

بررسی آزمایشگاهی ناهمسانگردی سرعت در نمونه‌های سنگی گرانیت بندرعباس، ماسه‌سنگ چابهار و آندزیت ارومیه در حالت‌های خشک و اشباع

مجید نبی‌بیدهندی* و سعید امیری بشلی*

چکیده

سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در سه جهت متعامد در نمونه‌های سنگی مکعبی شکل از سه گروه مختلف سنگی در هر دو حالت خشک و اشباع تحت فشار تک محوری کم اندازه‌گیری شده است. این سه گروه شامل هفت نمونه سنگ گرانیت از منطقه بندرعباس، شش نمونه ماسه‌سنگ از منطقه چابهار و پانزده نمونه آندزیت از منطقه ارومیه می‌باشند. سه ضریب بدون بعد ناهمسانگردی تامسن، γ ، ϵ و δ برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردیده است. این محاسبات نشان می‌دهد که نمونه‌های سنگی فوق از فرض ناهمسانگردی بیضوی در هر دو حالت خشک و اشباع پیروی می‌کنند. در ضمن برای هر سه گروه سنگی، بررسی ضرایب کشسانی، ضرایب یانگ، نسبت‌های پواسون و مدول بالک در هر دو حالت خشک و اشباع نشان می‌دهد که مقدار این کمیتها در حالت اشباع بیشتر از حالت خشک می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: ناهمسانگردی، همسانگرد عرضی، ناهمسانگردی بیضوی، ضرایب کشسانی

۱ مقدمه

درزه‌هایی در سنگ که در یک راستا قرار گرفته‌اند و یا وجود کانیهایی که ذاتا ناهمسانگرد^۲ هستند، از لحاظ سرعت انتشار امواج کشسانی ناهمسانگرد می‌باشند. در این صورت برای توصیف خواص کشسانی چنین موادی به جای دو ضریب کشسانی به ضرایب بیشتری نیاز است. مطالعات و بررسی‌های آزمایشگاهی (لو^۱ و همکاران، ۱۹۸۶؛ زامورا^۴ و همکاران، ۱۹۹۰ و کینگ^۵ و همکاران، ۱۹۹۴) نشان داده‌اند که اکثر مواد زمین رفتار همسانگردی عرضی^۱ از خود نشان می‌دهند. در این حالت برای توصیف خواص

در بیشتر کاربردهای نظریه کشسانی برای اکتشافات ژئوفیزیکی و مهندسی، محیط‌های مورد مطالعه کاملاً همسانگرد در نظر گرفته می‌شوند. با فرض همسانگرد بودن محیط، با معین نمودن دو ضریب مستقل μ و λ که به ثابت‌های لامه^۱ معروف هستند، می‌توان به محاسبه دیگر ضرایب کشسانی و در نتیجه به بررسی خواص کشسانی محیط پرداخت. ولی در عمل مشاهده می‌شود که اکثر مواد زمین از جمله سنگها، به علت داشتن لایه‌بندی در جهت خاص یا وجود کانیهایی طولی که در یک راستا قرار گرفته‌اند و یا به علت حضور

1. Lamé's constants
3. Lo
5. King

2. anisotropy
4. Zamora
6. transverse isotropy

* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.

مقارن بوده و در نتیجه می‌توان گفت که برای مشخص کردن یک ماده به تعداد ۲۱ ضریب کشسان مستقل نیاز است. با فرض آنکه هیچگونه جفت‌شدگی^۳ بین تنش نرمال و واتنیدگی برشی وجود ندارد و همچنین با فرض آنکه هیچگونه جفت‌شدگی بین تنش‌های برشی و واتنیدگی‌های برشی در جهت‌های مختلف وجود ندارد کلیه ضرایب ماتریس سختی به جز ضرایب قطری و سه ضریب c_{12} ، c_{13} و c_{23} صفر می‌شوند (چارلز^۴، ۱۹۹۷). در واقع تعداد ضرایب غیر صفر ماتریس سختی به ۱۲ کاهش می‌یابد که با توجه به مقارن بودن آن ۹ ضریب مستقل وجود دارد. برای حالتی که ماده کاملاً همسانگرد باشد، یعنی خواص فیزیکی آن در تمام جهات یکسان است تعداد ضرایب مستقل به دو ضریب λ و μ (ضرایب لامه) کاهش می‌یابد که ارتباط آنها با ضرایب ماتریس سختی به صورت زیر است

$$\begin{aligned} c_{11} = c_{22} = c_{33} &= \lambda + 2\mu \\ c_{12} = c_{13} = c_{23} &= \lambda \\ c_{44} = c_{55} = c_{66} &= \mu \end{aligned} \quad (۳)$$

با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج تراکمی (V_p) و امواج برشی (V_s) و چگالی محیط (ρ) می‌توان ضرایب لامه را با استفاده از روابط زیر بدست آورد

$$\lambda = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \quad (۴)$$

$$\mu = \rho V_s^2 \quad (۵)$$

۲.۲ محیط همسانگرد عرضی

معمول‌ترین حالت ناهمسانگردی، حالتی

کشسانی این گونه مواد به ۵ ضریب کشسانی مستقل نیاز می‌باشد.

