تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ آهک با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی

*علیرضا نجیبی، محمدرضا آصف: دانشگاه تربیت معلم تهران
رسول اجل‌لوئیان: گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان
غلام‌عباس صفیان: شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

تاریخ: دریافت ۹۰/۷/۱۹ پذیرش ۹۰/۱۰/۲۲

چکیده

پارامترهای الاستیک سنگ به دو روش دینامیکی و استاتیکی قابل اندازه‌گیری هستند. در روش دینامیکی، با اندازه‌گیری سرعت عبور امواج تراکمی (V_p) و برشی (V_s) در شرایط برجا و یا آزمایشگاه، ویژگی‌های الاستیک دینامیکی سنگ به‌دست می‌آیند. در روش استاتیکی نیز با انجام آزمایش‌های تخریبی مانند مقاومت فشاری تک محوری و یا سه محوری بر روی مغزه سنگ، پارامترهای مقاومتی و الاستیک استاتیکی اندازه‌گیری می‌شوند. روش‌های استاتیکی نتایج واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش‌های دینامیکی می‌دهند، اما هزینه انجام آن بیش‌تر بوده و اندازه‌گیری آن به نقاط دارای مغزه سنگی محدود می‌شود. متأسفانه پارامترهای دینامیکی و استاتیکی با یک‌دیگر برابر نیستند و معمولاً پارامترهای دینامیکی از پارامترهای استاتیکی متناظر خود بزرگ‌تر هستند. به‌منظور اندازه‌گیری پیوسته ویژگی‌های مکانیک سنگ در طول چاه، ایجاد روابط تجربی بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و التراسونیک بر روی مغزه‌های نفتی مربوط به سازندهای کربناته سروک و آسماری یکی از چاه‌های نفتی جنوب غرب ایران، روابطی تجربی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c) و مدول یانگ استاتیکی (E_s) بر اساس سرعت موج تراکمی (V_p) و مدول یانگ دینامیکی (E_d) پیشنهاد شده است که یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای تحلیل پیوسته پایداری در طول مسیر حفاری چاه‌های نفت و گاز را تأمین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سنگ آهک، مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی، التراسونیک.

*نویسنده مسئول najibi@tmu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

مقدمه

به‌منظور تخمین تنش‌های برجا، تحلیل پایداری دیوارهٔ چاه، پیش‌بینی فشار بهینهٔ گل حفاری، انتخاب مسیر مناسب در حفر چاه‌های جهت‌دار و ارزیابی تراکم و نشست ناشی از برداشت در مخازن هیدروکربنی، از مقاومت فشاری تک محوره و ویژگی‌های الاستیک سنگ مانند مدول یانگ و نسبت پواسون استفاده می‌شود [۷]. ویژگی‌های الاستیک سنگ به دو روش دینامیکی و استاتیکی قابل اندازه‌گیری هستند، در حالی‌که مقاومت فشاری تک محورهٔ سنگ تنها به روش استاتیکی به‌دست می‌آید. در روش استاتیکی نمونه سنگ در حالت تک محوری و یا سه‌محوری، تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد تا در آن شکست رخ دهد. با ترسیم منحنی تنش(های) اعمال شده به تغییر شکل‌های محوری و جانبی ایجاد شده، ویژگی‌های مقاومتی و الاستیک سنگ به‌صورت استاتیکی اندازه‌گیری می‌شوند [۱]. در روش دینامیکی سنگ تحت تأثیر بار دینامیکی حاصل از عبور امواج الاستیک قرار می‌گیرد و ویژگی‌های الاستیک آن با اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی، در شرایط آزمایشگاهی یا برجا (توسط نگارهای صوتی برشی دوقطبی[۱] یا پروفیل لرزه‌ای قائم[۲]) به‌دست می‌آیند. ثابت‌های الاستیک به‌دست آمده به روش‌های استاتیکی و دینامیکی اغلب با هم متفاوت هستند. به‌عنوان مثال، مدول یانگ استاتیک حدود ۳ برابر کوچک‌تر از مدول یانگ دینامیک است که بخش عمده‌ای از این اختلاف به‌دلیل تأثیرپذیری بیش‌تر اندازه‌گیری‌های استاتیکی از حفرات و ترک‌های موجود در سنگ است. عواملی دیگر نظیر تأثیر سیال و فشار منفذی، نوع سیمان و نوع تنش و دامنهٔ کرنش نیز در ایجاد اختلاف بین پارامترهای دینامیکی تأثیر می‌گذارند [۱۲].

مقاومت فشاری و ثابت‌های الاستیک استاتیکی بیانگر شرایط واقعی‌تر تنش‌های اعمال شده بر سنگ هستند و از این رو در معمولا در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱]. با این وجود، اندازه‌گیری ثابت‌های الاستیک استاتیکی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر از به‌دست آوردن ثابت‌های الاستیک دینامیکی است. وجود این مشکلات به این دلیل است که آزمایش‌های استاتیکی بر روی مغزهٔ سنگ انجام می‌شود و ممکن است در تمام چاه‌ها، مغزهٔ مناسب در دسترس نباشد؛ در حالی که ثابت‌های الاستیک دینامیکی، از انجام آزمایش‌های التراسونیک مغزهٔ

۱. DSI: Dipole Shear Sonic Imager ۲. VSP: Vertical Seismic Profile

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

سنگ یا توسط لاگ‌های صوتی چاه به دست می‌آیند که در صنعت نفت معمولاً در دسترس است. بنا بر این به‌منظور اندازه‌گیری پیوسته و منطقی ویژگی‌های مکانیکی سنگ در طول چاه، ایجاد روابط تجربی بین داده‌های دینامیکی با پارامترهای استاتیکی بسیار مهم است. از آن‌جاکه با تغییر ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و شکل سنگ‌دانه، درجهٔ سیمان‌شدگی و هتروژنزی، ویژگی‌های مکانیکی سنگ نیز تغییر می‌کند، ایجاد رابطه‌ای کلی بین مدول‌های دینامیکی با استاتیکی مشکل است [۱٤]. به‌همین دلیل پژوهشگران قبلی روابط انطباقی زیادی ارائه کرده‌اند که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

در این تحقیق با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و التراسونیک بر روی مغزه‌های نفتی سازندهای کربناته سروک و آسماری یکی از چاه‌های نفتی جنوب غرب ایران، روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c) و مدول یانگ استاتیکی (E_s) با مدول یانگ دینامیکی (E_d) و سرعت موج تراکمی (V_p) پیشنهاد شده است. با استفاده از روابط ارائه شده و نگارهای صوتی چاه، نگارهای مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیکی، برای طول چاه‌های دارای سازندهای کربناته سروک و آسماری قابل ترسیم است.

مروری بر پژوهش‌های گذشته

استفاده از روابط تجربی برای ترسیم‌نگار پارامترهای مکانیکی سنگ در طول چاه از سال ۱۹۵۰ مورد توجه قرار گرفته است. وایلی و همکاران (۱۹٦۳) استفاده از سرعت موج تراکمی به‌منظور تعیین تخلخل (با معادلهٔ میانگین زمان[۱]) را مطرح کردند که رابطه‌ای تجربی بین سرعت موج و تخلخل برقرار می‌کرد [۲۲]. از آن‌جا که تخلخل و دانسیته بر مقاومت نهایی سنگ تأثیر مستقیم می‌گذارند، اسموردینوف[۲] و همکاران (۱۹۷۰) روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوره با دانسیته و تخلخل برقرار کردند [۱۹]. میلیتزر[۳] و استول[٤] (۱۹۷۳) و گلوبو[٥] و روبینوویچ[٦] (۱۹۷٦) به‌ترتیب روابط (۱) و (۲) را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c) از سرعت موج تراکمی در سنگ آهک ارائه کردند [۱٥] و [۸]:

۱. Time – Average ۲. Smorodinov ۳. Militzer ۴. Stoll
۵. Golubev ۶. Robinovich

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

$$\sigma_c = 2.45V_p^{1.82} \quad (۱)$$

$$\log\sigma_c = 0.358V_p + 0.283 \quad (۲)$$

که در این روابط V_p بر حسب کیلومتر بر ثانیه و σ_c بر حسب مگاپاسکال است. ساویچ[۱] (۱۹۸٤) با پیشنهاد رابطهٔ لگاریتمی بین E_d و E_s، اظهار داشت که دقت رابطهٔ لگاریتمی حدود ۲۰ درصد بیش از روابط خطی است و فرم کلی (۳) را در مورد نحوهٔ ارتباط E_d با E_s ارائه کرد [۱۸]:

مورالس[۲] و همکاران (۱۹۹۳) با بررسی ماسه سنگ‌های نقاط مختلف جهان، مقادیر A_0 و A_1 رابطهٔ (۳) را در بازه‌های مشخص تخلخل، مطابق جدول ۱ بیان کردند [۱٦]:

جدول۱. مقادیر A_0 و A_1 در رابطهٔ (۵)

Porosity	A_0	A_1
10% - 15%	2.137	0.6612
15% - 25%	1.829	0.6920
>25%	-0.4575	0.9402

ون هیردن[۳] (۱۹۸۷)، رابطه‌ای کلی بین E_d و E_s برقرار کرد. او بر روی چهارده نوع سنگ مختلف که مدول یانگ آن‌ها در بازهٔ ۷ تا ۱۵۰ گیگاپاسکال قرار داشت، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و التراسونیک انجام داد و در فشارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ مگاپاسکال، مدول‌های یانگ دینامیکی و استاتیکی را با یک‌دیگر مقایسه کرد. وی فرم کلی ارتباط بین E_d و E_s را به‌صورت رابطهٔ (٤) پیشنهاد کرد [۲۰]:

$$E_s = aE_d^b \quad (٤)$$

که ضریب a در این رابطه، در محدودهٔ ۰.۰۹۷ تا ۰.۱۵۲ تغییر می‌کند و به سطح تنش بستگی دارد. مقدار b نیز در محدودهٔ ۱.۳۸۸ تا ۱.٤۸۵ قرار دارد و با افزایش سطح تنش کاهش می‌یابد.

