

مطالعه پراکندگی امواج کشسان در نمونه‌های سنگ آهک فیلیت و مقایسه بین مقادیر نظری و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

محمدعلی ریاحی* و محمدرضا وکیل**

چکیده

در این مقاله مقادیر سرعت انتشار امواج کشسان تراکمی و برشی برای نمونه‌های سنگ آهک فیلیت که بصورت مکعب مستطیل برش خورده بودند از طریق اندازه‌گیری در آزمایشگاه و سپس با استفاده از محاسبات نظری بدست آمده است.

ابتدا در فشار جو و درجه حرارت آزمایشگاه و با استفاده از ثبت اولین زمان رسید امواج و طول نمونه‌ها، مقادیر سرعت اندازه‌گیری شد. سرعت امواج تراکمی در بسامد ۶۳ KHz و برای امواج برشی ۳۳ KHz اندازه‌گیری شده‌اند. برای مطالعه اثر پراکندگی، اندازه‌گیری بر روی نمونه‌ها برای زوایای 30° ، 45° ، 60° و 90° که زاویه بین خط واصل بین فرستنده و گیرنده و بردار عمود بر صفحات درزه‌ها می‌باشد انجام شد. سپس در مرحله محاسبات نظری، با استفاده از روش اوکانل و بودیانسکی^۱ (۱۹۷۴) برای تعیین چگالی درزه و ضرایب لامه و بر مبنای نظریه هادسن^۲ (۱۹۸۰) مقادیر سرعت امواج بدست آمد.

نتایج حاصل برای نمونه‌های با چگالی درزه کم بین اندازه‌گیری آزمایشگاهی و روابط نظری توافق خوبی رانشان داد. برای نمونه‌های با چگالی درزه زیاد در زوایای 30° ، 45° و 60° خطای قابل ملاحظه‌ای مشاهده گردید. این عدم توافق بین اندازه‌گیری آزمایشگاهی و روابط نظری می‌تواند ناشی از ناخالصی‌ها و یکسان نبودن ماده زمینه در نمونه‌های سنگ باشد.

کلید واژه‌ها: پراکندگی امواج کشسان، امواج تراکمی، امواج برشی.

۱ مقدمه

می‌باشد. یکی از پهنه‌های وسیع ژئوفیزیک، بررسی سرعت انتشار امواج کشسان در محیط‌های واقعی است که در چنین محیط‌هایی عامل ناهمسانگردی مطرح می‌شود. ناهمسانگردی شکلهای متفاوتی دارد، به بیان دیگر علل ناهمسانگردی می‌تواند ناخالصی در مواد بصورت

از وجود تفاوت و مقایسه سرعت انتشار امواج کشسان در محیط‌های مختلف می‌توان خصوصیات محیط مورد نظر را مورد بررسی قرار داد. اگر محیط همسانگرد باشد مقادیر سرعت در جهات مختلف متفاوت نبوده اما در حالت ناهمسانگردی محیط، مقادیر سرعت در جهات مختلف متفاوت

1. O' Connell & Budiansky
2. Hudson

* موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.
** دانشگاه پیام‌نور مشهد، صندوق پستی ۴۳۲، مشهد.

شده‌اند بخصوص در مورد امواج برشی، درزه‌ها یا میان بارها باعث شکافتگی و قطبیدگی امواج برشی در محیط می‌گردند، بعبارت دیگر امواج برشی کشسان به دو مولفه موج قطبیده عمود بر هم شکافته می‌گردد. در مورد امواج تراکمی و برشی در جامدات درزه‌دار بخط شده یا درزه‌داری که بصورت کاتوره‌ای جهت یافته باشد نظرات مختلفی مطرح گردیده است (اوکانل و بودیانسکی، ۱۹۷۴؛ شونبرگ و دوما، ۱۹۸۸؛ دوما، ۱۹۸۹؛ تامسن^۱، ۱۹۸۶؛ هادسن، ۱۹۸۰ و ۱۹۸۱ و کرامپین، ۱۹۸۴).

هادسن (۱۹۸۰) ویژگیهای کلی جامدات درزه‌دار را بررسی کرد و در سال ۱۹۸۱ سرعت تضعیف امواج کشسان در مواد درزه‌دار را مورد بررسی قرار داد ولی درباره نظریات او کار عملی چندانی انجام نشده است. اسد و همکاران (۱۹۹۳) بخشی از کارهای هادسن که مربوط به درزه‌های بخط شده‌ای که از مواد ثانویه ضعیف پر شده بودند را با مدلی فیزیکی که بصورت آزمایشگاهی ساخته بودند، مورد بررسی قرار دادند. کار حاضر بررسی مقادیر سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های سنگ فیلیت که دارای درزه‌های بخط شده می‌باشند، بوده و شیوه کار مقایسه نتایج بدست آمده از محاسبات نظری و آزمایشگاهی است. در مرحله نظری، روابط هادسن مورد استفاده قرار گرفت و هدف از اینکار بررسی وجود رابطه‌ای بین پراکندگی امواج، در درزه‌های خشک برای زوایای مختلف بوده است.

روابط هادسن بر مبنای تقریب اول چگالی درزه بوده و در آنها درزه‌ها بصورت دایره‌هایی در نظر

میان بارها^۱، درزه‌ها، شکافتگی‌ها، شکافها، شکستگی‌های مختلف، لایه‌ها و محیط‌های لایه‌ای که در آنها لایه‌ها متناوبا از نظر ضخامت و چگالی متفاوت هستند، باشند. محیط‌هایی که دارای درزه‌های بخط شده باشند را می‌توان مانسته^۲ محیط‌های لایه‌ای که لایه‌ها متناوبا دارای خواص متفاوت باشند، دارای شکستگی‌های موازی یا میان بارها و محیط‌هایی که ناهمسانگردی عرضی دارند، در نظر گرفت.