در این مقاله ابتدا مروری در خصوص کارهای تئوری و آزمایشگاهی انجام شده درباره ناهمسانگردی به عمل می‌آید. سپس روال کار آزمایشگاهی و شرح دستگاه اندازه‌گیری بطور مختصر توضیح داده می‌شود. آنگاه نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مورد بحث قرار گرفته و در انتها نتیجه‌گیری می‌شود.

۲ مروری بر کارهای تئوری و آزمایشگاهی انجام شده پیرامون ناهمسانگردی

۱.۲ محیط همسانگرد کامل

بطور کلی رابطه بین تنش و واتنیدگی برای مواد کشسانی به صورت زیر بیان می‌شود (کینگ، ۱۹۷۰ و تامسن^۱، ۱۹۸۶)

$$\sigma_i = c_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (۱)$$

که در آن σ_i نشان دهنده مولفه‌های تنش، ε_j نشان دهنده مولفه‌های واتنیدگی و c_{ij} نیز بیانگر ماتریس سختی^۲ می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شود

$$c_{ij} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

ماتریس سختی یک ماتریس 6×6 می‌باشد که دارای ۳۶ عضو است. اما بعلت در نظر گرفتن اصل بقای انرژی می‌توان نشان داد که این ماتریس

1. Thomsen
3. coupling

2. stiffness matrix
4. Charlez

رابطه زیر تعریف شده است (تامسن، ۱۹۸۶)

$$\varepsilon \equiv \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}} \quad (7)$$

ضریب γ که به معنای میزان ناهمسانگردی موج برشی (S) در محیط ناهمسانگرد ضعیف می باشد با رابطه زیر تعریف شده است

$$\gamma \equiv \frac{c_{66} - c_{44}}{2c_{44}} \quad (8)$$

و ضریب δ ترکیبی از ضرایب کشسانی می باشد و در حالت طبیعی ممکن است مثبت یا منفی باشد. این ضریب از رابطه زیر محاسبه می شود (تامسن، ۱۹۸۶)

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})} \quad (9)$$

اگر دو ضریب ε و δ با هم برابر باشند در آن صورت نمونه دارای حالت ناهمسانگردی بیضوی می باشد. در حالت همسانگرد کامل، موج در محیط به صورت کروی منتشر می شود، ولی برای حالتی که محیط ناهمسانگرد باشد شکل موج به صورت نامنظم می باشد و در صورتی که فرض ناهمسانگرد بیضوی برای محیطی صادق باشد، بدین معنا است که موج در محیط به صورت بیضوی منتشر می شود (تامسن، ۱۹۸۶). ضریب ناهمسانگردی δ در کارهای مهندسی ژئوفیزیک و یا در کارهای اکتشافات ژئوفیزیکی عامل کنترل کننده مهمی می باشد. یکی از روش های محاسبه تنش در سازه های مختلف استفاده از نسبت پواسون است. می توان نشان داد در یک محیط کاملاً همسانگرد

است که در آن خواص فیزیکی در تمام جهات در یک صفحه یکسان باشند و با جهت عمود بر آن صفحه تفاوت کنند. به چنین حالتی «حالت همسانگردی عرضی» اطلاق می شود. در این صورت برای توصیف خواص کشسانی چنین محیطهایی به ۵ ضریب مستقل کشسانی به قرار زیر نیاز می باشد (برای توضیح بیشتر رجوع شود به چارلز، ۱۹۹۷)

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{22} & c_{13} &= c_{23} \\ c_{33} & & c_{44} &= c_{55} \\ c_{12} & & c_{66} &= \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

۳.۲ محیط ناهمسانگرد کشسان ضعیف^۱

تامسن (۱۹۸۶) بیان می کند که برای محیطهای ناهمسانگرد ضعیف (محیطهایی که درصد ناهمسانگردی در آنها کمتر از بیست درصد می باشد) می توان به جای بکاربردن پنج ضریب کشسانی مستقل از دو ضریب کشسانی (یابطور معادل از سرعتهای انتشار قائم P و S) به علاوه سه ضریب دیگر که بیانگر میزان ناهمسانگردی محیط می باشند، استفاده نمود. این سه ضریب که به ضرایب ناهمسانگردی معروف هستند و با ε ، γ و δ نشان داده می شوند، ترکیبی از ضرایب کشسانی می باشند که دارای ویژگیهای زیر هستند

- (۱) معادلات پیچیده انتشار امواج را ساده می کنند
 - (۲) بدون بعد می باشند
 - (۳) در حالتی که محیط همسانگرد باشد به سمت صفر میل می کنند.
- ضریب ناهمسانگردی ε که به معنای میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (P) است توسط

که در آن α سرعت موج تراکمی p در راستای قائم می‌باشد.

