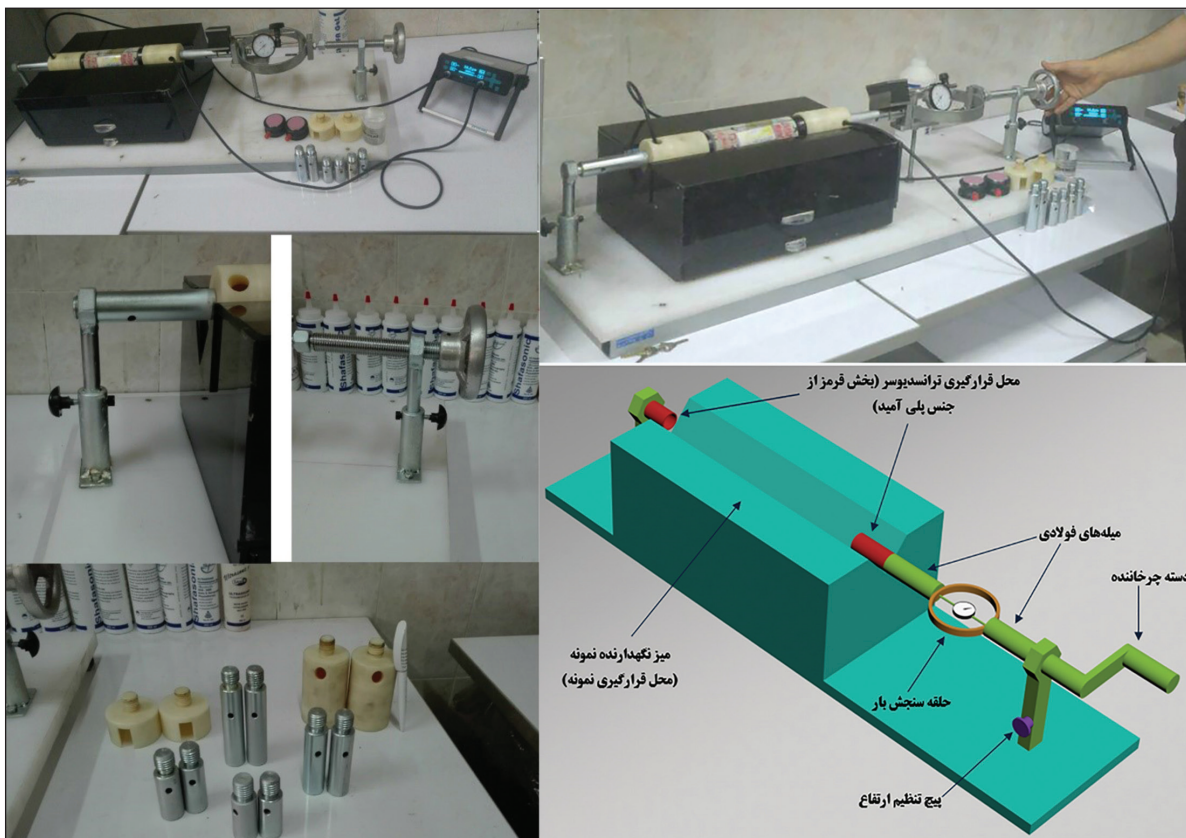
۳- دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فراصوتی

در این تحقیق، از دستگاه پاندیت لب پلاس (Pundit Lab/Pundit Lab+) ساخت کشور سوئیس استفاده شده است که با بسیاری از استانداردهای ارائه شده جهت انجام آزمون موج فراصوتی مطابقت دارد. این دستگاه توانایی اندازه‌گیری سرعت موج فراصوتی طولی و عرضی را دارد. هر جفت ترانسدیوسر (یک فرستنده و یک گیرنده)، که به دستگاه متصل می‌شوند، قابلیت ارسال و دریافت موج فراصوتی با فرکانس‌های اسمی مختلف را دارند. در این بررسی از ترانسدیوسرهای موج طولی با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز استفاده شد. روش اندازه‌گیری سرعت موج به گونه‌ای است که باید ترانسدیوسرها بر روی دو صفحه موازی از یک نمونه سنگ دارای طول مشخص (L) قرار گیرند. پس از ارسال و دریافت پالس، این دستگاه فاصله زمانی (t) بین شروع و دریافت موج را محاسبه می‌کند. این زمان با دقت ۰/۱ میکروثانیه اندازه‌گیری می‌شود. همچنین سرعت موج در نمونه از رابطه ساده ($V = L/t$) توسط دستگاه محاسبه شده و

واحد آن m/s خواهد بود. در شکل ۵ نمایی از دستگاه مذکور نشان داده شده است. همچنین دستگاهی به منظور نگهداری و اعمال فشار اندک (طبق استاندارد آزمون) به نمونه حین انجام آزمایش سرعت صوت طراحی و ساخته شده است. از آنجا که هنگام انجام آزمایش سرعت صوت، باید نمونه‌ها ثابت و بی‌حرکت باشند و همچنین اندکی فشار به آنها وارد شود، پس به منظور جلوگیری از خطاهای انسانی (عدم اعمال فشار ثابت و یکسان ناشی از خستگی اپراتور در گذر زمان و یا تعویض اپراتور، لغزش و حرکت نمونه) این دستگاه فراهم شد که شامل یک میز نگهدارنده، میله‌های فولادی جهت اعمال تنش، یک حلقه سنجش بار و لوازم جانبی دیگر است. در شکل ۶ نمایی از دستگاه مذکور دیده می‌شود. لازم به ذکر است طی آزمون‌هایی مجزا مشخص شد که عدم رعایت شرایط یکسان مکانیکی و کنترل شده مذکور می‌تواند تا ۱۵ درصد خطا در نتایج ایجاد کند.



