

پژوهشنامه علوم دفاعی، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

ص ص ۱ تا ۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲

کاربرد امواج آکوستیک در شناسایی مکان میادین مین (ضد تانک-ضدنفر)

امیررضا لطف الهی^۱، سید عیسی کرانیان^۲

چکیده

انتقال امواج آکوستیکی در زمین از لحاظ پیش‌بینی زلزله، یافتن اجسام و میادین مین در زیر زمین و نیز ایجاد ارتباط و انتقال انرژی برای کاربردهای ویژه و نظامی بسیار حائز اهمیت است. کارهایی که تاکنون در این زمینه صورت پذیرفته در حدود سیسموگرافی و برای امواج مربوط به زلزله می باشد که معمولاً قلمرو امواج زیر 100 Hz را پوشش می‌دهند. برای این گونه کاربردهای نظامی آگاهی از افت و میرایی امواج منتشره ضروری می‌باشد. کلیه مواد موجود در زمین دارای تخلخل می‌باشند و به همین دلیل سنگ که نمونه‌ای از همین مواد است برای انجام آزمون‌ها انتخاب شد. در این مقاله آزمون‌هایی بر روی سنگ‌های دارای تخلخل انجام پذیرفته است و نتایج حاصل از آن با تئوری بیوت مقایسه شده است. از این بررسی تطابق قابل قبولی بین نتایج تئوری و نتایج آزمون حاصل شده است. نتایج حاصل از تحلیل تئوری شامل یک موج برشی و دو موج طولی می‌باشد، که به موج طولی با سرعت انتشار بالاتر موج نوع اول و به موج طولی دیگر با سرعت انتشار کوچکتر موج نوع دوم اتلاق می‌شود. در این مقاله فقط موج نوع اول بررسی شده است. موج نوع اول در حالتی است که ذرات مادی و مایع باهم حرکت می‌کنند و دیگری در حالتی است که فاز جامد و فاز مایع در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند که در شناسایی اجسام در مواد متخلخل استفاده می‌شود. موج نوع دوم به دلیل اصطکاک زیاد بین ذرات مادی و مایع درون منافذ (حرکت نسبی آب و ذرات مادی) به شدت دمپ و میرا می‌گردد. سرعت موج نوع دوم در کلیه محیط‌های متخلخل کمتر از سرعت صوت در سیال درون منافذ آن می‌باشد که تأثیری در شناسایی اجسام نخواهد داشت.

واژگان کلیدی: روش نسبت طیفی، مواد متخلخل، تئوری بایوت، امواج اولتراسونیک، افت، فاکتور کیفیت.

۱. (*نویسنده مسئول): کارشناسی ارشد فیزیک اتمی - مولکولی، مدرس دانشگاه افسری امام علی(ع)، تهران، ایران.

ایمیل: Amirreza.lotfollahi54@gmail.com

۲. استادیار و عضو هیات علمی گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه دانشگاه افسری امام علی(ع)، تهران، ایران.

مقدمه

در این مقاله به بررسی انتشار امواج الاستیک در مواد متخلخل در محدوده فرکانسی 20000 Hz ، بررسی و اندازه گیری افت امواج منتشره پرداخته شده است. نتایج نهایی شامل سرعت امواج طولی و برشی، مقدار ضریب افت و فاکتور کیفیت نمونه ها می باشد. کارهایی که تا کنون در این زمینه صورت پذیرفته در محدوده سیسموگرافی و برای امواج مربوط به زلزله می باشد که معمولاً قلمرو فرکانس امواج زیر 10 Hz را پوشش می دهند (وایت، ۱۹۸۳). برای این گونه کاربردها آگاهی از افت و میرایی امواج منتشره ضروری می باشد. رفتار مواد و بخصوص مواد متخلخل در محدوده اولتراسونیک بسیار متفاوت از رفتار آنها در محدوده فرکانس پایین می باشد، و قابل تعمیم به همدیگر نمی باشد. به همین دلیل منطق و روال انجام آزمایش ها در هر محدوده فرکانسی با دیگری متفاوت است. بررسی انتشار امواج الاستیک در مواد متخلخل از مباحث پرکاربرد و پیچیده می باشد، برای اولین بار شخصی به نام بیوت در سال (۱۹۵۶) توانست تئوری دقیقی را در این باره ارائه کند. این تئوری به بررسی انتشار امواج الاستیک در مواد متخلخل اشباع با مایع می پردازد. رفتار ماده در حالت اشباع با مایع با حالت خشک کاملاً متفاوت می باشد و معمولاً مقدار ضرایب الاستیک با افزایش رطوبت کاهش می یابد. در بخش عملی و تجربی تحقیق حاضر آزمون هایی بر روی سنگ های دارای تخلخل انجام پذیرفته است و نتایج حاصل از آنها با تئوری بیوت مقایسه شده است. برای انجام آزمون بر روی نمونه های آزمایش و برآورد میزان افت و فاکتور کیفیت آنها، از روش نسبت طیفی^۱ استفاده شده است. در این روش امواج آکوستیک دریافتی در نمونه های استوانه ای با یک نمونه مرجع تقریباً بدون افت انرژی ارتعاشی مانند آلومینیوم مقایسه و مقادیر افت و فاکتور کیفیت آنها محاسبه می گردد. همچنین در سری آزمایش های طراحی شده سرعت امواج منتشره در نمونه های آزمون نیز محاسبه شده است. قابل ذکر است که در این تحقیق امواج الاستیک ارسالی در راستای طولی نمونه های آزمایش در محدوده فرکانسی ($0.2 \sim 2\text{ MHz}$) می باشد. نوع امواج ارسالی در راستای طولی نمونه ها، موج طولی P و امواج برشی یا عرضی S_1 و S_2 می باشند. دو موج برشی S_1 و S_2 ، امواج برشی عمود بر هم می باشند که برای بررسی خواص ناهمسانگردی در مواد استفاده می گردند.

کلیه مواد موجود در زمین دارای تخلخل می‌باشند و به همین دلیل سنگ که نمونه‌ای از همین مواد است برای انجام آزمون‌ها انتخاب شده است. در این تحقیق فقط موج نوع اول بررسی شده است. موج نوع اول در حالتی است که ذرات جامد و مایع باهم حرکت می‌کنند و دیگری در حالتی است که فاز جامد و فاز مایع در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند، موج نوع دوم به دلیل اصطکاک زیاد بین ذرات مادی و مایع درون منافذ (حرکت نسبی آب و ذرات مادی) به شدت دمپ و میرا می‌گردد. سرعت موج نوع دوم در کلیه محیط‌های متخلخل کمتر از سرعت صوت در سیال درون منافذ آن می‌باشد. مقدار ضریب افت و سرعت انتشار امواج در نمونه‌های متخلخل علاوه بر جنس و ساختار آن‌ها به شرایط فیزیکی و مقدار رطوبت آنها بستگی دارد. در ادامه مرور مختصری از کارهای معتبر انجام شده در مورد مباحث مطرح شده در این مقاله ارائه شده است.