۳ روند کارهای آزمایشگاهی و شرح دستگاه اندازه‌گیری سرعت

جهت بررسی ناهمسانگردی سرعت در سنگهای مختلف، نمونه‌های مکعبی شکل با ابعاد تقریبی ۴۰ تا ۶۰ میلی‌متر تهیه شده است. در این کار تعداد ۷ نمونه گرانیت از منطقه بندرعباس، ۶ نمونه ماسه‌سنگ از منطقه چابهار و ۱۵ نمونه آندزیت از منطقه ارومیه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. اطلاعات کامل راجع به ابعاد، جرم، چگالی و تخلخل این نمونه‌ها توسط امیری (۱۳۷۷) بیان شده است.

سیستم الکترونیک برای اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی یک Sonic viewer مدل ۵۲۱۷A به‌علاوه یک جفت ترانس دیوسر پیزوالکتریک مربوط به امواج تراکمی p با بسامد مرکزی ۶۳ کیلوهرتز و همچنین یک جفت ترانس دیوسر پیزوالکتریک مربوط به امواج برشی S با بسامد مرکزی ۳۳ کیلوهرتز می‌باشد که در هر جفت ترانس دیوسر یکی نقش فرستنده امواج p یا S و دیگری نقش گیرنده این امواج را دارد. شرح کامل دستگاه و طریقه اندازه‌گیری سرعت به طور مبسوط توسط نبی‌بیدهندی و کوثریان (۱۳۷۷) توضیح داده شده است.

۴ بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

برای محاسبه ضرایب کشسانی در حالت همسانگردی عرضی علاوه بر داشتن چگالی، باید مولفه سرعت امواج تراکمی و برشی در جهات

این روش محاسبه تنش می‌تواند درست باشد، ولی در عمل و در محیط‌های ناهمسانگرد در صورت عدم محاسبه ضریب δ تنش محاسبه شده بیشتر و یا کمتر از مقدار حقیقی است. اگر تنش عمودی با σ_{33} و تنش افقی با σ_{11} نمایش داده شود و سرعت موج تراکمی در محیط α و سرعت موج برشی β باشد، برای محیط‌های ناهمسانگرد ضعیف رابطه بین تنش افقی و عمودی به صورت زیر تعریف می‌شود (تامسن، ۱۹۸۶)

$$\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{33}} = \frac{c_{13}}{c_{33}} = (1 - 2 \frac{\beta_0^2}{\alpha^2}) + \delta \quad (10)$$

بانیک^۱ (۱۹۸۷) به بررسی اثر ضریب ناهمسانگردی δ در محیط‌های همسانگرد عرضی پرداخت و خطای ایجاد شده در محاسبه عمق دریای شمال را مجدداً تفسیر کرد و علت آن را همسانگرد فرض کردن محیط مورد مطالعه دانست. همچنین تاثیر δ را در تفسیر سرعت برونراند نرمال، V_{NMO} و دامنه بازتاب که دو عامل اساسی در کارهای اکتشافات لرزه‌ای می‌باشند، به صورت زیر بیان کرد

$$R_{app}(\theta) = R_{ipp}(\theta) + \frac{\Delta\delta}{2} \sin^2\theta \quad (11)$$

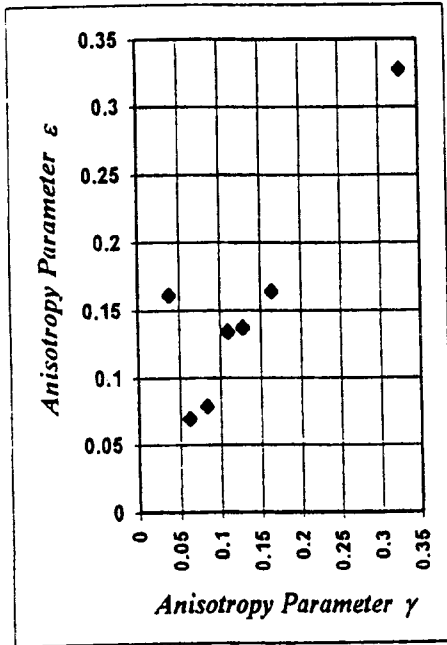
که در آن $R_{app}(\theta)$ دامنه بازتاب موج pp در برخورد با زاویه θ در محیط همسانگرد عرضی، $R_{ipp}(\theta)$ دامنه موج pp در حالت همسانگردی و $\Delta\delta$ اختلاف ضریب ناهمسانگردی در بالا و پایین سطح جدایی دو محیط می‌باشند.

