

تأثیر ناهمسانگردی تنش بر سرعت موج فشاری در سنگ‌های آندزیتی و ماسه سنگ

میثم صادقی^۱، یاسر جعفریان^{۲*}، شاهرخ پوربیرانوند^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
۲. دانشیار و هیأت علمی گروه مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
۳. استادیار و هیأت علمی گروه زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

*yjafarianm@iices.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

فشار و دمای بسیار زیاد اعماق پوسته زمین منجر به ایجاد گسستگی در سنگ‌ها و پدید آمدن ریز درزها در آنها می‌شود. دسترسی مستقیم به سنگ‌های پوسته زمین در اعماق زیاد بسیار پرهزینه بوده و در بیشتر موارد ناممکن است. مطالعه وضعیت سنگ‌ها در عمق زیاد بیشتر با استفاده از روش‌های غیرمستقیم همچون امواج لرزه‌ای انجام می‌گیرد. نتایج این پژوهش‌ها با نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی سرعت عبور امواج در سنگ‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و شرایط سنگ‌ها شبیه‌سازی می‌شود. در عمق زیاد فشار هیدروستاتیک بر سنگ‌های پوسته زمین اعمال می‌شود و تنش‌های تکتونیکی و تنش‌های امواج زلزله و غیره، موجب ناهمسانگردی آن می‌شود. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی تغییرات سرعت عبور موج فشاری به دلیل تغییر وضعیت تنش فشاری در سنگ است.

ابتدا مغزه استوانه‌ای از سنگ‌های مختلف با نسبت طول به قطر ۲ به ۲/۵ مطابق با روش آزمون استاندارد (ASTM D4543) آماده شده و ابعاد و وزن آنها تعیین می‌شود. پس از تعیین مقاومت فشاری تک محوری مغزه‌های سنگ مطابق با روش آزمون استاندارد (ASTM D2938)، فشار هیدروستاتیک معادل ۵۰ تا ۹۵ درصد آن بر مغزه‌های استوانه‌ای سنگ تهیه شده از زمین اعمال می‌شود. این فشار با استفاده از سلول هوک (فشار جانبی) و دستگاه اعمال فشار محوری بر نمونه وارد شده و با استفاده از دستگاه اولتراسونیک، سرعت عبور موج فشاری (پالس اولتراسونیک) مطابق با روش آزمون استاندارد (ASTM D2845) در جهت محوری نمونه تعیین می‌شود. سپس با کاهش فشار جانبی (افزایش تنش انحرافی) به صورت پلکانی، در هر مرحله سرعت عبور موج از مغزه‌های سنگی اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه نمودارهای مقایسه‌ای سرعت عبور موج فشاری (V_p) با چگالی (ρ_d)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و اثر تنش هیدروستاتیک (σ_{hyd}) و تنش انحرافی (σ_{dev}) بر سرعت عبور موج فشاری در هر یک از نمونه‌ها ترسیم می‌شود. نتایج بدست آمده نشان دهنده روابط خطی میان سرعت موج فشاری و ویژگیهای فیزیکی نمونه‌های سنگ هستند، همچنین سرعت عبور موج فشاری در بالاترین فشار هیدروستاتیک بیشینه بوده و با کاهش فشار جانبی (افزایش تنش انحرافی)، سرعت عبور موج نیز کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ناهمسانگردی تنش، اولتراسونیک، آزمایش سه محوری سنگ، سرعت موج فشاری، نمونه استوانه ای سنگ

۱. مقدمه

در سطح و در اعماق کم پوسته زمین، بیشتر سنگ‌ها رفتار الاستیک دارند در حالی که در اعماق زیاد پوسته زمین تحت تأثیر گرما و فشار بسیار زیاد، گسستگی در مرز بین ذرات تشکیل دهنده سنگ‌ها افزایش یافته و منجر به رفتار پلاستیک سنگ‌ها می‌شود که این تغییرات در ویژگی‌های سنگ‌ها بر سرعت امواج لرزه‌ای عبوری از آنها اثر می‌گذارد.

وضعیت تنش در پوسته تا عمق ۳ کیلومتری توسط براون و هوک [8] و همچنین بردی و براون [7] و تا عمق ۹ کیلومتری نیز توسط ژانگ و استفانسون [13] مورد مطالعه قرار گرفته است، که نتایج پژوهش‌های آنها نشان می‌دهد تنش عمودی و تنش‌های افقی تحت شرایط هیدروستاتیک و وزن سنگ‌های بالایی در اعماق بیش از ۳ کیلومتر، تقریباً با هم برابر می‌شوند.

چگونگی توزیع غیر یکنواخت تنش کششی در یک نمونه استوانه‌ای سنگ تحت تنش فشاری تک محوری به صورت خطوط هم تنش نیز توسط هاوکز و ملور [11] مدل‌سازی شده است. این خطوط با استفاده از رابطه مک لیتوک-والش^۱ به دست آمده است. این مدل‌سازی نشان می‌دهد که تحت تأثیر فشار تک محوری، بیشترین تمرکز تنش کششی در کناره‌های سطوح انتهایی و همچنین در نزدیکی مرکز نمونه استوانه‌ای سنگ ایجاد شده که منجر به شکست مخروطی در آن می‌شود.

توزیع تنش در نمونه استوانه‌ای سنگ با نسبت طول به قطر ۲ به ۱ تحت تنش فشاری سه محوری توسط کوت و همکارانش [15] به صورت خطوط هم تنش تعیین شده است. خطوط تنش نشان می‌دهد که تمام نمونه در حین بارگذاری تحت تنش فشاری قرار دارد.

ارتباط سرعت موج فشاری با ویژگی‌های فیزیکی از جمله چگالی و مقاومت فشاری تک محوری سنگ توسط طغرل و ظریف [19]، یاشار و اردوغان [22]، یاقیز [21]، ساری [17] و تعداد دیگری از پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته و روابطی برای آنها ارائه شده است که بیشتر این روابط خطی

است. با در نظر گرفتن سنگ‌هایی با مقاومت فشاری در محدوده کمتر از ۲۵ مگاپاسکال و سرعت موج فشاری کمتر از 3km/s، این روابط به صورت روابط نمایی توسط گوپتا و همکاران [10] ارائه شده است.