جامع‌ترین تئوری انتشار امواج الاستیک در محیط‌های متخلخل برای اولین بار توسط م. بیوت (۱۹۵۶) ارائه شد. مقاله اول بیوت مربوط به انتشار امواج الاستیک در محدوده فرکانس پایین می‌باشد و مقاله دوم بیوت روابط و معادلات انتشار امواج الاستیک در محدوده فرکانس بالا را ارائه می‌کند. همچنین او در این مقالات روش محاسبه و برآورد ضریب تصحیح فرکانسی را ارائه نمود.

محققین بسیاری کار آقای بیوت را ادامه دادند که در ادامه معتبرترین تحقیقات انجام شده بیان می‌گردد. جیمز بریمن^۱ (۱۹۸۰) از روابط کامپوزیت‌ها برای برآورد تعدادی از پارامترهای تئوری بیوت استفاده کرد و نتایج مطلوبی را ارائه نمود. پلونا^۲ (۱۹۸۲) یکی از دقیق‌تری آزمایش‌های عملی برای محاسبه سرعت امواج الاستیک و مقدار ضرایب افت امواج طولی و برشی را بر روی نمونه‌های متخلخل انجام داد و با نتایج حاصل از تئوری بیوت مقایسه کرد، نتیجه مقایسه او نشان داد که تئوری بیوت هم در محدوده فرکانس بالا و هم در محدوده فرکانس پایین بسیار دقیق می‌باشد. اوکشویتز^۳ (۱۹۸۴) تئوری بیوت را در قالب ۱۳ پارامتر مجهول بیان کرد و روش محاسبه هر کدام از پارامترها را ارائه نمود، همچنین او در تحقیقات خود مقایسه‌ای بین روابط تحلیلی و روابط تجربی برآورد پارامترهای مجهول تئوری بیوت ارائه کرد.

1. Berryman J.G.

2. Plona T.J.

3. Ogushvitz P.R.

در تئوری بیوت فقط جریان و نوسان مایع درون منافذ در راستای طولی نمونه متخلخل فرض شده است، در سال (۱۹۹۳) دُورکین و نور^۱ با فرض مدل وجود جریان و نوسان عرضی برای مایع درون منافذ نمونه متخلخل تئوری کامل تری به نام تئوری (BISQ^۲) ارائه کردند (دُورکین و نور، ۱۹۹۳). روش نسبت طیفی برای اولین بار توسط توکسوز^۳ (۱۹۷۹) ارائه شد. او و همکارانش افت و فاکتور کیفیت امواج (P,S) را در محدوده فرکانسی (۰/۱ ~ ۱ MHz) بر روی سنگ‌ها در حالت خشک، اشباع و یخ زده بررسی کردند و دریافتند که با افزایش فشار مقدار فاکتور کیفیت افزایش می‌یابد و مقدار ضریب افت، کاهش می‌یابد. همچنین مقدار فاکتور کیفیت در حالت اشباع نسبت به حالت خشک برای هر دو موج ارسالی کاهش می‌یابد. نتیجه مهم دیگری که با بررسی‌های انجام شده صحنه بر روی آن گذاشته شد این بود که ضریب افت به صورت خطی نسبت به فرکانس افزایش می‌یابد. یکی از جامع‌ترین کارهای انجام شده از نظر توضیح روش و روال انجام کار و ارائه جزئیات نتایج، سند فنی ارائه شده توسط هوپت و همکارانش^۴ (۱۹۹۲) می‌باشد، که به طور کامل روش انجام کار، چگونگی محاسبه سرعت امواج و ضرایب افت برای امواج طولی و برشی به همراه نتایج آزمایش‌ها را ارائه نموده‌اند.

پیشینه نظری

برای بدست آوردن معادلات انتشار امواج الاستیک در محیط‌های متخلخل از نظریه لاگرانژین^۵ استفاده شده است. برای بدست آوردن معادلات تعادلی انتشار، نیروهای اتلاف کننده انرژی امواج در نظر گرفته شده است که فرض این حالت کاملاً مطابق با واقعیت و طبیعت مواد می‌باشد. یکی از واقعیات مسأله انتشار امواج در محیط‌های متخلخل تئوری جریان ناروان^۶ سیالات در محیط مورد نظر می‌باشد که در این تحقیق این فرض در نظر گرفته شده است. این فرضیه به مفهوم این است که جریان سیال نسبت به ذرات جامد در میان منافذ محیط از نوع ناروان^۷ و تا حدودی خطی است. فرض دیگر در نظر گرفته شده این است که ماده ایزوتروپ می‌باشد، یعنی در راستای سه جهت مختصاتی در حال تعادل بوده و از نظر دینامیکی در راستاهای مختصاتی کوپل نمی‌باشد. با پذیرش فرضیات بالا، الگوی

-
1. Dvorkin & Nur
 2. Biot Squirt Theory
 3. Toksoz M. N.
 4. Haupt R.W. et al.
 5. Lagrangian viewpoint
 6. Poiseuille flow
 7. Poiseuille type

جریان میکروسکوپی و میدان سرعت مایع درون منافذ توسط مقادیر سرعت‌های میانگین فازهای جامد و مایع به صورت تابعی خطی محاسبه می‌شود.

تکه نمونه مکعبی شکل از مجموعه مواد (مجموعه فاز مایع و جامد) به عنوان المان در نظر گرفته می‌شود. المان اخذ شده از نظر ابعادی نسبت به طول موج امواج منتشره در محیط مورد مطالعه کوچک می‌باشد، و همچنین اندازه منافذ درون المان نسبت به اندازه المان کوچک می‌باشد. مهمترین نتیجه دو فرض در نظر گرفته شده در مورد طول موج و اندازه منافذ این است که الگوی سرعت میکروسکوپی شبیه حالتی می‌باشد که مایع غیر قابل تراکم باشد؛ بنابراین الگوی جریان میکروسکوپی مایع نسبت به فاز جامد فقط بستگی به جهت جریان نسبی دارد و به اندازه و دامنه آن وابستگی ندارد. با فرض ایزوتروپ بودن محیط، انرژی جنبشی (T) محیط متخلخل اشباع در واحد حجم مجموعه فاز جامد - مایع، توسط ۶ مؤلفه جابجایی فازهای جامد و مایع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$2T = \rho_{11} \left(\left(\frac{\partial u_x^s}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y^s}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z^s}{\partial t} \right)^2 \right) + \rho_{12} \left(\frac{\partial u_x^s}{\partial t} \frac{\partial u_x^f}{\partial t} + \frac{\partial u_y^s}{\partial t} \frac{\partial u_y^f}{\partial t} + \frac{\partial u_z^s}{\partial t} \frac{\partial u_z^f}{\partial t} \right) + \rho_{22} \left(\left(\frac{\partial u_x^f}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y^f}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z^f}{\partial t} \right)^2 \right) \quad (1)$$

