

اثر فشار و اشباع بر سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند  
گدوان و سنگ آهکی سازند سروک مربوط به یکی از چاههای اکتشافی میدین نفتی  
جنوب غرب ایران

<sup>۱</sup> جعفر ولی و امجد نبی بیدهندی

<sup>۱</sup> پژوهشگاه صنعت نفت

<sup>۲</sup> موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

(دریافت: ۸۲/۶/۱۱؛ پذیرش: ۸۲/۱۰/۷)

### چکیده

مطالعه حاضر بر روی ۵ نمونه مغزه های ماسه سنگی سازند گدوان و ۵ نمونه مغزه های سنگ آهکی سازند سروک در یک چاه اکتشافی یکی از میدین نفتی واقع در جنوب غرب ایران انجام شده است. ابتدا نمونه ها بشکل استوانه (Plug) تهیه شده و تخلخل و تراوایی آنها اندازه گیری شدند. سپس با استفاده از سیستم پیشرفته مستقر در شرکت TRC ژاپن اندازه گیری آزمایشگاهی سرعت در دو حالت خشک و اشباع از آب در فشارهای مختلف انجام گردید.

با داشتن خواص پتروفیزیکی از قبیل تخلخل، چگالی و کانی های تشکیل دهنده نمونه ها مقادیر سرعت امواج تراکمی ( $V_p$ ) و امواج برشی ( $V_s$ ) در شرایط مخزن و با فشارهای مختلف با استفاده از مدل گاسمن Gassmann پیش بینی شده است. مقادیر سرعت های امواج برشی و تراکمی بدست آمده از اندازه گیری آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل گاسمن در فشار سازند با یکدیگر مقایسه شده اند. در نهایت رابطه سرعت امواج برشی بر حسب سرعت امواج تراکمی در فشار مخزن برای دو گروه مذکور از نمونه های ماسه سنگ و سنگ آهک بدست آمده است.

**واژه های کلیدی:** سرعت های امواج تراکمی و برشی، مدل گاسمن، ماسه سنگ، سنگ آهک، سازند های سروک و گدوان.

## مقدمه

برای ارزیابی دقیق و روشن تأثیر پارامترهای مخزن بر روی خواص الاستیک سنگ‌های مخزن، انجام کارهای آزمایشگاهی و تئوری، هر دو لازم و ضروری است. از یک طرف نتایج آزمایشگاهی باید بوسیله تئوری‌ها تفسیر و مدل‌سازی شوند تا بعنوان اطلاعات ورودی برای تفسیر لرزه‌ای بکار روند. از طرف دیگر چون فرض‌هایی برای ساده سازی روابط ریاضی در مدل‌ها به کار می‌رود، نتایج آزمایشگاهی برای تأیید اعتبار این فرض‌ها لازمند. مطالعات فیزیک سنگ را میتوان به دو بخش تئوری و آزمایشگاهی تقسیم کرد. در بخش تئوری مطالعات اساسی توسط Gassmann و Biot انجام شده است (Gassmann, 1951; Biot, 1956) که اکنون با گذشت ۵۰ سال مورد استفاده محققین و صاحب‌نظران صنعت نفت قرار می‌گیرد. در بخش آزمایشگاهی نیز مطالعات قابل توجهی صورت گرفته است (Wang & Nur, 1992; Han *et al.*, 1986; Wang, 2000) (Eberhart *et al.*, 1989).

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نقشی حیاتی در اکتشاف و توسعه میدان‌های نفتی دارد. اگر چه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در مقیاس بسیار کوچکی، خصوصیات مخزن را بررسی می‌کند ولی استفاده توأم از آن به‌مراه نگارها و مقاطع لرزه‌ای در توصیف مخزن بسیار کارآمد است. در ضمن محدودیت مذکور را می‌توان با مغزه‌گیری‌های بیشتر از نقاط مختلف سازند کاهش داد. در این مقاله ابتدا در مورد زمین‌شناسی سازند مورد مطالعه و سپس در مورد تئوری، مفروضات و عملکرد مدل گاسمن و روابط ارائه شده در مدل توضیحاتی ارائه شده است و همچنین روش کار شامل آماده‌سازی نمونه Plugging و اندازه‌گیری سرعت  $V_p$  سیال مخزن و چگالی، تخلخل و تراوایی و اندازه‌گیری سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع شرح مختصر داده شده است. سرانجام مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده با آنچه توسط مدل گاسمن پیش بینی می‌شود مقایسه گردیده و در نهایت نتیجه‌گیری آمده است.

## زمین‌شناسی سازندهای سروک و گدوان

## • سازند سروک

این سازند با سن کرتاسه میانی و ضخامت حدود ۶۰۰ متر، با آهک‌های کرم، قهوه‌ای روشن تا تیره، متخلخل دولومیتی با نشانه‌های زیاد نفت داخل شکستگی‌ها مشخص می‌شود. در قسمت قاعده آهک‌های سفید و سفید خاکستری و نخودی رنگ، چرتی گچی، دولومیتی، رسی، پیریتی می‌باشند. در بعضی قسمت‌ها لایه‌های نازک دولومیت وجود دارد. ارتباط مرز بالائی سازند

سروک با سازند لافان بصورت دگر شیب می‌باشد. این دگر شیبی در منطقه، تورونین شناخته می‌شود.

