

اثر بسامد بر پاشندگی سرعت انتشار امواج کشاینندی در نمونه‌های ماسه سنگ و سنگ آهک منطقه چابهار در حالت‌های خشک و اشباع

مجید نبی بیدهندی* و محمود فتحی**

چکیده

در این پژوهش اثر بسامد بر پاشندگی سرعت انتشار امواج کشاینندی (تراکمی و برشی) بر روی چندین نمونه از سنگ آهک و ماسه سنگ منطقه چابهار در فشار جو در دو حالت خشک و اشباع بررسی گردیده است. پاشندگی سرعت امواج تراکمی بر روی کلیه نمونه‌ها در هر دو حالت خشک و اشباع، تحت بسامدهای ۶۳، ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز و برای امواج برشی تحت بسامدهای ۳۳ و ۱۰۰ کیلوهرتز اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که سرعت انتشار امواج تراکمی در هر دو حالت خشک و اشباع با افزایش بسامد افزایش می‌یابد و نرخ تغییرات سرعت نسبت به بسامد در هر دو حالت خشک و اشباع در بسامدهای ۶۳ و ۲۰۰ کیلوهرتز نسبت به بسامدهای ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز بیشتر می‌باشد. سرعت انتشار امواج برشی نیز در هر دو حالت خشک و اشباع غالباً با افزایش بسامد اضافه می‌شود، اگر چه در برخی موارد پاشندگی سرعت منفی مشاهده می‌شود. برای هر دو موج تراکمی و برشی میزان پاشندگی سرعت در حالت اشباع بیشتر از میزان پاشندگی در حالت خشک می‌باشد. در بسامدهای مختلف سرعت امواج تراکمی در حالت اشباع بیشتر از حالت خشک می‌باشد. ولی برای امواج برشی در برخی نمونه‌ها سرعت در حالت اشباع کمتر از حالت خشک است. با استفاده از اندازه‌گیری سرعت، ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی (Q_s و Q_p) در دو بسامد مختلف محاسبه شد که نتایج نشان می‌دهد که مقادیر Q_s و Q_p حالت خشک بزرگتر از این مقادیر برای حالت اشباع می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: پاشندگی سرعت، ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی، سرعت امواج تراکمی و برشی

۱ مقدمه

همانطور که میدانیم سرعت امواج کشاینندی عموماً در سنگهای اشباع از سیال با تغییر بسامد همبستگی دارد، که این پدیده پاشندگی سرعت نامیده می‌شود. اگر با افزایش بسامد سرعت افزوده شود، پاشندگی مثبت و در غیر این صورت پاشندگی منفی می‌باشد (گوپا^۱ و همکاران، ۱۹۹۴، وینکلر^۲، ۱۹۸۶، مولر^۳، ۱۹۹۱، پابن^۴، ۱۹۹۲).

معمولاً سه محدوده بسامدی مجزا برای امواج کشاینندی در اکتشافات ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محدوده برای امواج لرزه‌ای $10-200\text{ Hz}$ ، در نگاره‌های صوتی $1-100\text{ kHz}$ و در مافوق صوت و آزمایشگاهی

$1\text{ MHz}-10$ می‌باشد (ونگ و نور^۵، ۱۹۹۰). علاوه بر بسامد، عوامل دیگری چون دما، فشار، تخلخل، درصد اشباع سیال و گرانیروی سیال نیز بر روی پاشندگی سرعت امواج کشاینندی در سنگها تأثیر می‌گذارند (ویسنکلر، ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵، بست^۶، ۱۹۹۷، شو و وایت^۷، ۱۹۹۶، گلدبرگ و گانت^۸، ۱۹۸۸، بلنگی^۹ و همکاران، ۱۹۹۳ و هن^{۱۰} و همکاران، ۱۹۸۶). لذا لازم است که پاشندگی سرعت در بسامدهای مختلف و به خصوص تحت شرایط فیزیکی متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. بسیاری از خواص فیزیکی سنگها مانند سرعت،

1. Gopa
3. Mueller
5. Wang & Nur
7. Xu & White
9. Blangy

2. Winkler
4. Payne
6. Best
8. Goldberg & Gant
10. Han

* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۶۴۶۶، تهران.
** دانشگاه امام حسین (ع)، پژوهشکده علوم دفاعی استراتژیک، گروه سنجش از دور.

قبل از اندازه‌گیری سرعت، ابتدا ابعاد نمونه‌ها به دقت اندازه‌گیری شده و برای اندازه‌گیری وزن خشک آنها، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در یک آون الکتریکی در دمای 70°C نگهداری شده و پس از خروج از آون الکتریکی توزین شده‌اند. سپس با استفاده از روش اولین زمان رسید موج، سرعت امواج تراکمی (V_p) در بسامدهای ۶۳، ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز و سرعت امواج برشی (V_s) در بسامدهای ۳۳ و ۱۰۰ کیلوهرتز اندازه‌گیری شده است.

پس از اتمام اندازه‌گیری سرعت در نمونه‌های خشک، همه آنها در یک مخزن آب به مدت چهار روز قرار داده شدند تا کاملاً از آب اشباع شوند. اندازه‌گیری سرعت در نمونه‌های مزبور در همان بسامدهای حالت خشک صورت گرفته است. اگر چه برای اشباع کامل نمونه سنگ، باید سیال مربوطه با فشار لازم در نمونه تزریق شود، اما به علت عدم امکانات این کار میسر نبود. لیکن با توجه به تخلخل نسبتاً بالای نمونه‌های مورد آزمایش، احتمال اشباع کامل معقول بنظر می‌رسد. برای اندازه‌گیری سرعت از دستگاه سونیک ویور^۱ مدل ۵۲۱۷۸ استفاده شده که شرح دستگاه و روش اندازه‌گیری توسط نبی بیدهندی و کوثریان (۱۳۷۷) ارائه شده است.

۳ روش محاسبات

۳-۱ روش محاسبه پاشندگی سرعت

برای محاسبه پاشندگی سرعت امواج تراکمی و برشی در بسامدهای f_1 و f_2 ($f_1 > f_2$) از رابطه پاشندگی گویا (۱۹۹۴) استفاده شده است

$$\text{درصد پاشندگی سرعت} = \frac{V_{f_1} - V_{f_2}}{V_{f_1}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن V_{f_1} سرعت اندازه‌گیری شده در بسامد f_1 و f_2 سرعت اندازه‌گیری شده در بسامد f_2 می‌باشند. f_1 و f_2 برای امواج تراکمی به ترتیب ۶۳ و ۲۰۰ کیلوهرتز و برای امواج برشی ۳۳ و ۱۰۰ کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع بکار رفته است.

وینکلر (۱۹۸۵) با استفاده از نتایج بیوت^۵ (a و b) (۱۹۵۶)

نفوذپذیری، هدایت الکتریکی، تخلخل، تراوایی و اشباع آب را می‌توان در آزمایشگاه با ایجاد شرایط برجا اندازه‌گیری نموده و سپس به طور تجربی روابط بین آنها را بدست آورد، که لزوماً تمامی این روابط از داده‌های حاصل از چاه‌نگاری یا لرزه‌نگاری بدست نمی‌آیند یا بدست آوردن آنها مستلزم صرف هزینه‌های زیاد می‌باشد. لذا به منظور به کارگیری و یا مدل‌سازی روابط آزمایشگاهی در نتایج صحرایی یا چاه، به خصوص روابطی که در آنها سرعت انتشار امواج حائز اهمیت است، دانستن پاشندگی سرعت ضروری است. همچنین برای مواردی که استفاده از روش لرزه‌نگاری یا چاه‌نگاری مشکل یا غیر ممکن است با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و دانستن مقدار پاشندگی سرعت، می‌توان این نتایج را به نتایج صحرایی یا چاه تعمیم داده و سرعت انتشار امواج در چاه را تخمین زد (گوتز^۱ و همکاران، ۱۹۷۹، استوارت^۲ و همکاران، ۱۹۸۴، مورفی^۳ و گویا و همکاران، ۱۹۹۴).