که $(\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{22})$ ضرایب جرمی^۱ بوده و وابسته به دانسیته فازهای جامد و مایع است که توسط روابط زیر، محاسبه می‌شوند. روابط زیر بیان کننده این حقیقت هستند که جریان نسبی مایع درون منافذ، یکنواخت نمی‌باشد.

$$\rho_{11} + \rho_{12} = (1 - \phi)\rho_s \quad (2)$$

$$\rho_{12} + \rho_{22} = \phi\rho_f \quad (3)$$

ضریب ثابت (ρ_{12}) بیان کننده پارامتر کوپلینگ جرمی^۲ (اثر جرم مجازی^۳ که مربوط به مجموعه جرم واقعی و ظاهری است) بین فاز مایع و جامد می‌باشد که معمولاً دارای علامتی منفی می‌باشد. این ضرایب در بخش بعد به صورت مفصل بررسی خواهند شد. تابع اتلاف کننده (D) هموژن بوده و به فرم تابع درجه دو، که توسط ۶ مؤلفه سرعت بیان می‌شود و تنها وابسته به سرعت نسبی بین ذرات جامد و مایع می‌باشد. در صورتی که اختلاف سرعت ذرات جامد و مایع ناچیز باشد، مقدار این کمیت صفر خواهد شد.

$$2D = b \left(\left(\frac{\partial u_x^s}{\partial t} - \frac{\partial u_x^f}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y^s}{\partial t} - \frac{\partial u_y^f}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z^s}{\partial t} - \frac{\partial u_z^f}{\partial t} \right)^2 \right) \quad (4)$$

1. Mass coefficients
2. Mass coupling parameter
3. Virtual mass effect

که پارامتر (b) برای محیط‌های ایزوتروپیک ضریبی ثابت است، و با توجه به رابطه زیر وابسته به ویسکوزیته مایع^۱ (μ) و ضریب دارسی نفوذپذیری^۲ (یا نشت پذیری) (k) می‌باشد،

$$b = \frac{\mu \phi^2}{k} \quad (5)$$

معادلات لاگرانژ با وجود افت و میرایی در راستای طولی (x) به صورت زیر است،

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial u_x^s / \partial t} \right) + \frac{\partial D}{\partial u_x^s / \partial t} = F_x^s \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial u_x^f / \partial t} \right) + \frac{\partial D}{\partial u_x^f / \partial t} = F_x^f \quad (7)$$

که (F_x^s, F_x^f) به ترتیب برابر نیروی کل اعمالی به فاز جامد در واحد حجم و نیروی کل اعمالی به فاز مایع در واحد حجم می‌باشد. این نیروها به صورت زیر بر حسب گرادیان تنش بیان می‌شوند،

$$F_x^s = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (8)$$

$$F_x^f = \frac{\partial \sigma^f}{\partial x} \quad (9)$$

در نهایت با استفاده از معادلات (۸ و ۹) معادله حرکت در راستای طولی (x) به صورت زیر بیان می‌شود،

$$G \nabla^2 u_x^s + (M + G) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + S \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t^2} (\rho_{11} u_x^s + \rho_{12} u_x^f) + b \frac{\partial}{\partial t} (u_x^s - u_x^f) \quad (10)$$

$$S \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + R \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t^2} (\rho_{12} u_x^s + \rho_{22} u_x^f) - b \frac{\partial}{\partial t} (u_x^s - u_x^f) \quad (11)$$

به همین ترتیب این معادلات در راستای (y, z) نوشته می‌شوند. بیان برداری معادلات (۱۰ و ۱۱) به صورت زیر می‌باشد،

$$G \nabla^2 u^s + (M + G) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + S \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t^2} (\rho_{11} u^s + \rho_{12} u^f) + b \frac{\partial}{\partial t} (u^s - u^f) \quad (12)$$

$$S \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + R \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t^2} (\rho_{12} u^s + \rho_{22} u^f) - b \frac{\partial}{\partial t} (u^s - u^f) \quad (13)$$

از طریق اعمال عملگر دیورژانس به معادلات بالا، معادلات انتشار برای امواج طولی به صورت زیر بیان می‌شوند،

$$\nabla^2 (P \epsilon + S e) = \frac{\partial}{\partial t^2} (\rho_{11} \epsilon + \rho_{12} e) + b \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon - e) \quad (14)$$

$$\nabla^2 (S \epsilon + R e) = \frac{\partial}{\partial t^2} (\rho_{12} \epsilon + \rho_{22} e) - b \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon - e) \quad (15)$$

که $(P = M + 2G)$ می‌باشد. بیان فرم ماتریسی معادلات انتشار امواج طولی به صورت زیر است:

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} P & S \\ S & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ e \end{Bmatrix} = \frac{\partial}{\partial t^2} \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{12} & \rho_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ e \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} +b & -b \\ -b & +b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ e \end{Bmatrix} \quad (16)$$

1. Fluid Viscosity

2. Darcy's coefficient of Permeability

در صورتی که مسأله بدون میرایی و نیروهای اتلاف کننده در نظر گرفته شود، معادلات به صورت زیر کاهش می‌یابد،

$$\nabla^2(P\epsilon + Se) = \frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_{11}\epsilon + \rho_{12}e) \quad (17)$$

$$\nabla^2(S\epsilon + Re) = \frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_{12}\epsilon + \rho_{22}e) \quad (18)$$

از طریق اعمال عملگر کِرل به معادلات انتشار امواج و با توجه به این نکته که کِرل یک کمیت اسکالر صفر می‌باشد، معادلات انتشار برای امواج برشی به صورت زیر ارائه می‌شود،

$$\frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_{11}\psi + \rho_{12}\xi) + b \frac{\partial}{\partial t}(\psi - \xi) = G\nabla^2(\psi) \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_{12}\psi + \rho_{22}\xi) - b \frac{\partial}{\partial t}(\psi - \xi) = 0 \quad (20)$$

بیان فرم ماتریسی معادلات انتشار امواج برشی به صورت زیر است،

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi \\ \xi \end{Bmatrix} = \frac{\partial}{\partial t^2} \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{12} & \rho_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi \\ \xi \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} +b & -b \\ -b & +b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi \\ \xi \end{Bmatrix} \quad (21)$$

و معادلات انتشار امواج برشی بدون میرایی و اتلاف انرژی به صورت زیر بیان می‌گردد،

$$\frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_{11}\psi + \rho_{12}\xi) = G\nabla^2(\psi) \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_{12}\psi + \rho_{22}\xi) = 0 \quad (23)$$

محیط و مواد مورد مطالعه این تحقیق به دلیل داشتن خاصیت ایزوتروپی (همگن)، امواج پیچشی و امواج طولی منتشره در آنها با همدیگر غیر کوپل هستند و معادلات انتشار هرکدام از دیگری جداست.