$$V_{NMO} = \alpha \cdot (1 + \delta) \quad (12)$$

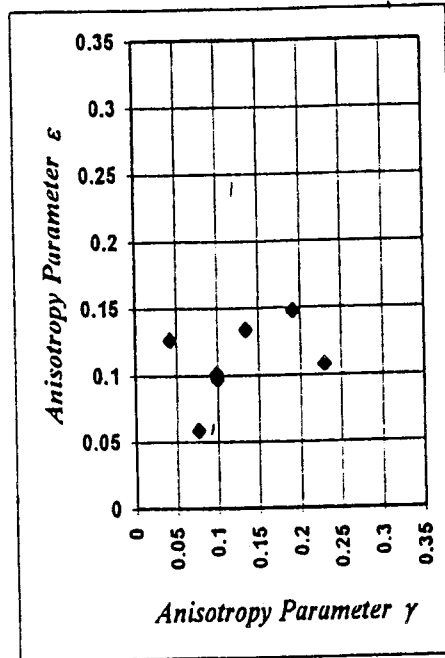
مختلف (با توجه به محور تقارن) به دست آید. سرعت‌های مورد نیاز با توجه به تعاریف مربوطه شامل V_{P11} ، V_{P33} ، V_{SH1} ، V_{SV3} ، V_{P45} می‌باشند، که در آن V_{P11} سرعت موج تراکمی در جهت عمود بر محور تقارن، V_{P33} سرعت موج تراکمی در جهت موازی با محور تقارن، V_{SH1} سرعت موج برشی در جهت عمود بر محور تقارن بطوریکه جهت ارتعاش در همان صفحه عمود بر محور تقارن باشد، V_{SV3} سرعت موج برشی در جهت موازی با محور تقارن بطوریکه جهت ارتعاش ذرات عمود بر محور تقارن باشد یا سرعت موج برشی در جهت عمود بر محور تقارن بطوریکه حرکت ذرات موازی با محور تقارن باشد و سرانجام V_{P45} سرعت موج تراکمی در جهتی که زاویه ۴۵ درجه با محور تقارن می‌سازد، می‌باشند. دانستن محور تقارن برای تعیین ضرایب کشسانی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. اگر در یک نمونه سنگی سطوح لایه‌بندی مشخص باشد یا جهت قرار گرفتن درزه‌ها و شکاف‌ها معین باشد، تشخیص محور تقارن کار مشکلی نمی‌باشد. ولی در صورتی که سطوح لایه‌بندی معین نباشد، برای تشخیص محور تقارن و صفحه همسانگردی باید با دقت بیشتری مسئله را بررسی نمود. روش اندازه‌گیری سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در راستاهای مختلف و نحوه محاسبه ضرایب کشسانی بطور مبسوط توسط امیری (۱۳۷۷) بیان شده است. یکی از روش‌های محاسبه میزان ناهمسانگردی برای مواد همسانگرد عرضی از طریق ضرایب ناهمسانگردی می‌باشد.

۱.۴ نمونه‌های گرانیت بندرعباس

در این نمونه‌ها میزان ناهمسانگردی موج تراکمی در حالت خشک بیشتر از حالت اشباع می‌باشد. برای امواج برشی نیز به جز دو مورد که میزان ناهمسانگردی در حالت خشک بیشتر از حالت اشباع می‌باشد برای بقیه نمونه‌ها میزان ناهمسانگردی در دو حالت خشک و اشباع تقریباً یکسان می‌باشد. این مشاهدات با نتایج کارهای آزمایشگاهی دیگر محققین سازگاری دارد (شوان، ۱۹۹۶). گرانیت سنگی است که دارای تخلخل بسیار کم است ولی ترکهای ریز زیادی دارد که معمولاً جهت‌دار نیز هستند. وجود ترکها سبب می‌شود که در حالت خشک میزان ناهمسانگردی سرعت نسبتاً زیاد باشد. با اشباع سنگ بوسیله آب، سرعت موج تراکمی در جهت محور تقارن که عمود بر سطح لایه‌بندی است (V_{P33}) افزایش می‌یابد حال آنکه سرعت موج تراکمی در جهت لایه‌بندی (V_{P11}) در سنگ اشباع نسبت به حالتی که سنگ خشک بود افزایش زیادی پیدا نمی‌کند که این امر سبب می‌شود میزان ناهمسانگردی موج تراکمی در حالت اشباع کاهش یابد. در مورد موج برشی چون مدول برشی سیالات اعم از هوا و آب صفر می‌باشد، در نتیجه اشباع سنگ از آب تأثیر چندانی در میزان سرعت و در نتیجه در میزان ناهمسانگردی نمی‌گذارد. بررسی ارتباط بین میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (ϵ) و برشی (γ) در هر دو حالت خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های (۱.الف) و (۱.ب) آورده شده است. بررسی ضرایب ناهمسانگردی ϵ و δ با یکدیگر نشان می‌دهد که نمونه‌های سنگی گرانیت بندرعباس از فرض ناهمسانگردی بیضوی در هر دو حالت خشک و اشباع پیروی می‌کنند. شکل‌های