در این مقاله ابتدا به طور مختصر روش کار آزمایشگاهی، دستگاه اندازه‌گیری سرعت و روش‌های محاسبه پاشندگی سرعت و ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی ذکر گردیده، سپس پاشندگی سرعت امواج تراکمی و برشی در هر دو حالت خشک و اشباع تحت بسامدهای مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته و ضریب کیفیت امواج در هر دو حالت خشک و اشباع محاسبه شده است. آنگاه نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با کارهای انجام شده توسط دیگران مقایسه و در نهایت نتایج ذکر شده است.

۲ نمونه‌های مورد آزمایش و روش کار آزمایشگاهی

نمونه‌های مورد آزمایش شامل پنج نمونه ماسه سنگ و پنج نمونه سنگ آهک از منطقه چابهار بوده که به اشکال استوانه‌ای و مکعبی تهیه شده‌اند. طول نمونه‌های ماسه سنگ ۲/۳۸-۲/۴۸ میلی متر، چگالی خشک آنها ۲/۳۸-۲/۴۸ گرم بر سانتیمتر مکعب و تخلخل آنها ۵/۴-۶/۲ درصد می‌باشد. طول نمونه‌های سنگ آهک ۷۵/۳۰-۵۰/۲۰ میلی متر، چگالی خشک آنها ۱/۸۴-۱/۵۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و تخلخل آنها ۱۱/۹-۲۰/۷ درصد می‌باشد.

1. Goetz
3. Murphy
5. Biot

2. Stewart
4. Sonicviewer

$$V_{p2}^2 = \frac{A + [A^2 - 4B(PR - Q^2)]^{\frac{1}{2}}}{2B} \quad (۸)$$

که در آن V_{p2} و V_{s2} به ترتیب سرعت امواج برشی و تراکمی سنگ در حالت اشباع و در بسامد بالا می‌باشند و مقادیر A, B, P, R, Q که به خصوصیات فیزیکی سنگ بستگی دارند، توسط جانسون و پلونا^۱ (۱۹۸۲) تعریف شده‌اند.

با توجه به روابط (۴) و (۷) در مقایسه با رابطه (۲) انتظار می‌رود که با توجه به افزایش چگالی کل سنگ در حالت اشباع، سرعت انتشار امواج برشی در حالت اشباع کمتر از سرعت آن در حالت خشک باشد. این پیش‌بینی همیشه درست نیست، زیرا وقتی که سنگ اشباع می‌شود، جفت شدگی بین ذرات جامد سنگ بهتر شده و سبب افزایش سرعت می‌گردد و در برخی موارد ممکن است اثر افزایش سرعت ناشی از جفت شدگی بیش از کاهش سرعت ناشی از افزایش چگالی باشد و در نتیجه سرعت در حالت اشباع بیشتر از سرعت در حالت خشک شود (مورفی، ۱۹۸۵).

همچنین با توجه به روابط (۶) و (۸) در مقایسه با رابطه (۳) نیز مشاهده می‌شود که در بسامد پایین و نیز در بسامد بالا، سرعت امواج تراکمی در حالت اشباع بیشتر از سرعت در حالت خشک است، زیرا مدول بالک در حالت اشباع افزایش می‌یابد. همچنین انتظار می‌رود که در محدوده بسامدهای بالا سرعت انتشار امواج نسبت به محدوده بسامدهای پایین افزایش یابد (وینکلر، ۱۹۸۶).

۲-۳ روش محاسبه ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی (Q_s و Q_p)

برای محاسبه ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی در بسامدهای f_1 و f_2 ($f_1 > f_2$) از رابطه زیر استفاده شده است (گوپا و همکاران، ۱۹۹۴)

$$Q = (1/\pi) [V_{f_2}/(V_{f_1} - V_{f_2})] \ln(f_1/f_2) \quad (۹)$$

که در آن، V_{f_1} و V_{f_2} به ترتیب سرعت‌های اندازه‌گیری شده

سرعت امواج برشی و تراکمی در محدوده بسامدهای پایین (به سمت صفر) در سنگها را به شرح زیر بیان می‌کند

$$V_{s0}^2 = \frac{N}{(1-\phi)\rho_s} \quad (۲)$$

$$V_{p0}^2 = \frac{k_b}{(1-\phi)\rho_s} + \frac{4}{3} V_{s0}^2 \quad (۳)$$

که در آنها، V_{p0} و V_{s0} به ترتیب سرعت امواج برشی و تراکمی در حالت خشک و در بسامد پایین، N و k_b به ترتیب مدول برشی و مدول بالک سنگ خشک، ϕ تخلخل و ρ_s چگالی قسمت جامد سنگ می‌باشند. سرعت امواج برشی در محدوده بسامد پایین و در حالت اشباع (V_{s1}) از رابطه زیر به دست می‌آید

$$V_{s1}^2 = N/\rho_c \quad (۴)$$

که در آن ρ_c چگالی کل مجموعه سنگ اشباع شده از سیال می‌باشد یعنی

$$\rho_c = (1-\phi)\rho_s + \phi\rho_f \quad (۵)$$

که در آن ρ_f چگالی سیال اشباع کننده سنگ می‌باشد. همچنین برای سرعت امواج تراکمی و در محدوده بسامد پایین و در حالت اشباع (V_{p1}) داریم

$$V_{p1}^2 = (k_s - k_b)^2 / \left\{ \rho_c k_s \left[1 - \phi - (k_b/k_s) + \phi (k_s/k_f) \right] \right\} + \frac{k_b}{\rho_c} + \frac{4}{3} \frac{N}{\rho_c} \quad (۶)$$

که در آن k_s و k_f به ترتیب مدول بالک ماده جامد و سیال اشباع کننده خلل و فرج سنگ می‌باشند.

وینکلر (۱۹۸۵) همچنین سرعت امواج برشی و تراکمی در محدوده بسامدهای بالا (مافوق صوت) در سنگهای اشباع از سیال را بصورت زیر بیان می‌دارد

$$V_{s2}^2 = \frac{N}{(1-\phi)\rho_s + [1-(1/\alpha)]\phi\rho_f} \quad (۷)$$

که در آن α ضریب پیچایی بدون بعد است که به شکل حفره‌های سنگ بستگی دارد

آهک اندازه گرفته شده‌اند. البته لازم به ذکر است که این تحقیقات بر روی نمونه‌های سنگی شیل، آندزیت و بازالت نیز صورت گرفته است (فتحی، ۱۳۷۷).

۱-۴ نمونه‌های ماسه سنگ

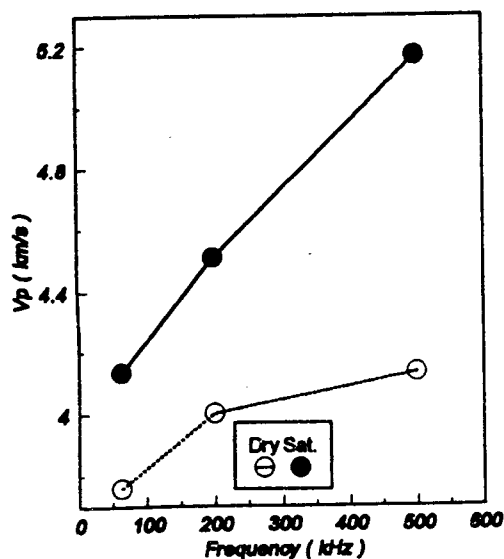
۱-۱-۴ پاشندگی سرعت امواج تراکمی و برشی

مقادیر ابعاد، وزن، سرعت انتشار امواج، چگالی و تخلخل مربوط به سه نمونه مکعبی S_1 و S_2 و S_3 و دو نمونه استوانه‌ای S_4 و S_5 اندازه گرفته شده ماسه سنگها در جدول ۱ آورده شده است. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی، نمودار سرعت امواج تراکمی در بسامدهای ۶۳، ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع برای هر یک از نمونه‌های ماسه سنگ رسم گردیده است (شکل‌های ۱ تا ۵). با توجه به این شکل‌ها و جدول ۱ مشاهده می‌شود که در هر دو حالت خشک و اشباع با افزایش بسامد، سرعت امواج تراکمی افزایش می‌یابد، لیکن در حالت اشباع این روند افزایش سرعت بیشتر می‌باشد.