روش نسبت طیفی

این روش برای اولین بار توسط توکسوز^۱ (۱۹۷۹) ارائه شده است. از این روش برای اندازه‌گیری افت و اتلاف امواج اولتراسونیک در موادی که افت امواج در آنها بالا می‌باشد یا به عبارت دیگر مقدار فاکتور کیفیت^۲ Q در آنها کوچک می‌باشد، استفاده می‌گردد. در این روش نمونه مورد آزمایش با یک نمونه مرجع که ضریب افت آن بسیار کوچک می‌باشد، مقایسه می‌شود. بایستی دو نمونه از نظر ابعادی، هندسی و کیفیت سطوح مثل هم باشند تا صحت مقایسه تضمین گردد. از مزایای این روش مقایسه‌ای این است که بسیاری از عوامل مؤثر در کاهش دقت نتایج آزمایش از قبیل تأثیرات ترانسدیوسر^۳، تأثیرات سطح تماس ترانسدیوسر- نمونه و عدم دقت سیستم و وسایل الکترونیکی

1. Toksoz

2. Quality Factor

3. Transducer

حذف می‌گردد. برای مثال می‌توان به عدم تماس و انطباق کامل بین سطوح ترانسدیوسر و نمونه استوانه‌ای و همچنین عوامل ایجاد نویز اشاره کرد. امواج طولی (یا فشاری با جبهه مسطح) و امواج برشی در محدوده فرکانسی اولتراسونیک به صورت پالس باند-پهن اولتراسونیک در محدوده فرکانسی (۲MHz - ۰/۲) در راستای طولی نمونه فرستاده می‌شود.

اعداد و نتایج بدست آمده از انجام آزمایش در حوزه زمان می‌باشد، به عبارتی گراف‌های حاصله از انجام آزمون تغییرات دامنه را نسبت به زمان ارائه می‌دهد. از آنجایی که استفاده از روش نسبت طیفی نیازمند منحنی تغییرات دامنه نسبت به تغییرات فرکانس می‌باشد، به کمک تبدیل فوریه سریع نتایج خام حاصله از انجام آزمایش‌ها تبدیل به گراف‌های دامنه - فرکانس می‌گردد. پس از داشتن گراف دامنه - فرکانس به کمک روش نسبت طیفی، ضریب افت و فاکتور کیفیت برای نمونه‌های آزمایش محاسبه می‌گردد.

دامنه امواج طولی مسطح برای نمونه مرجع و نمونه مورد آزمایش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_1(f) = N_1(f, z) e^{-\alpha(f)z} e^{i(2\pi ft - k_1 z)} \quad (24)$$

$$A_2(f) = N_2(f, z) e^{-\alpha(f)z} e^{i(2\pi ft - k_2 z)} \quad (25)$$

که A برابر دامنه، f فرکانس، z فاصله در راستای طولی نمونه آزمایش، $(k_i = 2\pi f/v_i)$ عدد موج^۱، v سرعت انتشار موج می‌باشد. $N(f, z)$ فاکتور هندسی^۲ است که تابعی از فرکانس و فاصله طولی می‌باشد، و همچنین $\alpha(f)$ برابر ضریب افت^۳ (میرایی یا استهلاک) است که وابسته به فرکانس می‌باشد. فاکتور هندسی شامل ضرایب پخش و پراکندگی امواج در مواد، تأثیرات انعکاسی و تأثیرات سطوح تماس نمونه‌های آزمایش - ترانسدیوسر و ... می‌باشد. اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به نمونه مرجع و نمونه مورد آزمایش می‌باشد، به عبارتی دیگر در این روش نمونه مورد آزمایش نسبت به یک نمونه مرجع با مقدار ضریب افت برابر صفر سنجیده می‌شود. با توجه به دو رابطه بالا، نسبت دامنه‌ها به صورت زیر است:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{N_1}{N_2} e^{-(\alpha_1 - \alpha_2)z} \quad (26)$$

با اعمال عملگر Ln به طرفین رابطه بالا، رابطه زیر حاصل می‌گردد،

$$Ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - Ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = -(\alpha_1 - \alpha_2)z \quad (27)$$

1. Wave Number
2. Geometrical Factor
3. Attenuation Coefficient

با توجه به بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام شده توسط محققین بین ضریب افت و فرکانس رابطه‌ای خطی برقرار می‌باشد. بنابراین اگر فرض شود که $\alpha(f)$ تابعی خطی نسبت به فرکانس است، در این صورت رابطه زیر وارد معادلات می‌شود،

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (28)$$

که پارامتر (γ) مقدار ثابتی است و برابر مقدار شیب رابطه خطی بیان شده است و طبق رابطه زیر وابسته به پارامتر Q می‌باشد،

$$Q = \frac{\pi}{\gamma v} \quad (29)$$

که پارامتر (Q) فاکتور کیفیت^۱ می‌باشد، و طبق رابطه زیر برابر مقدار اتلاف انرژی در هر سیکل نسبت به مقدار ماکزیمم انرژی کرنشی می‌باشد.

$$\frac{2\pi}{Q} = \frac{-\Delta E}{E} \quad (30)$$

که $(-\Delta E)$ برابر مقدار اتلاف انرژی در هر سیکل می‌باشد. اکنون به کمک رابطه (۲۸)، رابطه نسبت طیفی به صورت زیر بازنویسی می‌شود،

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = (\gamma_2 - \gamma_1)zf \quad (31)$$

که مولفه $\ln(A_1/A_2)$ برابر لگاریتم نسبت دامنه طیفی نمونه مرجع به نمونه مورد آزمایش می‌باشد. مولفه $\ln(N_1/N_2)$ شامل فاکتورهای وابسته به فرکانس و فاصله در نمونه آزمایش از قبیل پراکندگی دسته امواج، انعکاس موج از محل تماس ترانسدیوسر و نمونه، تأثیر چسب یا ماده واسط بین ترانسدیوسر و قطعه مورد آزمایش و ... می‌باشد. مولفه سمت راست رابطه (۳۱) در صورت ثابت بودن دما و فشار آزمایش فقط وابسته به فرکانس است. با توجه به این نکات که پورب دریافت کننده امواج اولتراسونیک در انتهای راستای طولی نمونه قرار دارد و طول نمونه مرجع و نمونه مورد آزمایش یکسان است، می‌توان متغیر Z را به صورت Z_0 ثابت فرض کرد. در این صورت رابطه (۳۱) به صورت رابطه‌ای که تنها متغیر آن فرکانس است، نوشته می‌شود:

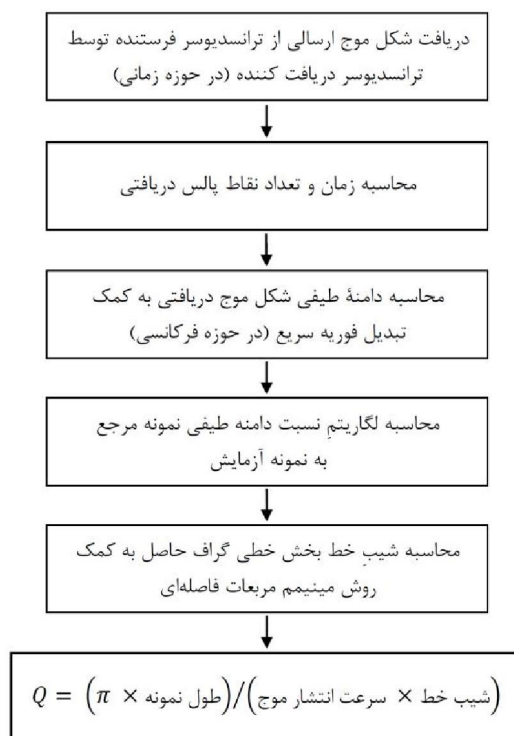
$$F(f) = (\gamma_2 - \gamma_1)Z_0f \quad (32)$$

از آنجایی که برای انجام آزمایش در هر دو نمونه مرجع و نمونه آزمایش از یک سیستم و تجهیزات استفاده شده است، پارامتر فاکتور هندسی N برای هر دو به طور مشابه وابستگی با فرکانس خواهد داشت. در صورت محاسبه و رسم متغیر $F(f)/Z_0$ نسبت به تغییرات فرکانس، مقدار $(\gamma_2 - \gamma_1)$

1. Quality Factor

برابر با شیب خط گراف حاصله خواهد بود. در مرحله پردازش نتایج آزمون‌های انجام شده، برای محاسبه شیب خط، تقریباً خطی گراف حاصله از روش مینیمم مربعات فاصله‌ای^۱ استفاده شده است. هنگامی که مقدار پارامتر فاکتور کیفیت نمونه مرجع مشخص باشد، به کمک روابط بالا مقدار (γ_1) محاسبه می‌شود، و در نهایت مقدار (γ_2) که مربوط به نمونه آزمایش است، بدست خواهد آمد. با توجه به انتخاب آلومینیوم به عنوان نمونه مرجع، مقدار پارامتر فاکتور کیفیت Q برای آلومینیوم در حدود ۱۵۰۰۰۰ می‌باشد در این صورت مقدار $(\gamma_1 \approx 0)$ خواهد بود. و در نهایت مقدار شیب خط حاصله برابر (γ_2) خواهد بود [۱۱].

برای درک بهتر از روال انجام روش نسبت طیفی بر روی نتایج خام بدست آمده از انجام آزمایش، فلوچارت زیر ارائه شده است [۲۱].



شکل (۱): فلوچارت روش نسبت طیفی (ژنگ^۲، ۲۰۰۷)

روش انجام آزمایش

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها از سه نمونه سنگ دارای تخلخل استفاده شده است، که در زیر مراحل آماده‌سازی و حصول مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها ارائه شده است. محفظه قرارگیری

1. Linear Least Squared Fitting
2. Zheng

نمونه‌ها در دستگاه استفاده شده برای انجام آزمایش، به شکل استوانه با قطر ۵۰/۸ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین نمونه‌های آزمایش بایستی به شکل استوانه با قطر برابر با ۵۰/۸ میلی‌متر (معادل ۲ اینچ) باشند، در غیر این صورت تماس کامل بین سطوح پروب‌ها و نمونه برقرار نخواهد شد و همچنین تماس غشاء لاستیکی درون محفظه با دیواره نمونه حذف شده و در نتیجه فشار جانبی مناسب و صحیحی اعمال نخواهد شد. با توجه به ماکزیمم و مینیمم جابجایی کفه‌های دستگاه، طول نمونه‌ها می‌تواند از ۷ الی ۱۴ سانتی‌متر باشند که طولی برابر با ۱۰ سانتی‌متر برای نمونه‌های آزمون انتخاب شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها از نظر ابعادی به کمک دستگاه تراشکاری انجام شد. پارامتر بسیار مهم در تراشکاری نمونه‌های متخلخل انتخاب دور مناسب و انتخاب لبه برنده مناسب می‌باشد، تا در حین تراشکاری به دلیل تردی و درشتی دانه‌های تشکیل دهنده لبه‌های نمونه‌ها خرد نگردد و همچنین با بالا بردن دور ماشین تراش نوک لبه برنده می‌سوزد و عملیات ماشینکاری مختل می‌گردد. دور انتخاب شده برای تراشکاری نمونه‌ها ۹۰ دور بر دقیقه می‌باشد. در جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات ابعادی نمونه مرجع و نمونه‌های آزمایش ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات ابعادی نمونه مرجع

حجم (cm^3)	طول (mm)	قطر (mm)	جنس
۲۰۳/۳۸	۹۹/۹۵	۵۰/۹	آلومینیوم Al

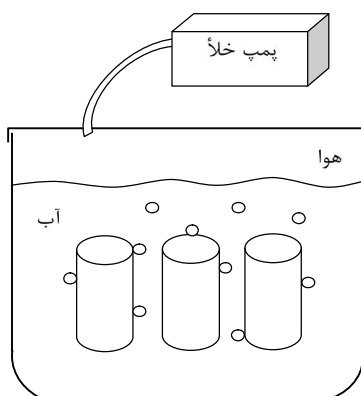
جدول (۲): مشخصات ابعادی نمونه‌های آزمایش

حجم (cm^3)	طول (mm)	قطر (mm)	شماره نمونه
۲۰۳/۰۷۵	۹۹/۸۰	۵۰/۹۰	۱
۲۰۲/۲۳۳	۹۹/۶۶	۵۰/۸۳	۲
۲۰۱/۶۲۹	۹۹/۴۸	۵۰/۸۰	۳

الف) اشباع‌سازی نمونه‌ها

برای اشباع کردن نمونه‌ها، آن‌ها درون محفظه دستگاه که محتوی آب معمولی می‌باشد، به صورت غوطه‌ور قرار داده شدند. محفظه دستگاه تا اندازه‌ای از آب پر می‌شود که نمونه‌ها کاملاً درون آب قرار گیرند و بخش بالایی محفظه خالی می‌ماند سپس درب محفظه بسته شده و خروجی بالایی محفظه که به منظور تخلیه و مکش هوای داخل محفظه تعبیه شده است، به پمپ خلأ وصل می‌گردد. نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در همان حالت راکد غوطه‌ور درون آب بدون هیچ عملیاتی نگاه داشته می‌شوند،

سپس به مدت ۴ ساعت سیستم شروع به کار می‌کند و پمپ خلأ فعال شده و در بخش خالی از آب محفظه‌ای که نمونه‌ها درون آن قرار دارند، خلأی برابر $(KPa) 20$ ایجاد می‌کند که این عمل با بازه زمانی نیم ساعته قطع و دوباره اعمال می‌گردد. در هنگام ایجاد خلأ و کاهش شدید فشار هوا در بخش بالایی محفظه، کلیه هوای درون منافذ نمونه متخلخل خارج شده و با آب پر می‌گردد که شکل انجام پذیرفتن این پدیده همانند عمل جوشیدن می‌باشد. پس از اتمام عمل اشباع سازی، بایستی حمل نمونه‌ها به محل انجام آزمایش‌های نهایی به صورت غوطه‌ور درون آب انجام گیرد تا نمونه‌ها از حالت اشباع کامل خارج نشوند.