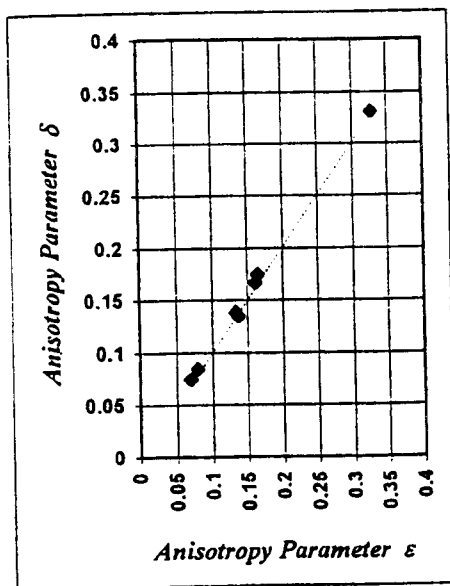


(الف)

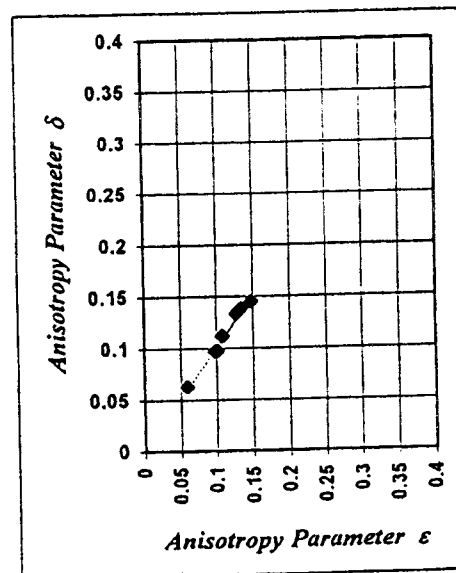


(ب)

شکل ۱. بررسی ارتباط میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (ϵ) و برشی (γ) برای نمونه‌های گرانیت بندرعباس (الف) - حالت خشک (ب) - حالت اشباع



(الف)



(ب)

شکل ۲. بررسی درستی فرض ناهمسانگردی بیضوی برای نمونه‌های گرانیت بندرعباس (الف) - حالت خشک (ب) - حالت اشباع

نسبتهای پواسون و مدول بالک برای این نمونه‌ها در حالت اشباع بیشتر از همین مقادیر برای حالت خشک می‌باشند (امیری، ۱۳۷۷).

۳.۴ نمونه‌های آندزیت ارومیه

بررسی ارتباط بین میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (ϵ) و برشی (γ) در این نمونه‌ها در حالت‌های خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های (۵. الف) و (۵. ب) آورده شده است. مشاهده می‌شود که میزان ناهمسانگردی امواج برشی در دو حالت خشک و اشباع تفاوت محسوسی ندارد ولی میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی در حالت اشباع در برخی نمونه‌ها بیشتر و در برخی دیگر کمتر از میزان ناهمسانگردی در حالت خشک می‌باشد و اشباع باعث می‌شود که ناهمسانگردی امواج تراکمی تقریباً ثابت باقی بماند. احتمالاً علت مشاهده اخیر می‌تواند به نوع کانی‌های موجود و نحوه قرارگرفتن آنها در چنین نمونه‌هایی نسبت داده شود.

بررسی درستی ناهمسانگردی بیضوی که از برابری ضرایب ناهمسانگردی (ϵ) و (δ) حاصل می‌شود، در هر دو حالت خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های (۶. الف) و (۶. ب) آورده شده است. مشاهده می‌شود که فرض ناهمسانگردی بیضوی در هر دو حالت خشک و اشباع برای این نمونه‌ها نیز صادق می‌باشد. همچنین مانند دو گروه سنگی گرانیت و ماسه‌سنگها برای این نمونه‌ها نیز مقادیر ضرایب کشسانی در حالت اشباع بیشتر از مقادیر مربوطه در حالت خشک است (امیری، ۱۳۷۷).