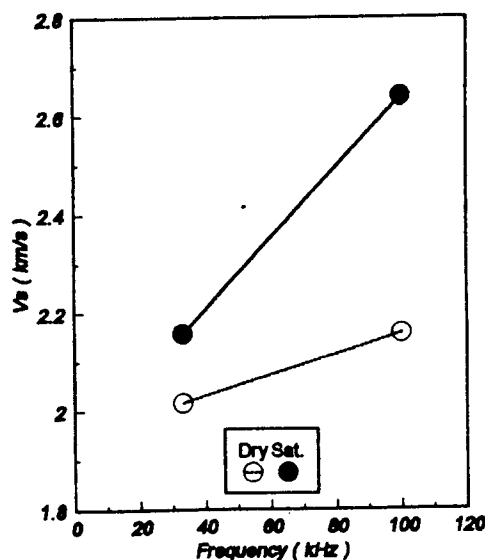
امواج تراکمی یا برشی در بسامدهای f_1 و f_2 می‌باشند. در این پژوهش ضریب کیفیت برای امواج تراکمی در بسامدهای ۶۳ و ۲۰۰ کیلوهرتز و ضریب کیفیت برای امواج برشی در بسامدهای ۳۳ و ۱۰۰ کیلوهرتز برای هر دو حالت خشک و اشباع با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شده است. با توجه به رابطه (۹) ضریب کیفیت با پاشندگی سرعت نسبت عکس دارد، پس در هر نمونه که بر اثر افزایش بسامد، سرعت اضافه شود، انتظار می‌رود که مقدار Q کم شود، لذا از آنجاییکه پاشندگی سرعت بر اثر بسامد در حالت اشباع بیشتر از پاشندگی سرعت در حالت خشک می‌باشد، پس باید مقدار Q در حالت اشباع، کمتر از مقدار Q در حالت خشک باشد.

۴ نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت ابتدا نتایج پاشندگی سرعت امواج تراکمی و برشی در حالت خشک و اشباع مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از آن ضریب کیفیت امواج را بررسی خواهیم کرد. این مقادیر بطور جداگانه برای نمونه‌های ماسه سنگ و سنگ



الف) امواج تراکمی

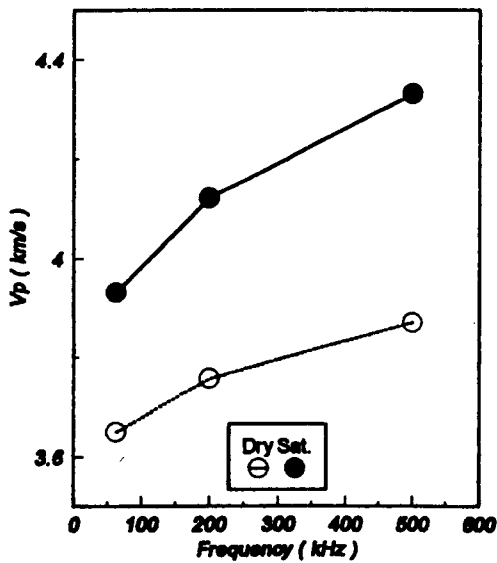


ب) امواج برشی

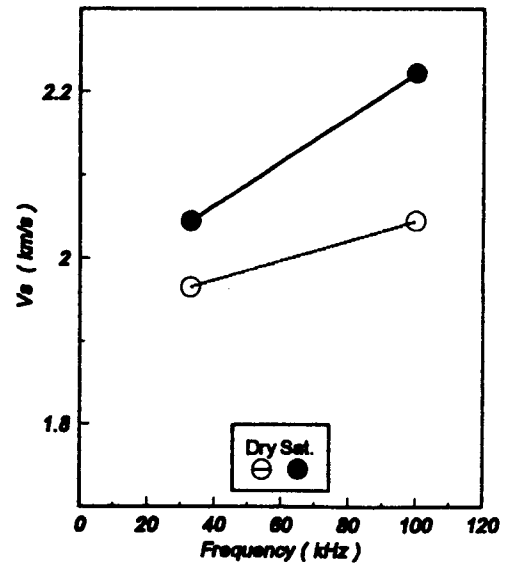
شکل ۱. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه ماسه سنگ S_1 از منطقه چابهار

پاشندگی سرعت امواج برشی برای بسامدهای ۳۳ و ۱۰۰ کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع نیز محاسبه شده و در شکل‌های ۱ تا ۵ برای هر پنج نمونه، نمودار سرعت بر حسب بسامد ترسیم شده است. برای امواج برشی پاشندگی

پاشندگی سرعت امواج تراکمی در این نمونه‌ها در حالت خشک ۶/۴ - ۰/۹ درصد و در حالت اشباع ۹/۰ - ۴/۴ درصد می‌باشد. برای کلیه نمونه‌ها درصد پاشندگی سرعت امواج تراکمی در حالت اشباع از حالت خشک بیشتر می‌باشد.

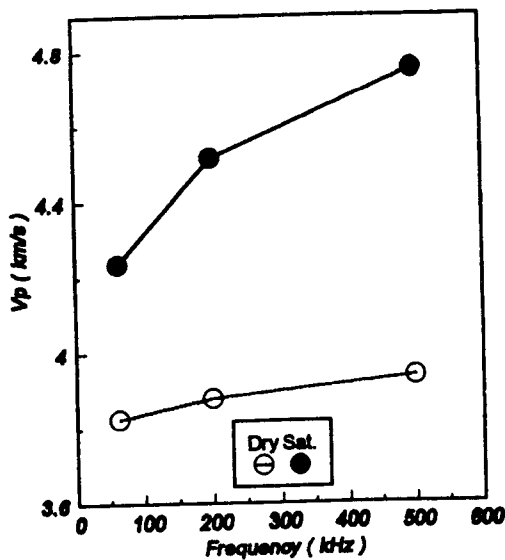


الف) امواج تراکمی

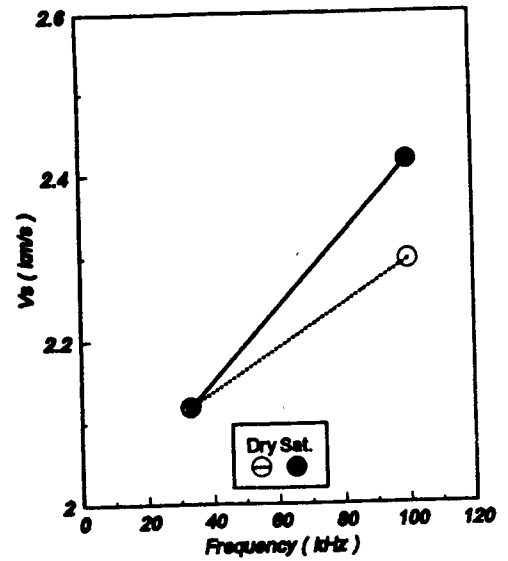


ب) امواج برشی

شکل ۲. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه ماسه سنگ ۲ از منطقه چابهار