#### • سازند گدوان

این سازند با سن کرتاسه پائینی (آپتین) با لایه‌ای از شیل و ماسه شروع می‌شود. شیل‌ها برنگهای خاکستری، خاکستری تیره، قهوه‌ای تیره، سخت متوسط، بندرت پیریتی و ماسه‌ای بوده و ماسه سنگها هم خاکستری تیره، قهوه‌ای تیره با سختی متوسط، دانه ریز، رسی، آهکی و بیتومن‌دار و پیریتی می‌باشند. بعد از این لایه‌های شیلی/مارنی و ماسه‌ای با لایه‌های سنگ آهک برنگهای خاکستری، سفید، نخودی، قهوه‌ای، متوسط تا سخت، رسی و میکریتی می‌رسد که مقدار آنها در مقایسه با لایه‌های شیلی بسیار ناچیز است در این سازند یک بخش آهکهای نخودی، خاکستری تا قهوه‌ای، قهوه‌ای، قهوه‌ای تا نخودی، سفید خاکستری، تمیز با سختی متوسط است که حاوی نفت می‌باشد. بعد از این بخش توالی لایه‌های شیل، آهک و ماسه سنگ شروع می‌شود و این ماسه سنگها از لحاظ نفتی دارای اهمیت می‌باشند.

#### تئوری و مفروضات مدل گاسمن

تئوری گاسمن برای محیطهای متخلخل اشباع از سیال در سال ۱۹۵۱ ارائه شد (Gassmann, 1951).

گاسمن برای معرفی مدل خود فرضیات زیر را در نظر گرفت:

- این تئوری در فرکانسهای پائین صادق است.
- سنگ یا محیط همگن و همسانگرد می‌باشند.
- تمام حفره‌ها بهم پیوسته یا مرتبط هستند.
- سنگ متخلخل بعنوان یک سیستم سیال - جامد و یک سیستم بسته است یعنی آب درون سنگ بیرون نمی‌آید.
- در هنگام تحریک یک موج، حرکت نسبی میان سیال و قسمت جامد سنگ قابل صرف نظر کردن است.

در رابطه (۱) مدول بالک سنگ اشباع  $K$  بر حسب مدول بالک قسمت جامد  $K_s$  (matrix)، مدول بالک شاره  $K_f$  (fluid)، مدول بالک سنگ خشک  $K_d$  و تخلخل  $\Phi$  با استفاده از مدل گاسمن داده شده است (Wang and Nur 1992).

$$K = K_d + \frac{[1 - (K_d/K_s)]^2}{\frac{\Phi}{K_d} + \frac{1 - \Phi}{K_s} - \frac{K_d}{K_s^2}} \quad (۱)$$

روابط (۲) و (۳) به ترتیب مدول برشی سنگ اشباع و چگالی بالک سنگ اشباع را بدست می‌دهند.

$$\mu = \mu_d \quad (۲)$$

$$\rho = \Phi \rho_f + (1 - \Phi) \rho_s \quad (۳)$$

که در آنها  $\mu_d$  مدول برشی سنگ خشک،  $\rho_s$  و  $\rho_f$  به ترتیب چگالی قسمت جامد سنگ و چگالی شاره درون حفره‌ها می‌باشند. با داشتن مقادیر  $K$ ،  $\mu$  و  $\rho$  از سه رابطه اخیر می‌توان سرعت‌های امواج تراکمی  $V_p$  و امواج برشی  $V_s$  را از روابط (۴) و (۵) محاسبه نمود.

$$V_p = \left[ \frac{K + 4/3\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad (۴)$$

$$V_s = \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2} \quad (۵)$$

برای تعیین مدول بالک قسمت جامد سنگ ابتدا می‌توان از روش‌های (Voigt ۱۹۱۰) و Reuss (۱۹۲۹) مدول بالک را برحسب درصد عناصر موجود در نمونه مورد نظر بدست آورد و سپس با میانگین‌گیری دومقدار بدست آمده (روش Hill) می‌توان مقدار واقعی ترمدول بالک را بدست آورد (Wang and Nur, 1992). این میانگین‌گیری‌ها برای مدل‌های Voigt، Reuss و Hill به ترتیب از روابط ۶ تا ۸ بدست می‌آیند که در آنها  $M$  می‌تواند مدول بالک قسمت جامد سنگ  $K_s$  یا مدول برشی آن باشد.

$$M_v = \sum_{i=1}^n c_i M_i \quad (۶)$$

$$M_r = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{M_i} \quad (۷)$$

$$M_H = \frac{1}{2} (M_v + M_r) \quad (۸)$$

در این مطالعه از داده‌های استاندارد شرکت شلومبرژه برای تعیین مدول بالک کانی‌ها استفاده شده است، که مقادیر آن در جدول ۱ آمده است.