شونبرگ و دوما^۳ (۱۹۸۸) نظریه‌هایی که ناهمسانگردی کشسانی را بعلت حضور میان بارهای بیضوی توخالی یا پر را در نظر می‌گیرند، پیش‌بینی و با یکدیگر مقایسه کردند و سپس با نظریه‌ای که ناهمسانگردی کشسانی را بدلیل درزه‌های موازی بلند یا شکستگی‌ها یا میان بارهای با نسبت عرضی کوچک (معمولا درزه‌های تخت) پیش‌بینی می‌کند، مقایسه نمودند. برای چگالی درزه‌های کم، مدل سازگاری خوبی را با نظریه نشان داد. کرامپین^۴ (۱۹۸۴) توسعه نظریه مربوط به تضعیف و انتشار امواج لرزه‌ای در محیط‌هایی با درزه‌های بخط شده را محاسبه کرد. نظرات متفاوتی درباره مطالب یاد شده در بالا توسط دیگران نیز ارایه شده است. اسده^۵ و همکارانش (۱۹۹۳) نشان دادند هنگامیکه چشمه و گیرنده در یک راستا و در مقابل هم هستند دامنه موج دریافتی بزرگتر از حالتی است که امتداد چشمه و گیرنده با امتداد عمود بر سطح نمونه دارای زاویه باشد، در مقابل فاز امواج مذکور تغییر نمی‌کند.

در محیط‌هاییکه درزه‌های بخط شده در آن واقع

1. inclusions
2. analogous
3. Schoenberg & Douma
4. Crampin
5. Ass'ad
6. Thomsen

$$V_{sh}^2 = \left(\frac{w}{K}\right)^2 = \beta^2 \left[1 - \frac{16}{3}(\varepsilon) \left\{ \frac{(\lambda + 2\mu)}{(3\lambda + 4\mu)} \cos^2 \theta \right\}\right] \quad (2)$$

$$V_{sv}^2 = \left(\frac{w}{K}\right)^2 = \beta^2 \left[1 - \frac{16}{3}(\varepsilon) \left\{ \frac{(\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{(\lambda + 2\mu)}{(3\lambda + 4\mu)} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 \right\}\right] \quad (3)$$

که در آنها کمیت α سرعت امواج تراکمی ماده زمینه و β سرعت امواج برشی ماده زمینه، ε چگالی درزه و λ و μ ضرایب لامه دینامیکی ماده همسانگرد زمینه است. θ زاویه ایست که بردار انتشار با محور بخت شدگی (متمم زاویه بردار انتشار با صفحات لایه‌ها) دارد. برای بدست آوردن مقدار سرعت گروه موج یا به بیان دیگر مقدار سرعت پرتو موج از رابطه پوستما^۱ (۱۹۵۵) و، ورنیک و لیو^۲ (۱۹۹۷) به قرار زیر استفاده شده است

$$S^2 = V^2 + \left(\frac{dv}{d\theta}\right)^2 \quad (4)$$

که در آن S مقدار سرعت پرتو موج و V سرعت فاز است یا به بیان ورنیک و لیو (۱۹۹۷) کمیت S سرعت پرتو و کمیت V سرعت پرتو عمود بر خط مماس بر جبهه موج است. و در رابطه (۵)

$$\tan \psi = \frac{1}{V} \frac{dv}{d\theta} \quad (5)$$

که ψ زاویه بین جهت انتشار سرعت امواج برشی V_s و تراکمی V_p می‌باشد.

با استفاده از رابطه (۴) و محاسبه مقادیر $\frac{dv}{d\theta}$

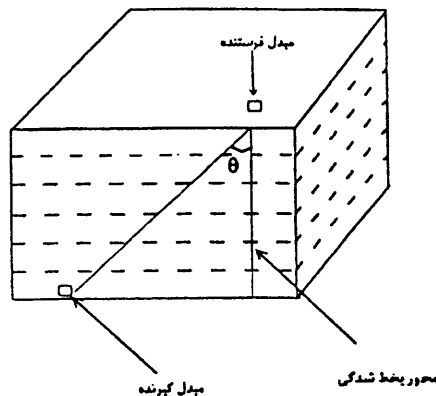
گرفته شده‌اند، هر چند اگر درزه‌ها بصورت بیضری نیز در نظر گرفته شوند تفاوت زیادی در نتایج ایجاد نمی‌شود. از بررسی نتایج بدست آمده لزوم بکارگیری تقریبهای دوم در روابط ارائه شده توسط هادسن (۱۹۸۱)، بعنوان راه حل برای مطالعه نمونه های با چگالی درزه بیشتر از ۱۰٪ پیشنهاد شده است. برای محاسبه چگالی درزه از روابط اوکانل و بودیانسکی (۱۹۷۴) استفاده شد و محاسبه مقدار سرعت نظری از طریق روابط هادسن (۱۹۸۰)، همان سرعت انتقال انرژی می‌باشد از سرعت گروه محاسبه می‌شود. و در روش تجربی برای محاسبه سرعت انتشار امواج کشسان سرعت گروه یا سرعت پرتو اندازه گیری می‌شود ولی در روش نظری برای محاسبه سرعت امواج کشسان از سرعت فاز که برابر $\frac{\omega}{K}$ می‌باشد استفاده میشود. در این مطالعه برای محاسبه سرعت پرتو از دیدگاه نظری روابط پوستما^۱ (۱۹۵۵) مورد استفاده قرار گرفته است.