الف) امواج تراکمی



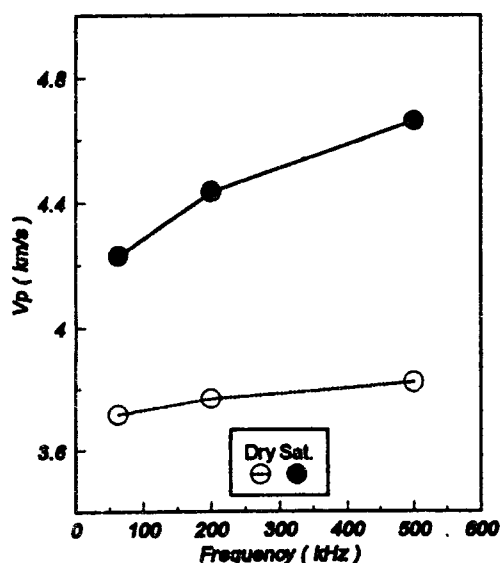
ب) امواج برشی

شکل ۳. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه ماسه سنگ ۳ از منطقه چابهار

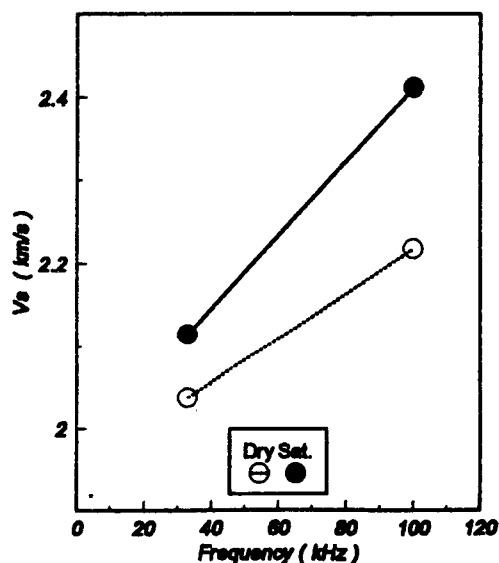
فیزیکی ندارد (گوپا و همکاران، ۱۹۹۴).

۲-۱-۴ ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی (Q_s و Q_p)
ضریب کیفیت امواج تراکمی با استفاده از رابطه (۹) در

سرعت در حالت خشک $1/6 - 8/8$ درصد و در حالت اشباع $22/3 - 8/7$ درصد است، یعنی پاشندگی سرعت امواج برشی در حالت اشباع در کلیه نمونه‌ها از حالت خشک بیشتر می‌باشد. در نمونه S_4 پاشندگی سرعت منفی مشاهده می‌شود که معنی

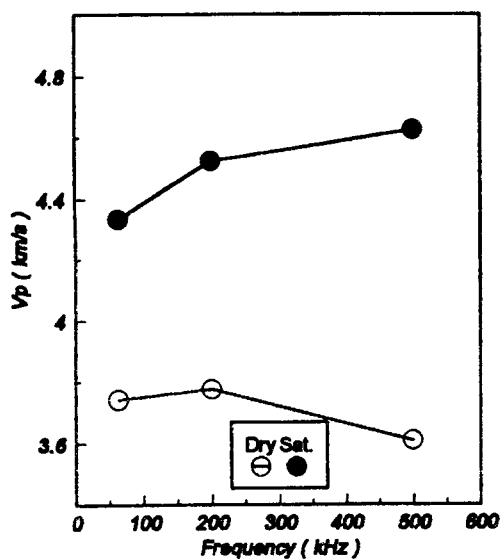


الف) امواج تراکمی

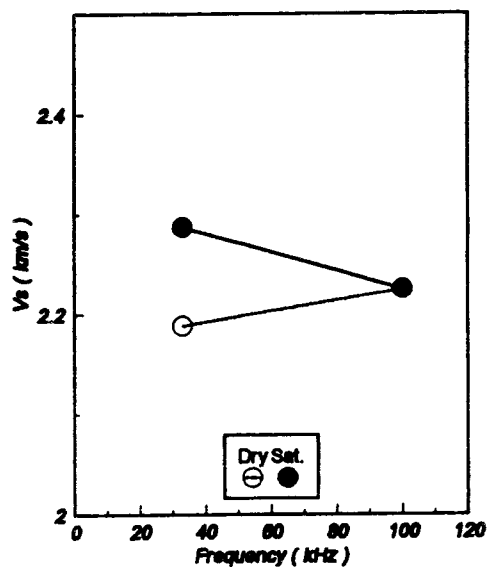


ب) امواج برشی

شکل ۴. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه ماسه سنگ S_4 از منطقه چابهار



الف) امواج تراکمی



ب) امواج برشی

شکل ۵. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه ماسه سنگ S_5 از منطقه چابهار

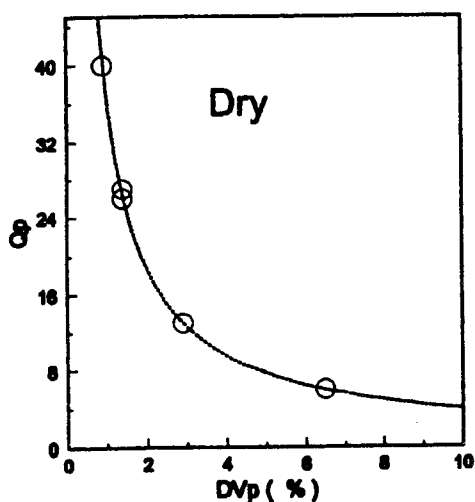
جدول ۱. مقادیر ایما، وزن و سرعت اندازه‌گیری شده و نیز پاشندگی، سرعت و ضرایب کیفیت محاسبه شده مربوط به پنج نمونه مسامه سنگ منطقه چابهار در هر دو حالت خشک و اشباع

Dry rock samples																						
no.	sample	length (mm)	across (mm)	height (mm)	weight (g)	f= 63 kHz		f= 200 kHz		f= 500 kHz		f= 33 kHz		f= 100 kHz								
						T _p (us)	V _p (km/s)	T _p (us)	V _p (km/s)	T _p (us)	V _p (km/s)	T _s (us)	V _s (km/s)	T _s (us)	V _s (km/s)	density (g/cc)	porosity (%)	ΔV _p 200/63 (%)	ΔV _p 500/200 (%)	Q _p	Q _s	
1	S1	49.62	43.74	43.80	231	13.2	3.769	12.4	4.002	12.0	4.135	24.6	2.017	23.0	2.157	2.43	4.2	6.5	3.3	7.0	6	5
2	S2	51.10	50.00	47.20	287	14.0	3.650	13.6	3.757	13.2	3.671	26.0	1.905	25.0	2.044	2.38	5.8	2.9	3.0	4.0	13	9
3	S3	55.10	50.00	52.16	344	14.4	3.826	14.2	3.880	14.0	3.936	26.0	2.119	24.0	2.296	2.39	4.9	1.4	1.4	8.3	26	4
4	S4	55.00		54.60	320	14.8	3.716	14.6	3.767	14.4	3.619	27.0	2.037	24.8	2.218	2.48	5.4	1.4	1.4	8.9	27	4
5	S5	82.32		54.72	481	22.0	3.742	21.8	3.776	21.6	3.811	37.6	2.189	37.0	2.226	2.48	5.2	0.9	0.9	1.6	40	22

