

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

برآورد رابطه تجربی سرعت امواج صوتی با سطح تنش وارد بر سنگ

نگارنده: مرضیه سادات دشتی خویدکی

استاد راهنما:

دکتر سید محمداسماعیل جلالی

استاد مشاور:

مهندس نادر زیاری

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۹۵/۱۷۹۵/۹۴
 تاریخ: ۱۰/۷/۹۵
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مرضیه سادات دشتی خویدکی به شماره دانشجویی ۹۲۱۵۹۴۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکتئیک سنگ تحت عنوان برآورد رابطه تجربی بین سرعت امواج صوتی و سطح تنش وارد بر سنگ که در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی - امتیاز ۱۹) دفاع مجدد مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱ عالی (۲۰ - ۱۹) ✓

۴- قابل قبول (۱۵ - ۱۴/۹۹)

۲- خوب (۱۷ - ۱۶/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	۱- استاد راهنمای اول
		مهندس نادر زبیری	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر اسفند عزیز	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر مهدی نوروزی	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر شکرالله زارع	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

۹۵/۷/۱۰

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



پیشکش به:

تو فرشته ی زمینی روزگار ، مادر گرانقدرم
و به پیشگاه مقدس و فداکار ارجمند تو ، پدر

تقدیم به:

برای عمر احمد ، برای یاری های گام به گامش در پیشبرد اهدافم
و به جوهر ماندگار زندگی خواهر؛ عاطفه، باران و فرزانه عزیزم

تشکر و قدردانی

با سپاس از حمایت های دو گوهر گرانبهای زندگی پدر و مادر مهربانم

سپاس فراوان از محضر آموزنده ی استاد دکتر جلالی

و قدردانی از حضور گرم خواهران جانم و برادرم که در تمامی مراحل مشوق و همراهم بودند

تقدیر از مشاور یاری گر مهندس زیاری برای کمک به پیشبرد پروژه تحقیقاتی ام

سپاس از همگامان زندگی در لحظات شادی و غم؛ دوستان عزیزم مهسا مهدوی راد، لیلا فلاحی زاده،

منصوره عسکری، مهسا رخبر، افسانه سلطانی و فاطمه آقاجانی

از همیاری مهندسان گرامی سمانه یاره، مهدی مقیمی و پویا مرادی کمال تشکر را دارم.

و در آخر قدردانی از همدلی و کمک های بی دریغ آقای مهندس افتخاری و آقای قنبری مسوولین دفتر

ریاست پارک علم و فناوری استان سمنان و زحمات آقای شاه حسینی که در رفع مشکلات دانشجویان

فروگذار نمی کنند.

تعهدنامه

اینجانب مرضیه سادات دشتی خویدکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان برآورد رابطه تجربی بین سرعت و سطح تنش وارد بر سنگ و راهنمایی آقای دکتر سید محمداسماعیل جلالی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

تمامی مراحل یک پروژه عمرانی یا معدنی از جمله طراحی، ساخت، تحلیل و برقراری پایداری، نگهداری و پیش بینی شکست بر اساس خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده و یا بستر پروژه انجام می‌شود. بنابراین اهمیت اطلاع دقیق از خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ یا مصالح عمرانی امری بدیهی است. به دلیل مشکلات تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در آزمایشگاه یا به صورت برجا مانند پرهزینه بودن و زمان بر بودن و نیز دشواری تهیه نمونه در آزمایش‌های مستقیم ارزیابی خواص، در بعضی مواقع از روش‌های غیر مستقیم و غیرمخرب برای بررسی و ارزیابی ویژگی‌های سنگ استفاده می‌شود و تقاضا برای این روش‌ها رو به گسترش است. امواج فراصوت یکی از مهم‌ترین روش‌های آزمون غیرمخرب است که روی سنگ‌ها و در شرایط آزمایشگاهی و میدانی به کار می‌رود. محققان زیادی این روش را به عنوان یک ابزار مفید، مقرون به صرفه و سریع برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی سازه‌های سنگی و مصالح عمرانی معرفی و روابط تجربی بین سرعت امواج فراصوت و ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی انواع سنگ‌ها ارائه کرده‌اند. علاوه بر خواص فیزیکی و مکانیکی، سطح تنش وارد بر سنگ یا سازه عامل مهم دیگری است که آگاهی از آن در مراحل مختلف پروژه‌های معدنی و عمرانی ضروری است. آزمایش‌های تجربی انجام شده روی نمونه‌های سنگی کارآمدی استفاده از آزمون سرعت امواج فراصوت برای تعیین سطح تنش سنگ را تایید می‌کنند؛ به طوری که سرعت موج فراصوت نه تنها تحت تاثیر تنش فعلی قرار می‌گیرد بلکه تاریخچه تنشی که سنگ در گذشته تحمل کرده است هم موثر است. بنابراین داشتن رابطه‌ای که بتواند ارتباط درست و منطقی بین سطح تنش وارد بر سنگ و سرعت موج فراصوت ایجاد کند این امکان را فراهم می‌کند که بتوان بدون ایجاد آسیب در سازه اطلاعات مفیدی در مورد شرایط پایداری سازه به دست آورد، زمان وقوع شکست را پیش‌بینی کرد و تمهیدات لازم برای جلوگیری از شکست را به عمل آورد. هدف از مطالعه حاضر ارائه رابطه‌ای بین سرعت امواج فراصوت و سطح تنش به عنوان یک رهیافت در این زمینه است. به همین منظور آزمایش تعیین سرعت پالس فراصوت در

سطوح تنش مختلف روی نمونه‌های مکعبی از جنس گچ - سیمان تعریف شده است. پس از به دست آمدن نسبت اختلاط مناسب بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره که بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (قطر N_x) با نسبت‌های اختلاط متفاوت انجام شده، ۲۲ نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مکعب و نسبت آب به سیمان 0.5 ساخته شده است. به منظور برداشت تغییرات کرنش محوری و جانبی، پس از تسطیح سطوح مورد نظر با چسب صیقل دهنده کرنش‌سنج‌های 60 میلیمتری در راستای موازی و عمود بر محور باگذاری روی نمونه چسبانده شده‌اند. در این آزمایش‌ها نمونه در شرایط تنش آزاد و سپس در ترازهای مختلف تنش با گام‌های ثابت و از پیش تعیین شده تحت بارگذاری قرار گرفته تا گسیخته شود. در هر تراز تنش، زمان عبور موج از نمونه با استفاده از تراگذارهای عمودی 55 کیلوهرتزی در مد پیوسته و در راستای عمود بر محور باگذاری و کرنش جانبی و محوری به وجود آمده در آن با استفاده از کرنش‌سنج‌های نصب شده به صورت متعامد بر روی نمونه، اندازه‌گیری و ثبت شده است. در نهایت، با داشتن منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها و همچنین سرعت عبور امواج فراصوت، رابطه‌ای منطقی بین این دو منحنی مشخصه ارایه شده است.

کلمات کلیدی: آزمون غیرمخرب، امواج فراصوت، سطح تنش، خواص مکانیکی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- دشتی خویدکی، م.، جلالی، م.ا.، زیاری، ن.، ۱۳۹۵، اندازه‌گیری پارامترهای ژئومکانیکی سنگ با استفاده از امواج فراصوت، کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

فهرست مطالب

۱	فصل اول کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۱-۱ هدف تحقیق
۴	۲-۱-۱ ضرورت تحقیق
۴	۳-۱-۱ ساختار پایان نامه
۵	۲-۱ مفاهیم
۵	۱-۲-۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ
۶	۱-۱-۲-۱ خصوصیات فیزیکی سنگ
۶	۲-۱-۲-۱ خصوصیات مکانیکی سنگ
۷	۲-۲-۱ آزمون غیرمخرب
۷	۳-۲-۱ آزمون فراصوت
۸	۴-۲-۱ ویژگی‌های امواج فراصوت
۸	۵-۲-۱ تولید امواج فراصوت
۹	۶-۲-۱ روش‌های آزمایش
۱۰	۷-۲-۱ انتخاب فرکانس
۱۱	۸-۲-۱ انتخاب ماده واسط
۱۱	۳-۱ جمع بندی
۱۳	فصل دوم مروری بر پیشینه مطالعات مکانیک سنگی با استفاده از امواج فراصوت
۱۴	۱-۲ مقدمه

۱۵	۲-۲ عوامل موثر بر سرعت امواج صوتی در سنگ
۲۳	۳-۲ بررسی رابطه بین سرعت موج فراصوت با خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ
۳۱	۴-۲ بررسی رابطه سرعت موج فراصوت با تنش‌های محیطی
۴۰	۵-۲ جمع‌بندی
۴۱	فصل سوم طرح آزمایش و روش انجام تحقیق
۴۲	۱-۳ مقدمه
۴۳	۲-۳ تجهیزات آزمون فراصوت
۴۳	۱-۲-۳ دستگاه فراصوت
۴۵	۲-۲-۳ تراگذار
۴۵	۳-۲-۳ ژل فراصوت
۴۶	۴-۲-۳ کرنش‌سنج
۴۶	۵-۲-۳ مدار واسط
۴۸	۳-۳ روش کار
۴۸	۱-۳-۳ طرح انجام آزمایش
۵۰	۲-۳-۳ مراحل تهیه نمونه
۵۳	۳-۳-۳ مراحل انجام آزمایش
۵۳	۱-۳-۳-۳ تعیین محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها
۵۵	۲-۳-۳-۳ تعیین محل قرارگیری تراگذار
۵۶	۳-۳-۳-۳ برداشت داده‌های کرنش‌سنج
۵۷	۴-۳-۳-۳ ماده واسط تراگذار و سطح نمونه

۵۸	۵-۳-۳-۳ فرکانس تراگذارها
۵۸	۶-۳-۳-۳ اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت در شرایط تنش آزاد
۵۹	۷-۳-۳-۳ اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت تحت بارگذاری
۶۰	۸-۳-۳-۳ نتایج اولیه آزمایش فراصوت
۶۱	۴-۳ جمع‌بندی

فصل چهارم تحلیل آزمایش‌های فراصوت و ارایه رابطه تجربی بین سرعت صوت و تراز

۶۳	تنش
۶۴	۴-۱ مقدمه
۶۴	۴-۲ تحلیل مکانیکی نمونه‌ها
۶۴	۴-۲-۱ منحنی شاخص تنش - کرنش محوری
۶۷	۴-۲-۲ منحنی تنش - کرنش جانبی
۶۷	۴-۲-۳ منحنی تنش - کرنش حجمی
۷۵	۴-۲-۴ مقاومت کششی
۷۷	۴-۳ تحلیل نتایج آزمون فراصوت
۷۷	۴-۳-۱ رابطه بین سرعت پالس فراصوت و چگالی
۷۸	۴-۳-۲ سرعت پالس فراصوت در شرایط تنش آزاد
۷۹	۴-۳-۳ تغییرات سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش مختلف
۸۹	۴-۳-۴ منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت در مقابل کرنش محوری
۹۰	۴-۳-۵ منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت در مقابل کرنش جانبی
۹۲	۴-۳-۶ اثر بارگذاری بر توسعه ترک
۱۰۲	۴-۳-۷ ارایه رابطه تجربی بین سرعت پالس فراصوت و سطح تنش

۱۰۶	۴-۴ جمع بندی
۱۰۷	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهاد
۱۰۸	۵-۱ نتیجه گیری
۱۱۲	۵-۲ پیشنهادها
۱۱۵	فهرست منابع

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ سرعت امواج صوتی طولی در سنگ‌های لایه‌ای..... ۱۷
- جدول ۲-۲ ویژگی‌های صوتی فازهای آب موجود در سنگ..... ۱۸
- جدول ۳-۲ جمع‌بندی نتایج مطالعات، تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده..... ۳۷
- جدول ۱-۳ ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه فراصوت C372N و محدودیت‌های آن..... ۴۴
- جدول ۲-۳ اطلاعات کلی مورد انتظار از آزمایش..... ۴۹
- جدول ۳-۳ نمونه‌ای از نتایج آزمایش فراصوت در حالت تنش آزاد و تحت بارگذاری (نمونه شماره ۳)..... ۶۱
- جدول ۱-۴ پارامترهای مکانیکی به دست آمده از نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها..... ۷۵
- جدول ۲-۴ مشخصات نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی برزیلی و نتایج آزمایش..... ۷۶
- جدول ۳-۴ خواص مکانیکی نمونه‌های گچ - سیمان..... ۷۶
- جدول ۴-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱..... ۹۴
- جدول ۵-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۲..... ۹۵
- جدول ۶-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۳..... ۹۵
- جدول ۷-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۴..... ۹۶
- جدول ۸-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۵..... ۹۶
- جدول ۹-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۶..... ۹۷
- جدول ۱۰-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۷..... ۹۷
- جدول ۱۱-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۸..... ۹۸
- جدول ۱۲-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۹..... ۹۸
- جدول ۱۳-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۰..... ۹۹
- جدول ۱۴-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۱..... ۹۹
- جدول ۱۵-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۲..... ۱۰۰
- جدول ۱۶-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۳..... ۱۰۰

- جدول ۱۷-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۴..... ۱۰۱
- جدول ۱۸-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۵..... ۱۰۱
- جدول ۱۹-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه‌های مختلف..... ۱۰۲
- جدول ۲۰-۴ بررسی آماری تغییرات سرعت پالس فراصوت در نمونه‌ها و سطوح تنش مختلف..... ۱۰۳
- جدول ۲۱-۴ بازه ضرایب معادله برازش شده به منحنی سرعت - تنش با حاشیه اطمینان ۹۵٪..... ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ وابستگی سرعت امواج طولی به وزن مخصوص ظاهری..... ۱۶
- شکل ۲-۲ تغییرات نسبی سرعت امواج طولی در فشارهای محصور کننده..... ۱۹
- شکل ۳-۲ سرعت نسبی امواج الاستیک بر حسب دمای حاصل از گرمایش الکتریکی سنگ‌ها با فرکانس زیاد..... ۲۰
- شکل ۴-۲ سرعت موج فراصوتی در سنگ‌های یخ بسته..... ۲۱
- شکل ۵-۲ سرعت امواج فراصوت تابعی از سطح تنش اندازه‌گیری شده در ماسه سنگ رد وایلد مور..... ۲۲
- شکل ۱-۳ قسمت‌های مختلف دستگاه فراصوت..... ۴۴
- شکل ۲-۳ جزییات صفحه نمایش دستگاه فراصوت..... ۴۵
- شکل ۳-۳ تراگذار عمودی ۵۵ کیلوهرتزی..... ۴۶
- شکل ۴-۳ ژل فراصوت عامل جفت کننده بین تراگذار و نمونه..... ۴۷
- شکل ۵-۳ کرنش سنج ورقه‌ای ۶۰ میلیمتری چسبانده شده روی نمونه..... ۴۷
- شکل ۶-۳ مدار واسط..... ۴۸
- شکل ۷-۳ نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (قطر N_x) با نسبت‌های اختلاط متفاوت، برای به دست آوردن نسبت مناسب..... ۵۱
- شکل ۸-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی نمونه‌های استوانه‌ای..... ۵۱
- شکل ۹-۳ قالب تهیه نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر مکعب..... ۵۲
- شکل ۱۰-۳ نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر مکعب..... ۵۳
- شکل ۱۱-۳ تعیین محل دقیق قرارگیری کرنش‌سنج‌ها و تسطیح آن با چسب صیقل دهنده..... ۵۴
- شکل ۱۲-۳ قرارگیری کرنش‌سنج در محل تعیین شده..... ۵۵
- شکل ۱۳-۳ اتصال انتهای کرنش‌سنج به مدار واسط..... ۵۵
- شکل ۱۴-۳ پایانه‌ی اتصال سیم کرنش‌سنج به مدار واسط..... ۵۵
- شکل ۱۵-۳ تعیین محل قرارگیری تراگذار..... ۵۶

- شکل ۳-۱۶ نمونه زیر دستگاه تست مقاومت فشاری تک‌محوره..... ۵۷
- شکل ۳-۱۷ استفاده از ژل فراصوت در محل تراگذار..... ۵۸
- شکل ۳-۱۸ نمونه شکسته شده و پایان آزمایش..... ۶۰
- شکل ۴-۱ منحنی شاخص تنش - کرنش..... ۶۶
- شکل ۴-۲ سه مرحله گذار منحنی کرنش حجمی (نمونه شماره ۵)..... ۶۹
- شکل ۴-۳ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۲..... ۷۰
- شکل ۴-۴ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۳..... ۷۰
- شکل ۴-۵ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۶..... ۷۱
- شکل ۴-۶ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۹..... ۷۱
- شکل ۴-۷ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۰..... ۷۲
- شکل ۴-۸ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۱..... ۷۲
- شکل ۴-۹ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۲..... ۷۳
- شکل ۴-۱۰ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۳..... ۷۳
- شکل ۴-۱۱ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۴..... ۷۴
- شکل ۴-۱۲ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۵..... ۷۴
- شکل ۴-۱۳ نمونه‌های آزمایش کشش غیر مستقیم بعد از شکست..... ۷۶
- شکل ۴-۱۴ شکل شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت صوت عمود بر راستای بارگذاری و در تنش‌های مختلف..... ۷۷
- شکل ۴-۱۵ منحنی رابطه بین سرعت پالس فراصوت و چگالی در نمونه‌های آزمایشگاهی..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶ سرعت پالس فراصوت در نمونه‌ها بدون اعمال بار..... ۷۹
- شکل ۴-۱۷ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر (نمونه آزمایشی شماره ۵)..... ۸۰
- شکل ۴-۱۸ منحنی سرعت پالس فراصوت در سطوح مختلف تنش (نمونه آزمایشی شماره ۵)..... ۸۱
- شکل ۴-۱۹ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱..... ۸۱
- شکل ۴-۲۰ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۲..... ۸۲

- شکل ۴-۲۱ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۳.....۸۲
- شکل ۴-۲۲ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۴.....۸۳
- شکل ۴-۲۳ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۵.....۸۳
- شکل ۴-۲۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۶.....۸۴
- شکل ۴-۲۵ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۷.....۸۴
- شکل ۴-۲۶ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۸.....۸۵
- شکل ۴-۲۷ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۹.....۸۵
- شکل ۴-۲۸ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۰.....۸۶
- شکل ۴-۲۹ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۱.....۸۶
- شکل ۴-۳۰ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۲.....۸۷
- شکل ۴-۳۱ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۳.....۸۷
- شکل ۴-۳۲ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۴.....۸۸
- شکل ۴-۳۳ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۵.....۸۸
- شکل ۴-۳۴ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش محوری در نمونه آزمایشی شماره ۵ در کرنش‌های پیش از گام آخر.....۸۹
- شکل ۴-۳۵ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش محوری در نمونه آزمایشی شماره ۵.....۹۰
- شکل ۴-۳۶ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش جانبی در نمونه آزمایشی شماره ۵ در کرنش‌های پیش از گام آخر.....۹۱
- شکل ۴-۳۷ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش جانبی در نمونه آزمایشی شماره ۵.....۹۱
- شکل ۴-۳۸ مقادیر مختلف سرعت در ترازهای تنش متفاوت.....۱۰۵
- شکل ۴-۳۹ منحنی برازش شده به مقادیر میانگین سرعت پالس فراصوت تا تراز تنش ۱۷/۵ مگاپاسکال...۱۰۵

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ در پروژه‌های معدنی و عمرانی مانند سازه‌های زیرزمینی، شیب‌های سنگی، تونل‌ها، سدها و نظایر این‌ها، برای تعیین ظرفیت باربری، مطالعه انفجار سنگ، طراحی پایه در معادن زیرزمینی و پیش‌بینی شکست توده سنگ بسیار مهم هستند [۱].

از امواج فراصوت به عنوان پیک‌های اطلاعاتی در مواردی به شرح زیر استفاده می‌شود [۲]:

- مطالعه و تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در نقاطی که دسترسی مستقیم به آن‌ها ممکن نیست

- اکتشاف و تعیین حدود ذخایر و انباشته‌های درونی زمین اعم از مایع، جامد و گاز
- شناسایی کلی طبقات مختلف زمین به کمک اطلاعات حاصل از دو قسمت پیشین
- بررسی زلزله‌ها به طور کلی؛ اعم از تعیین محل رخداد، شدت و پیش‌بینی احتمالی

تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی در آزمایشگاه و همچنین در شرایط برجا برای توصیف توده سنگ به طور کلی گران قیمت، زمان‌بر و گاهی اوقات تهیه مغزه برای انجام آزمایش مستقیم ارزیابی توده سنگ بسیار دشوار است [۲]. به همین دلیل، سال‌ها است که در پروژه‌های عملی زمینی استفاده از روش‌های غیرمخرب^۱ برای بررسی و ارزیابی شرایط سنگ رو به گسترش است. امواج فراصوت^۲ یکی از مهم‌ترین روش‌های آزمون غیرمخرب است که در مورد سنگ‌ها به کار می‌رود. کاربرد این روش به دلیل سریع و اقتصادی بودن برای شرایط آزمایشگاهی و میدانی مناسب و آسان است. [۳].

در آزمایش‌های فراصوت نمونه سنگ بین دو تراگذار^۳ پیزوالکتریک قرار می‌گیرد که یکی از آن‌ها ارسال کننده و دیگری گیرنده پالس مکانیکی است. یک پالس الکتریکی به تراگذار فرستنده داده می‌شود که تبدیل به یک ضربه یا موج مکانیکی می‌شود و در نمونه انتشار می‌یابد و در انتهای دیگر نمونه، توسط

^۱ Non-Destructive Testing (NDT)

^۲ Ultrasonic Testing

^۳ Transducer

تراگذار گیرنده جذب و به یک موج الکتریکی تبدیل می‌شود که در صفحه نمایش یک نوسان نگار^۱ قابل مشاهده خواهد بود. به این ترتیب زمان انتقال موج یا ضربه مکانیکی در نمونه تعیین می‌شود. چنانچه طول نمونه l و زمان انتقال موج t باشد سرعت انتشار صوت (V) از رابطه ۱-۱ به دست می‌آید [۴]:

$$V = \frac{l}{t} \quad (1-1)$$

محققان زیادی آزمون سرعت امواج فراصوت^۲ را به عنوان یک ابزار مفید و مقرون به صرفه برای بررسی خواص مکانیکی بتن مورد استفاده در سازه‌ها مانند مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری معرفی می‌کنند. در زمینه سازه‌های سنگی نیز سرعت امواج فراصوت یک روش مفید، آسان و مقرون به صرفه برای برآورد ویژگی‌های الاستیکی و مقاومتی است و به علاوه برخلاف روش‌های مخرب به نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای نیاز ندارد و روابط تجربی بین سرعت امواج فراصوت و مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته قبلاً تدوین شده است [۵].

برای ایجاد پایداری حفاری‌ها، طراحی و ساخت کانال‌های تهویه، چالزنی در سنگ برای جایگذاری مواد منفجره، طراحی سیستم‌های نگهداری و پیش‌بینی فرایندهای شکستگی در پروژه‌های معدنی و عمرانی، علاوه بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بستر، آگاهی از سطح تنش توده سنگ نیز لازم و ضروری است. آزمایش‌های تجربی انجام شده روی نمونه‌های سنگی، کارآمدی اندازه‌گیری سرعت صوت برای تعیین سطح تنش سنگ را تایید می‌کنند [۶]. به طوری که سرعت موج فراصوت نه تنها تحت تاثیر تنش فعلی قرار می‌گیرد بلکه تاریخچه تنشی که سنگ در گذشته تحمل کرده است هم موثر است [۷].

۱-۱-۱ هدف تحقیق

هدف از این پروژه به دست آوردن رابطه‌ای برای برآورد میزان تنش وارد بر سنگ با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوت و به تبع آن در صورت امکان پیش‌بینی زمان وقوع شکست به منظور ارایه تمهیداتی برای جلوگیری از آن است.

^۱ Oscilloscope

^۲ Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

۲-۱-۱ ضرورت تحقیق

در پروژه‌های معدنی و عمرانی که در تعامل با بستر سنگی هستند هرگونه حفاری منجر به از بین رفتن شرایط تعادل زمین می‌شود. این عدم تعادل به صورت تنش القایی بروز می‌نماید و تا فاصله‌ای که این تنش‌ها دوباره به صورت طبیعی به تعادل برسند، دیده می‌شود. پایداری یا عدم پایداری سازه در مجاورت تنش‌های القایی و تغییرشکل‌های ایجاد شده در سازه ناشی از این تنش‌ها، با توجه به مقاومت سنگ در برابر این تغییرشکل‌ها کنترل می‌شود؛ بنابراین با بررسی و نظارت بر تغییرات تنش القایی در مناطق دارای تمرکز تنش می‌توان پایداری سازه را کنترل کرد. یکی از روش‌های بررسی شرایط سنگ میزبان استفاده از آزمون‌های غیرمخرب است. با استفاده از آزمون غیرمخربی مانند آزمون فراصوت می‌توان به صورت لحظه‌ای اطلاعات لازم و کافی در مورد شرایط سنگ را دریافت و ثبت کرد. آزمون فراصوت روش مناسب و مقرون به صرفه‌ای است که به صورت غیرمخرب و به سادگی می‌تواند برای بررسی این تغییرات به کار رود. داشتن رابطه‌ای که بتواند ارتباط درست و منطقی بین سطح تنش وارد بر سنگ و سرعت موج فراصوت ایجاد کند این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان بدون ایجاد آسیب در سازه اطلاعات مفیدی در مورد شرایط پایداری سازه به دست آورد، زمان وقوع شکست را پیش‌بینی کرد و تمهیدات لازم برای جلوگیری از آن را به عمل آورد.

۳-۱-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل اول، ضمن بیان مزیت‌های استفاده از امواج فراصوت به عنوان یک آزمون غیرمخرب برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ؛ ضرورت و هدف از مطالعه حاضر ارائه شده است. سپس به صورت خلاصه تعاریف کلی در مورد مباحث مورد مطالعه در این تحقیق یعنی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ، امواج فراصوت و آزمون غیرمخرب فراصوت آورده شده است.

در فصل دوم پس از بیان مختصری در مورد عوامل موثر بر سرعت امواج فراصوت در سنگ و به ویژه عامل تنش؛ نتایج تحقیقات سایر نویسندگان در مورد استفاده از امواج فراصوت برای ارزیابی و برآورد

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ مرور شده است.

در فصل سوم با عنوان طرح آزمایش و روش انجام تحقیق؛ طرح آزمایش، مراحل تهیه نمونه‌ها و روش انجام آزمایش شرح داده شده است.

فصل چهارم شامل نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از آزمایش بر روی ۱۵ نمونه به صورت نمودارهای استاندارد مکانیک سنگی و تفسیر و تحلیل این نمودارها می‌شود.

در فصل پنجم جمع‌بندی کلی از نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر صورت گرفته است و پیشنهادهایی برای رفع کمبودها و جامع‌تر شدن نتایج این مطالعه ارائه شده است.

۲-۱ مفاهیم

مباحث مورد مطالعه در این پژوهش یعنی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ، آزمون غیرمخرب، امواج فراصوت، آزمون غیرمخرب فراصوت، روش‌ها و عوامل موثر در آن به صورت خلاصه در این بخش تعریف شده‌اند.

۱-۲-۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ

سنگ‌ها از موادی با ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مختلف تشکیل شده‌اند که به مبداء تشکیل و فرآیندهای زمین‌شناسی رخ داده روی آن‌ها بستگی دارد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها عوامل بسیار مهمی هستند که در طراحی و ساخت سازه‌های زیرزمینی باید مورد توجه قرار گیرند. مهم‌ترین خصوصیات مکانیکی سنگ شامل مدول الاستیک، نسبت پواسون و مقاومت و مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی سنگ شامل وزن مخصوص، تخلخل، درصد آب و گاز، لایه‌بندی و تورق و ترکیب دانه‌بندی است [۲]. این پارامترها را می‌توان در آزمایشگاه و یا از طریق آزمایش‌های برجا به دست آورد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که می‌توان بین خصوصیات مختلف سنگ ارتباط برقرار کرد، به گونه‌ای که مقادیر برخی از ویژگی‌های سنگ را بتوان با توجه به برخی دیگر از خصوصیات برآورد کرد.

۱-۲-۱-۱ خصوصیات فیزیکی سنگ

ویژگی فیزیکی هر سنگ رفتار ویژه آن سنگ را بر اثر کنش نوعی میدان فیزیکی بر آن مشخص می‌کند. هر ویژگی معمولاً با شاخصی کمی مشخص می‌شود که این کنش را تعیین می‌کند [۸]. خواص فیزیکی سنگ‌ها را می‌توان در سه گروه زیر تقسیم بندی کرد [۲].

۱- خواصی که ذاتی و مستقل هستند؛ مانند وزن مخصوص و تخلخل

۲- خواصی که عکس العمل سنگ‌ها را در برابر ابزار نشان می‌دهند؛ مانند سایش پذیری

۳- خواصی که در ارتباط با پدیده‌های فیزیکی دیگر هستند؛ مانند ضریب هدایت گرمایی

۲-۱-۲-۱-۱ خصوصیات مکانیکی سنگ

خواص مکانیکی سنگ‌ها به کلیه خواصی گفته می‌شود که رابطه‌ی بین نیروهای وارد بر سنگ را نشان داده و تغییرات آن‌ها را با تغییر شکل‌های حاصل از این نیروها (با در نظر گرفتن زمان یا بدون زمان) مشخص می‌سازد. مهم‌ترین خواص مکانیکی سنگ‌ها را به طور کلی می‌توان در گروه‌های اصلی زیر رده‌بندی نمود [۹]:

۱- خواص الاستیسیته سنگ‌ها، که رابطه بین تنش و کرنش را در محدوده تغییر شکل‌های

برگشت‌پذیر سنگ نشان می‌دهد؛ مانند مدول الاستیسیته و نسبت پواسون.

۲- خواص مقاومتی سنگ‌ها، که مشخص کننده شرایط تحمل تنش‌ها و تغییر شکل‌های برگشت

ناپذیر سنگ‌ها است؛ مانند مقاومت فشاری تک‌محوری.

۳- خواص رئولوژی که بیان کننده رابطه بین تنش و کرنش سنگ در تغییر شکل‌های خمیری

برگشت‌ناپذیر و وابسته به زمان است.

۴- خواص تکنولوژیکی که نشان دهنده رفتار سنگ در برابر ابزار است؛ که بخشی از آن‌ها مربوط

به فیزیک سنگ‌ها هستند.

۵- خواصی که مربوط به وجود یا حرکت سیال در سنگ‌ها است، که تعدادی از آن‌ها به فیزیک

سنگ وابسته است؛ مانند نفوذپذیری.

۲-۲-۱ آزمون غیرمخرب

آزمایش‌های غیرمخرب با استفاده از اصول و قوانین فیزیکی، بدون تغییر یا آسیب رساندن به مواد و مصالح، اطلاعاتی در مورد ساختار و ناهمگنی درون آن‌ها به دست می‌دهد. سادگی، پایین بودن هزینه‌های آزمایش، عدم تخریب مصالح و از همه مهم‌تر سرعت در نتیجه‌گیری از مزیت‌های چشم‌گیر آزمایش‌های غیرمخرب است. با پیشرفت تکنولوژی ساخت دستگاه‌ها و ابزار آزمایش، ضریب خطا کم‌تر و دقت در ثبت نتایج بیش‌تر شده است.

با آزمایش‌های غیرمخرب می‌توان تغییرات در خواص مصالح را نسبت به زمان با تکرار آزمایش‌ها برای نمونه‌ای معین به دست آورد. این آزمایش‌ها می‌تواند برای هدف‌های گوناگون انجام گیرد ولی دو هدف اصلی از انجام آن‌ها کنترل کیفیت و تطبیق مصالح با مشخصات است [۱۰].

۳-۲-۱ آزمون فراصوت

آزمایش فراصوت یک روش غیرمخرب است که در آن امواج صوتی با فرکانس بالا به درون مواد تحت بازرسی، برای یافتن عیوب داخلی و بررسی خواص مواد ارسال می‌شود. [۱۱]. در این آزمون‌ها، بلور یک تراگذار توسط جریان برق تحریک شده و به ارتعاش در می‌آید. امواج فراصوت که در اثر ارتعاش بلور در سطح تراگذار ایجاد شده‌اند پس از عبور از یک ماده واسط^۱ به داخل قطعه وارد می‌شوند [۱۲]. امواج صوتی با مقداری اتلاف انرژی ناشی از میرایی در درون مواد حرکت کرده و در مرزهای مشترک بازتاب می‌یابند. در بیش‌تر کاربردها از آشکار سازی پرتوی بازتاب شده، برای تشخیص وجود، مکان و ارزیابی کمی عیوب، استفاده می‌شود. (اما در این مطالعه آن بخشی از موج که از مرزهای مشترک عبور می‌کند مورد نظر است. زیرا هدف از آزمایش‌های انجام شده تشخیص عیوب موجود نیست.)

^۱ ماده واسط (Couplant) که ممکن است آب یا روغن باشد بین تراگذار و قطعه قرار می‌گیرد و امکان انتقال بهینه امواج فراصوت را از تراگذار به قطعه فراهم می‌سازد.

در صنایع مختلف از بازرسی فراصوت، برای کنترل کیفیت و بازرسی مواد در حین کار، برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به منظور یافتن شکست‌های قریب‌الوقوع استفاده می‌شود [۱۱].

۴-۲-۱ ویژگی‌های امواج فراصوت

یک پرتو فراصوت از جهات مختلف به یک باریکه نور شباهت دارد. هر دو موج بوده و از معادله عمومی موج پیروی می‌کنند. هر کدام از این پرتوها با یک سرعت مشخص در یک محیط همگن حرکت می‌کنند (سرعتی که به خواص محیط بستگی دارد نه به خواص امواج). پرتوهای فراصوت همانند پرتوهای نوری در برخورد با سطوح بازتاب می‌شوند، هنگام عبور از مرز مشترک دو ماده که مشخصات صوتی متفاوت دارند و در برخورد با لبه‌های تیز و موانع گرد، شکسته می‌شوند. پراکنش^۱ پرتوهای فراصوت توسط سطوح زبر و ذرات، موجب کاهش انرژی این پرتوها می‌شود، این امر شبیه به کاهش شدت نور عادی به سبب پراکنش است [۱۰].

۵-۲-۱ تولید امواج فراصوت

در بعضی مواد بلورین خاص اثر پیزوالکتریک وجود دارد، یعنی چنانچه ولتاژی به سطح بلور اعمال شود، آن بلور اتساع یا تغییر بعد می‌یابد و برعکس، چنانچه بلوری در معرض کرنش مکانیکی قرار گیرد، میدانی الکتریکی در آن به وجود می‌آید و ولتاژ تولید شده متناسب با مقدار کرنش خواهد بود. مواد پیزوالکتریک اساس تراگذارهای الکترومکانیکی را تشکیل می‌دهند. نخست از کوارتز طبیعی به عنوان ماده پیزوالکتریک استفاده می‌شد که هنوز تا حدی به کار می‌رود. اما مواد دیگر از جمله تیتانات باریم، زیرکونات سرب و متانیوبات سرب کاربرد گسترده‌ای دارند. هنگامی که ولتاژ متناوبی در امتداد ضخامت قرص پیزوالکتریک اعمال می‌شود، قرص شروع به انقباض و انبساط می‌کند و از این رهگذر موجی فشاری عمود بر قرص در پیرامون آن تولید می‌شود. تولید موج زمانی حداکثر تاثیر را دارد که بلور تراگذار با فرکانس طبیعی خود ارتعاش کند و این مورد به وسیله ابعاد و ثابت‌های الاستیک مواد به کار

^۱ Scattering

رفته تعیین می‌شود. در بعضی روش‌های آزمون فراصوت از دو تراگذار استفاده می‌کنند. یکی برای فرستادن باریکه و دیگری به عنوان گیرنده. اما در بیش‌تر موارد تنها به یک تراگذار نیاز است. این تراگذار هم به عنوان فرستنده و هم به عنوان گیرنده عمل می‌کند. فراصوت به صورت مجموعه‌ای از پالس‌های فوق‌العاده کوتاه مدت فرستاده می‌شود و بلور در فاصله زمانی ارسال امواج، علائم بازتابیده را می‌تواند آشکار سازد [۱۳].

۱-۲-۶ روش‌های آزمایش

آزمایش‌های فراصوت از نوع تماسی^۱ یا شناور^۲ هستند. در آزمایش تماسی ردیاب^۳ در تماس مستقیم با جسم تحت آزمایش، برای ارسال بهتر امواج به درون جسم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آزمایش نوع شناور، یک ردیاب ضدآب با مقداری فاصله از جسم تحت آزمایش به کار گرفته می‌شود و امواج فراصوت با گذر از یک مسیر آبی یا ستون آبی به درون جسم فرستاده می‌شوند. روش‌های تماسی خود به سه نوع تقسیم می‌شوند: روش پرتوی عمودی، روش پرتوی مایل و روش امواج سطحی. در این مطالعه از روش تماسی پرتوی عمودی استفاده شده است [۱۱].

آزمون‌های تماسی بسته به نوع موج مورد استفاده به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱- روش پرتوی مستقیم^۴ به منظور ارسال امواج طولی و یا عرضی در امتداد عمود بر سطح به

داخل قطعه

۲- روش پرتوی زاویه‌ای^۵ به منظور تولید امواج برشی

^۱ Contact

^۲ Immersion

^۳ Probe

^۴ Straight beam technique

^۵ Angle beam technique

۳- روش پرتوی زاویه ای برای تولید امواج ریلی^۱ بر روی سطح قطعه و یا تولید امواج لمب^۲ در

داخل ورق‌ها

روش عبوری نوعی از روش پرتوی مستقیم است. در این روش از دو تراگذار مجزا استفاده می‌شود که هر یک از آن‌ها در یک طرف قطعه قرار می‌گیرند. یکی از تراگذارها فرستنده و دیگری گیرنده است. تراگذار فرستنده امواج فراصوت را به داخل قطعه ارسال می‌کند و تراگذار گیرنده این امواج را در سوی دیگر قطعه دریافت می‌کند. وجود ناپیوستگی در مسیر حرکت موج سبب کاهش انرژی دریافت شده توسط گیرنده می‌شود. برای انجام بهینه این آزمون، بلوری که در فرستنده مورد استفاده قرار می‌گیرد باید مولد بسیار خوبی برای امواج صوتی باشد و گیرنده نیز باید از موادی که بهترین ویژگی را برای دریافت انرژی صوتی دارند ساخته شده باشد.

تراگذارهای مورد استفاده در این روش‌ها با استفاده از لایه نازکی از ماده واسط مستقیماً بر روی قطعه قرار داده می‌شوند. ماده واسط باید چسبندگی کافی را برای باقی ماندن بر روی قطعه در تمامی طول آزمایش داشته باشد. در آزمون‌های تماسی، لایه واسط باید حتی الامکان نازک باشد و به نحوی انتخاب شود که بتواند هماهنگی لازم را بین امپدانس‌های صوتی قسمت‌های در حال تماس قرار دهد [۱۲].

۷-۲-۱ انتخاب فرکانس

یکی از عوامل مهم در انتخاب تراگذار، فرکانس آن است. در انجام هر آزمون نیاز به حساسیت مشخصی است که این حساسیت به طول موج بستگی دارد. از آنجا که فرکانس و طول موج با یکدیگر نسبت معکوس دارند، هرچه فرکانس بیشتر باشد، طول موج کوتاه‌تر است. از طرف دیگر هرچه طول موج کوتاه‌تر باشد حساسیت بیشتر است. لذا برای دستیابی به حساسیت‌های بیشتر باید از فرکانس‌های بالاتری استفاده شود [۱۲].

- هرچه فرکانس تراگذار زیادتر باشد، گستردگی پرتو آن کم‌تر خواهد بود که این امر موجب

^۱ Rayleigh

^۲ Lamb Waves

افزایش حساسیت و قدرت تفکیک تراگذار می‌شود. همچنین افزایش فرکانس موجب زیادت‌تر شدن استهلاک و کم شدن قدرت نفوذ پرتوها می‌شود.

- با کم شدن فرکانس قدرت نفوذ پرتوها افزایش یافته و استهلاک موج کم می‌شود. کم شدن فرکانس همچنین موجب گسترده‌تری پرتو و کاهش حساسیت و قدرت تفکیک تراگذار می‌گردد.