۲ بررسی روابط موجود در مورد سرعت انتشار امواج کشسان و نظریه‌های بکار رفته روابط هادسن (۱۹۸۱) مقادیر نظری سرعت فاز امواج کشسان تراکمی و برشی را ازایه می‌کنند. روابط مذکور برای مواد درزه‌دار بخت شده خشک بصورت ذیل است

$$V_p^2 = \left(\frac{w}{K}\right)^2 = \alpha^2 \left[1 - \frac{4}{3}(\varepsilon) \left\{ \frac{(\lambda + 2\mu \cos^2 \theta)^2}{\mu(\lambda + \mu)} + \frac{16\mu}{3\lambda + 4\mu} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right\}\right] \quad (1)$$

۳ روش اندازه گیری و شرح دستگاه مورد استفاده

داده‌های تجربی از طریق اندازه گیری نمونه‌های سنگ فیلیت که از منطقه ویرانی حومه مشهد استخراج شده و دارای درزه‌های بخط شده مشخص هستند، بدست آمدند. درزه‌ها و بخط شدگی آنها در نمونه‌های مذکور با چشم معمولی قابل مشاهده بودند. نمونه‌ها بصورت مکعب مستطیل با طول ۱۷۵ تا ۲۰۶ و عرض ۵۶ تا ۶۹ و ارتفاع ۴۷ تا ۵۱ میلیمتر انتخاب شدند. دلیل انتخاب نمونه‌ها بصورت مکعب مستطیل برای ایجاد اتصال خوب مبدل‌های فرستنده و گیرنده به سطح نمونه‌ها می‌باشد تا بدین وسیله خطای حاصل از قرار گرفتن مبدل‌ها بر روی نمونه و لغزیدن آنها به حداقل ممکن برسد. زوایای تابش موج برای نمونه مطابق شکل ۱ نسبت به محور تقارن (عمود بر لایه بندی) صفر، ۳۰°، ۴۵°، ۶۰° و



شکل ۱. نمونه سنگی که به صورت مکعب مستطیل انتخاب شده است، محور بیخه شدگی و زاویه تابش θ مشخص شده‌اند. مبدل‌های فرستنده در بالا و گیرنده در پایین نمونه قرار گرفته‌اند، و آنها برای هر اندازه گیری در امتداد طول نمونه جایجا شده‌اند.

برای امواج تراکمی و برشی از روابط (۱)، (۲) و (۳)، وکیل (۱۳۷۷) روابط زیر را پیشنهاد نمود.

$$V_p^2 = V_p^2 + \frac{1}{4V_p^2} [\alpha^2 \left(\frac{4}{3}\right) (\epsilon)] \quad (6)$$

$$\left\{ \frac{4(\lambda + 2\mu \cos^2\theta) \sin^2\theta}{\lambda + \mu} - 2A \sin 4\theta \right\}^2$$

$$= V_{sh}^2 + \frac{\beta^4 S_{SH}^2}{4V_{SH}^2} (M \sin 2\theta) \quad (7)$$

$$= V_{sv}^2 + \frac{\beta^2 S_{SV}^2}{4V_{SV}^2} \left[\frac{16}{3} (\epsilon) \sin 4\theta \right]$$

$$\left\{ \frac{\lambda + 2\mu}{4(\lambda + \mu)} - \frac{2(\lambda + 2\mu)}{(3\lambda + 4\mu)} \right\}^2 \quad (8)$$

که در آنها

$$A = \frac{4\mu}{3\lambda + 4\mu} \quad (9)$$

و

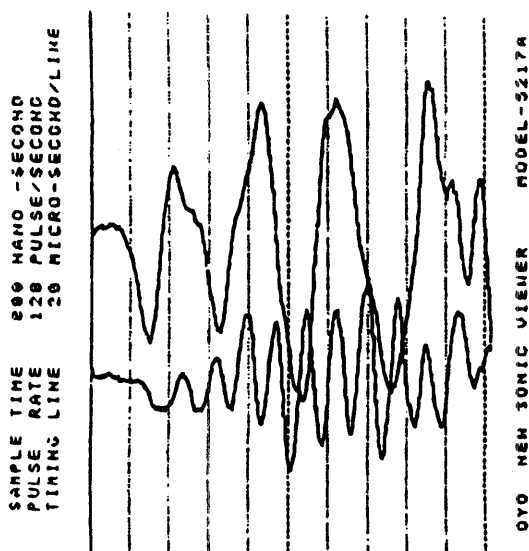
$$M = \frac{16}{3} (\epsilon) \frac{\lambda + 2\mu}{3\lambda + 4\mu} \quad (10)$$

می‌باشد. پس از به دست آوردن مقدار $\frac{V_p}{V_s}$ مقدار $\frac{\lambda}{\rho} = V_p^2 - 2V_s^2$ و $\frac{\mu}{\rho} = V_s^2$ جایگزین شده که در نتیجه مقدار ρ در تمام روابط بالا حذف می‌گردد و بر حسب سرعت‌های V_p و V_s محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن چگالی درزه ϵ یا C.D. از روش اوکانل و بودیانسکی (۱۹۷۴) استفاده شده است. بنابراین مقدار ϵ یا C.D. برابر است با

$$C.D. = \epsilon = \frac{45}{16} \frac{(\bar{v} - \bar{v}') (2 - \bar{v}')}{(10 - \bar{v}') (10 \bar{v} - 3\bar{v}' - \bar{v}')} \quad (11)$$

که در آن \bar{v} ضریب پواسن ماده زمینه و \bar{v}' ضریب پواسن ماده‌ای است که درزه‌ها از آن پر شده باشند.