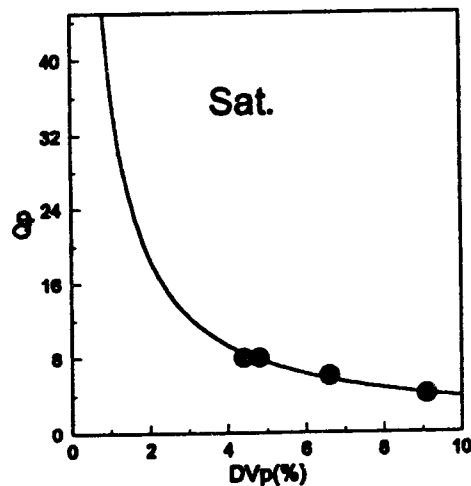
Saturated rock samples																						
no.	sample	length (mm)	across (mm)	height (mm)	weight (g)	f= 63 kHz		f= 200 kHz		f= 500 kHz		f= 33 kHz		f= 100 kHz								
						T _p (us)	V _p (km/s)	T _p (us)	V _p (km/s)	T _p (us)	V _p (km/s)	T _s (us)	V _s (km/s)	T _s (us)	V _s (km/s)	density (g/cc)	porosity (%)	ΔV _p 200/63 (%)	ΔV _p 500/200 (%)	Q _p	Q _s	
1	S1	49.62	43.74	43.80	235	12.0	4.135	11.0	4.511	9.6	5.169	23.0	2.157	18.8	2.639	2.47	4.2	9.1	14.6	22.3	4	2
2	S2	51.10	50.00	47.20	294	13.0	3.931	12.4	4.121	11.8	4.331	25.0	2.044	23.0	2.222	2.44	5.8	4.8	5.1	8.7	8	4
3	S3	55.10	50.00	52.16	351	13.0	4.238	12.2	4.516	11.6	4.750	26.0	2.119	22.8	2.417	2.44	4.9	6.6	5.2	14.0	6	2
4	S4	55.00		54.60	327	13.0	4.231	12.4	4.435	11.8	4.661	26.0	2.115	22.8	2.412	2.54	5.4	4.8	5.1	14.0	8	2
5	S5	82.32		54.72	491	19.0	4.333	18.2	4.523	17.8	4.625	36.0	2.287	37.0	2.225	2.54	5.2	4.4	2.2	-2.7	8	-13

در کلیه نمونه‌ها برای بسامدهای ۳۳ و ۱۰۰ کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع محاسبه شده است. در شکل ۷ نمودار ضریب کیفیت امواج برشی بر حسب درصد تغییرات سرعت امواج برشی در هر دو حالت خشک و اشباع رسم گردیده است. با توجه به این شکل Q_p در حالت خشک بین ۴ تا ۲۲ و در حالت اشباع بین ۲ تا ۴ در کلیه نمونه‌ها متغیر می‌باشد، هر چند برای نمونه g به علت پاشندگی منفی، مقدار Q_p نیز منفی شده است که معنی فیزیکی ندارد. با توجه به این

کلیه نمونه‌های ماسه سنگ برای بسامدهای ۶۳ تا ۲۰۰ کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع محاسبه و در شکل ۶ نمودار ضریب کیفیت امواج تراکمی بر حسب درصد تغییرات سرعت در نمونه‌ها نمایش داده شده است. با توجه به این شکل Q_p در حالت خشک بین ۶ تا ۴۰ و در حالت اشباع بین ۴ تا ۸ تغییر می‌کند. نتیجه اینکه Q_p در حالت خشک از مقادیر Q_p در حالت اشباع در کلیه نمونه‌ها بیشتر می‌باشد. ضریب کیفیت امواج برشی نیز با استفاده از رابطه (۹)

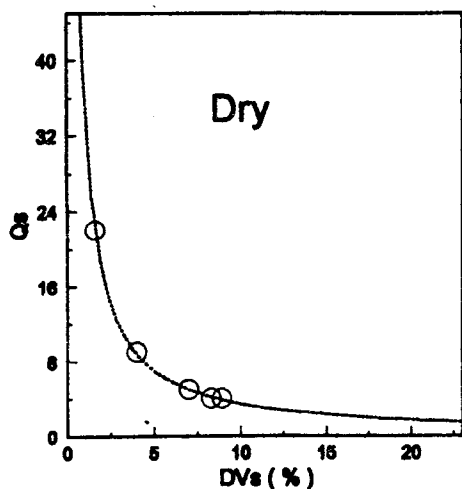


الف) حالت خشک

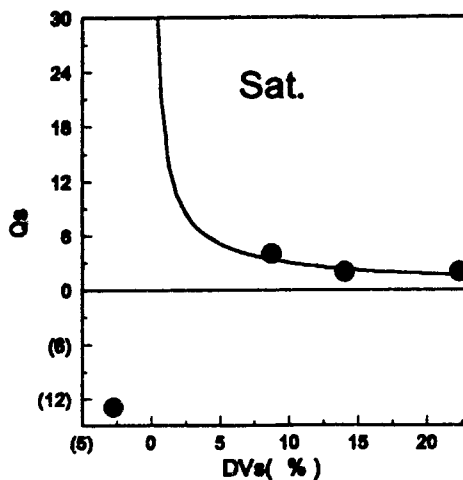


ب) حالت اشباع

شکل ۶. نمودار ضریب کیفیت امواج تراکمی بر حسب درصد تغییرات سرعت برای پنج نمونه ماسه سنگ منطقه چابهار



الف) حالت خشک



ب) حالت اشباع

شکل ۷. نمودار ضریب کیفیت امواج برشی بر حسب درصد تغییرات سرعت برای پنج نمونه ماسه سنگ منطقه چابهار

اشباع $13/3 - 4/9$ درصد تغییر می‌کند. پاشندگی سرعت امواج تراکمی در کلیه نمونه‌ها در حالت اشباع از حالت خشک بیشتر می‌باشد (به بخش ۳-۱ مراجعه شود).

پاشندگی سرعت امواج برشی در این نمونه‌ها برای حالت خشک $9/3 - 1/7$ درصد و در حالت اشباع $13/3 - 4/4$ درصد متغیر می‌باشد و در نمونه L_4 پاشندگی سرعت امواج برشی در حالت اشباع منفی ($2/3$ - درصد) شده است. نتیجه اینکه برای امواج برشی نیز پاشندگی سرعت در حالت اشباع در کلیه نمونه‌های سنگ آهک بیشتر از حالت خشک می‌باشد.

۲-۲-۴ ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی (Q_s و Q_p)
 ضریب کیفیت امواج تراکمی با استفاده از رابطه (۹) در کلیه نمونه‌ها برای بسامدهای ۶۳ و ۲۰۰ کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع محاسبه شده و مقادیر آنها در جدول ۲ آورده شده است. نمودار ضریب کیفیت امواج تراکمی بر حسب درصد تغییرات سرعت در نمونه‌ها در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل Q_p حالت خشک برای نمونه‌های سنگ آهک بین ۵ تا ۳۷ و Q_p حالت اشباع بین ۳

نتایج می‌توان گفت ضریب کیفیت در حالت خشک از ضریب کیفیت در حالت اشباع بیشتر است.