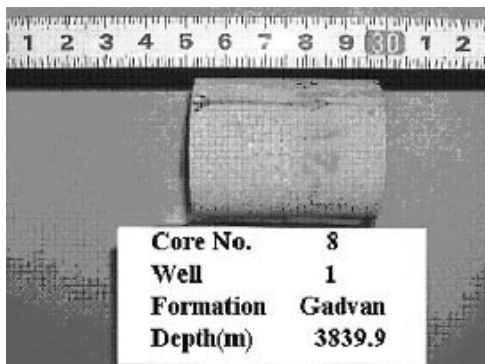
جدول ۱- داده‌های استاندارد شرکت شلومبرژه برای تعیین مدول بالک کانیهای کلسیت، دولومیت و کوارتز.

مدول کانی	$\mu$ (GPa)	K (GPa)
کلسیت	۲۹	۷۰/۲
دولومیت	۴۶/۶	۶۹/۴
کوارتز	۴۵	۳۶/۶

## روش کار

### آماده سازی نمونه ها

ابتدا با مطالعه نگارهای پتروفیزیکی و زمین شناسی برای سازند مورد نظر در عمق های خاص مغزه هایی بصورت پلاگ (Plug) نمونه برداری شدند. این پلاگ ها به صورت استوانه و دارای قطر ۱/۵ اینچ (۳/۸۱ سانتی متر) و طول ۲/۵ اینچ (۶/۳۵ سانتی متر) می باشند. عمل Plugging بصورت عمودی می باشد و به همراه این عمل می توان از نمونه های اطراف پلاگ نیز برای کارهای پتروفیزیکی از قبیل XRD و Thin Section و.... استفاده کرد و مواردی مانند شماره و عمق نمونه و همچنین شماره چاه و میدان مربوطه باید به همراه آن یادداشت برداری شود. یک نمونه آماده در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- یک نمونه از پلاگ های تهیه شده بشکل استوانه، با قطر ۱/۵ اینچ (۳/۸۱ سانتیمتر) و طول ۲/۵ اینچ (۶/۳۵ سانتیمتر)، نمونه گیری به صورت عمودی انجام شده است.

### اندازه گیری سرعت $V_p$ سیال مخزن

جهت تعیین مدول بالک شاره نیاز به سرعت امواج تراکمی می باشد. بنابراین اندازه گیری سرعت  $V_p$  سیال مخزن در دو حالت نفت و آب مخزن انجام می گیرد. اندازه گیری سرعت  $V_p$

نفت در دو حالت نفت خام (Crude oil) و نفت زنده (Live oil) انجام شده است. همچنین اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی آب با میزان اشباع نمک مربوط به شرایط مخزن انجام شده است.

دو الکتروود فرستنده و گیرنده سرعت امواج در دو طرف بالا و پائین سیلندر مخصوص قرار داده شده و میزان زمان عبور موج تراکمی اندازه‌گیری می‌شود و سپس می‌توان با تغییر فشار و دما سرعت های مختلف  $V_p$  سیال مخزن را بدست آورد. مقادیر بدست آمده مدول بالک اشاره در سیالات مختلف در شرایط مخزن بصورت زیر می‌باشد.

$$K_f = 3/84 \text{ GPa} \quad \text{آب با } 210000 \text{ ppm نمک}$$

$$K_f = 2/17 \text{ GPa} \quad \text{نفت خام}$$

$$K_f = 1/66 \text{ GPa} \quad \text{نفت زنده}$$

### اندازه‌گیری چگالی، تخلخل و تراوایی نمونه‌ها

اندازه‌گیری چگالی باتوجه به اندازه‌گیری ابعاد فیزیکی (قطر و ارتفاع) و جرم براحتی قابل محاسبه است. همچنین با پودر کردن مقداری از نمونه می‌توان میزان چگالی دانه‌ها (Grain Density) را نیز بدست آورد. برای اندازه‌گیری تخلخل از دستگاه Porosimeter مدل ۳۰۰ ASC و برحسب روش هلیوم استفاده می‌شود. میزان تراوایی نیز بصورت افقی و به فاصله یک سانتیمتر از یکدیگر و در چهار جهت مختلف تعیین می‌شود. این اندازه‌گیری توسط دستگاه PDPK انجام شده است. در نهایت بامتوسط‌گیری مقادیر بدست آمده می‌توان مقدار تراوایی (Permeability) را محاسبه کرد. مقادیر چگالی، تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های ماسه سنگ و سنگ آهک به ترتیب درجداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲- مقادیر چگالی، تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های ماسه‌سنگ سازند گدوان.

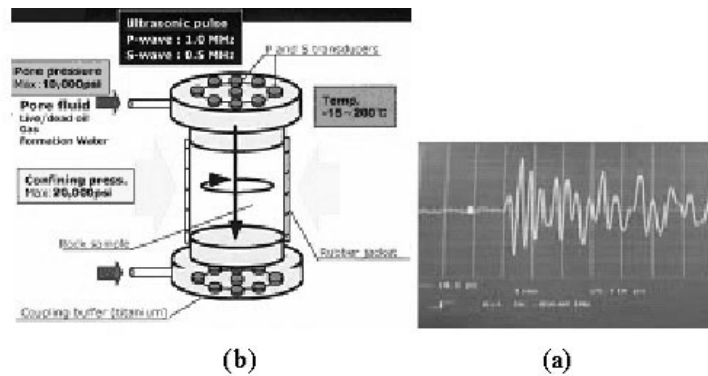
شماره نمونه	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	تراوایی (mD)	تخلخل (%)
۱	۲/۰۸	۴۹۰	۲۱/۵
۲	۲/۰۸	۳۶۲	۲۲/۴
۳	۲/۱۷	۸۰۶	۱۸/۳
۴	۲/۱۰	۲۲۰۸	۲۱
۵	۲/۱۴	۱۳۶۴	۱۹/۶

جدول ۳- مقادیر چگالی، تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های سنگ آهک سازند سروک.