شکل (۲): شکل شماتیک دستگاه اشباع‌ساز

ب) چگالی و تخلخل

چگالی مواد تابع منافذ، درزها، شکاف‌ها و سایر فضاها با وجود در ماده می‌باشد. چگالی سنگ‌ها و خاک‌ها با افزایش عمق بیشتر می‌شود، چرا که با افزایش عمق فشار اعمالی به ماده افزایش یافته و درزها و ترک‌ها بسته می‌شود و در نتیجه تخلخل آن‌ها کاهش می‌یابد. اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آنهاست، زیرا چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم می‌باشد. و بدین ترتیب وابستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد. تخلخل در لایه‌های زمین به دلایل مختلفی از جمله شرایط تشکیل، دگرسانی، انحلال کانی‌ها، تبلور مجدد و غیره به وجود می‌آید. تخلخل سنگ‌ها بستگی به شکل و توزیع ابعاد دانه‌ها، استحکام دانه‌ها، سمت و سوی دانه‌ها و درجه تراکم دانه‌ها دارد. از نظر اندازه منافذ، سنگ‌ها به سه دسته زیر تقسیم می‌شود:

منافذ زیر مؤینه با ابعادی کوچکتر از $2/$ میکرون

منافذ مویینه به ابعاد $1/$ میکرون تا $2/$ میلیمتر

منافذ بزرگتر از مویینه با ابعادی بزرگتر از $1/$ میلیمتر

حجم منافذ، چگالی نمونه در حالت خشک، چگالی دانه‌های تشکیل دهنده نمونه و تخلخل آن از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$V_{void} = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{\rho_w} \quad (33)$$

$$\rho_{dry} = \frac{M_{dry}}{V_{total}} \quad (34)$$

$$\rho_{grain} = \frac{M_{dry}}{V_{total} - V_{void}} \quad (35)$$

$$\varphi = \frac{100V_{void}}{V_{total}} \quad (36)$$

که V_{total} حجم کل نمونه (cm^3) ، V_{void} حجم منافذ (cm^3) ، ρ_{dry} چگالی خشک (gr/cm^3) ، ρ_{grain} چگالی ذرات تشکیل دهنده نمونه (gr/cm^3) ، φ ضریب تخلخل $(\%)$ ، M_{sat} جرم حالت اشباع با سطح خشک شده (gr) و M_{dry} جرم خشک نمونه (gr) می‌باشد.

جدول (۳): جرم، چگالی و تخلخل نمونه‌های آزمایش

شماره نمونه	جرم بارطوبت طبیعی (gr)	جرم حالت خشک (gr)	جرم حالت اشباع (gr)	چگالی خشک (kg/m^3)	چگالی دانه‌ها (kg/m^3)	تخلخل $(\%)$
۱	۴۰۷/۳	۴۰۶/۰	۴۴۵/۴	۱۹۹۹/۳	۲۴۸۰/۵	۱۹/۴
۲	۴۷۷/۱	۴۷۶/۷	۴۹۴/۰	۲۳۵۷/۲	۲۵۷۷/۷	۸/۶
۳	۵۲۷/۹	۵۲۷/۶	۵۳۱/۱	۲۶۱۶/۷	۲۶۶۲/۹	۱/۸

ج) محاسبه سرعت صوت در نمونه‌های آزمون

نحوه کارکرد دستگاه به این گونه است که امواج آکوستیک توسط ترانسدیوسر فرستنده امواج ارسال می‌گردد و پس از طی طول نمونه به ترانسدیوسر گیرنده می‌رسد. دریافت امواج توسط پراب گیرنده با تأخیر زمانی همراه است. با استخراج این زمان در واقع مدت زمان گذر موج برای هر نمونه آزمایش بدست خواهد آمد. قبل از شروع آزمایش بایستی تأثیر ضخامت پیشانی پراب‌ها در زمان گذر موج حذف گردد. برای این منظور دو پراب فرستنده و گیرنده بدون وجود نمونه‌ای بر روی هم قرار می‌گیرند. زمان گذر موج ارسالی از پراب فرستنده به سوی پراب گیرنده بدون وجود نمونه آزمایش در بین آن‌ها برای سه نوع موج ارسالی به صورت زیر است:

جدول (۴): زمان گذر امواج ارسالی از ترانسدیوسر فرستنده به گیرنده

نوع موج	P	S_1	S_2
زمان گذر (μs)	۱۴/۳۷۵	۲۵/۶۰۰	۲۶/۶۰۰

زمان‌های ارائه شده در جدول بالا از زمان‌های بدست آمده برای نمونه‌های آزمایش کسر می شود. سپس طول نمونه‌های آزمایش (X) به کمک کولیس اندازه گرفته می‌شود و در نهایت طبق رابطه زیر سرعت انتشار امواج (V) در نمونه‌های آزمایش و نمونه مرجع محاسبه می‌گردد.

$$V_j = \frac{X_j}{T_j}, \quad j=P, S_1, S_2 \quad (37)$$

در جدول شماره (۵) سرعت انتشار امواج طولی و برشی در ۳ نمونه آزمایش ارائه شده است. و همچنین در گراف‌های زیر تغییرات سرعت انتشار امواج نسبت به تغییرات فشار در حالت خشک و اشباع برای نمونه‌ها رسم شده است.