همچنین تأثیر زاویه درزه‌ها بر سرعت موج فشاری نیز توسط نورانی و همکاران [12] و عباس و همکاران [2] بررسی شده و نتایج نشان می‌دهد که عمود بر جهت انتشار موج با افزایش تعداد درزه‌ها سرعت موج کاهش یافته و با کاهش زاویه نسبت به جهت انتشار موج نیز سرعت موج افزایش می‌یابد به شکلی که بیشترین سرعت موج در حالتی است که درزه‌ها هم راستا با جهت انتشار موج باشند.

مطالعه تأثیر دما بر سرعت موج توسط اعیانی و همکاران [1] نیز نشان داد که با افزایش دما سرعت موج فشاری کاهش می‌یابد.

تغییرات سرعت موج فشاری نیز توسط ژانگ و ژائویی [20] مورد مطالعه قرار گرفته و داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که در مراحل اولیه بارگذاری، سرعت موج فشاری به دلیل بسته شدن درزه‌ها افزایش یافته و با رسیدن سنگ تحت تنش به شرایط الاستیک افزایش سرعت با شیب ملایم‌تری اتفاق می‌افتد و در نهایت با نزدیک شدن تنش اعمالی به نقطه شکست سنگ افزایش سرعت به دلیل گسترش ریزدرزه‌ها متوقف شده و کاهش می‌یابد (شکل ۱).

شکل ۱. سرعت موج فشاری به تنش تک محوری در یک نمونه سنگ گنیس (ژانگ و ژائویی، ۲۰۱۶)

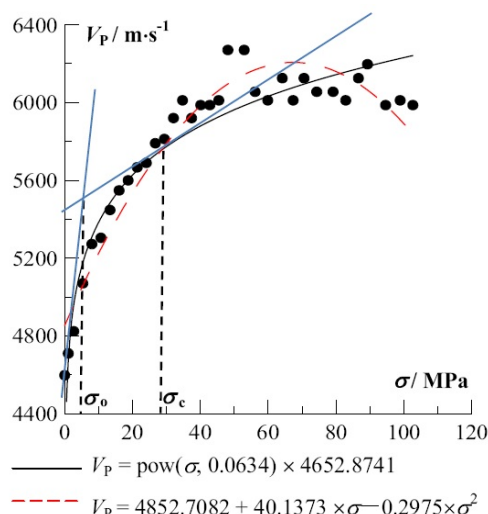


Fig. 1. P wave velocity-stress curves of gneiss rock (Xiang & Zhaoyi, 2016).

1. McLintoch-Walsh equation

۲. روش تحقیق

در این پژوهش تلاش بر این بوده که انواع مختلف سنگ (آذرین و رسوبی) مورد آزمایش قرار گیرد، بر همین مبنا با توجه به در دسترس بودن سنگ‌ها و همینطور شرایط تجهیزات مورد استفاده و لزوم پژوهش سه نوع سنگ آذرین بیرونی (ریز بلور) و یک نمونه ماسه سنگ تهیه شده است. ماسه سنگ از معدن روته دماوند (D) و سنگ‌های آذرین شامل آندزیت معدن پرند (P)، تراکی آندزیت سد بعثت زنجان (Z)، لایت معدن شترکوه قزوین (Q) تهیه شده‌اند. شکل (۲) موقعیت جغرافیایی تقریبی محل تهیه نمونه‌های سنگ را در نقشه ایران نشان می‌دهد.

شکل ۲. موقعیت جغرافیایی محل تهیه نمونه‌های سنگ در نقشه ایران



Fig. 2. Sampling locations in the Iran map

ماسه سنگ‌ها از دانه‌های تخریبی که پیکره اصلی رسوب را تشکیل می‌دهند، ماتریکس دانه ریز واقع در بین دانه‌ها، کانی‌های درجا و سیمان‌هایی که بعد از رسوبگذاری رسوبات و در هنگام عمل دپازن ته نشین شده‌اند، تشکیل شده است. قطعاتی از هر نوع سنگ شناخته شده می‌تواند به عنوان دانه در یک رسوب آواری یافت شود.

بلوک‌های ماسه سنگ از معدن روته با مختصات جغرافیایی $35^{\circ}57'50.02''N$, $51^{\circ}31'32.86''E$ در شمال شرق تهران تهیه شده و رنگ آن قرمز بوده و از نظر زمین شناسی متعلق به سازندهای زایگون و لالون از دوران

پرکامبرین است. مطالعه مقطع نازک میکروسکوپی آن نشان می‌دهد که دانه‌های تشکیل دهنده آن بیشتر شامل کوارتز و پلاژیوکلاز با گردشگی ضعیف و جورشدگی متوسط همراه با سیمان کربناته بوده و فاقد آثار فسیلی است. این سنگ‌ها به عنوان سنگ لاشه ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۳).

شکل ۳. مطالعه مقطع نازک نمونه D-7 (ماسه سنگ آرکوزی): تصویر میکروسکوپی مربوط به ماسه سنگ با سیمان کربناته، (Q) کوارتز، نور پلاریزه، تصویر A: بزرگنمایی 5x؛ تصویر B: بزرگنمایی 10x.

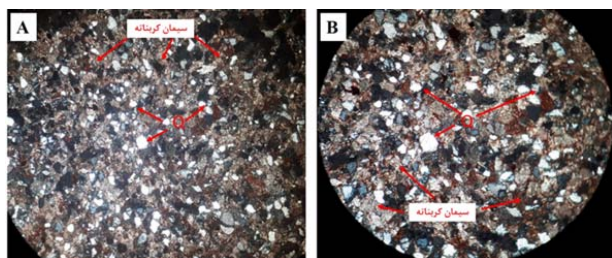


Fig. 3. Thin section study of sample D-7 (arkosic wac): Microscopic image of Sandstone with carbonate cement, (Q) quartz, polarized, image A: (5x), image B: (10x).