آزمایشگاهی شکل ۲، در جدول ۱ آورده شده است، بطوریکه مقادیر جدول، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر زاویه بر روی هر نمونه می‌باشد. چون برای هر زاویه بخصوص بر روی هر نمونه با جابجایی جای مبدل‌های گیرنده و فرستنده حداقل دو مقدار بدست می‌آید و از طرفی برای زاویه صفر درجه نسبت به محور تقارن (90° نسبت به سطح لایه‌ها) چهار مقدار اندازه‌گیری حاصل می‌شود، بدین جهت میانگین این مقادیر در هر مورد در نظر گرفته شده است. در نهایت برای هر نمونه میانگین سرعت امواج تراکمی V_p و برشی



شکل ۲. نگاشت ثبت شده برای حالتی که چشمه و گیرنده در یک راستا و در مقابل هم هستند (تریس بالایی). تریس پایین حالتی است که امتداد چشمه و گیرنده با امتداد عمود بر سطح نمونه دارای زاویه 30° باشد. چنانکه مشاهده می‌شود دامنه موج دریافتی تریس بالایی بزرگتر از تریس پایینی می‌باشد. شایان ذکر است که در مورد تریس بالایی ۴ بار برانبارش و برای تریس پایینی ۷ بار برانبارش صورت گرفته است.

90° برشی می‌باشد. برای بدست آوردن سرعت امواج برشی در ماده زمینه در نمونه‌ها مقدار سرعت امواج برشی تأیید شده در امتداد موازی لایه‌ها (90°) در نظر گرفته شده است. حداکثر مقدار سرعت امواج تراکمی اندازه گرفته شده را سرعت موج تراکمی ماده زمینه در نظر گرفتیم. میانگین سرعت امواج برشی هر نمونه محاسبه شد و بهمین ترتیب میانگین سرعت موج تراکمی و سپس از نسبت $\frac{V_p}{V_s}$ آنها ضرایب پواسن هر نمونه محاسبه شده است. برای محاسبه چگالی درزه، دو روش، یکی روش میکروسکوپ الکترونیکی که توسط هادلی^۱ (۱۹۹۶) استفاده شد و دیگری روش اوکانل و بودیانسکی (۱۹۷۴) بکار می‌رود. در مطالعه حاضر بعلمت در اختیار نداشتن میکروسکوپ الکترونیکی روش اخیر برگزیده شد.

دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی از نوع Sonic Viewer مدل ۵۲۱۷-A ساخت کارخانه OYO کشور ژاپن می‌باشد. امواج تولید شده توسط پیچه دستگاه از نوع امواج تخت می‌باشد. گستره زمانی نمونه‌گیری از $80 \mu s$ تا $80 ms$ بوده و بسامدهای بکار رفته در مبدل‌ها برای امواج تراکمی $63 KHz$ و برای امواج برشی $33 KHz$ می‌باشد. بسامدهای مورد اشاره با در نظر گرفتن تقریب هادسن (۱۹۸۰) در صورتیکه $K.a \ll 1$ باشد قابل قبول می‌باشند، بطوریکه K عدد موج و a شعاع دایره درزه می‌باشد.

۴ داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری در آزمایشگاه
داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیریهای

1. Hadly

و نمونه دارای چگالی درزه ۱۵٪ است، سرعت موج P دارای کمترین مقدار نسبت به نمونه های دیگر با چگالی درزه کمتر می باشد. این کاهش مقدار سرعت باتوجه به رابطه ۱ صحیح است. اما

V_{S2} و V_{S1} محاسبه شده و در جدول ۱، آورده شده است. در این جدول $S1$ و $S2$ بجای SH و SV آورده شده اند. چنانکه در جدول مذکور ملاحظه می شود وقتی که موج تحت زاویای 0° تا 45° می تابد

جدول ۱. نتایج سرعت های امواج برشی و تراکمی به روش تجربی، تابعی از زاویه تابش θ و چگالی درزه (C.D.).