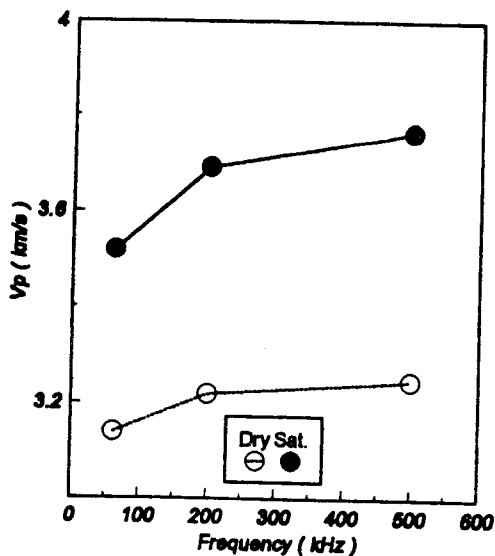
۲-۴ نمونه‌های سنگ آهک

۱-۲-۴ پاشندگی سرعت امواج تراکمی و برشی

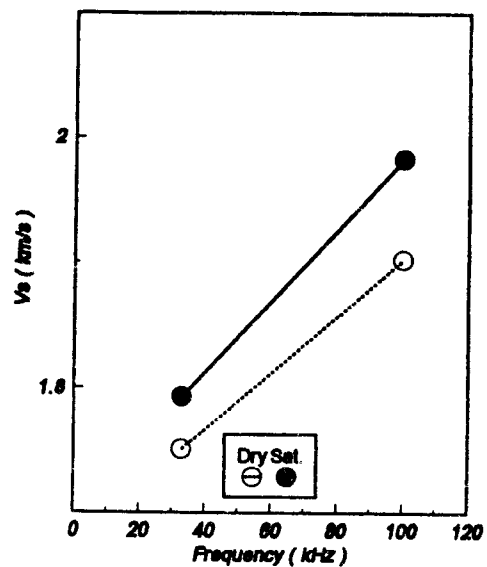
مقادیر ابعاد، وزن، سرعت انتشار امواج، چگالی و تخلخل مربوط به دو نمونه استوانه‌ای L_1 و L_2 و سه نمونه مکعبی L_3 ، L_4 و L_5 اندازه گرفته شده سنگ آهک در جدول ۲ آورده شده است. نمودار سرعت امواج تراکمی بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه‌های سنگ آهک در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نمایش داده شده است.

در این نمونه‌ها نیز با افزایش بسامد در هر دو حالت خشک و اشباع سرعت نیز افزایش می‌یابد و میزان افزایش سرعت در نمونه‌های اشباع بیشتر از خشک می‌باشد. همچنین تحت بسامدهای متفاوت، سرعت در حالت اشباع از سرعت در حالت خشک در کلیه نمونه‌ها بیشتر است.

پاشندگی سرعت امواج تراکمی برای بسامدهای ۶۳ و ۲۰۰ کیلوهرتز، در حالت خشک $6/9 - 1$ درصد و در حالت



الف) امواج تراکمی



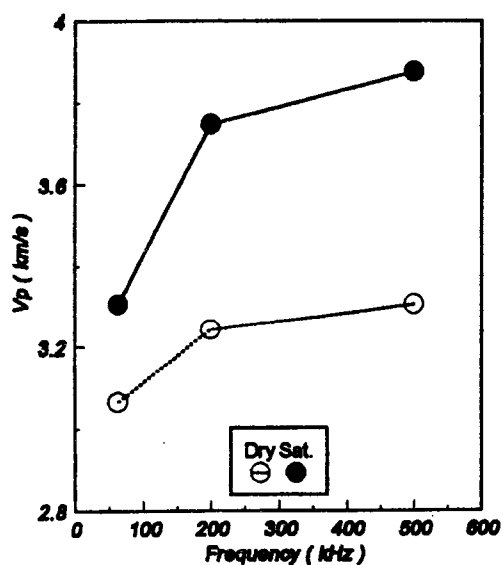
ب) امواج برشی

شکل ۸. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه سنگ آهک L_1 از منطقه چابهار

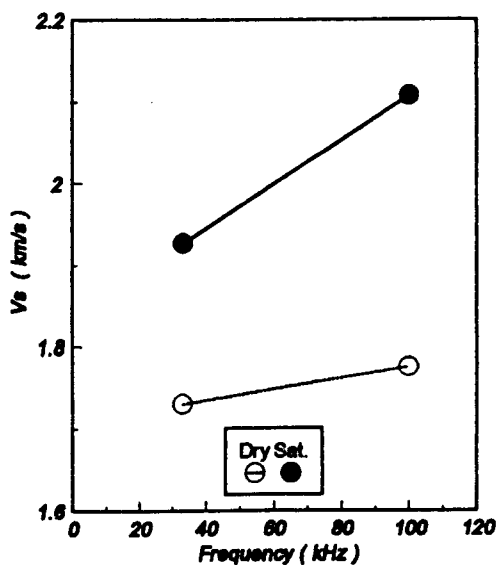
کیلوهرتز در هر دو حالت خشک و اشباع محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است. نمودار ضریب کیفیت امواج برشی بر حسب درصد تغییرات سرعت امواج برشی در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. با توجه به شکل مذکور، مشاهده

تا ۸ متغیر بوده نیز Q_p حالت خشک بیشتر از Q_p حالت اشباع است.

ضریب کیفیت امواج برشی نیز برای نمونه‌های سنگ آهک با استفاده از رابطه (۹) برای بسامدهای ۳۳ و ۱۰۰

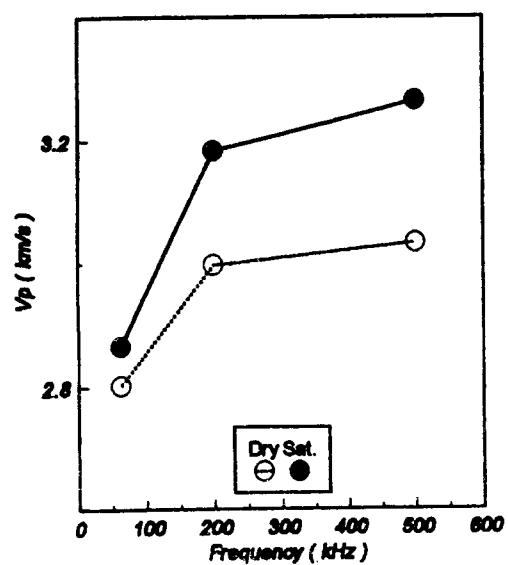


الف) امواج تراکمی

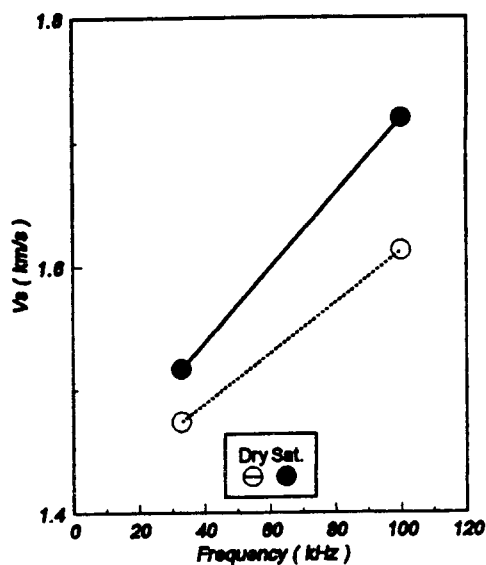


ب) امواج برشی

شکل ۹. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه سنگ آهک L_2 از منطقه چابهار



الف) امواج تراکمی



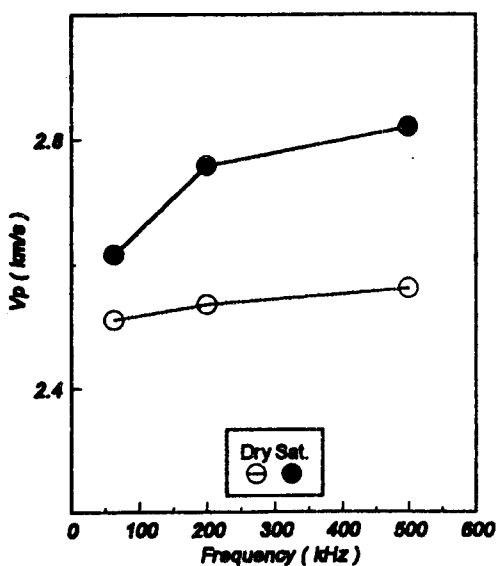
ب) امواج برشی

شکل ۱۰. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت‌های خشک و اشباع برای نمونه سنگ آهک L_3 از منطقه چابهار