شکل ۵- نمایی از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج در آزمایشگاه.



شکل ۶- نمایی از دستگاه طراحی و ساخته شده جهت انجام آزمون موج فراصوتی.

۴- روش آزمایش ۴-۱. مراحل آزمایش

فرکانس اسمی ترانسدیوسرها (۵۴ کیلوهرتز) جهت ثبت سرعت موج و کالیبراسیون آن با میله شاخص انجام شد. برای انجام مرحله پایانی این آزمون، اطلاعاتی همچون طول هر نمونه به دستگاه پاندیت لب وارد شد. سپس ترانسدیوسرها با فشاری معادل ۱۰ نیوتن بر سانتی متر مربع (بار محوری توسط میله‌های فولادی و رینگ سنجنده بار) به هر نمونه چسبانده شد و همزمان ارسال و دریافت موج انجام و سرعت موج ثبت گردید (شکل ۶).

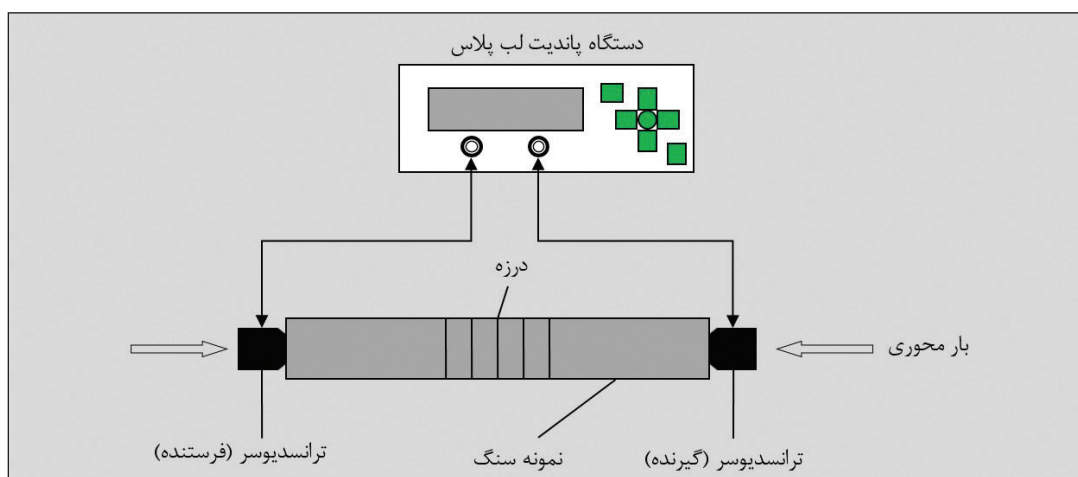
۴-۲. طرح آزمایش

ابتدا آزمون سرعت موج طولی بر روی نمونه‌ها انجام و سپس با ایجاد یک درزه مصنوعی در هر نمونه آزمون موج تکرار شد. به همین ترتیب بعد از ایجاد هر درزه، آزمون سرعت موج تا ایجاد ۵ درزه در هر نمونه ادامه یافت. شایان ذکر است این درزه‌ها با دو آرایش (فاصله‌داری ۲ و ۵ سانتی‌متر) ایجاد شدند. هدف از این کار بررسی همزمان اثر فاصله‌داری و تعداد درزه‌ها بر سرعت موج فراصوتی است (شکل‌های ۷، ۸ و ۹).

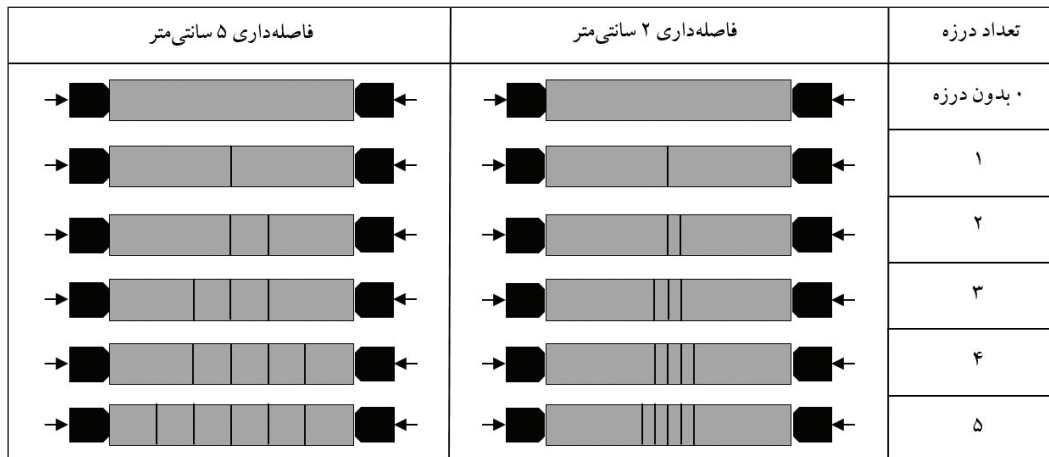
پس از برش و صیقل دادن سر و ته نمونه‌های توف، ابتدا مشخصات فیزیکی آنها طبق استاندارد پیشنهاد شده توسط «انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ» (ISRM) تعیین شد (Franklin et al., 2007). جدول ۱ این مشخصات را نشان می‌دهد. در ادامه نمونه‌های با طول و قطر مشابه و بدون ناپوستگی (جهت ارزیابی بهتر و دقیق‌تر) انتخاب شدند. برای انجام آزمون سرعت موج طولی، هر نمونه بر روی میز نگهدارنده قرار داده و جای‌گذاری ترانسدیوسرها و تنظیم ارتفاع دستگاه با توجه به مرکز نمونه انجام شد. سپس میله‌های فولادی چرخانده شد تا ترانسدیوسرها به دو طرف نمونه کاملاً بچسبند. در این مرحله نیاز است که با توجه به استانداردهای پیشنهاد شده (Rummel and Van Heerden, 1978; ASTM, 2000) جهت انجام آزمون موج فراصوتی بین سر و ته هر نمونه با ترانسدیوسرها به اندازه کافی ژل مخصوص مالیده شود تا از استهلاک احتمالی موج جلوگیری شود و انتقال انرژی به صورت یکنواخت صورت پذیرد. همچنین طبق همین استاندارد، تنظیمات دستگاه «پاندیت لب» با

جدول ۱- مشخصات فیزیکی نمونه سنگی مورد مطالعه.