جدول (۵): سرعت امواج طولی و برشی نمونه‌های خشک و اشباع در فشارهای مختلف (m/s)

نمونه شماره	فشار (MPa)	V_P		V_{S1}		V_{S2}	
		خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
۱	۵	۳۲۴۲/۸۹	۲۷۴۳/۶۴	۲۱۰۹/۹۳	۱۸۳۷/۹۳	۲۱۱۴/۴۰	-
	۱۰	۳۳۱۸/۳۷	۳۰۱۲/۸۳	۲۱۴۶/۲۳	۱۸۹۷/۳۳	۲۱۵۰/۸۶	۱۹۰۲/۷۶
	۲۰	۳۳۹۱/۶۷	۳۱۲۶/۰۷	۲۱۷۹/۰۳	۱۹۵۴/۹۴	۲۱۸۸/۵۹	۱۹۵۶/۸۶
	۳۰	۳۴۶۲/۲۷	۳۲۱۶/۷۶	۲۲۱۲/۸۶	۱۹۹۷/۹۹	۲۲۱۲/۸۶	۱۹۹۶
	۴۰	۳۴۹۲/۵۶	۳۲۶۹/۴۵	۲۲۳۵/۱۶	۲۰۱۴/۱۲	۲۲۳۲/۶۶	۲۰۱۶/۱۶
۲	۵	۴۳۹۵/۱۵	۴۴۸۴/۱۴	۲۷۸۷/۶۹	۲۶۶۴/۷۰	۲۷۶۰/۶۶	۲۶۵۷/۶۰
	۱۰	۴۴۶۴/۰۵	۴۵۲۴/۸۶	۲۸۲۳/۲۲	۲۶۹۷/۱۶	۲۷۹۱/۶۰	۲۶۸۹/۸۸
	۲۰	۴۵۳۵/۱۵	۴۵۵۵/۸۹	۲۸۵۱/۵۰	۲۷۳۷/۹۱	۲۸۱۹/۲۴	۲۷۳۷/۹۱
	۳۰	۴۵۹۷/۹۲	۴۶۵۱/۵۸	۲۸۶۳/۷۹	۲۷۶۴/۴۹	۲۸۵۵/۵۹	۲۷۶۴/۴۹
	۴۰	۴۶۶۲/۴۶	۴۶۸۴/۳۷	۲۸۷۶/۱۹	۲۷۸۳/۸۰	۲۸۷۲/۰۵	۲۷۸۳/۸۰
۳	۵	۵۳۴۱/۲۱	۵۳۵۵/۵۹	۳۱۹۸/۷۱	۳۱۵۳/۰۹	۳۱۸۸/۴۶	۳۱۳۸/۱۷
	۱۰	۵۳۷۰/۰۴	۵۴۲۸/۶۵	۳۲۴۰/۳۹	۳۱۸۳/۳۶	۳۲۱۴/۲۲	۳۱۶۳/۱۲
	۲۰	۵۴۱۳/۸۸	۵۴۸۸/۵۵	۳۲۵۶/۳۰	۳۲۰۳/۸۶	۳۲۳۵/۱۲	۳۱۹۳/۵۸
	۳۰	۵۴۴۳/۵۰	۵۵۱۹/۰۰	۳۲۶۶/۹۹	۳۲۳۵/۱۲	۳۲۵۰/۹۸	۳۲۱۴/۲۲
	۴۰	۵۴۷۳/۴۵	۵۵۴۹/۷۹	۳۲۸۳/۱۶	۳۲۴۵/۶۸	۳۲۶۶/۹۹	۳۲۲۹/۸۷

د) محاسبه فاکتور کیفیت از روش نسبت طیفی

به کمک روابط روش نسبت طیفی که در بخش روش تحقیق توضیح داده شده است، فاکتور کیفیت برای نمونه‌های آزمون در فشارهای مختلف در دو حالت خشک و اشباع محاسبه شده است که مقادیر

آن در جدول شماره (۶) ارائه شده است. برای بررسی بیشتر در گراف‌های زیر تغییرات فاکتور کیفیت نسبت به تغییرات فشار در حالت خشک و اشباع ارائه شده است.

جدول (۶): مقادیر فاکتور کیفیت امواج طولی و برشی نمونه‌ها در دو حالت خشک و اشباع در فشارهای مختلف

نمونه شماره	فشار	Q_P		Q_{S1}		Q_{S2}	
		خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
۱	۵	۴۵/۶۲	۲۱/۵۸	۱۸/۸۸	۱۸/۷۴	-	-
	۱۰	۴۶/۱۳	۳۷/۸۸	۱۹/۸۳	۱۹/۴۸	۳۳/۳۵	۲۲/۰۸
	۲۰	۴۷/۰۵	۴۰/۶۵	۲۰/۳۹	۱۹/۶۳	۳۷/۸۱	۲۵/۶۴
	۳۰	۴۷/۱۳	۴۳/۶۲	۲۱/۹۵	۲۰/۴۰	۳۹/۷۵	۲۶/۱۸
	۴۰	۴۸/۰۳	۴۳/۵۳	۲۳/۶۹	۲۱/۶۱	۴۲/۸۸	۲۷/۱۰
۲	۵	۴۱/۰۸	۲۸/۲۹	۲۶/۹۵	۱۵/۴۹	۳۴/۵۵	۱۹/۶۴
	۱۰	۴۱/۸۲	۳۰/۶۸	۲۸/۱۸	۱۶/۵۰	۳۶/۲۵	۲۱/۲۲
	۲۰	۴۳/۰۴	۳۱/۵۳	۲۹/۳۶	۱۷/۵۹	۳۷/۲۷	۲۱/۳۰
	۳۰	۴۴/۶۸	۳۲/۵۶	۳۰/۶۰	۱۸/۲۱	۳۷/۷۹	۲۲/۳۴
	۴۰	۴۶/۷۳	۳۴/۷۹	۳۱/۴۴	۱۹/۰۴	۳۸/۰۷	۲۳/۴۶
۳	۵	۱۳/۲۷	۸/۵۹	۸۹/۹۹	۵۹/۱۵	۷۲/۴۲	۴۰/۹۷
	۱۰	۱۷/۴۲	۸/۷۵	۱۱۵/۳۱	۷۴/۸۹	۹۷/۳۰	۴۴/۹۷
	۲۰	۱۸/۹۶	۹/۲۷	۱۳۸/۸۴	۸۳/۶۳	۱۳۴/۵۰	۶۶/۴۲
	۳۰	۲۳/۰۳	۱۰/۳۷	۱۵۲/۹۵	۹۵/۲۲	۱۷۰/۴۰	۸۵/۱۷
	۴۰	۲۶/۰۳	۱۲/۰۴	۱۷۳/۱۰	۹۸/۷۳	۱۸۸/۰۳	۹۲/۴۶

نتیجه‌گیری

۱. با افزایش فشار مؤثر اعمالی بر نمونه‌ها ترک‌های موجود در داخل نمونه‌ها بسته می‌شوند که این پدیده باعث می‌شود تا مقادیر سرعت انتشار امواج طولی و برشی بدست آمده از نتایج آزمون و مقادیر سرعت انتشار محاسبه شده از روابط تئوری به هم نزدیک‌تر شوند. این افزایش دقت در هر دو حالت خشک و اشباع صادق می‌باشد.

۲. سرعت انتشار امواج برشی برای هر سه نمونه آزمایش در حالت اشباع کمتر از حالت خشک می‌باشد، که با پیش‌بینی‌ها انطباق دارد. با توجه به اینکه بایستی سرعت امواج طولی در حالت اشباع بیشتر از حالت خشک باشد، این پدیده احتمالاً به دلیل نرم شدگی^۱ ساختار و کانی‌های پایه رسی در

1. Softening

حالت خیس و اشباع روی داده است که روی دادن چنین اتفاقی طبیعی می‌باشد. همچنین شایان ذکر است که مقایسه بیان شده برای سرعت انتشار امواج در کلیه فشارهای اعمالی در این مقاله صادق می‌باشد.