۵ نتایج

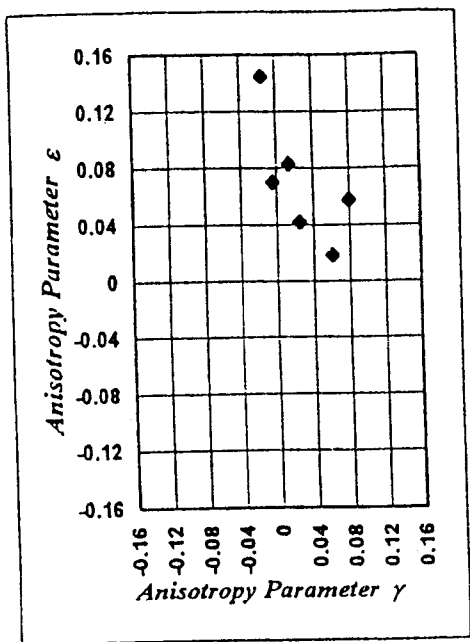
بررسی ناهمسانگردی سرعت‌های امواج تراکمی

(۲. الف) و (۲. ب) این بررسی را به ترتیب برای حالت‌های خشک و اشباع نشان می‌دهد. همچنین مقادیر پنج ضریب کشسانی مستقل (C_{34}, C_{44} ، C_{11}, C_{12}, C_{13}) و ضرایب یانگ (E_V, E_H) و نسبتهای پواسون (ν_1, ν_2, ν_3) و مدول بالک (K) در حالت اشباع بیشتر از این مقادیر در حالت خشک می‌باشند (امیری، ۱۳۷۷).

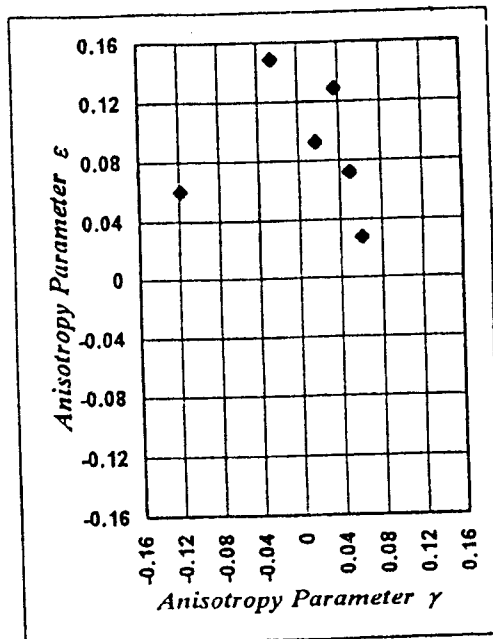
۲.۴ نمونه‌های ماسه‌سنگ چابهار

در این نمونه‌ها میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی در حالت اشباع تا اندازه‌ای بیشتر از حالت خشک به نظر می‌رسد، لکن با توجه به میزان دقت آزمایشات می‌توان آنها را یکسان در نظر گرفت. مطلب اخیر در مورد میزان ناهمسانگردی امواج برشی در دو حالت خشک و اشباع نیز صادق است. در ماسه‌سنگها از آنجا که تعداد ترکهای ریز نسبت به حفره‌های کروی و بیضوی ناچیز می‌باشد و این ترکها نیز بطور اتفاقی در توده سنگ توزیع شده‌اند لذا میزان ناهمسانگردی هر دو موج P و S در حالت اشباع تفاوت چندانی با میزان ناهمسانگردی در حالت خشک ندارند. بررسی ارتباط میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (ϵ) و برشی (γ) در حالت‌های خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های (۳. الف) و (۳. ب) آورده شده است.

بررسی درستی فرض ناهمسانگردی بیضوی که از برابری ضرایب ناهمسانگردی (ϵ) و (δ) نتیجه می‌شود در دو حالت خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های (۴. الف) و (۴. ب) آورده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود این نمونه‌ها نیز از فرض ناهمسانگردی بیضوی پیروی می‌کنند. همچنین نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که مقادیر ۵ ضریب مستقل کشسانی، ضرایب یانگ،

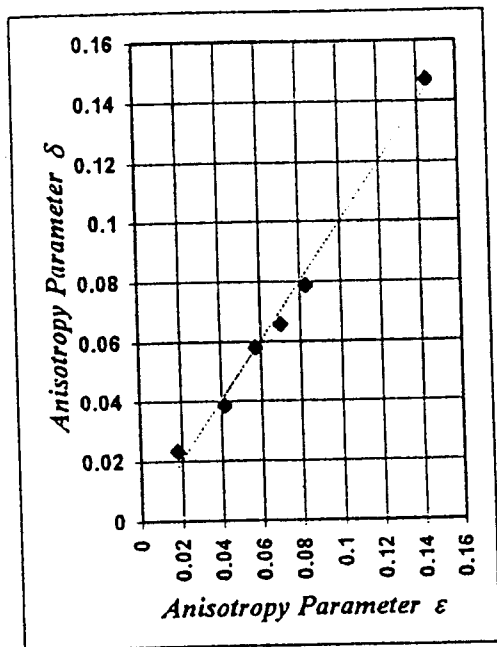


(الف)