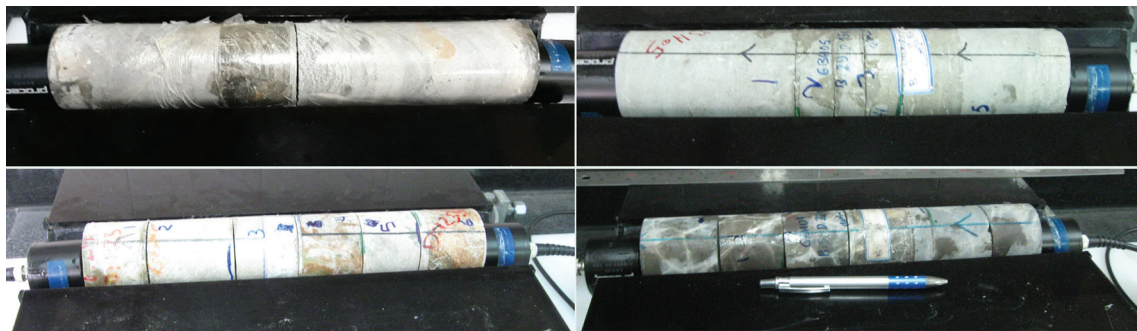
نوع سنگ	نام نمونه	قطر (میلی‌متر)	چگالی خشک (گرم بر سانتی‌متر مربع)	چگالی اشباع (گرم بر سانتی‌متر مربع)	تخلخل (درصد)	درصد جذب آب (درصد)
توف	Sh1	۶۳	۲/۶۱	۲/۶۲	۰/۷۴	۰/۲۸
	Sh2	۶۱	۲/۶۴	۲/۶۵	۰/۵۵	۰/۲۱
	Sh3	۶۱	۲/۵۵	۲/۵۶	۱/۸۶	۰/۷۳
	Sh4	۶۱	۲/۶۳	۲/۶۶	۳/۰۲	۱/۱۵
	Sh5	۶۱	۲/۵۸	۲/۶۰	۱/۸۶	۰/۷۲
	Sh6	۶۱	۲/۶۵	۲/۶۶	۱/۶۹	۰/۶۴
	Sh7	۶۱	۲/۵۸	۲/۵۹	۱/۵۷	۰/۶۱
	Sh8	۶۳	۲/۶۶	۲/۶۷	۰/۶۰	۰/۲۲
	Sh9	۶۱	۲/۶۰	۲/۶۱	۱/۷۴	۰/۶۷
	Sh10	۶۱	۲/۵۷	۲/۶۰	۲/۲۹	۰/۸۹



شکل ۷- نمایی از آزمون سرعت موج فراصوتی در آزمایشگاه.



شکل ۸- افزایش تدریجی درزه‌ها با دو فاصله‌داری ۲ و ۵ سانتی‌متر.



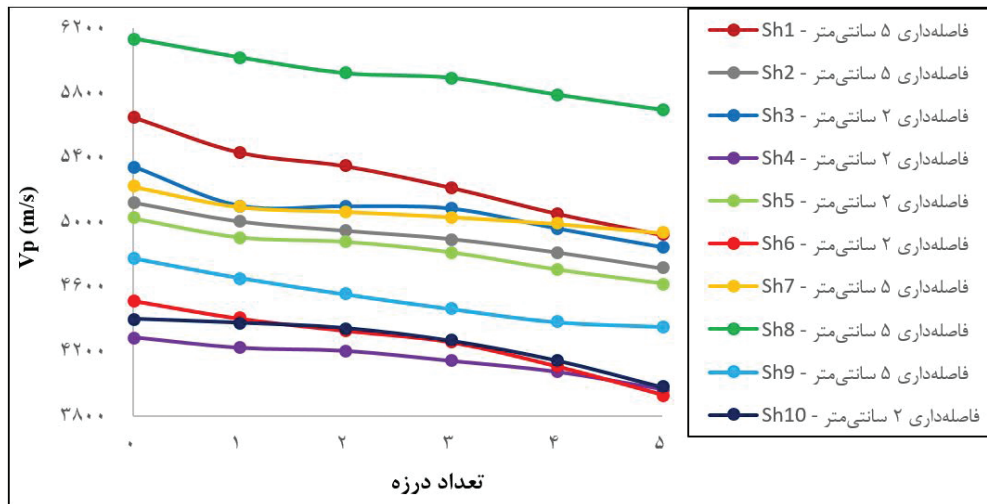
شکل ۹- نمونه‌های درزه‌دار تحت آزمون سرعت موج فراصوتی.