۳. وجود آب به جای هوا درون منافذ نمونه متخلخل خود ایجاد میرایی و استهلاک می‌کند و باعث افزایش افت امواج الاستیک می‌گردد، در نتیجه در شناسایی میادین مین و اجسام خلل ایجاد خواهد شد. مقادیر ضرایب افت محاسبه شده برای نمونه‌ها در فشارهای مختلف در حالت اشباع کمتر از حالت خشک می‌باشد. در نتیجه مقادیر فاکتور کیفیت که تابعی از مقادیر ضریب افت و سرعت انتشار می‌باشد، در هر فشار اعمالی در حالت اشباع کمتر از حالت خشک می‌باشد. مقادیر فاکتور کیفیت برای هر نمونه در هر حالتی (خشک و اشباع) با افزایش فشار افزایش می‌یابد و مقادیر ضرایب افت برای هر نمونه در هر حالتی با افزایش فشار کاهش می‌یابد که این روال مطابق با واقعیت و پیش‌بینی‌ها می‌باشد. همچنین با افزایش فشار اعمالی به نمونه‌های آزمون، فرکانس دامنه بیشینه افزایش می‌یابد، که این پدیده نیز بر روی صحت و دقت نتایج صحه می‌گذارد.

۴. با توجه به نتایج تحلیل تئوری به موج طولی با سرعت انتشار بالاتر موج نوع اول^۱ و به موج طولی دیگر با سرعت انتشار کوچکتر موج نوع دوم^۲ اتلاق می‌شود. در این تحقیق فقط موج نوع اول بررسی شده است. موج نوع اول در حالتی است که ذرات جامد و مایع باهم حرکت می‌کنند و دیگری در حالتی است که فاز جامد و فاز مایع در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند در نتیجه جهت شناسایی اجسام کاربرد دارد. موج نوع دوم به دلیل اصطکاک زیاد بین ذرات جامد و مایع درون منافذ (حرکت نسبی آب و ذرات جامد) به شدت دمپ و میرا می‌گردد در نتیجه تأثیری در شناسایی اجسام ندارد. سرعت موج نوع دوم در کلیه محیط‌های متخلخل کمتر از سرعت صوت در سیال درون منافذ آن می‌باشد. برای مثال اگر مایع اشباع کننده نمونه متخلخل آب باشد، سرعت موج نوع دوم از سرعت صوت درون آب کمتر می‌باشد.

تطابق نتایج تئوری با نتایج آزمایش و دقت تحلیل تئوری با توجه به بررسی مقالات موجود در این زمینه در محدوده قابل قبول می‌باشد.

1. Wave of the first kind
2. Wave of the second kind

پیشنهادهای

۱. بررسی افت امواج و اولین پیک دریافتی سنسور با در نظر گرفتن و اعمال فشار متفاوت به سیال درون منافذ (این پارامتر یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقادیر ضرایب افت و فاکتور کیفیت در تئوری بیوت می باشد، که در این تحقیق ثابت و برابر فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است).
۲. بررسی تأثیر دما بر روی سرعت و فاکتور کیفیت امواج طولی و برشی (تغییرات دما بر روی ضرایب الاستیک و در نتیجه رفتار ماده تأثیر می گذارد).

فهرست منابع

۱. فهمی فر احمد، "آزمایش های مکانیک سنگ – مبانی نظری و استانداردها" جلد اول و دوم، ناشر: شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ۱۳۸۰.
2. Allard J.F., "Propagation of Sound in Porous Media: modelling sound absorbing materials", Elsevier Science Publication (1993).
3. Biot M.A., "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, High-Frequency range, J. Acoust. Soc. Am. (1956).
4. Biot M.A., "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, Low-Frequency range, J. Acoust. Soc. Am. (1956).
5. Berryman J.G., "Confirmation of Biot's theory", J. Appl. Phys. (1980).
6. Burridge R., Childress S., Papanicolaou G., "Macroscopic Properties of Disordered Media", Springer (1982).
7. Coussy O., "Poromechanics", England, John Wiley & Sons (2004).
8. Corapcioglu M.Y., "Advances in Porous Media", Vol. 3, Netherlands, Elsevier (1996).
9. Dvorkin J. & Nur A., "Dynamic Poroelasticity: A Unified Model with the Squirt and the Biot Mechanisms", Geophysics, Vol. 58, No. 4, (1993).
10. Horsrud P. et al., "Petroleum Related Rock Mechanics", 2th Edition, Elsevier (2008).
11. Haupt R.W. et al, "Elastic Moduli and Seismic Wave Attenuation in Dry & Saturated Rock", (1992).
12. Jaeger J.C., Cook G.W., "Fundamentals of Rock Mechanics", 4th Ed., John Wiley & Sons (2007).
13. Kenneth W. Winkler & William F., "Acoustic Velocity and Attenuation in Porous Rocks", American Geophysical Union (1995).
14. Liu B., Kern H., Popp T., "Attenuation and Velocities of P- and S-Waves in Dry and Saturated Crystalline and Sedimentary Rocks at Ultrasonic Frequencies", Phys. Chem. Earth, Vol. 22 (1997).
15. Ogushwitz P.R., "Applicability of the Biot theory – Low Porosity material", J. Acoust. Soc. Am (1985).
16. Plona T.J., "Acoustics of Fluid-Saturated Porous Media", IEEE (1982).

17. Sears F.M., Bonner B.P., "Ultrasonic attenuation measurement by spectral ratios utilizing signal processing techniques", IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, Vol. 19, No.2, (1981).
18. Sarma L.P., Ravikumar N., "Q-factor by spectral ratio technique for strata evaluations", Engineering Geology 57 (2000).
19. Toksoz M.N., "Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements", Society of Exploration Geophysicis (1979).
20. Toksoz M.N., "Ultrasonic P and S Wave Attenuation in Dry and Saturated Rocks Under Pressure", Journal of Geophysical Research, Vol. 85, No. B2 (1980).
21. Stoll R.D., "Sediment Acoustics - Lecture notes in earth science", Springer-Verlag (1989).
22. Verruijt A., "Soil Dynamics", Delft university of technology (2007).
23. White J.E., "Underground Sound: application of seismic wave", Netherlands, Elsevier Science Publisher (1983).
24. Wang & Nur, "Elastic Wave Velocities in Porous Media", (1985).
25. Yamamoto T., "Acoustic Wave Propagation through Porous Media with Arbitrary Pore Size Distributions", J. Acoust. Soc. Am. (1988).
26. Zheng R. et al, "Spectral Ratio Method to Estimate Broadband Ultrasound Attenuation of Cortical Bones in vitro using Multiple Reflections", Physics in Medicine & Biology, 52 (2007).