چگالی درزه (C.D.) به درصد	زاویه θ (درجه)	V_p (m/s)	V_{S1} (m/s)	V_{S2} (m/s) (ترپس یابینی)	نسبت میانگین V_p/V_s
۵	۰	۴۲۹۷	۲۵۱۳	۲۳۳۶	۱/۸۳۴
	۳۰	۴۵۱۸	۲۳۰۴	۲۵۱۳	
	۴۵	۴۲۳۰	۲۳۶۵	۲۴۱۸	
	۶۰	۴۷۶۵	۲۶۴۹	۲۷۷۵	
	۹۰	۴۸۶۴	۲۷۳۴	۲۵۱۳	
۸/۳	۰	۳۷۶۴	۲۶۰۳	۲۶۱۲	۱/۶۹۷
	۳۰	۴۲۴۸	۲۷۹۸	۲۸۵۳	
	۴۵	۴۳۱۶	۲۵۸۲	۲۱۳۹	
	۶۰	۴۹۷۴	۲۸۹۲	۲۳۲۰	
	۹۰	۵۷۱۸	۳۱۲۱	۲۸۱۹	
۱۱/۱	۰	۳۹۸۱	۲۷۶۲	۲۶۶۸	۱/۸۴۰
	۳۰	۳۹۸۸	۲۵۵۵	۳۱۸۱	
	۴۵	۴۸۹۷	۲۶۳۳	۲۳۸۱	
	۶۰	۴۲۴۳	۳۱۱۸	۲۳۰۸	
	۹۰	۵۸۸۵	۲۹۸۴	۲۴۵۱	
۱۴/۳	۰	۴۱۴۳	۲۸۳۳	۲۷۷۵	۱/۹۲۵
	۳۰	۳۶۷۱	۲۶۰۵	۲۳۹۷	
	۴۵	۳۹۸۴	۲۶۴۱	۲۶۵۰	
	۶۰	۴۵۱۵	۲۷۳۰	۲۵۷۰	
	۹۰	۵۷۹۶	۳۱۶۵	۲۷۷۵	
۱۵	۰	۳۸۵۵	۲۷۳۲	۱۶۴۰	۱/۶۱۶
	۳۰	۳۱۱۲	۲۵۹۰	—	
	۴۵	۳۶۳۶	۲۷۶۶	—	
	۶۰	۴۲۷۱	۲۹۷۵	—	
	۹۰	۵۲۲۸	۳۴۶۱	—	

در زوایای 90° و 0° برابر با 0% و $7/3\%$ و برای موج SV بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با 0% و $7/5\%$ بوده است.

برای نمونه های با چگالی درزه $1/11$ حداقل و حداکثر اختلاف برای موج P بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $9/3\%$ و $3/4\%$ و برای موج SH در زوایای 90° و 0° برابر با 6% و 0% و برای موج SV بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $8/2\%$ و $1/10\%$ بوده است.

برای نمونه های با چگالی درزه $1/14$ حداقل و حداکثر اختلاف برای موج P بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $8/8\%$ و $4/5\%$ و برای موج SH در زوایای 90° و 0° برابر با 0% و $8/7\%$ و برای موج SV بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $1/3\%$ و $6/7\%$ بوده است.

برای نمونه های با چگالی درزه $1/15$ حداقل و حداکثر اختلاف برای موج P بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $3/2\%$ و $7/2\%$ و برای موج SH در زوایای 90° و 0° برابر با 0% و $1/1\%$ بوده است. چون نمونه در موقع اندازه گیری سرعت SV تحت فشار اهرم دو طرف گیرنده و فرستنده تخریب گردید امکان اندازه گیری برای این حالت میسر نشد.

شایان ذکر است، در مواردی که مقادیر سرعت بروش نظری و اندازه گیری خیلی نزدیک به یکدیگر بدست آمده است، اختلاف 0% در نظر گرفته شده است.

۶ اختلاف بین مقادیر اندازه گیری و محاسبه

سرعت از دیدگاه آزمایش و نظریه

برای امواج تراکمی اختلاف مقادیر اندازه گیری شده سرعت و مقادیر متناظر محاسبه شده آنها

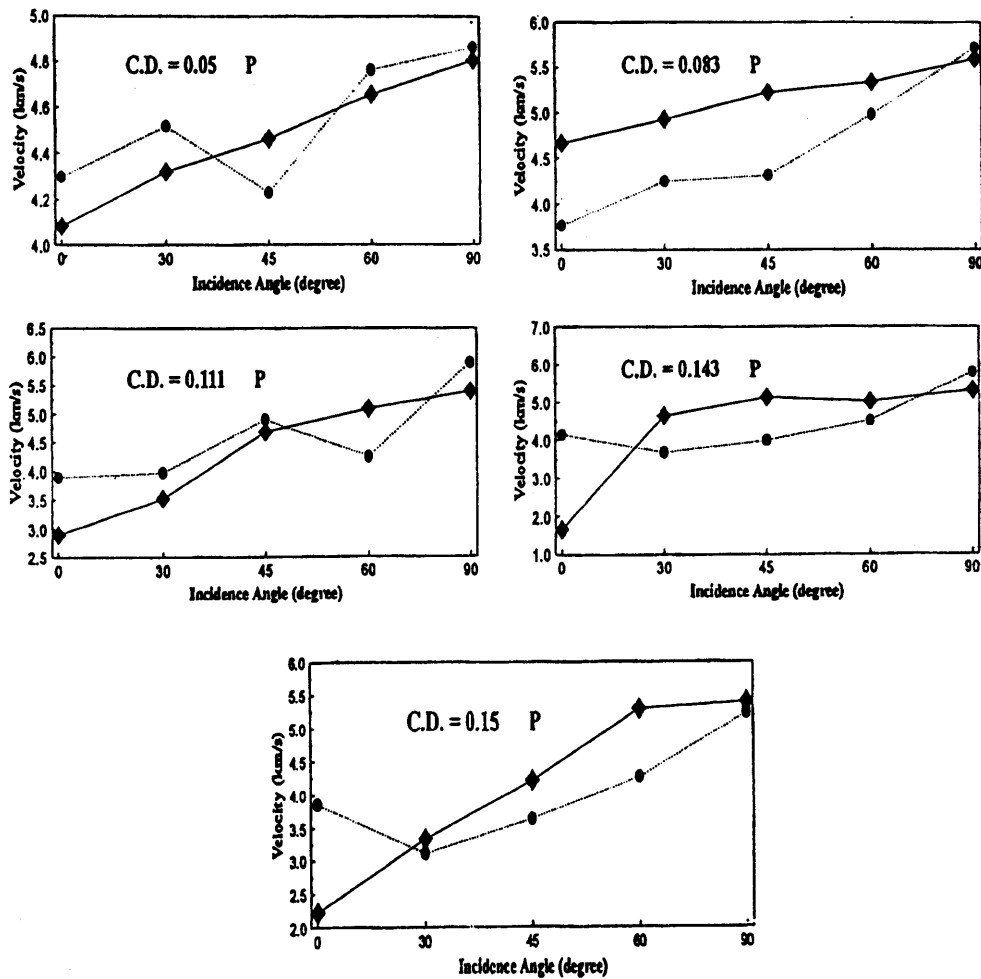
برای زوایای تابش 60° و 90° مقادیر مذکور با تغییراتی همراه است. از طرف دیگر برای حالتی که موج با زاویه 90° می تابد نسبت به حالتیکه با زاویه 0° می تابد، کمترین درزه و یا به بیانی دیگر کمترین پراکنندگی انرژی اتفاق می افتد. بنابراین بعلت کمتر مشاهده شدن درزه ها برای زاویه تابش 90° مقدار سرعت بدست آمده بیشتر از تابش با زاویه 0° خواهد بود (اسد و دیگران، ۱۹۹۳). در نتیجه برای حالتیکه ماده از چگالی درزه کمتری ($1/5$) برخوردار است، اختلاف بین مقادیر سرعت برای تابش 90° و 0° کم می باشد، در صورتیکه اگر ماده از چگالی درزه بیشتری ($1/15$) برخوردار باشد اختلاف مورد اشاره بین مقادیر سرعت زیاد است (جدول ۱).