شماره نمونه	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	تراوایی (mD)	تخلخل (%)
۱	۲/۰۹	۲/۸۶	۲۲/۴
۲	۲/۲۷	۰/۸۱	۱۴/۵
۳	۲/۰۶	۶/۳۲	۲۳/۹
۴	۲/۴۷	۰/۰۹	۴/۹
۵	۲/۵۳	۰/۱۸	۸/۲

### اندازه‌گیری سرعت $V_p$ و $V_s$ نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع

برای اندازه‌گیری در شرایط مخزن ابتدا باید سیستم و نمونه در شرایط پایدار فشار و دمای مورد نظر قرار گیرند و این عمل مستلزم زمان نسبتاً طولانی است. سپس با تغییر فشار موثر از مقدار ماکزیمم فشار به سمت حداقل می‌توان شرایط متفاوت را در محیط نمونه ایجاد و زمان عبور موج را اندازه‌گیری نمود. البته این عمل در مورد سازندهای فوق از حدود ۴۵ GPa برای سازند گدوان و از حدود ۳۰ GPa برای سازند سروک شروع و به فشار حدود ۶ GPa رسیده است. معمولاً دمای نمونه مقدار ثابت و برابر با دمای مخزن می‌باشد. اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی در دو حالت خشک و اشباع از آب اندازه‌گیری شده است. این اندازه‌گیریها توسط سیستم اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک (EWMMS) در مرکز تحقیقات و تکنولوژی شرکت نفت ژاپن (TRC) انجام شده است. همچنین در این سیستم شبیه‌سازی مخزن تا عمق ۵۰۰۰ متری امکان پذیر است. و می‌توان اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک را برای شماره‌های مختلف مانند آب، نفت و گاز انجام داد. از طرفی سیستم توانائی اعمال ماکزیمم فشار همه‌جانبه (Confining Pressure) و فشار شاره (Fluid Pressure) بترتیب حدود ۱۴۰ GPa و ۷۰ GPa را دارا می‌باشد. حدود تغییرات دمای نمونه حدود ۱۵-۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. در ضمن زمان رسید اولیه امواج الاستیک دریافت شده توسط گیرنده بوسیله اسیلوسکوپ مشاهده می‌گردد (شکل ۲).

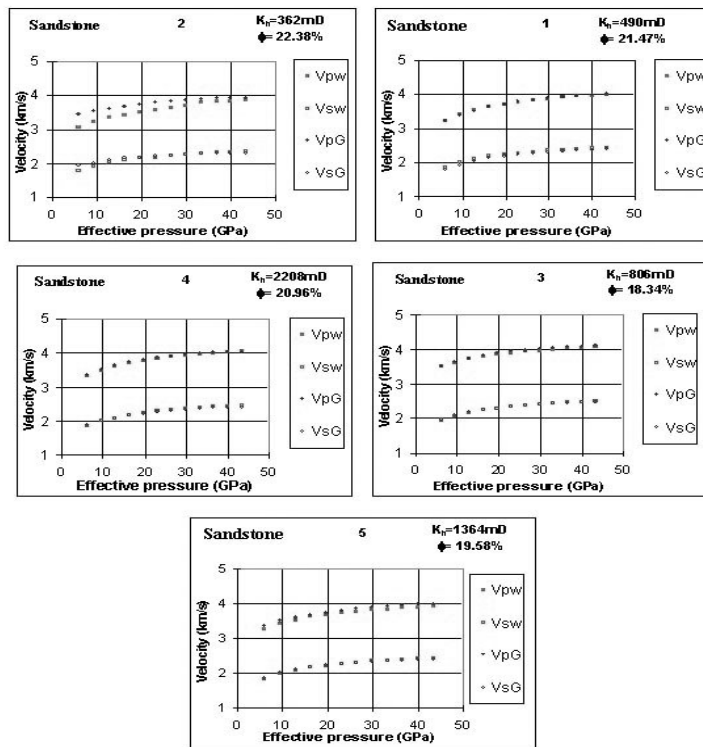


شکل ۲- (a) یک نمونه از زمان رسید اولیه امواج الاستیک دریافت شده توسط گیرنده که در اسیلوسکوپ قابل مشاهده می باشد. (b) نحوه عملکرد سیستم اندازه گیری سرعت امواج الاستیک بر روی مغزه های مورد آزمایش، شامل فرستنده و گیرنده امواج P و S، ماکزیمم فشار همه جانبه، فشار شاره، تغییرات دمای نمونه و فرکانس امواج S.

