

تعیین واحدهای ژئومکانیکی (GMUs) مخزن با استفاده از داده‌های چاه پیمایی در یکی از میادین نفتی خلیج فارس



محمد علی فرجی^۱، علی کدخدایی^۲، محمد شیرمحمدی^۲

۱- دانشجوی زمین شناسی نفت دانشگاه تهران

۲- دکترای زمین شناسی نفت عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی زمین شناسی نفت دانشگاه تهران

m.faraji@ut.ac.ir



چکیده :

کاربرد مکانیک سنگ در بخش‌های مختلف صنعت نفت در موضوعاتی نظیر شکافت هیدرولیکی، ذخیره سازی زیرزمینی گاز، ماسه دهی چاه‌ها، نشست سطح زمین یا کف دریا، فعال شدن گسل‌ها، تغییر تراوایی، بهره‌دهی چاه‌ها، ازدیاد برداشت در مخازن نفت سنگین و ... از سال‌ها پیش مطرح و پروژه‌های متعددی در این زمینه تعریف شده است. در ایران علیرغم ثبت مشکلاتی نظیر مچالگی لوله جداری، تولید ماسه، بهره دهی چاه‌ها در مخازن شکافدار، مشکلات آتی ذخیره سازی گاز و ...، مطالعات ژئومکانیکی مورد توجه جدی قرار نگرفته است. به طوریکه در بسیاری از میادین تولیدی کشور هیچ آزمایش مکانیک سنگی انجام نشده است، بهمین دلیل اطلاعات ناچیزی در مورد خواص مکانیکی سنگ مخزن و پوش سنگ میادین موجود است. در این مطالعه با استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی (لاگ‌های صوتی و چگالی) پارامترهای مکانیکی یا ژئومکانیکی سنگ‌های مخزن محاسبه شده و نتایج آنها با نقاط دارای داده‌های مغزه مقایسه شد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول محاسبات انجام‌شده بود. در نهایت این پارامترهای ژئومکانیکی در قالب ۶ واحد ژئومکانیکی مختلف طبقه بندی شد که از واحد ۱ به واحد ۶ کیفیت ژئومکانیکی سنگ کاهش پیدا میکند. سنگ‌هایی که در واحد ۱ قرار می‌گیرند بهترین کیفیت ژئومکانیکی را دارند و سنگ‌های واحد ۶ دارای کمترین کیفیت ژئومکانیکی است که سنگ‌های دارای شکستگی زیاد و لیتولوژی‌های شیلی در این واحد قرار می‌گیرند و بنابراین مستعد ریزش هنگام حفاری هستند.

واژه‌های کلیدی : مکانیک سنگ، لاگ‌های پتروفیزیکی، واحدهای ژئومکانیکی، شکستگی، پارامترهای ژئومکانیکی

Establishing reservoir Geomechanical Units (GMUs) based on well log data in one of the Persian Gulf oilfields

Mohammad Ali Faraji¹, Ali Kadkhodaie², Mohammad Shir Mohammadi¹

1 - Department of Geology, University of Tehran

2- Department of Geology, University of Tabriz

m.faraji@ut.ac.ir

Abstract:

Rock mechanics applications in the different sections of petroleum industry such as hydraulic fracturing, underground gas reservation, sand production, sea floor or ground subsidence, faults activation, permeability changes, wells performance, enhance oil recovery in heavy oil reservoirs etc... have considered from last years and numerous projects are defined in this context. Despite of problems such as casing collapse, sand production, well performance in fractured reservoirs, future gas reservation obstacles and so on, there is no serious attention to geomechanical studies, meanwhile, in most of oilfields non rock mechanic experiments have done, so there is scant information about mechanical properties of reservoirs and cap rocks. In this study, reservoir geomechanical parameters are calculated based on well log data (Sonic and Density Log) then results are plotted against core data and a Correlation Coefficient equals 0.85 (C.C =0.85) achieved that this proved the accuracy of calculations. Finally these parameters were clustered into 6 Geomechanical Units (GMUs), that GMU 1 is the best unit at the view of geomechanical quality and GMU 2 has worse quality which fractured rocks (permeable intervals) and shaly rocks (prone to washout during drilling).

Keywords: Rock Mechanics, Well Logs, GMUs, Fracture, Geomechanical Parameters, Washout

۱- مقدمه :

مکانیک سنگ یا ژئومکانیک در مباحث نفتی با تأثیر تنش و مقاومت سنگ بر رفتار سازندها در نتیجه فعالیت‌های نفتی سر و کار دارد. مسائل مربوط به ژئومکانیک در تمامی مراحل توسعه میدان، از همان مراحل اولیه اکتشاف، که سوالات اساسی نظیر پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری مطرح می‌شود، تا مراحل ارزیابی، توسعه و استخراج میدان، که اپراتور با مسائلی نظیر بهینه‌سازی پایداری چاه، جهت حفاری و پیش‌بینی بسته بودن گسل‌ها و تراوایی شکاف روبرو می‌باشد، مطرح می‌گردد. خواص ژئومکانیکی سنگهای مخزن و پوش در حفاری و تولید و فرآیندهای بازیافت تأثیر به‌سزایی دارد.

سنگهای با کیفیت پایین ژئومکانیکی یعنی دارای مقاومت تک‌محوری، نسبت پواسون، مدول یانگ، مدول بالک و مدول برشی پایین، در صورت شیلی بودن می‌توانند مشکلات عدیده ای مثل ریزش دیواره چاه در هنگام حفاری ایجاد کنند، این سنگها هم‌چنین در صورت مخزنی بودن می‌توانند کیفیت بالایی را به علت فراوانی شکستگی‌ها و تراوایی بالا از خود نشان دهند. سنگهای با کیفیت بالای ژئومکانیکی سنگهای سفت و سختی را شامل می‌شوند که اغلب پوش سنگ‌ها و واحدهای مخزنی فاقد شکستگی از این نوع سنگ‌ها می‌باشند. در این مطالعه با استفاده از داده‌های لاگ (به ویژه لاگ‌های صوتی و چگالی) و داده‌های مغزه، واحدهای ژئومکانیکی برای ۳ عدد از چاه‌های یکی از میادین نفتی واقع در خلیج فارس محاسبه شده است که به دلیل محرمانه بودن اطلاعات از ذکر نام میدان و موقعیت آن خودداری شده است. در این میدان افق‌های مختلفی از قبیل گدوان، سورمه، کنگان و دالان دارای پتانسیل تولید هستند و سازندهای گچساران و دشتک و انیدریت هیت پوش سنگ‌های اصلی این میدان می‌باشند.

۲- روش‌ها و مواد:

۲-۱: پارامترهای ژئومکانیکی مخزن:

پارامترهای اصلی ژئومکانیکی مخزن عبارتند از :

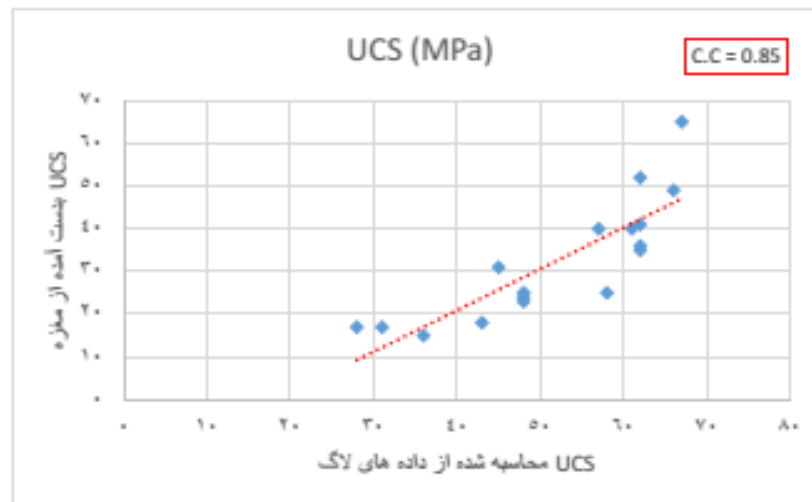
۱- مقاومت فشاری تک‌محوری (Compressive Uniaxial Strength)

این پارامتر نشان‌دهنده میزان مقاومت سنگ در برابر فشار و بارگذاری است که میزان آن توسط آزمایش تک‌محوری فشاری، چکش اشمیت (Schmidt) و آزمایش بار نقطه ای بدست می‌آید (Ph.Kearey et al., 2002). در این مطالعه میزان این مقاومت با استفاده از داده‌های لاگ به صورت غیرمستقیم تخمین زده شده است (M.Zoback, 2007) که فرمول آن در زیر آمده است:

$$UCS = (7682/\Delta t)^{1.82}/145 \quad (1)$$

که در این رابطه UCS، مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال و Δt مقدار فرانت لاگ صوتی بر حسب میکروثانیه بر فوت

در شکل ۱ کراس پلات UCS محاسبه‌شده در مقابل مقادیر بدست‌آمده از داده‌های مغزه نشان داده شده است:



شکل ۱: کراس پلات مقاومت تک محوری بدست آمده از لاگ در مقابل داده‌های مغزه و ضریب همبستگی آنها

این مدول در آزمایشگاه و به صورت مستقیم از نسبت تنش طولی وارد شده به نمونه سنگ به استرین طولی حاصل از آن بدست می‌آید (Ph.Kearey et al., 2002). که در اینجا به صورت غیرمستقیم مطابق رابطه (۲) محاسبه شده است (M.Zoback, 2007):

$$E = \left(\frac{\rho_b}{\Delta t_s^2}\right) \left(\frac{3(\Delta t_s^2) - 4(\Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}\right) * 1.34 * 10^{10} \quad (2)$$

که در این رابطه E، مدول یانگ بر حسب Psi، ρ_b چگالی کل بر حسب گرم بر سانتیمترمکعب، Δt_s لاگ صوتی موج برشی و Δt_p لاگ صوتی موج فشارشی بر حسب میکروثانیه بر فوت

۳- نسبت پواسون (Poisson's ratio)

این پارامتر عبارت است از نسبت استرین جانبی به طولی (Ph.Kearey et al., 2002) که در این مطالعه به صورت غیر مستقیم از رابطه (۲) محاسبه شده است (M.Zoback, 2007):

$$\text{Poisson's ratio} = 0.5 \left(\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}\right) \quad (3)$$

که در این رابطه V_p سرعت موج فشارشی و V_s سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه می باشد.

۴- مدول برشی (Shear Moduli) به صورت غیر مستقیم از رابطه زیر محاسبه شده است (M.Zoback, 2007):

$$G = \left(\frac{\rho_b}{DT_s^2}\right) * 1.34 * 10^{10} \quad (4)$$

که در این رابطه G مدول برشی بر حسب Psi، ρ_b چگالی کل قرائت شده از لاگ چگالی و DT_s لاگ صوتی موج برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت

۵- مدول بالک (Bulk Moduli) که از رابطه زیر محاسبه می شود (M.Zoback, 2007):

$$K = \rho_b \left(\left(\frac{1}{DT_p^2}\right) - \left(\frac{4}{3DT_s^2}\right) \right) * 1.34 * 10^{10} \quad (5)$$

که در این رابطه K مدول بالک بر حسب Psi، DT_p لاگ صوتی موج فشارشی و DT_s لاگ صوتی موج برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت با توجه به اینکه لاگ صوتی موج برشی برای چاه‌ها در دسترس نبود، مقادیر سرعت موج برشی و لاگ صوتی موج برشی از رابطه بین سرعت موج فشاری و برشی بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی تخمین زده شد (J.P.Castagna et al., 1985).

به علت بزرگ بودن مقادیر پارامترهای برشی، بالک و یانگ، این پارامترها در ادامه محاسبات به صورت MPsi لحاظ شده اند.

متأسفانه به علت ناقص بودن داده‌های مغزه امکان مقایسه سایر پارامترهای محاسبه شده با داده‌های مغزه وجود نداشت. لیکن با توجه به اینکه در نقاط با مقاومت تک محوری بالا سایر پارامترهای محاسبه شده هم مقادیر بالایی را نشان می دادند و نیز بلعکس، لذا می توان از دقت قابل قبول محاسبات اطمینان حاصل کرد.

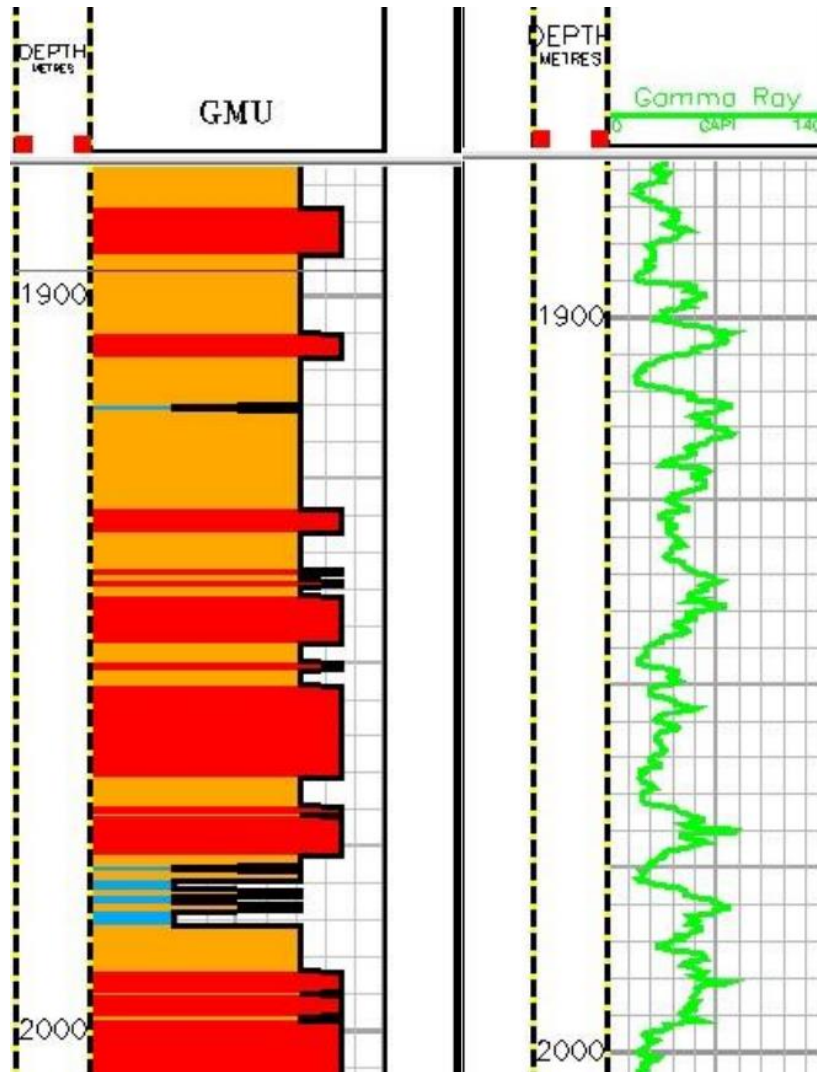
۲-۲: تعیین واحدهای ژئومکانیکی

با استفاده از روابط (۱) تا (۵) و رابطه بین سرعت امواج برشی و فشاری، مقدار پارامترهای ژئومکانیکی برای نقاطی که دارای داده‌های لاگ بودند در ۳ چاه مورد مطالعه محاسبه شد. سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB تعداد بهینه واحدها یا کلاسترها مشخص شد که این تعداد ۶ واحد بود. سپس داده‌ها توسط نرم افزار Geolog و با استفاده از الگوریتم خوشه بندی MRGC به ۶ واحد ژئومکانیکی (GMU) مختلف خوشه بندی شدند. به طوریکه این ۶ واحد از لحاظ مقدار پارامترهای محاسبه شده بیشترین اختلاف را با هم داشتند (شکل ۲). همانطور که در این شکل مشاهده می شود GMU 1 دارای بهترین کیفیت ژئومکانیکی است و مقدار همه ی پارامترهای محاسبه شده در این واحد از همه واحدها بیشتر است و GMU 6 به علت کم بودن مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی محاسبه شده در آن دارای پایین ترین کیفیت ژئومکانیکی است.

	NAME	COL	PAT	WEIGHT	UCS	POISON	G	E	BULK
1	GMU_1	Blue	Blue	212	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]
2	GMU_2	Light Blue	Light Blue	1351	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]
3	GMU_3	Cyan	Cyan	595	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]
4	GMU_4	Green	Green	5201	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]
5	GMU_5	Orange	Orange	8225	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]
6	GMU_6	Red	Red	792	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]	[Histogram]

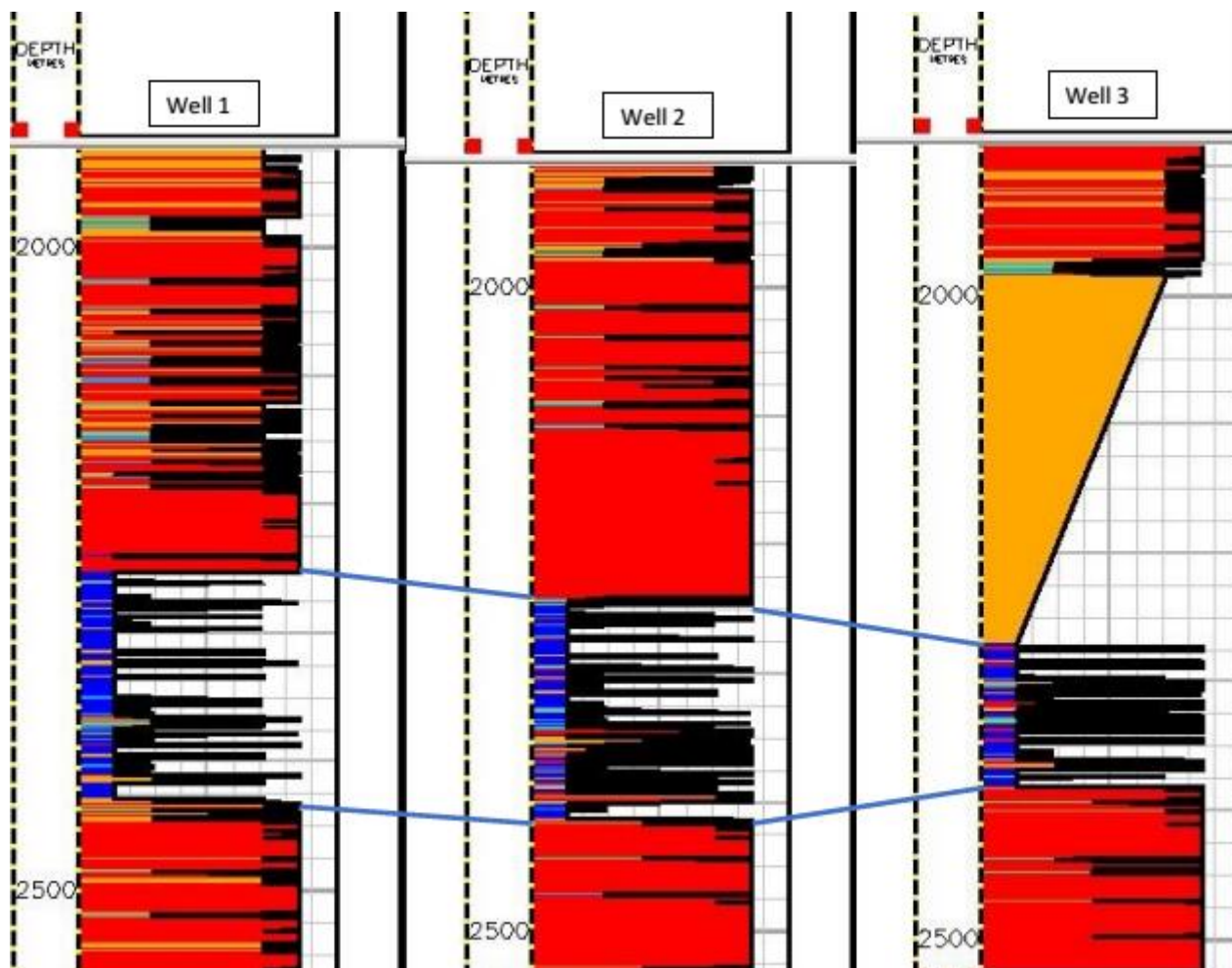
شکل ۲: واحدهای ژئومکانیکی مختلف و اختلاف مقادیر پارامترهای محاسبه شده در واحدهای مختلف. پارامترهای ژئومکانیکی در GMU 1 دارای بیشترین مقدار و در GMU 6 دارای کمترین مقدار می باشند.

با توجه به اینکه GMU 6 از لحاظ ژئومکانیکی از بدترین کیفیت برخوردار است لذا سنگهای با کیفیت نامطلوب ژئومکانیکی (به طور مثال سنگهای شیلی) و سنگهای دارای مقادیر فراوان شکستگی در این واحد قرار می گیرند. شکل ۳ عمق خاصی از چاه ۱ را با GMUها و لاگ GR (بر حسب درجه API) آن عمق نشان میدهد. مشاهده می شود که در جاهایی که مقدار حجم شیل بالاست (GR بالا) GMUها در رده های ۵ و ۶ قرار میگیرند یعنی در رده GMUهای با کیفیت نامطلوب قرار می گیرند.



شکل ۳: GMUها و لاگ GR برای عمق ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ متری از چاه ۱ مشاهده می شود که با افزایش مقدار GR کیفیت GMU هم کاهش می یابد.

در شکل ۴ واحدهای ژئومکانیکی برای عمق ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متری از چاه‌های ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده و این سه چاه توسط واحدهای ژئومکانیکی شان با هم تطایف داده شده اند.



شکل ۴: واحدهای ژئومکانیکی برای عمق ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متری از چاه‌های ۱ و ۲ و ۳ و تطابق این چاه بر اساس واحدهای ژئومکانیکی

۳- بحث و نتیجه گیری:

واحدهای ژئومکانیکی برای سه چاه ۱ و ۲ و ۳ با توجه به روابط (۱) تا (۵) محاسبه شده و سپس در ۶ واحد دسته بندی شدند. که از واحد ۱ به ۶ کیفیت ژئومکانیکی کاهش میابد.

با توجه به واحدهای بدست آمده برای سه چاه مورد مطالعه، مشاهده می شود که بخش اعظم هر سه چاه را واحدهای کم کیفیت تشکیل می دهند که کیفیت ضعیف این واحدها می تواند به علت شکسته بودن سنگها یا شیلی بودن آنها باشد که در نقاط با حجم شیل بالا این کیفیت ضعیف به شیلی بودن واحد بر می گردد و در سایر نقاط می تواند به علت شکسته بودن افق‌های تولیدی و وجود زون‌های شکسته باشد که با توجه به تکتونیک فعال خلیج فارس و تولید بالا از افق‌های تولیدی در خلیج فارس، وجود چنین زون‌های شکسته ای قابل انتظار است. لذا با توجه به واحدهای ژئومکانیکی می توان زون‌های شکسته با پتانسیل تولیدی بالا را به شناسایی نمود و نیز نواحی شیلی با کیفیت ژئومکانیکی ضعیف را که به شدت مستعد ریزش دیواره چاه هنگام حفاری هستند را شناسایی نمود.

References:

- 1- Mark D.Zoback (2007). Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press
- 2- Philip Kearey, Michael Brooks, Ian Hill (2002), An Introduction to Geophysical Exploration, Third Edition, Blackwell Science
- 3- J. P. Castagna, M. L. Batzle, R. L. Eastwood (1985), Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, Geophysics, Vol. 50, No. 4, P. 571-581