۵ نتایج حاصل از اندازه گیری ها

مقادیر سرعت در نمونه های مختلف بدست آمده تحت زوایای متفاوت در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. برای نمونه های با چگالی درزه های مختلف مقادیر حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر نظری سرعت که بعد از این با واژه اختلاف بیان می شود بترتیب زیر است.

برای نمونه های با چگالی درزه $1/5$ حداقل و حداکثر اختلاف برای موج P بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $1/1\%$ و 5% و برای موج SH در زوایای 90° و 0° برابر با $2/9\%$ و 0% و برای موج SV بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $2/9\%$ و $3/9\%$ بوده است.

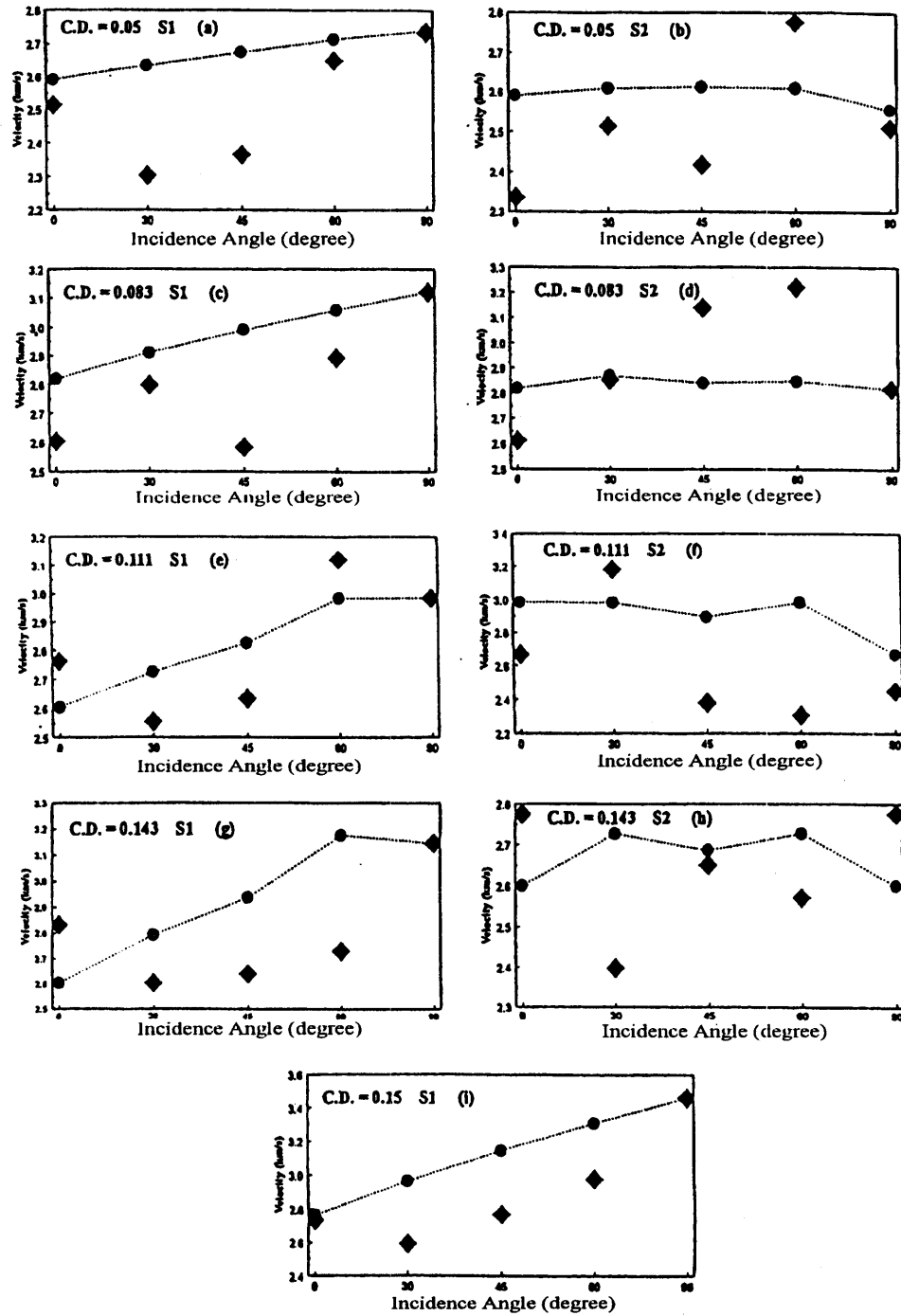
برای نمونه های با چگالی درزه $1/8$ حداقل و حداکثر اختلاف برای موج P بترتیب در زوایای 90° و 0° برابر با $2/2\%$ و $19/3\%$ و برای موج SH