### مقایسه داده های آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده توسط مدل گاسمن

با توجه به اندازه گیری های سرعت های امواج برشی و تراکمی در شرایط آزمایشگاهی و همچنین اندازه گیری های پتروفیزیکی نمونه ها و اعمال آن در روابط مدل سرعت گاسمن می توان مقادیر سرعت را پیش بینی کرد. در اشکال ۳ و ۴ مقادیر سرعت پیش بینی شده در مدل گاسمن به همراه مقادیر اندازه گیری آزمایشگاهی بر حسب فشار موثر به ترتیب برای دو گروه ماسه سنگ و سنگ آهک نشان داده شده اند.

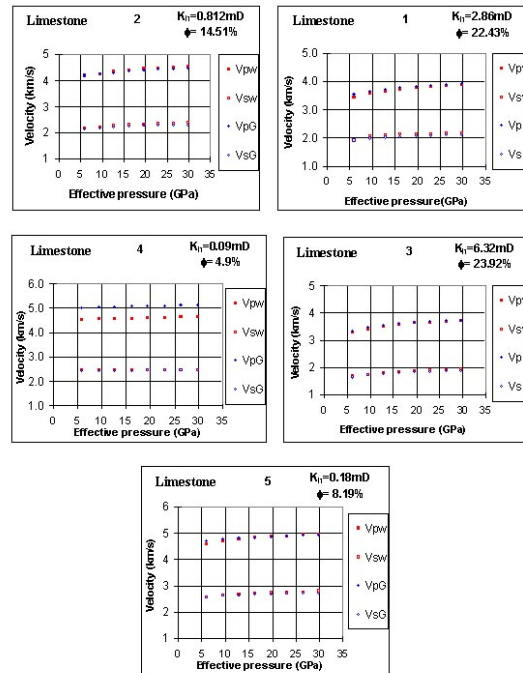




شکل ۳- مقادیر سرعت‌های امواج تراکمی و برشی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و پیش‌بینی شده توسط مدل گاسمن برحسب فشار موثر برای نمونه‌های ماسه سنگ.  
 Vpw: سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده در حالت اشباع از آب.  
 VpG: سرعت موج تراکمی پیش‌بینی مدل گاسمن.  
 Vsw: سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در حالت اشباع از آب.  
 VsG: سرعت موج برشی پیش‌بینی مدل گاسمن.

همانطوریکه در شکل‌های ۳ و ۴ نمایان می‌باشد هر نمونه به خاطر تفاوت در نوع کانی تشکیل دهنده و همچنین میزان تخلخل و تراوایی آن دارای عکس‌العمل متفاوت سرعت برحسب فشار می‌باشد.

گروه ماسه سنگ (شکل ۳) نمونه های شماره ۱ تا ۵ همگی با تخلخل و تراوانی بالا، یک تغییر سرعت حدود  $1000 \text{ m/s}$  را در مقابل حداقل و حداکثر فشار  $40-6 \text{ GPa}$  از خود نشان می دهند. گروه سنگ آهک (شکل ۴) نیز نمونه های شماره ۱ الی ۵ با تخلخل های کم تا زیاد و همچنین دارای تراوانی کم، یک تغییر سرعت حدود  $500-200 \text{ m/s}$  را در مقابل حداقل و حداکثر فشار  $35-6 \text{ GPa}$  از خود نشان می دهند. و این تغییر سرعت برحسب فشار موثر در فشارهای کم بیشتر مشهود است.



شکل ۴- مقادیر سرعت های تراکمی و برشی اندازه گیری در آزمایشگاه و پیش بینی توسط مدل گاسمن برحسب فشار موثر برای نمونه های سنگ آهک.

$V_{pw}$ : سرعت موج تراکمی اندازه گیری شده در حالت اشباع از آب  $V_{pG}$ : سرعت موج تراکمی پیش بینی مدل گاسمن.

$V_{sw}$ : سرعت موج برشی اندازه گیری شده در حالت اشباع از آب.

$V_{sG}$ : سرعت موج برشی پیش بینی مدل گاسمن.

در تمامی نمونه‌ها مقادیر سرعت پیش‌بینی شده توسط مدل گاسمن و مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی با یکدیگر برابر و یا بسیار نزدیک می‌باشند و این تفاوت در فشار مخزن به حداقل می‌رسد، و این دلیل بر صحت ارائه مدل گاسمن در این ناحیه می‌باشد.

### اثر فشار و اشباع

در مخزن همواره دو نوع فشار وجود دارد، فشار رولایه ناشی از سنگینی لایه‌های بالائی  $P_o$  (Overburden Pressure) که به آن فشار محصور کننده (Confining Pressure) نیز گفته می‌شود و فشار دیگر نیز ناشی از فشار شاره درون خلل و فرج می‌باشد که آنرا فشار سیال (Fluid Pressure) و یا  $P_p$  (Pore Pressure) می‌نامند، همچنین تفاوت دو فشار را فشار موثر  $P_e$  (Effective Pressure) می‌نامند (Lee & Shaw, 1998).

$$P_e = P_o - P_p \quad (9)$$

سرعت امواج لرزه ای  $V_p$  و  $V_s$  و امپدانس با افزایش فشار رولایه بیشتر می‌شود. رابطه بین سرعت ها و فشار رولایه غیر خطی و تغییرات خواص لرزه ای در نواحی با فشار رولایه پائین خصوصاً در ماسه سنگ ها بیشتر است، این مهم در مطالعات لرزه ای چهار بعدی و AVO بسیار مهم می‌باشد (Wang, 2001).

در جدول ۴ اثر تغییر سرعت امواج تراکمی بصورت درصد بر حسب تغییر فشار موثر (حدود 5GPa) در دو حالت فشار موثر کم و در فشار مخزن برای دو نوع (نمونه شماره ۲ از گروه ماسه سنگ و نمونه شماره ۳ از گروه سنگ آهک) آمده است. می‌توان میزان درصد تغییر سرعت امواج تراکمی برای نمونه‌های فوق را در فشارهای مختلف مشاهده کرد. همانگونه که مشاهده می‌شود با کاهش فشار موثر میزان درصد تغییرات سرعت امواج افزایش می‌یابد. از این تغییرات سرعت امواج تراکمی بر حسب فشار می‌توان مثلاً در مطالعات چهار بعدی لرزه ای استفاده کرد.

در طی تولید و افزایش برداشت از مخزن میزان فشار و اشباع شاره تغییر می‌یابد. ممکن است تغییر فشار و اشباع شاره مستقل و یا تاثیر پذیر از یکدیگر باشند. در هر حال مقدار سرعت و امپدانس لرزه‌ای بستگی به تغییر فشار و اشباع شاره مخزن دارد (Wang, 2001). همانگونه که در جدول ۴ میزان درصد تغییر سرعت تراکمی بر حسب فشار موثر در حد پائین و در شرایط فشار مخزن برای نمونه‌های سنگ آهک و ماسه‌سنگ آمده است، این تغییرات سرعت در فشارهای

پائین بیشتر مشاهده می شود، بنابراین در مواقعی که فشار مخزن افت می کند می توان انتظار داشت که تغییرات سرعت بیشتر از شرایط مخزن باشد. همچنین تقریباً در تمامی نمونه های آهکی (به جز نمونه شماره ۴) سرعت امواج تراکمی در حالت اشباع از آب در داده های مدل گاسمن و داده آزمایشگاهی دارای تفاوت اندک و ثابت می باشد، اما این حالت در نمونه های ماسه سنگی متفاوت است. بطوریکه این تفاوت اندک و ثابت در فشارهای کم برقرار اما در فشارهای نزدیک فشار مخزن تفاوتی مشاهده نمی شود و این امر نشان دهنده آنست که هنگامی که نمونه ماسه سنگ در حالت فشار مخزن قرار می گیرد بدلیل تراکم پذیری و جابجائی ریزدانه های ماسه سنگ ها باعث می شود تا نمونه دارای رفتار یکسان باشند. اما این حالت در نمونه های آهکی دیده نمی شود.

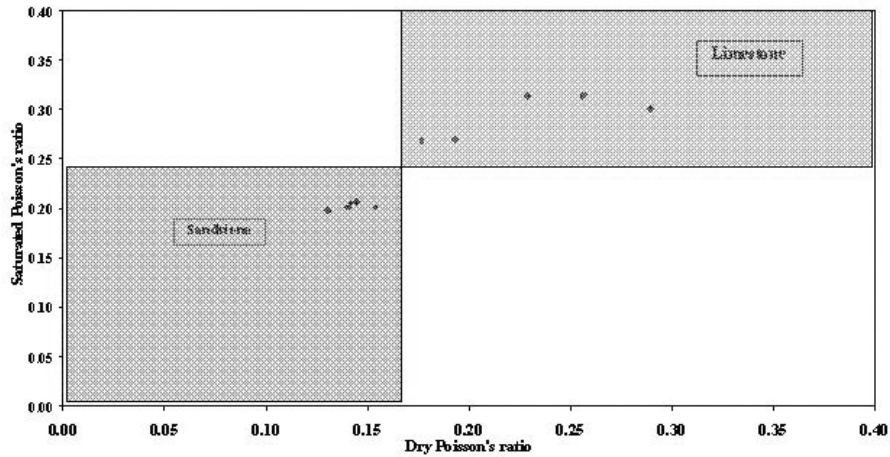
جدول ۴- میزان درصد تغییر سرعت موج تراکمی بر حسب فشار موثر در حد پائین ۶ GPa و در شرایط فشار مخزن ۴۰-۳۵ GPa برای دو نمونه ماسه سنگ و سنگ آهک.

نمونه شماره ۳ (گروه سنگ آهک)	نمونه شماره ۲ (گروه ماسه سنگ)	نمونه ها فشار موثر
۳۱٪	۸۱٪	فشار کم
۰/۲۴٪	۰/۷۶٪	فشار مخزن

همچنین در نمونه های آهکی سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در آزمایشگاه و آنچه توسط مدل گاسمن پیش بینی می گردد، در حالت اشباع از آب، دارای تغییرات اندک و تقریباً دارای شرایط یکسان بر حسب تغییرات فشار می باشند، و در نمونه های ماسه سنگ نیز سرعت امواج برشی در شرایط اندازه گیری آزمایشگاهی و مدل گاسمن دارای تغییرات مشابه با سرعت امواج تراکمی بر حسب تغییرات فشار می باشند.

### پیش بینی لیتولوژی

یکی از راههای تعیین لیتولوژی به کمک روش نسبت پواسون می باشد. می توان با استفاده از اندازه گیری سرعت های  $V_p$  و  $V_s$  در شرایط آزمایشگاهی و تعیین نسبت پواسون، لیتولوژی را تخمین زد. همانطوریکه در شکل ۵ ملاحظه می شود با محاسبه نسبت های پواسون در حالت های اشباع از آب و خشک و رسم آن نسبت به یکدیگر دو نوع نمونه های ماسه سنگ و سنگ آهک به خاطر تفاوت در مقادیر نسبت پواسون از یکدیگر تمییز داده می شوند.

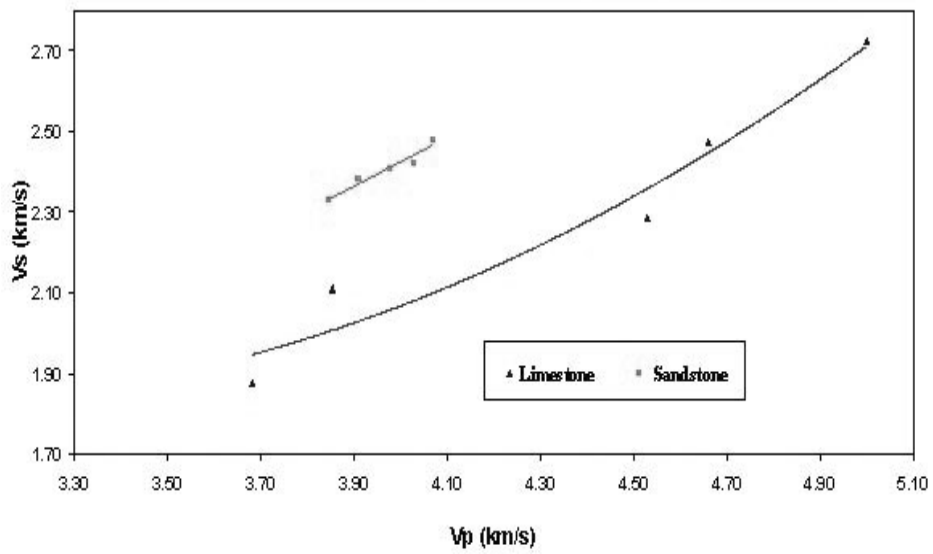


شکل ۵- پیش‌بینی لیتولوژی نمونه‌ها بر اساس نسبت‌های پواسون در حالت‌های اشباع از آب و حالت خشک در شرایط فشار مخزن.

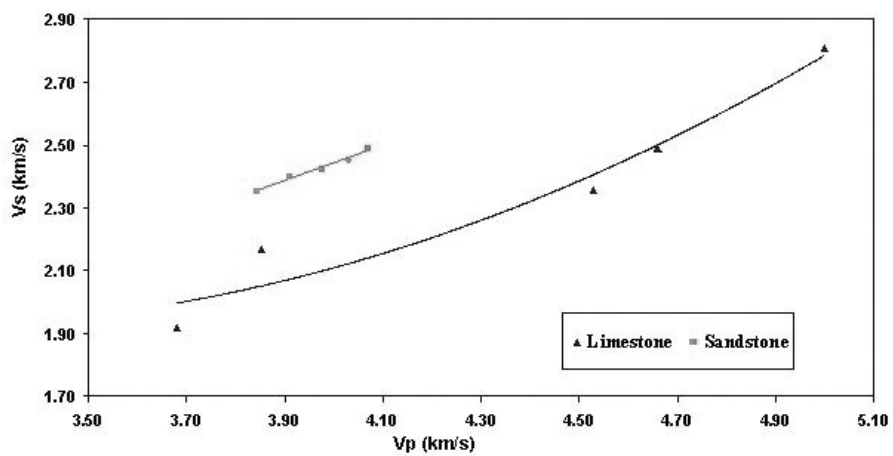
در واقع تمامی نمونه‌های سنگ‌آهک در این مطالعه دارای نسبت پواسون با محدوده بالاتر از ۰/۱۷ در حالت خشک و مقدار ۰/۲۵ در حالت اشباع حاصل شده است. همچنین برای نمونه‌های ماسه‌سنگی نیز محدوده کمتر از ۰/۱۷ و ۰/۲۵ را به ترتیب در حالت خشک و اشباع در نظر گرفت. از این امر می‌توان بکمک داده‌های لرزه‌ای و همچنین مطالعات AVO در گستره وسیعی نوع لیتولوژی مخزن را پیش‌بینی کرد.

#### تخمین سرعت امواج برشی

شکل ۶ سرعت موج برشی پیش‌بینی شده توسط مدل گاسمن بر حسب سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای هر دو گروه نمونه‌های ماسه‌سنگی و سنگ‌آهکی را نشان می‌دهد. شکل ۷ نیز مقادیر آزمایشگاهی سرعت موج برشی بر حسب سرعت موج تراکمی را برای همان دو گروه نشان می‌دهد. معادلات مربوط به بهترین منحنی گذرانده شده از نقاط مربوط به نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک در هر دو منحنی در روابط ۱۰ الی ۱۳ آمده است.



شکل ۶- سرعت موج برشی در بیش بینی شده توسط مدل گاسمن بر حسب سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک در شرایط فشار مخزن.



شکل ۷- سرعت موج برشی بر حسب سرعت موج تراکمی (مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه).

با نگاهی اجمالی به روابط ۱۰ الی ۱۳ که مستقیماً با برازش داده‌های سرعت امواج در شکل‌های ۶ و ۷ بصورت مجزا برای هر یک از دو گروه نمونه‌های سنگی بدست آمده است. مشاهده می‌شود که روابط بین  $V_p$  و  $V_s$  برای هر دو حالت مدل و اندازه‌گیری آزمایشگاهی برای هر یک از گروه‌های سنگی بسیار نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین با تخمین صحیح پارامترهای مخزن و ارائه مدل مناسب (لااقل در این ناحیه) می‌توان سرعت موج برشی را در هر نقطه از میدان از روی سرعت موج تراکمی پیش‌بینی کرد.

سرعت موج برشی پیش‌بینی شده توسط مدل گاسمن برحسب موج تراکمی آزمایشگاهی به ترتیب برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک در روابط ۱۰ و ۱۱ آورده شده است (شکل ۶).

$$\text{for Sandstone} \quad V_{SG} = 0.58 V_{PM} + 0.1 \quad R^2 = 0.94 \quad (10)$$

$$\text{for Limestone} \quad V_{SG} = 0.2 (V_{PM})^2 - 1.16 V_{PM} + 3.5 \quad R^2 = 0.95 \quad (11)$$

سرعت موج برشی برحسب موج تراکمی در شرایط آزمایشگاهی بترتیب در روابط ۱۲ و ۱۳ برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک آورده شده است.

$$\text{for Sandstone} \quad V_{SM} = 0.57 V_{PM} + 0.16, \quad R^2 = 0.97 \quad (12)$$

$$\text{for Limestone} \quad V_{SM} = 0.25 (V_{PM})^2 - 1.5 V_{PM} + 4.34, \quad R^2 = 0.95 \quad (13)$$

$V_{SG}$ : سرعت موج برشی پیش‌بینی شده توسط مدل گاسمن.

$V_{PM}$ : سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه.

$V_{SM}$ : سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه.

### نتیجه گیری

- تغییرات سرعت امواج تراکمی برحسب فشار موثر در ماسه سنگ‌ها بیشتر از سنگ آهک می‌باشد.
- با داشتن اطلاعات اولیه پتروفیزیکی و نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت و ارائه

- یک مدل مناسب می‌توان سرعت  $V_s$  را در هر نقطه از میدان پیش‌بینی کرد، مشروط بر اینکه پارامترهای اولیه مدل بدرستی تخمین زده شده باشند.
- همخوانی سرعت‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و پیش‌بینی شده توسط مدل گاسمن دلیل بر کاربرد این مدل حداقل در این منطقه دارد.
  - میزان درصد تغییر سرعت تراکمی بر حسب فشار موثر بین فشار پائین و فشار مربوط به مخزن برای نمونه‌های ماسه سنگ و سنگ آهک متفاوت است، بنابراین درمواقعی که فشار مخزن افت می‌کند میزان تغییرات سرعت با افت فشار رابطه مستقیم دارد.
  - می‌توان به کمک مقادیر نسبت پواسون و داده‌های لرزه‌ای و همچنین مطالعات AVO درگستره وسیعی نوع لیتولوژی مخزن را پیش‌بینی کرد.

#### References

- Gassmann, F. (1951) *Über die Elastizität poröser Medien*. Vierteljahresschrift d. Naturf. Ges. Zürich. Jahrg. **96**, 1-23
- Biot M. A. (1956) *Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid: 1. Low-frequency range, 2. Higher frequency range*. Journal of the Acoustical Society of America **28**, 168-191
- Wang Z. & Nur A. (1992) *Elastic wave velocities in porous media: A theoretical recipe*, Geophysics Reprint Series, **2**, 1-35
- Han D. Nur A. and Morgan D. L. (1986) *Effective of porosity and clay content on wave velocities in sandstones*. Geophysics, **41**, 895-921
- Wang Z. (2000) *the Gassmann equation revisited comparing laboratory data with Gassmann prediction*, Geophysics Reprint Series, **3**, 8-23
- Eberhart-Philips D., Han D. H. and Zoback M. D. (1989) *Emperical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone*. Geophysics, **54**, 82-89
- Japan National Oil Corporation (JNOC)–Technical Research Center (TRC), (2002). *Rock Physics Data Book*
- Lee, S., and Shaw, J. (1998) *Integration of seismic and geomechanical methods for deep water reservoir prediction and drilling design*, SEG, Expanded Abstract.
- Wang Z. (2001) *Fundamental of Seismic Rock Physics*, Geophysics, **66(2)**, 398-412