۸-۲-۱ انتخاب ماده واسط

در آزمون‌های تماسی انتخاب ماده واسط اصولاً به شرایط انجام آزمایش از جمله زبری و دمای سطحی که آزمون بر روی آن انجام می‌گیرد و نیز چگونگی قرارگرفتن سطح (افقی، مورب و یا عمودی) بستگی دارد. برای سطوح نسبتاً صاف که به حالت افقی قرار دارند، معمولاً ترکیبی شامل یک قسمت ژلاتین (سلولز) و دو قسمت آب، که یک ماده مرطوب ساز به آن اضافه شده باشد مناسب است. برای سطوحی که زبری کمی دارند روغن‌های سبک (مانند روغن موتور) نیز مناسب هستند. برای سطوح زبر، سطوح داغ و سطوح قائم، به استفاده از مواد واسط غلیظ‌تر یا مواد واسط مخصوص ضرورت دارد. به هر صورت در همه حال، لایه واسط باید حتی الامکان نازک باشد تا نتایج به دست آمده صحیح و قابل اعتماد باشند [۱۲].

۳-۱ جمع‌بندی

در پروژه‌های معدنی و عمرانی، علاوه بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بستر، آگاهی از سطح تنش توده سنگ نیز لازم و ضروری است. آزمون غیرمخرب فراصوت یک روش کارآمد در تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و همچنین سطح تنش وارد بر سازه سنگی است که می‌تواند بدون ایجاد آسیب در سازه برای بررسی‌های مکانیک سنگی به کار رود. این آزمون روش‌های مختلفی دارد که با توجه به شرایط آزمایش، نوع مصالح و هدف از آزمایش، روش مناسب انتخاب می‌شود. هدف از این پروژه

به دست آوردن رابطه‌ای برای برآورد میزان تنش وارد بر سنگ با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوت است.

فصل دوم

مروری بر پیشینه مطالعات مکانیک سنگی با استفاده از امواج

فراصوت

۱-۲ مقدمه

قرن‌ها است که انسان با نواختن ضربه بر قطعات و ارزیابی تفاوت صداهای تولید شده توسط آن‌ها کیفیت قطعات را به نوعی می‌آزماید. اما با وجود سابقه طولانی مطالعه و تحقیق در علم صوت، کاربردهای نوین امواج فراصوت تنها در اوایل قرن بیستم آغاز گردید. اولین کاربرد فراصوت برای بازرسی مواد به دهه سوم قرن بیست باز می‌گردد. دو محقق به نام‌های سوکولوف^۱ از روسیه (۱۹۲۹) و مالهاوزر^۲ (۱۹۳۱) از آلمان اولین کسانی بودند که از فراصوت برای بازرسی مواد استفاده کردند. اولین دستگاه عیب یاب فراصوتی که در آن همچون دستگاه‌های مدرن از پالس‌های فراصوت استفاده شد، در سال ۱۹۴۰ توسط فایرستون^۳ به ثبت رسیده است. این دستگاه که رفلکتوسکوپ نامیده شده بسیاری از محدودیت‌های سیستم‌های قبلی را مرتفع نموده است. اولین دستگاه فراصوت صنعتی نیز در سال ۱۹۴۳ بر اساس دستگاه فایرستون ساخته شده است. این منبع تولید موج مستقیماً بر روی قطعه قرار می‌گرفت. در سال ۱۹۴۸ اولین سیستم آزمون فراصوتی که امکان انجام آزمون را به روش غوطه وری فراهم کرد توسط اردمن^۴ معرفی شده است. آزمون فراصوت در دهه ۱۹۴۰ که جنگ جهانی دوم در جریان بود شاهد پیشرفت‌های قابل توجهی بود و از دهه ۱۹۵۰ تا کنون نیز بسط و توسعه آن با سرعت و به طور گسترده‌ای در جریان است [۱۲].

اولین آزمون‌های فراصوت بر روی مصالح سنگی برای به دست آوردن خواص مکانیکی آن‌ها نیز در دهه ۵۰ میلادی توسط وایلی^۵ و همکاران آغاز شد [۷].

در این فصل پس از توضیح مختصر عوامل موثر بر سرعت امواج صوتی در سنگ، تحقیقات انجام شده در مورد کاربرد سرعت امواج الاستیک به عنوان یک روش غیرمخرب و مقرون به صرفه در برآورد

^۱ Sokolov

^۲ Mulhauser

^۳ Firestone

^۴ Erdman

^۵ Wyllie

ویژگی‌های مختلف مکانیکی سنگ، در حوزه خواص مواد و ویژگی‌های محیطی، بررسی و مرور می‌شود.

۲-۲ عوامل موثر بر سرعت امواج صوتی در سنگ

ماهیت انتشار امواج الاستیک در سنگ‌ها با مشخصاتی مانند سرعت انتشار امواج، ضریب جذب امواج صوتی^۱، مقاومت صوتی ظاهری^۲، دامنه موج، ضریب بازتاب و شکست امواج در سطح فصل مشترک دو محیط سنگی تعیین می‌شوند.

نسبت سرعت موج طولی به موج عرضی (v_p / v_s) در سنگ تنها تابعی از نسبت پواسون است و از این رو می‌تواند از جمله مشخص کنندگان نسبت پواسون باشد.

تفاوت مقدار v_p / v_s در سنگ‌های بلورین آذرین و دگرگونی اغلب بسیار اندک و در حدود ۱/۷ تا ۱/۹ است. دامنه تغییرات v_p / v_s در سنگ‌های رسوبی، به دلیل استحکام برشی اندک سنگ‌های سست و متخلخل که در آن‌ها نسبت پواسون به سمت ۰/۵ میل می‌کند بیش‌تر و در حدود ۱/۵ تا ۱۴ است. مقدار این نسبت در سنگ‌های رس‌دار بسیار زیاد است و در سنگ‌های ترد به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. بنابراین، سرعت امواج الاستیک را ثابت‌های الاستیک و چگالی سنگی که این امواج در آن منتشر می‌شوند، تعیین می‌کند. باید تذکر داد که این سرعت عملاً به فرکانس بستگی ندارد و بنابراین به کار گرفتن هر فرکانسی برای پژوهش امکان‌پذیر است.

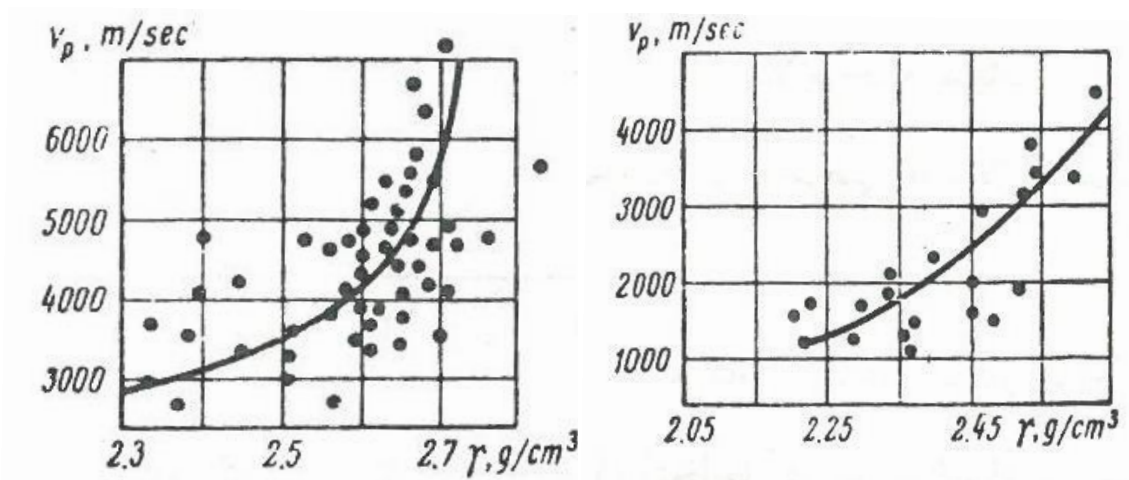
تمام ویژگی‌های صوتی سنگ‌ها به مشخصات الاستیک آن‌ها بستگی دارد. سرعت امواج طولی با افزایش مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (ν) زیاد می‌شود. افزایش نسبت پواسون از ۰/۱ به ۰/۴، مقدار v_p را ۴۵ درصد زیاد می‌کند. سرعت موج عرضی هم با افزایش E زیاد می‌شود، اما با افزایش مقدار ν از حد اقل به حداکثر، سرعت این موج حدود ۲۰ درصد کم می‌شود. بنابراین حداکثر سرعت امواج الاستیک در سنگ‌هایی با تخلخل کم که از کانی‌های تیره رنگ تشکیل شده باشند (با مقدار E زیاد) مشاهده می‌شود. برای مثال در گابرو، پریدوتیت‌ها، بازالت‌ها، اسکارن‌ها، و نظایر آن‌ها، سرعت امواج طولی به ۶۰۰۰ تا

^۱ Sound absorption coefficient

^۲ Acoustic Impedance

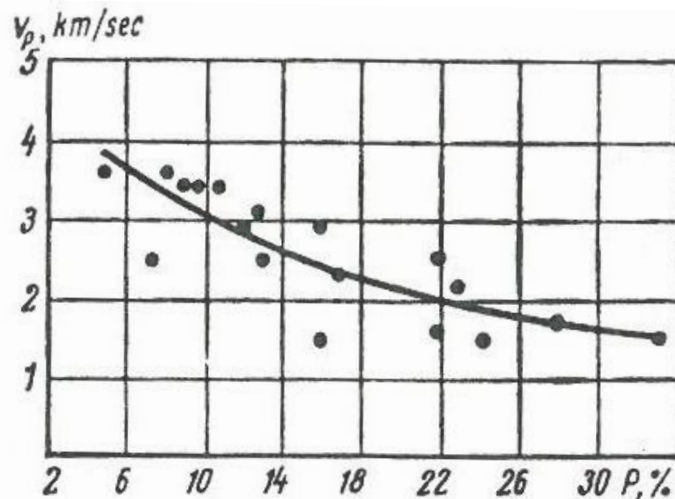
۷۰۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد.

تخلخل، مدول یانگ را به مقدار زیاد کاهش می‌دهد؛ بنابراین در سنگ‌های متخلخل از سرعت امواج الاستیک هم کم می‌شود. در شکل ۱-۲ رابطه بین سرعت و وزن مخصوص در سنگ آهک (الف)، رس (ب) و تغییرات سرعت نسبت به تخلخل (پ) نشان داده شده است [۸].



(الف) سنگ آهک

(ب) رس



(پ) نمودار سرعت امواج طولی بر حسب تخلخل سنگ

شکل ۱-۲ وابستگی سرعت امواج طولی به وزن مخصوص ظاهری [۲].

در سنگ‌های لایه‌ای، سرعت امواج الاستیک در امتداد لایه‌ها و در عرض آن‌ها تفاوت دارد، و همیشه V_{\parallel} بیش‌تر از V_{\perp} است. وقتی لایه‌های تشکیل دهنده سنگ از دو گونه متفاوت تشکیل شده باشند، در ساده‌ترین حالت می‌توان سرعت امواج را از کل زمانی که طول می‌کشد تا آن‌ها از لایه‌ها عبور کنند،

محاسبه کرد. ضریب ناهمسانگردی ($V_{||}/V_{\perp}$) در بیش تر سنگ‌های رسوبی از ۱/۱ تا ۱/۳ است. در جدول ۱-۲ سرعت امواج صوتی طولی در سنگ‌های لایه‌ای، در راستای موازی با چینه بندی و عمود بر آن و همچنین ضریب ناهمسانگردی که عبارت است از نسبت سرعت در راستای موازی با لایه‌های سنگ به سرعت در راستای عمود چینه بندی ارائه کرده است [۸].

جدول ۱-۲ سرعت امواج صوتی طولی در سنگ‌های لایه‌ای [۸].

ضریب ناهمسانگردی $V_{ }/V_{\perp}$	سرعت موج طولی (m/s)		سنگ
	عمود بر چینه بندی	به موازات چینه بندی	
۱ / ۰.۴	۵۱۰۰	۵۳۰۰	سنگ آهک
۱ / ۱۹	۳۲۰۰	۳۸۰۰	ماسه سنگ
۱ / ۱۰	۳۹۰۰	۴۲۰۰	آهک رس
۱ / ۱۸	۳۸۰۰	۴۶۰۰	سرپانتینیت

سرعت صوت از اندازه دانه‌های تشکیل دهنده سنگ هم تأثیر می‌پذیرد. به طوری که سرعت امواج الاستیک در سنگ‌های ریز دانه بیش از سنگ‌های درشت دانه است. سنگ‌های ناپیوسته عملاً هیچ مقاومتی در برابر نیروهای برشی که اصطکاک داخلی تعیین کننده بزرگی آن است ندارند، به طوری که در سنگ‌های ناپیوسته، نظیر مایعات، تنها امواج طولی منتشر می‌شوند. بنابراین، هر چه سنگ دست خورده‌تر باشد (بر اثر گسستگی یا هوازدگی و نظایر آن‌ها)، یعنی هرچه به حالت ناپیوسته نزدیک‌تر باشد، سرعت موج عرضی در آن کم‌تر و جذب این موج در آن بیش‌تر است. عوامل بیرونی نیز بر ویژگی‌های صوت اثر می‌گذارند. مرطوب شدن سنگ‌های متخلخل به تغییر سرعت امواج الاستیک در آن‌ها منجر می‌شود. اگر مرطوب شدن به نرم کردن سنگ منجر نشود، سرعت صوت در آن به سادگی با استفاده از زمان عبور امواج الاستیک پی در پی که از اسکلت کانی و از روزنه‌ها می‌گذرند، محاسبه می‌شود. در روابط ۱-۲ تا ۳-۲ روش محاسبه سرعت در یک سنگ متخلخل با مواد پرکننده ارائه شده است:

$$t = t_m + t_p \quad (1-2)$$

$$\frac{1}{V} = \frac{P}{V_P} + \frac{1-P}{V_m} \quad (2-2)$$

$$V = \frac{V_P \cdot V_m}{V_m \cdot P + V_P(1-P)} \quad (3-2)$$

که در آن‌ها P مجموع طول مسیر عبور موج در ماده پرکننده روزنه‌ها، t_p زمان عبور امواج الاستیک از روزنه‌ها، v_p سرعت موج الاستیک در ماده پرکننده روزنه‌ها، t_m زمان عبور امواج الاستیک از اسکلت کانی و v_m سرعت موج الاستیک در اسکلت کانی سنگ است.

پس، هر چه سرعت صوت در ماده‌ی پرکننده روزنه بیش‌تر باشد، سرعت کل آن در نمونه سنگ بیش‌تر خواهد بود. چون سرعت صوت در آب (v_1) پنج برابر سرعت آن در هوا (v_a) است، اشباع شدن سنگ سخت از آب به افزایش سرعت موج الاستیک در آن می‌انجامد [۸]. در جدول ۲-۲ ویژگی‌های صوتی آب به عنوان یک ماده پرکننده در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲-۲ ویژگی‌های صوتی فازهای آب موجود در سنگ [۸].

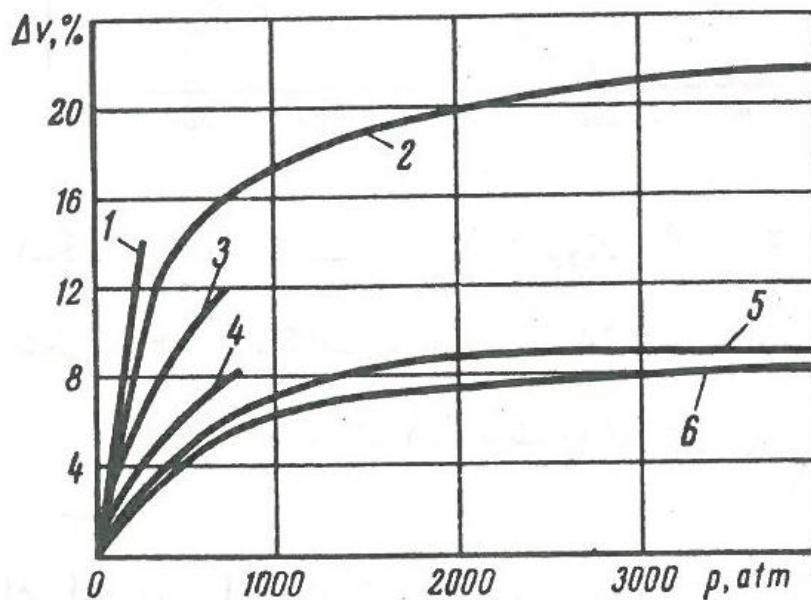
ضریب جذب		سرعت موج طولی (m/s)	چگالی ظاهری (kg/m^3)	فاز
$f = 10^7 \text{ Hz}$	$f = 10^5 \text{ Hz}$			
$8/5 \times 10^{-1}$	$8/5 \times 10^{-5}$	۱۴۸۵	۱۰۰۰	آب
$1/24 \times 10^{-3}$	$1/24 \times 10^{-1}$	۳۳۱	۱/۲۹	هوا
-----	-----	۳۳۰۰ تا ۳۳۰۰	۹۱۸	یخ

اما سرعت صوت در سنگ‌هایی که کاملاً اشباع از آب باشند، کم‌تر از سنگ‌های کم روزنه است؛ زیرا v_1 از سرعت صوت در اسکلت کانی کم‌تر است. موج‌های عرضی تنها از اسکلت کانی می‌گذرند؛ و در نتیجه در سنگ‌ها، با هر میزان رطوبت که داشته باشند، کم و بیش ثابت است.

افزایش فشار وارد بر سنگ (به خصوص فشارهای محصور کننده) مقدار ثابت‌های الاستیک آن را زیاد می‌کند. به همین دلیل سرعت موج الاستیک در سنگ تحت تنش زیاد می‌شود. میزان فشردگی سنگ به بار وارد بر آن بستگی دارد. به همین دلیل سرعت موج الاستیک در سنگی یکسان که در ژرفاهای مختلف و در معرض فشارهای متفاوتی قرار گرفته باشد، بر حسب ژرفا تفاوت خواهد داشت.

وابستگی سرعت صوت به فشردگی و بارگذاری در سنگ‌های متخلخل و ناپیوسته واضح‌تر است، زیرا اثر

فشار بر آن‌ها نسبتاً بیش‌تر است. شکل ۲-۲ تغییرات نسبی سرعت امواج طولی نسبت به فشار محصور کننده در سنگ‌های سینیت، ماسه سنگ، دولومیت، شیست، بازالت و گابرو نشان می‌دهد. مثلاً در مارن‌های ماسه‌ای که تخلخل اولیه آن‌ها ۲۵ درصد است، سرعت موج طولی، در حالتی که فشار وارد بر آن‌ها به ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برسد، ۵۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد؛ این افزایش در سنگ‌هایی که تخلخل آن‌ها کم‌تر است به ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌رسد (برای مثال v_p در فشار ۴۰۰۰ اتمسفر، در گابرو ۵ تا ۷ درصد و در گرانیت ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد) [۸].



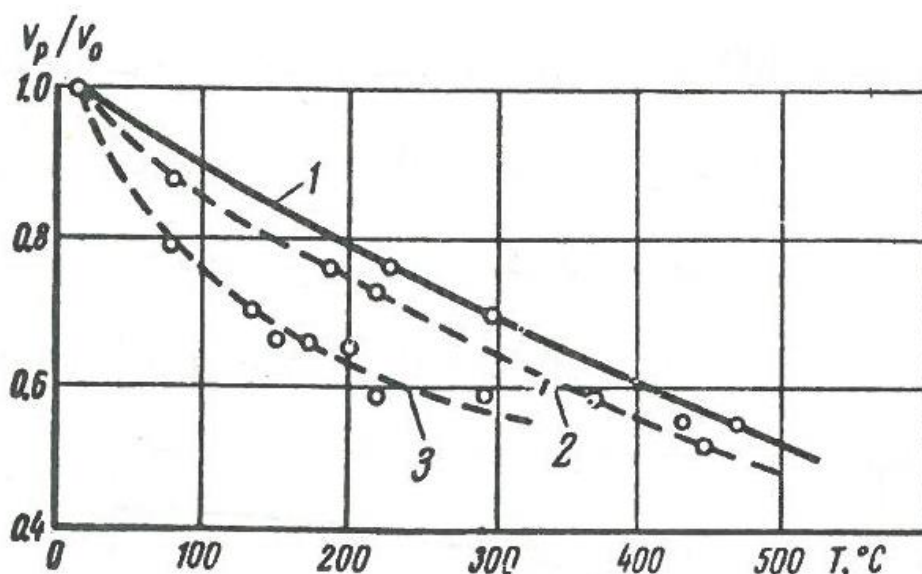
شکل ۲-۲ تغییرات نسبی سرعت امواج طولی در فشارهای محصور کننده: (۱) ماسه سنگ، (۲) سینیت، (۳) دولومیت، (۴) شیست، (۵) بازالت، و (۶) گابرو [۲].

در انتشار امواج عرضی الگوی مشابهی دیده می‌شود؛ اما افزایش سرعت این امواج با فشار، آرام‌تر صورت می‌گیرد و به حد معینی می‌رسد. با افزایش بیش‌تر فشار، نسبت v_p/v_s تقریباً ثابت باقی می‌ماند. افزایش فشار، ناهمسانگردی سنگ را کم می‌کند.

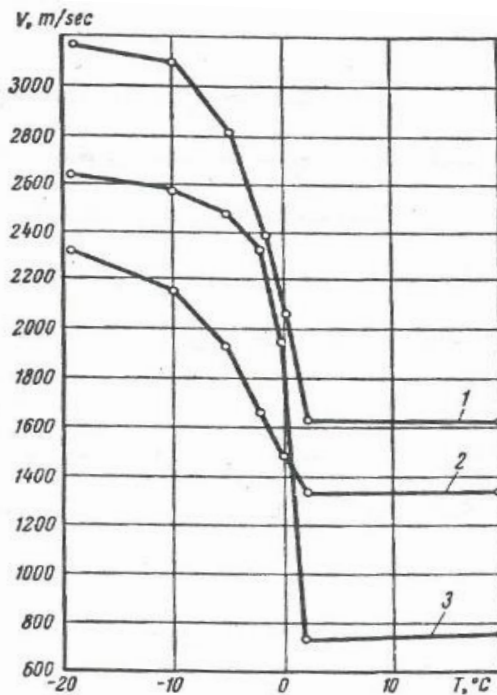
چون تغییرات دما در سنگ‌ها موجب تغییر ثابت‌های الاستیک آن‌ها می‌شود، بنابراین بر سرعت موج در آن‌ها نیز تاثیر می‌گذارد. در اکثر موارد، سرعت امواج طولی افت نموده و ضریب جذب افزایش می‌یابد. سرعت نسبی امواج الاستیک نسبت به دمای حاصل از گرمایش الکتریکی سنگ‌ها با فرکانس زیاد در

سنگ‌های اسکارن اپیدوت - گارنت، اسکارن پیروکسن - گارنت و دولومیت در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

در سنگ‌های مرطوب، هنگامی که درجه حرارت آن‌ها به زیر نقطه یخ زدگی آب می‌رسد، افزایش سریعی در سرعت امواج طولی و عرضی در آن‌ها مشاهده می‌شود. کاهش شدید سرعت امواج فراصوت با رسیدن دما از ۲۰- درجه سانتی‌گراد به نقطه انجماد آب (صفر درجه سانتی‌گراد) در ماسه سنگ، ماسه و رس در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. این امر با توجه به سرعت بالای امواج صوتی در یخ نسبت به حالت‌های دیگر آب که در جدول ۲-۲ نیز ارایه شده است توجیه می‌شود [۸].

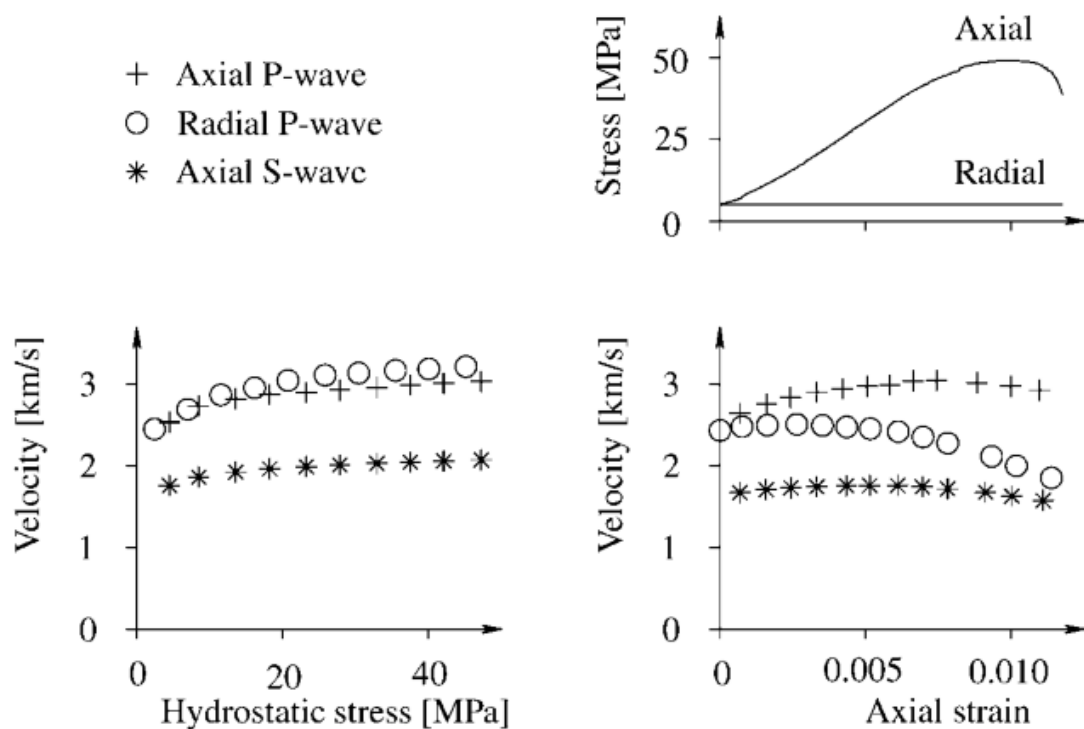


شکل ۳-۲ سرعت نسبی امواج الاستیک بر حسب دمای حاصل از گرمایش الکتریکی سنگ‌ها با فرکانس زیاد : (۱) اسکارن اپیدوت - گارنت، (۲) اسکارن پیروکسن - گارنت، و (۳) دولومیت [۲].



شکل ۲-۴ سرعت موج فراصوتی در سنگ‌های یخ بسته : (۱) ماسه سنگ، (۲) ماسه، (۳) رس [۲]

سرعت صوت در سنگ به سطح تنش نیز بستگی دارد. تا حدودی، این اثر را می‌توان به تغییرات تخلخل بر اثر اعمال تنش نسبت داد. با این حال، این برای توضیح حساسیت تنش به سرعت، در بیش‌تر سنگ‌ها کافی نیست. شکل ۲-۵ رفتار معمول یک ماسه سنگ را نشان می‌دهد. این رفتار را می‌توان با توجه به ریزترک‌ها (بسیار کوچک‌تر از طول موج) که تحت تاثیر تنش وارده باز یا بسته می‌شوند، توجیه کرد. ترک باز در صورتی که در راستای عمود بر جهت انتشار موج باشد به شدت سرعت یک موج را کاهش می‌دهد، در حالی که در غیر این صورت اثر آن بر سرعت کم است.



شکل ۲-۵ سرعت امواج فراصوت تابعی از سطح تنش اندازه گیری شده در ماسه سنگ رد وایلد مور [۱۴].

در طول بارگذاری هیدرواستاتیک سرعت به تدریج و به صورت یکنواخت با نرخ کمی افزایش می‌یابد. این امر با توجه به بسته شدن ترک که باعث سخت‌تر شدن سنگ می‌شود، یا فرآیندهای مشابه که تماس ذرات را گسترش می‌دهند قابل توضیح است. در طول بارگذاری تک‌محوره، سرعت انتشار امواج در راستای موازی با افزایش بار ابتدا زیاد می‌شود، علت این امر نیز همان فرایندهایی است که باعث افزایش سرعت در طول بارگذاری هیدرواستاتیک می‌شوند. با افزایش بارگذاری و شکل‌گیری ترک‌های کششی، سرعت امواجی که در راستای عمود بر جهت تنش اصلی حداقل منتشر می‌شوند، کاهش می‌یابد. این ترک‌ها اغلب به عنوان ترک جناخی^۱ شناخته می‌شوند که در طول لغزش اصطکاکی ترک‌های بسته تشکیل می‌شوند. بنابراین ناهمسانگردی تنش باعث ناهمسانگردی صوتی می‌شود. تاثیر ریزترک روی انتشار امواج صوتی، در میرایی نیز به صورت پراکندگی افت‌ها با توجه به قابل بودن ترک‌ها دیده می‌شود. به طور معمول با افزایش فشار محصورکننده، میرایی کاهش می‌یابد.

^۱ Wing Cracks

استفاده از ناهمسانگردی صوتی مشاهده شده به عنوان روشی برای اندازه‌گیری ناهمسانگردی تنش چندان آسان نیست. این امر تا حدودی به این دلیل است که عوامل دیگری مانند لایه‌بندی دانه یا جهت‌گیری دانه می‌توانند باعث ناهمسانگردی شوند و تا حدی به این دلیل که سنگ‌ها معمولاً تحت تنش تشکیل و سیمانی می‌شوند. ناهمسانگردی تنش القایی در رسوبات سیمانی نشده نتیجه بارگذاری استاتیکی برای سخت‌تر شدن تماس دانه‌ها است. تنش متفاوت در جهات مختلف موجب سفتی متفاوت در جهات مختلف می‌شود، که در نتیجه ناهمسانگردی صوتی به وجود می‌آید. فرایند سیمانی شدن سختی مضاعفی را در تماس دانه‌ای فراهم می‌کند، به طوری که سفتی نسبی برای آن‌هایی که تحت بارگذاری ضعیف‌تر بوده‌اند، بزرگ‌تر است. در نتیجه به جای وضعیت تنش فعلی، مشخصه تغییرات تنش که پس از سیمانی شدن اتفاق می‌افتد ناهمسانگردی ناشی از تنش است. بنابراین تاریخچه تنش سنگ ممکن است تاثیر قابل توجهی بر روی وابستگی سرعت بر تنش داشته باشد [۱۴].

۲-۳ بررسی رابطه بین سرعت موج فراصوت با خواص فیزیکی و مکانیکی

سنگ

در زمینه کاربرد روش‌های فراصوت، مطالعات و آزمایش‌های بسیاری صورت گرفته و گزارش شده است. برای نمونه تاد^۱ و سیمونز^۲ (۱۹۷۲) کاهش سرعت پالس فراصوت^۳ (UPV) در نمونه‌های خشک در مقایسه با سنگ‌هایی با اشباع شدگی حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، در سنگ‌های با تخلخل کم را گزارش کرده‌اند [۱۵]. وانگ^۴ و همکاران (۱۹۹۰) گزارش داده‌اند، سرعت موج فشاری با توجه به تفاوت سیال منفذی موجود در سنگ مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد، و اشباع شدگی سرعت موج فشاری را افزایش

^۱ Todd

^۲ Simmons

^۳ Ultrasonic Pulse Velocity

^۴ Wang, Z.

می‌دهد [۱۶]. پراساد^۱ و مایزنر^۲ (۱۹۹۲) رابطه بین سرعت و میرایی موج برشی و فشاری با اندازه ذرات، شکل، تخلخل، چگالی و تراکم‌پذیری ماسه سنگ‌های خشک و اشباع از آب را با استفاده از روش پالس فراصوت در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز بررسی کرده‌اند. نتیجه مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که به جز سرعت موج برشی، مقادیر سرعت موج فشاری و میرایی موج برشی و فشاری به اندازه ذرات بستگی دارد، به طوری که در ماسه‌های دانه درشت مقادیر بیشتری دارند. به علاوه آن‌ها مشاهده کرده‌اند مقدار سرعت و میرایی اندازه‌گیری شده در ماسه‌های اشباع بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل بیوت^۳ است [۱۷]. در این موضوع، پلوسک^۴ (۱۹۹۶) روشی را برای اندازه‌گیری سرعت انتشار و میرایی صوت در سنگ با موج پیوسته پیشنهاد می‌کند. این روش نیاز به ایجاد یک سوراخ در سنگ و پر کردن آن با آب به عنوان یک محیط واسط برای انتشار و دریافت امواج با دو حسگر فراصوت جداگانه دارد. فرکانس تراگذارها حدود ۵۰ کیلوهرتز است. برای اندازه‌گیری سرعت صوت، موج ۵۰ کیلوهرتز توسط یک موج ۲۰۰ هرتز در دامنه تقویت شده است. اندازه‌گیری‌ها با تعیین تغییرات فاز موج تقویت شده انجام شده‌اند. در این روش از مزایای جهت‌داری یک موج با فرکانس بالا و میرایی کم یک موج با فرکانس پایین استفاده می‌شود. پلوسک ادعا کرده است با این روش می‌توان سنگ را تا عمق حدود ۲۵ متر بررسی کرد. این روش تنها در سنگ‌های سیلیسی موفقیت آمیز بوده است [۱۸].

گوپتا^۵ و رائو^۶ (۱۹۹۸) بیان نموده‌اند که به تدریج با افزایش درجه هوازگی مقادیر UPV کاهش می‌یابد. کاهش UPV در نمونه‌های اشباع که تمام منافذ و حفره‌ها و همچنین ریزترک‌ها پر از آب هستند کم‌تر است. به علاوه آن‌ها گزارش می‌کنند بین سرعت موج فشاری و مقاومت، مانند مقاومت فشاری تک‌محوره، اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت کششی صرف نظر از خطی یا غیر خطی بودن یک رابطه

^۱ Prasad

^۲ Meissner

^۳ Biot Model

^۴ Plocek

^۵ Gupta

^۶ Rao

مستقیم وجود دارد [۱۹].

طغرل^۱ و ظریف^۲ (۱۹۹۹) رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و UPV در سنگ گرانیت را یک رابطه خطی گزارش کرده‌اند [۲۰] در حالی که قهرمان^۳ (۲۰۰۱) روابط غیر خطی بین این دو پارامتر برای انواع مختلف سنگ‌ها ارایه کرده است [۲۱].

قاسمی و همکاران (۱۳۸۴) اثر متغیرهای مختلف بر روی سرعت انتشار امواج الاستیک را به صورت آزمایشگاهی روی نمونه‌های سنگ کربناتی بررسی کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که سرعت انتشار امواج فشاری در اثر اشباع افزایش می‌یابد ولی سرعت امواج برشی در سنگ‌های اشباع از سیال، تغییرات ناچیزی نسبت به همان سنگ‌ها در حالت خشک نشان می‌دهد. افزایش فشار مؤثر در هر دو حالت خشک و اشباع سبب افزایش سرعت می‌شود ولی آهنگ افزایش سرعت امواج فشاری بیش‌تر است. آن‌ها همچنین بیان نموده‌اند که در هر دو نمونه اشباع و خشک سرعت امواج فشاری و برشی با افزایش تخلخل رابطه معکوس و با افزایش چگالی رابطه مستقیم دارد اما آهنگ تغییرات سرعت امواج فشاری بیشتر است [۲۲]. قهرمان (۲۰۰۷) برای برآورد سرعت موج فشاری (V_p) در سنگ اشباع با استفاده از سرعت موج فشاری در سنگ خشک و ارزیابی تاثیر اشباع‌شدگی بر سرعت موج الاستیک، سرعت موج فشاری و برشی را در ۴۱ نمونه سنگ آذرین، رسوبی و دگرگونی اندازه‌گیری کرده است. قهرمان گزارش کرده است که یک رابطه خطی قوی بین سرعت موج فشاری در حالت خشک با حالت اشباع وجود دارد و می‌توان سرعت موج فشاری نمونه اشباع را با استفاده از سرعت موج فشاری نمونه خشک برآورد کرد [۲۳]. ایوانز^۴ و همکاران (۲۰۰۸) دریافته‌اند که دامنه موج‌های عبوری در محیط دانه ریز اشباع از آب مقطر نسبت به زمانی که محیط دانه درشت باشد، بزرگ‌تر هستند و افت فرکانسی و دامنه با افت فشار منفذی در محیط دانه ریز شدت بیش‌تری دارد. ولی هنگامی که در همان آب CO_2 حل کردند دامنه‌های

^۱ Tugrul

^۲ Zarif

^۳ Kahraman

^۴ Evans

موج بزرگ‌تر از حالت آب خالص دیده شده است. ایشان این پدیده را به افزایش چگالی سیال منفذی نسبت داده‌اند. از یافته‌های مهم دیگر آن‌ها این بود که تغییرات دامنه و فرکانس موج عبوری بسیار سریع‌تر از سرعت موج خود را به نمایش می‌گذارد [۲۴]. واسکونسلوس^۱ و همکاران (۲۰۰۸) به منظور بررسی مناسب بودن سرعت پالس فراصوت (UPV) به عنوان یک روش ساده و مقرون به صرفه غیرمخرب برای پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی گرانیت و ارزیابی سطح هوازدهی آن آزمایش وسیعی طراحی کردند. خواص مکانیکی و فیزیکی که بررسی کرده‌اند به ترتیب شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، چگالی و تخلخل می‌شود. برای این منظور، اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت با فرکانس طبیعی تراگذار در نمونه‌هایی با اندازه و شکل مختلف انجام شده است. نمونه‌های مکعبی، منشوری کششی و استوانه‌ای فشاری با اندازه مشخص تحت شرایط رطوبت مختلف یعنی خشک و اشباع و دو تراگذار با فرکانس‌های متمایز در نظر گرفته شده‌اند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که اگر چه تفاوت قابل توجهی بین فرکانس تراگذارها نیست، مقادیر UPV اندازه‌گیری شده با فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز کمی پایین‌تر از آن‌هایی است که با تراگذار ۵۴ کیلوهرتز اندازه‌گیری شده‌اند. همچنین نمونه‌های با اندازه کوچک‌تر (نمونه‌های کششی) UPV کم‌تری داشتند. عواملی مانند هوازدهی و رطوبت نیز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقادیر UPV دارند. گرانیت هوازده نسبت به گرانیت تازه UPV پایین‌تری دارد و مقادیر UPV در گرانیت اشباع از گرانیت خشک بیش‌تر است. علاوه بر این، ریزساختار داخلی مربوط به تورق یا صفحات شکستگی منجر به ناهمسانگردی قابل توجهی در UPV می‌شود و مقادیر بیش‌تر سرعت را در راستای موازی با تورق یا صفحات شکست ثبت کرده‌اند. رطوبت منجر به کاهش حساسیت UPV برای تشخیص ریزترک‌های داخلی که باعث ناهمسانگردی هستند، می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد UPV روش غیرمخرب ساده ارزیابی ناهمسانگردی داخلی برای نمونه‌های گرانیت خشک است. همبستگی‌های آماری قابل توجهی که بین سرعت پالس فراصوت و خواص مکانیکی یعنی مقاومت کششی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ایجاد شده است، نشان می‌دهد که این خواص را می‌توان

^۱ Vasconcelos

به صورت منطقی با استفاده از این روش غیرمخرب برآورد کرد. به طور خاص، همبستگی‌های آماری به دست آمده بین UPV و خصوصیات شکستگی می‌تواند برای برآورد رفتار شکست گرانیات تحت فشار و کشش استفاده شود. خروجی اصلی کار این بود که سرعت پالس فراصوت می‌تواند به عنوان یک روش ساده و مقرون به صرفه غیرمخرب برای پیش‌بینی اولیه خواص مکانیکی و فیزیکی و همچنین به عنوان یک ابزار برای ارزیابی تغییرات هوازگی گرانیات که در طول مدت بهره‌برداری رخ می‌دهد استفاده شود [۲۵]. لاسیلا^۱ و همکاران (۲۰۱۰) سرعت انتشار موج P و S را در نمونه‌های میکا شیبست خشک به دست آمده از چال حفاری عمیق اوتکومپو^۲ در شرق فنلاند تحت فشار تک‌محوره در یک دستگاه اندازه‌گیری سفارشی اندازه‌گیری کرده‌اند. سرعت‌های به دست آمده در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال برای امواج P و S به ترتیب 5520 ± 130 و 3270 ± 60 متر بر ثانیه بوده که با مقادیر به دست آمده تحت فشار سه محوری (5530 ± 200 برای امواج فشاری و 3300 ± 90 برای امواج برشی) مطابقت داشته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اندازه‌گیری سرعت فراصوت می‌تواند تحت فشار تک‌محوره و بدون نیاز به هندسه استوانه‌ای نمونه انجام شود [۲۶]. ارزیابی کمی مقدار گاز در پژوهش آزمایشگاهی که توسط یام^۳ و اشمیت^۴ (۲۰۱۱) انجام گرفته نشان می‌دهد که در یک نمونه اشباع از سیال محتوی CO₂ تغییرات سرعت امواج الاستیک همخوانی خوبی با مدل بیوت دارد ولی تغییرات دامنه به شدت وابسته به تغییرات فشار منفذی و فرکانس بوده است [۲۷]. نفسلی اوغلو^۵ (۲۰۱۳) به منظور بررسی خواص ژئومکانیکی سنگ‌های ضعیف و بسیار ضعیف با استفاده از اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت و با توجه ویژه به ترکیب کانی شناسی، سرعت موج P را در ۶۶ نمونه سنگ رسوبی از جمله سنگ‌های رسی و گل‌سنگ جمع‌آوری شده از منطقه فیروز کوه^۶ استانبول اندازه‌گیری کرده‌اند و آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره

^۱ Lassila

^۲ Outokumpu

^۳ Yam

^۴ Schmitt

^۵ Nefeslioglu

^۶ Firuzkoy

(UCS) روی آن‌ها انجام داده‌اند. در طول آزمایش UCS تغییر شکل محوری را نیز مورد بررسی قرار داده و مدول الاستیک (E_i) سنگ را محاسبه کرده‌اند. روابط آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت موج P (V_p)، UCS و E_i را بررسی کرده و به منظور بررسی اثر ترکیب کانی شناسی در پیش‌بینی معادلات تجربی V_p -UCS و V_p - E_i از طیف سنجی بازتابی استفاده کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری V_p و طیف سنجی بازتابی به طور موثر می‌توانند با هم برای ارزیابی خواص ژئومکانیکی سنگ‌های ضعیف و بسیار ضعیف استفاده شوند [۲۸]. کاندلوال^۱ (۲۰۱۳) رابطه بین ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی انواع مختلف سنگ با سرعت موج P را بررسی کرده است. در این مطالعه، برای به دست آوردن یک رابطه تجربی بین سرعت موج P و مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، چگالی، شاخص دوام، مدول یانگ، نسبت پواسون، شاخص مقاومت به ضربه و عدد ریباند چکش اشمیت، نمونه‌های توده سنگ آذرین، رسوبی و سنگ‌های دگرگونی از مکان‌های مختلف در هند جمع آوری شده است. نتایج آزمایش‌های او یک ارتباط بسیار قوی بین سرعت موج P و خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی انواع مختلف سنگ با ضریب همبستگی بسیار بالا را نشان می‌دهد. همه این خواص یک رابطه خطی با سرعت موج P دارند، به جز نسبت پواسون که رابطه چند جمله‌ای ضریب همبستگی بالاتری به دست می‌دهد. همچنین برای بررسی حساسیت معادلات تجربی، از آزمون t استیودنت^۲ استفاده کرده است که اعتبار همبستگی‌های ارائه شده را تایید می‌کرد. این مطالعه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، مقاومت برشی، چگالی، شاخص دوام، مدول یانگ، نسبت پواسون، شاخص مقاومت به ضربه، و عدد ریباند چکش اشمیت انواع مختلف سنگ را می‌توان با استفاده از سرعت موج P و معادلات تجربی ساده با شرایط مشخص، بدون برون‌یابی برآورد کرد. با این حال او بیان نموده است که اندازه‌گیری سرعت موج P به طور کامل نمی‌تواند جایگزین آزمون مکانیکی نمونه‌های سنگ شوند [۲۹]. ارسیکدی^۳ و همکاران (۲۰۱۴) مطالعاتی را روی مقاومت

^۱ Khandelwal

^۲ T- Student Test

^۳ Ercikdi

فشاری تک‌محوره و ویژگی‌های UPV مصالح سیمانی^۱ (CPB) تولید شده از دو باطله مختلف کارخانه انجام داده‌اند. آزمایش UPV و UCS در دوره‌های ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز پس از نمونه‌گیری، روی ۲۴۰ نمونه CPB انجام شده است. آن‌ها گزارش کرده‌اند که با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات، برای نمونه‌های ۱۰ تا ۲۰ سانتی متری CPB مقادیر UCS با مقادیر UPV در ارتباط است و یک رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا بین UCS و UPV وجود دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که UPV اساساً مستقل از اندازه نمونه است و بنابراین می‌تواند برای برآورد سریع مقاومت و کیفیت نمونه CPB حتی در نمونه‌های کوچک همراه با مزایای کاهش اندازه نمونه مورد استفاده قرار گیرد. آن‌ها UPV را به عنوان یک آزمون کم هزینه با صرف زمان کم‌تر و روشی عملی که می‌تواند با قابلیت اطمینان در تعیین UCS و کیفیت نمونه‌های CPB مورد استفاده قرار گیرد، پیشنهاد کرده‌اند [۳۰]. وازانلی^۲ و همکاران (۲۰۱۵) مطالعاتی را با هدف بررسی پتانسیل استفاده از UPV به عنوان یک روش ساده و مقرون به صرفه غیرمخرب برای توصیف خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک بسیار متخلخل و نرم (سنگ لچه^۳)، به منظور کمک به روش‌های بررسی و مطالعه مصالح تاریخی انجام داده‌اند. این تحقیقات در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و سرعت امواج فراصوت با توجه به اندازه نمونه، با استفاده از فرکانس مناسب یک مگاهرتز اندازه‌گیری شده‌اند. ناهمسانگردی و حضور آب به عنوان عوامل مؤثر در انتشار موج فراصوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آن‌ها ارتباط بین UPV، چگالی و مقاومت فشاری تک محوری (UCS) در شرایط خشک و اشباع شده را با تحلیل رگرسیون بررسی کرده‌اند و بیان نموده‌اند مقادیر پایین UPV و مقاومت فشاری به دست آمده با تخلخل بالا و سیمان‌شدگی ضعیف سنگ لچه مطابقت دارد. ناهمسانگردی کمی توسط UPV تشخیص داده شده و ثابت شده است تاثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری ندارد. به علاوه مشاهده کرده‌اند سنگ اشباع نسبت به سنگ خشک UPV کم‌تری دارد. در توضیح این امر تاثیر آب روی نیروهای پیوند شیمیایی بین ذرات با سیمان‌شدگی ضعیف اسکلت

^۱ Cemented Paste Backfill

^۲ Vasanelli

^۳ Lecce stone

سنگ و در نتیجه تضعیف ارتباط بین دانه‌ها و کاهش UPV و مقاومت مکانیکی پیشنهاد شده است، همچنین سهم کانی‌های رسی در کاهش UPV در شرایط اشباع نیز قابل توجه است. آن‌ها یک همبستگی آماری قابل اعتماد بین UPV و UCS در هر دو شرایط خشک و اشباع به دست آورده‌اند که اجازه می‌دهد تا با استفاده از روش‌های تست غیرمخرب مانند سرعت موج فراصوت، یک برآورد مناسب از مقاومت سنگ لچه به دست آورد. همبستگی آماری پایینی بین UPV و تراکم پیدا شده است که نشان می‌دهد که عوامل دیگری نیز روی سنگ لچه تاثیر می‌گذارند. برای توجیه این نتایج، با توجه به حساسیت بالای امواج فراصوت در شناسایی ویژگی‌های ذاتی سنگ مربوط به تغییرات بافتی و کانی شناسی، تغییرات بافت و حضور متغیر کانی‌های رسی پیشنهاد شده است. در نهایت، این مطالعه منجر به بینش بهتر در پاسخ سنگ آهک متخلخل و نرم به انتشار موج فراصوت و قابلیت اطمینان روش UPV در ارزیابی مقاومت فشاری آن، شده است [۳۱]. یکی از پارامترهای مهمی که سرعت موج فراصوت در سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد به احتمال زیاد طول نمونه‌های آزمون است. کارامان^۱ و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای، به منظور کشف تاثیر طول نمونه در UPV، نمونه‌های سنگ را از هشت مکان مختلف در ترکیه جمع آوری کرده‌اند. نمونه‌های استاندارد N_x را با طول‌های مختلف ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌متر آماده و سنگ‌ها را از نظر زمین شناسی به دو گروه آتشفشانی و رسوبی شیمیایی (سنگ آهک) تقسیم کرده‌اند. آزمون UPV در شرایط خشک و اشباع شده را برای هر ۲۰۰ نمونه انجام داده‌اند. با ارزیابی نتایج آزمون، نشان داده‌اند که طول نمونه‌ها به طور قابل توجهی روی مقادیر UPV تاثیر می‌گذارد و با تحلیل رگرسیون، روشی برای تعیین طول آستانه نمونه سنگ‌های مورد مطالعه ارائه کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که تغییرات مقادیر UPV_{dry} و UPV_{sat} به طور کلی در نمونه‌هایی با طول کم‌تر از طول آستانه است. در این مطالعه، طول آستانه نمونه برای سنگ‌های آتشفشانی ۷۹ میلی‌متر و برای سنگ آهک ۱۰۹ میلی‌متر به دست آورده‌اند [۱]. مهاجرانی و جلالی (۱۳۹۴) تاثیر عوامل نسبت طول به قطر، فرکانس موج، دامنه‌ی موج و تعداد پالس در واحد زمان را روی نمونه‌های سنگ تراورتن

^۱ Karaman

آزمایش کرده‌اند. از بررسی آزمایشات فوق به‌طور کلی مشخص شده است که با افزایش نسبت طول به قطر، افزایش دامنه‌ی موج و کاهش فرکانس سرعت موج فشاری در نمونه‌ی تراورتن افزایش می‌یابد. همچنین سرعت موج فشاری با تغییرات تکرار پالس در واحد زمان در مقدار مشخصی حداکثر می‌شود. [۳۲]. اوزکان^۱ و یایلا^۲ (۲۰۱۶) با هدف به دست آوردن ارتباطی بین خواص فیزیکی و سرعت پالس فراصوت در نمونه‌های خاک رس در دماهای بالا، خواص فیزیکی و سرعت پالس فراصوت نمونه‌های رسی را به عنوان تابعی از دمای تجزیه و تحلیل کرده‌اند. پس از حرارت دادن نمونه‌های خاک رس فشرده شده در دماهای ۸۵۰، ۹۰۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خواص فیزیکی آن‌ها مورد بررسی قرار داده و با دستگاه آزمون فراصوت، سرعت پالس فراصوت در هر نمونه خاک رس حرارت دیده اندازه‌گیری کرده‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند یک رابطه ذاتی بین خواص فیزیکی و سرعت پالس فراصوت وجود دارد. به طوری که در نتیجه افزایش چگالی نمونه‌ها، تفاوت بین سرعت پالس فراصوت با افزایش دما بیش‌تر می‌شود. بنابراین، می‌توان استنباط کرد که سرعت پالس فراصوت تمایل دارد از افزایش چگالی ناشی از حرارت، پیروی کند. علاوه بر این، UPV به شدت وابسته به ساختار نمونه است. آن‌ها بیان کرده‌اند که به عنوان یک نتیجه نهایی UPV می‌تواند برای پیش‌بینی خواص فیزیکی نمونه‌های خاک رس حرارت دیده مورد استفاده قرار گیرد [۳۳].

۴-۲ بررسی رابطه سرعت موج فراصوت با تنش‌های محیطی

در بررسی‌های آزمایشگاهی که در آن‌ها سرعت امواج کشسان P و S، در فشارهای همه جانبه متفاوت اندازه‌گیری شده است، به خوبی رفتار غیرخطی سرعت امواج برحسب فشار ملاحظه می‌شود. ابره‌ارت-فیلیپس^۳ و همکاران (۱۹۸۹) با اندازه‌گیری محتوای رس و تخلخل در ۶۴ نمونه ماسه سنگ اشباع یک رابطه غیرخطی چند متغیره بین سرعت امواج الاستیک و فشار موثر ارائه کرده‌اند. نتایج آزمایش‌های

^۱ Ozkan

^۲ Yayla

^۳ Eberhart-Philips

آن‌ها نشان می‌دهد در فشارهای کمتر از فشار موثر، با افزایش فشار، سرعت به صورت نمایی زیاد می‌شود و برای فشارهای بزرگتر از 0.2 کیلو بار سرعت به تدریج به صورت خطی افزایش می‌یابد [۳۴]. وانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۵) مفهوم فشار بحرانی را که به طور عمده به چگالی و توزیع ریزترک‌ها بستگی دارد معرفی کرده و بیان نموده‌اند در فشارهای پیش از فشار بحرانی رابطه بین سرعت و فشار غیر خطی است و بعد از آن تغییرات سرعت نسبت به فشار از رابطه خطی پیروی می‌کند [۳۵]. وپفر^۲ و کریستنسن^۳ (۱۹۹۱) سرعت موج فشاری را به عنوان تابعی از فشار محصور کننده در سنگ گنایس اندازه‌گیری کرده و مشاهده کرده‌اند که تاثیر فشار بر سرعت در فشارهای کم‌تر از 200 مگاپاسکال که در آن با افزایش فشار ریزترک‌ها شروع به بسته شدن و با کاهش فشار هنگام باربرداری شروع به باز شدن می‌کنند، بیشتر است. این رفتار به طور کلی به این دلیل است که بسته شدن ریزترک‌ها آسان‌تر از دوباره باز شدن آنهاست. در فشارهای بالا که تاثیر ریزترک‌ها ناچیز است سرعت با شیب کمی افزایش می‌یابد. آنها منطقه گذار از تغییرات با شیب زیاد به تغییرات با شیب کم را که در حد فاصل فشار 60 تا 200 مگاپاسکال رخ می‌داد منطقه زانویی نامیده‌اند و به طور کلی یک رابطه نمایی برای بیان رفتار سرعت بر حسب فشار ارایه کرده‌اند [۳۶]. آنسلمتی^۴ و ابرلی^۵ (۱۹۹۳) تاثیر فشار روی سرعت امواج فشاری و برشی در نمونه‌های کربناتی را تحت فشار همه جانبه و فشارهای منفذی گوناگون بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که در فشار 8 مگاپاسکال تغییرات سرعت موج فشاری و برشی به دلیل مقدار و نوع تخلخل است و تفاوت‌های کانی شناسی تاثیرگذار نیستند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند افزایش سرعت در نمونه‌هایی که به صورت آزمایشگاهی فشرده شده بودند کمتر از افزایش سرعت ناشی از کاهش تخلخل در سنگ‌های طبیعی است. این اختلاف نشان می‌دهد تغییرات دیاژنتیکی همراه با فشردگی بیشتر از فشردگی ناشی از فشار دوباره بر سرعت امواج الاستیک موثر است [۳۷]. فجایر و

^۱ Wang, Q.

^۲ Wepfer

^۳ Christensen

^۴ Anselmetti

^۵ Eberli

همکاران (۲۰۰۸) با توجه به نقش فشار همه جانبه بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ روشن ساخته‌اند که در سنگ‌های ضعیف، اختلاف بین مدول‌های دینامیک و استاتیک حداکثر است و معمولاً مدول‌های دینامیک از مدول‌های استاتیک متناظر خود (مدول استاتیک تحت همان فشار همه جانبه) بزرگ‌تر هستند. با افزایش فشار همه جانبه و متراکم شدن سنگ، مقادیر مدول‌های الاستیک استاتیک و دینامیکی سنگ افزایش و اختلاف بین آن‌ها کاهش می‌یابد [۱۴].

پروسکوریاکوف^۱ و لیونسکی^۲ بیان نموده‌اند به منظور ارایه رابطه بین سرعت انتشار امواج الاستیک و سطح تنش تحت بارگذاری تک‌محوره، برای سنگ نمک که چگالی و تغییر شکل خزشی بالایی دارد؛ آزمایش‌هایی را روی نمونه‌های مکعبی نمک جمع آوری شده از سه افق پتاسی مختلف در عمق ۶۰۰ متری با اندازه‌های ۸، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری مورد آزمایش قرار داده‌اند. این نمونه‌ها در راستای عمود بر لایه بندی تحت بارگذاری قرار گرفته و سرعت امواج فراصوت در جهت عمود بر محور بارگذاری و موازی لایه بندی اندازه‌گیری شده است. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که با افزایش تنش، سرعت امواج طولی تا ۴۵ درصد سرعت امواج طولی در حالت بدون تنش کاهش می‌یابد و برای برآورد وضعیت تنش بر اساس سرعت امواج فشاری رابطه‌ای نمایی با پایه نپر ارایه کرده‌اند. به علاوه آن‌ها گزارش کرده‌اند که برای استفاده از این رابطه در شرایط طبیعی باید اثر مقیاس را در نظر گرفت و برای از بین رفتن اثر مقیاس لازم است نمونه حداقل ۲۵ تا ۳۰ برابر اندازه ذرات باشد [۳۸].

اثرات تنش حاضر و تنش پیشین روی سرعت امواج فشاری و برشی در سنگ‌های رسوبی (ماسه سنگ، چالک، شیل) توسط هولت^۳ و همکاران (۱۹۹۱) مطالعه شده است. آن‌ها سرعت صوت در نمونه‌های مغزه را در دو جهت متعامد و به طور همزمان تحت شرایط مختلف اعمال تنش (همسانگرد، ناهمسانگرد) اندازه‌گیری کرده‌اند. همچنین، یک سری آزمایش شبیه سازی انجام داده‌اند، که در آن ماسه سنگ مصنوعی تحت تنش تشکیل و سرعت صوت در طول و بعد از باربرداری اندازه‌گیری شده است.

^۱ Proskuryakov

^۲ Livenskii

^۳ Holt

آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت امواج صوتی در سنگ‌های رسوبی به تغییرات تنش حساس است، به ویژه در سطوح تنش کم‌تر از حداکثر تنشی که قبلاً تجربه کرده است. تقارن تنش (همسانگرد، ناهمسانگرد) در انتشار موج منعکس می‌شود. باربرداری ناهمسانگرد منجر به ناهمسانگردی صوتی می‌شود که پس از باربرداری کامل نیز باقی می‌ماند. آن‌ها تاکید کرده‌اند زمانی که اندازه‌گیری‌های صوتی برای مقایسه با داده‌های میدانی انجام می‌شوند باید شرایط آزمایشگاه به شرایط تنش برجا نزدیک باشد. تغییر در ناهمسانگردی و همچنین مقادیر سرعت می‌تواند در پیدا کردن جهت و مقدار تنش برجا کمک کند [۷].

مگلیس^۱ (۲۰۰۵) با اندازه‌گیری سرعت صوت در چال‌هایی با عمق یک متر حفر شده در ربع دهانه یک تونل معدنی گزارش داده است که در محل‌های تنش کششی سرعت امواج کم است که نشان دهنده وجود ریزترک‌ها حتی تا عمق یک متری است در حالی که در محل‌های تنش فشاری سرعت امواج زیاد است که نشان دهنده آسیب کمتر مصالح سنگی در این نواحی است [۳۹].

ساروت^۲ و همکاران (۲۰۰۷) برای ارزیابی ناهمسانگردی سرعت و تغییرات آن تحت بارگذاری سه محوره، سرعت امواج فشاری و برشی را در جهات مختلف نسبت به لایه بندی روی نمونه شیل کالوو-آکسفوردین^۳ اندازه‌گیری کرده‌اند. آن‌ها به منظور حداقل شدن خطای ناشی از تفاوت بین دو نمونه که ظاهراً ویژگی‌های سنگ شناسی و وضعیت فیزیکی یکسانی دارند، آزمایش‌های خود را روی یک نمونه مغزه انجام داده‌اند. این ارزیابی به برآورد چگالی و توزیع ریزترک‌ها، کمی کردن ناهمسانگردی ذاتی و ناشی از تنش در شیل تحت بارگذاری کمک می‌کند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که V_p و V_s اندازه‌گیری شده در راستای موازی با لایه بندی کاهش یک نواخت، V_p اندازه‌گیری شده در زاویه ۹۰ درجه نسبت به لایه بندی افزایش یک نواخت و $V_p(45)$ روندی مشابه مطالعات سایر محققان دارد. آن‌ها بیان نموده‌اند با استفاده از نتایج این مطالعه می‌توان داده‌های ورودی لازم برای مدلسازی انتشار موج در شیل‌های

^۱ Meglis

^۲ Sarout

^۳ Callovo-Oxfordian Shale

متخلخل با نفوذپذیری پایین و حاوی سیال را فراهم کرد [۴۰].

در آزمایشی که توسط نیو^۱ و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده است، با استفاده از فرایند تکرار پالس در گروه‌های صدتایی و بهبود نسبت موج به نویز، سرعت فراصوت از سطح زمین، جهت تعیین تغییرات تنش برای پیش‌بینی زلزله اندازه‌گیری شده است. این روش امکان بررسی انتشار موج‌ها تا مسافت بیش از ۵ متر را میسر می‌کند. این فن آوری در معادن زیرزمینی کاربردی نیست [۴۱].

سنگون^۲ و همکاران (۲۰۱۱) با هدف بررسی اثر بارگذاری محوری بر سرعت موج فشاری، مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۱ نمونه سنگ مختلف انجام داده‌اند. در این آزمایش‌ها سرعت موج فشاری را در سطوح مختلف بار محوری اندازه‌گیری کرده و مشاهده کرده‌اند که V_p تحت تاثیر بارگذاری محوری قرار می‌گیرد و از آنجا که سنگ‌های به صورت برجا تحت تنش هستند بهتر است مشخصه سازی صوتی سنگ نیز تحت بارگذاری انجام شود. با افزایش بار در سنگ‌های با تخلخل کم مقادیر V_p یا تغییر نمی‌کند یا به آرامی افزایش می‌یابد اما در سنگ‌های با تخلخل بالا به آرامی کم می‌شود [۴۲].

اسلامی و همکاران (۲۰۱۲) سرعت امواج فراصوت را در نمونه‌های آهکی تحت بارگذاری خزشی اندازه‌گیری کرده و مشاهده کرده‌اند که سرعت امواج فراصوت اولیه یعنی زمانی که نمونه تحت بارگذاری قرار نگرفته همسانگرد است اما در طول بارگذاری ناهمسانگرد می‌شود. از آغاز بارگذاری تا اولین ترک‌زایی پایدار، UPV افزایش می‌یابد که نشان دهنده بسته شدن ریزترک‌های موجود در نمونه عمود یا تقریباً عمود بر محور بارگذاری است. سپس به آرامی شروع به کاهش می‌کند. در این مرحله ریزترک‌های موازی با محور بارگذاری شروع به باز شدن می‌کنند. این روند مکانیسم شناسایی شده به وسیله منحنی‌های تنش کرنش را تایید می‌کند. اسلامی و همکاران گزارش کرده‌اند اگرچه مشاهدات استاتیک و دینامیکی با سایر پژوهش‌های انجام شده به خوبی مطابقت داشته است اما بعد از باربرداری کامل، همسانگردی سرعت امواج فراصوت در همه جهت‌های انتشار بهبود می‌یابد (جز در چرخه آخر

^۱ Niu

^۲ Sengun

که نمونه تحت تنش پس از مقاومت نهایی قرار داشت) و فقط از مقادیر پیش از بارگذاری کوچک‌تر هستند. این مشاهده با نتایج پژوهش‌های سایر نویسندگان تفاوت قابل توجهی دارد [۴۳].

چن^۱ و ژو^۲ (۲۰۱۶) به منظور بررسی تاثیر آزاد سازی تنش و باربرداری ناشی از فعالیت‌های معدنی و عمرانی روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، سرعت موج فشاری را در طول آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره اندازه‌گیری کرده و مشاهده کرده‌اند که تا تنش بحرانی برابر ۲۰ تا ۳۰ درصد مقاومت فشاری تک‌محوره V_p با شیب زیاد افزایش می‌یابد. با رسیدن تنش اعمال شده به تنش بحرانی شیب افزایش سرعت کم می‌شود تا به بیشترین مقدار خود برسد و بعد از آن نیز با شیب زیادی کاهش می‌یابد. بر قسمت اول منحنی سرعت-تنش نتایج آزمایشگاهی چن و ژو یعنی تنش‌های کم‌تر از تنش بحرانی تابع نمایی و بر قسمت دوم منحنی تابع چندجمله‌ای درجه دو برازش شده است. به علاوه آن‌ها بیان نموده‌اند منحنی سرعت موج فشاری-تنش، تغییر شکل سه مرحله حجمی را که در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره دیده می‌شود به خوبی نشان می‌دهد. آن‌ها در این مطالعه مفهومی شاخص باربرداری که نسبت سرعت موج فشاری تحت تنش دوباره برجا به سرعت موج فشاری در شرایط بدون تنش است معرفی کرده‌اند و به کمک این شاخص روش طبقه بندی توده سنگ BQ^3 را که به طور گسترده در چین استفاده می‌شود، بهبود بخشیده‌اند [۴۴].

نتایج مطالعات و آزمایش‌های نویسندگان مذکور در جدول ۲-۳ به صورت خلاصه نشان داده شده است.

^۱ Chen

^۲ Xu

^۳ Basic Quality

جدول ۲-۳ جمع‌بندی نتایج مطالعات، تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده

شماره	نام نویسنده	سال	عنوان گزارش	ملاحظات
۱	تاد و سیمونز	۱۹۷۲	تأثیر فشار منفذی بر سرعت موج فشاری در سنگ‌های با تخلخل کم	کاهش سرعت صوت در نمونه‌های خشک با اشباع شدگی ۲۰-۳۰ درصد
۲	پروسکوریاکوف و لیونسکی	۱۹۷۵	بررسی سرعت انتشار امواج الاستیک در رابطه با تنش در سنگ نمک تحت فشار تک محوری	کاهش ۴۰ تا ۴۵ درصدی سرعت امواج طولی نسبت به سرعت امواج طولی در حالت آزاد با افزایش تنش و ارایه رابطه نمایی بین سرعت امواج فشاری و سطح تنش
۳	توکسوز و کاستر	۱۹۷۶	سرعت و میرایی موج‌های لرزه‌ای در محیط‌های دو فازی	تأثیر شکل منافذ، تراکم‌پذیری، چگالی سنگ و سیال بر سرعت موج فشاری در نمونه‌های خشک و اشباع و تغییرات اندک موج برشی در این دو محیط
۴	ابرهارت-فیلیپس و همکاران	۱۹۸۹	روابط تجربی بین سرعت لرزه‌ای، فشار موثر، تخلخل و درصد رس در ماسه سنگ	ارایه یک رابطه غیرخطی چند متغیره بین سرعت امواج الاستیک و فشار موثر
۵	وانگ و باتل	۱۹۹۰	تأثیر تفاوت در سیال منفذی بر سرعت موج لرزه‌ای در سنگ	تفاوت سرعت موج فشاری با توجه به سیال منفذی موجود در سنگ و افزایش سرعت موج فشاری در اثر اشباع شدگی
۶	هولت و همکاران	۱۹۹۱	تأثیر تنش و تاریخچه تنش بر انتشار امواج صوتی در سنگ رسوبی	حساسیت سرعت امواج صوتی در سنگ‌های رسوبی به تغییرات تنش، به ویژه در سطوح تنش کمتر از حداکثر تنش در تاریخچه تنش
۷	ویفر و کریستنسن	۱۹۹۱	رابطه سرعت با فشار محصور کننده و کاربردهای آن	اندازه‌گیری سرعت امواج کشسان P و S در فشارهای همه جانبه متفاوت و ارایه رابطه نمایی بین سرعت امواج الاستیک و فشار
۸	پراساد و مایزور	۱۹۹۲	مکانیسم میرایی در ماسه، مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نظریه بیوت	تأثیر اندازه ذرات در سرعت و میرایی موج فشاری و مقدار سرعت و میرایی اندازه‌گیری شده در ماسه‌های اشباع بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل بیوت است
۹	آنسلمتی و ابرلی	۱۹۹۳	کنترل سرعت صوت در سنگ‌های کربناته	افزایش سرعت در فشارهای کم برای نمونه‌های نامتراکم و تأثیر پذیری کمتر نمونه‌های سخت تحت فشار
۱۰	پلوسک	۱۹۹۶	تجهیزات بررسی فراصوت در معدن	استفاده از مزایای جهت‌داری یک موج با فرکانس بالا و میرایی کم یک موج با فرکانس پایین برای اندازه‌گیری سرعت انتشار و میرایی صوت در سنگ‌های سیلیسی با موج پیوسته
۱۱	گوپتا و رائو	۱۹۹۸	ویژگی‌های شاخص سنگ‌های هوازده: روابط متقابل و کاربردها	کاهش UPV با افزایش درجه هوازده‌گی در نمونه‌های اشباع نشده بازالت، گرانیته و کوارتزیت

ادامه جدول ۲-۳				
۱۲	طغرل و ظریف	۱۹۹۹	همبستگی مشخصات کانی شناسی و بافت با خواص مهندسی سنگ‌های گرانیتی جمع‌آوری شده از ترکیه	ارایه روابط خطی بین مقاومت فشاری تک‌محوره سرعت موج فشاری در سنگ گرانیت
۱۳	قهرمان	۲۰۰۱	بررسی روش‌های ساده برای ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ	ارایه رابطه غیر خطی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سرعت صوت در سنگ‌های مختلف
۱۴	مگلیس	۲۰۰۵	ارزیابی در آسیب ریز ترک درجا با استفاده از توموگرافی سرعت فراصوت	کاهش UPV در اثر آسیب ناشی از رشد ترک
۱۵	وانگ و همکاران	۲۰۰۵	وابستگی فشار و ناهمسانگردی سرعت موج در سنگ‌های دگرگونی فشار بالای کمر بند کوهزایی دابی-سولو (چین)	ارایه بریح ه مفهومی فشار بحرانی و تغییر رفتار غیر خطی سرعت امواج نسبت به تغییرات فشار به رفتار خطی در فشارهای بعد از فشار بحرانی
۱۶	قاسمی و همکاران	۲۰۰۵	سرعت انتشار امواج در نمونه‌های سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربنی	افزایش سرعت انتشار امواج تراکمی در اثر اشباع، افزایش سرعت در هر دو حالت خشک و اشباع با افزایش فشار مؤثر، رابطه معکوس تغییرات سرعت امواج برشی و فشاری با تخلخل و رابطه مستقیم سرعت امواج با چگالی
۱۷	قهرمان	۲۰۰۷	همبستگی بین سرعت موج فشاری در حالت اشباع و خشک سنگ	برآورد سرعت موج فشاری در حالت اشباع با استفاده از سرعت موج فشاری در سنگ خشک
۱۸	ساروت و همکاران	۲۰۰۷	خواص دینامیکی و ناهمسانگردی شیل تحت بارگذاری سه محوری: بررسی تجربی و نظری	اندازه‌گیری سرعت امواج فشاری و برشی در جهات مختلف نسبت به لایه بندی در نمونه شیل کالوو-آکسفوردین
۱۹	اوانز و همکاران	۲۰۰۸	اثر هندسه منافذ و CO ₂ حل شده در انتقال فراصوت در طول تغییرات فشار منفذی	بیش تر بودن دامنه‌های موج‌های عبوری در محیط دانه ریز اشباع از آب مقطر نسبت به محیط دانه درشت باشد
۲۰	نیو و همکاران	۲۰۰۸	تغییرات سرعت پیش لرزه‌ای مشاهده شده از منبع فعال نظارت در سایت حفاری Parkfield SAFOD	استفاده از فرایند تکرار پالس، بهبود نسبت موج به نویز و اندازه‌گیری سرعت فراصوت از سطح زمین، جهت تعیین تغییرات تنش برای پیش‌بینی زلزله
۲۱	فجایر و همکاران	۲۰۰۸	مکانیک سنگ مربوط نفت	افزایش مقادیر مدول‌های کشسان استاتیک و دینامیکی سنگ با افزایش فشار همه جانبه و متراکم شدن سنگ و کاهش اختلاف بین آن‌ها
۲۲	واسکونسولوس و همکاران	۲۰۰۸	ارزیابی فراصوت خواص فیزیکی و مکانیکی گرانیت	افزایش UPV در گرانیت با افزایش اشباع شدگی و کاهش هوازدگی، وجود رابطه منطقی بین سرعت پالس فراصوت و ویژگی‌های ژئومکانیکی گرانیت

ادامه جدول ۲-۳				
عدم نیاز به هندسه استوانه‌ای برای اندازه گیری سرعت امواج الاستیک	سرعت اولتراسونیک سنگ‌های گنایس بالایی در چال حفاری عمیق اوتکومپو، مقایسه بارگذاری تک‌محوره و سه محوره	۲۰۱۰	لاسیلا و همکاران	۲۳
وابستگی شدید تغییرات دامنه به تغییرات فشار منفذی و فرکانس و همخوانی خوب تغییرات سرعت امواج الاستیک در یک نمونه اشباع از سیال محتوی CO ₂ با مدل بیوت	مطالعه آزمایشگاهی فیزیک سنگ	۲۰۱۱	یام و اشمیت	۲۴
افزایش تدریجی V _p در سنگ‌های با تخلخل کم و کاهش تدریجی آن در سنگ‌های با تخلخل بالا با افزایش بار	سرعت موج P و سختی چکش اشمیت سنگ تحت بارگذاری فشاری تک محوری	۲۰۱۱	سنگون و همکاران	۲۵
همسانگردی دوباره سرعت امواج فراصوت در همه جهات انتشار پس از باربرداری کامل	برآورد آسیب یک سنگ آهک متخلخل با استفاده از اندازه‌گیری پیوسته سرعت موج در طول باگذاری خزش تک محوری	۲۰۱۲	اسلامی و همکاران	۲۶
استفاده از اندازه‌گیری V _p و طیف سنجی بازتابی به طور برای ارزیابی خواص ژئومکانیکی سنگ‌های ضعیف و بسیار ضعیف	بررسی خواص ژئومکانیکی مصالح سنگی ضعیف و بسیار ضعیف با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب: اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت و طیف سنجی بازتاب	۲۰۱۳	نفسلی اوغلو	۲۷
ارتباط بسیار قوی بین سرعت موج P و خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی انواع مختلف سنگ با ضریب همبستگی بسیار بالا	ارتباط بین سرعت موج فشاری و خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مختلف	۲۰۱۳	کاندلوال	۲۸
رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا بین UCS و UPV برای نمونه‌های ۱۰ تا ۲۰ سانتی متری CPB	خواص مقاومتی و فراصوت CPB	۲۰۱۴	ارسیکدی و همکاران	۲۹
کارایی روش UPV برای توصیف خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک بسیار متخلخل و نرم (لچه)	سرعت پالس فراصوت برای ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک بسیار متخلخل	۲۰۱۵	وازانلی و همکاران	۳۰
تاثیر قابل توجه طول نمونه‌ها روی مقادیر UPV، تعیین طول آستانه نمونه و تغییرات مقادیر UPV _{dry} و UPV _{sat} در نمونه‌هایی با طول کم‌تر از طول آستانه	اثر طول نمونه بر سرعت موج فشاری فراصوت در برخی سنگ‌های آتشفشانی و سنگ آهک	۲۰۱۵	کارامان و همکاران	۳۱
افزایش سرعت موج فشاری در نمونه‌ی تراورتن با افزایش نسبت طول به قطر، افزایش دامنه‌ی موج و کاهش فرکانس	بررسی اثر عوامل دستگامی و مشخصات هندسی نمونه بر سرعت موج فشاری در نمونه‌های سنگی تراورتن	۲۰۱۵	مهاجرانی و جلالی	۳۲

ادامه جدول ۲-۳				
افزایش تفاوت بین سرعت پالس فراصوت با افزایش دما تحت تاثیر افزایش چگالی نمونه‌ها، وابستگی UPV به ساختار نمونه و استفاده از UPV برای پیش‌بینی خواص فیزیکی نمونه‌های خاک رس حرارت دیده	بررسی ارتباط خواص فیزیکی و سرعت پالس فراصوتی نمونه‌های رسی حرارت دیده	۲۰۱۶	اوزکان و یایلا	۳۳
ارایه شاخص باربرداری و بهبود روش طبقه بندی توده سنگ BQ	رابطه تنش و سرعت موج فشاری در سنگ و کاربردهای آن	۲۰۱۶	چن و ژو	۳۴

۲-۵ جمع‌بندی

با بررسی مطالعات انجام شده در مورد استفاده از سرعت امواج فراصوت در مکانیک سنگ مشاهده می‌شود که حجم زیادی از این مطالعات و آزمایش‌ها به بررسی رابطه بین سرعت امواج فراصوت با خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ می‌پردازد. به علاوه از بین پژوهش‌های انجام شده در زمینه رابطه بین سرعت امواج فراصوت و تنش‌های محیطی نیز بخش اندکی مربوط به استفاده از کاربرد تغییرات UPV در تنش‌های اعمال شده مختلف است. بنابراین طرح آزمایش این تحقیق به عنوان رهیافتی برای رفع کمبود آزمایش‌های انجام شده و نیاز به نتایج جامع و کاربردی در مورد تاثیر روند بارگذاری روی تغییرات سرعت امواج فراصوت تعریف شده است. به علاوه به دلیل متفاوت بودن شرایط ساختاری نمونه‌های سنگی از نظر شدت و اندازه ریزترک‌ها و تخلخل و همچنین دشواری تهیه نمونه‌های مکعبی از سنگ، به منظور ارسال و دریافت بهتر پالس فراصوت، در این آزمایش‌ها از نمونه‌های مصنوعی گچ - سیمان استفاده شده است.

فصل سوم

طرح آزمایش و روش انجام تحقیق

۳-۱ مقدمه

سرعت امواج الاستیک را به طور معمول با عبور موج فراصوت با فرکانس معین از نمونه سنگ (و در معادن از پایه سنگی) اندازه‌گیری می‌کنند. زمانی که طول می‌کشد، تا پالس از نمونه (یا پایه) عبور کند (t)، در نوسان‌نگار ثبت می‌شود. سرعت موج الاستیک را با توجه به طول نمونه (l) تعیین می‌کنند؛ برای افزایش دقت، این طول باید حداقل ۴ تا ۵ برابر طول موج ارتعاش باشد. آسان‌ترین اندازه‌گیری، اندازه‌گیری زمان سفر موج طولی است؛ زیرا این موج بیش‌ترین سرعت را دارد و نخستین موجی است که به گیرنده می‌رسد. در نتیجه، لحظه دریافت این موج به وضوح بر نوسان‌نگار ثبت می‌شود. سرعت موج عرضی کم‌تر است و به همین دلیل تشخیص لحظه دقیق دریافت این موج مشکل‌تر می‌شود [۸].

برای ارزیابی مصالح با استفاده از اندازه‌گیری سرعت گذر امواج فراصوت، اندازه‌گیری امواج باید با دقت بسیار بالایی انجام پذیرد. این کار با ابزاری انجام می‌شود که می‌تواند امواج مناسب را تولید و سپس با دقت کافی، زمان گذر آن‌ها را در حد فاصل فرستنده و گیرنده (در صورتی که فرستنده و گیرنده در محل مناسب قرار گرفته باشند)، در مصالح مورد نظر اندازه‌گیری کند.

در این پژوهش، آزمایش فراصوت و مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی نمونه‌های مکعبی شبه سنگی انجام شده است به همین منظور تعداد ۲۲ نمونه گچ - سیمان مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مکعب بر اساس نسبت اختلاط مناسب که با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های استوانه‌ای با درصدهای متفاوت گچ و سیمان به دست آمده و نسبت آب به سیمان 0.5 ، در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شده است. برای اندازه‌گیری کرنش محوری و جانبی از دو کرنش‌سنج 60 میلیمتری که به صورت متعامد در میانه دو وجه هر نمونه چسبانده شده‌اند استفاده شده است. تعداد ۱۵ نمونه برای آزمایش فراصوت انتخاب شده‌اند. این نمونه‌ها تحت بارگذاری تک‌محوره قرار گرفته و در هرگام آزمایش که به طور تقریبی معادل 10 درصد مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها است، زمان عبور موج از نمونه با استفاده از تراگذارهای 55 کیلوهرتزی و همچنین کرنش نمونه‌ها با

استفاده از کرنش‌سنج‌های متصل به ثبات داده^۱، اندازه‌گیری و ثبت شده است. نتایج اولیه به دست آمده از آزمایش روی هر نمونه شامل سطح تنش، زمان عبور موج در هر سطح و شماره کرنش ثبت شده است. این اطلاعات توسط نرم‌افزار ثبات داده ارایه شده است.

۲-۳ تجهیزات آزمون فراصوت

برای انجام آزمایش‌های فراصوت لازم است مجموعه‌ای از تجهیزات فراهم شود. در این بخش از نوشتار مشخصات تجهیزاتی که برای انجام آزمایش‌های مورد نظر از آن‌ها استفاده شده، آمده است.

۱-۲-۳ دستگاه فراصوت

برای انجام آزمایش‌های فراصوت از دستگاه فراصوت C372N ساخت شرکت Matest ایتالیا استفاده شده است. از این دستگاه به منظور آشکارسازی عیوب، حفرات، ترک‌ها و مناطق ناهمگن درون مواد بتنی و سنگ‌ها استفاده می‌شود و توانایی اندازه‌گیری ویژگی‌های سرعت (با اندازه‌گیری زمان انتقال پالس توسط تراگذار در نمونه)، طول (فاصله بین دو تراگذار)، برآورد مدول یانگ، مقاومت فشاری و عمق ترک را دارد. بدیهی است برای اندازه‌گیری این ویژگی‌ها محدودیت‌هایی وجود دارد که در جدول ۱-۳ ارایه شده است و در استفاده از دستگاه باید به این محدودیت‌ها توجه شود.

قسمت‌های مختلف دستگاه مورد نظر در شکل ۱-۳ نشان داده شده و عبارت است از:

- صفحه رنگی لمسی LCD ۴۰×۴۸۰ پیکسل (که در شکل با شماره ۱ مشخص شده است) و یک صفحه کلید در کنار صفحه نمایش (که در شکل با شماره ۲ مشخص شده است)
- دو تراگذار پیزوالکتریک ۵۵ کیلوهرتز و سیم‌های اتصال (که در شکل با شماره ۳ مشخص شده است)

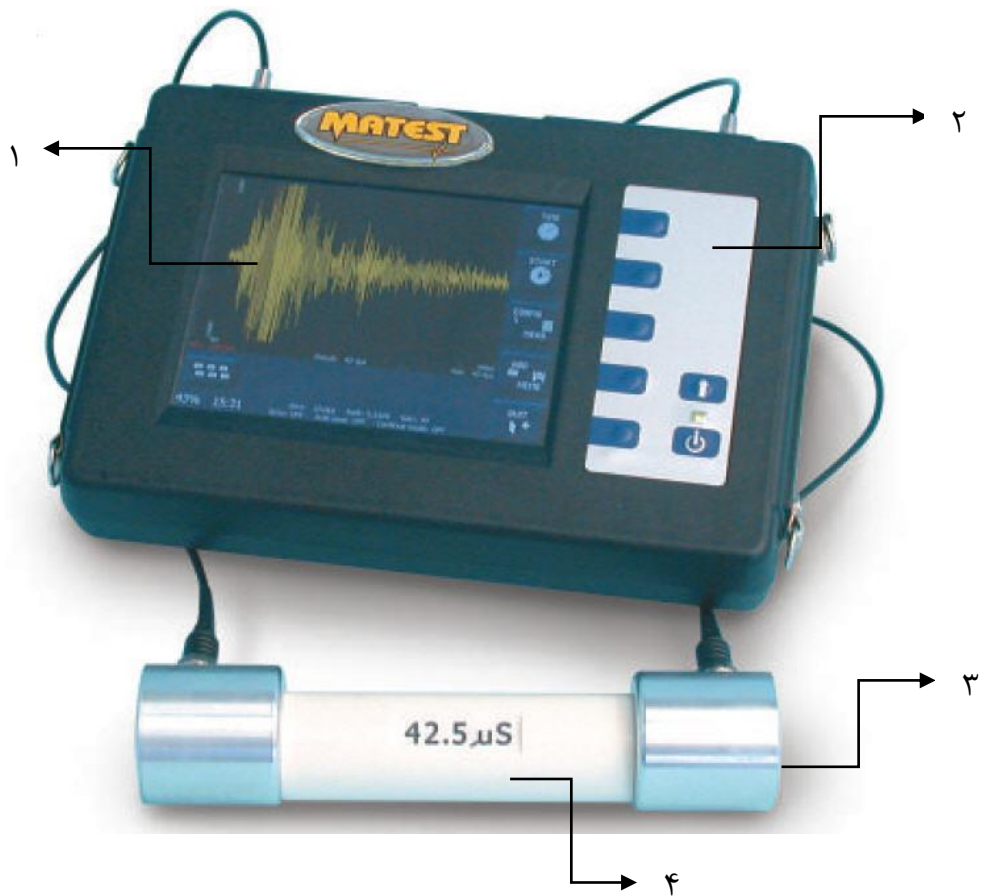
- استوانه کالیبراسیون (که در شکل با شماره ۴ مشخص شده است)

در شکل ۲-۳ نیز جزییات صفحه نمایش دستگاه فراصوت نشان داده شده است.

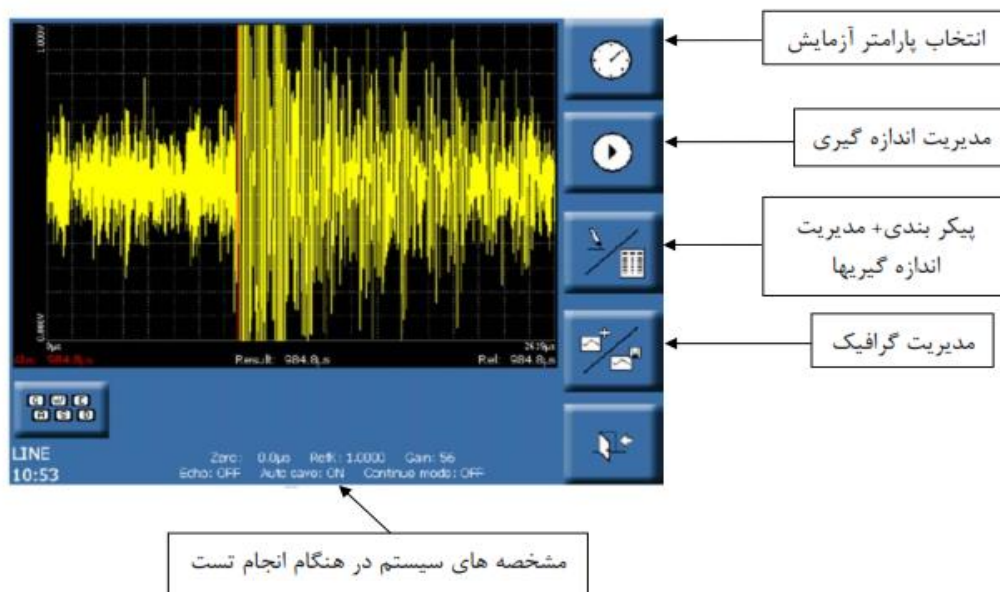
^۱ Data Logger

جدول ۱-۳ ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه فراصوت C372N و محدودیت‌های آن

عامل	مشخصه	واحد	کمترین مقدار عامل	بیشترین مقدار عامل
سرعت (m/s)	طول	cm	۱	۵۰۰۰
طول (m)	سرعت	m/s	۰/۱	۱۰ ^۷
مدول یانگ (Pa)	سرعت برشی	m/s	۰/۱	۱۰ ^۷
	دانسیته	kg/m ³	۱	۵۰۰۰
	طول	m	۱	۵۰۰۰
مقاومت فشاری (N/mm ²)	اندیس فشاری	-	۱	۵۰۰
	طول	cm	۱	۵۰۰۰
عمق ترک (m)	سرعت	m/s	۰/۱	۱۰ ^۷
	طول	cm	۱	۵۰۰۰



شکل ۱-۳ قسمت‌های مختلف دستگاه فراصوت



شکل ۲-۳ جزئیات صفحه نمایش دستگاه فراصوت

۲-۲-۳ تراگذار

تراگذار وسیله‌ای برای انتقال امواج فراصوت ایجاد شده به نمونه است. از آن جا که هنگام برخورد موج تابشی با زاویه‌ای غیر از ۹۰ درجه، آن بخش از باریکه که از میان فصل مشترک می‌گذرد، شکست می‌یابد و باعث می‌شود دو موج با سرعت‌های متفاوت در ماده آزمون منتشر شوند، تراگذارهای عمودی^۱ انتخاب شده‌اند تا تابش موج با زاویه ۹۰ درجه باشد. شکل ۳-۳ تراگذارهای عمودی استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳ ژل فراصوت^۲

برای ایجاد ارتباط موثر بین تراگذارها و سطح نمونه از ژل فراصوت C370-07 ساخت شرکت Matest ایتالیا نشان داده شده در شکل ۴-۳ استفاده شده است.

^۱ تراگذارهای عمودی برای فرستادن موج فشاری به درون ماده آزمون تحت زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح ماده طراحی شده است.

^۲ Couplant

۴-۲-۳ کرنش سنج^۱

اندازه‌گیری کرنش نمونه‌ها با استفاده از کرنش‌سنج‌های ورقه‌ای چسبان ۶۰ میلی‌متری ساخت شرکت Vishay امریکا انجام شده است. در شکل ۳-۵ کرنش‌سنج استفاده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است.

۵-۲-۳ مدار واسط^۲

مدار واسط یک مدار الکتریکی است که بین کرنش‌سنج و ثبات داده قرار می‌گیرد و اندک تغییرات مقاومت ایجاد شده در کرنش‌سنج را با اعمال ولتاژ افزایش داده و به ثبات داده منتقل می‌کند. در شکل ۳-۶ مدار واسط استفاده شده به عنوان واسط بین کرنش‌سنج و ثبات داده نشان داده شده است.



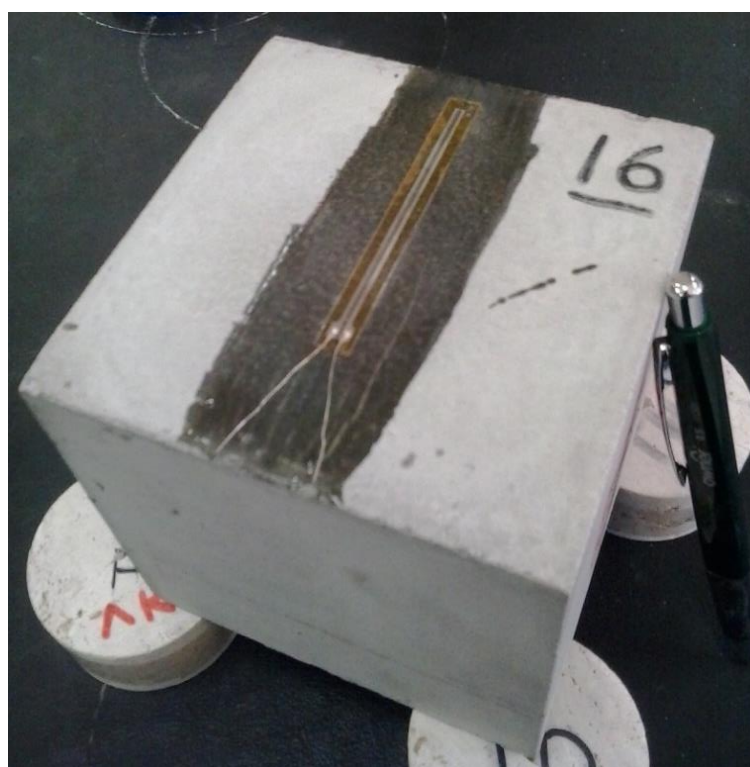
شکل ۳-۳ تراگذار عمودی ۵۵ کیلوهرتزی

^۱ Strain guage

^۲ Bridge box



شکل ۳-۴ ژل فراصوت عامل جفت کننده بین تراگذار و نمونه



شکل ۳-۵ کرنش سنج ورقه‌ای ۶۰ میلیمتری چسبانده شده روی نمونه



شکل ۳-۶ مدار واسط

۳-۳ روش کار

تاکنون روش آزمایش فراسوت انجام شده در این مطالعه به صورت کلی و بدون ذکر جزئیات شرح داده شده است. در این بخش طرح آزمایش، مراحل تهیه نمونه، تعیین نسبت مناسب اختلاط و مراحل انجام آزمایش به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

۳-۳-۱ طرح انجام آزمایش

در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، ابتدا نمونه در شرایط تنش آزاد و سپس در حالی که تحت بارگذاری است در ترازهای مختلف تنش با گام‌های ده درصد UCS، بیست درصد UCS، سی درصد UCS تا صد درصد UCS مورد آزمایش قرار می‌گیرد تا به مرحله شکست برسد؛ در هر گام (هر تراز تنش) زمان عبور موج از نمونه، کرنش جانبی و کرنش محوری به وجود آمده در آن با استفاده از کرنش‌سنج اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. بنابراین نتایج آزمایش به صورت جدول ۳-۲ خواهد بود:

جدول ۲-۳ اطلاعات کلی مورد انتظار از آزمایش

ردیف	تراز تنش	کرنش	زمان عبور موج (Tp)
۱	10% UCS	ϵ_{10}	Tp ₁₀
۲	20% UCS	ϵ_{20}	Tp ₂₀
۳	30% UCS	ϵ_{30}	Tp ₃₀
۴	40% UCS	ϵ_{40}	Tp ₄₀
...
۸	80% UCS	ϵ_{80}	Tp ₈₀
۹	90% UCS	ϵ_{90}	Tp ₉₀
۱۰	100% UCS	ϵ_{100}	Tp ₁₀₀

در جدول ۲-۳، Tp₁₀ یعنی زمان عبور امواج الاستیک از نمونه‌ای که تحت بارگذاری معادل ده درصد UCS است، Tp₂₀ یعنی سرعت عبور امواج الاستیک از نمونه‌ای که تحت بارگذاری معادل بیست درصد UCS قرار دارد و به همین ترتیب تا تراز تنش ۱۰۰ درصد UCS.

با داشتن زمان عبور موج از نمونه و فاصله بین تراگذارها که همان طول ضلع نمونه است می‌توان سرعت موج عبوری را به دست آورد. به این ترتیب بین سرعت‌های عبور امواج از نمونه و ترازهای مختلف تنش رابطه‌ای به دست خواهد آمد.

با اندازه‌گیری کرنش محوری و جانبی نمونه با استفاده از کرنش‌سنج‌های چسبانده شده روی وجوه نمونه، نسبت پواسون هر نمونه به دست خواهد آمد. با داشتن منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها و همچنین سرعت عبور امواج فراصوت، امکان ارایه رابطه‌ای منطقی بین این دو منحنی مشخصه بررسی خواهد شد.

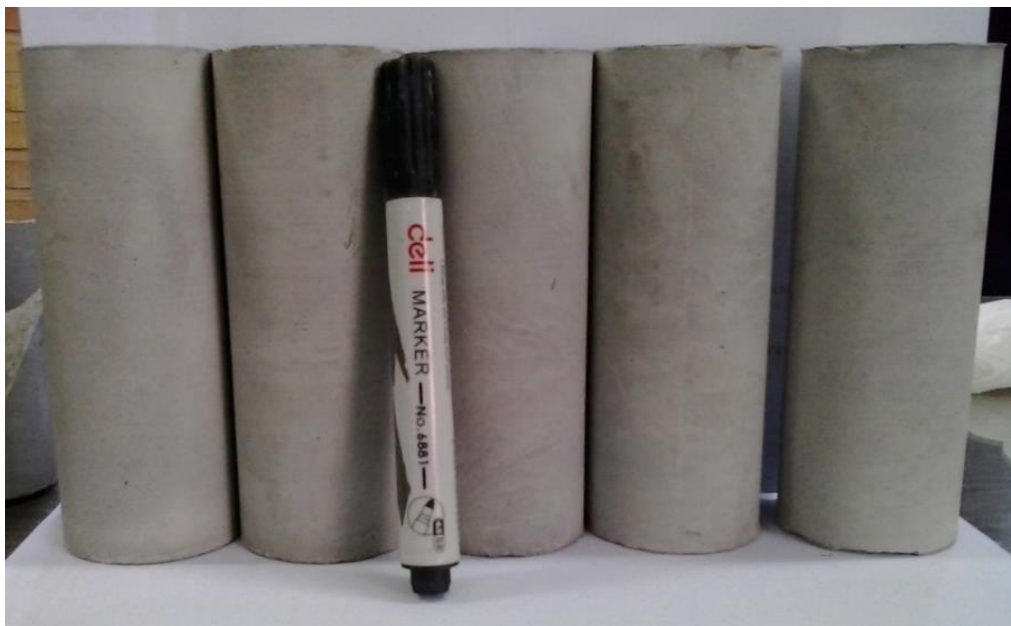
اندازه‌گیری سرعت امواج و کرنش نمونه در راستای عمود بر محور بارگذاری انجام می‌شود. همچنین برای ایجاد ارتباط موثرتر بین سطح نمونه و تراگذارهای ارسال و دریافت پالس و کاهش خطای ناشی از انتشار موج در فصل مشترک هوا و نمونه (دو محیط با خواص الاستیکی متفاوت)، نمونه‌ها مکعبی ساخته خواهند شد. به این منظور از ژل فراصوت نیز استفاده می‌شود.

۲-۳-۳ مراحل تهیه نمونه

با توجه به لزوم همگن بودن نمونه‌ها و نیز ضرورت شناخت کامل ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها، نمونه‌های مورد آزمایش از جنس گچ - سیمان انتخاب شده‌اند. برای تهیه نمونه‌ها از گچ سپیدار سمنان و سیمان پرتلند تیپ ۷ شاهرود استفاده شده است. به منظور همگن شدن گچ با سیمان، گچ با الک مش ۲۰۰ سرند شده است.

در مرحله بعد برای دستیابی به نسبت اختلاط مناسب، به گونه‌ای که هم زمان گیرش و خشک شدن سیمان در حضور گچ کاهش یابد و هم مقاومت فشاری نمونه‌ها برای انجام آزمایش گام به گام فراصوت مناسب باشد، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (قطر N_x) با نسبت‌های اختلاط متفاوت تهیه شده است. نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده برای تعیین نسبت اختلاط مناسب در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. نمونه‌ها به مدت یک هفته در محیط آزمایشگاه خشک شده، سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی آن‌ها انجام شده است. شکل ۳-۸ نمونه‌های استوانه‌ای که تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره قرار گرفتند را پس از شکست نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های استوانه‌ای نسبت اختلاط مناسب شامل نسبت آب به مصالح ۰/۵ و نسبت گچ به سیمان ۱ به دست آمده است.



شکل ۳-۷ نمونه های استوانه ای استاندارد (قطر N_x) با نسبت های اختلاط متفاوت، برای به دست آوردن نسبت مناسب



شکل ۳-۸ آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی نمونه های استوانه ای

پس از به دست آمدن نسبت اختلاط مناسب، نمونه های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر مکعب ساخته شده است. قالب های استفاده شده برای ساخت نمونه های مکعبی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



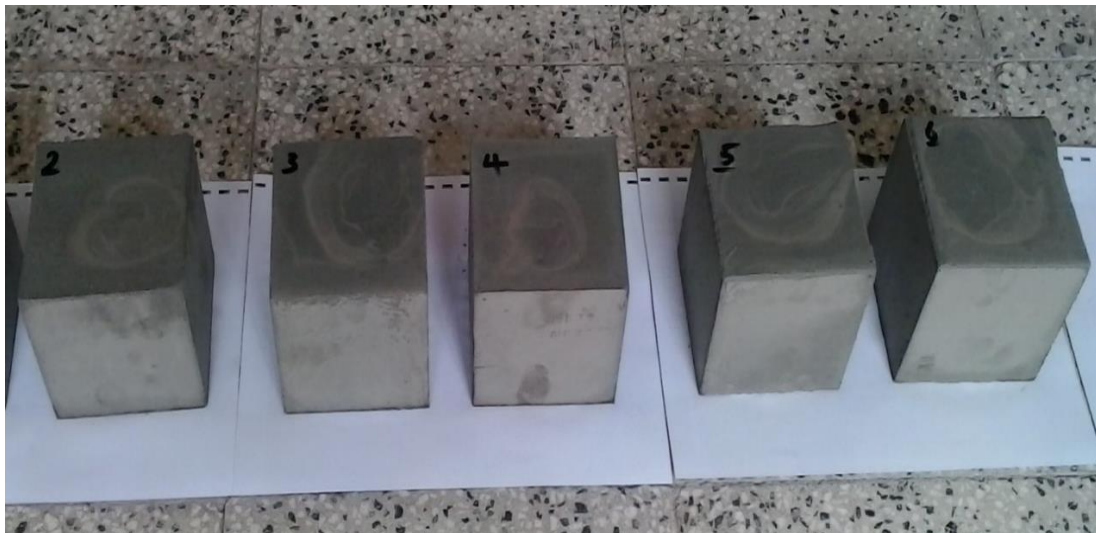
شکل ۳-۹ قالب تهیه نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر مکعب

در آزمایش روی نمونه‌های مکعبی، ملات نمونه‌ها در قالب‌های فولادی یا چدنی ریخته می‌شوند و قالب‌ها معمولاً مکعب‌هایی به ابعاد ۱۵۰ mm هستند. قالب‌ها باید با شکل و ابعاد تعیین شده و مسطح بودن با رواداری‌های کمی منطبق باشند. بهتر است قالب و قاعده آن در هنگام بتن ریزی با یکدیگر قفل و بسته شده باشند چون این موضوع نشت ملات را کاهش می‌دهد [۱۱]. در این آزمایش به دلیل محدودیت فضای بین دو فک دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره از قالب‌هایی با اندازه ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر مکعب استفاده شده است.

قبل از سوار کردن قالب، سطح داخلی آن را باید با روغن معدنی و یا لایه نازکی از روغن مشابه چرب کرد تا از چسبیدن بتن به داخل قالب جلوگیری به عمل آید [۱۱].

برای هر نمونه مکعبی به طور تقریبی ۹۰۰ گرم سیمان، ۹۰۰ گرم گچ و ۹۰۰ گرم آب استفاده شده است. نمونه‌های مکعبی به مدت یک ساعت در داخل قالب در شرایط محیطی قرار گرفتند تا به گیرش

برسند. سپس از قالب‌ها خارج شده و به مدت یک هفته خارج از قالب خشک شده‌اند. شکل ۳-۱۰ تعدادی از نمونه‌های مکعبی را پس از خارج کردن از قالب نشان می‌دهد همان طور که در شکل ۳-۱۰ نیز دیده می‌شود این نمونه‌ها هنوز کاملاً خشک نشده‌اند.



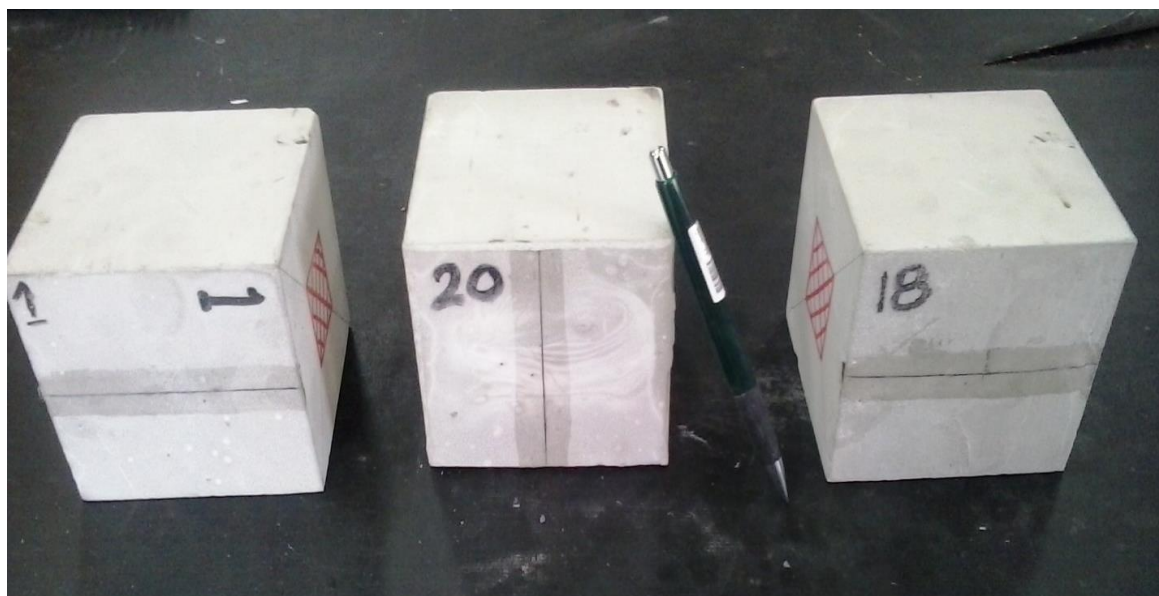
شکل ۳-۱۰ نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر مکعب

۳-۳-۳ مراحل انجام آزمایش

قبل از انجام آزمایش باید طرح جزییات اجرای آزمایش‌ها تدوین شود. در این طرح به جزییاتی هم‌چون محل قرارگیری ابزارهای اندازه‌گیری انتخاب شده، نحوه برداشت اطلاعات و چگونگی ثبت آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۳-۳ تعیین محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها

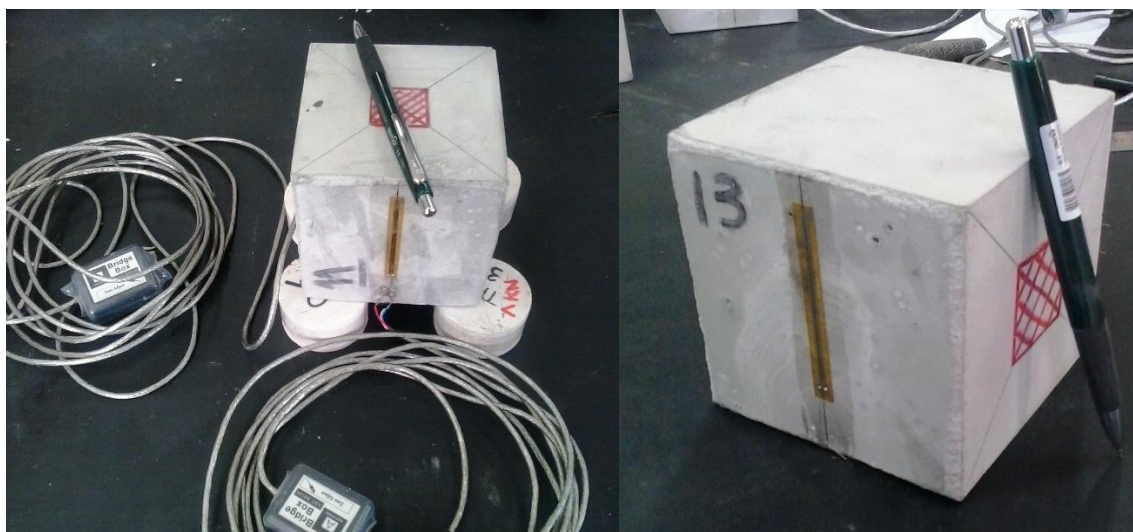
برای انجام آزمایش، ابتدا محل دقیق قرارگیری کرنش‌سنج‌ها روی نمونه تعیین شده است به طوری که کاملاً در میانه وجه نمونه مکعبی و عمود بر اضلاع آن باشد. کرنش‌سنج دوم نیز در وجه مقابل کرنش‌سنج اول، در راستای عمود بر آن و دقیقاً در میانه وجه نمونه قرار گرفته است. شکل ۳-۱۱ علامت گذاری و تسطیح محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها روی نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۳ تعیین محل دقیق قرارگیری کرنش‌سنج‌ها و تسطیح آن با چسب صیقل دهنده

محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها ابتدا با چسب صیقل دهنده مسطح و صیقلی شده است. بعد از گذشت ۱۲ ساعت و گیرش و خشک شدن چسب صیقل دهنده، کرنش‌سنج‌ها روی خطوط مشخص شده چسبانده شده‌اند. شکل ۱۲-۳ کرنش‌سنج‌های چسبانده شده روی نمونه شماره ۲ را نشان می‌دهد. سپس دو سر کرنش‌سنج با واسطه پایانه^۱ به مدار واسط ثابت داده لحیم شده است. شکل ۱۳-۳ و شکل ۱۴-۳ به ترتیب کرنش‌سنج متصل به مدار واسط و پایانه برای اتصال سیم کرنش‌سنج به مدار واسط را نشان می‌دهد.

^۱ Terminal



شکل ۳-۱۳ اتصال انتهای کرنش سنج به مدار واسط

شکل ۳-۱۲ قرارگیری کرنش سنج در محل تعیین شده



شکل ۳-۱۴ پایانه‌ی اتصال سیم کرنش سنج به مدار واسط

۲-۳-۳-۳ تعیین محل قرارگیری تراگذار

از آن جا که مسیر عبور موج باید مستقیم و کوتاه‌ترین مسیر باشد یعنی موج باید عمود بر سطح قرارگیری تراگذار حرکت کند به منظور در یک راستا قرار گرفتن تراگذارهای فراصوت، محل قرارگیری آن‌ها در دو وجه کناری و جوه کرنش سنج‌ها و دقیقا در مرکز وجه نمونه علامت گذاری شده است. شکل ۳-۱۵ محل قرار دادن تراگذار برای آزمایش فراصوت را نشان می‌دهد که با یک مربع قرمز رنگ با طولی برابر قطر تراگذار روی نمونه‌های مکعبی مشخص شده است.



شکل ۳-۱۵ تعیین محل قرارگیری تراگذار

۳-۳-۳-۳ برداشت داده‌های کرنش‌سنج

همان طور که شکل ۳-۱۶ نشان می‌دهد، نمونه برای شروع آزمایش زیر دستگاه آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره قرار گرفته است. انتهای سیم مدار واسط هر دو کرنش‌سنج به دو کانال دستگاه ثبات داده متصل و پیچ آن‌ها برای کالیبره کردن (صفر شدن) عدد قرائت شده از کرنش‌سنج‌ها تنظیم شده است. در تمامی آزمایش‌ها کرنش‌سنج افقی که کرنش جانبی را اندازه‌گیری می‌کند به کانال یک و کرنش‌سنج قائم که کرنش محوری را اندازه‌گیری می‌کند به کانال دو دستگاه ثبات داده متصل شده‌اند. دستگاه ثبات داده نیز به رایانه متصل است و داده‌های قرائت شده توسط نرم‌افزار ثبت می‌شود. در نرم‌افزار مربوطه مشخص شده است که هر کانال مربوط به کدام کرنش‌سنج است و تعداد داده‌های برداشت شده در هر میلی ثانیه چهار عدد تعیین شده است.



شکل ۳-۱۶ نمونه زیر دستگاه تست مقاومت فشاری تک‌محوره

۴-۳-۳-۳ ماده واسط تراگذار و سطح نمونه

به دلیل این‌که در فصل مشترک دو محیط با خواص الاستیکی متفاوت محدودیت‌هایی برای انتشار صوت وجود دارد، هنگامی که باریکه‌ای از امواج صوتی فشاری به مرز دو محیط می‌رسد، بخشی از امواج تابشی در فصل مشترک بازتابیده خواهد شد و بخش دیگر آن از میان فصل مشترک عبور می‌کند [۱۳]. به همین دلیل برای انتقال بهتر موج و کاهش ضریب بازتاب، از ژل فراصوت به عنوان عامل جفت‌کننده بین بلور تراگذار و نمونه استفاده شده است. لازم به ذکر است که بازده عبور در صورتی که ضخامت ژل جفت‌کننده بین تراگذار و نمونه کم باشد، بهبود پیدا می‌کند. بنابراین ضخامت این لایه نیز نباید زیاد باشد؛ از این رو باید تراگذار روی ژل ساییده شود تا یک لایه نازک از ژل بین تراگذار و سطح نمونه باقی بماند. شکل ۳-۱۷ ایجاد یک لایه نازک از ژل فراصوت در محل قرارگیری تراگذار روی نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷ استفاده از ژل فراصوت در محل تراگذار

۳-۳-۳-۵ فرکانس تراگذارها

انتخاب فرکانس ارتعاشات فراصوت از یک طرف براساس این واقعیت است که هرچه فرکانس بالاتر باشد گستره جهتی که موج آن را طی می کند کوچک تر است و بنابراین انرژی دریافت شده بیش تر است. از طرف دیگر هرچه فرکانس بیش تر باشد میرایی انرژی بیش تر می شود. معمولاً در این گونه موارد از تراگذارهایی با فرکانس طبیعی ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز استفاده می شود، حد پایینی این مقیاس معمول تر است [۱۱]. در این آزمایش از تراگذارهایی با فرکانس ۵۵ کیلوهرتز استفاده شده است. در شکل ۳-۳ تراگذارهای ۵۵ کیلوهرتزی دستگاه فراصوت مورد نظر نشان داده شده است.

۳-۳-۳-۶ اندازه گیری سرعت پالس فراصوت در شرایط تنش آزاد

مرحله اول آزمایش، اندازه گیری سرعت عبور موج از نمونه در حالت تنش آزاد^۱ است. تراگذار فرستنده و گیرنده به صورت مشروح در بالا در تماس با نمونه قرار گرفته و موج در مد پیوسته^۲ دستگاه فراصوت

^۱ Stress Release

^۲ Continues mode

فرستاده شده است. برای افزایش دقت آزمایش در هر مرحله میانگین سه قرائت به عنوان زمان گذر موج ثبت شده است.

۳-۳-۷ اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت تحت بارگذاری

از آن جا که دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره آزمایشگاه مکانیک سنگ برای نیروهای کم‌تر از ۳۰ کیلونیوتن کالیبره نیست، آزمایش فراصوت تحت بارگذاری، در نیروی ۳۰ کیلونیوتن شروع و برای سایر مراحل آزمایش گام ۲۵ کیلونیوتن تعیین شده است.

برای انجام آزمایش فراصوت تحت بارگذاری، نمونه در دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره ساخت شرکت Contols ایتالیا قرار گرفته و بارگذاری به آرامی انجام شده است تا فک دستگاه با سطح بالایی نمونه تماس پیدا کند. سپس روند بارگذاری طبق استاندارد ISRM برای آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره با نرخ ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه ادامه یافته و به طور هم‌زمان اطلاعات دریافتی از کرنش‌سنج‌ها در نرم‌افزار ثبت شده است.

ثبات داده، داده‌های کرنش‌سنج را تا رسیدن عقربه دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره به نیروی ۳۰ کیلونیوتن ثبت می‌کند. با رسیدن نشانگر به ۳۰ کیلونیوتن، بارگذاری و روند ثبت تغییرات کرنش‌سنج متوقف و شماره داده ثبت شده از کرنش‌سنج‌ها قرائت و یادداشت شده است.

برای انجام گام اول آزمایش فراصوت در حالی که نمونه تحت نیروی ۳۰ کیلونیوتن قرار دارد، همانند مرحله تنش آزاد، ابتدا وجوه تعیین شده برای تراگذارها با ژل پوشانده شده، سپس تراگذار در محل تعیین شده در مرکز سطح نمونه قرار گرفته و موج توسط دستگاه ارسال شده است. زمان عبور موج از نمونه در این مرحله نیز به صورت میانگین سه قرائت ثبت شده است.

گفتنی است به دلیل این که مراحل مذکور در مدت زمان کم‌تر از ۱ دقیقه انجام می‌شود فرصتی برای افت فشار روغن در پشت فک دستگاه تراکم نبوده و بنابراین نمونه تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار نداشته است.

برای رسیدن به گام دوم یعنی ۵۰ کیلونیوتن، دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره مجدداً روشن و هم‌زمان

ثبت داده‌های کرنش‌سنج آغاز شده است. مانند مرحله قبل با رسیدن نشانگر به ۵۰ کیلونیوتن دستگاه خاموش، روند ثبت داده متوقف و شماره داده ثبت شده توسط نرم‌افزار یادداشت شده است. آزمایش فراصوت برای این گام نیز مشابه دستورالعمل مذکور انجام و زمان عبور موج از نمونه تحت نیروی ۵۰ کیلونیوتنی ثبت شده است.

آزمایش در گام‌های بعدی هم همانند گام اول و دوم تا زمانی که نمونه بشکند یا یکی از کرنش‌سنج‌ها از مدار خارج شود، انجام شده است. خارج شدن کرنش‌سنج از مدار زمانی اتفاق می‌افتاد که آن وجه دچار شکستگی شود به صورتی که کرنش‌سنج بشکند. نمونه‌های گسیخته شده و کرنش‌سنج‌هایی که از مدار خارج شده‌اند در شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۳ نمونه شکسته شده و پایان آزمایش

۸-۳-۳-۳ نتایج اولیه آزمایش فراصوت

برای هر نمونه داده‌های مراحل مختلف آزمایش به صورت جدول ۳-۳ ثبت شده است. در این جدول منظور از شماره کرنش ثبت شده، شماره‌ای است که نرم‌افزار هنگام متوقف کردن روند ثبت داده به

عنوان تعداد داده ثبت شده تا آن لحظه نشان می‌دهد و این شماره متناظر است با کرنش نمونه که کرنش‌سنج در زمان رسیدن به گام مورد نظر اندازه‌گیری کرده است. در مجموع ۲۲ نمونه مکعبی ساخته شده است که از این تعداد ۱۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

جدول ۳-۳ نمونه‌ای از نتایج آزمایش فراصوت در حالت تنش آزاد و تحت بارگذاری (نمونه شماره ۳)

ردیف	نیرو (kN)	زمان عبور موج از نمونه T_p (μs)	شماره کرنش ثبت شده
۱	۰	۳۸/۹	۱
۲	۳۰	۳۸/۷	۱۰۳
۳	۵۰	۳۸/۷	۱۳۳
۴	۷۵	۳۸/۷	۱۷۴
۵	۱۰۰	۳۸/۹	۲۱۷
۶	۱۲۵	۳۹/۰	۲۴۹
۷	۱۵۰	۳۹/۲	۲۹۰
۸	۱۷۵	۴۰/۷	۳۳۳

۳-۴ جمع‌بندی

در آزمایش‌های فراصوت نمونه بین دو تراگذار پیزوالکتریک قرار می‌گیرد که یکی از آن‌ها ارسال‌کننده و دیگری گیرنده پالس مکانیکی است. یک پالس الکتریکی به صورت ضربه یا موج مکانیکی از تراگذار فرستنده ارسال و در انتهای دیگر نمونه، توسط تراگذار گیرنده جذب و به یک موج الکتریکی تبدیل می‌شود. در طرح آزمایش این پژوهش از بین ویژگی‌های مختلف یک پالس فراصوت مانند شکل موج دریافت شده، میزان جذب یا دریافت انرژی پالس، فرکانس، طول موج و ...، سرعت پالس پیک اطلاعاتی مورد نظر است. در این فصل تجهیزات استفاده شده، مراحل تهیه نمونه‌ها، طرح کلی آزمایش، مراحل انجام آزمایش روی نمونه‌های مصنوعی گچ - سیمان و نتایج مورد انتظار از آزمایش به تفصیل توضیح داده شده است.

فصل چهارم

تحليل آزمایش‌های فراصوت و ارایه رابطه تجربی بین

سرعت صوت و تراز تنش

۴-۱ مقدمه

همان طور که در فصل گذشته توضیح داده شد اطلاعات اولیه خروجی از نرم افزار ثبات داده و دستگاه آزمون فراصوت به ترتیب شامل شماره کرنش ثبت شده و زمان عبور موج در هر سطح تنش است. بر اساس این داده‌های اولیه کرنش محوری و جانبی متناظر با هر شماره کرنش و سرعت پالس فراصوت به دست آمده است. با استفاده از این اطلاعات ویژگی‌های مکانیک سنگی و صوتی نمونه‌ها محاسبه و برآورد شده است.

در این فصل ابتدا در مورد خصوصیات مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش شامل خصوصیات مقاومتی (مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی)، منحنی تنش - کرنش محوری، منحنی کرنش جانبی و حجمی، اتساع، شکل‌پذیری نمونه‌ها و سپس در مورد خصوصیات صوتی نمونه‌ها از جمله منحنی سرعت پالس فراصوت در نمونه‌های تحت بارگذاری، سرعت موج فشاری در شرایط بدون بار، اثر بارگذاری بر توسعه ترک با استفاده از تغییرات سرعت صوت در حالت بدون بار، منحنی رابطه بین سرعت پالس فراصوت و چگالی بحث خواهد شد. در پایان نیز رابطه‌ای برای تغییرات سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش مختلف برای این نمونه شبه سنگی ارائه می‌شود.

۴-۲ تحلیل مکانیکی نمونه‌ها

همان طور که ذکر شد با انجام آزمایش‌های تشریح شده در فصل گذشته، شاخص‌های مکانیکی و صوتی نمونه‌های تحت آزمایش تعیین شده است. در این بخش مهم‌ترین شاخص‌های برآورد شده تحلیل و نتایج حاصله ذکر شده است.

۴-۲-۱ منحنی شاخص تنش - کرنش محوری

در شکل ۴-۱ منحنی شاخص تنش - کرنش محوری (منحنی شماره ۱) یکی از آزمایش‌ها (آزمایش شماره ۵) نشان داده شده است. اطلاعات کرنش از کرنش‌سنج‌هایی که به صورت متعامد روی دو وجه نمونه‌ها نصب شده به دست آمده است. این منحنی را می‌توان به سه قسمت متمایز تقسیم کرد:

- قسمت OA: در ابتدای بارگذاری به دلیل موازی نبودن دو انتهای نمونه و تمرکز تنش در نقاط درگیری نمونه و صفحات بارگذاری و همچنین بسته شدن ریزترک‌های ذاتی موجود در نمونه افقی یا تقریباً افقی هستند، منحنی کمی به طرف بالا تقعر دارد و نشان دهنده افزایش مدول الاستیسیته با افزایش بار است.

- قسمت AB: که با تقریب خوبی خطی است و بیانگر مدول الاستیسیته ثابت است.

- قسمت BC: که به طرف پایین تقعر دارد و در نقطه C به حداکثر می‌رسد.

در دو قسمت اول OA و AB ممکن است وارفتگی جزئی در رفتار نمونه مشاهده شود ولی با تقریب زیاد رفتار نمونه را می‌توان الاستیک در نظر گرفت یعنی در جریان بارگذاری و باربرداری تغییرات غیر قابل برگشت در ساختمان و خصوصیات نمونه صورت نگرفته است.

در قسمت سوم منحنی یعنی BC، که معمولاً در تنشی معادل ۸۰ درصد مقاومت نهایی نمونه شروع می‌شود شیب منحنی با افزایش بار به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. با توجه به تعریف شکل پذیری^۱، نمونه در قسمت BC شکل پذیر است و بعد از آن رفتار شکل پذیر به شکننده^۲ تبدیل می‌شود. نقطه حداکثر تنش در منحنی σ - ϵ یعنی نقطه C، که مرز انتقال از رفتار شکل پذیر به شکننده است، بیانگر مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه است که نمونه در این نقطه دچار گسیختگی شده و می‌شکند. مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه آزمایشی شماره ۵، ۱۶/۵ مگاپاسکال است. در این قسمت تغییرات غیرقابل بازگشتی در ساختمان نمونه ایجاد شده است.

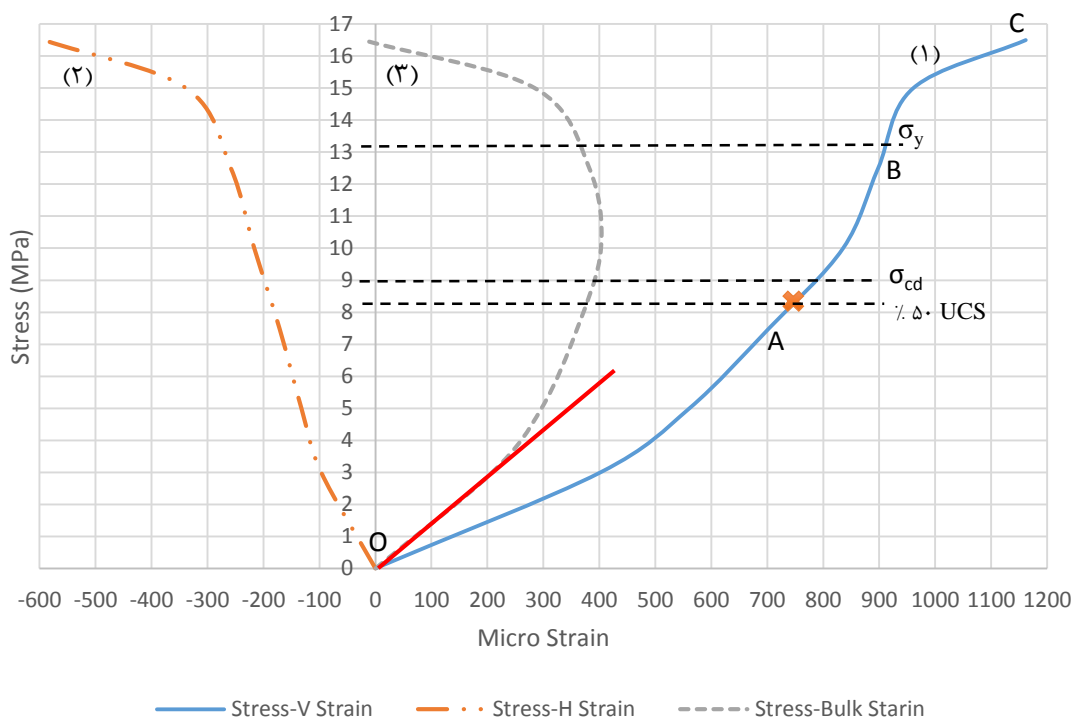
نقطه B مرز انتقال از حالت الاستیک به شکل پذیر، نقطه تسلیم نامیده می‌شود و تنش موثر در آن را نیز تنش تسلیم می‌گویند. این تنش با σ_y نشان داده می‌شود. تعیین تنش مزبور با دقت کافی همواره با دشواری همراه است اما اگر فرض شود که قسمت BC در تنشی معادل ۸۰ درصد مقاومت نهایی (UCS ۰.۸۰) شروع می‌شود، تنش موثر در نقطه B برابر ۸۰ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه

^۱ Ductile

^۲ Brittle

است که این مقدار برای نمونه آزمایشی شماره ۵، برابر ۱۳/۲ مگاپاسکال خواهد بود. نقطه ای از منحنی که با علامت ضربدر مشخص شده است نقطه ۵۰ درصدی تنش ماکزیمم (UCS) و برابر ۸/۲۵ مگاپاسکال است. مقادیر مدول الاستیک مماسی و وتری در این نقطه به ترتیب ۱۷/۶ و ۱۱/۳ گیگاپاسکال است.

اعمال تنش فشاری باعث کاهش طول نمونه و به وجود آمدن کرنش محوری ϵ_a در جهت تنش وارد شده و همزمان باعث انبساط و ایجاد کرنش های جانبی ϵ_l در جهت عمود بر راستای تنش اعمال شده خواهد شد. به همین علت برای بیان کمی رفتار الاستیک سنگ به همراه مدول یانگ معمولا ضریب ثابت دیگری به نام نسبت پواسون به کار گرفته می شود. منحنی تنش - کرنش جانبی با شماره ۲ در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. با استفاده از اطلاعات کرنش سنج های نصب شده به صورت متعامد روی نمونه آزمایشی شماره ۵، نسبت پواسون این نمونه ۰/۳۰۴ به دست آمده است.



شکل ۱-۴ منحنی شاخص تنش - کرنش

۲-۲-۴ منحنی تنش - کرنش جانبی

منحنی تنش - کرنش جانبی نمونه‌ها با استفاده از اطلاعات به دست آمده از کرنش‌سنجی که در راستای عمود بر محور بارگذاری روی نمونه‌ها نصب شده، ترسیم شده است (منحنی شماره ۲ در شکل ۱-۴). وقتی یک نمونه تحت بارگذاری تک‌محوره قرار می‌گیرد، در راستای اعمال بار فشاری کاهش طول و در جهت عمود بر این محور افزایش طول مشاهده می‌شود. در مکانیک سنگ افزایش طول که بیانگر کرنش جانبی است با علامت منفی نشان داده می‌شود. بنابراین منحنی کرنش جانبی در قسمت منفی محور کرنش‌ها قرار دارد.

در ابتدای روند بارگذاری از آن‌جا که ترک‌هایی که نسبت به راستای اعمال بار عمود یا مایل هستند بسته می‌شوند و هنوز ترک‌های جدید ناشی از بارگذاری تشکیل نشده‌اند کرنش محوری از کرنش جانبی بیشتر است. با ادامه روند بارگذاری و افزایش بار فشاری اعمال شده به نمونه، ترک‌هایی که از قبل در نمونه وجود داشته‌اند گسترش می‌یابند، به ویژه آن‌هایی که با محور بارگذاری زاویه 20° تا $20^\circ +$ دارند باز شده و منبسط می‌شوند، همچنین ترک‌های جدیدی هم در نمونه به وجود می‌آیند. در این مرحله کرنش جانبی از کرنش محوری بزرگتر می‌شود.

۳-۲-۴ منحنی تنش - کرنش حجمی

مجموع کرنش‌های محوری و جانبی کرنش حجمی نامیده می‌شود. از آن‌جا که آزمایش‌ها تحت فشار تک محوری انجام شده‌اند و تنش جانبی بر نمونه‌ها اعمال نمی‌شود، کرنش‌های جانبی برابر در نظر گرفته شده‌اند و منحنی کرنش حجمی به صورت مجموع کرنش محوری و دو برابر کرنش جانبی یعنی با رابطه ۱-۴ رسم شده است.

$$\varepsilon_V = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_l \quad (1-4)$$

که در آن ε_a کرنش محوری، ε_l کرنش جانبی و ε_V کرنش حجمی است.

برای یک ماده الاستیک خطی با مقادیر معین مدول یانگ و نسب پواسون، کرنش حجمی در حین

تراکم، خطی مستقیم با شیب مثبت است (خط مماس بر منحنی کرنش حجمی در شکل ۴-۱). دلیل آن این است که با افزایش بار تراکمی، حجم نمونه کاهش می‌یابد و کرنش محوری از مجموع کرنش‌های جانبی بیشتر است (منحنی شماره ۳ در شکل ۴-۱). همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، تقریباً در ۵۰ تا ۶۰ درصد مقاومت نهایی، منحنی کرنش حجمی از حالت مستقیم خارج و به سمت کرنش‌های کوچک‌تر منحرف می‌شود. این امر نشان دهنده افزایش حجم سنگ تحت بارهای فشاری است که در مراحل آخر بارگذاری و نزدیکی شکست سنگ افزایش مزبور قابل توجه بوده و به سمت مقادیر کوچک‌تر کرنش یعنی قسمت منفی محور کشیده می‌شود. این پدیده را پدیده اتساع^۱ می‌نامند. شرط لازم برای بروز این پدیده این است که باید کرنش محوری از مجموع کرنش‌های جانبی کوچک‌تر باشد. دلیل افزایش حجم نیز همین است. پدیده اتساع را می‌توان به تشکیل و توسعه ترک‌های میکروسکوپی در نمونه‌های سنگ که محور طولی آن‌ها به موازات جهت تنش اصلی حداکثر است، نسبت داد. تنش متناظر با این نقطه یعنی جایی که منحنی کرنش حجمی به سمت کرنش‌های منفی نمودار برمی‌گردد را تنش آسیب ترک^۲ می‌گویند (σ_{cd}) [۴۵]. تنش متناظر با این مقدار در منحنی تنش کرنش نمونه شماره ۵ به طور تقریبی برابر ۹ مگاپاسکال است.

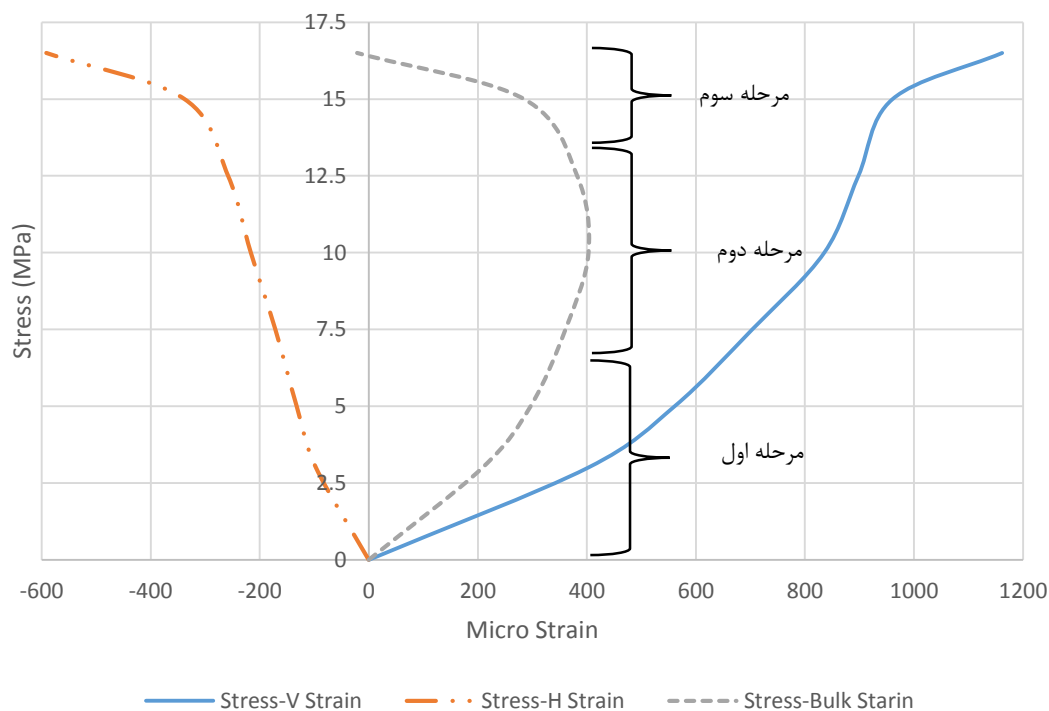
به طور کلی منحنی کرنش حجمی به سه مرحله تقسیم می‌شود:

- مرحله اول که در آن تحت تنش‌های پایین، ریزترک‌های موجود در نمونه بسته شده و در نتیجه حجم نمونه کاهش می‌یابد.
- مرحله دوم که در آن با افزایش تنش، نمونه تغییر شکل می‌دهد اما حجم آن تقریباً ثابت می‌ماند.
- مرحله نهایی، که در این مرحله با نزدیک شدن تنش اعمال شده به مقاومت نهایی نمونه، ریزترک‌ها توسعه می‌یابند و حجم زیاد می‌شود تا نمونه گسیخته شده و بشکند [۴۴].

^۱ Dilation

^۲ Crack Damage Stress

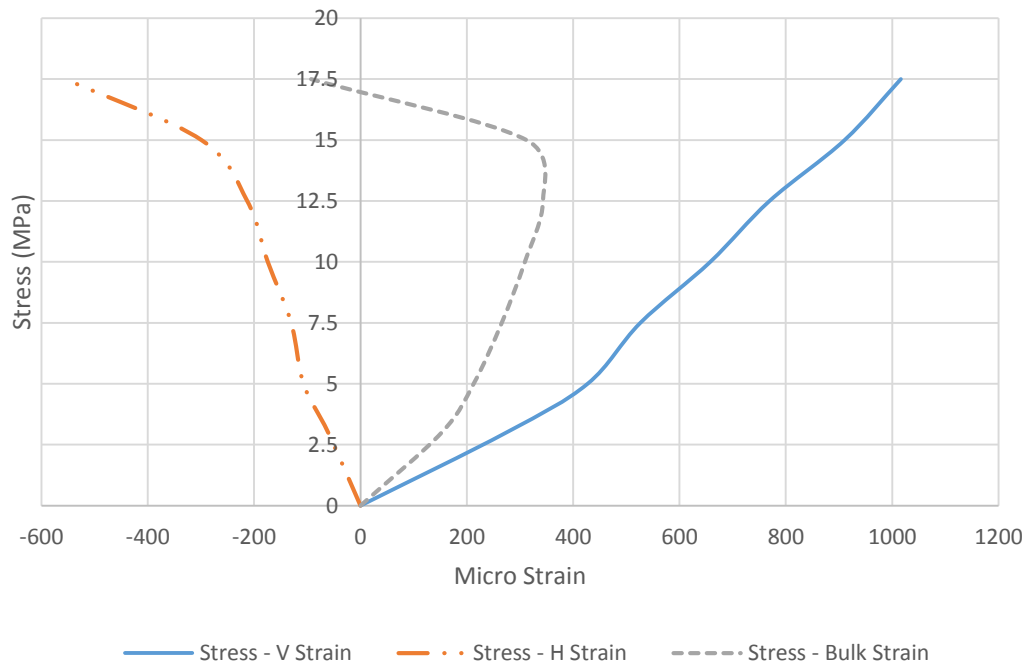
این سه مرحله در شکل ۲-۴ روی منحنی تنش - کرنش حجمی به صورت تقریبی مشخص شده‌اند.



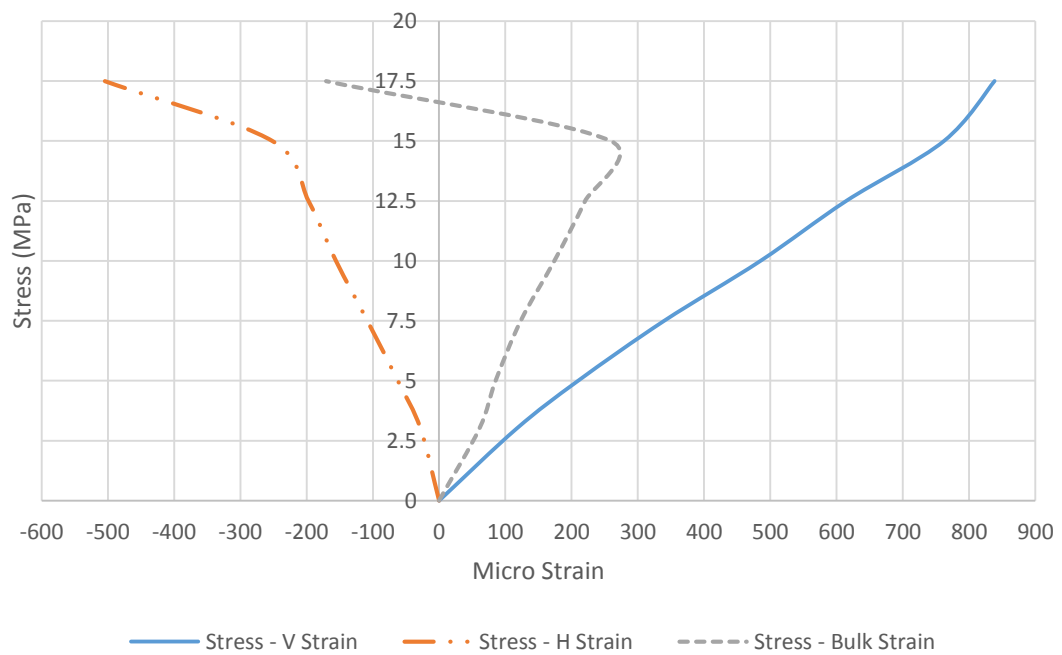
شکل ۲-۴ سه مرحله گذار منحنی کرنش حجمی (نمونه شماره ۵)

نمودارهای تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی سایر نمونه‌های آزمایش شده (که اطلاعات

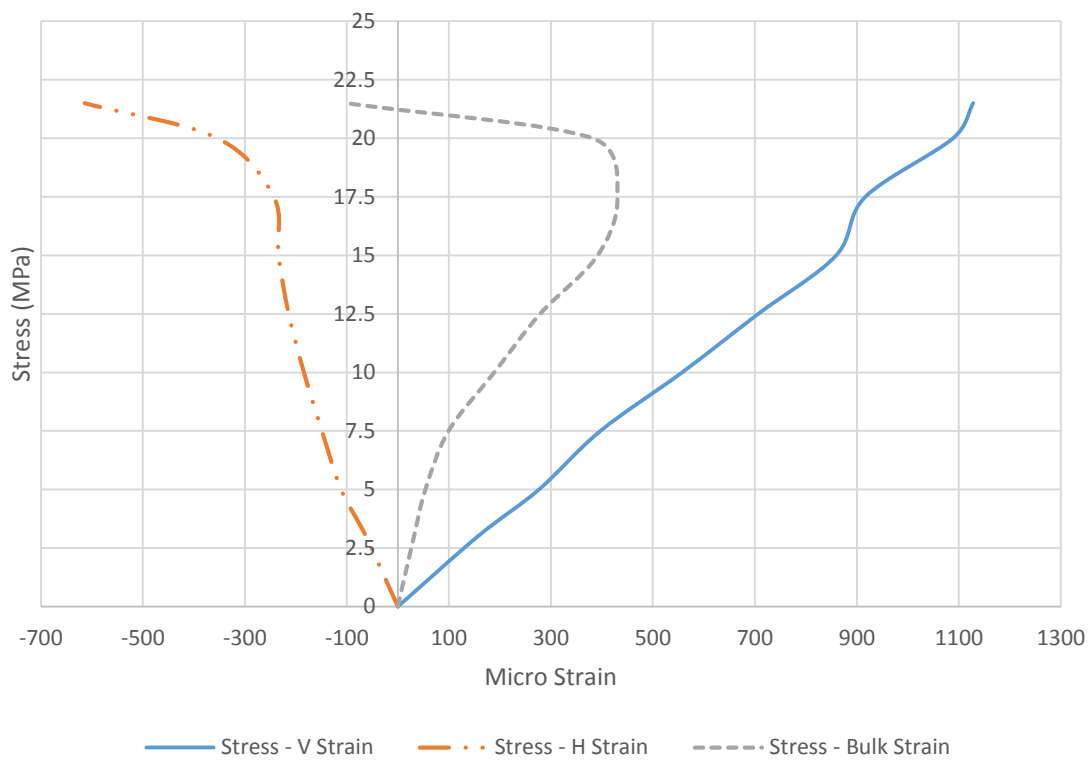
کرنش‌های آنها به درستی و کامل ثبت شده است) در شکل ۳-۴ تا شکل ۱۲-۴ ارائه شده است:



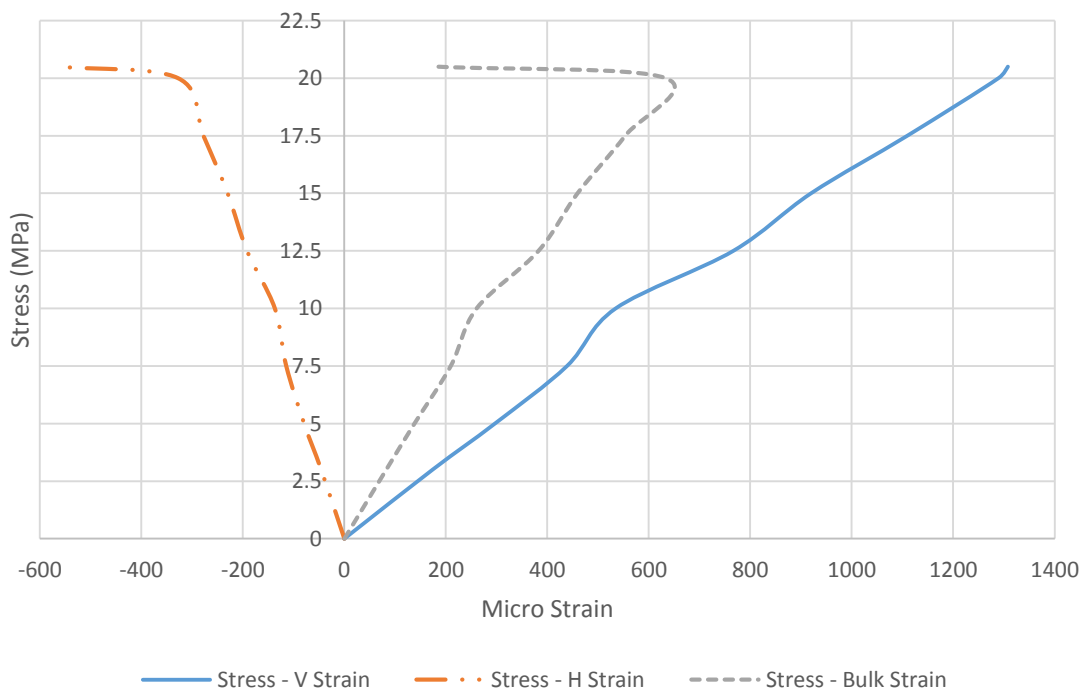
شکل ۳-۴ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۲



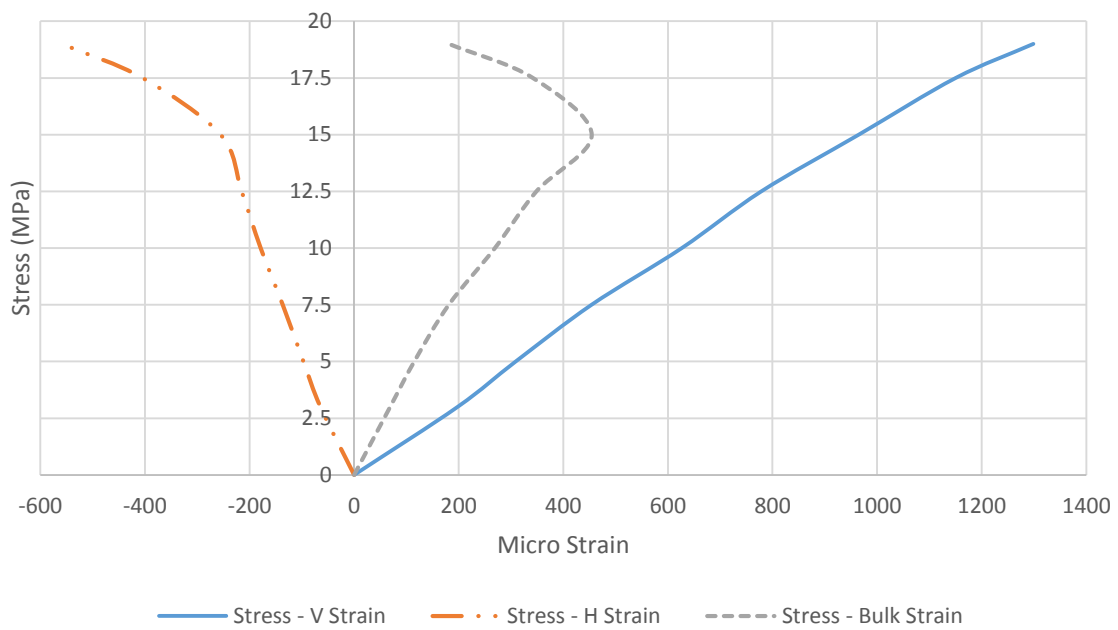
شکل ۴-۴ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۳



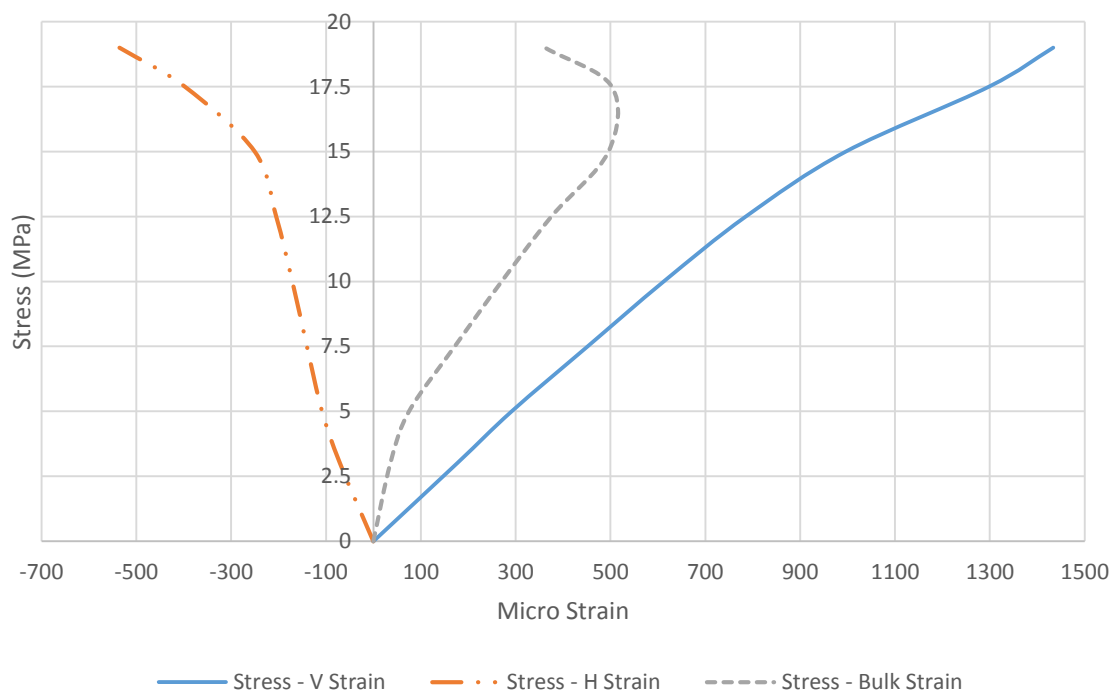
شکل ۴-۵ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۶



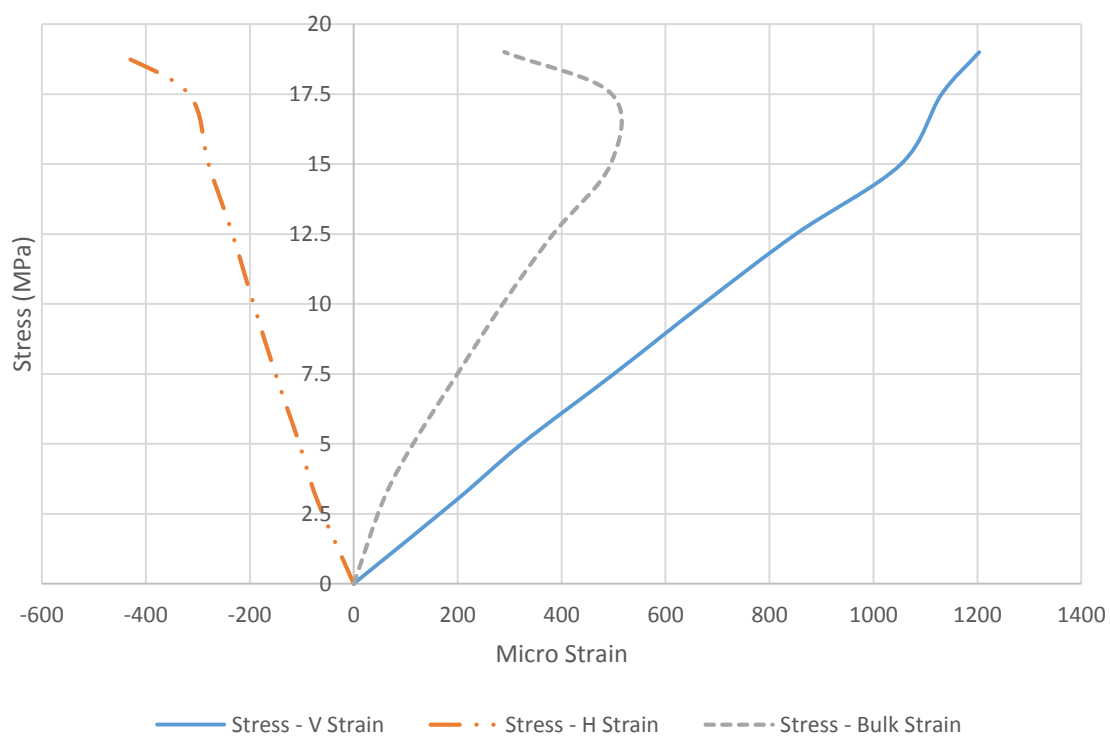
شکل ۴-۶ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۹



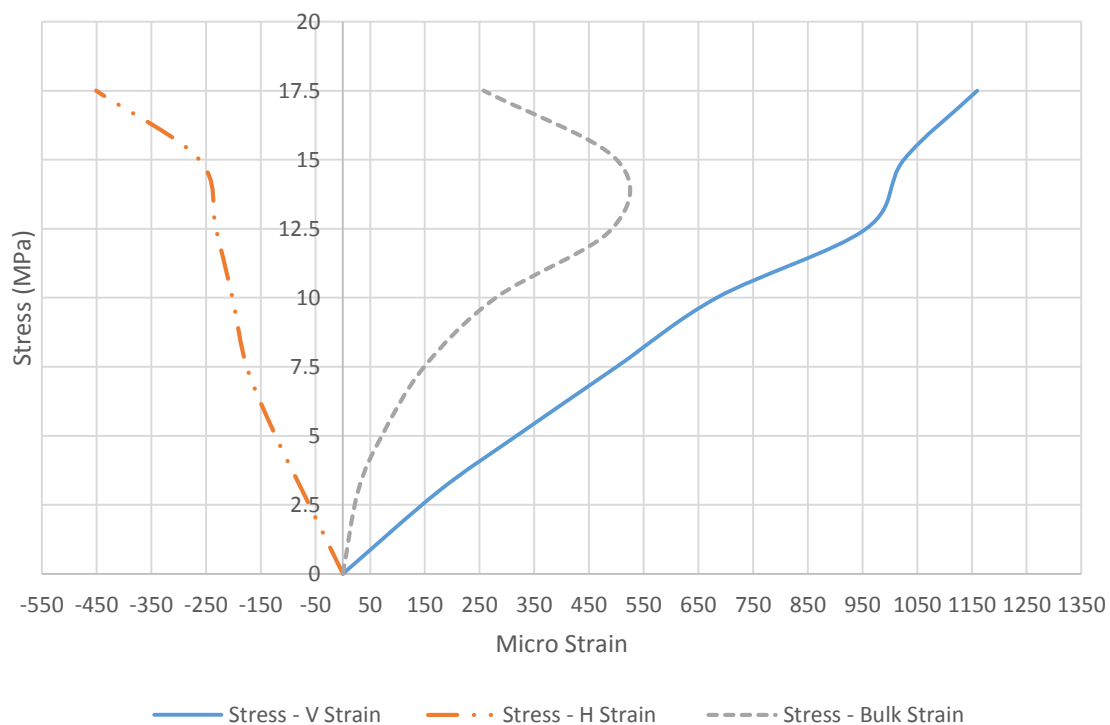
شکل ۴-۷ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۰



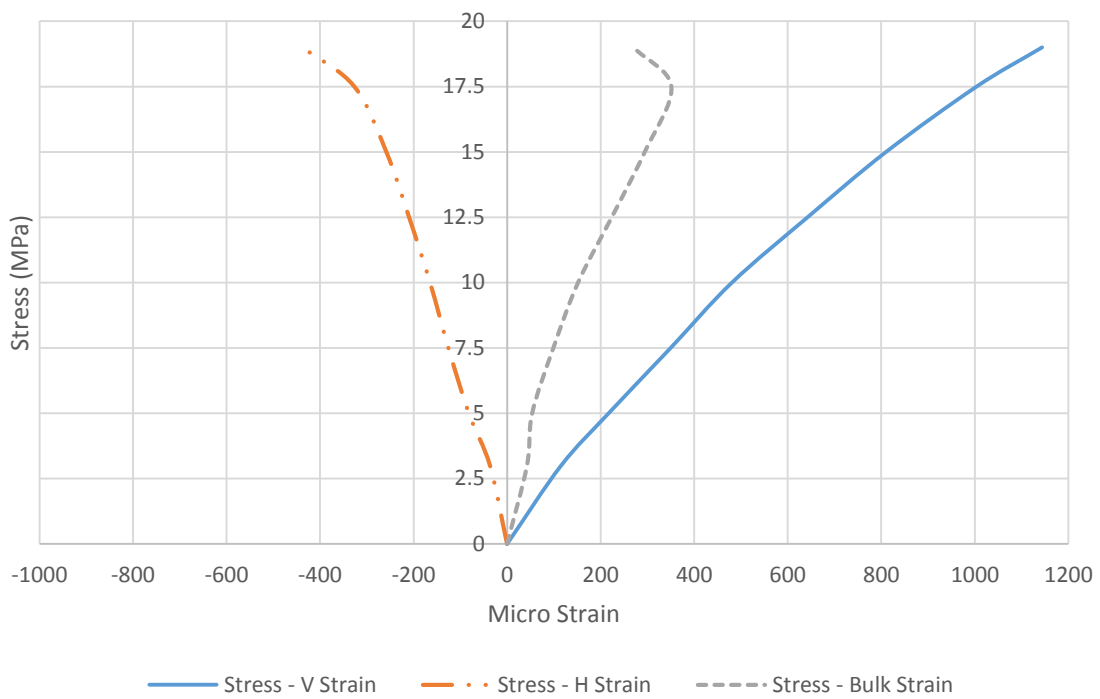
شکل ۴-۸ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۱



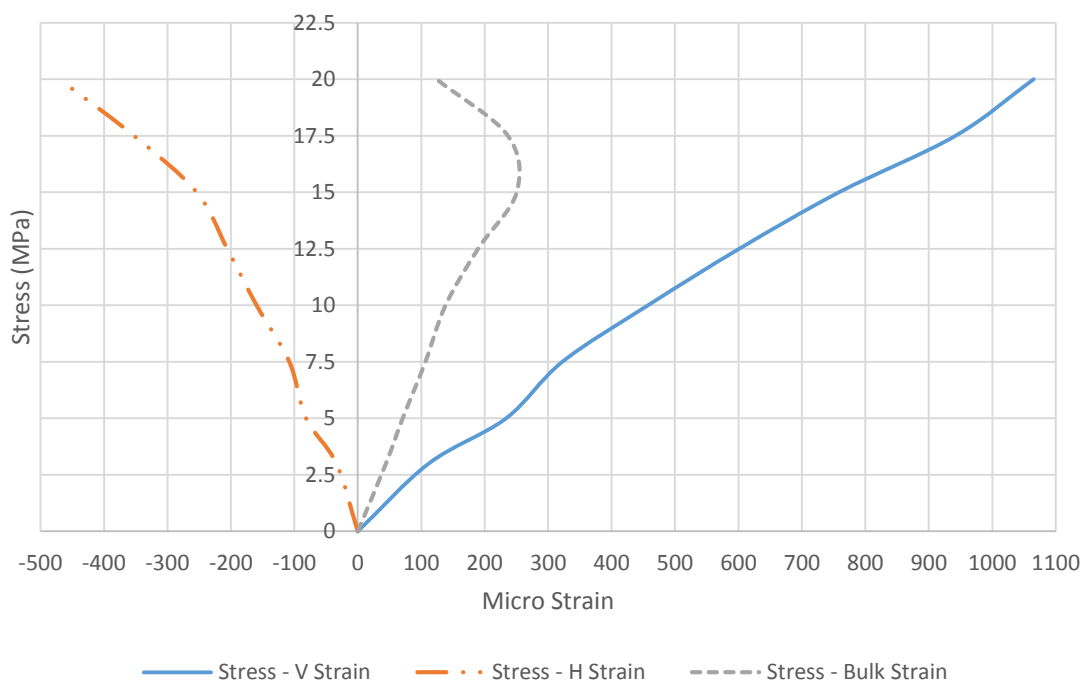
شکل ۹-۴ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۲



شکل ۱۰-۴ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۳



شکل ۴-۱۱ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۴



شکل ۴-۱۲ نمودار تنش - کرنش محوری، جانبی و حجمی نمونه آزمایشی شماره ۱۵

پارامترهای مکانیکی به دست آمده از نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیک مماسی و وتری در نقطه ۵۰ درصدی مقاومت حداکثر، مدول الاستیک مماسی در نقطه ۱۲ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول حجمی و نسبت پواسون (۷) در جدول ۴-۱ ارایه شده است:

جدول ۴-۱ پارامترهای مکانیکی به دست آمده از نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها

شماره نمونه	UCS (Mpa)	$E_{t\delta}$ (Gpa)	$E_{s\delta}$ (Gpa)	$E_{t\tau}$ (Gpa)	$K = E/3(1-2\nu)$	ν
۲	۱۷/۵	۱۹/۱	۱۴/۵	۱۳/۳۰	۱۶/۳۲	۰/۳۰
۳	۱۷/۵	۲۰/۱	۲۱/۳	۲۰/۷۰	۱۷/۰۹	۰/۳۰
۵	۱۶/۵	۱۷/۶	۱۱/۳	۱۰/۴۰	۱۴/۹۷	۰/۳۰
۶	۲۱/۵	۱۸/۹	۱۸/۱	۱۷/۱۰	۱۵/۱۴	۰/۲۹
۹	۲۰/۵	۱۶/۱	۱۷/۲	۱۷/۹۰	۱۱/۰۴	۰/۲۶
۱۰	۱۹	۱۵/۶	۱۶/۴	۱۷/۳۰	۱۴/۲۹	۰/۳۲
۱۱	۱۹	۱۴/۴	۱۶/۵	۱۸/۰۰	۱۳/۲۶	۰/۳۲
۱۲	۱۹	۱۴/۷	۱۴/۴	۱۳/۷۰	۱۲/۷۶	۰/۳۱
۱۳	۱۷/۵	۱۴/۱	۱۴/۴	۱۳/۶۰	۱۱/۳۵	۰/۲۹
۱۴	۱۹	۱۷/۵	۲۰/۷	۲۱/۹۰	۱۴/۲۳	۰/۲۹
۱۵	۲۰	۱۸/۷	۲۱/۹	۲۲/۳۰	۱۵/۴۳	۰/۳۰
میانگین	۱۸/۸	۱۷	۱۷	۱۷	۱۴/۲	۰/۳۰

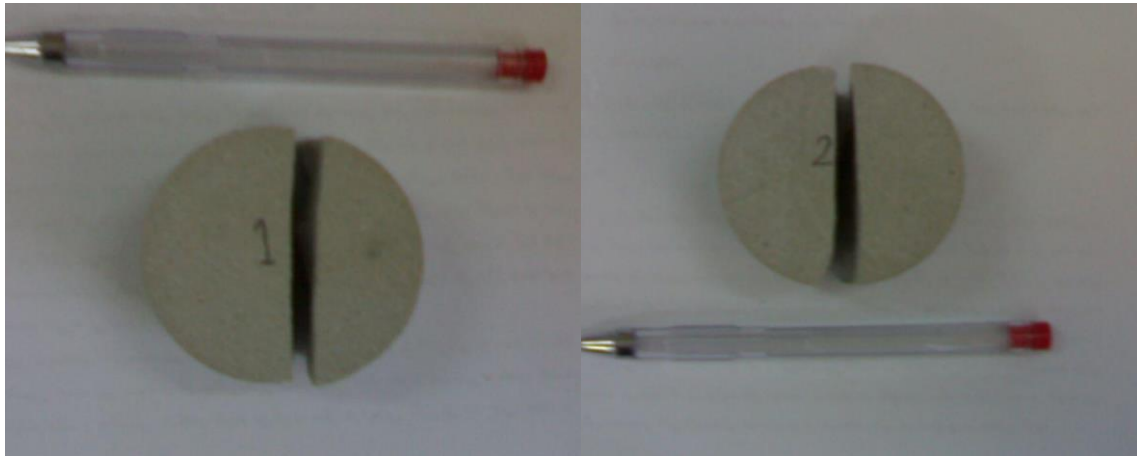
۴-۲-۴ مقاومت کششی

برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها از آزمایش کشش غیر مستقیم (آزمایش برزلی) استفاده شده است. در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۰/۵ تحت بارگذاری فشاری قرار گرفته‌اند و مقاومت کششی آن‌ها از رابطه ۴-۲ محاسبه شده است.

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi R t} \quad (۲-۴)$$

که در آن σ_t مقاومت کششی، P بار در لحظه شکست، R شعاع نمونه و t ضخامت استوانه است. برای انجام این آزمایش از نمونه‌های مکعبی ساخته شده مغزه‌هایی با قطر ۵۲ میلیمتر تهیه شده و سپس این مغزه‌ها به قطعاتی با ضخامت تقریبی ۳۰ میلیمتر تقسیم شده‌اند. آزمایش برزلی بر روی این

نمونه‌ها انجام شده و بارهای شکست ثبت شده‌اند. شکل ۴-۱۳ نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی برزیلی را پس از شکست نشان می‌دهد. نتایج آزمایش و مقاومت‌های به دست آمده با رابطه ۴-۱ در جدول ۴-۲ ارایه داده شده است.



شکل ۴-۱۳ نمونه‌های آزمایش کشش غیر مستقیم بعد از شکست

جدول ۴-۲ مشخصات نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی برزیلی و نتایج آزمایش

شماره نمونه	قطر (mm)	ضخامت (mm)	بار (kN)	مقاومت کششی (MPa)
۱	۵۲/۲۳	۳۰/۹۲	۳۰۶۸/۸	۱/۲۹
۲	۵۲/۱۸	۲۹/۱۳	۳۷۷۷/۱	۱/۴۱
۳	۵۲/۵۱	۳۰/۶۵	۳۵۶۸/۲	۱/۵۰
۴	۵۲/۳۷	۲۹/۹۸	۳۶۹۵/۴	۱/۴۹
میانگین	۵۲/۳۲	۳۰/۱۷	۳۵۲۷/۳۷	۱/۴۲

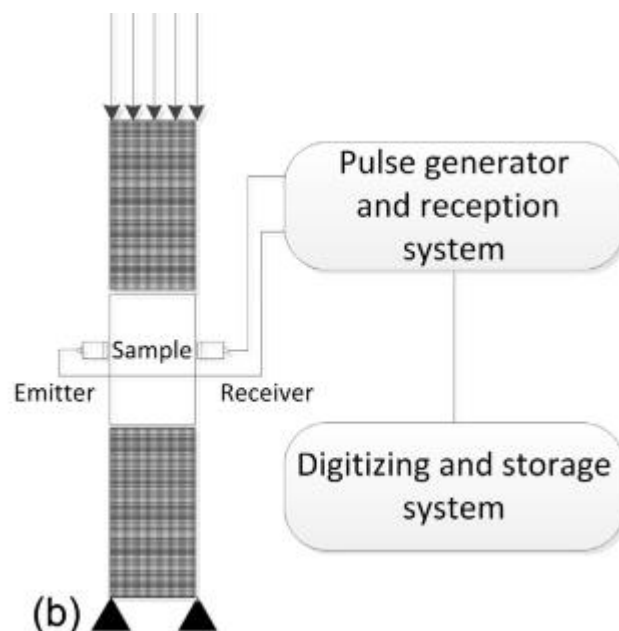
خواص مکانیکی نمونه‌های گچ - سیمان استفاده شده در این مطالعه آزمایشگاهی در جدول ۴-۳ جدول ۴-۳ درج شده است:

جدول ۴-۳ خواص مکانیکی نمونه‌های گچ - سیمان

مقاومت فشاری تک‌محوره (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	مدول یانگ (Gpa)	نسبت پواسون
۱۸/۸۲	۱/۴۲	۱۷	۰/۳۰

۳-۴ تحلیل نتایج آزمون فراصوت

سرعت صوت برای تعیین سطح تنش وارد بر سنگ و در نتیجه میزان آسیب و تغییرات ریزساختاری آن، پارامتر بسیار حساسی است [۴۴]. همان‌طور که در فصل گذشته به صورت مشروح توضیح داده شد، برای اندازه‌گیری سرعت صوت در حالی که نمونه تحت بارگذاری است، تراگذارهای ارسال و دریافت پالس فراصوت در جهت عمود بر محور بارگذاری در تماس با نمونه قرار می‌گیرند و در هر گام تعیین شده (۲۵ کیلو نیوتن) زمان عبور پالس اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۴-۱۴ تجهیزات آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت صوت در تنش‌های مختلف یک نمونه سنگی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۴ شکل شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت صوت عمود بر راستای بارگذاری و در تنش‌های مختلف [۶]

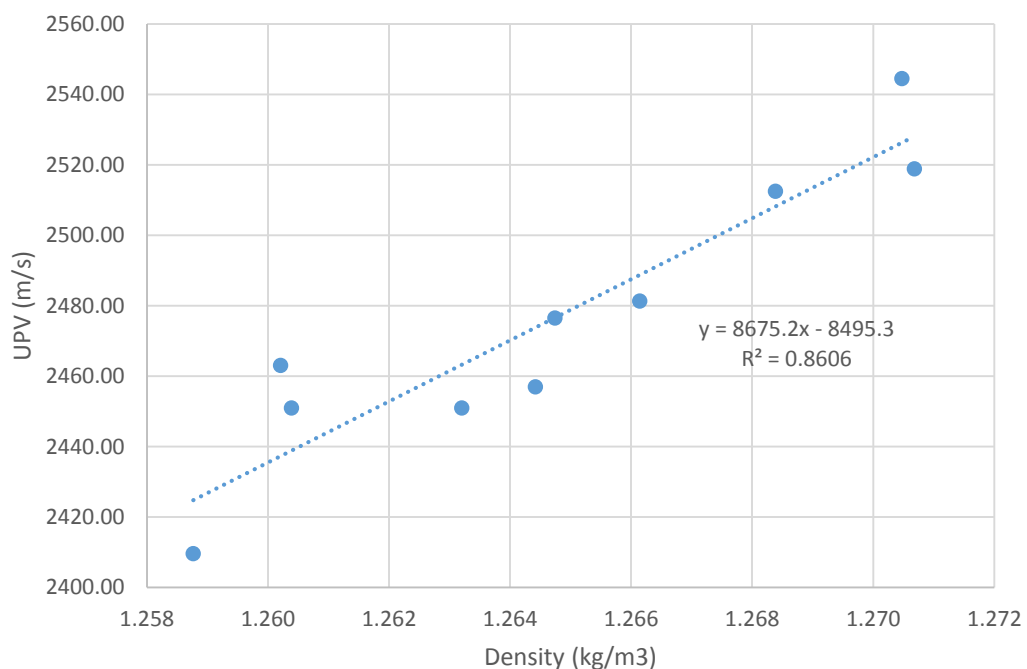
۱-۳-۴ رابطه بین سرعت پالس فراصوت و چگالی

سرعت صوت رابطه نزدیکی با ویژگی‌های مکانیکی سنگ دارد. تحقیقات زیادی نیز برای برقراری رابطه بین سرعت امواج فشاری و پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی سنگ انجام شده است. بر اساس مجموعه نتایجی که از مطالعه در مورد رابطه بین سرعت موج فشاری و چگالی روی سنگ‌های مختلف

به دست آمده، مشخص شده است که در حالت کلی این دو عامل با هم رابطه خطی دارند [۴۶]. نتایج به دست آمده از این آزمایش نیز نشان‌دهنده وجود یک رابطه خطی بین این دو عامل است. در شکل ۴-۱۵ تغییرات سرعت بر حسب چگالی ۸ نمونه و منحنی برازش شده به این نقاط با ضریب همبستگی $R^2 = 0.86$ نشان داده شده است. معادله خط برازش شده به صورت رابطه ۴-۳ است:

$$V = -8495/3 + 8675/2 \rho \quad (3-4)$$

که در آن V سرعت پالس فراصوت و ρ چگالی نمونه‌ها است.



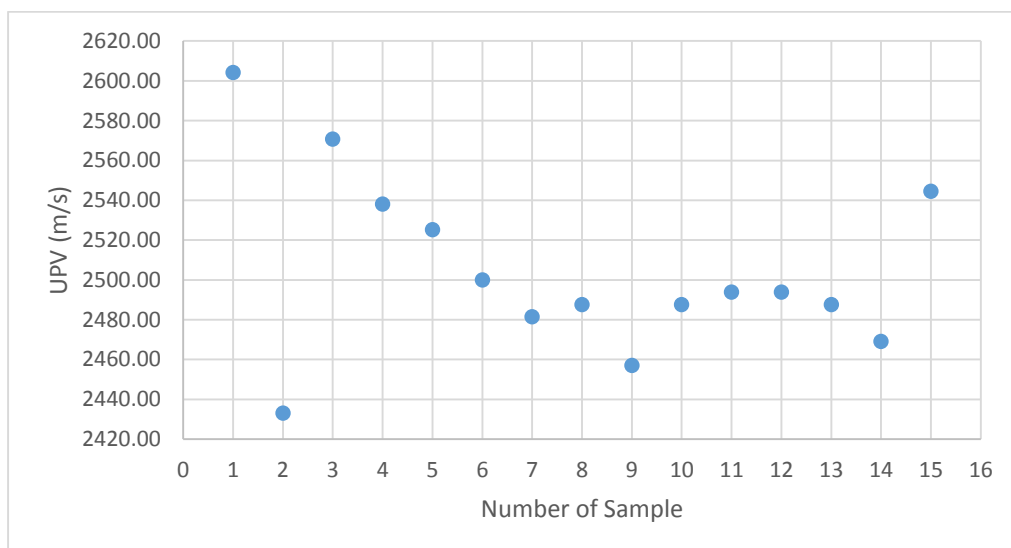
شکل ۴-۱۵ منحنی رابطه بین سرعت پالس فراصوت و چگالی در نمونه‌های آزمایشگاهی

۴-۳-۲ سرعت پالس فراصوت در شرایط تنش آزاد

اولین مرحله آزمایش سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش مختلف، در حالت بدون تنش یعنی زمانی که هیچ‌گونه باری به نمونه اعمال نمی‌شود انجام شده است. نمودار سرعت پالس فراصوت در شرایط بدون تنش نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.

سرعت پالس فراصوت در نمونه‌های مختلف بین ۲۴۳۳ تا ۲۶۰۴ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. به عبارتی

دامنه تغییر سرعت در شرایط تنش آزاد ۱۷۰ متر بر ثانیه (معادل ۷ درصد کمترین سرعت قراصوت ثبت شده در حالت بدون بار) است. این اختلاف سرعت در نمونه‌های مختلف را می‌توان به متفاوت بودن شرایط داخلی نمونه‌ها از نظر اندازه و شدت ریزترک‌ها به ویژه چگالی آن‌ها در راستای اندازه‌گیری سرعت مرتبط دانست. اگرچه که نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی یکسان و اعمال و بیره به منظور به حداقل رساندن خلل و فرج و حباب‌های هوای درون نمونه‌ها تهیه شده‌اند؛ اما با این حال نمی‌توان انتظار داشت که نمونه‌ها از نظر تخلخل، ریزترک‌ها و سایر شرایط داخلی کاملاً مشابه باشند و در هر صورت وجود اختلاف و ناهمسانی (هر چند کم) بین نمونه‌های دست‌ساز نیز طبیعی است.



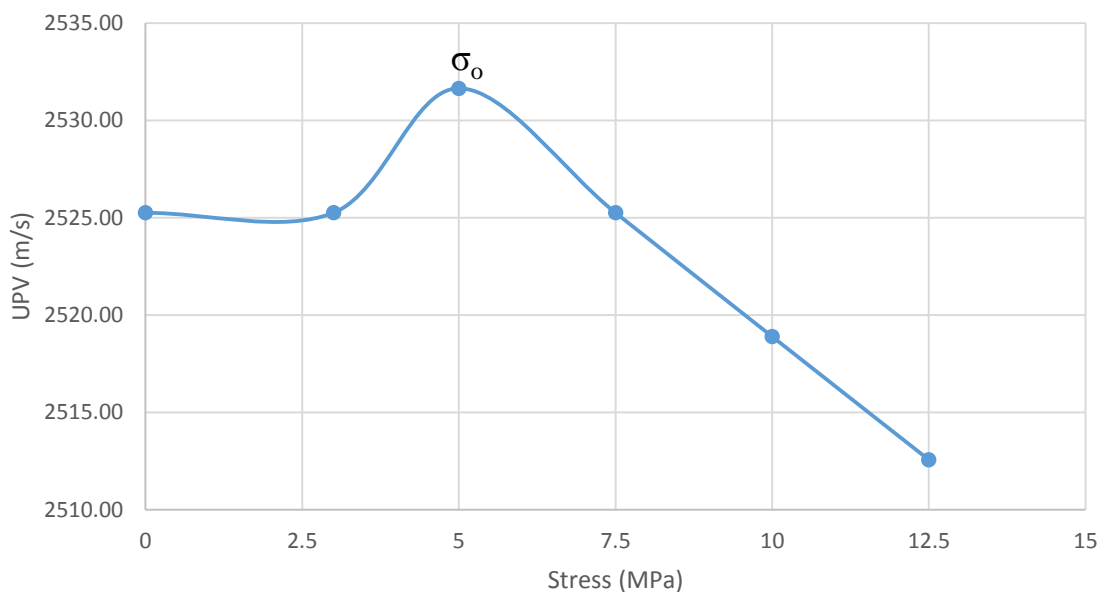
شکل ۴-۱۶ سرعت پالس فراصوت در نمونه‌ها بدون اعمال بار

۳-۳-۴ تغییرات سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش مختلف

منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت با افزایش تنش، در سطوح تنش متوسط و پایین که در مرحله اول و دوم منحنی تنش - کرنش حجمی است، در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تنش‌های پایین، وقتی که تنش اعمال شده کمتر از ۵ مگاپاسکال است سرعت پالس فراصوت افزایش می‌یابد. این تنش مرزی که حدوداً ۳۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری نمونه است و با σ_0 نشان داده خواهد شد، با توجه به نمودار تنش - کرنش، در محدوده OA منحنی کرنش محوری

(شکل ۴-۱) و مرحله اول کرنش حجمی (شکل ۴-۲) که ریزترک‌ها بسته شده و نمونه به یک محیط همگن و تقریباً بدون تخلخل تبدیل می‌شود، قرار دارد.

با عبور تنش اعمال شده از تنش مرزی σ_0 ، مقدار سرعت در مقابل افزایش بار، به تدریج با شیب ملایمی شروع به کاهش می‌کند. این بخش از منحنی تغییرات سرعت متناظر با مرحله دوم در منحنی کرنش حجمی است و در منحنی کرنش محوری در محدوده الاستیک AB قرار می‌گیرد. کاهش تدریجی و ملایم سرعت تا تنش ۱۲/۵ مگاپاسکال یعنی کمی پس از نقطه عطف منحنی کرنش حجمی (تنش ۱۱ مگاپاسکال) ادامه پیدا می‌کند. در محدوده این تنش است که پدیده اتساع رخ می‌دهد و منحنی کرنش وارد مرحله سوم می‌شود.



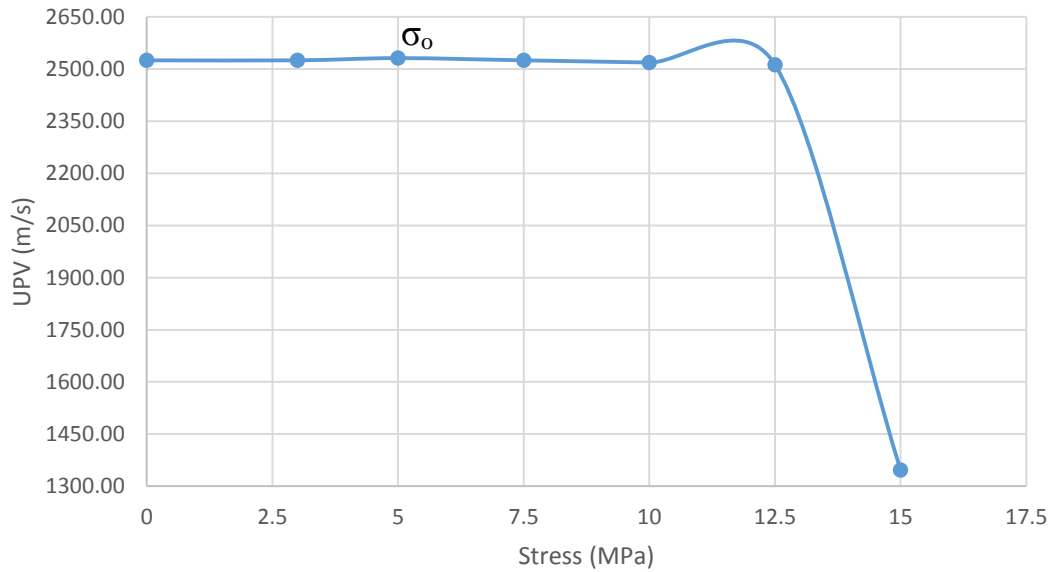
شکل ۴-۱۷ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر (نمونه آزمایشی شماره ۵)

برای مشاهده ادامه روند تغییرات سرعت فراصوت با افزایش سطح تنش از تنش اتساع تا زمان شکست و گسیختگی نمونه، منحنی سرعت پالس فراصوت - تنش با مقیاس مناسب‌تری در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است.

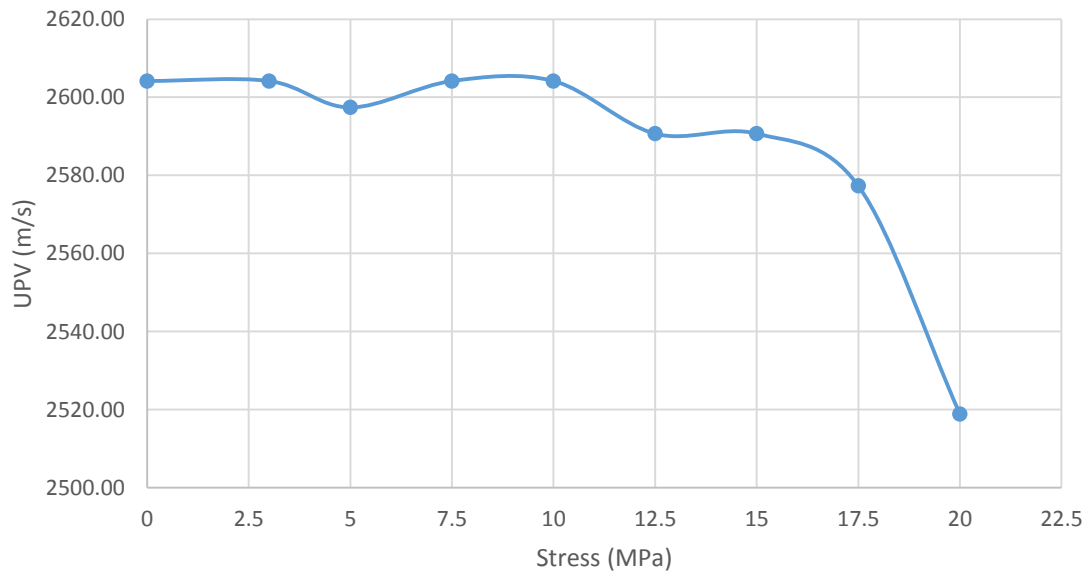
با رسیدن تنش اعمال شده به تنشی که در آن پدیده اتساع رخ می‌دهد؛ سرعت پالس فراصوت با شیب

زیادی کم می‌شود تا تنش وارده به حداکثر مقاومت نهایی نمونه برسد، نمونه گسیخته شده و آخرین پالس فراصوت از نمونه عبور کند.

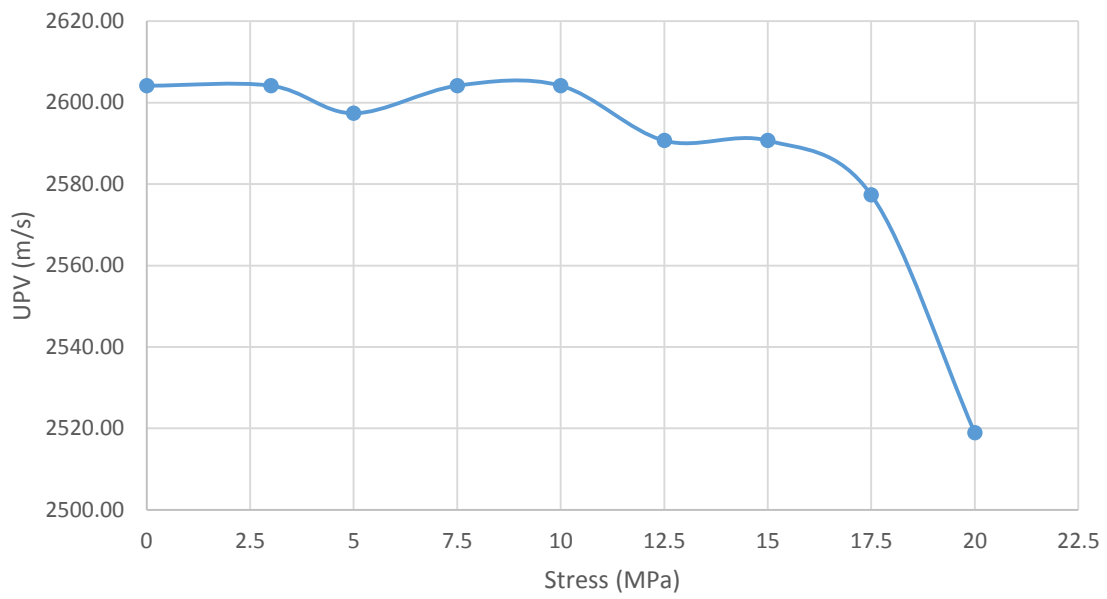
نمودارهای سرعت پالس فراصوت – تنش سایر نمونه‌های آزمایش شده برای سطوح تنش پیش از گام آخر در شکل ۱۹-۴ تا شکل ۳۳-۴ ارائه شده است:



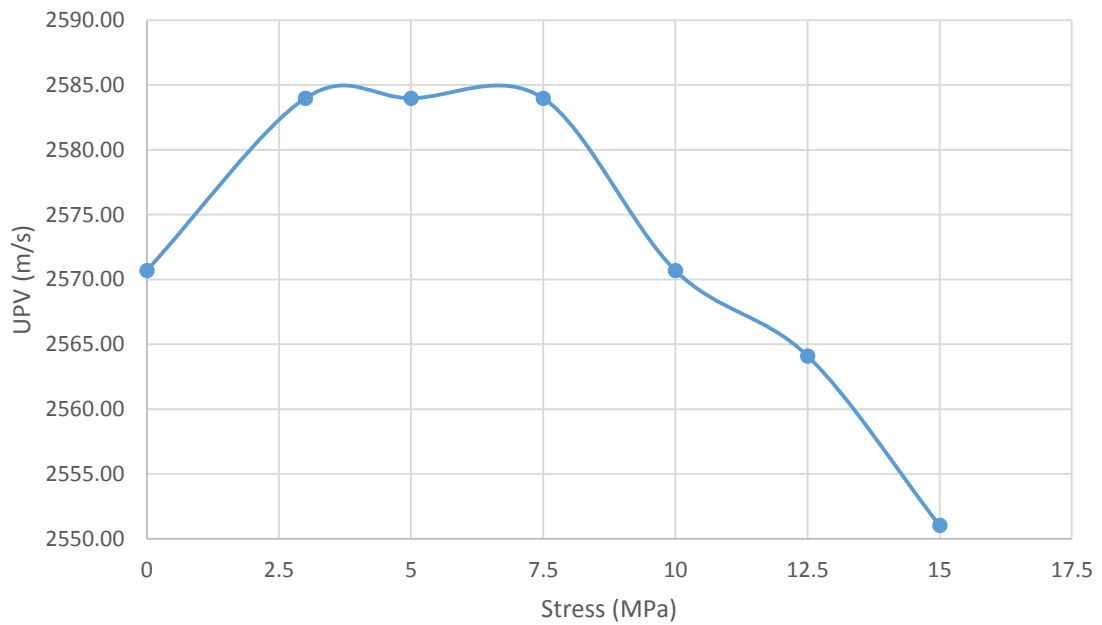
شکل ۱۸-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در سطوح مختلف تنش (نمونه آزمایشی شماره ۵)



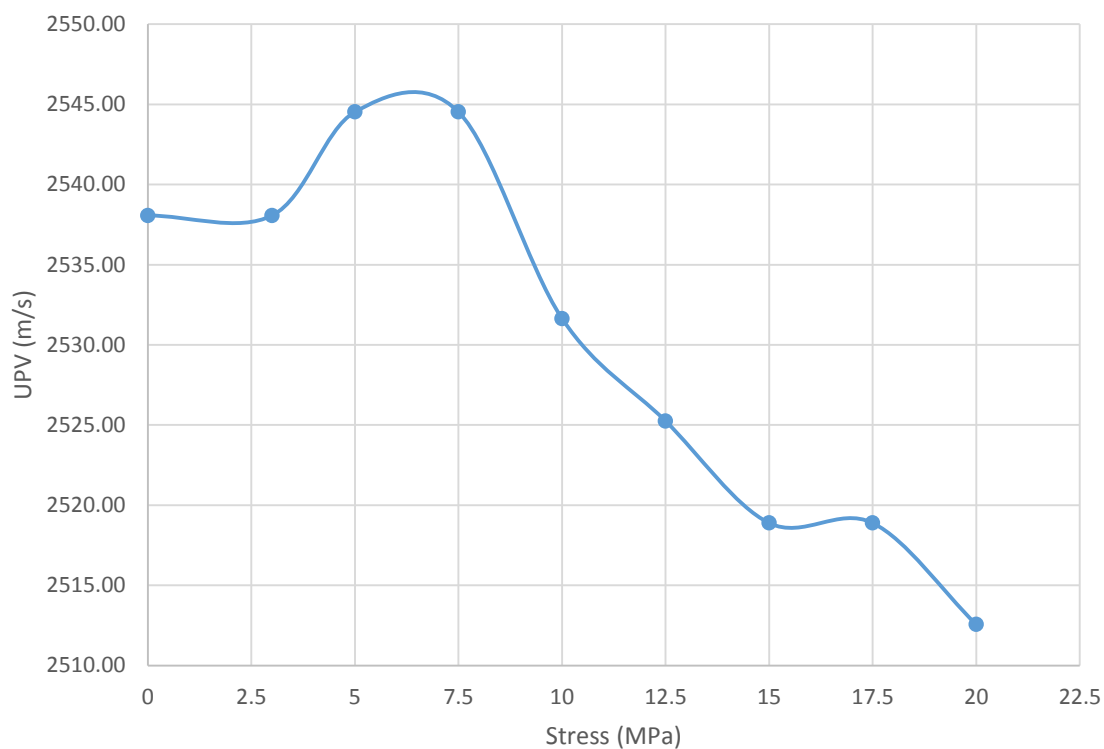
شکل ۱۹-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱



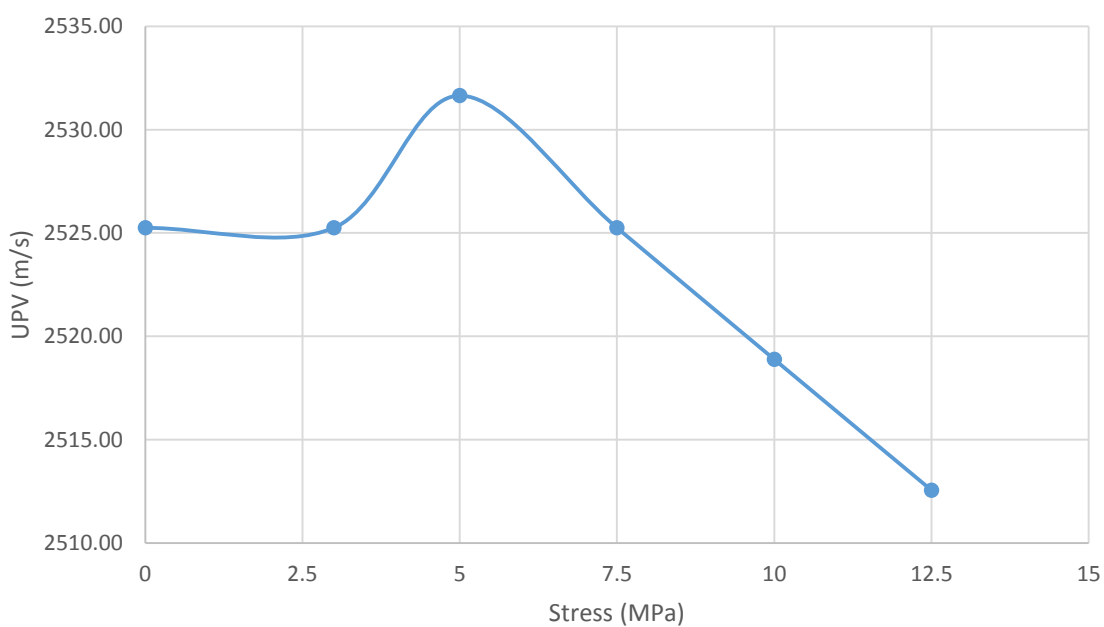
شکل ۲۰-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۲



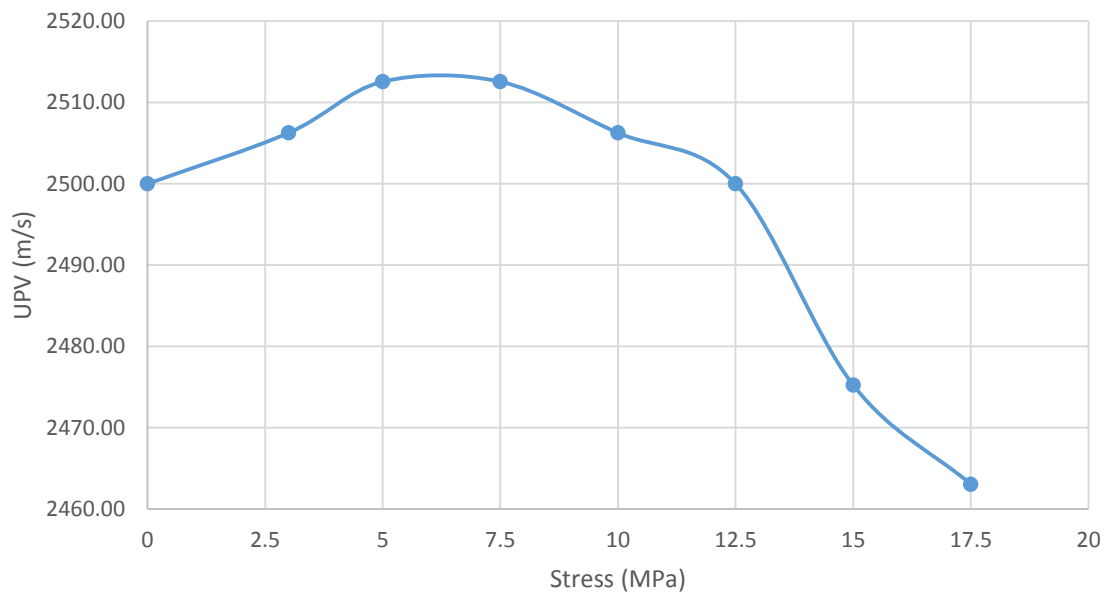
شکل ۲۱-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۳



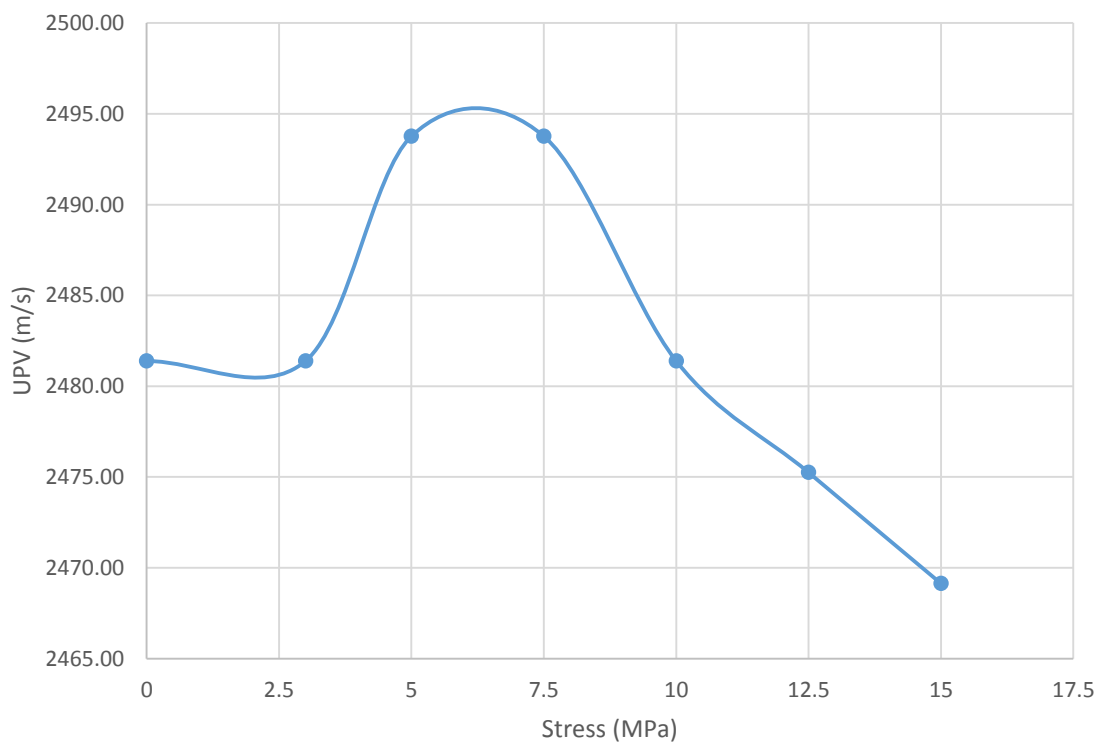
شکل ۲۲-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۴



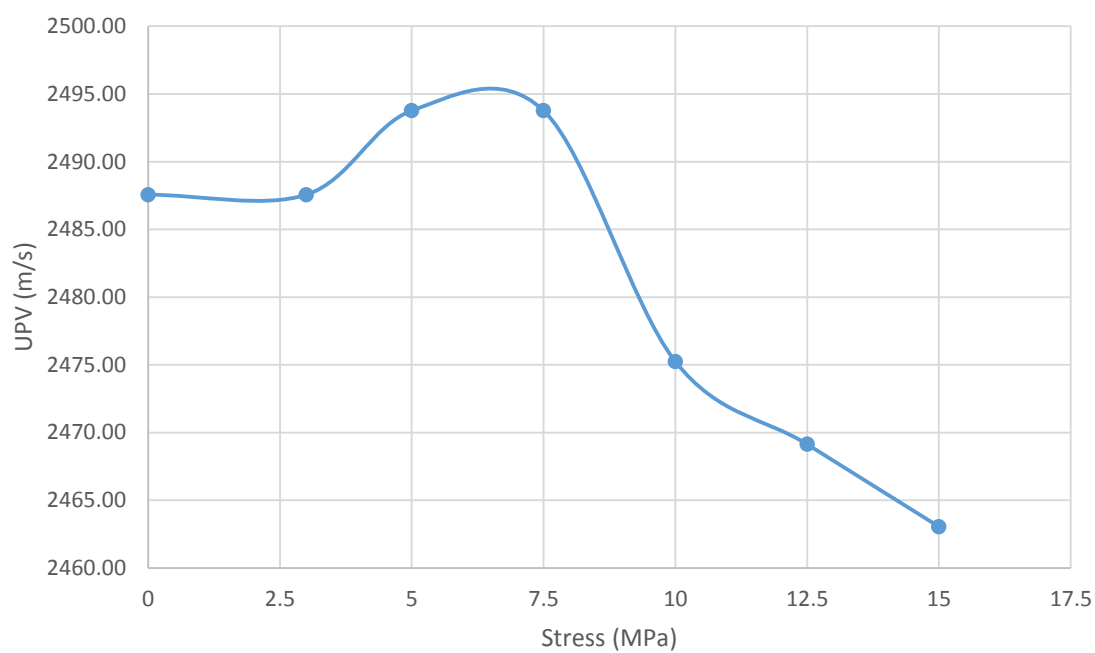
شکل ۲۳-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۵



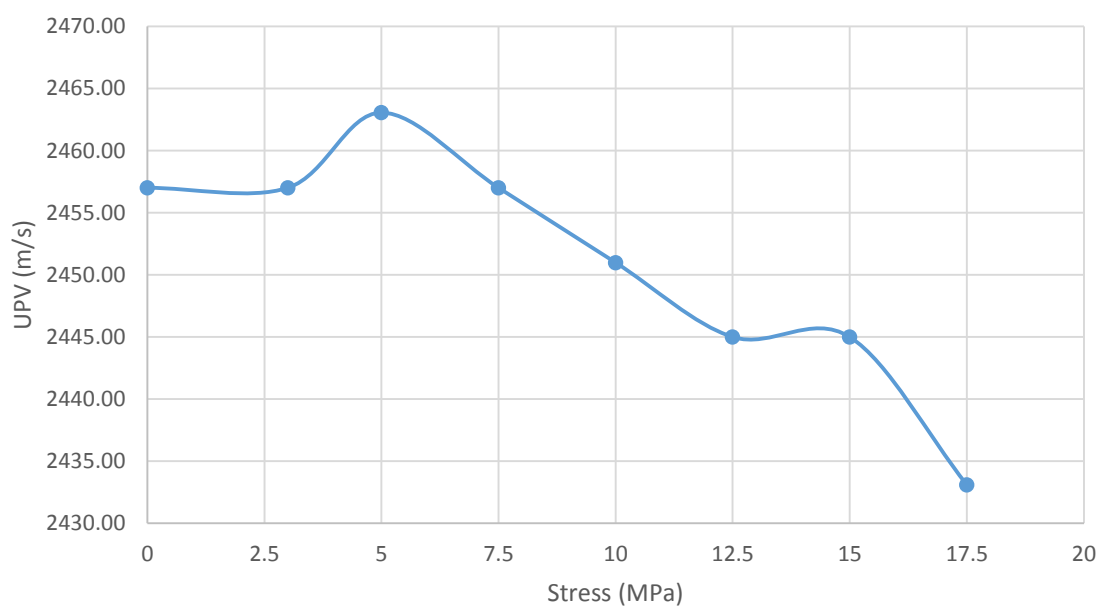
شکل ۲۴-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۶



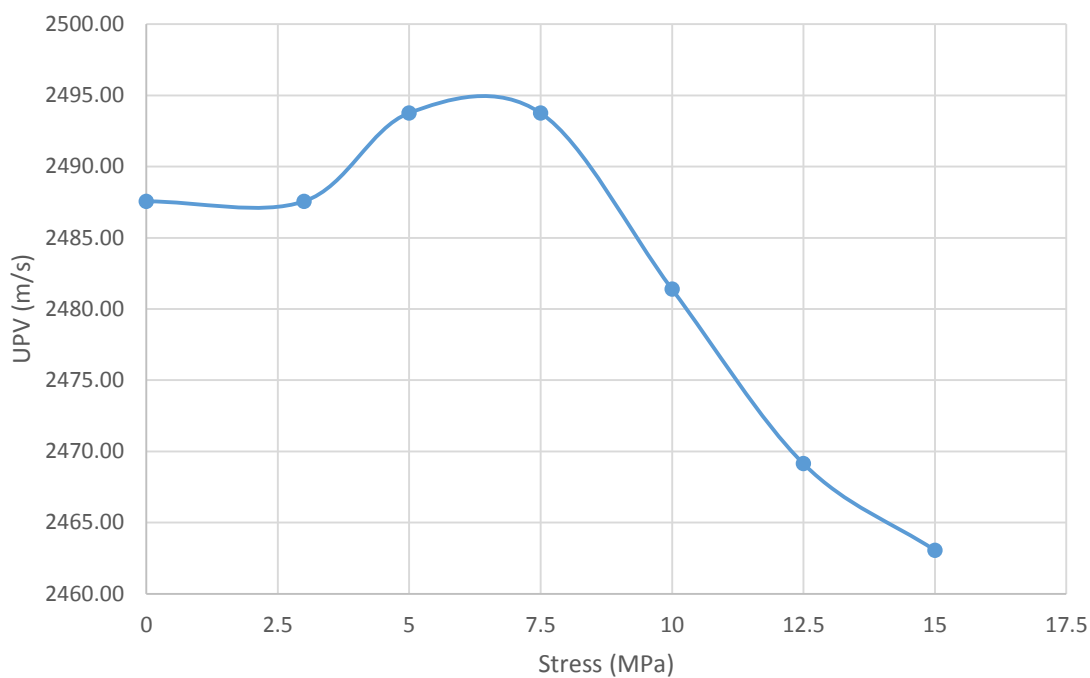
شکل ۲۵-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۷



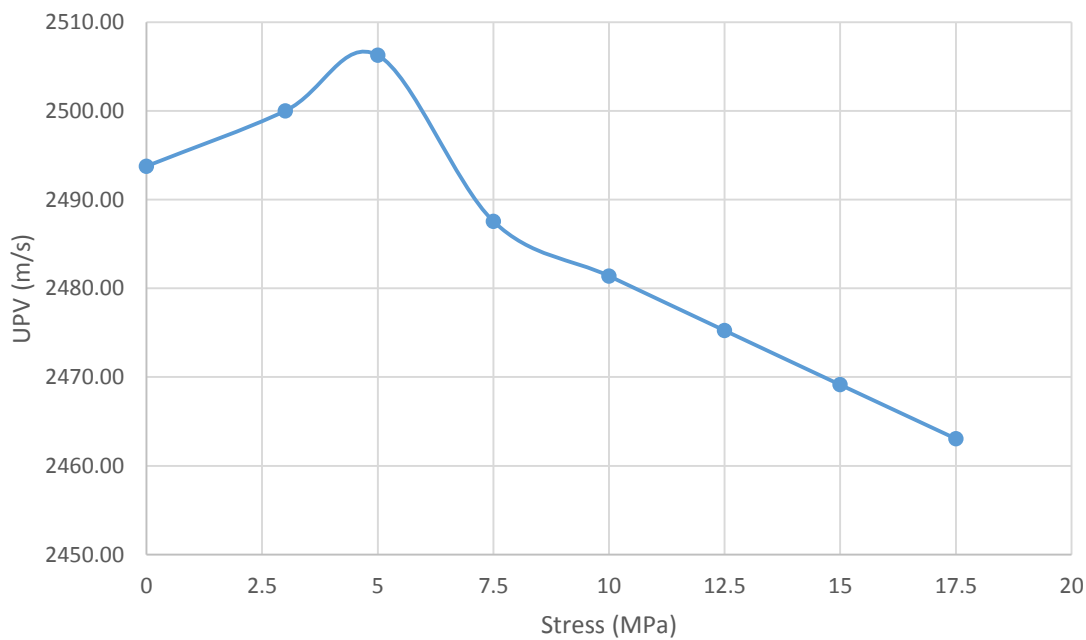
شکل ۴-۲۶ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۸



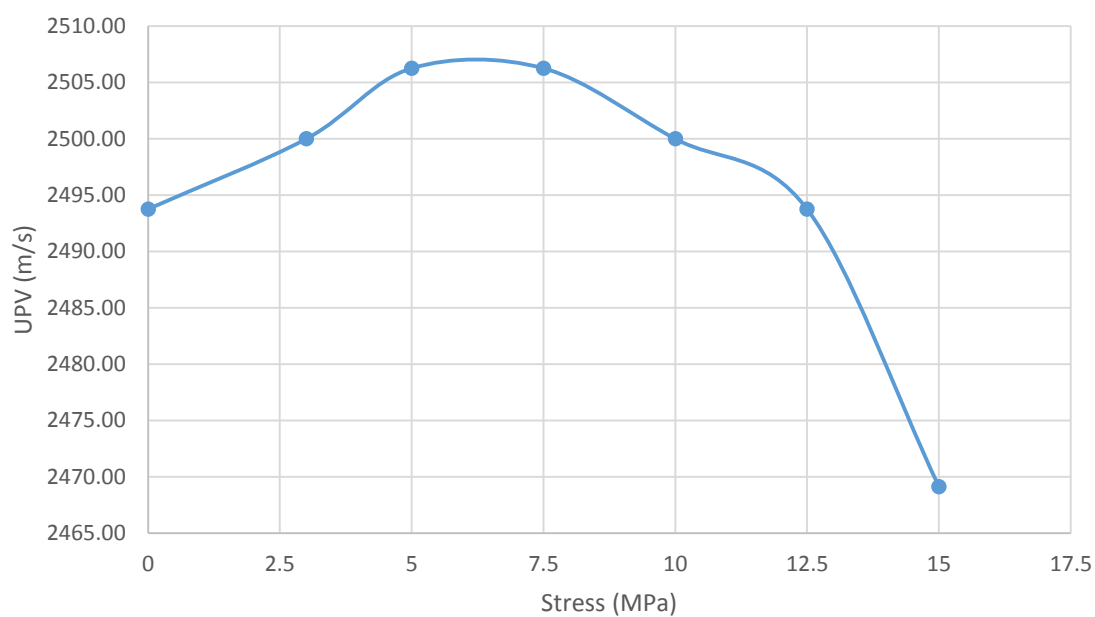
شکل ۴-۲۷ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۹



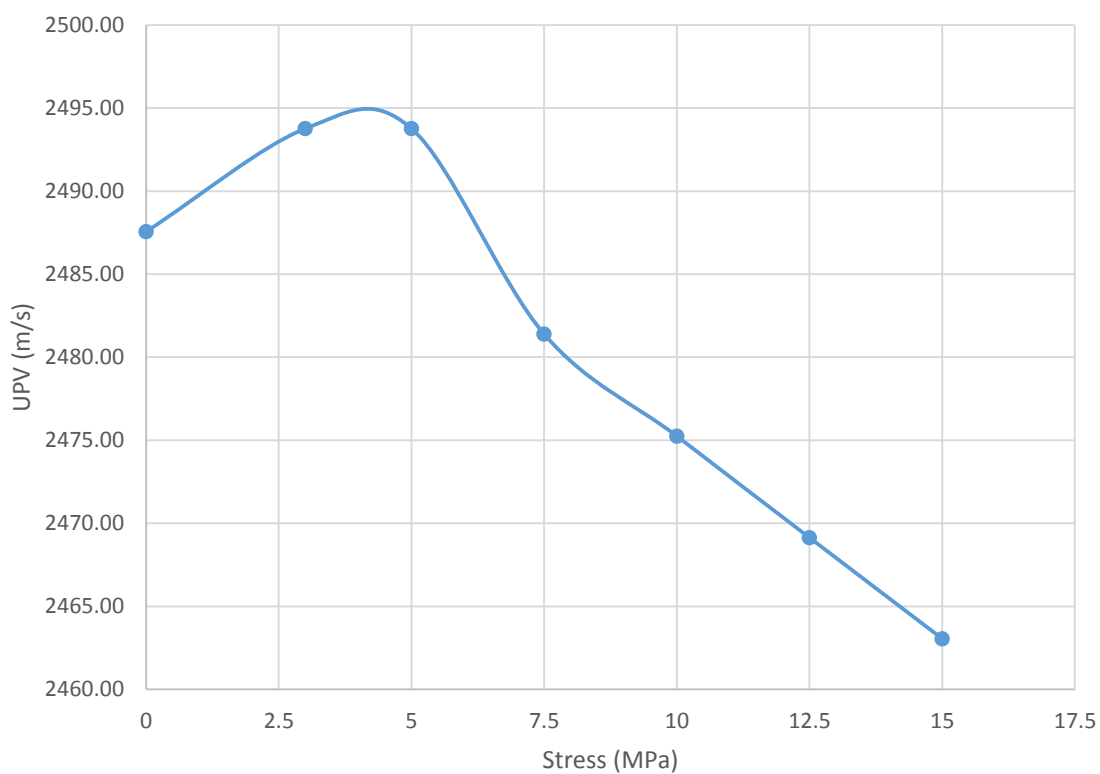
شکل ۴-۲۸ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۰



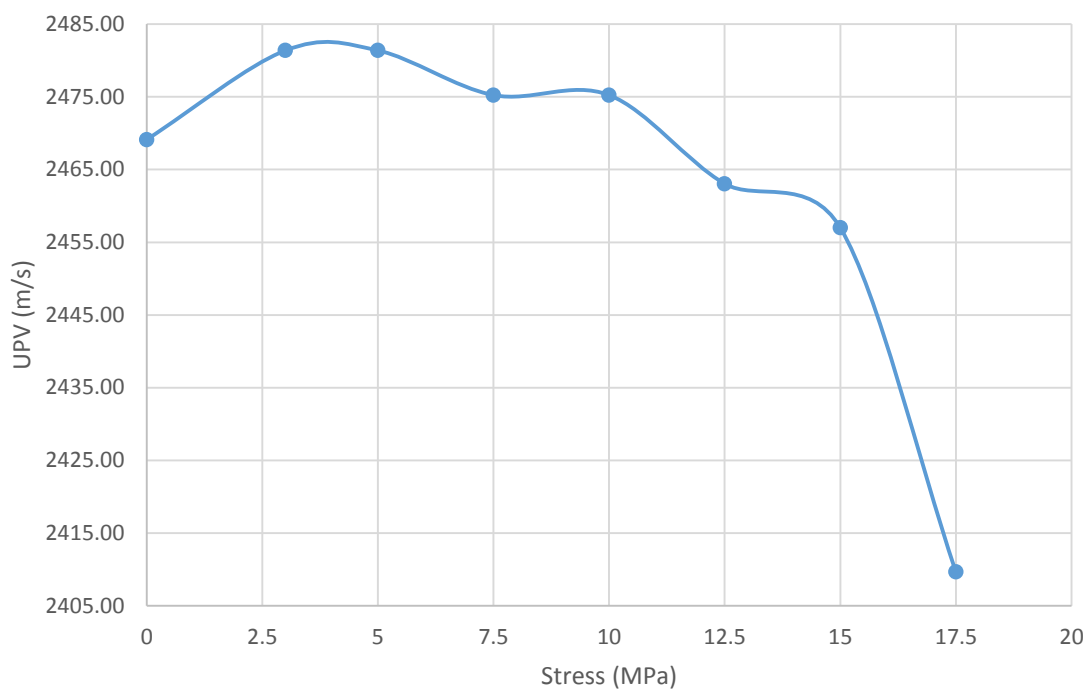
شکل ۴-۲۹ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۱



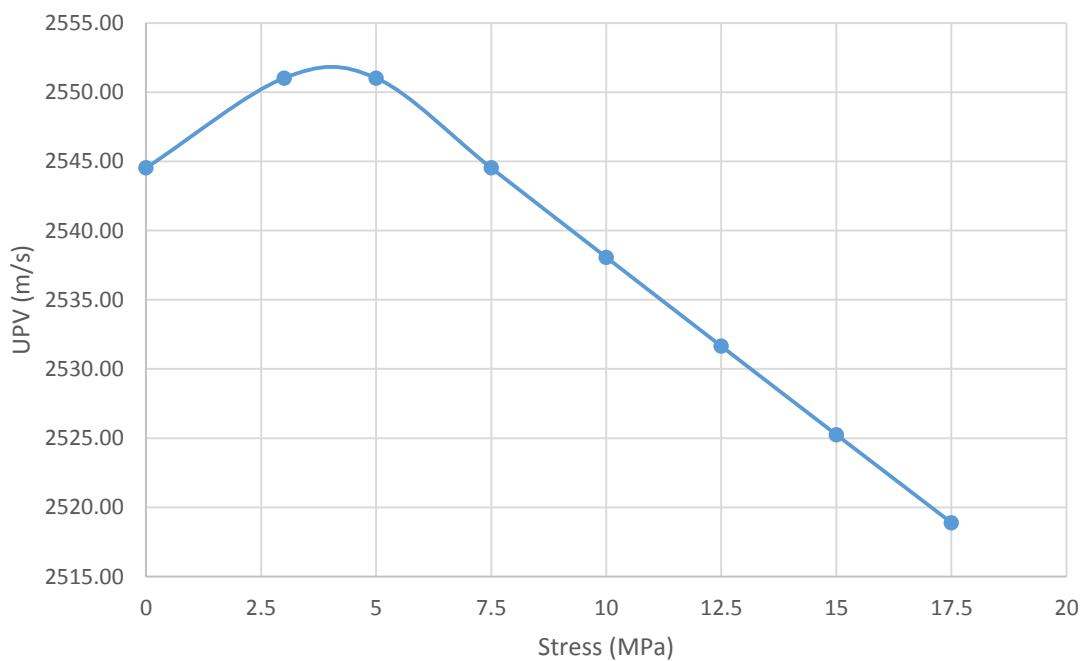
شکل ۳۰-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۲



شکل ۳۱-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۳



شکل ۳۲-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۴

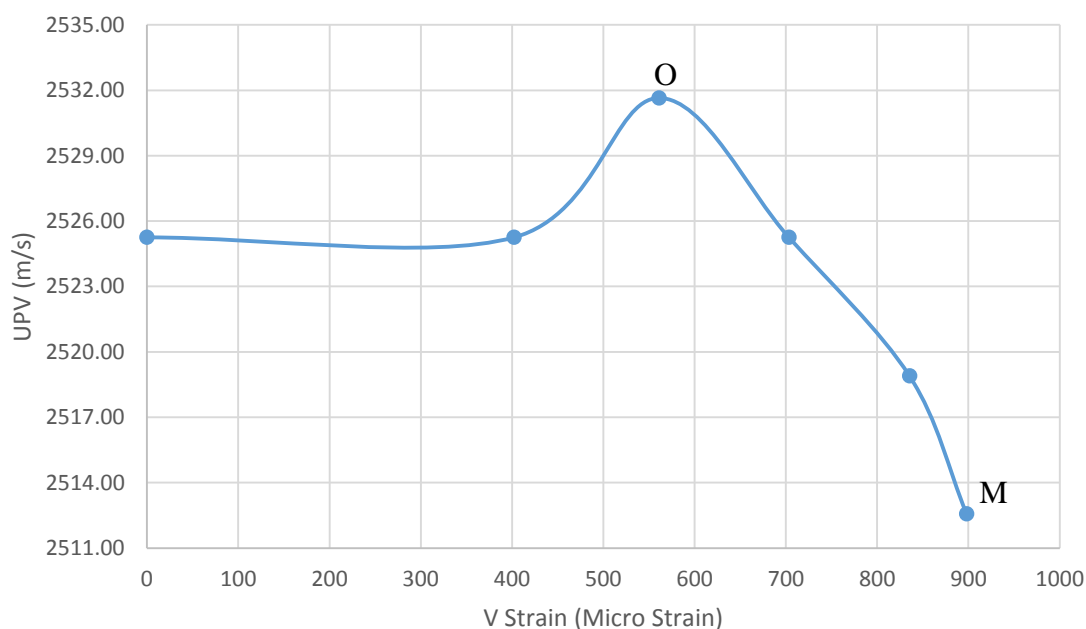


شکل ۳۳-۴ منحنی سرعت پالس فراصوت در تنش‌های پیش از گام آخر در نمونه آزمایشی شماره ۱۵

۴-۳-۴ منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت در مقابل کرنش محوری

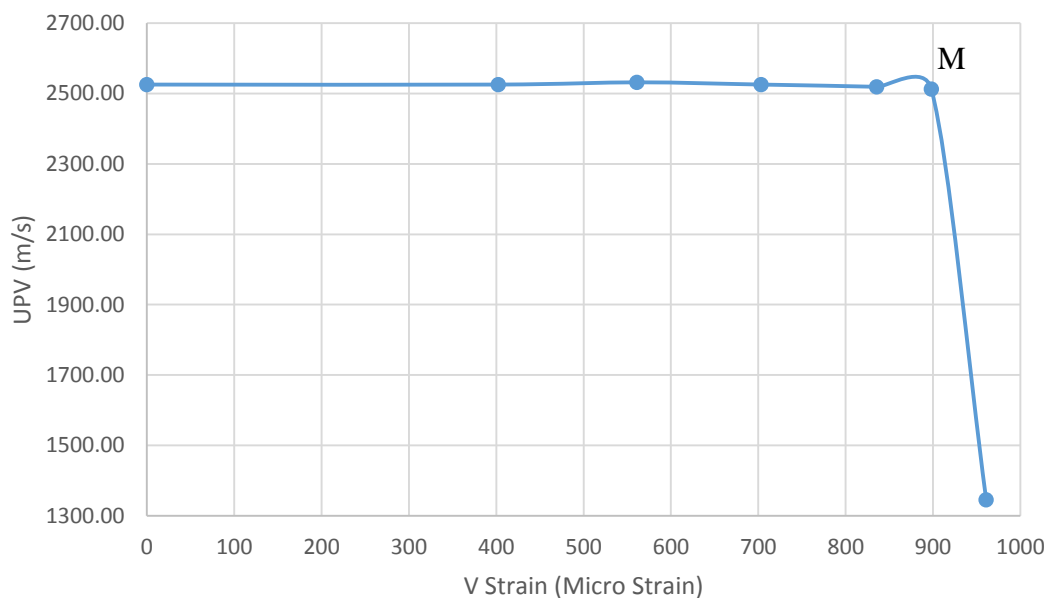
انتظار می‌رود در کرنش‌های محوری متناظر با مرحله اول کرنش حجمی (شکل ۲-۴) یعنی فاصله OA، که در آن به دلیل بسته شدن ریزترک‌ها و یکپارچه شدن محیط، حجم کاهش می‌یابد، با کم شدن مسیر عبور موج فشاری و همچنین عبور موج از محیطی با مقاومت صوتی ثابت و عدم افت سرعت ناشی از گذر از مسیرهای هوا؛ سرعت پالس فراصوت افزایش یابد. همان‌طور که در شکل ۴-۳ نیز دیده می‌شود، سرعت پالس فراصوت تا نقطه O افزایش می‌یابد. با توجه به منحنی تنش - کرنش (شکل ۱-۴) و مراحل مختلف منحنی کرنش حجمی (شکل ۲-۴)، این نقطه متناظر با حدوداً ۳۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری نمونه (σ_0) است.

در کرنش‌های محوری بزرگ‌تر از کرنش نقطه O که در منحنی تنش - کرنش در فاصله الاستیک AB و در منحنی کرنش حجمی در مرحله دوم قرار می‌گیرد تا کرنش متناظر با تنش ۱۲/۵ مگاپاسکال (نقطه M)، در محدوده تنش اتساع، سرعت پالس فراصوت با شیب ملایمی کم می‌شود.



شکل ۴-۳ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش محوری در نمونه آزمایشی شماره ۵ در کرنش‌های پیش از گام آخر

با ادامه روند بارگذاری و افزایش کرنش محوری، باز شدگی آن دسته از ریزترک‌هایی که در راستای محور اعمال بار یا با شیب کمی نسبت به آن قرار دارند، بیشتر می‌شود. به عبارتی ریزترک‌ها بازتر و گسترده‌تر می‌شوند. به علاوه تحت فشار ریزترک‌ها و ناپیوستگی‌های جدیدی هم در جهت‌های مختلف در نمونه به وجود می‌آید. همان‌طور که در بخش ۴-۳-۳ عنوان شد این تغییرات در مرحله سوم کرنش حجمی رخ می‌دهند. در منحنی رابطه سرعت - کرنش محوری نشان داده شده در شکل ۴-۳۵، هم دیده می‌شود که در کرنش‌های محوری هم‌ارز این مرحله، سرعت پالس فراصوت با شیب زیادی کم می‌شود تا جایی که انتهاهای ترک‌های نمونه به سطوح آزاد برسد و با ایجاد صفحه شکست، نمونه از هم گسیخته شده و بشکند.

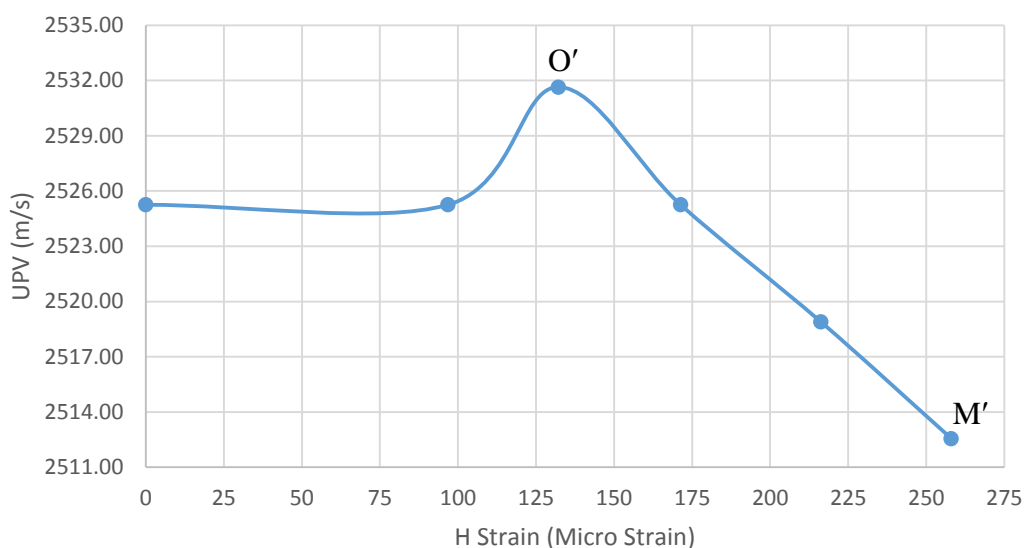


شکل ۴-۳۵ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش محوری در نمونه آزمایشی شماره ۵

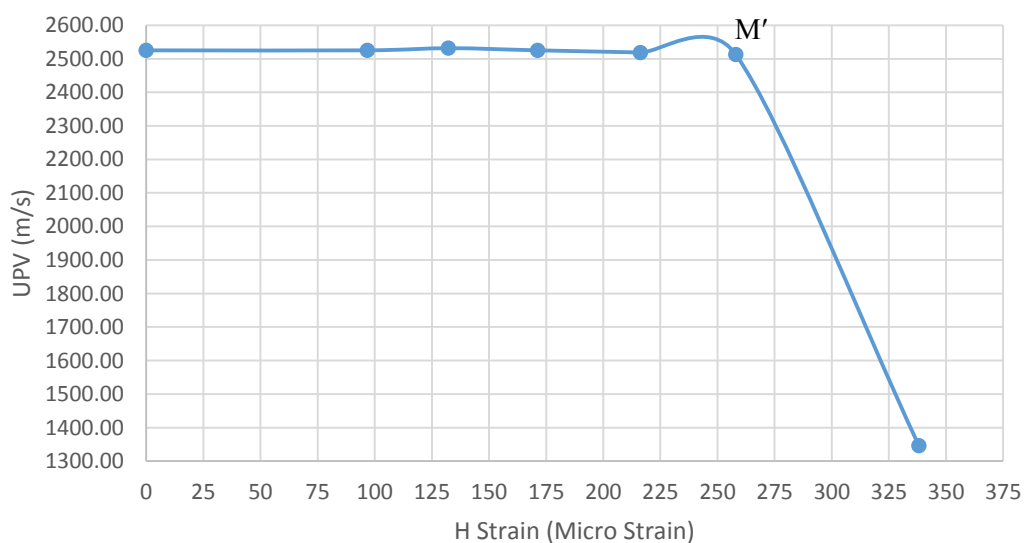
۴-۳-۵ منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت در مقابل کرنش جانبی

روند تغییرات سرعت در منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت و کرنش جانبی هم همانند منحنی سرعت در سطوح تنش مختلف و منحنی سرعت - کرنش محوری است. همان‌طور که در شکل ۴-۳۶ دیده می‌شود سرعت تا کرنش متناظر با نقطه O' افزایش می‌یابد. این نقطه معادل نقطه O در منحنی

سرعت - کرنش محوری و نقطه σ_0 در منحنی سرعت - تنش است. سپس با افزایش کرنش تا کرنش M' ، سرعت با شیب ملایمی کم می‌شود. این نقطه معادل نقطه M در منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش محوری است. بعد از آن سرعت با شیب زیادی کاهش می‌یابد تا به کرنش جانبی لحظه شکست برسد و نمونه بشکند. تغییرات سرعت پالس فراصوت نسبت به کرنش در کرنش‌های پیش از گام آخر و پس از آن به ترتیب در شکل ۴-۳۶ و شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۶ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش جانبی در نمونه آزمایشی شماره ۵ در کرنش‌های پیش از گام آخر



شکل ۴-۳۷ منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش جانبی در نمونه آزمایشی شماره ۵

مقایسه منحنی رابطه بین سرعت پالس فراصوت با کرنش محوری، جانبی و در سطوح تنش مختلف نشان می‌دهد که اطلاعات حاصل از این نمودارها همسو هستند و یکدیگر را تایید می‌کنند.

۴-۳-۶ اثر بارگذاری بر توسعه ترک

برای بررسی اثر بارگذاری بر گسترش ترک از روش‌های مختلفی مانند فوتو الاستیسیته، توموگرافی، رادیوگرافی اشعه ایکس با شدت پایین، سرعت امواج فراصوت و ... استفاده می‌شود.

برای مثال در روش فوتو الاستیسیته از خاصیت ناهمسانگردی نور تحت تنش در مواد غیر کریستالی شفاف استفاده می‌شود. این خاصیت غیر دائمی تنها تا زمانی که تنش‌ها اعمال می‌شوند وجود داشته و با نام شکست مضاعف موقتی^۱ معرفی شده است. روش فوتو الاستیسیته نیز بر اساس این رفتار مواد شفاف پایه گذاری شده است. در این مواد نور در دو جهت اصلی تنش با دو سرعت مجزا حرکت می‌کند، بنابراین پس از عبور طیف نور از هر المان از نمونه تحت تنش، اختلاف فازی ایجاد خواهد شد. با توجه به اینکه اختلاف ضرایب شکست نور در دو جهت اصلی با اختلاف تنش‌های اصلی مشخص می‌شود. در این روش مدلی از قطعه ساخته شده و در پلاریسکوپ صفحه‌ای دارای دو قطبی کننده نور عمود بر هم (پلاریز کننده و آنالیز کننده) قرار می‌گیرد. با قرار دادن مدل در پلاریسکوپ در صورتی که اختلاف فاز ایجاد شده طیف نور پس از عبور از یک نقطه از مدل مضرب صحیحی از طول موج نور عبوری باشد یا جهات تنش اصلی منطبق بر جهات محورهای پلاریز کننده و آنالیز کننده باشد، طیف نور کاملاً جذب می‌شود. در غیر این صورت طیف نور از پلاریسکوپ عبور می‌کند. بر این اساس نوارهایی تشکیل شده که حاوی اطاعتی از میزان اختلاف تنش‌های اصلی و جهات تنش اصلی در نقاط مختلف هستند [۴۷]. در آزمون رادیوگرافی از پرتوهای ایکس با قابلیت نفوذ بالا برای نفوذ به داخل محیط مورد آزمایش و مقدار جذب متفاوت این پرتوها در حین عبور از محیط‌های مختلف استفاده می‌شود. بخشی از پرتو که در حین عبور از محیط مادی جذب می‌شود به ضخامت، چگالی و عدد اتمی ماده و هم چنین طول

^۱ Temporary Double Refraction

موج پرتو یا انرژی فوتون‌های عبوری بستگی دارد. با افزایش ضخامت و چگالی محیط، جذب پرتو بیشتر می‌شود. بنابراین در صورت وجود عیب یا ناهمگنی و تغییر ضخامت در قطعه میزان پرتو جذب شده در نقاط مختلف متفاوت خواهد بود. از این رو برای تشخیص و شناسایی عیب در قطعه باید به نحوی این غیر یکنواختی حاصل از مقدار پرتو جذب شده پس از عبور از درون قطعه را آشکار ساخت. این آشکار سازی با عبور دادن پرتوهای ایکس از درون قطعه و بررسی اثر حاصل از آن بر روی فیلم انجام می‌گیرد [۴۸].

در اینجا اثر بارگذاری بر گسترش ترک در نمونه‌ها با استفاده از سرعت عبور موج فشاری در بارهای مختلف بررسی شده است. در این روش توسعه ترک در مسیر عبور پالس در مراحل مختلف بارگذاری از رابطه ۴-۴ به دست می‌آید.

$$V = \frac{\sum V_i L_i}{\sum L_i} \quad (۴-۴)$$

که در آن V_i سرعت عبور موج در محیط‌های مختلف، L_i طول مسیر عبور موج در محیط‌های مختلف و V سرعت کلی موج است. به عبارتی اگر فرض شود در این آزمایش، پالسی که از تراگذار فرستنده ارسال می‌شود برای رسیدن به تراگذار گیرنده از محیط جامد نمونه و هوای بین ریزترک‌ها عبور می‌کند، رابطه ۴-۴ به صورت زیر خواهد بود:

$$V_t = \frac{V_s \cdot L_s + V_a \cdot L_a}{L_s + L_a} \quad (۵-۴)$$

که در آن V_s سرعت عبور پالس فراصوت از بخش جامد نمونه، V_a سرعت صوت در هوا که در حدود ۳۴۳ متر بر ثانیه فرض می‌شود، L_s طول مسیر عبور پالس از محیط جامد که برابر طول نمونه در نظر گرفته می‌شود، L_a مجموع طول بازشدگی ریزترک‌هایی که در مسیر عبور پالس هستند و V_t سرعت پالس فراصوت در کل نمونه که با داشتن زمان رسیدن پالس از تراگذار فرستنده به تراگذار گیرنده به دست می‌آید.

برای به دست آوردن میزان پوکی نمونه ناشی از رشد و گسترش ریزترک‌ها تحت بارگذاری باید تغییرات

L_a در ترازهای مختلف تنش با هم مقایسه شوند. بنابراین در مرحله اول، برای مقایسه تاثیر بارگذاری بر گسترش ترک در دو گام اول بارگذاری یا به عبارتی به دست آوردن میزان افزایش مجموع طول بازشدگی ریزترکها بین این دو تراز تنش، سرعت پالس فراصوت در شرایط بدون بار و تنش ۳ مگاپاسکال با هم مقایسه می‌شوند. مقایسه این دو حالت یک عدد مثبت برای L_a خواهد بود که بیانگر طول مسیر هوای ایجاد شده در نمونه بین تراگذارهای فرستنده و گیرنده (در راستای اندازه‌گیری زمان عبور موج) در روند بارگذاری است. این عدد به صورت L_{a03} به معنای افزایش طول بازشدگی ریزترکها تا تراز تنش ۳ مگاپاسکال، نشان داده خواهد شد. در مرحله دوم، سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش ۳ و ۵ مگاپاسکال با هم مقایسه شده و عدد حاصل با L_{a35} نشان داده می‌شود که بیانگر افزایش مجموع طول باز شدگی ریزترکها بین دو تراز تنش ۳ و ۵ مگاپاسکال است.

این مراحل برای تمامی نمونه‌ها تا تنش مقاومت فشاری تک‌محوره محاسبه شده و در جدول ۴-۴ تا جدول ۴-۱۸ نشان داده شده است. در آخر نیز برای نشان دادن افزایش پوکی کلی نمونه‌ها، سرعت‌های پالس فراصوت بین حالت بدون بار و لحظه شکست مقایسه شده‌اند و نتیجه به صورت L_{af} در جدول ۴-۱۹ ارایه شده است.

جدول ۴-۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۶۰۴/۱۲	۰
۰/۰۰	۲۶۰۴/۱۲	۳
۰/۳۰	۲۵۹۷/۴۰	۵
-۰/۳۰	۲۶۰۴/۱۷	۷/۵
-۰/۳۰	۲۶۰۴/۱۷	۱۰
۰/۶۰	۲۵۹۰/۶۷	۱۲/۵
۰/۶۰	۲۵۹۰/۶۷	۱۵
۰/۶۰	۲۵۷۷/۳۲	۱۷/۵
۲/۶۸	۲۵۱۸/۸۹	۲۰
۵۴/۵۱	۱۷۵۱/۳۱	۲۰/۵

جدول ۴-۵ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۲

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۳۳/۰۹	۰
۰/۰۰	۲۴۳۳/۰۹	۳
۰۰/۸۵	۲۴۵۰/۹۸	۵
۰/۲۸	۲۴۴۴/۹۹	۷/۵
۰/۱۴	۲۴۴۲/۰۰	۱۰
۱/۲۸	۲۴۱۵/۴۶	۱۲/۵
۱/۴۱	۲۳۸۶/۶۳	۱۵
۷/۶۱	۲۲۴۲/۱۵	۱۷/۵

جدول ۴-۶ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۳

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۵۷۰/۶۹	۰
۰۰/۵۹	۲۵۸۳/۹۸	۳
۰۰/۵۹	۲۵۸۳/۹۸	۵
۰۰/۵۹	۲۵۸۳/۹۸	۷/۵
۰/۶۰	۲۵۷۰/۶۹	۱۰
۰/۳۰	۲۵۶۴/۱۰	۱۲/۵
۰/۵۹	۲۵۵۱/۰۲	۱۵
۴/۴۵	۲۴۵۷/۰۰	۱۷/۵

جدول ۴-۷ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۴

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۵۳۸/۰۷	۰
۰/۰۰	۲۵۳۸/۰۷	۳
-۰/۲۹	۲۵۴۴/۵۳	۵
-۰/۲۹	۲۵۴۴/۵۳	۷/۵
۰/۵۹	۲۵۳۱/۶۵	۱۰
۰/۲۹	۲۵۲۵/۲۵	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۵۱۸/۸۹	۱۵
۰/۲۹	۲۵۱۸/۸۹	۱۷/۵
۰/۲۹	۲۵۱۲/۵۶	۲۰
۴/۳۹	۲۴۲۱/۳۱	۲۲/۵

جدول ۴-۸ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۵

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۵۲۵/۲۵	۰
۰/۰۰	۲۵۲۵/۲۵	۳
-۰/۲۹	۲۵۳۱/۶۵	۵
۰/۲۹	۲۵۲۵/۲۵	۷/۵
۰/۲۹	۲۵۱۸/۸۹	۱۰
۰/۲۹	۲۵۱۲/۵۶	۱۲/۵
۱۱۶/۳۵	۱۳۴۵/۸۹	۱۵

جدول ۴-۹ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۶

L _{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۵۰۰/۰۰	۰
-۰/۲۹	۲۵۰۶/۲۷	۳
-۰/۲۹	۲۵۱۲/۵۶	۵
-۰/۲۹	۲۵۱۲/۵۶	۷/۵
۰/۲۹	۲۵۰۶/۲۷	۱۰
۰/۲۹	۲۵۰۰/۰۰	۱۲/۵
۱/۱۶	۲۴۷۵/۲۵	۱۵
۰/۵۸	۲۴۶۳/۰۵	۱۷/۵
۵۰/۵۵	۱۷۵۱/۳۱	۲۰

جدول ۴-۱۰ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۷

L _{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۸۱/۳۹	۰
۰/۰۰	۲۴۸۱/۳۹	۳
-۰/۵۸	۲۴۹۳/۷۷	۵
-۰/۵۸	۲۴۹۳/۷۷	۷/۵
۰/۵۸	۲۴۸۱/۳۹	۱۰
۰/۲۹	۲۴۷۵/۲۵	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۶۹/۱۴	۱۵
۵/۷۸	۲۳۵۲/۹۴	۱۷/۵

جدول ۴-۱۱ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۸

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۸۷/۵۶	۰
۰/۰۰	۲۴۸۷/۵۶	۳
-۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۵
-۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۷/۵
۰/۸۷	۲۴۷۵/۲۵	۱۰
۰/۲۹	۲۴۶۹/۱۴	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۶۳/۰۵	۱۵
۳/۷۴	۲۳۸۶/۶۳	۱۷/۵
۱/۶۸	۲۳۵۲/۹۴	۱۸/۵

جدول ۴-۱۲ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۹

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۵۷/۰۰	۰
۰/۰۰	۲۴۵۷/۰۰	۳
-۰/۲۹	۲۴۶۳/۰۵	۵
۰/۲۹	۲۴۵۷/۰۰	۷/۵
۰/۲۹	۲۴۵۰/۹۸	۱۰
۰/۲۹	۲۴۴۴/۹۹	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۴۴/۹۹	۱۵
۰/۵۷	۲۴۳۳/۰۹	۱۷/۵
۰/۵۷	۲۴۲۱/۳۱	۲۰

جدول ۴-۱۳ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۰

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۸۷/۵۶	۰
۰/۰۰	۲۴۸۷/۵۶	۳
-۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۵
-۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۷/۵
۰/۵۸	۲۴۸۱/۳۹	۱۰
۰/۵۸	۲۴۶۹/۱۴	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۶۳/۰۵	۱۵
۲/۰۱	۲۴۲۱/۳۱	۱۷/۵
۲۶۷/۲۳	۹۰۹/۰۹	۱۹

جدول ۴-۱۴ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۱

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۹۳/۷۷	۰
-۰/۲۹	۲۵۰۰/۰۰	۳
-۰/۲۹	۲۵۰۶/۲۷	۵
۰/۸۷	۲۴۸۷/۵۶	۷/۵
۰/۲۹	۲۴۸۱/۳۹	۱۰
۰/۲۹	۲۴۷۵/۲۵	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۶۹/۱۴	۱۵
۰/۲۹	۲۴۶۳/۰۵	۱۷/۵
۷۲/۴۷	۱۵۷۲/۳۳	۱۹

جدول ۴-۱۵ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۲

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۹۳/۷۷	۰
-۰/۲۹	۲۵۰۰/۰۰	۳
-۰/۲۹	۲۵۰۶/۲۷	۵
-۰/۲۹	۲۵۰۶/۲۷	۷/۵
۰/۲۹	۲۵۰۰/۰۰	۱۰
۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۱۲/۵
۱/۱۶	۲۴۶۹/۱۴	۱۵
۵۰/۳۲	۱۷۵۷/۴۷	۱۷/۵

جدول ۴-۱۶ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۳

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۸۷/۵۶	۰
-۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۳
-۰/۲۹	۲۴۹۳/۷۷	۵
۰/۵۸	۲۴۸۱/۳۹	۷/۵
۰/۲۹	۲۴۷۵/۲۵	۱۰
۰/۲۹	۲۴۶۹/۱۴	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۶۳/۰۵	۱۵
۱۱۹/۹۰	۱۳۰۷/۱۹	۱۷/۵

جدول ۴-۱۷ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۴

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۴۶۹/۱۴	۰
-۰/۵۷	۲۴۸۱/۳۹	۳
-۰/۵۷	۲۴۸۱/۳۹	۵
۰/۲۹	۲۴۷۵/۲۵	۷/۵
۰/۲۹	۲۴۷۵/۲۵	۱۰
۰/۵۸	۲۴۶۳/۰۵	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۴۵۷/۰۰	۱۵
۲/۲۹	۲۴۰۹/۶۴	۱۷/۵
۵۲/۲۳	۱۷۰۰/۶۸	۱۹

جدول ۴-۱۸ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه شماره ۱۵

L_{ai} (mm)	UPV (m/s)	تنش (Mpa)
---	۲۵۴۴/۵۳	۰
-۰/۲۹	۲۵۵۱/۰۲	۳
-۰/۲۹	۲۵۵۱/۰۲	۵
۰/۲۹	۲۵۴۴/۵۳	۷/۵
۰/۲۹	۲۵۳۸/۰۷	۱۰
۰/۲۹	۲۵۳۱/۶۵	۱۲/۵
۰/۲۹	۲۵۲۵/۲۵	۱۵
۰/۲۹	۲۵۱۸/۸۹	۱۷/۵

بدیهی است از دیدگاه تئوری، علامت منفی برخی از L_{ai} ها که در جدول‌های بالا دیده می‌شود به معنی کاهش مجموع طول بازشدگی ریزترک‌ها است.

جدول ۴-۱۹ اثر بارگذاری بر توسعه ترک در نمونه‌های مختلف

شماره نمونه	V_0	V_{final}	L_{af} (mm)
۱	۲۶۰۴/۲۰	۱۷۵۱/۳۱	۶۰/۵۷
۲	۲۴۳۴/۲۸	۲۲۴۲/۱۵	۱/۰۰
۳	۲۵۷۰/۶۹	۲۴۵۷/۰۰	۵/۳۸
۴	۲۵۳۸/۰۷	۲۴۲۱/۳۱	۵/۶۲
۵	۲۵۲۵/۲۵	۱۳۴۵/۸۹	۱۱/۶۲
۶	۲۵۰۰/۰۰	۱۷۵۱/۳۱	۵۳/۱۷
۷	۲۴۸۱/۳۹	۲۳۵۲/۹۴	۶/۴۰
۸	۲۴۸۷/۵۶	۲۳۵۲/۹۴	۶/۷۰
۹	۲۴۵۷/۰۰	۲۴۲۱/۳۱	۱/۷۲
۱۰	۲۴۸۷/۵۶	۲۴۲۱/۳۱	۳/۱۹
۱۱	۲۴۹۳/۷۷	۱۵۷۲/۳۳	۷۴/۹۷
۱۲	۲۴۹۳/۷۷	۱۷۵۷/۴۷	۵۲/۰۶
۱۳	۲۴۸۷/۵۶	۱۳۰۷/۱۹	۱۲/۴۵
۱۴	۲۴۶۹/۱۴	۱۷۰۰/۶۸	۵۶/۶۱
۱۵	۲۵۴۴/۵۳	۲۵۱۸/۸۹	۱/۱۸

۴-۳-۷ ارایه رابطه تجربی بین سرعت پالس فراصوت و سطح تنش

در بخش ۴-۳-۳ به تفصیل توضیح داده شد تغییر در سطح تنش، سرعت موج فشاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. چگونگی تغییر سرعت پالس فراصوت با افزایش تنش در این نمونه‌ها با یک رابطه ریاضی بیان می‌شود. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش سرعت پالس فراصوت، در هر گام آزمایش یا تراز تنشی که سرعت در آن اندازه‌گیری شده است، ۱۵ مقدار مختلف ولی به طور کلی نزدیک به هم برای سرعت به دست آمده است. در جدول ۴-۲۰ بررسی آماری تغییرات سرعت پالس فراصوت در نمونه‌ها و سطوح تنش مختلف ارایه شده است.

جدول ۴-۲۰ بررسی آماری تغییرات سرعت پالس فراصوت در نمونه‌ها و سطوح تنش مختلف

UPV (m/s)				
سطح تنش (MPa)	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
۰	۲۶۰۴/۱۷	۲۴۳۳/۰۹	۲۵۰۴/۹۰	۴۲/۹۹
۳/۰	۲۶۰۴/۱۷	۲۴۳۳/۰۹	۲۵۰۸/۷۰	۴۳/۸۷
۵/۰	۲۵۹۷/۴۰	۲۴۵۰/۹۸	۲۵۱۳/۶۱	۳۹/۸۸
۷/۵	۲۶۰۴/۱۷	۲۴۴۴/۹۹	۲۵۰۹/۹۲	۴۲/۶۹
۱۰/۰	۲۶۰۴/۱۷	۲۴۴۲/۰۰	۲۵۰۲/۱۸	۴۲/۶۴
۱۲/۵	۲۵۹۰/۶۷	۲۴۱۵/۴۶	۲۴۹۳/۲۹	۴۴/۰۶
۱۵/۰	۲۵۹۰/۶۷	۱۳۴۵/۹۰	۲۴۰۶/۱۵	۲۸۷/۱۶
۱۷/۵	۲۵۷۷/۳۲	۱۳۰۷/۱۹	۲۳۰۷/۷۶	۳۳۶/۷۷
۱۸/۵	۲۳۵۲/۹۴	۱۸۱/۰۶	۱۲۶۷/۰۰	۱۰۸۵/۹۴
۱۹/۰	۱۷۰۰/۶۸	۲۶۴/۵۵	۸۳۷/۶۳	۵۴۹/۷۸
۲۰/۰	۲۵۱۸/۸۹	۷۴۲/۹۴	۱۹۸۹/۴۰	۶۸۵/۷۰
۲۰/۵	۱۷۵۱/۳۱	۱۷۵۱/۳۱	۱۷۵۱/۳۱	۰/۰۰
۲۱/۵	۴۹۹/۲۵	۴۹۹/۲۵	۴۹۹/۲۵	۰/۰۰
۲۲/۵	۲۴۲۱/۳۱	۲۴۲۱/۳۱	۲۴۲۱/۳۱	۰/۰۰

ترازهای ۱۸/۵، ۱۹ و ۲۱/۵ اگرچه جزو گام‌های تعیین شده برای آزمایش سرعت پالس فراصوت نبوده‌اند ولی به دلیل گسیخته شدن برخی نمونه‌ها در این سطوح تنش، نتایج آزمایش مربوط به آن‌ها در جدول بالا ذکر شده است. از آن‌جا که در ترازهای ۲۱/۵ و ۲۲/۵ فقط یک داده وجود دارد (تنها یک نمونه در این ترازها گسیخته شده است) مقادیر جدول ۴-۲۰ در این سطوح تنش ثابت است.

شکل ۴-۳۸ پلات مقادیر مختلف سرعت در هر تراز تنش برای ۱۵ نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود پراکندگی نتایج آزمایش فراصوت اندک است و به‌طور کلی در نمونه‌های مختلف سرعت‌های به دست آمده در هر تراز تنش به هم نزدیک هستند.

با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی^۱ نرم‌افزار MATLAB، بر روی نقاط میانگین سرعت‌های پالس فراصوت در هر سطح تنش یک منحنی چندجمله‌ای درجه دو با حاشیه اطمینان ۹۵ درصد و ضریب همبستگی $R^2 = ۰/۹۴$ برازش شده است. معادله منحنی برازش شده به صورت رابطه ۴-۷ است:

^۱ Curve Fitting Toolbox

$$V = -1/4\sigma^2 + 15/22\sigma + 2488 \quad (7-4)$$

در این رابطه V_p سرعت پالس فراصوت و σ سطح تنش وارد شده است. با توجه به شکل کلی یک چند جمله‌ای درجه دو ($y = Ax^2 + Bx + C$) بازه تغییرات ضرایب رابطه ۴-۷ در حاشیه اطمینان ۹۵ درصد در جدول ۴-۲۱ ارایه شده است:

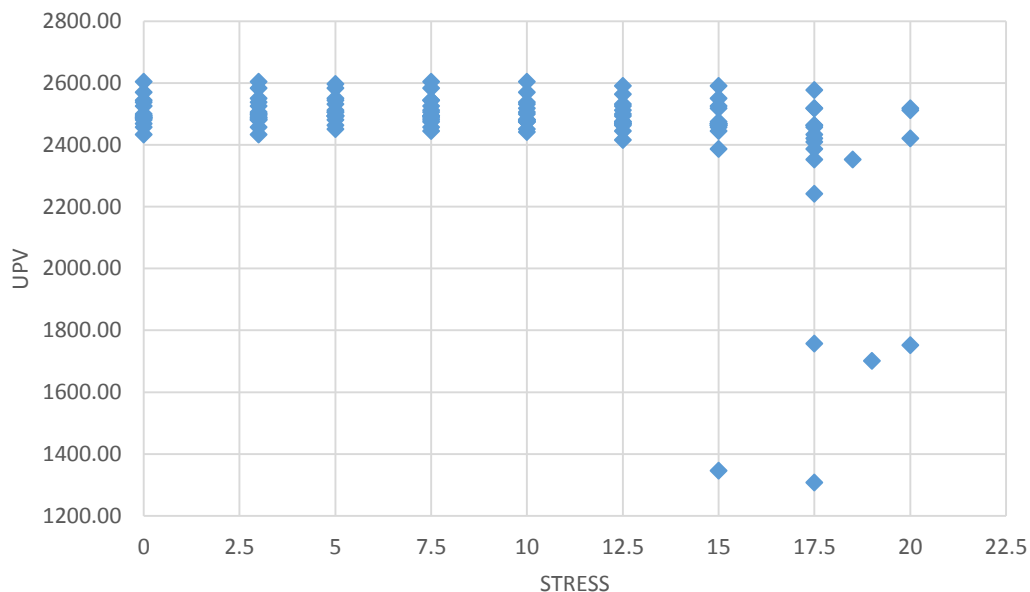
جدول ۴-۲۱ بازه ضرایب معادله برازش شده به منحنی سرعت - تنش با حاشیه اطمینان ۹۵٪

بیشینه	کمینه	ضریب
-۰/۷۱	-۲/۰۹	A
۲۷/۸۹	۲/۵۷	B
۲۵۳۶	۲۴۴۰	C

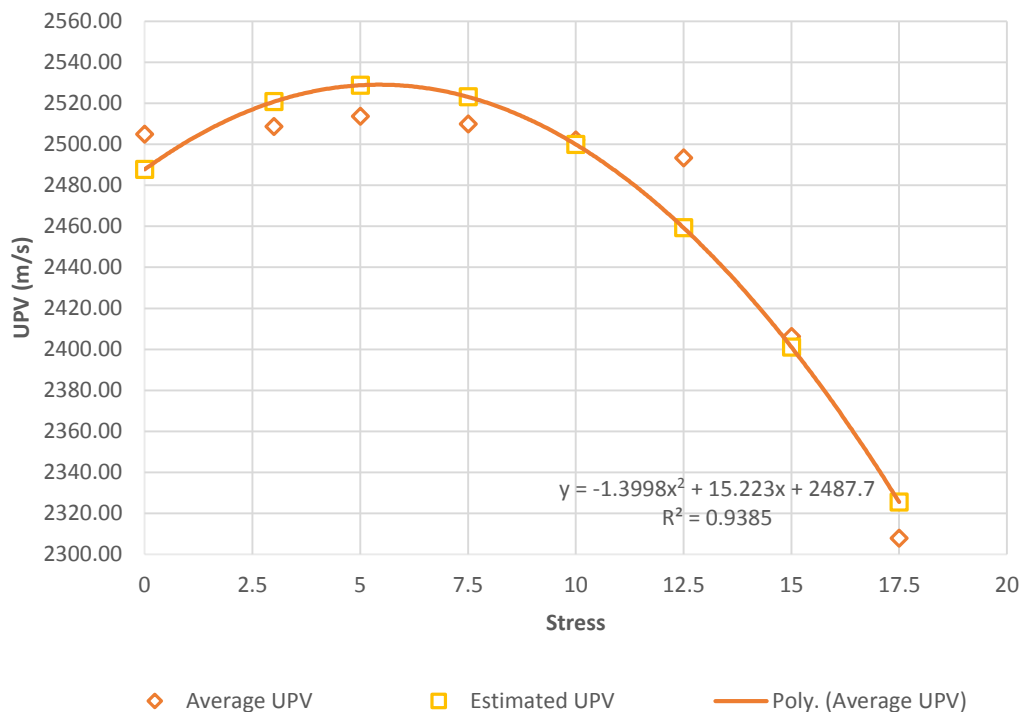
گفتنی است از آن جا که نتایج آزمون فراصوت تمامی نمونه‌ها تا تراز تنش ۱۷/۵ مگاپاسکال کامل است، برای برازش منحنی از نتایج آزمون تا این سطح تنش استفاده شده است و از نتایج مربوط به سطوح بالاتر صرف نظر شده است.

در شکل ۴-۳۹ مقادیر میانگین سرعت پالس فراصوت تمام نمونه‌ها در سطوح مختلف تنش، منحنی برازش شده به این نقاط با استفاده از نرم‌افزار Excel و مقادیر UPV محاسبه شده از رابطه برازش شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضرایب معادله منحنی برازش شده با این نرم‌افزار به ضرایب به دست آمده از نرم‌افزار MATLAB بسیار نزدیک است.

UPV - STRESS



شکل ۴-۳۸ مقادیر مختلف سرعت در ترازهای تنش متفاوت



شکل ۴-۳۹ منحنی برازش شده به مقادیر میانگین سرعت پالس فراصوت تا تراز تنش ۱۷/۵ مگاپاسکال

۴-۴ جمع‌بندی

در این فصل داده‌های اولیه به دست آمده از آزمایش فراصوت و مقاومت فشاری تک‌محوره پس از پردازش در قالب نمودار و جدول ارائه شده است و در بخش‌هایی شامل نمودار تنش - کرنش، رابطه بین سرعت امواج فراصوت و سطح تنش؛ رابطه بین سرعت امواج فراصوت و کرنش محوری و جانبی؛ استفاده از سرعت امواج فراصوت در بررسی توسعه ترک تحت بارگذاری و در نهایت ارائه رابطه بین تغییرات سرعت پالس فراصوت و سطح تنش؛ تحلیل و تفسیر شده است.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهاد

۵-۱ نتیجه گیری

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های تعریف شده در این تحقیق، مکعب‌هایی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مکعب از جنس گچ - سیمان با نسبت آب به سیمان $0/5$ بوده‌اند. به منظور همگن شدن نمونه‌ها، گچ سپیدار سمنان با الک مش 200 سرند شده است. نمونه‌های مکعبی پس از به دست آمدن نسبت اختلاط مناسب بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (قطر N_x) با نسبت‌های اختلاط متفاوت، با استفاده از قالب‌های چدنی که سطح داخلی آن با لایه نازکی از گریس چرب شده، ساخته شده‌اند.

برای انجام آزمایش تعیین سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش مختلف، محل دقیق قرارگیری کرنش‌سنج‌ها و تراگذارهای فراصوت روی نمونه تعیین شده و پس از تسطیح محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها با چسب صیقل دهنده، کرنش‌سنج‌ها روی خطوط مشخص شده چسبانده شده‌اند. سپس دو سر کرنش‌سنج با واسطه پایانه به مدار واسط ثابت داده لحیم، انتهای سیم مدار واسط‌ها به دو کانال دستگاه ثابت داده متصل و کالیبره شده‌اند. دستگاه ثابت داده‌های قرائت شده را به یک رایانه منتقل و توسط نرم‌افزار ثبت می‌کند. در این آزمایش‌ها نمونه در شرایط تنش آزاد و سپس در ترازهای مختلف تنش با گام‌های ثابت و از پیش تعیین شده تحت بارگذاری قرار گرفته تا گسیخته شود. در هر تراز تنش، زمان عبور موج از نمونه با استفاده از تراگذارهای 55 کیلوهرتزی در مد پیوسته و کرنش جانبی و محوری به وجود آمده در آن با استفاده از کرنش‌سنج‌های نصب شده به صورت متعامد بر روی نمونه اندازه‌گیری و ثبت شده است.

اندازه‌گیری سرعت امواج در راستای عمود بر محور بارگذاری انجام شده و برای ایجاد ارتباط موثرتر بین سطح نمونه و تراگذارهای ارسال و دریافت پالس و کاهش خطای ناشی از انتشار موج در فصل مشترک هوا و نمونه، نمونه‌ها به صورت مکعبی ساخته شده است. برای انتقال بهتر موج و کاهش ضریب بازتاب، از ژل فراصوت به عنوان عامل جفت‌کننده بین تراگذار و نمونه استفاده شده است. همچنین برای تابش

موج با زاویه ۹۰ درجه تراگذارهای عمودی انتخاب شده‌اند.

با داشتن زمان عبور موج از نمونه و فاصله بین تراگذارهای ارسال و دریافت پالس، سرعت موج عبوری و اطلاعات ثبت شده از کرنش سنج‌ها، کرنش محوری، جانبی و نسبت پواسون نمونه‌ها تعیین شده است. سپس با داشتن منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها و همچنین سرعت عبور امواج فراصوت، رابطه‌ای منطقی بین این دو منحنی مشخصه ارائه شده است.

در مجموع ۲۲ نمونه مکعبی ساخته شد که از این تعداد ۱۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج کلی به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی این نمونه‌ها را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- منحنی تنش - کرنش با استفاده از اطلاعات کرنش به دست آمده از کرنش‌سنج‌هایی که به صورت متعامد روی نمونه‌ها نصب شده‌اند رسم شده است.
- از آن‌جا که آزمایش‌ها تحت فشار تک‌محوری انجام شده‌اند و تنش جانبی بر نمونه‌ها اعمال نشده است، کرنش‌های جانبی برابر در نظر گرفته شده‌اند و منحنی کرنش حجمی به صورت مجموع کرنش محوری و دو برابر کرنش جانبی رسم شده است.
- منحنی تنش - کرنش جانبی نمونه‌ها نیز با استفاده از اطلاعات به دست آمده از کرنش‌سنجی که در راستای عمود بر محور بارگذاری رو نمونه‌ها نصب شده ترسیم شده است.
- به طور تقریبی در ۵۰ تا ۶۰ درصد مقاومت نهایی، منحنی کرنش حجمی از حالت مستقیم خارج و به سمت کرنش‌های کم‌تر منحرف می‌شود. این امر نشان دهنده افزایش حجم سنگ تحت بارهای فشاری است که در مراحل آخر بارگذاری و نزدیک به شکست سنگ، افزایش مزبور قابل توجه بوده و به سمت چپ یعنی قسمت منفی محور کرنش کشیده می‌شود.
- برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم (آزمایش برزیلی)، از نمونه‌های مکعبی، نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۰/۵ و قطر ۵۲ میلی‌متر تهیه شده است. در این آزمایش‌ها مقاومت کششی نمونه برابر با ۱/۴۲ مگاپاسکال به دست آمده

است.

- نتایج به دست آمده از آزمایش تعیین سرعت پالس فراصوت نشان‌دهنده وجود یک رابطه خطی بین سرعت پالس فراصوت و چگالی نمونه‌ها است. رابطه $V = - ۸۴۹۵/۳ + ۸۶۷۵/۲ \rho$ با ضریب همبستگی $R^2 = ۰/۸۶$ بین این دو عامل برقرار است.
- اولین مرحله آزمایش سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش مختلف، در حالت بدون تنش یعنی زمانی که هیچ‌گونه باری به نمونه اعمال نمی‌شود انجام شده است. در این شرایط سرعت پالس فراصوت در نمونه‌های مختلف بین ۲۴۳۳ تا ۲۶۰۴ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. به عبارتی دامنه تغییر سرعت در شرایط تنش آزاد ۱۷۰ متر بر ثانیه (معادل ۷ درصد کم‌ترین سرعت فراصوت ثبت شده در حالت بدون بار) است.
- اختلاف سرعت پالس فراصوت در حالت بدون بار در نمونه‌های مختلف را می‌توان به متفاوت بودن شرایط داخلی نمونه‌ها از نظر اندازه و شدت ریزترک‌ها به ویژه چگالی آن‌ها در راستای اندازه‌گیری سرعت مرتبط دانست. اگرچه که نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی یکسان و اعمال و پیره به منظور به حداقل رساندن خلل و فرج و حباب‌های هوای درون نمونه‌ها، تهیه شده‌اند؛ اما با این حال نمی‌توان انتظار داشت که نمونه‌ها از نظر تخلخل، ریزترک‌ها و سایر شرایط داخلی کاملاً مشابه باشند و در هر صورت وجود اختلاف و ناهمسانی (هرچند کم) بین نمونه‌های دست‌ساز نیز طبیعی است.
- منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت با افزایش تنش، نشان می‌دهد که در تنش‌های پایین، (حدوداً ۳۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری نمونه) سرعت پالس فراصوت افزایش می‌یابد. این تنش مرزی با توجه به نمودار تنش - کرنش، در محدوده بخش اول منحنی کرنش محوری و مرحله اول کرنش حجمی که ریزترک‌ها بسته شده و نمونه به یک محیط همگن و تقریباً بدون تخلخل تبدیل می‌شود، قرار دارد.
- با افزایش تنش، منحنی سرعت به تدریج با شیب ملایمی شروع به کاهش می‌کند. این بخش

از منحنی تغییرات سرعت فراصوت، متناظر با مرحله دوم در منحنی کرنش حجمی است و در منحنی کرنش محوری در محدوده بخش دوم قرار می‌گیرد.

- با رسیدن تنش اعمال شده به تنشی که در آن پدیده اتساع رخ می‌دهد، سرعت پالس فراصوت با شیب زیادی کم می‌شود تا زمانی که تنش وارده به حداکثر مقاومت نهایی نمونه برسد، نمونه گسیخته شده و آخرین پالس فراصوت از نمونه عبور کند.

- در کرنش‌های محوری متناظر با مرحله اول کرنش حجمی با کم شدن مسیر عبور موج فشاری، عبور موج از محیطی با مقاومت صوتی ثابت و عدم افت سرعت ناشی از گذر موج از مسیرهای هوا؛ سرعت پالس فراصوت افزایش می‌یابد.

- در کرنش‌های محوری بزرگ‌تر که در مرحله دوم منحنی تنش - کرنش محوری و کرنش حجمی قرار می‌گیرد، سرعت پالس فراصوت با شیب ملایمی کم می‌شود.

- با ادامه روند بارگذاری و افزایش کرنش محوری، سرعت پالس فراصوت با شیب زیادی کم می‌شود تا جایی که انتهاهای ترک‌های نمونه به سطوح آزاد برسد و با ایجاد صفحه شکست، نمونه از هم گسیخته شده و بشکند. این تغییرات در مرحله سوم کرنش حجمی رخ می‌دهند.

- روند تغییرات سرعت در منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت در مقابل کرنش جانبی هم همانند منحنی سرعت در سطوح تنش مختلف و منحنی سرعت پالس فراصوت - کرنش محوری است. به طوری که سرعت ابتدا افزایش یافته، سپس با شیب ملایمی کم می‌شود و بعد از آن با شیب زیادی کاهش می‌یابد تا به کرنش جانبی لحظه شکست برسد و نمونه بشکند.

- مقایسه منحنی تغییرات سرعت پالس فراصوت در مقابل کرنش محوری، جانبی و در سطوح تنش مختلف نشان می‌دهد که اطلاعات حاصل از این نمودارها همسو هستند و یکدیگر را تایید می‌کنند.

- برای به دست آوردن اثر بارگذاری بر گسترش ترک و تغییرات پوکی نمونه ناشی از رشد و گسترش ریزترک‌ها با استفاده از سرعت عبور موج فشاری در بارهای مختلف، تغییرات مجموع

طول بازشدگی ریزترک‌ها (L_a) در گام‌های مختلف اعمال تنش و در حالت بدون بار با زمان شکست محاسبه شده‌اند.

- با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش سرعت پالس فراصوت، در هر گام آزمایش یا تراز تنشی که سرعت در آن اندازه‌گیری شده، ۱۵ مقدار مختلف ولی به طور کلی نزدیک به هم برای سرعت به دست آمده است. بر روی این نقاط یک منحنی دو جمله‌ای درجه دو با ضریب همبستگی $R^2 = 0.94$ و با رابطه $V = -1/4\sigma^2 + 15/22\sigma + 2488$ برازش شده است.

۵-۲ پیشنهادها

- بر اساس مطالعات انجام شده و نتایجی که از این پایان‌نامه به دست آمده است، موارد زیر جهت بهره‌گیری کمی و کیفی بیشتر از نتایج تغییرات سرعت پالس فراصوت در سطوح تنش متفاوت، پیشنهاد می‌شود:
- برای اندازه‌گیری سرعت موج در نمونه‌های سنگی که هنگام شکست پرتاب سنگ ندارند، تراگذارهای ارسال و دریافت پالس با استفاده از تسمه‌های پلاستیکی در تمام مدت آزمایش در تماس با سطح نمونه قرار داشته باشند.
 - در صورتی که امکان ارتباط دایم تراگذارها با سطح نمونه فراهم نیست برای بررسی بهتر ارتباط تغییرات سرعت با سطح تنش و افزایش داده‌های برداشت شده، می‌توان تعداد گام‌های آزمایش را افزایش داد. یعنی در فواصل کمتری زمان عبور موج از نمونه را اندازه گرفت.
 - برای تعیین دقیق نیروی وارد بر نمونه در هر گام آزمایش و کاهش خطای انسانی در استفاده از دستگاه آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره عقربه‌ای، پیشنهاد می‌شود از لودسل استفاده شود.
 - چنانچه شرایط استفاده از لودسل یا دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره دیجیتال و تماس دایم تراگذارها با سطح نمونه مهیا باشد، پیشنهاد می‌شود لودسل و دستگاه فراصوت هم همانند کرنش‌سنج‌ها به دیتالاگر متصل شوند و با تعیین یک بازه زمانی ثابت برای ثبت اطلاعات خروجی از این ابزارها، برداشت داده در طول آزمایش از لحظه بدون بار تا زمان شکست به

صورت پویا انجام شود.

- این مطالعه به دلیل مزایای استفاده از نمونه مکعبی در برداشت دقیق‌تر اطلاعات صوتی و همچنین مشکلات تهیه نمونه مکعبی از سنگ، بر روی نمونه‌های شبه سنگی انجام شده است، بنابراین پیشنهاد می‌شود برای به دست آوردن نتایج کاربردی در پروژه‌های عمرانی و معدنی از نمونه‌های سنگی و یا مصالح عمرانی مورد استفاده در سازه‌های مختلف استفاده شود.
- به منظور افزایش دامنه کاربرد نتایج حاصل از این مطالعه در شرایط محیطی متفاوت از نظر رطوبت و دما، پیشنهاد می‌شود آزمایش تغییرات سرعت نسبت به سطح تنش روی نمونه‌های سنگی یا مصالح عمرانی، در شرایط مختلف دما و رطوبت هم انجام شود تا نتایج قابل تعمیم شوند.
- از آنجا که چگالی ترک‌های ایجاد شده تحت تنش در تمام نقاط یک سازه مصنوعی یا بستر سنگی یکسان نیست برای بسط و توسعه رابطه بین تغییرات سرعت نسبت به تنش با توجه به چگالی ترک، پیشنهاد می‌شود در مصالح مصنوعی که امکان ساخت نمونه با شرایط گوناگون فراهم است، نمونه‌هایی با چگالی‌های ترک متفاوت تهیه شوند و تحت بارگذاری، سرعت پالس عبوری از آن‌ها در تنش‌های متفاوت اندازه‌گیری شود. در مورد سنگ که امکان ایجاد چگالی ترک متفاوت نیست می‌توان با نرم‌افزارهای عددی و با داشتن اطلاعات پایه سرعت صوت در اسکلت سنگ و مواد پرکننده باز شدگی‌ها (سیال حاوی ترکیب‌های مختلف، آب، هوا،...)، تاثیر چگالی ترک و تنش را به صورت هم‌زمان بر سرعت صوت بررسی کرد.
- با توجه به این که فرکانس امواج فراصوت روی عمق نفوذ و میرایی پرتوها موثر است، پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش کارایی این روش غیرمخرب در عمق‌ها و فواصل گوناگون، آزمایش‌های مشابه با فرکانس‌های متغیر انجام شوند تا رابطه بین سطح تنش و سرعت پالس فراصوت براساس فرکانس پالس به دست آید.
- این مطالعه رابطه تغییرات سرعت نسبت به بار استاتیکی را بررسی می‌کند در صورتی که بار

- وارد شده به یک سازه الزاما استاتیکی نیست و ممکن است برای مثال از نوع خستگی باشد.
- پیشنهاد می‌شود در مطالعات کاربردی، این آزمایش با توجه به نوع بار وارده اصلاح شود.
- به طور کلی برای استفاده کارآمدتر و دقیق‌تر از رابطه بین سرعت پالس فراصوت و سطح تنش پیشنهاد می‌شود جهت بهبود این رابطه شرایط مختلف فیزیکی سنگ یا مصالح مورد نظر از جمله درجه هوازدگی، تخلخل، چگالی، سیال و فشار منفذی نیز مورد توجه قرار گیرد.

فهرست منابع

- 1- Karaman, K., Kaya, A., & 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, 142-149.
- ۲- وفائیان، م.، (۱۳۷۶)، *خواص مهندسی سنگ ها تئوریها و کاربردهای اجرایی*، چاپ اول، نشر ارکان، اصفهان، ۴۲۴ صفحه
- 3- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., & García-del-Cura, M. A. (2011). Spatial attenuation: the most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Engineering Geology*, 119(3), 84-95.
- ۴- ترابی ر.، (۱۳۹۰)، *مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ*، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- 5- Jiang, J., & Sun, J. Z. (2011). Comparative study of static and dynamic parameters of rock for the Xishan Rock Cliff Statue. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 12(10), 771-781.
- 6- Garreton, L. F. G. (2014, November). The use of power ultrasound in mining. In *Elsevier Inc.*
- 7- Holt, R. M., Fjær, E., Raaen, A. M., & Ringstad, C. (1991). Influence of stress state and stress history on acoustic wave propagation in sedimentary rocks. In *Shear Waves in Marine Sediments* (pp. 167-174). Springer Netherlands.
- ۸- پی. رزفسکی، گ. نوویک، ای. کی. شاترجی. (۱۳۷۱). *فیزیک سنگ*، دانش، م.، صنعت فولاد، تهران
- ۹- وفایان، م.، (۱۳۷۱)، *مکانیک سنگ*، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- ۱۰- ناطقی الهی ف.، رستمی ع.، (بهار ۱۳۸۴)، *آزمایشهای غیرمخرب (NDT) و مطالعه مورد از کاربرد آنها در سازه های فولادی*، چاپ اول، ناشر نورپردازان، تهران، ۱۶۰ صفحه
- ۱۱- نویل ا. م.، (۱۳۷۱)، *آزمایش‌های بتن سخت شده، عشقی س.*، چاپ دوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ۸۸ صفحه
- ۱۲- هنرور ف.، (تابستان ۱۳۸۴)، *آزمون فراصوتی*، چاپ اول، ناشر نورپردازان، تهران، ۱۳۶ صفحه
- ۱۳- بری ه.، ورنون ج.، (۱۳۸۹)، *آزمونهای غیرمخرب*، شاکری م.، چاپ ششم، موسسه انتشارات

- 14- Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 53). Elsevier.
- 15- Todd, T., & Simmons, G. (1972). Effect of pore pressure on the velocity of compressional waves in low-porosity rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77(20), 3731-3743.
- 16- Wang, Z., Batzle, M. L., & Nur, A. M. (1990). Effect of different pore fluids on seismic velocities in rocks. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 26(1-2), 104-112.
- 17- Prasad, M., & Meissner, R. (1992). Attenuation mechanisms in sands: Laboratory versus theoretical (Biot) data. *Geophysics*, 57(5), 710-719.
- 18- Plocek, J. (1996). Equipment for ultrasonic investigation in mines. *Ultrasonics*, 34(2), 425-430.
- 19- Gupta, A. S., & Rao, K. S. (1998). Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), 161-172.
- 20- Tuğrul, A., & Zarif, I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51(4), 303-317.
- 21- Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981-994.
- ۲۲- قاسمی، م.، نبی بیدهندی، م. و خزانهداری، ج.، (۱۳۸۴). سرعت انتشار امواج در نمونه‌های سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران. *فصلنامه علوم زمین*، شماره ۵۶، صفحه ۱۳۴-۱۴۵.
- 23- Kahraman, S. (2007). The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics*, 46(4), 341-348.
- 24- Evans, B., Keshavarz Faraj Khah, N., & Nakatsuka, Y. (2008). Effect of pore geometry and dissolved CO₂ on ultrasonic transmission during pore pressure changes. *Geophysics*, 73(6), 181-185.

- 25- Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Alves, C. A. S., & Pamplona, J. (2008). Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48(5), 453-466.
- 26- Lassila, I., Karlqvist, R., Elbra, T., Gates, F. K., Pesonen, L. J., & Hægström, E. (2010). Ultrasonic velocity of the upper gneiss series rocks from the Outokumpu deep drill hole, Fennoscandian shield—Comparing uniaxial to triaxial loading. *Journal of Applied Geophysics*, 72(3), 178-183.
- 27- Yam, H., & Schmitt, D. R. (2011). CO2 rock physics: A laboratory study. *Canadian Well Logging Society InSite Magazine*, 30(1).
- 28- Nefeslioglu, H. A. (2013). Evaluation of geo-mechanical properties of very weak and weak rock materials by using non-destructive techniques: Ultrasonic pulse velocity measurements and reflectance spectroscopy. *Engineering Geology*, 160, 8-20.
- 29- Khandelwal, M. (2013). Correlating P-wave velocity with the physico-mechanical properties of different rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 170(4), 507-514.
- 30- Ercikdi, B., Yılmaz, T., & Külekci, G. (2014). Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. *Ultrasonics*, 54 (1), 195-204.
- 31- Vasanelli, E., Colangiuli, D., Calia, A., Sileo, M., & Aiello, M. A. (2015). Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonics*, 60, 33-40.
- ۳۲- مهاجرانی، س.، و جلالی، س. م. ا. (۱۳۹۴). بررسی اثر عوامل دستگاهی و مشخصات هندسی نمونه بر سرعت موج فشاری در نمونه‌های سنگی تراورتن، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۹، شماره ۴، صفحه ۱۲۶-۱۴۲
- 33- Özkan, İ., & Yayla, Z. (2016). Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples. *Ultrasonics*, 66, 4-10.
- 34- Eberhart-Phillips, D., Han, D. H., & Zoback, M. D. (1989). Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. *Geophysics*, 54(1), 82-89.
- 35- Wang, Q., Ji, S., Salisbury, M. H., Xia, B., Pan, M., & Xu, Z. (2005). Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic

- rocks from the Dabie–Sulu orogenic belt (China): implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections. *Tectonophysics*, 398(1), 67-99.
- 36- Wepfer, W. W., & Christensen, N. I. (1991, September). A seismic velocity-confining pressure relation, with applications. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 28, No. 5, pp. 451-456). Pergamon.
- 37- Anselmetti, F. S., & Eberli, G. P. (1993). Controls on sonic velocity in carbonates. *Pure and Applied Geophysics*, 141(2-4), 287-323.
- 38- Proskuryakov, N. M., Livenskii, V. S., & Kuznetsov, H. F. (1975). Study of the velocity of propagation of elastic waves in relation to stress in salt rocks under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*, 11(1), 68-69.
- 39- Meglis, I. L., Chow, T., Martin, C. D., & Young, R. P. (2005). Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(1), 25-34.
- 40- Sarout, J., Molez, L., Guéguen, Y., & Hoteit, N. (2007). Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: Experimental and theoretical investigations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(8), 896-906.
- 41- Niu, F., Silver, P. G., Daley, T. M., Cheng, X., & Majer, E. L. (2008). Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site. *Nature*, 454(7201), 204-208.
- 42- Sengun, N., Altindag, R., Demirdag, S., & Yavuz, H. (2011). P-wave velocity and Schmidt rebound hardness value of rocks under uniaxial compressional loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4), 693-696.
- 43- Eslami, J., Hoxha, D., & Grgic, D. (2012). Estimation of the damage of a porous limestone using continuous wave velocity measurements during uniaxial creep tests. *Mechanics of Materials*, 49, 51-65.
- 44- Chen, X., & Xu, Z. (2016). The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-9.
- 45- Hakala, M., Kuula, H., & Hudson, J. A. (2007). Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: a case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), 14-46.

46- Pappalardo, G. (2015). Correlation between P-wave velocity and physical–mechanical properties of intensely jointed dolostones, Peloritani mounts, NE Sicily. *Rock Mech Rock Eng*, 48, 1711-1721.

۴۷- آیت الهی، م. ر.، میرسیار، م. م.، (۱۳۸۹)، استفاده از روش نوری فوتوالاستیسیته در تحلیل تنش ناچها و ترکهای ساخته شده از دو ماده مختلف، سومین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، صفحه ۱۳۷-۱۴۰، کرمان.

۴۸- تویسرکانی، ح.، (۱۳۹۴)، بررسیهای غیرمخرب، چاپ چهارم، انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان، اصفهان، ۲۹۴ صفحه.

Abstract

Physical and mechanical properties of construction materials is a fundamental issue that affects all phases of a civil or mining project such as designing, building, stability analysis, maintenance and failure prediction. Exact information of physical and mechanical properties of rock is a vital practice. In situ physical and mechanical properties defining has difficulties such as costly and long experiments and difficult coring. Consequently, evaluating rock properties with non-destructive methods have been increasingly demanded. One of the most important non-destructive methods is UPV which is used for rocks in experimental and field conditions. Many researchers have been used this method as a fast and economical tool for estimating elastic and mechanical properties of rock and presenting empirical relations between UPV and physicomaterial properties of different rock types. Stress state is another important factor that should have been specified during different phases of civil or mining projects. Experimental tests on rock samples approved UPV method efficiency for determining stress state. Ultrasonic pulse velocity is affected by the current and past stress which was tolerated by the rock. So defining a logical relation between stress state and ultrasonic pulse velocity makes it possible to obtain useful information about conditions of structural stability, failure prediction and destruction prevention. A relationship between ultrasonic pulse velocity and stress state is presented in this study. To achieve this aim, the ultrasonic pulse velocity test in different stress levels was defined on gypsum and cement cubic samples. Optimal mixing ratio achieved by uniaxial compressive strength test on standard cylindrical samples (diameter N_x) with different mixing ratios. So, 22 cubic samples were made with dimensions of $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ and 0.5 of water to cement ratio. To determine the variation of axial and lateral strain, surfaces were smooth with adhesive polishing. Two 60 mm strain gauges were glued on the sample with the direction of parallel and perpendicular to the axis of loading. The specimen was loaded under release and different stress conditions with predetermined fixed intervals to failure. In each stress level, wave transit time were measured using 55 kHz vertical probes in continuous mode and perpendicular to the loading axis, lateral and axial strain was recorded using strain gauges installed orthogonal on the sample. Finally, the logical relationship between these two characteristic information are presented based on the stress-strain curve of samples as well as the ultrasonic pulse velocity in them.

Keywords: Non-destructive methods, ultrasonic pulse velocity, stress states, geomechanical properties.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Rock Mechanics of Mining Engineering

**Developing an Empirical relation to Predict Acoustic Pulse
Velocity in Rocks under Variable Stress States**

By: Marzie Sadat Dashti Khavidaki

Supervisor:

Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali

Advisor:

Nader Ziari

September 2016