سنگ‌های آذرین خروجی یا آتشفشانی حد واسط (آندزیت، تراکی آندزیت و لایت): آندزیت‌ها پس از بازالت‌ها فراوان‌ترین سنگ‌های آتشفشانی هستند. آندزیت‌ها دارای بافتی متنوع هستند. اغلب پورفیریک و دارای خمیره میکرولیتی و میکرولیتی شیشه‌ای هستند. کانی‌های اصلی آندزیت‌ها، پلاژیوکلازها هستند که ترکیبی در حد آندزین دارند. پلاژیوکلاز همیشه هم به صورت فنوکریست و هم در خمیره یافت می‌شود. سایر کانی‌ها در آندزیت عبارتند از آمفیبول، بیوتیت، پیروکسن که اغلب به صورت فنوکریست در سنگ یافت می‌شود. در خمیره آندزیت اغلب پلاژیوکلاز، دانه‌های ریز بیوتیت، کوارتز و کانی‌های اپک یافت می‌شوند. آلکالی فلدسپات معمولاً در آندزیت‌ها حضور ندارد و اگر باشد میزان آن کمتر از ۱۰ درصد کل فلدسپات‌های سنگ می‌باشد و معمولاً در خمیره آنها یافت می‌شود.

سنگ لایت آتشفشانی کاملاً شبیه به سنگ آندزیت و بازالت آتشفشانی است با این تفاوت که میزان فلدسپار غنی از پتاسیم در لایت بیشتر است.

اصلی تشکیل دهنده این سنگ هستند که در زمینه میکرولیتی (کانی‌های میکرولیتی فلدسپار) قرار گرفته اند. کوارتز و کانی‌های اپک به صورت کانی‌های فرعی حضور دارند. بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز تا حدودی دگرسان شده‌اند. بافت سنگ هیالومیکریتی پورفیریک است و دگرسانی سوسوریتی شدن را تحمل کرده است (شکل ۵).

شکل ۵. تشریح میکروسکوپی نمونه شماره P-1 (آندزیت): تصویر A: بافت هیالو میکرولیتی پورفیریک در آندزیت با بلورهای پلاژیوکلاز (PL) و کلینوپروکسن (Cp)، کانی اپک (O)، نور معمولی، تصویر B: نور پلاریزه، بزرگنمایی 5x.

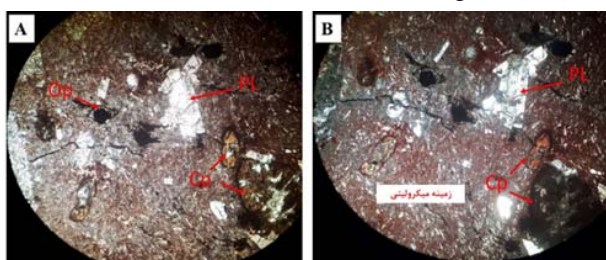


Fig. 5. Thin section study of sample P-1 (Andesite): image A: Porphyric hyalomicrolytic Fissure in andesite with plagioclase crystals (PL) and clinopyroxene (Cp), opac mineral (O), natural (right), image B: polarized, (5x).

معدن شترکوه قزوین (Q) در مختصات جغرافیایی $36^{\circ}07'12.63''N$, $49^{\circ}24'42.04''E$ قرار داشته سنگ‌های آن از نوع لایتیت و دارای رنگ خاکستری روشن است. این سنگ‌ها متعلق به سازند کرج از دوره اتوسن هستند. بررسی نمونه دستی و مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک نمونه نشان می‌دهد که بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز پتاسیم دار و کوارتز کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این سنگ است که در زمینه میکروگرانولار (کانی‌های پلاژیوکلاز و کوارتز) قرار گرفته‌اند. بافت سنگ پورفیریک است و دگرسانی سریستی را تحمل کرده است که در آن کانی‌های پلاژیوکلاز به انواع کانی‌های رسی از جمله اپیدوت دگرسان شده‌اند. کانی‌های اپک به صورت کانی‌های فرعی در زمینه سنگ حضور دارند (شکل ۶).

سد بعثت زنجان (Z) در مختصات جغرافیایی $36^{\circ}58'54''N$, $48^{\circ}25'29''E$ قرار داشته و مغزه‌های تهیه شده آن از نوع آندزیت و تراکی آندزیت به رنگ سیاه و از نظر زمین شناسی متعلق به سازند کرج دوره اتوسن است. مطالعه مقاطع نازک نمونه سد بعثت نشان می‌دهد که نوع این سنگ (کوارتز) تراکی آندزیت برشیه و به شدت اپیدوتیزه با بافت پورفیریتیک است که در آن فنوکریست و بیشتر میکروفنوکریستال‌های پلاژیوکلاز با ترکیب متوسط (حدود آندزین) که بیشتر بی‌شکل است و در آنها علاوه بر ماکل‌گاه تجزیه به اپیدوت دیده می‌شود. در زمینه ریز و نهان‌بلور هم فلدسپار بی‌شکل قلیایی، سیلیس ری کریستاله و گاه بلورهای ریز کوارتز، کانی‌های اپیدوتی خیلی ریز، کمی کربنات بی-شکل و کانی‌های کدر اکسید آهن یافت می‌شود (شکل ۴).

شکل ۴. مطالعه مقطع نازک نمونه Z-1 (تراکی آندزیت اپیدوتیزه شده): میکروفنوکریستال‌های پلاژیوکلاز که در برخی نقاط تجزیه شده به اپیدوت در زمینه ریز و نهان بلور فلدسپار بی‌شکل و کوارتز ریز (نور طبیعی: راست، نور پلاریزه: چپ)، (5x).

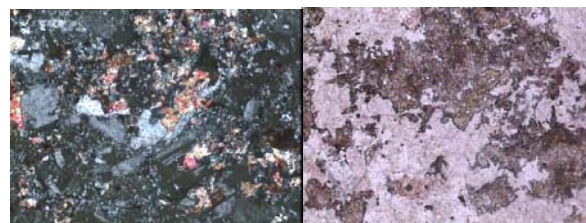


Fig. 4. Thin section study of sample Z-1 (Epidotized trachyandesite): Plagioclase microphenocrystals, which in some places decompose into epidote in the field of fine and latent amorphous feldspar crystals and fine quartz, natural (right), polarized (left), (5x).

معدن پرند (P) در مختصات جغرافیایی $35^{\circ}30'01.88''N$, $51^{\circ}06'39.14''E$ قرار داشته بلوک‌های سنگ آن به رنگ قرمز گوشتی از نوع آندزیت و از نظر زمین شناسی متعلق به سازند کرج از دوره اتوسن است. بررسی نمونه دستی و مقاطع نازک تهیه شده از این نمونه نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از نوع آذرین خروجی با ترکیب حد واسط متمایل به بازیک و شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و کلینوپروکسن که در یک خمیره شیشه‌ای و میکرولیتیک قرار دارند. بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز و پیروکسن کانی‌های

شکل ۸. تجهیزات اندازه‌گیری سرعت پالس اولتراسونیک در سنگ، کالیبراسیون با استفاده از سرعت موج فشاری در هوا (c)، میله کالیبراسیون (b)، کالیبراسیون با استفاده از میله کالیبره (a)، نمودار زمان سیر پالس اولتراسونیک عبوری از هوا (e)، نمودار زمان سیر پالس اولتراسونیک عبوری از میله کالیبره (d).

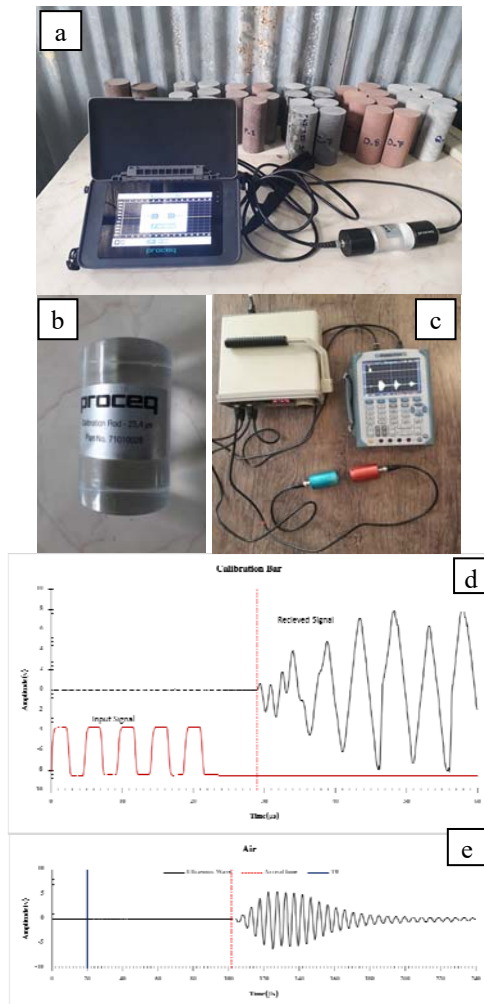


Fig. 8. Ultrasonic pulse velocity measuring equipment in rock, Calibration using compression wave velocity in air (c), calibration rod (b), Calibration using the calibration rod (a), Ultrasonic pulse travel time diagram of air (e), Ultrasonic pulse travel time diagram passing through a calibrated rod (d).

برای اعمال تنش سه بعدی به نمونه‌های استوانه‌ای سنگ از جک هیدرولیک (تنش محوری) و سلول سه محوری سنگ (تنش جانبی) استفاده شده و سنسورهای ارسال و دریافت کننده امواج صوتی در صفحات بارگذاری بالا و پایین نمونه تعبیه شده و همزمان با اعمال تنش، موج عبوری در تنش‌های مختلف نیز ثبت شد و روابط مربوط به نسبت سرعت موج فشاری به تنش هیدروستاتیک و تنش انحرافی ترسیم شد (شکل ۹).

شکل ۶. مطالعه مقطع نازک نمونه Q-3 (لاتیت): تصویر A: بافت پورفیریک در لاتیت با بلورهای پلاژیوکلاز (PL)، نور معمولی، بزرگنمایی 10x؛ تصویر B: نور پلاریزه، بزرگنمایی 5x.

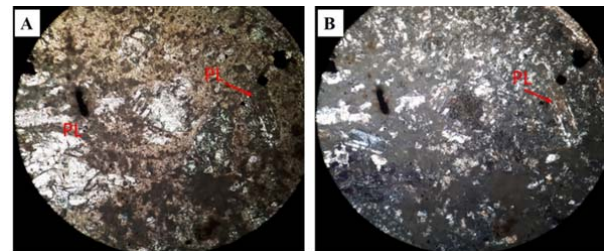


Fig. 6. Thin section study of sample Q-3 (Latite): image A: Porphyritic Fissure in latite with plagioclase crystals (PL), natural (right) (10x), image B: polarized, (5x).

نمونه‌های سنگ آندزیت (P)، تراکی آندزیت (Z)، لاتیت (Q) و ماسه سنگ (D) از بلوک‌های سنگی مناسب مغزه‌گیری و مطابق با روش استاندارد ASTM D4543 آماده، و وزن و ابعاد آنها اندازه‌گیری شد (شکل ۷).

شکل ۷. مغزه‌گیری و اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌های آماده شده (بالا)، نمونه‌های استوانه‌ای آماده شده: تراکی آندزیت زنجان (Z)، آندزیت پرند (P)، لاتیت قزوین (Q) و ماسه سنگ دماوند (D) (پایین).



Fig. 7. Coring and measuring the dimensions of the prepared samples (up), Cylindrical specimens prepared: zanjan trachyandesite (Z), parand andesite (P), Qazvin latite (Q), Damavand sandstone (D), (down).

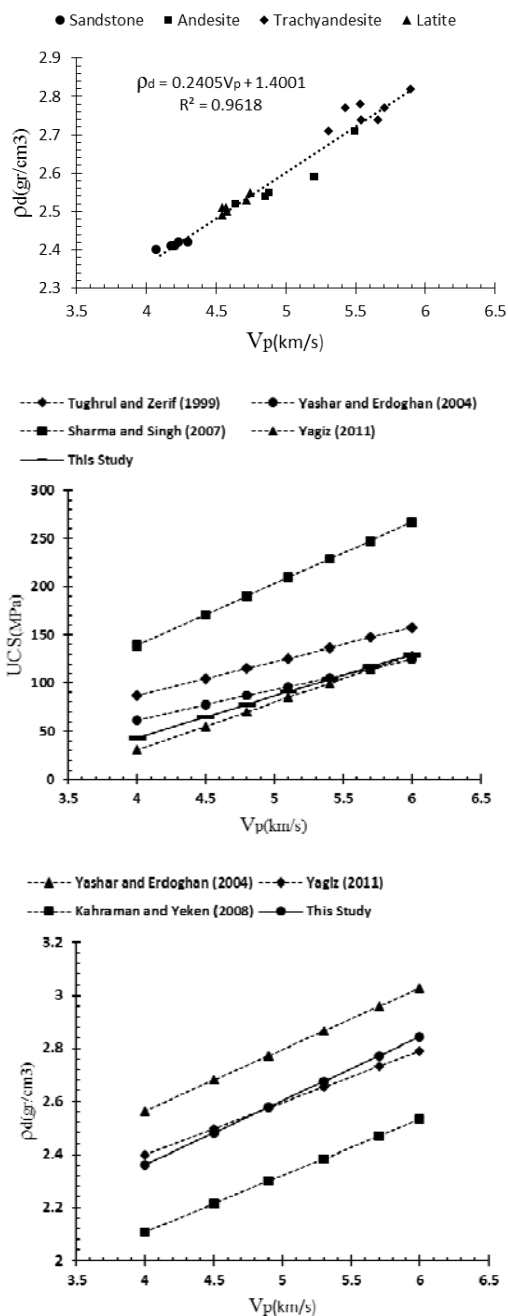


Fig. 10. Comparison of the obtained results with previous researches; ρ_{dry} , UCS vs V_p .

در ادامه فشار همه جانبه را به صورت پلکانی تا رسیدن به ۵۰ مگاپاسکال افزایش داده و در هر مرحله سرعت موج اندازه‌گیری شد. سپس به صورت پلکانی فشار جانبی را کاهش داده و در هر مرحله سرعت موج اندازه‌گیری، و منحنی‌های زمان سیر مربوطه ترسیم شدند (شکل ۱۱).

شکل ۹. دستگاه‌های اعمال فشار سه محوری و تعیین سرعت موج فشاری (بالا)، شکل شماتیک تعیین سرعت موج فشاری نمونه تحت فشار محوری و جانبی (پایین).

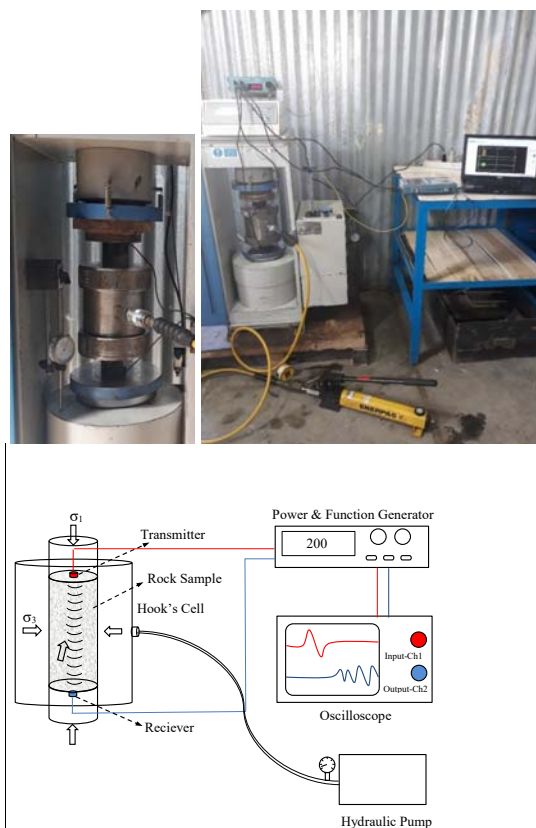
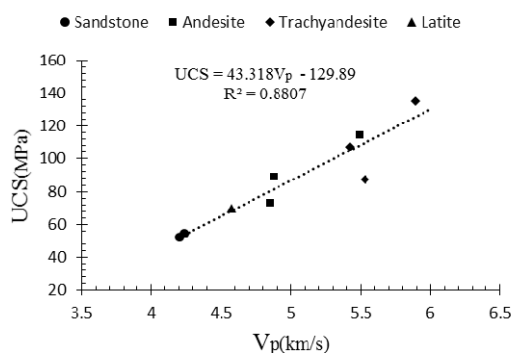


Fig. 9. Triaxial pressure load and P wave velocity determination equipment (up), Schematic figure for determining the P wave velocity of sample under axial and lateral pressure (down).

۳. نتایج

در ابتدا سرعت موج فشاری برای هر یک از نمونه‌ها بدون اعمال فشار اندازه‌گیری شده و با ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های مربوطه مقایسه شدند (شکل ۱۰).

شکل ۱۰. مقایسه نتایج به دست آمده با پژوهش‌های پیشین: (V_p) با (UCS)، چگالی خشک (ρ_d).



شکل ۱۱. نمودار مقایسه زمان سیر در مقادیر متفاوت تنش انحرافی در نمونه های D-1, P-2, Q-6 و Z-5