شکل ۳. نمودارها نشاندهنده مقادیر سرعت امواج تراکمی در سنگهای مورد آزمایش می‌باشند. در این نمودارها مربع مستطیل‌هایی که توسط خط پر به هم متصل شده‌اند مقادیر اندازه‌گیری شده و دایره‌هایی که توسط خط چین به هم متصل شده‌اند مقادیر سرعت محاسبه شده به طریق نظری می‌باشند. چگالی درزه (ε) با حرف C.D. در داخل نمودارها مشخص شده‌اند. نمونه‌ها از منطقه ویرانی مشهد استخراج شده‌اند.

چگالی‌های درزه بالاتر تقریبهای دوم C.D. را در فرمولهای هادسن (۱۹۸۱) باید در نظر گرفت. همچنین گستره اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای، امواج SH و امواج SV در محدوده اختلاف چگالی درزه ۵ تا ۱۵ درصد نیز در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در این جدول،

چنانکه از جدول ۲ مشاهده می‌شود بستگی کامل به چگالی درزه داشته که نتایج نمونه‌های با چگالی درزه زیر ۱۱/۱ درصد با تقریب اول نظریه هادسن نیز قابل قبول به نظر می‌رسند. البته باید در نظر داشت که روابط هادسن برای چگالی درزه کمتر از ۱۰٪ در نظر گرفته شده است بنابراین برای حالت



شکل ۴. نمودارهای a, b, c, g, e, b برای امواج SH و نمودارهای d, f, h برای امواج SV برای سنگهای با چگالی درزه (C.D. یا ε) به ترتیب ۰.۰۵، ۰.۰۸۳، ۰.۱۱۱، ۰.۱۴۳ و ۰.۱۵ تهیه شده‌اند. در این نمودارها مربع مستطیل‌ها نشان‌دهنده مقدار سرعت‌های اندازه‌گیری شده و دایره‌هایی که توسط خط چین به هم متصل شده‌اند مقادیر سرعت محاسبه شده به طریق نظری را نشان می‌دهند. نمونه‌ها از منطقه ویرانی مشهد استخراج شده‌اند.

جدول ۲. اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده سرعت از دیدگاه آزمایش و نظری حاصل از زاویای تابش θ و چگالی های درزه (C.D.).

حالت الف: امواج تراکمی P، اختلاف مقادیر اندازه گیری شده سرعت و مقادیر متناظر محاسبه شده.		حالت ب: امواج برشی از نوع SH، اختلاف مقادیر اندازه گیری شده سرعت و مقادیر متناظر محاسبه شده.		حالت ج: امواج برشی از نوع SV، اختلاف مقادیر اندازه گیری شده سرعت و مقادیر متناظر محاسبه شده.	
چگالی درزه (C.D.)	گستره اختلاف به درصد	چگالی درزه (C.D.)	گستره اختلاف به درصد	چگالی درزه (C.D.)	گستره اختلاف به درصد
۵	۵/۲-۱/۱	۵	۱۲/۴-۲/۳	۵	۹/۸-۳/۷
۸/۳	۱۹/۴-۶	۸/۳	۱۳/۶-۸/۳	۸/۳	۱۰/۴-۶/۴
۱۱/۱	۳۴-۴/۷	۱۱/۱	۶/۸-۴/۵	۱۱/۱	۲۲-۸/۲
۱۴/۳	۴۹/۵-۸/۸	۱۴/۳	۱۴-۶/۷	۱۴/۳	۸/۷-۱/۳
۱۵	۷۲-۳/۲	۱۵	۱۲/۵-۱/۱	—	—

اختلاف مقادیر سرعت امواج برشی اندازه گیری شده و محاسبه شده برای نمونه های با چگالی درزه زیر ۱۱/۱ درصد با توجه به تقریب اول نظریه هادسن قابل قبول بنظر می رسد.