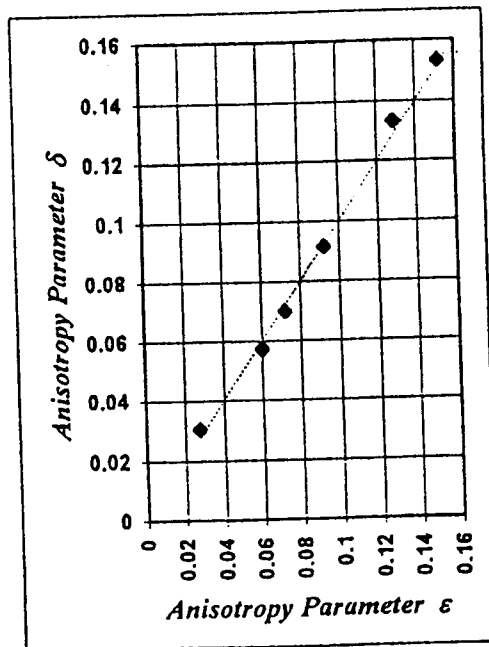


(ب)

شکل ۳. بررسی ارتباط میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (ϵ) و برشی (γ) برای نمونه‌های ماسه‌سنگ چابهار (الف) - حالت خشک (ب) - حالت اشباع

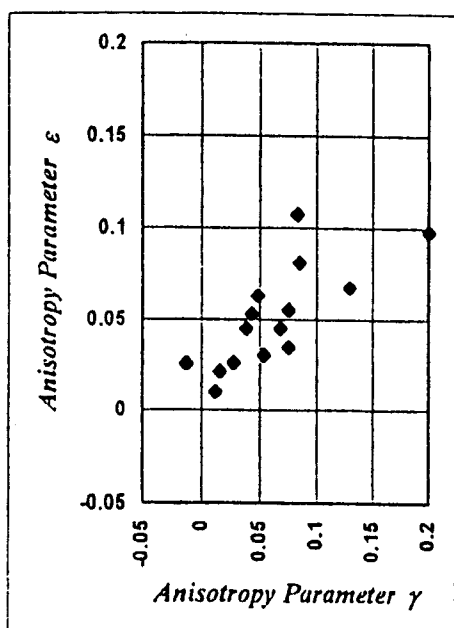


(الف)

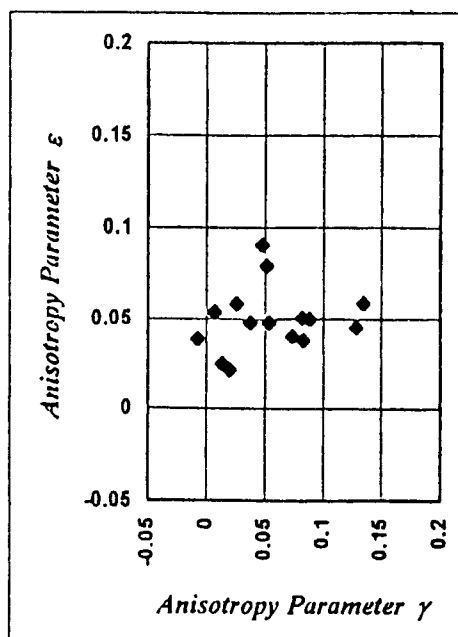


(ب)

شکل ۴. بررسی درستی فرض ناهمسانگردی بیضوی برای نمونه‌های ماسه‌سنگ چابهار (الف) - حالت خشک (ب) - حالت اشباع

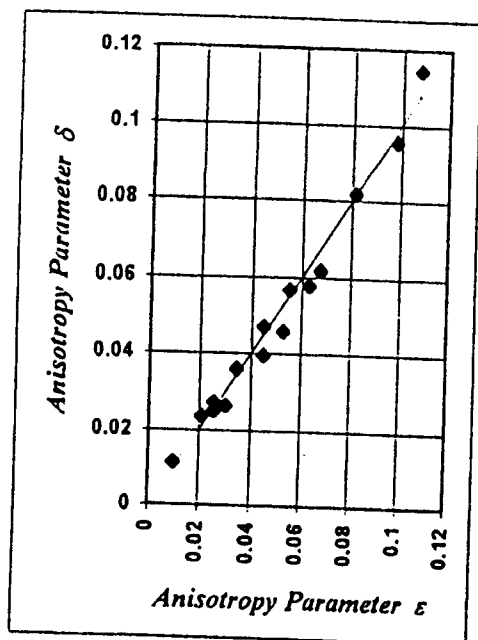


(الف)