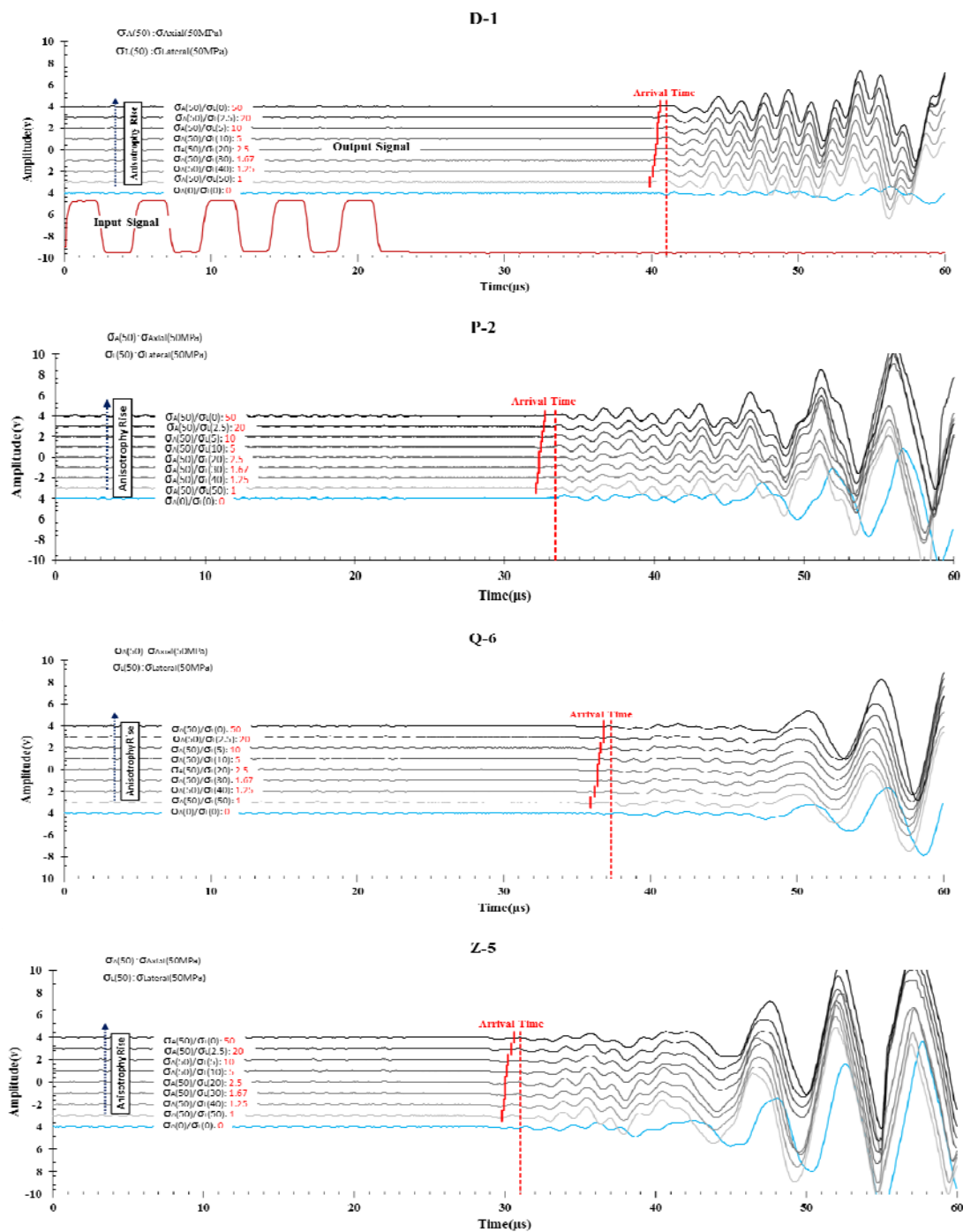
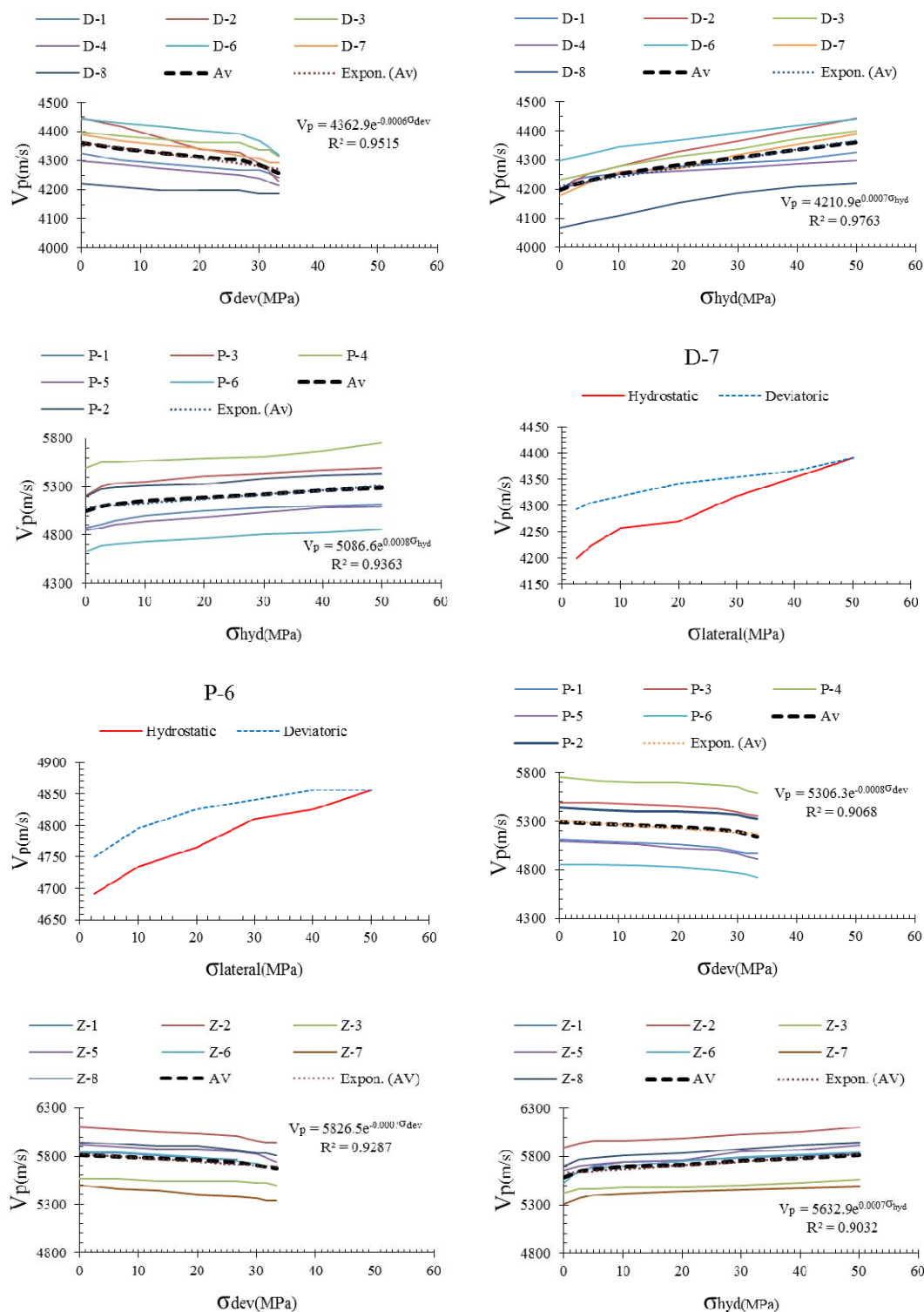


Fig. 11. comparison diagram of P wave travel time at different deviatoric stresses in samples D-1, P-2, Q-6 and Z-5.

شکل ۱۲. نمودار نسبت سرعت موج فشاری (V_p) به تنش جانبی (چپ) و تنش انحرافی (وسط) و تنش هیدروستاتیک (راست) برای نمونه های ماسه سنگ (D)، آندزیت (P)، تراکی آندزیت (Z) و لایت (Q).



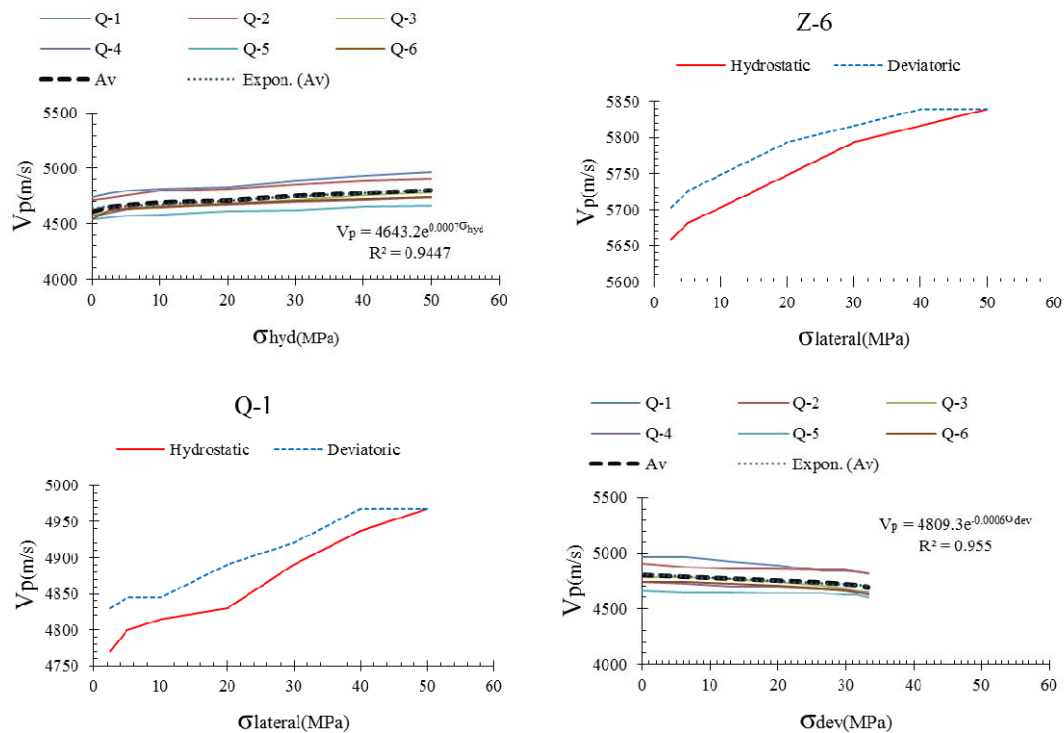


Fig. 12. Relationship between the V_p and lateral stress (σ_{lateral}), deviatoric stress (σ_{dev}), hydrostatic stress (σ_{hyd}) in rock cores of sandstone (D), andesite (P), trachyandesite (Z) and latite (Q).

جدول ۱. روابط میان V_p با ρ_d ، UCS، E_t ، ν

Researchers	Equations	R^2	Rock Type/ Lithology
Tughrul and Zarif (1999)	$UCS = 35.54V_p - 55$	0.۶۴	Igneous rocks
Yashar and Erdoghan (2004)	$UCS = (V_p - 2.0195)/0.032$ $\rho = (V_p + 7.707)/4.318$	0.۶۶ 0.۶۴	Lime, marble, dolomite
Sharma and Singh (2008)	$UCS = 0.0642V_p - 117.99$	0.۸۱	7 types of rocks
Kahraman and Yeken (2008)	$\rho = 0.213V_p + 1.256$	0.۶۷	Carbonate rocks
Yagiz (2011)	$UCS = 0.258V_p^{3.543}$ $UCS = 49.4V_p - 167$ $\rho = 0.19V_p + 1.61$ $E = 20.1V_p - 53$	0.۸۵ 0.۷۹ 0.۳۴	9 types of rocks
This study	$UCS = 43.318V_p - 129.9$ $\rho_d = 0.2405V_p + 1.4$ $E_t = 5.432V_p - 11.343$ $\nu = 0.093V_p + 0.7158$	0.88 ۰.۹۶ 0.9۲ 0.9۴	۴ types of rocks

Table1. Relationship between V_p with γ_d , UCS, E_t , ν

فشاری با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و در سنگ‌های با مقاومت فشاری بالاتر از ۸۰ مگاپاسکال آهنگ کاهش سرعت تغییر نمی‌کند.

۱۲. مراجع

- [1] Ayani M., Honarvar F. & Shabani R. 2015 Study of variations of longitudinal and transverse ultrasonic wave velocity with changes in temperature. Modares Mechanical Engineering, 16(2), 199-205, (In Persian).
- [2] Abbass H. A., Mohamed Z., Yasir S. F. 2020 A review methods, techniques and approaches on investigation of rock anisotropy. American Institute of Physics Conference Proceedings, 020012, , 1-8.
- [3] Akai K. 1971 The failure surface of isotropic and anisotropic rocks under multiaxial stresses J. Soc, Mater. Sci., Japan (20), 122-128.
- [4] Attwell P. B. & Farmer I. W. 1993 Principles of engineering geology. Chapman & Hall, London.
- [5] Bieniawski Z. T. 1967 Stability concept of brittle fracture propagation in rock. Eng. Geol., 2, 149-162.
- [6] Bieniawski Z. T. 1967 Mechanism of brittle fracture of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 4, 395-430.
- [7] Brady B. H. G., Brown E. T. 2004 Rock mechanics: for underground mining. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, London, 3rd.
- [8] Brown E. T., Hoek E. 1978 Trends in relationships between measured in situ stresses and depth. Int., J., Rock Mech, Min., Sci., Geomech., Abstr., 15, 211-215.
- [9] Fahimifar A., Soroush H. 2001 Rock mechanic tests; theoretical aspects and standards, Vol 1, Laboratory Tests, (In Persian).
- [10] Gupta S., Kumar D., Bandyopadhyay A., Gupta S. L. 2018 Implications of correlations for sandstone. Int., J., Inn., Res., Sci., Tech., 4(9), 50-60.
- [11] Hawkes I., Mellor M. 1970 Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. Eng. Geol., 4, 177-285
- [12] Hemmati Nourani M. R., Yar Ahmadi Bafghi A. R. Ghorbani A. 2017 Sensitivity analysis of discontinuity properties in

UCS: مقاومت فشاری تک محوری (محدود نشده): ρ , چگالی: V_p , سرعت موج فشاری: E_t , مدول یانگ: ν , مدول پواسون نتایج برازش خطوط نمودارهای مربوطه برای مولفه‌های فیزیکی و تنش و مقایسه آنها با نتایج پژوهش‌های سایر پژوهشگران در جدول ۱ آمده است.

۵. جمع بندی

با تحلیل نتایج و نمودارهای ترسیم شده از آزمایشهای نمونه‌های استوانه‌ای سنگ و بدون در نظر گرفتن شرایط درزه‌ها و گسیختگی‌ها و همچنین حفرات موجود در نمونه‌ها در این پژوهش می‌توان نتایج زیر را فهمید داده‌های حاصل از آزمایش نمونه‌های سنگی نشان دهنده افزایش سرعت موج فشاری با افزایش چگالی، افزایش مقاومت فشاری تک محوری است. میان روابط خطی ارائه شده در این پژوهش با روابط ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر هماهنگی نسبی وجود دارد.

تحلیل نمودارهای نسبت سرعت موج فشاری به تنش هیدروستاتیک نشان می‌دهد که در فشار هیدروستاتیک تا ۱۰ مگاپاسکال افزایش سرعت موج با شیب بیشتری رخ می‌دهد (ناشی از بسته شدن درزه‌های سنگ) و در ادامه در فشار هیدروستاتیک تا ۴۰ مگاپاسکال شیب افزایش سرعت موج ملایم‌تر می‌شود که احتمالاً نشان دهنده قرارگیری سنگ در شرایط الاستیک است. با افزایش فشار هیدروستاتیک بیش از ۴۰ مگاپاسکال در سنگ‌هایی که مقاومت فشاری تک محوری آنها بیش از ۹۰ مگاپاسکال است، آهنگ افزایش سرعت موج فشاری بیشتر می‌شود.

تحلیل نمودارهای رابطه سرعت موج فشاری با تنش انحرافی نشان می‌دهد که با کاهش فشار جانبی (افزایش تنش انحرافی) تا فشارهای کمتر از ۱۰ مگاپاسکال سرعت موج فشاری ثابت بوده و یا با کاهش بسیار اندکی همراه است. در ادامه با افزایش تنش انحرافی تا ۳۰ مگاپاسکال، آهنگ کاهش سرعت بیشتر شده و با شیب تقریباً یکنواخت ادامه می‌یابد، با افزایش تنش انحرافی به بیش از ۳۰ مگاپاسکال در نمونه‌های با مقاومت فشاری کمتر از ۸۰ مگاپاسکال سرعت موج

- [21] Yagiz S. 2011 P-wave Velocity test for assessment of Geotechnical properties of some rock materials. *Bull. Mater. Sci.*, 34(4), 947-953.
- [22] Yashar E., Erdoghan Y. 2004 Correlating sound velocity with the density, compressive strength and young's modulus of carbonate rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 871-875.

Stress Anisotropy Effect on Compressional Wave Velocity of Andesite and Sandstone

M. Sadeghi¹, Y. Jafarian^{2*}, Sh. Pourbeyranvand³

1. M.s. Student, Department of Seismology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES), Tehran, Iran
2. Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES), Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Seismological Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES), Tehran, Iran

- elastic wave propagation in rock mass with using the discrete element method. *Iranian Journal of Mining Engineering* , 12(35), 75-89, (In Persian).
- [13] Jang A. & Stephansson O. 2009 Stress field of earth's crust, 89-91, 226-231.12.
- [14] Johnson R. B. & Deraff J. V. 1988 Principles of engineering geology. John Wiley & Sons, USA.
- [15] Kotte J. J., Berczes Z. G., Gramberg J. & Seldenrath Th. R. 1969 Stress-Strain relation and breakage of cylindrical granitic rock specimens under uniaxial and triaxial loads. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 6(6), 581-595.
- [16] Sano O., Ito I. & Terada M. 1981 Influence of strain rate on dilatancy and strength of oshima granite under uniaxial compression. *J. Geophysics. Res.*, 86(10), 9299-9311.
- [17] Sari M. 2018 Investigating relationship between engineering properties of various rock types. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, 5, 1-25.
- [18] Sharma Pk., Sing Tn. 2008 A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67, 17-22.
- [19] Tughrul A., Zarif H. 1999 Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *J. Eng. Geol.* 51, 303-317.
- [20] Xiang C., Zhaoyi Xu. 2016 The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application. *Bull. Eng. Geol. Environ.* DOI: 10.1007/s10064-016-0866-6.

Abstract

High pressure and temperature in the earth's crust lead to fracture and microcracks in rocks. Direct access to earth crust rocks at great depths is very costly and, in most cases, impossible. The study of the condition of rocks at great depths is often done using indirect methods such as seismic waves. The results of these studies are compared with the results of laboratory studies of wave velocities in different rocks and the conditions of the rocks are simulated. At high depths, hydrostatic stress is applied to the rocks of the earth's crust, and tectonic, earthquake and other stresses cause it to be anisotropic. The primary purpose of this study is to investigate the change in compressive wave velocity due to the change in compressive stress in rocks. At first, a cylindrical core of different stones with a length to diameter ratio of 2 to 2.5 is prepared according to the standard test method (ASTM D4543) and their dimensions and weight are determined. after measuring the unconfined compressive strength of cores according to the standard test method (ASTM D2938), the hydrostatic pressure of 50% to 95% of it is applied to the rock samples prepared from the earth. This pressure is applied to the cores by using the Hoek cell (for lateral pressure) and the axial load machine and

using an ultrasonic device, determine the compressive wave velocity (ultrasonic pulse) is determined according to the standard test method (ASTM D2845) in the axial direction of the sample. Then, the wave velocity was measured by decreasing the lateral pressure (increasing deviatoric stress) in a stepwise manner and the wave velocity was measured at each step. In the following, comparative diagrams of compressive wave velocity (V_p) with density (ρ_d), uniaxial compressive strength (UCS) and the effect of hydrostatic stress (σ_{hyd}) and deviatoric stress (σ_{dev}) on P-wave velocity in each sample are drawn. The results show linear relationships between compressive wave velocity and the physical properties of rock samples. Also, the P-wave velocity at hydrostatic pressure is the highest and as the lateral pressure decreases (increasing the deviatoric stress), the velocity also decreases.

Keywords: Stress Anisotropy, Ultrasonic, Rock Triaxial Test, Compressive Wave Velocity, Rock Core Sample