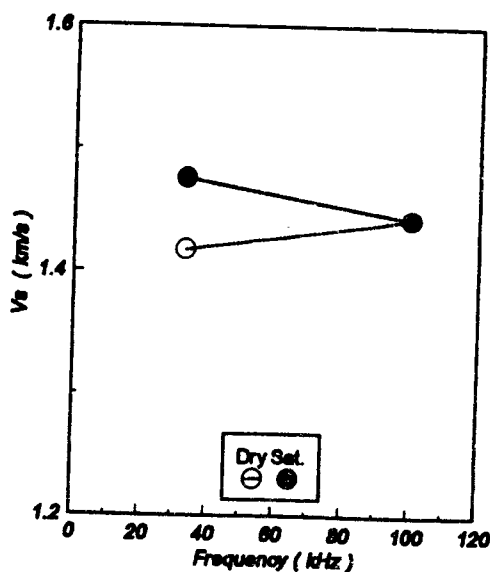
۵ نتیجه گیری

نتیجه گیری کلی از اندازه گیری های پاشندگی سرعت و ضریب کیفیت بر روی نمونه های ماسه سنگ و سنگ آهک را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

می شود که Q_s حالت خشک برای نمونه های سنگ آهک بین ۴ تا ۲۰ و در حالت اشباع بین ۳ تا ۸ تغییر می کند، و در نمونه Z_4 به علت پاشندگی سرعت منفی Q_s نیز منفی شده است. در این نمونه ها نیز Q_s حالت خشک بیشتر از Q_s حالت اشباع می باشد.

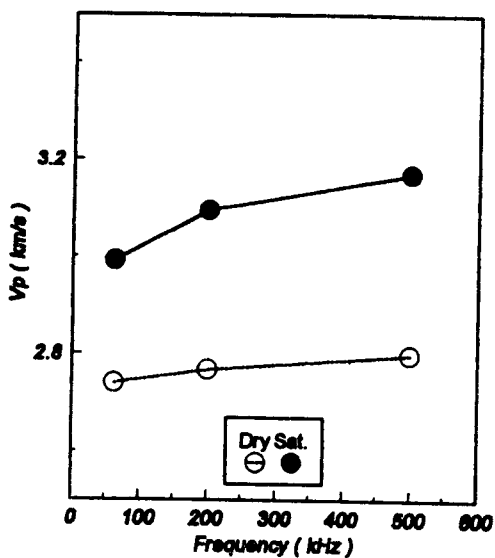


الف) امواج تراکمی

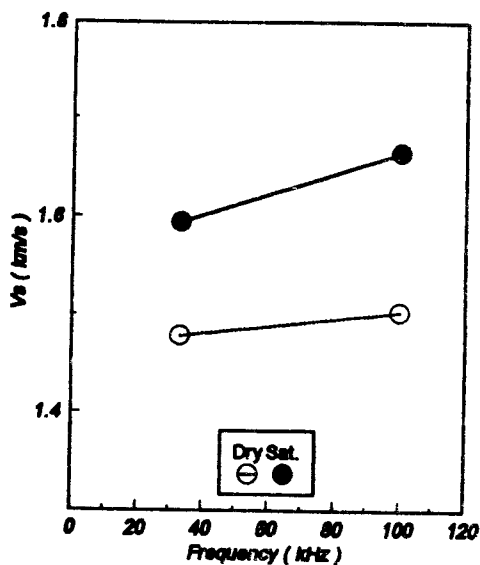


ب) امواج برشی

شکل ۱۱. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت های خشک و اشباع برای نمونه سنگ آهک Z_4 از منطقه چابهار



الف) امواج تراکمی



ب) امواج برشی

شکل ۱۲. نمودار سرعت انتشار امواج بر حسب بسامد در حالت های خشک و اشباع برای نمونه سنگ آهک Z_5 از منطقه چابهار

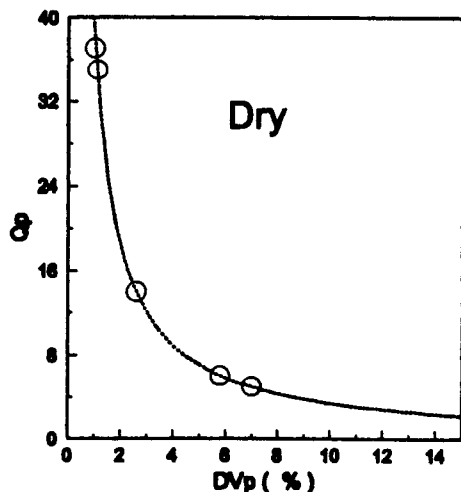
جدول ۲. مقادیر ابعاد، وزن و سرعت اندازه گیری شده و نیز پاشندگی، سرعت و ضرایب کیفیت محاسبه شده مربوط به پنج نمونه سنگ آهک منطقه چابهار در هر دو حالت خشک و اشباع

Dry rock samples

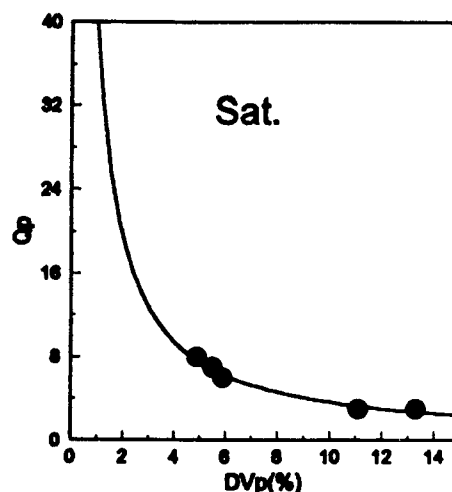
no.	sample length (mm)	across (mm)	height (mm)	diameter (mm)	weight (g)	f = 63 kHz		f = 200 kHz		f = 500 kHz		f = 33 kHz		f = 100 kHz		density (g/cc)	porosity %	$\Delta V_{p200/63}$ %	$\Delta V_{p500/200}$ %	ΔV_s %	Q_p	Q_s
						T_p (us)	V_p (km/s)	T_p (us)	V_p (km/s)	T_p (us)	V_p (km/s)	T_s (us)	V_s (km/s)	T_s (us)	V_s (km/s)							
1	L1	75.30		54.32	321	24	3.14	23.4	3.22	23.2	3.25	43	1.75	39.6	1.90	1.84	12.0	2.6	0.9	8.6	14	4
2	L2	67.46		54.70	292	22	3.07	20.8	3.24	20.4	3.31	39	1.73	38	1.78	1.84	12.6	5.8	2.0	2.6	6	13
3	L3	51.58	51.90	51.00	230	18.4	2.80	17.2	3.00	17	3.03	35	1.47	32	1.61	1.68	18.3	7.0	1.2	9.4	5	4
4	L4	50.20	48.50	53.50	207	20	2.51	19.8	2.54	19.6	2.56	35.4	1.42	34.8	1.44	1.59	20.7	1.0	1.0	1.7	37	20
5	L5	52.60	50.20	56.80	242	19.2	2.74	19	2.77	18.8	2.80	35.6	1.48	35	1.50	1.61	18.7	1.1	1.1	1.7	35	20