۷ بحث

از مقایسه نتایج بدست آمده با استفاده از نظریه هادسن و نتایج حاصل از آزمایش ها موارد زیر را می توان مورد بحث و بررسی قرار داد؛ برای هر دو مولفه امواج برشی SH (S_1) و SV (S_2) در چگالی های درزه های مختلف دو مورد جذب را بررسی می کنیم. در حالت اول جهت انتشار انرژی موج برشی موازی با محور تقارن (موج با فرود 0°) می باشد. در این حالت تعداد بیشتری از درزه ها دیده می شوند. یا به بیان دیگر سرعت انتقال انرژی کمترین حالت را دارد. زیرا موج بیشترین پراکندگی را داشته و با افزایش چگالی درزه جذب انرژی افزایش پیدا می کند و محیط پاشنده ای ایجاد می شود که روی شکل موج تاثیر می گذارد. بهمین

جهت در این حالت بین نتایج آزمایش و نتایج نظری واگرایی محسوسی مشاهده گردید. در حالت دوم وقتی که جهت انتشار امواج برشی عمود بر محور تقارن است (موازی لایه ها) سرعت انتقال انرژی بیشترین مقدار را داشته و بیشترین تعداد از درزه ها مخفی می شوند و سرعت انتشار امواج نزدیک به مقدار سرعت در محیط همسانگرد زمینه می گردد. در این حالت امتداد انتشار امواج برشی موازی درزه ها بوده و در نتیجه تعداد کمتری از درزه ها دیده می شوند و به علت رفتارهای کشسانی محیط پاشیده نمی گردند.

وقتی چگالی درزه بالا است، اندرکنش درزه با درزه ایجاد شده و بنظر می رسد که شانس پراکندگی چندگانه و بازتابهای غیر شکافتی بالا رفته و در نتیجه شکل موج تغییر می کند. بطور کلی با مقایسه مقادیر سرعت های اندازه گیری شده و محاسبه شده برای نمونه های با چگالی درزه های مختلف که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است، مشاهده می گردد که هر چه چگالی درزه

تشکر و قدردانی

از شورای محترم پژوهشی دانشگاه تهران بخاطر کمک مالی در قالب طرح تحقیقاتی به شماره ۶۵۱/۱/۳۸۱ سپاسگزاری می‌شود. بر خود لازم می‌دانیم که از مسئولین موسسه ژئوفیزیک که در زمینه در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاه فیزیک سنگ موسسه ژئوفیزیک، همکاری صمیمانه نمودند قدردانی نماییم.

منابع

- وکیل، م، ۱۳۷۷، بررسی پراکندگی امواج کشسان در سنگهای با چگالی درزه کم: پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- Ass'ad, J.M., Tatham, R.H., McDonald, J.A., Kusky, T.M., and Jech, J., 1993, A physical model study of scattering of waves by aligned cracks: comparison between experiment and theory: *Geophysical Prospecting*, **41**, 323-339.
- Crampin, S., 1984, Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **76**, 135-145.
- Douma, J., 1989, The representability of cracked media by periodically layered media: *Geophysical Prospecting*, **37**, 831-849.
- Hadly, K., 1996, Comparison of calculated and observed crack densities and seismic velocities gradient: *J. Geophys. Res.*, **61**, 3484-3494.

کمتر باشد مقدار اندازه گیری شده به مقدار محاسبه شده سرعت نزدیک تر است. البته عوامل دیگری مانند ناخالصی ها در داخل سنگ و یکسان نبودن ماده زمینه نیز خود می تواند مولد خطا باشد.

۸ نتیجه گیری

در چگالی درزه های کمتر از ۱/۱۱٪ یک سازگاری نسبی بین نتایج حاصله از نظریه و آزمایش مشاهده می گردد. با در نظر گرفتن اینکه محیط زمینه از نظر جنس یا میان بارها همسانگرد کامل نیست پس خطاهای احتمالی مشاهده شده می تواند مربوط به این واقعیت باشد. وقتی که راستای ارتعاش ذرات موازی محور تقارن و زاویه بین امتداد انتشار انرژی نسبت به محور تقارن 90° است (موازی درزه ها)، مولفه SH نسبت به شدت چگالی درزه ها تقریباً غیر حساس می باشد. در صورتی که مولفه SV نسبت به درزه ها حساس بوده و می تواند ناشی از شدت تغییرات جانبی ماده زمینه و یا درزه ها باشد.

برای امواج تراکمی (P) اختلاف بین نظریه و آزمایش در چگالی درزه ۵٪ شروع و در چگالی درزه بالاتر این اختلاف بیشتر مشاهده گردید که حداکثر مقدار اختلاف مربوط به چگالی درزه ۱۵٪ بود. البته برای چگالی درزه ۳/۱۴٪، بدون در نظر گرفتن مقدار مربوط به زاویه تابش 0° که برابر ۴۵/۵٪ بود و این ناشی از پراکندگی شدید موج است، اختلاف بدست آمده نزدیک به چگالی درزه ۳/۸٪ بود. در حالتی که انرژی امواج منتشر شده موازی درزه ها بود، همانطور که انتظار می رفت سرعت بدست آمده نزدیک به مقدار سرعت انتشار موج در محیط زمینه است.

- Hudson, J.A., 1980, Overall properties of cracked solid: *Mathematical Proceedings of Cambridge Philosophical Society*, **88**, 371-384.
- Hudson, J.A., 1981, Wave speed and attenuation of elastic waves in material containing cracks: *Geophysical Journal of the Royal Society*, **64**, 133-150.
- O'Connell, R.J., and Budiansky, B., 1974, Seismic velocities in dry and saturated cracked solids: *J. Geophys. Res.*, **82**, 5719-5735.
- Postma, G.W., 1955, Wave propagation in stratified medium: *Geophysics*, **20**, 780-806.
- Schoenberg, M., and Douma, J., 1988, Elastic wave propagation in media with parallel fractures aligned cracks: *Geophysical Prospecting*, **36**, 571-590.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, 1953-1966.
- Vernik, L., and Liu, X.Z., 1997, Velocity anisotropy in shales: a petrophysical study: *Geophysical Prospecting*, **62**, 521-532.