۵- بحث

داده‌های حاصل از آزمون سرعت موج طولی بر نمونه‌های سالم و درزه‌دار توف مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در کلیه نمونه‌ها و در هر دو آرایش فاصله‌داری، با افزایش تعداد درزه‌ها سرعت موج طولی کاهش یافته است. همچنین در نمودار شکل ۱۰، این رابطه خطی معکوس بین تعداد درزه و سرعت موج طولی به خوبی مشاهده می‌شود؛ با این حال همزمان با افزایش تعداد درزه‌ها، روند کاهش سرعت موج در دو آرایش فاصله‌داری با هم متفاوت است؛ به گونه‌ای که برای سه درزه اول، میزان کاهش سرعت موج در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر بیشتر از فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر بوده؛ اما در تعداد درزه‌های بیشتر از ۳، روند مذکور معکوس شده است. به طور کلی فاصله‌داری کمتر، اثر کاهشی (میرایی) بیشتری بر سرعت موج طولی داشته؛ به گونه‌ای که در مجموع ۵ درزه، میزان کاهش سرعت موج در فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر بیشتر از فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر است. همچنین نتایج به دست آمده، با استفاده از روش آماری حداقل مربعات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این روش، همبسته‌سازی داده‌های سرعت موج طولی با تعداد درزه‌های ایجاد شده در نمونه توف مورد مطالعه قرار گرفت و معادله رگرسیون بهینه با ضریب همبستگی (R) حداکثر به دست آمد (جدول ۳).

جدول ۲- سرعت موج فراصوتی در نمونه‌های توف با درزه مصنوعی.

فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر					فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر					تعداد درزه	سرعت موج طولی (متر بر ثانیه)
Sh10	Sh6	Sh5	Sh4	Sh3	Sh9	Sh8	Sh7	Sh2	Sh1		
۴۳۹۹	۴۵۱۲	۵۰۲۴	۴۲۸۵	۵۳۴۴	۴۷۷۶	۶۱۳۵	۵۲۱۸	۵۱۱۸	۵۶۵۰	۰	
۴۳۷۵	۴۴۰۲	۴۹۰۶	۴۲۲۰	۵۱۰۲	۴۶۵۴	۶۰۱۹	۵۰۹۳	۵۰۰۲	۵۴۳۲	۱	
۴۳۴۲	۴۳۲۷	۴۸۷۸	۴۲۰۱	۵۰۹۸	۴۵۵۲	۵۹۲۱	۵۰۶۴	۴۹۴۵	۵۳۴۷	۲	
۴۲۶۴	۴۲۵۶	۴۸۱۳	۴۱۳۹	۵۰۸۴	۴۴۶۱	۵۸۹۲	۵۰۳۱	۴۸۹۴	۵۲۱۴	۳	
۴۱۴۳	۴۱۰۷	۴۷۰۶	۴۰۷۲	۴۹۶۱	۴۳۷۹	۵۷۸۹	۴۹۸۹	۴۸۱۲	۵۰۵۳	۴	
۳۹۷۹	۳۹۳۰	۴۶۱۹	۳۹۶۴	۴۸۴۵	۴۳۵۰	۵۶۹۵	۴۹۳۳	۴۷۱۳	۴۹۲۱	۵	



شکل ۱۰- تغییرات سرعت موج طولی با افزایش تعداد درزه در نمونه‌های سنگ توف.

 جدول ۳- معادله رگرسیون برای سنگ توف مورد مطالعه (سرعت موج طولی: V_p ، تعداد درزه: J_N).

نام نمونه	معادله	ضریب همبستگی R	فاصله‌داری
Sh1	$V_p = -140.43 J_N + 5620.6$	-۰/۹۹	۵ سانتی‌متر
Sh2	$V_p = -75.6 J_N + 5103$	-۰/۹۹	۵ سانتی‌متر
Sh7	$V_p = -50.571 J_N + 5181.1$	-۰/۹۳	۵ سانتی‌متر
Sh8	$V_p = -83.4 J_N + 6117$	-۰/۹۸	۵ سانتی‌متر
Sh9	$V_p = -87.029 J_N + 4746.2$	-۰/۹۷	۵ سانتی‌متر
Sh3	$V_p = -83.771 J_N + 5281.8$	-۰/۸۸	۲ سانتی‌متر
Sh4	$V_p = -60.314 J_N + 4297.6$	-۰/۹۶	۲ سانتی‌متر
Sh5	$V_p = -76.857 J_N + 5016.5$	-۰/۹۸	۲ سانتی‌متر
Sh6	$V_p = -110.46 J_N + 4531.8$	-۰/۹۸	۲ سانتی‌متر
Sh10	$V_p = -82.114 J_N + 4455.6$	-۰/۹۰	۲ سانتی‌متر

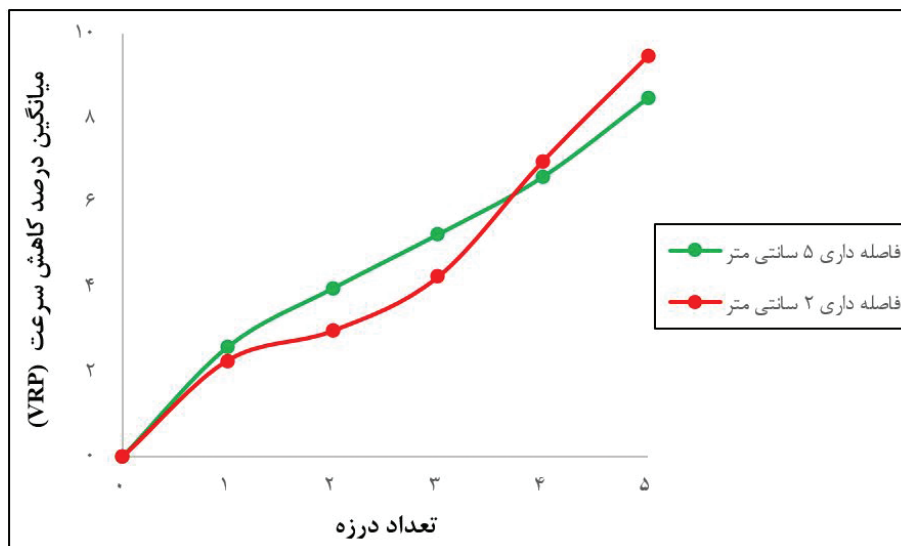
طور محسوسی قابل مشاهده است. علت بروز چنین روندی در کاهش سرعت موج به نحوه رفتار درزه‌ها در فاصله‌داری‌های متفاوت مربوط است؛ به گونه‌ای که در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر، هر درزه به صورت تقریباً مستقل عمل می‌کند و در نتیجه تأثیر هر درزه بر سرعت موج ارتباط چندانی با سایر درزه‌ها ندارد. بنابراین روند VRP از درزه ۱ تا ۵ و با فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر، تقریباً ثابت است. اما با کاهش فاصله‌داری درزه‌ها به ۲ سانتی‌متر و ثابت بودن طول موج مورد استفاده (حدود ۸/۳ سانتی‌متر)، VRP تحت تأثیر دو عامل «افزایش نسبت طول موج به فاصله‌داری» و «تأثیرپذیری درزه‌ها از یکدیگر» قرار می‌گیرد. هر چه نسبت طول موج عبوری به فاصله‌داری درزه‌ها بیشتر شود؛ موج هنگام عبور تأثیرپذیری کمتری از درزه‌ها دارد. بنابراین با کاهش فاصله‌داری درزه‌ها (افزایش نسبت طول موج به فاصله‌داری)، سرعت موج افزایش و VRP کاهش می‌یابد. با این حال به دلیل نزدیکی درزه‌ها در این آرایش فاصله‌داری، تأثیرپذیری درزه‌ها از یکدیگر بیشتر است؛ به نحوی که هنگام برخورد موج به درزه‌ها و متعاقباً انعکاس و انکسار موج در مسیر اندک بین درزه‌ها، احتمالاً تداخل مخربی در موج فراصوتی عبوری ایجاد شده است و در نتیجه منجر به کاهش سرعت موج و افزایش VRP می‌شود. بدیهی است که این تأثیرپذیری درزه‌ها و تداخل موج نسبت مستقیم با افزایش و کاهش تعداد درزه‌ها دارد.

در ادامه جهت مقایسه و تحلیل دقیق‌تر داده‌های حاصل از سناریوهای مختلف آزمون‌های این تحقیق، شاخصی تحت عنوان «درصد کاهش سرعت» (Velocity Reduction Percentage) تعریف شده است که بیان‌کننده میزان کاهش سرعت موج در هر مرحله از نمونه درزه‌دار نسبت به نمونه سنگ بکر است: $VRP = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100$. در این رابطه V_0 و V_1 به ترتیب سرعت موج طولی در نمونه سنگ بکر و درزه‌دار می‌باشد. در جدول ۴ مقادیر VRP با افزایش تعداد درزه‌های هر نمونه آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های با آرایش فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر، با افزایش تعداد درزه‌ها، میزان کاهشی سرعت موج یک روند تقریباً یکنواخت و یکسان طی می‌کند؛ به گونه‌ای که با ایجاد هر درزه، میزان کاهش سرعت تقریباً ثابت بوده و بنابراین هر درزه سهم تقریباً یکسانی از VRP نهایی برای ۵ درزه داشته است. اما در نمونه‌های درزه‌دار با آرایش فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر نتایج کاملاً متفاوت است؛ به نحوی که با ایجاد یک تا سه درزه اول، شیب کاهش سرعت موج نسبتاً اندک بوده اما با ایجاد درزه چهارم و سپس پنجم، سرعت موج افت بیشتری کرده است. بنابراین در مجموع ۵ درزه با فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر، سهم دو درزه آخر در میزان کاهش سرعت موج بیشتر بوده است.

با ترسیم میانگین مقادیر VRP در شکل ۱۱، تحلیل فوق در دو حالت مذکور به

جدول ۴- درصد کاهش سرعت موج فراصوتی با افزایش تعداد درزه‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه.

تعداد درزه	فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر						فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر						
	Sh1	Sh2	Sh7	Sh8	Sh9	میانگین	Sh3	Sh4	Sh5	Sh6	Sh10	میانگین	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۳/۸۶	۲/۲۷	۲/۴۰	۱/۸۹	۲/۵۵	۲/۵۹	۴/۵۳	۱/۵۲	۲/۳۵	۲/۴۴	۰/۵۵	۲/۲۸	۲/۲۸
۲	۵/۳۶	۳/۳۸	۲/۹۵	۳/۴۹	۴/۶۹	۳/۹۷	۴/۶۰	۱/۹۶	۲/۹۱	۴/۱۰	۱/۳۰	۲/۹۷	۲/۹۷
۳	۷/۷۲	۴/۳۹	۳/۵۸	۳/۹۶	۶/۶۰	۵/۲۵	۴/۸۷	۳/۴۱	۴/۲۰	۵/۶۷	۳/۰۷	۴/۲۴	۴/۲۴
۴	۱۰/۵۷	۵/۹۸	۴/۳۹	۵/۶۴	۸/۳۱	۶/۶۱	۷/۱۷	۴/۹۷	۶/۳۳	۸/۹۸	۵/۸۲	۶/۹۸	۶/۹۸
۵	۱۲/۹۰	۷/۹۱	۵/۴۶	۷/۱۷	۸/۹۲	۸/۴۷	۹/۳۴	۷/۴۹	۸/۰۶	۱۲/۹۰	۹/۵۵	۹/۴۷	۹/۴۷



شکل ۱۱- میزان کاهش سرعت موج طولی با افزایش تعداد درزه.

تأثیر مهمی بر سرعت انتشار امواج دارند. تعیین سرعت سیر موج در توده سنگ و آگاهی از نحوه تأثیر مشخصات درزه بر این سرعت، کمک بزرگی به مهندسان و محققان جهت شناسایی ویژگی‌های مهندسی توده سنگ خواهد کرد. در این تحقیق اثر تراکم (تعداد و فاصله‌داری) درزه بر سرعت سیر موج طولی در سنگ‌های آذرآواری (توف) سری ریزو مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا آزمون سرعت موج طولی بر روی نمونه‌ها انجام و سپس با ایجاد یک درزه مصنوعی در هر نمونه، آزمون موج تکرار گردید. به همین ترتیب بعد از ایجاد هر درزه، سرعت موج تا ایجاد ۵ درزه در هر نمونه اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی همزمان اثر فاصله‌داری و تعداد درزه‌ها بر سرعت موج طولی، این درزه‌ها با دو آرایش (فاصله‌داری ۲ و ۵ سانتی‌متر) ایجاد شدند. با مقایسه سرعت‌های موج اندازه‌گیری شده در هر مرحله و تجزیه و تحلیل آنها، موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه‌گیری است:

۱) در فاصله‌داری‌های مختلف، رفتار درزه‌ها نسبت به عبور موج فراصوتی ثابت نیست؛ به گونه‌ای که در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر، هر درزه به صورت تقریباً مستقل عمل می‌کند. اما با کاهش فاصله‌داری درزه‌ها به ۲ سانتی‌متر، میزان کاهش سرعت موج تحت تأثیر دو عامل

همانگونه که بیان شد میزان VRP موج هنگام عبور از درزه‌ها با فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر، همزمان تحت تأثیر دو عامل مذکور قرار دارد. در یک فاصله‌داری معین و با افزایش تعداد درزه‌ها از ۱ تا ۵، سهم عامل اول بر میزان VRP ثابت است (برخلاف عامل دوم). بنابراین سهم دو عامل مذکور در میزان VRP، طی حالت‌های مختلف ۱ تا ۵ درزه برابر نیست؛ به عبارت دیگر از یک تا سه درزه اول، تأثیر عامل اول بیشتر از عامل دوم بوده و برآیند این دو باعث کاهش VRP موج شده است؛ اما با ایجاد درزه چهارم و پنجم، عامل دوم یعنی تأثیرپذیری درزه‌ها و تداخل موج شدت می‌گیرد و از عامل اول بیشتر می‌شود. در نتیجه با ایجاد دو درزه آخر، VRP موج افزایش یافته است. به همین دلیل در یک تا سه درزه اول، میزان VRP در فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر کمتر از فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر بوده؛ اما در تعداد درزه‌های بیشتر از ۳، روند مذکور معکوس شده است.

۶- نتیجه‌گیری

یکی از مؤلفه‌های تعیین‌کننده پارامترهای مهندسی توده سنگ درزه‌ها هستند که

۴) به طور کلی فاصله‌داری کمتر، اثر کاهشی یا میرایی بیشتری بر سرعت موج طولی داشته است؛ به گونه‌ای که در مجموع ۵ درزه میزان کاهش سرعت موج در فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر بیشتر از فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر است.

۵) در پایان پیشنهاد می‌شود مطالعات گسترده‌تری جهت بررسی اثر تعداد درزه‌های بیشتر، فاصله‌داری‌های متفاوت، انواع سنگ، منشأ و پتروگرافی، مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ بر سرعت موج طولی انجام شود تا نتایج دقیق‌تری از تغییرات سرعت با توجه به تغییرات پارامترهای مذکور حاصل شود.

افزایش نسبت طول موج به فاصله‌داری و «تأثیرپذیری درزه‌ها از یکدیگر» قرار می‌گیرد.

۲) یک رابطه خوب خطی (همبستگی معکوس) بین تعداد درزه و سرعت موج طولی وجود دارد.

۳) در هر دو آرایش فاصله‌داری، سرعت موج طولی با افزایش تعداد درزه‌ها کاهش می‌یابد. با این حال روند کاهشی سرعت موج در دو آرایش با هم متفاوت است؛ به گونه‌ای که برای سه درزه اول، میزان کاهش سرعت موج در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر بیشتر از فاصله‌داری ۲ سانتی‌متر است؛ اما در تعداد درزه‌های بیشتر از ۳ نتیجه معکوس شده است.

کتابنگاری

بلاغی، ز.، صادقیان، م. و قاسمی، ح.، ۱۳۸۹- پژوهش‌های آذرین پالئوزئوئیک زیرین جنوب بهاباد (باقی، ایران مرکزی)؛ شاهدهی بر کافت زایی، نشریه پترولوژی، دوره ۱، شماره ۴، صص. ۶۴ تا ۴۵

مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، ۱۳۹۴- گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی محدوده معدنی نارینگان. ص ۲۷.

References

- Abdelaali, R., Abderrahim, B., Mohamed, B., Yves, G., Abderrahim, S., Mimoun, H. and Jamal, S. 2013- Prediction of Porosity and Density of Calcarenite Rocks from P-Wave Velocity Measurements. *International Journal of Geosciences*, 4, 1292-1299. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.49124>.
- Altindag, R., 2012- Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks. *The journal of the southern African institute of mining and metallurgy*, vol. 112, pp. 229-227. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532012000300014.
- Amaral, P. M., Rosa, L. G. and Fernandes, J. C., 2005- Experimental evaluation of dynamic test methodologies for assessing the elastic constants of granitic rocks. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 24(4), pp. 135-142. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-005-8781-y>.
- ASTM, 2000- Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. ASTM International, West Conshohocken, PA, D2845-00, www.astm.org.
- Aydin, A., 2013- Upgraded ISRM suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique. In *the ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pp. 95-99). Springer, Cham. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-013-0454-z>.
- Boadu, F. K., 1997a- Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*. vol. 36, pp. 1-19. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985197000086>.
- Boadu, F. K., 1997b- Relating the hydraulic properties of a fractured rock mass to seismic attributes: Theory and numerical experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(6), pp. 885-895. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160997800020>.
- Boadu, F. K., 2000- Predicting the transport properties of fractured rocks from seismic information: numerical experiments. *Journal of applied geophysics*, 44(2), pp. 103-113. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985199000208>.
- Carrozzo, M. T., Leucci, G., Margiotta, S., Mazzone, F. and Negri, S., 2008- Integrated geophysical and geological investigations applied to sedimentary rock mass characterization. *Annals of Geophysics*. VOL. 51, N. 1. <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3044>.
- Chawre, B., 2018- Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(3), pp.594-602. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775517301592>.
- Chen, X., Li, J. C., Cai, M. F., Zou, Y. and Zhao, J., 2015- Experimental study on wave propagation across a rock joint with rough surface. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(6), pp.2225-2234. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-015-0716-z>.

- Christaras, B., 2003- P-wave velocity and quality of building materials. In Proceeding of IAEG, International Symposium Industrial Mineral and Building Stones, Istanbul Technical University, pp. 295-300. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/cambridge/GES/GES06.pdf>.
- Del Rio, L. M., Lopez, F., Esteban, F. J., Tejado, J. J., Mota, M., González, I., San Emeterio, J. L. and Ramos, A., 2006- Ultrasonic Characterization of Granites obtained from Industrial Quarries of Extremadura (Spain). *Ultrasonics*, Vol. 44: e1057-e1061. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16814343>.
- Eitzenberger, A., 2012- Wave Propagation in Rock and the Influence of Discontinuities. PhD thesis, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Lulea University of technology, Sweden, pp. 9-13, 46-52, 79-85, 96-107, 125-131, 152-159, 179-180. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990707/FULLTEXT01.pdf>.
- El Azhari, H. and El Hassani, I. E. E. A., 2013- Effect of the number and orientation of fractures on the P-wave velocity diminution: application on the building stones of the Rabat Area (Morocco). *Geomaterials*, 3(03), p.71. <https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=34584>.
- Ercikdi, B., Karaman, K., Cihangir, F., Yılmaz, T., Aliyazıcıoğlu, Ş. and Kesimal, A., 2016- Core size effect on the dry and saturated ultrasonic pulse velocity of limestone samples. *Ultrasonics*, 72, pp.143-149. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X16301391>.
- Ersoy, A. and Atici, U., 2007- Correlation of P and S-waves with cutting specific energy and dominant properties of volcanic and carbonate rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 40.5, pp. 491-504. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-006-0111-x>.
- Fener, M. 2011- The effect of rock sample dimension on the P-wave velocity. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 30(2), pp. 99-105. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-011-0095-7>.
- Franklin, J. A., Vogler, U. W., Szlavins, J., Edmond, J. M. and Bieniawski, Z. T., 2007- Suggested methods for determining water-content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring; 1974-2006. 83-88. <https://www.researchgate.net/publication/313163862>.
- Guéguen, Y. and Schubnel, A. 2003- Elastic wave velocities and permeability of cracked rocks. *Tectonophysics* 370.1. pp. 163-176. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195103001847>.
- Kahraman, S., 2001- A Correlation between P-Wave Velocity, Number of Joints and Schmidt Hammer Rebound Number. *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (5), pp. 729-733. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136516090100034X>.
- Kahraman, S., 2002- The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Engineering Geology*, 63(3), 347-350. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795201000898>.
- Kano, S. and Tsuchiya, N., 2002- Parallelepiped cooling joint and anisotropy of P-wave velocity in the Takidani granitoid, Japan Alps. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 114: 465-477. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027301003018>.
- Karaman, K., Kaya, A. and Kesimal, A., 2015- Effect of the specimen length on ultrasonic P-wave velocity in some volcanic rocks and limestones. *Journal of African Earth Sciences*, 112, pp. 142-149. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X15300698>.
- Kewalramani, M. A. and Gupta, R., 2006- Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. *Automation in Construction* 15.3 pp. 374-379. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580505000968>.
- Khandelwal, M. and Ranjith, P. G., 2010- Correlating Index Properties of Rocks with P-Wave Measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 71(1), pp. 1-5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092698511000025X>.
- Khandelwal, M. and Singh, T. N., 2009- Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity. *International Journal of Coal Geology* 79.1 pp. 55-60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516209000159>.
- Kurtulus, C., Cakir, S. and Yoğurtcuoğlu, A., 2016- Ultrasound Study of Limestone Rock Physical and Mechanical Properties. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52(6). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11204-016-9352-1>.
- Lande, P. S. and Gadewar, A. S., 2012- Application of artificial neural networks in prediction of compressive strength of concrete by using ultrasonic pulse velocities, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 3(1), pp. 34-42. <https://pdfs.semanticscholar.org/4588/5a2532f75bfbcd69af4fa3dbd37affd28ef.pdf>.
- Lee, I. M., Truong, Q. H., Kim, D. H. and Lee, J. S., 2009- Discontinuity detection ahead of a tunnel face utilizing ultrasonic reflection: Laboratory scale application. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), pp.155-163. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779808000618>.