Saturated rock samples

no	sample length (mm)	across (mm)	height (mm)	diameter (mm)	weight (g)	f = 63 kHz		f = 200 kHz		f = 500 kHz		f = 33 kHz		f = 100 kHz		density (g/cc)	porosity %	$\Delta V_{p200/63}$ %	$\Delta V_{p500/200}$ %	ΔV_s %	Q_p	Q_s
						T_p (us)	V_p (km/s)	T_p (us)	V_p (km/s)	T_p (us)	V_p (km/s)	T_s (us)	V_s (km/s)	T_s (us)	V_s (km/s)							
1	L1	75.30		54.32	342	21.4	3.52	20.4	3.69	20	3.77	42	1.79	38	1.98	1.96	12.0	4.9	2.0	10.5	8	3
2	L2	67.46		54.70	312	20.4	3.31	18.0	3.75	17.4	3.88	35	1.93	32.0	2.11	1.97	12.6	13.3	3.4	9.4	3	4
3	L3	51.58	51.90	51.00	255	18	2.87	16.2	3.18	15.8	3.26	34	1.52	30	1.72	1.87	18.3	11.1	2.5	13.3	3	3
4	L4	50.20	48.50	53.50	234	19.2	2.61	18.2	2.76	17.8	2.82	34	1.48	34.8	1.44	1.80	20.7	5.5	2.2	-2.3	7	-15
5	L5	52.60	50.20	56.80	270	18	2.92	17	3.09	16.6	3.17	33	1.59	31.6	1.66	1.80	18.7	5.9	2.4	4.4	6	8

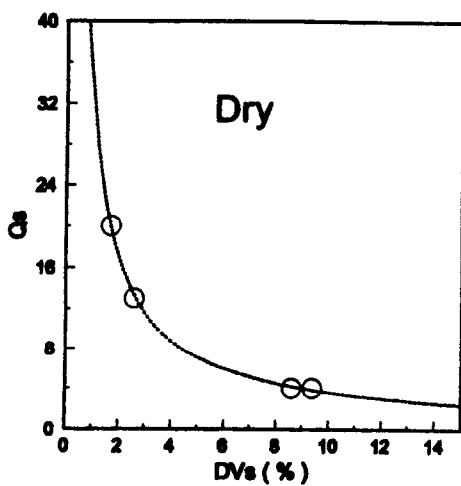


الف) حالت خشک

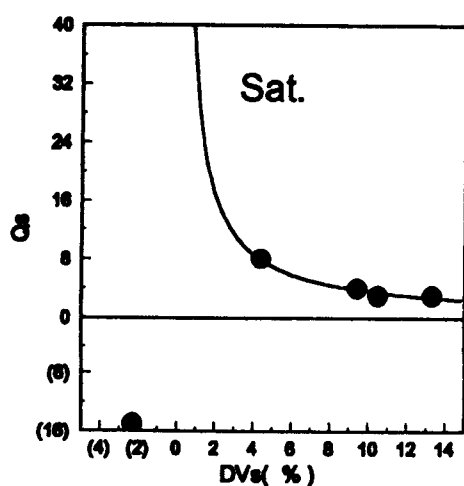


ب) حالت اشباع

شکل ۱۳. نمودار ضریب کیفیت امواج تراکمی بر حسب درصد تغییرات سرعت برای پنج نمونه سنگ آهک منطقه چابهار



الف) حالت خشک



ب) حالت اشباع

شکل ۱۴. نمودار ضریب کیفیت امواج برشی بر حسب درصد تغییرات سرعت برای پنج نمونه سنگ آهک منطقه چابهار

می‌شود چنانچه تعداد بسامدهای مورد آزمایش بیشتر باشد این نتایج برای بسامدهای پیوسته نیز صادق باشند.
 ۳- درصد تغییرات سرعت امواج برشی برای هر نمونه از درصد تغییرات سرعت امواج تراکمی بیشتر است.
 ۴- ضریب کیفیت امواج تراکمی و برشی در حالت خشک برای کلیه نمونه‌ها بیشتر از ضریب کیفیت در حالت اشباع می‌باشد.

۱- در تمام نمونه‌ها سرعت امواج تراکمی با افزایش بسامد، در هر دو حالت خشک و اشباع افزایش می‌یابد، این نتایج با نتایج وینکلر (۱۹۸۵) مطابقت دارند.
 ۲- پاشندگی سرعت در حالت اشباع بیشتر از پاشندگی سرعت در حالت خشک است. این روند برای هر دو امواج تراکمی و برشی مشاهده می‌شود، البته این نتایج برای بسامدهای گسسته‌ای که ما در اختیار داشته‌ایم حاصل شده است و پیش‌بینی

منابع

- 127-132.
- Murphy, W.F., 1984, Acoustic measures of partial gas saturation in tight sandstones: *J. Geophys. Res.*, **89**, 11549-11559.
- Murphy, W.F., 1985, Sonic and ultrasonic velocities : Theory versus experiment: *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 85-88.
- Payne, M.A., 1991, Shear-wave logging to enhance seismic modeling: *Geophysics*, **56**, 2129- 2138.
- Stewart, R.R., Huddleston, P.D., and Kan, T.K., 1984, Seismic versus sonic velocities: *Geophysics*, **49**, 1153-1168.
- Wang, Z., and Nur, A., 1990, Dispersion analysis of acoustic velocities in rocks: *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 2384-2395.
- Winkler, K.W., 1983, Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones: *J. Geophys. Res.*, **88**, 9493-9499.
- Winkler, K.W., 1985, Dispersion analysis of velocity and attenuation in Berea sandstone: *J. Geophys. Res.*, **90**, 6793-6800.
- Winkler, K.W., 1986, Estimates of velocity dispersion between seismic and ultrasonic frequencies: *Geophysics*, **51**, 183-189.
- Xu, S., and White, R.E., 1996, A physical model for shear-wave velocity prediction: *Geophysical Prospecting*, **44**, 687-717.
- فتیحی، م.، ۱۳۷۷، بررسی اثر فرکانس بر سرعت انتشار امواج الاستیک P و S در سنگ‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- نبی بیدهندی، م. و کوثریان، م.، ۱۳۷۷، سرعت انتشار امواج الاستیک در نمونه‌های سنگ آهک منطقه خوزستان در حالت‌های خشک و اشباع. ن. فیزیک زمین و فضا، **۲۴**، شماره‌های ۱ و ۲، ۱۷-۲۵.
- Best, A.I., 1997, The effect of pressure on ultrasonic velocity and attenuation in near-surface sedimentary rocks: *Geophysical Prospecting*, **45**, 345-364.
- Biot, M.A., 1956a, Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range: *Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 168-178.
- Biot, M.A., 1956b, Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. II. Higher-frequency range: *Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 179-191.
- Blangy, J.P., Strandenes, S., Moos, D., and Nur, A., 1993, Ultrasonic velocities in sands-revisited: *Geophysics*, **58**, 344-356.
- Goetz, J.F., Dupal, L., and Bowler, J., 1979, An investigation into discrepancies between sonic log and seismic check shot velocities: *Austral. Petr. Expl. Assoc. J.*, **19**, 131-141.
- Goldberg, D., and Gant, W.T., 1988, Shear-wave processing of sonic log waveforms in a limestone reservoir: *Geophysics*, **53**, 668-676.
- Gopa, S., Donald, F.W., and Mark, A.M., 1994, Comparison of P- and S-wave velocities and Q's from VSP and sonic log data: *Geophysics*, **59**, 1512-1529.
- Han, D.H., Nur, A., and Morgan, D., 1986, Effect of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: *Geophysics*, **51**, 2093-2107.
- Johnson, D.L., and Plona, T.J., 1982, Acoustic slow waves and the consolidation transition: *Journal of the Acoustical Society of America*, **72**, 556-565.
- Mueller, M.C., 1991, Acquisition of shear velocity information with the dipole array sonic tool (in the Gulf Coast Tertiary of Texas): 61st Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts,