

تعبیر و تفسیر پتروفیزیکی مخزن هیدروکربنی در جنوب ایران با استفاده از امواج صوتی تراکمی و برشی

حسین حسین پورصیامی

فارغ التحصیل مهندسی اکتشاف معدن - دانشکده معدن - دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(تاریخ دریافت ۸۴/۵/۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۹/۲۶، تاریخ تصویب ۸۴/۱۱/۲۹)

چکیده

در این مقاله قصد داریم کاربرد مدل کریف را برای تعبیر و تفسیر پتروفیزیکی داده های موجود یکی از میادین هیدروکربوری ایران مورد بررسی قرار دهیم. اساس این مدل استفاده از سرعت امواج فشاری و برشی است. پیشرفت های اخیر در صنعت نفت و ساخت ابزارهای جدید و مدرن در نمودارگیری درون چاهی سبب شده تا میزان علاقمندی به برداشت امواج صوتی فشاری و برشی و نیز تعبیر و تفسیر آنها با هدف تعیین ترکیبات سنگ شناسی و پارامترهای پتروفیزیکی سازندها و نوع سیال روز به روز افزایش پیدا کند. همانطوریکه می دانیم معادلات اساسی ارائه شده از سوی وایلی وریمر (Wyllie, 1956 & Raymer, 1980) در تعبیر و تفسیر های پتروفیزیکی سازندها اغلب مورد استفاده قرار می گیرند اما معادلات مذکور تنها از موج فشاری بهره می برند. در این مقاله قصد داریم ضمن معرفی مدل کریف (Krief, 1990) و کاربرد آن در تعبیر و تفسیر پتروفیزیکی سازندها های مختلف، کاربرد عملی این مدل در یکی از میادین هیدروکربوری ایران را نیز بررسی کنیم. این مدل بر اساس رابطه بین مربعات سرعت امواج فشاری و برشی با تخلخل و نوع سیال سازندها که به صورت علمی - تجربی است، بنا نهاده شده است. بر این اساس اگر نمودار مقاطع مربعات سرعت امواج فشاری و برشی را برای داده های موجود حاصل از یک سازندها تمیز در یک دستگاه مختصات کارترین رسم کنیم، مشاهده خواهیم کرد که بین این داده ها یک رابطه شبه خطی مناسبی وجود دارد.

واژه های کلیدی: نمودار درون چاهی، سرعت موج فشاری، سرعت موج برشی، تخلخل، ترکیب سنگ شناسی، سیال سازندها

مقدمه

در سال ۱۹۵۶ وایلی (Wyllie & et al., 1956)، معادله زمان متوسط که یک رابطه خطی بین تخلخل و زمان عبور صوت یا آهستگی موج فشاری است را ارائه دادند. مقادیر حاصل از رابطه وایلی با اطلاعات به دست آمده از آزمایشگاه اختلاف دارند و این اختلاف در مناطقی که تخلخل بالایی دارند، بیشتر مشاهده می شود [۸، ۱۲]. در سال ۱۹۸۰ ریمر (Raymer & et al., 1980)، و همکارانش دو رابطه جدید برای تخلخل و موج فشاری یکی برای تخلخل های پایین و دیگری برای تخلخل های خیلی بالا ارائه دادند و برای مناطق با تخلخل بین دو حد یاد شده از روش درون یابی بین دو رابطه مذکور استفاده کردند [۱۰]. در سال ۱۹۶۳ پیکت (Pickett, 1963)، مشاهده کرد که برای طیف وسیعی از داده ها، نسبت آهستگی موج فشاری به آهستگی موج برشی $(\Delta t_p / \Delta t_s)$ هنگامی که سازندها اشباع از گاز باشد، ثابت است و این نسبت، زمانی که همان سازندها اشباع از آب گردد با تخلخل تغییر می کند [۹]. آردیتی

در سال ۱۹۵۶ وایلی (Wyllie & et al., 1956)، معادله زمان متوسط که یک رابطه خطی بین تخلخل و زمان عبور صوت یا آهستگی موج فشاری است را ارائه دادند. مقادیر حاصل از رابطه وایلی با اطلاعات به دست آمده از آزمایشگاه اختلاف دارند و این اختلاف در مناطقی که تخلخل بالایی دارند، بیشتر مشاهده می شود [۸، ۱۲]. در سال ۱۹۸۰ ریمر (Raymer & et al., 1980)، و همکارانش دو رابطه جدید برای تخلخل و موج فشاری یکی برای تخلخل های پایین و دیگری برای تخلخل های خیلی بالا ارائه دادند و برای مناطق با تخلخل بین دو حد یاد شده از روش درون یابی بین دو رابطه مذکور استفاده کردند [۱۰]. در سال ۱۹۶۳ پیکت (Pickett, 1963)، مشاهده کرد که برای طیف وسیعی از داده ها، نسبت آهستگی موج فشاری به آهستگی موج برشی $(\Delta t_p / \Delta t_s)$ هنگامی که سازندها اشباع از گاز باشد، ثابت است و این نسبت، زمانی که همان سازندها اشباع از آب گردد با تخلخل تغییر می کند [۹]. آردیتی

سازند را هنگامی که سیال بتواند آزادانه از سازند خارج شود را اندازه می گیرد و M مدولی است که تغییر در فشار هیدرولیکی مورد نیاز برای اعمال مقداری آب به سازند را بدون هیچگونه تغییری در حجم سازند اندازه می گیرد $(\delta(V_{fm})=0)$ [۲،۳]. در نظریه گسمن (Gassmann, 1951)، ضریب بالک سازند و ساختار آن به صورت توابعی از ضریب بالک اجزا ترکیبی سازند (خمیره و سیال) و تخلخل با استفاده از ضریب بایوت به شکل روابط زیر بیان می شوند [۷]:

$$K_{sk} = K_{ma}(1 - \beta) \quad (۶)$$

$$K_{fm} = K_{ma}(1 - \beta) + \beta^2 M \quad (۷)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\beta - \phi}{K_{ma}} + \frac{\phi}{K_{fl}} \quad (۸)$$

با حذف $\beta^2 M$ از معادلات (۵) و (۷) خواهیم داشت:

$$K_{fm} - \lambda_{fm} = K_{sk} - \lambda_{sk} \quad (۹)$$

و در نتیجه:

$$\mu_{fm} = \mu_{sk} \quad (۱۰)$$

به عبارت دیگر، ضریب برشی سازند برابر با ضریب برشی ساختار آن است و حضور یک سیال تاثیر ناچیزی بر روی ضریب برشی سازند دارد [۸]. بر اساس مشاهدات پیکت در یک سازند اشباع از گاز، نسبت سرعت موج فشاری به سرعت موج برشی برای طیف وسیعی از تخلخل ثابت است و برابر با مقدار نسبت سرعت موج فشاری به سرعت موج برشی در خمیره سازند است [۹]:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{V_{pma}}{V_{sma}} \quad (۱۱)$$

این نسبت می تواند به صورت زیر نیز نوشته شود:

$$\frac{\rho_b V_p^2}{\rho_b V_s^2} = \frac{\rho_{ma} V_{pma}^2}{\rho_{ma} V_{sma}^2} \quad (۱۲)$$

در نتیجه می توان برای سازند های اشباع از گاز رابطه بین ضریب بالک و برشی را با استفاده از معادلات (۳) و (۴) به

ارایه رابطه شبه خطی بین مربعات سرعت امواج فشاری و برشی توسط کریف (Krief & et al., 1990)، سبب ایجاد نمودار متقاطع جدیدی شد که برای تشخیص ترکیبات سنگ شناسی و نوع سیال ابزار بسیار مفیدی است [۸].

نظریه ها

بر اساس نظریه کشسانی، اگر مدل ساده ای از سازند را با زیرنویس (fm) در نظر بگیریم، اجزا تشکیل دهنده این سازند عبارتند از سیال سازند با زیرنویس (fl) و خمیره آن با زیرنویس (ma). سیال مذکور، تخلخل سازند (ϕ) را اشغال می کند و در ضمن تراکم پذیر بوده و لزجت ندارد. در این مدل تخلخل به صورت یکنواخت توزیع شده و ساختار سازند، با زیرنویس (sk)، کشسان است. همچنین از ضرایب بالک (K)، برشی (μ) و لامه (λ) برای تعیین خواص کشسانی سازند، ساختار سازند، خمیره و سیال آن استفاده می شود. چون سیال لزجت ندارد بنابراین نظریه کشسانی ضریب برشی سیال حذف می شود.

$$\mu_{fl} = 0 \quad (۱)$$

رابطه (۲) می تواند ضرایب بالک، برشی و لامه که برای تمام مواد کشسان معتبر است، را به هم مرتبط کند.

$$2/3\mu = K - \lambda \quad (۲)$$

مطابق با نظریه کشسانی، روابط بین سرعت صوت، ضریب بالک و ضریب برشی برای هر محیط قابل انتشار، همسان و کشسانی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho_b V_p^2 = K_{fm} + 4/3\mu_{fm} \quad (۳)$$

$$\rho_b V_s^2 = \mu_{fm} \quad (۴)$$

در این روابط ρ_b چگالی بالک، V_p سرعت موج فشاری و V_s سرعت موج برشی است. ضرایب لامه سازند و ساختار آن به تخلخل سازند نیز از طریق رابطه زیر مرتبط می شوند:

$$\lambda_{fm} = \lambda_{sk} + \beta^2 M \quad (۵)$$

در رابطه (۵) عبارت $\beta^2 M$ در واقع واکنش سیال پر شده در تخلخل را با ساختار سازند نشان می دهد. β ضریب بایوت است که نسبت تغییر حجم سیال به تغییر حجم

$$\rho_b V_s^2 = \rho_{ma} V_{sma}^2 (1 - \beta)$$

(۱۹)

در روابط بالا M از معادله (۸) و چگالی بالک سازند (ρ_b) از معادله (۲۰) محاسبه می شوند :

$$\rho_b = (1 - \varphi)\rho_{ma} + \varphi\rho_{fl}$$

(۲۰)

از طرفی همان طوری که می دانیم ضریب بایوت با تخلخل رابطه دارد . یکی از روابط تجربی بین ضریب بایوت و تخلخل استفاده از معادلات (۱۸) و (۱۹) و داده های ریمر است [۱۰]. این داده ها در واقع ترکیبی از جفت مقادیر تخلخل و زمان عبور صوت موج فشاری هستند. خمیره مربوط به این داده ها ماسه سنگ و تغییرات تخلخل از (۰ - ۱۰۰٪) است . معادله استفاده شده توسط ریمر برای سازند های سخت مشابه با معادله (۱۸) است بنابراین می توان نوشت [۸] :

$$\rho_b V_p^2 = \rho_{ma} V_{pma}^2 (1 - \varphi)^{3.8}$$

(۲۱)

اما باید در جستجوی عبارت پیوسته ای بین ضریب بایوت و تخلخل همچون رابطه زیر باشیم [۸] :

$$(1 - \beta) = (1 - \varphi)^{m(\varphi)}$$

(۲۲)

در این رابطه m پارامتر متغیر و تابعی از تخلخل است. اگر مقادیر تخلخل بدست آمده از روابط مذکور را با مقادیر حاصل از داده های ریمر مقایسه شود ، رابطه تجربی زیر که بهترین انطباق بین دو پارامتر m و تخلخل است، به دست می آید [۸] :

$$m(\varphi) = \frac{3}{1 - \varphi}$$

(۲۳)

شکل (۱) تغییرات β را با تخلخل و بر اساس روابط تجربی (۲۲) و (۲۳) ، نشان می دهد . هنگامی که تخلخل بیش از ۵۰٪ می شود ، β به عدد ۱ نزدیک می شود و معادلات (۱۸) و (۱۹) سرعت امواج فشاری و برشی به شکل زیر در می آیند [۸] :

$$\frac{1}{\rho_b V_p^2} = \frac{1 - \varphi}{K_{ma}} + \frac{\varphi}{K_{fl}}$$

(۲۴)

$$\rho_b V_s^2 = 0$$

(۲۵)

صورت زیر نوشت [۸] :

یا

$$\frac{K_{fm} + 4/3\mu_{fm}}{\mu_{fm}} = \frac{K_{ma} + 4/3\mu_{ma}}{\mu_{ma}}$$

$$\frac{K_{fm}}{\mu_{fm}} = \frac{K_{ma}}{\mu_{ma}}$$

(۱۳)

اگر فرض کنیم $M = 0$ است ، هنگامی که سیال سازند گاز باشد عبارت μ_{fm} به صورت تابعی از μ_{ma} و β با استفاده از معادلات (۷) و (۱۳) و جایگزینی K_{fm} بدست می آید :

$$\mu_{fm} = \mu_{ma} (1 - \beta)$$

(۱۴)

در معادله (۸) ، چون مقدار ضریب بالک گاز از نظر کمی کوچکتر از ضریب بالک جامد است، مقدار $1/K_{fl}$ بزرگ خواهد بود و در نتیجه مقدار M قابل صرف نظر کردن است و این همان فرضی است که قبلا در نظر گرفته شده است. برای تعیین ضریب بالک و برشی خمیره و ضریب بالک سیال از معادلات (۳) و (۴) به صورت زیر استفاده می کنیم [۸] :

یا

$$\rho_{ma} V_{pma}^2 = K_{ma} + 4/3\rho_{ma} V_{sma}^2$$

$$K_{ma} = \rho_{ma} (V_{pma}^2 - 4/3V_{sma}^2)$$

(۱۵)

و ضریب برشی خمیره برابر است با :

$$\mu_{ma} = \rho_{ma} V_{sma}^2$$

(۱۶)

اگر رابطه (۱۵) را برای ضریب بالک سیال بنویسیم خواهیم داشت :

یا

$$K_{fl} = \rho_{fl} (V_{pfl}^2 - 4/3V_{sfl}^2)$$

$$K_{fl} = \rho_{fl} V_{pfl}^2$$

(۱۷)

همچنین با استفاده از روابط (۳) و (۴) و بسط آنها می توان به روابط جدیدی برای سرعت موج فشاری و سرعت موج برشی دست یافت [۸] :

$$\rho_b V_p^2 = \rho_{ma} V_{pma}^2 (1 - \beta) + \beta^2 M$$

(۱۸)

$$F = \beta^2 \frac{\rho_{fl} V_{pfl}^2}{\phi} - \rho_b V_{pfl}^2 + \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \beta) \quad (30)$$

از طرفی با استفاده از رابطه (۲۰) و جایگزینی ρ_b در رابطه (۳۰) خواهیم داشت:

$$F = \beta^2 \frac{\rho_{fl} V_{pfl}^2}{\phi} - \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \phi) - \rho_{fl} V_{pfl}^2 \phi + \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \beta)$$

یا

$$F = (\beta - \phi) V_{pfl}^2 \left(\frac{\beta \rho_{fl}}{\phi} + (\rho_{fl} - \rho_{ma}) \right)$$

مقدار $\frac{\beta \rho_{fl}}{\phi}$ کوچک و قابل صرفنظر کردن است بنابراین

مقدار F به مقدار زیر بسیار نزدیک می شود [۸]:

$$F = (\beta - \phi) V_{pfl}^2 (\rho_{fl} - \rho_{ma}) \quad (31)$$

چون در تخلخل های کم، مقدار F در مقایسه با سایر جملات معادله (۲۷) قابل صرفنظر کردن است ($V_p^2 \gg V_{pfl}^2$)، بنابراین اگر مقدار F را از معادله (۲۷) حذف نماییم، معادله (۳۲) به دست خواهد آمد [۸]:

$$\rho_b (V_p^2 - V_{pfl}^2) = \rho_{ma} (V_{pma}^2 - V_{pfl}^2) (1 - \beta) \quad (32)$$

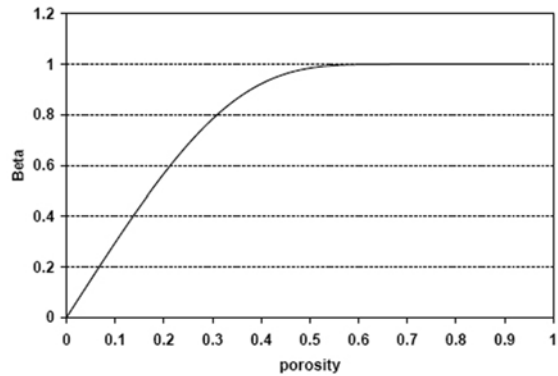
و اگر معادله (۳۲) را بر معادله (۱۹) تقسیم کنیم، خواهیم داشت [۸]:

یا

$$\frac{\rho_b (V_p^2 - V_{pfl}^2)}{\rho_b V_s^2} = \frac{\rho_{ma} (V_{pma}^2 - V_{pfl}^2) (1 - \beta)}{\rho_{ma} V_{sma}^2 (1 - \beta)}$$

$$V_p^2 = \left(\frac{V_{pma}^2 - V_{pfl}^2}{V_{sma}^2} \right) V_s^2 + V_{pfl}^2 \quad (33)$$

معادله (۳۳) رابطه خطی بین مربعات بین سرعت امواج فشاری و برشی را نشان می دهد [۸]. اگر در مختصات کارتزین، بر روی محور X ها، V_s^2 را و در محور Y ها، V_p^2 را رسم کنیم، معادله (۳۳) خط مستقیمی را نشان خواهد داد که محور Y ها را در نقطه $(0, V_{pfl}^2)$ (نقطه سیال) قطع و از نقاط (V_{sma}^2, V_{pma}^2) (نقاط خمیره سازند) نیز عبور می کند. شیب این خط تابعی از سرعت امواج فشاری و برشی در خمیره و سیال است و به صورت زیر محاسبه می شود [۸]:



شکل ۱: تغییرات β در مقابل تخلخل [۸].

چون ضریب بالک برابر با $\rho_b V_p^2$ است، هنگامی که $\rho_b V_s^2 = 0$ می گردد، معادله (۲۴) معادل با رابطه وود (Wood, 1941) برای سرعت امواج صوتی است [۸، ۱۱]:

$$\frac{1}{K_{fm}} = \frac{1 - \phi}{K_{ma}} + \frac{\phi}{K_{fl}} \quad (26)$$

مدل کریف

کریف (Krief & et al. 1990) بر اساس معادلات بیان شده در بالا، نشان داد که سرعت امواج فشاری و برشی به وسیله رابطه شبه خطی در محدوده تخلخل (۰ تا ۰.۵۰) با یکدیگر ارتباط دارند. معادله (۱۸) را می توان به صورت زیر نیز نوشت [۸]:

$$\rho_b V_p^2 + \rho_b V_{pfl}^2 - \rho_b V_{pfl}^2 = \rho_{ma} V_{pma}^2 (1 - \beta) + \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \beta) - \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \beta) + \beta^2 M$$

و یا:

$$\rho_b (V_p^2 - V_{pfl}^2) = \rho_{ma} (V_{pma}^2 - V_{pfl}^2) (1 - \beta) + \beta^2 M - \rho_b V_{pfl}^2 + \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \beta) \quad (27)$$

که در آن:

$$F = \beta^2 M - \rho_b V_{pfl}^2 + \rho_{ma} V_{pfl}^2 (1 - \beta) \quad (28)$$

همانطوری که می دانیم، ضریب بالک یک سیال خیلی کوچکتر از ضریب بالک یک جامد است ($K_{fm} \gg K_{fl}$)، بنابراین می توان با تقریب مناسب نوشت [۸]:

$$\frac{1}{M} = \frac{\beta - \phi}{K_{ma}} + \frac{\phi}{K_{fl}} \quad \text{و یا} \quad M = \frac{K_{fl}}{\phi} \quad (29)$$

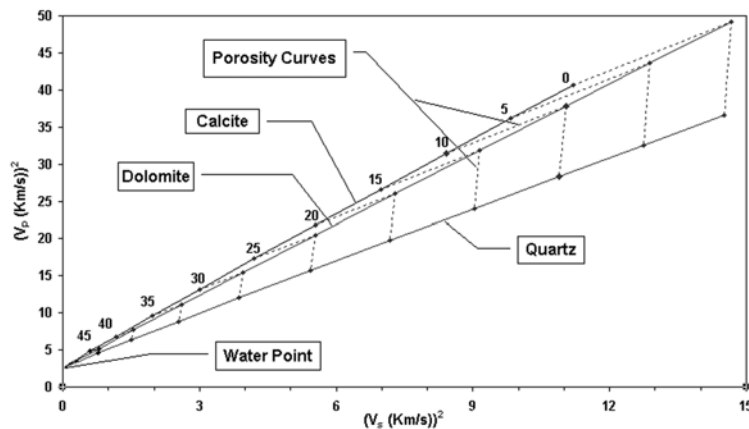
اگر معادله (۲۸) را بسط دهیم، خواهیم داشت:

(۴) نمودارهای تعیین ترکیب سنگ شناسی و تخلخل در مقابل تغییرات V_p^2 و V_s^2 را برای سه نوع سیال سازندی (آب، نفت و گاز) نشان می‌دهند. به دلیل تغییر سرعت موج فشاری در آب، نفت و گاز، امکان تشخیص نوع سیال سازند از روی نقطه برخورد منحنی با محور V_p^2 وجود دارد. عرض از مبدا برای آب $۲/۶ (km/s)^2$ ، نفت $۱/۵ (km/s)^2$ و گاز $۰/۴ (km/s)^2$ است [۸].

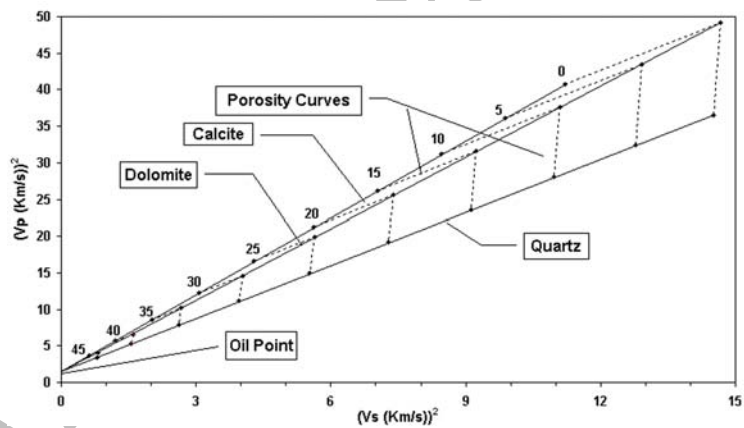
$$\text{شیب خط} = \frac{V_{pma}^2 - V_{pfl}^2}{V_{sma}^2}$$

(۳۴)

بنابراین اگر نمودار متقاطع V_p^2 در مقابل V_s^2 را برای خمیره های استاندارد (کلسیت، دولومیت و کوارتز) و سیال سازندی (آب، نفت یا گاز) رسم کنیم، هنگامی که نرخ تغییرات تخلخل ۰.۱ باشد، نمودار مزبور، نمودار ترکیب سنگ شناسی خواهد بود [۸]. شکل های (۲)، (۳) و



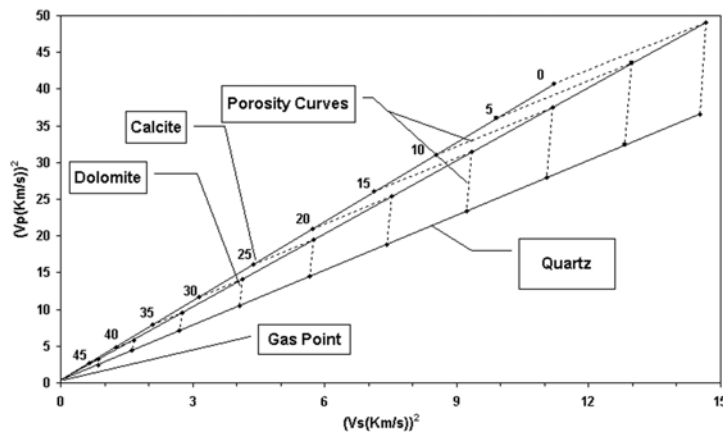
شکل ۲: نمودار تعیین ترکیب سنگ شناسی و تخلخل با استفاده از سرعت موج فشاری و برشی (سیال سازندی آب است).



شکل ۳: نمودار تعیین ترکیب سنگ شناسی و تخلخل با استفاده از سرعت موج فشاری و برشی (سیال سازندی نفت است).

جدول ۱: تغییرات شیب برای کانی ها و سیالات مختلف.

شیب	نوع کانی
۲/۳۴	کوارتز آب دار
۲/۵۴	کوارتز گاز دار
۳/۳۹	کلسیت آب دار
۳/۵۹	کلسیت گاز دار
۳/۱۷	دولومیت آب دار
۳/۳۳	دولومیت گاز دار



شکل ۴: نمودار تعیین ترکیب سنگ شناسی و تخلخل با استفاده از سرعت موج فشاری و برشی (سیال سازندی گاز است).

جدول ۲: مقایسه تغییرات شیب کانی ها و سیالات با داده های واقعی.

V_{pfl}^2			$(V_{pma}^2 - V_{pfl}^2) / V_{sma}^2$			
گاز	نفت	آب	گاز	نفت	آب	
۰/۴۰	۱/۵۰	۲/۶۰	۳/۵۹	۳/۴۹	۳/۳۹	خط کلسیت
۰/۴۰	۱/۵۰	۲/۶۰	۳/۳۲	۳/۲۵	۳/۱۷	خط دولومیت
۰/۴۰	۱/۵۰	۲/۶۰	۲/۴۹	۲/۴۲	۲/۳۴	خط کوارتز
۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۳/۳۲	۳/۳۲	۳/۳۲	خط برازش

نمودار متقاطع $(V_s^2 - V_p^2)$ نیز تغییر می کند. روند افزایش تخلخل در جهت کاهش V_s^2 و V_p^2 است و این کاهش تا نقطه سیال ادامه دارد. همچنین برای تعیین نوع سیال سازند می توان از اختلاف بین سرعت موج فشاری در آب، گاز و نفت استفاده نمود.

برای نشان دادن کاربرد عملی مدل کریف از داده های درون چاهی مربوط به یکی از میداین هیدروکربوری در جنوب ایران استفاده شده است. به دلیل اهمیت بارز این گونه اطلاعات از ذکر نام میدان معذور هستیم. این داده ها مربوط به چاهی در یک مخزن گازی است و دارای نمودارهای درون چاهی صوتی فشاری و برشی می باشند و ما قصد داریم در این مقاله به اهمیت استفاده از نمودارهای درون چاهی صوتی در تشخیص ترکیبات سنگ شناسی، نوع سیال سازندی و تخلخل و کاربرد مدل کریف در میدان مذکور بپردازیم. در شکل (۵) نمودارهای خام درون چاهی در چاه مذکور نشان داده شده است. ستون اول از سمت چپ شامل نمودارهای قطر سنجی چاه و رشته ابزار حفاری و نمودار پرتو گاما است. در ستون وسط نمودارهای PEF، چگالی، تخلخل به همراه نمودارهای آهستگی موج فشاری و برشی آمده اند و در ستون سمت راست نمودارهای

بنابراین تعیین نوع سیال آبی سازند از گاز با توجه به اختلاف V_p^2 آنها به آسانی میسر است. هنگامی که سیال سازند مشخص می شود، خطی که از بین نقاط داده های نمودار درون چاهی و نقطه سیال عبور می کند، نشان دهنده ترکیب سنگ شناسی خمیره سازند است. شیب این خط بر اساس نوع خمیره تغییر می کند. مقدار این شیب برای کانی ها و سیالات سازندی مختلف در جدول (۱) آمده است. همان طوری که در جدول (۱) مشاهده می شود، مقدار شیب برای کوارتز پایین تر از کلسیت و دولومیت است و لذا می توان کربنات ها را از ماسه سنگ به آسانی تشخیص داد [۸].

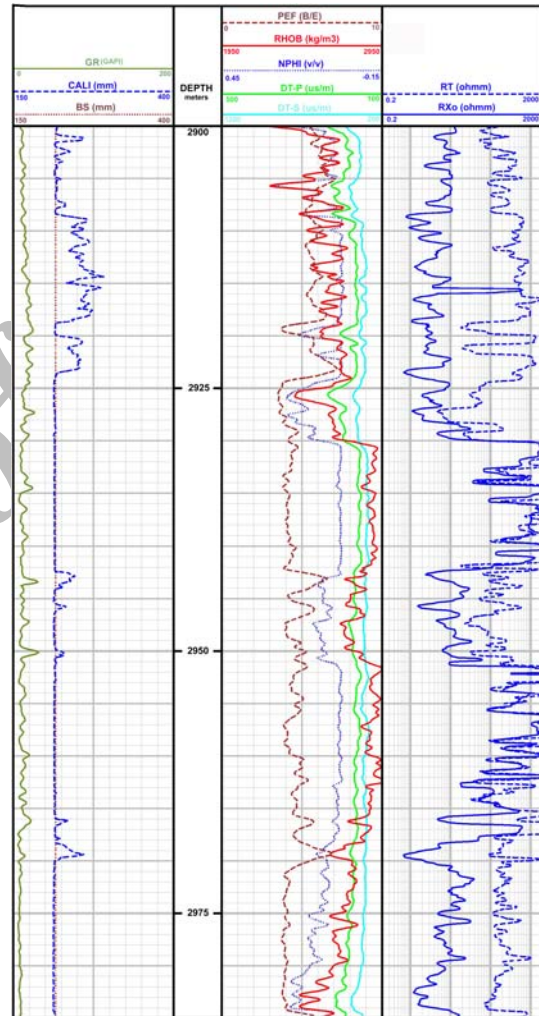
مطالعه موردی

مطابق با مدل کریف، برای سیال های مختلف مانند آب، نفت و گاز و نیز کانی های کلسیت، دولومیت و کوارتز با مشخصات بیان شده در جدول (۲)، نمودارهای گوناگون V_p^2 برحسب V_s^2 به ترتیب در شکل های (۲)، (۳) و (۴) رسم شده اند. همان طوری که در این شکل ها مشاهده می شود، منحنی های تخلخل و ترکیب سنگ شناسی تابع نوع سیال بوده و با تغییر آن، موقعیت آنها در

از مبدا که در واقع نقطه سیال (V_{pfl}^2) است، مشخص گردد (شکل (۶)). همان طوری که در شکل (۶) مشاهده می شود، عرض از مبدا برای خط برازش شده برابر با ($V_{pfl}^2 = 0/1$) است که نزدیک به مقدار سرعت موج فشاری در گاز ($V_{pfl}^2 = 0/4$) می باشد. البته مقدار V_{pfl}^2 برای آب و $2/6$ و برای نفت $1/5$ است که با مقدار مربوط به خط برازش شده اختلاف نسبی زیادی دارند. اگر همین روش را برای دو حالت دیگر، زمانیکه سیال سازندی گازی و نفتی باشد، انجام دهیم (شکل های (۷) و (۸)) مشاهده خواهیم کرد که خط برازش شده انطباق زیادی با نموداری که سیال سازندی آن گاز است، دارد. بنابراین از روش کریف مشخص شد که سیال سازندی در این اینتروال مورد نظر گاز می باشد. لازم به توضیح است که قبلا بر اساس مطالعات جامع پتروفیزیکی در این مخزن مشخص شده بود که سیال سازندی، گازی است. به عبارت دیگر می توان نتیجه گرفت که این روش قابلیت تعیین نوع سیال سازندی را دارد. از طرفی اگر بر اساس مدل پیکت نمودار Δt_p را بر حسب Δt_s برای داده های این چاه رسم نماییم (شکل (۹))، مشاهده خواهیم کرد که پراکندگی داده ها حول محوری که از مبدا مختصات عبور می کند، خواهد بود. بهترین خط انطباق برازش شده بر روی این داده ها با ضریب همبستگی ($R^2 = 0/9$) نیز از مبدا مختصات می گذرد و یا به عبارت دیگر نسبت سرعت موج فشاری به سرعت موج برشی برای تمام تخلخل ها ثابت و برابر با ($V_p/V_s = 1/82$) است و همان طوری که پیکت بر روی داده های خود مشاهده کرد، نسبت سرعت موج فشاری به سرعت موج برشی در سازند های اشباع از گاز ثابت و مستقل از تغییرات تخلخل می باشد.

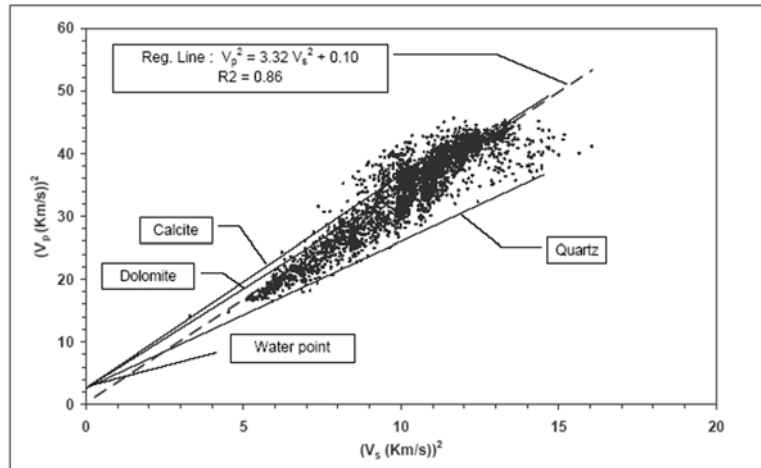
ترکیب سنگ شناسی: دومین مولفه در این روش، تعیین ترکیب سنگ شناسی در این چاه است. در این حالت اگر در نمودار متقاطع ($V_s^2 - V_p^2$) در شرایط سیال گازی، داده ها را وارد کنیم (شکل (۸)) مشاهده می کنیم که بخش عمده ای از نقاط در محدوده ترکیب سنگ شناسی دولومیت و کلسیت قرار می گیرند. مقدار شیب بهترین خط انطباق برازش شده برابر با $\{(V_{pma}^2 - V_{pfl}^2)/V_{sma}^2\} = 3/32$ است که برابر با شیب خط دولومیت می باشد. به عبارت دیگر مطابق با این مدل، ترکیب سنگ شناسی داده ها دولومیت تا دولومیت آهکی است.

مقاومتی مشاهده می شوند. برای استفاده از مدل کریف، ابتدا نمودار های آهستگی مربوط به موج فشاری و برشی را به نمودار های سرعتی تبدیل نمودیم. سپس مطابق با نمودار متقاطع ($V_s^2 - V_p^2$) اگر مقادیر V_s^2 را بر روی محور افقی و V_p^2 متناظر با آن را در محور عمودی تعیین و نقاط مربوطه را بر روی نمودار مشخص نماییم، با فرض آنکه سیال سازندی آب باشد، شکل (۶) به دست خواهد آمد.

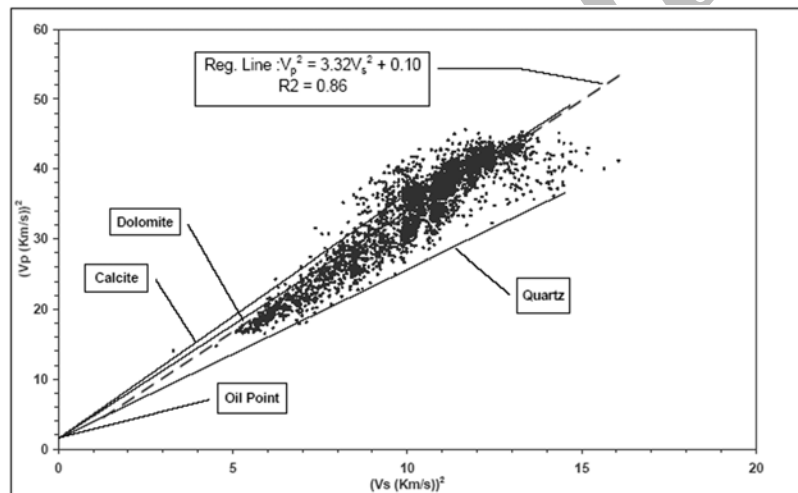


شکل ۵: نمودارهای خام درون چاهی برای داده های واقعی در یک مخزن گازی.

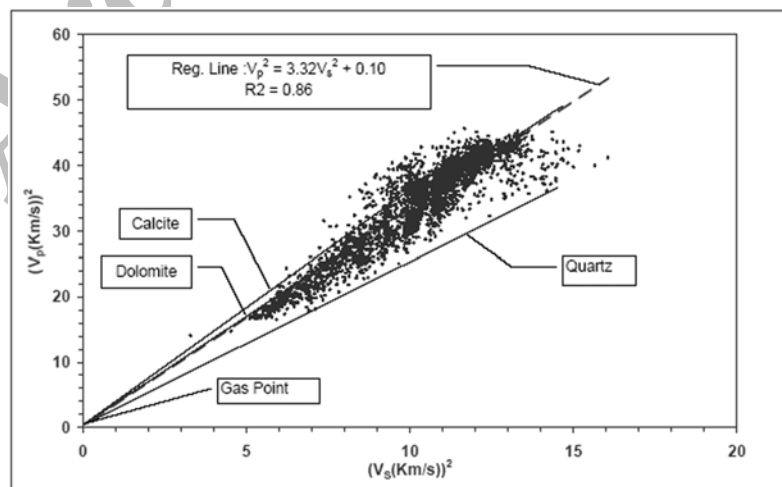
سیال سازندی: اولین مولفه ای که در این روش اهمیت دارد، تعیین نوع سیال سازندی است. در این حالت برای تعیین نوع سیال سازندی ابتدا خطی را بر نقاط (V_s^2 ، V_p^2) که بیشترین انطباق را دارد، برازش می کنیم، سپس این خط را امتداد داده تا نقطه برخورد با محور عمودی یا عرض



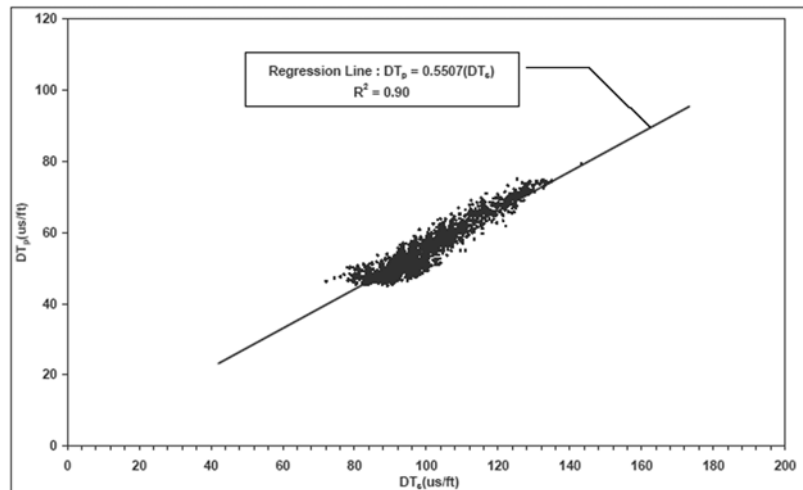
شکل ۶: تغییرات V_p^2 در برابر V_s^2 برای داده های واقعی مخزن گازی در جنوب ایران (سیال سازندی آب است).



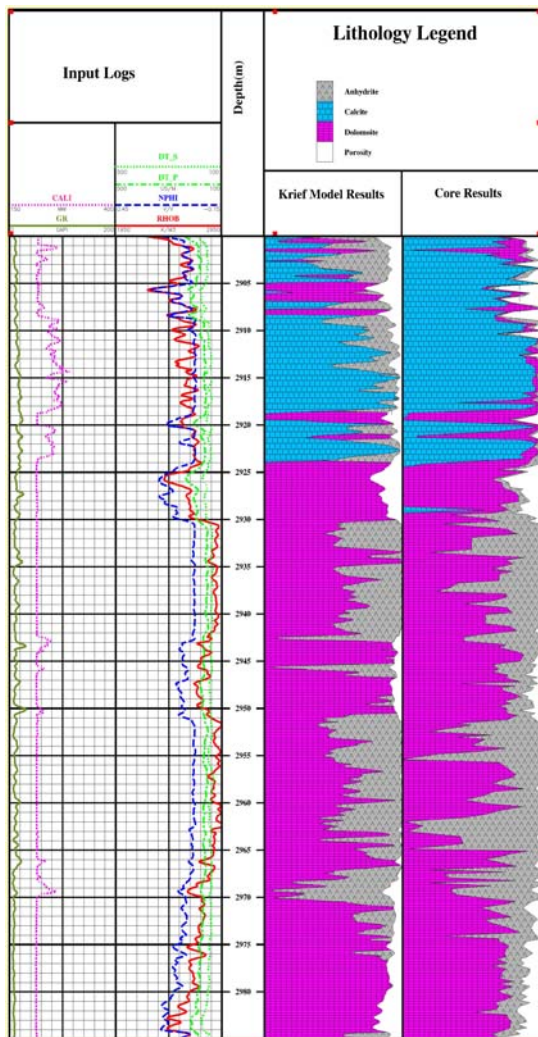
شکل ۷: تغییرات V_p^2 در برابر V_s^2 برای داده های واقعی مخزن گازی در جنوب ایران (سیال سازندی نفت است).



شکل ۸: تغییرات V_p^2 در برابر V_s^2 برای داده های واقعی مخزن گازی در جنوب ایران (سیال سازندی گاز است).



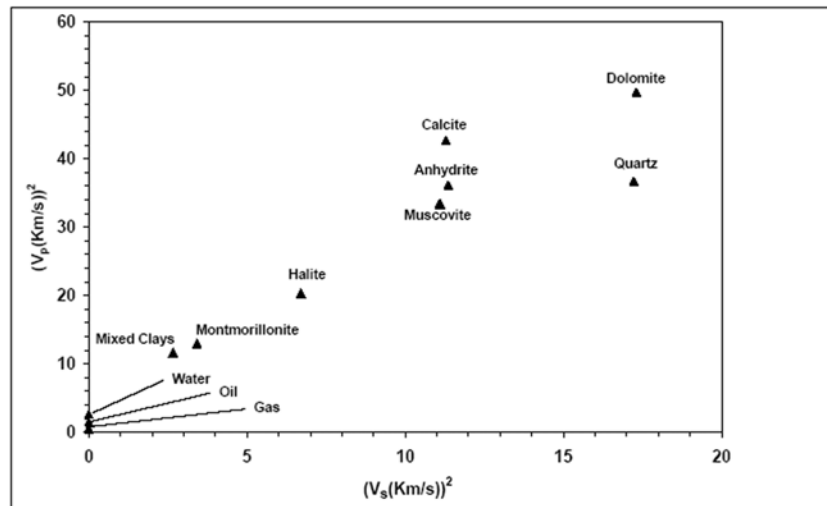
شکل ۹: تغییرات آهستگی موج فشاری (Dtp) در برابر آهستگی موج برشی (Dts) برای داده های واقعی مخزن گازی در جنوب ایران.



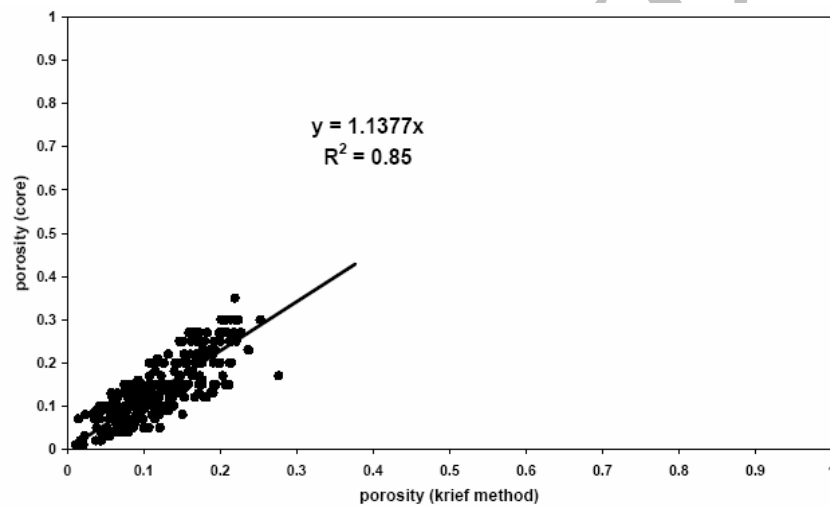
شکل ۱۰: مقایسه ترکیب سنگ شناسی به دست آمده از روش کریف با مطالعات آزمایشگاهی.

البته قبلا بر اساس مطالعه سنگ شناسی بر روی مقاطع نازک در آزمایشگاه و مطالعه پتروفیزیکی، ترکیب سنگ شناسی غالب در این مخزن نیز دولومیت تا دولومیت آهکی تعیین شده بود. شکل (۱۰) بر اساس مطالعه سنگ شناسی در بخشی از این مخزن و به کارگیری مدل کریف تهیه شده است. همان طوری که در شکل (۱۰) مشاهده می شود ترکیب سنگ شناسی بدست آمده از مطالعات سنگ شناسی در آزمایشگاه با مدل کریف انطباق قابل قبولی دارد [۵، ۶]. شکل (۱۱) نمودار تعیین ترکیب سنگ شناسی که بر اساس مدل کریف و برای تعدادی از کانی ها به دست آمده را نشان می دهد. همان طوری که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، دولومیت در منتهی الیه شمال شرقی و سیال های سازندی در جنوب غربی این نمودار قرار دارند. همچنین با استفاده از نمودار شکل (۱۱) می توان تنوعی از ترکیب های سنگ شناسی حاصل از کانی های موجود را مشخص کرد.

تخلخل: سومین مولفه، تعیین تخلخل است. همان طوری که توضیح داده شد، منحنی های تخلخل به صورت تابعی از V_p^2 و V_s^2 در نمودار های متقاطع $(V_s^2 - V_p^2)$ (شکل های ۳، ۴) آمده اند. برای تعیین تخلخل با استفاده از مدل کریف، ابتدا نقاط مربوط به هر یک از داده ها V_p^2 ، V_s^2 را در نمودار متقاطع $(V_s^2 - V_p^2)$ (متناظر (آب، گاز، نفت) وارد می کنیم و سپس با توجه منحنی های تخلخل در این نمودارها مقادیر تخلخل قرائت و ثبت می شوند.



شکل ۱۱: نمودار متقاطع V_p^2 در برابر V_s^2 برای تعیین ترکیب سنگ شناسی.



شکل ۱۲: نمودار مقادیر تخلخل به دست آمده از مغزه نسبت به مقادیر حاصل از مدل کریف.

این مطالعه در حد قابل قبولی است.

نتیجه گیری

۱. پیشرفت های اخیر در صنعت نفت و ساخت ابزارهای جدید و مدرن در نمودارگیری درون چاهی سبب شده تا میزان علاقمندی به برداشت امواج صوتی فشاری و برشی روز به روز بیشتر گردد. ابداع ابزارها و روش های جدید عمدتاً در جهت کاهش هزینه های اکتشاف و استخراج منابع هیدروکربنی است. بنابراین استفاده از روش های نوین و کم هزینه به ویژه مدل کریف در تعبیر و تفسیر پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی بسیار ارزشمند و مفید هستند.
۲. به کارگیری مدل کریف در تعیین ترکیب سنگ شناسی، نوع سیال و تخلخل مخزن گازی در جنوب ایران نشان داد که این مدل از درجه اعتبار قابل قبولی برخوردار است.

با استفاده از این روش ابتدا تخلخل مربوط به هر یک از داده های مورد نظر در نمودار متقاطع $(V_s^2 - V_p^2)$ متناظر (سیال گازی) تعیین گردید و سپس برای مشخص کردن میزان دقت و صحت تخلخل های به دست آمده از مدل کریف، آنها را با مقادیر تخلخل حاصل از مغزه ها در نمودار متقاطعی که محور افقی آن تخلخل حاصل از مدل کریف و محور عمودی آن تخلخل به دست آمده از روی مغزه ها است، قرار دادیم (شکل ۱۲).

همان طوری که از شکل (۱۲) پیداست، میزان انطباق داده ها نسبتاً خوب است و بهترین خط انطباق برازش شده به آنها، دارای ضریب همبستگی ۰/۸۵ است و از نقطه مبدا مختصات هم عبور می کند. به عبارت دیگر میزان تناظر یک به یک مقادیر تخلخل به دست آمده از دو روش مناسب بوده و درجه اعتبار مدل کریف در تعیین مقدار تخلخل در

۳. مقدار خطای مشاهده شده در تعیین پارامترهای پتروفیزیکی مخزن گازی مورد مطالعه ناشی از ساده سازی در پارامترهای نظریه کشسانی (نظریه گسمن) [۷] به ویژه پارامترهای مربوط به سیال است که این مقدار خطا در حد مجاز است.
۴. استفاده از رابطه تجربی ریمر [۱۰] (روابط ۲۲ و ۲۳) در مطالعات پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی که طیف تغییرات تخلخل در مخازن اغلب کمتر از ۵۰ درصد است، قابل قبول می باشد.

مراجع

- 1 - Arditty, P. C., Schein, F. and Staron, P. (1988). "Determination of reservoir parameters using the EVA acoustic logging tool." *Elf-Aquitaine*, Presented at S.E.G. workshop.
- 2 - Biot, M. A. (1941). "General theory of three-dimensional consolidation." *Journal of Applied Physics*, Vol. 12, PP.155-164.
- 3 - Biot, M. A. (1956). "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I: low-frequency range; II: higher-frequency range." *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 28, PP.168-191.
- 4 - Castagna, J. P., Batzle, M. L. and Eastwood, R. L. (1985). "Relationship between compressional-wave and shear wave velocities in clastic silicate rocks." *Geophysics*, Vol. 50, PP.571-581.
- 5 - Clavier, C., Coats, G. and Dumanoir, J. (1977). "The theoretical and experimental basis for the Dual-Water model for the interpretation of shaly sands, SPE-6859." *Society of Petroleum Engineers, 52nd Annual Technical Meeting and Exhibition*, Preprint, PP. 16.
- 6 - Domenico, S. N. (1974). "Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale." *Geophysics*, Vol. 39, No. 6, PP.759-769.
- 7 - Gassmann, F. (1951). "Elasticity of porous media." *Vierteljahrsschrder Naturforschenden Gessellschaft*, Vol. 96, PP.1-23.
- 8 - Krief, M., Garta, J., Stellingwerf, J., and Venture, J. (1990). "A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves." *The Log Analysis*, Vol. 31, PP.355-369.
- 9 - Pickett, G. R. (1963). "Acoustic character log and their applications in formation evaluation." *JPT, Trans. AIME*.
- 10 - Raymer, L. I., Hunt, E. R. and Gardner, J. S. (1980). "An improved sonic transit time to porosity transform, paper p, in 21st Annual logging symposium transactions." *Society of professional well log Analysis*, PP. 12.
- 11 - Wood, A.W. (1941). *A textbook of sound: The Macmillan Company*, New York.
- 12 - Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R. and Gardner, L. W. (1956). "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media." *Geophysics*, Vol. 21, No. 1, PP.41-70.