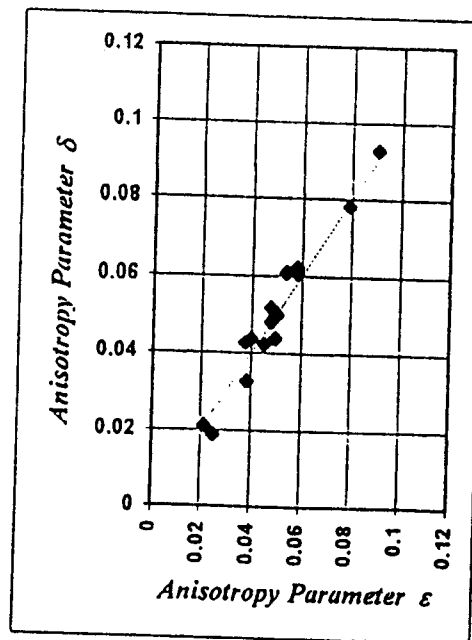


(ب)

شکل ۵. بررسی ارتباط میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی (ϵ) و برشی (γ) برای نمونه‌های آندزیت ارومیه (الف) - حالت خشک (ب) - حالت اشباع



(الف)



(ب)

شکل ۶. بررسی درستی فرض ناهمسانگردی بیضوی برای نمونه‌های آندزیت ارومیه (الف) - حالت خشک - (ب) - حالت اشباع

زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس به علت تهیه نمونه‌های سنگی تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Banik, N. C., 1987, An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media: *Geophysics*, **52**, 1654-1664.
- Charlez, P. A., 1997, *Rock mechanics-Petroleum application*, 2: Editions, Technip, Paris.
- King, M. S., 1970, Static and dynamic elastic moduli of rocks under pressure, *Rock Mechanics-Theory and Practice: Proceedings 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, 329-351.
- King, M. S., Andrea, M., and Shams-Khanshir, M., 1994, Velocity anisotropy of carboniferous mudstone: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **31**, 261-263.
- LO, T. W., Coyner, K. B., and Toksoz, M. N., 1986, Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite: *Geophysics*, **51**, 164-171
- Schon, J. H., 1996, Physical properties of rocks: *Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration*, **18**, Elsevier Science Ltd.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, 1954-1966.
- و برشی در سه گروه سنگی گرانیت بندرعباس، ماسه‌سنگ چابهار و آندزیت ارومیه نتایج زیر را بدست می‌دهد
- ۱- تمامی نمونه‌های سنگی مورد آزمایش بصورت همسانگرد عرضی می‌باشند و روابط مربوط به محیط‌های همسانگرد عرضی در مورد تمامی نمونه‌های سنگی فوق صادق است.
- ۲- تمامی نمونه‌های سنگی مذکور ضمن اینکه همسانگرد عرضی هستند دارای خاصیت ناهمسانگردی کشسان ضعیف نیز می‌باشند. لذا روابط مربوط به محیط‌های همسانگرد عرضی و ناهمسانگردی ضعیف برای این نمونه‌ها بطور مشترک بکار می‌رود.
- ۳- میزان ناهمسانگردی امواج برشی در حالت خشک و برای هر یک از سه گروه سنگی تقریباً برابر با مقادیر مربوطه در حالت اشباع برای همان گروه سنگی می‌باشد، لکن میزان ناهمسانگردی امواج تراکمی در سنگهای اشباع غالباً کمتر از سنگهای خشک می‌باشد.
- ۴- مقادیر ضرایب کشسانی (C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{34} , C_{44}) و ضرایب یانگ (E_V , E_H) و نسبت‌های پواسون (ν_1 , ν_2 , ν_3) و مدول بالک (K) برای کلیه سنگها در حالت اشباع بیشتر از مقادیر مذکور در حالت خشک می‌باشند.
- ۵- بررسی ضرایب ناهمسانگردی ϵ و δ با یکدیگر نشان می‌دهد که این نمونه‌ها از فرض ناهمسانگردی بیضوی پیروی می‌نمایند.
- ۶ تشکر و قدردانی بدینوسیله از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به علت در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاه فیزیک سنگ و همچنین از آزمایشگاه مهندسی

Zamora, M., and Poirier J. P., 1990, Experimental study of acoustic and birefringence in dry and saturated Fontainebleau sandstone: *Geophysics*, **55**, 1455-1465.

امیری، س.، ۱۳۷۷، بررسی آزمایشگاهی ناهمسانگردی سرعت در نمونه‌های سنگی گرانیت و بازالت بندرعباس، ماسه‌سنگ و سنگ آهک چابهار، شیل همدان آندزیت ارومیه در دو حالت خشک و اشباع: پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

نبی‌بیده‌ندی، م. و کوثریان، م.، ۱۳۷۷، سرعت انتشار امواج الاستیک در نمونه‌های سنگ آهک منطقه خوزستان در حالت‌های خشک و اشباع: نشریه فیزیک زمین و فضا، ۲۴، ۱۷-۲۵.