- Leucci, G. and De Giorgi, L., 2006- Experimental studies on the effects of fracture on the P and S wave velocity propagation in sedimentary rock (Calcarenite del Salento). *Engineering Geology*, 84(3), pp. 130-142. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795205003285>
- Li, J. C. and Ma, G. W., 2009- Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), pp. 471-478. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160908001767>.
- Li, J. C., Li, N. N., Li, H. B. and Zhao, J., 2017- An SHPB test study on wave propagation across rock masses with different contact area ratios of joint. *International Journal of Impact Engineering*, 105, pp.109-116. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X16310892>.
- Li, Y. and Zhu, Z., 2012- Study on the velocity of P waves across a single joint based on fractal and damage theory. *Engineering Geology*, 151, pp. 82-88. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795212002682>.
- Li, Y., Zhu, Z., Li, B., Deng, J. and Xie, H., 2011- Study on the transmission and reflection of stress waves across joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), pp. 364-371. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160911000037>.
- Liu, T., Li, J., Li, H., Li, X., Zheng, Y. and Liu, H., 2017- Experimental Study of S-wave Propagation through a Filled Rock Joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(10), pp.2645-2657. <https://www.springerprofessional.de/en/experimental-study-of-s-wave-propagation-through-a-filled-rock-j/12447440>.
- Madenga, V., Zou, D. H. and Zhang, C., 2006- Effects of curing time and frequency on ultrasonic wave velocity in grouted rock bolts. *Journal of applied geophysics* 59.1 pp. 79-87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985105000790>.
- Mahdevari, S. and Maarefvand, P., 2017- Applying ultrasonic waves to evaluate the volumetric block proportion of bimrocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(9), p.204. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-017-2999-8>.
- Mohd-Nordin, M. M., Song, K. I., Cho, G. C. and Mohamed, Z., 2014- Long-Wavelength Elastic Wave Propagation Across Naturally Fractured Rock Masses. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(2), pp. 561-573. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-013-0448-x>.
- Onur, A. H., Bakraç, S. and Karakuş, D., 2012- Ultrasonic waves in mining application. In *Ultrasonic Waves*. InTech. <http://www.intechopen.com/books>. pp. 180- 209.
- Perino, A. and Barla, G., 2015- Resonant Column Apparatus Tests on Intact and Jointed Rock Specimens with Numerical Modelling Validation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(1), pp. 197-211. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-014-0564-2>.
- Phani, K. K., 2007- Estimation of elastic properties of porous ceramic using ultrasonic longitudinal wave velocity only. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(7), pp.2165-2171. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1551-2916.2007.01736.x>.
- Potapov, A. I. and Makhov, V. E., 2018- Experimental Ultrasonic Study of the Elastic Modulus of Glass Fiber Plastics in Constructions. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 54(1), pp.1-16. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1061830918010060>.
- Rechlin, A. J., 2013- Rock-mass classification in tunneling based on seismic velocities and tunnel-driving data using support vector machines. PhD thesis, Department of Earth Sciences, Freie University of Berlin. <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/10776?show=full>.
- Rummel, F. and Van Heerden, W. L., 1978- ISRM Suggested methods for determining sound velocity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. *Geomech. Abstr.* 15, 53-58. <https://www.isrm.net/>.
- Sharma, P. K. and Singh, T. N., 2007- A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol 67, pp. 17-22. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-007-0109-y>.
- Sheraz, A. M., Emad, M. Z., Shahzad, M. and Arshad, S. M., 2014- Relation between uniaxial compressive strength, point load index and sonic wave velocity for dolorite. *Pakistan Journal of Science*, 66 (1), pp. 60-66. <http://www.paas.com.pk/pjs.php>.
- Sousa, L. M., Del Río, L. M. S., Calleja, L., De Argandona, V. G. R. and Rey, A. R., 2005- Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77(1), pp. 153-168. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795204002200>.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Alves, C. A. S. and Pamplona, J., 2008- Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48(5), pp. 453-466. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X08000334>.
- Vázquez, P., Alonso, F. J., Esbert, R. M., and Ordaz, J., 2010- Ornamental granites: relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network. *Construction and Building Materials*, 24(12), pp. 2536-2541. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810002515>.

- Wang, Y., Xu, X. and Yang, D., 2014- Ultrasonic elastic characteristics of five kinds of metamorphic deformed coals under room temperature and pressure conditions. *Science China Earth Sciences*, 57(9), pp. 2208-2216. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-014-4922-4>.
- Watanbe, T. and Sassa, K., 1995- Velocity and amplitude of P-waves transmitted through fractured zones composed of multiple thin low velocity layers. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 32, pp. 313-324. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906295000085>.
- Yagiz S, 2011- P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials. *Bull. Mater. Sci.*, 34(4), pp. 947-953. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12034-011-0220-3>.
- Yasar, E. and Erdogan, Y., 2004- Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, pp. 871-875. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136516090400019X>.

The effect of joint density on P-wave velocity

Y. Zarei^{1*}, A. Uromeihy² and M. R. Nikoodel³

¹Ph.D., Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2018 October 05

Accepted: 2019 April 10

Abstract

In this laboratory study, the effect of joint density (number and spacing) on the pressure wave velocity was researched in pyroclastic rocks. After determining the physical properties, the P-wave velocities of intact rock samples were measured. Then, an artificial joint perpendicular to the measuring direction was created in each sample, and the wave velocity tests were repeated. These tests were continued up to 5 joints with two sets of 2 and 5 cm spacing. Consequently, the data were analyzed using the statistical methods. The results show that the P-wave velocity was decreased by increasing the number of joints in both spacing sets, and thus an inverse linear relationship was obtained. However, as the number of joints increases, the reduction rates of wave velocity were different at two spacing sets. More precisely, up to 3 joints, the reduction rate in the 5 cm spacing set was more than that in the other set. Nonetheless, after the third joint, the decreasing rate in the 2 cm spacing set became greater. Generally, the shorter spacing had a more reduction (attenuation) in the P-wave velocity. In this regard, at a total of 5 joints, the reduction rate of the P-wave velocity in 2 cm spacing set was more than that in the other set.

Keywords: Rock mass, Number of joints, Spacing, Ultrasonic waves, P-wave velocity, Attenuation.

For Persian Version see pages 151 to 162

*Corresponding author: Y. Zarei; E-mail: zarei@modares.ac.ir