مچپرو[٤] روشی دیگر در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره از داده‌های دینامیکی است [۳]. این روش اخیراً توسط شرکت شلومبرژر در تعدادی از میدان‌های نفتی دنیا از جمله ایران استفاده شده است. در این روش، E_s با تخلخل مؤثر (n_e) و E_d پیش‌بینی می‌گردد و سپس مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس E_s تخمین زده می‌شود (روابط ۵ و ٦).

۱. Savich ۲. Morales ۳. Van Heerden ۴. Mechpro

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

$$E_s = (-2.21 \times n_e + 0.963) \times E_d \quad (۵)$$

$$\sigma_c = (3 + 4.1 \times E_s) \quad (۶)$$

که در آن‌ها σ_c بر حسب مگاپاسکال، E_d و E_s بر حسب گیگاپاسکال و تخلخل مؤثر به‌صورت اعشاری بیان می‌شود. با بررسی روابط فوق، در می‌یابیم که در تخلخل‌های بالاتر از ۴۳ درصد، مقادیر E_s به‌دست آمده منفی می‌شود و هنگامی که تخلخل به‌سمت صفر میل کند، مقادیر E_s و E_d به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند. بنا بر این رابطهٔ (۵) برای مقادیر مشخصی از تخلخل تعریف شده است. جدول ۲ برخی روابط تجربی ارائه شده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. برخی روابط تجربی موجود برای تخمین UCS و E_s از پارامترهای مکانیکی سنگ*

شماره رابطه	رابطه	نوع سنگ	مرجع
(۷)	$E_s = 1.263E_d - 29.5$	آذرین و دگرگونی	کینگ (۱۹۸۳)
(۸)	$\sigma_c = 4.31\left(\frac{E_d}{10}\right)^{1.705}$	آذرین و دگرگونی	کینگ (۱۹۸۳)
(۹)	$E_s = 0.74E_d - 0.82$	انواع سنگ‌های رسوبی	عیسی و کازی (۱۹۸۸)
(۱۰)	$\log_{10} E_s = 0.02 + 0.7\log_{10} \rho E_d$	انواع سنگ‌های رسوبی	عیسی و کازی (۱۹۸۸)
(۱۱)	$\sigma_c = 2.28 + 4.0189E_s$	سنگ‌های نرم	برادفورد و همکاران (۱۹۸۸)
(۱۲)	$\sigma_c = 0.278E_s^2 + 2.458E_s$	ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل، دلومیت و سیلتستون	لی (۱۹۹۷)
(۱۳)	$E_s = 0.018E_d^2 + 0.422E_d$	ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل، دلومیت و سیلتستون	لی (۱۹۹۷)
(۱۴)	$E_s = 1.153E_d - 15.2$	سنگ‌های سخت (Es >15 GPa)	وانگ و نور (۲۰۰۱)
(۱۵)	$\sigma_c = 0.77V_p^{2.93}$	شیل	هورسرود (۲۰۰۱)
(۱۶)	$\sigma_c = 243.6n^{-0.96}$	شیل	هورسرود (۲۰۰۱)
(۱۷)	$E_s = 0.076V_p^{3.23}$	شیل	هورسرود (۲۰۰۱)
(۱۸)	$E_s = 0.103\sigma_c^{1.086}$	سنگ گل	لشکری پور (۲۰۰۲)
(۱۹)	$E_s = 0.0158E_d^{2.74}$	شیل	اوهن (۲۰۰۳)
(۲۰)	$E_s = 0.541E_d + 12.852$	سنگ آهک	امین و همکاران (۲۰۰۹)
(۲۱)	$\sigma_c = 2.94\frac{E_s^{0.83}}{n^{0.088}}$	سنگ آهک	آصف و فرخروز (۲۰۱۰)

*در این روابط σ_c بر حسب مگاپاسکال، E_s و E_s بر حسب گیگاپاسکال و تخلخل به‌صورت اعشاری بیان شده‌اند.

نمونه‌های بررسی شده و آزمون‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های مورد آزمایش، شامل ۲۱ عدد مغزهٔ سنگی از سازندهای کربناته سروک و آسماری یکی از چاه‌های نفتی جنوب غرب ایران است. لیتولوژی سازند سروک، شامل سنگ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

آهک‌های توده‌ای کرم تا قهوه‌ای و خاکستری رنگ و سن آن سنومانین- تورونین است [۲]. سازند آسماری نیز از سنگ آهک‌های کرم تا قهوه‌ای رنگ به سن الیگوسن بالایی- میوسن زیرین تشکیل شده است [۲]. مواد هیدروکربنی نمونه‌ها با دستگاه سوکسله[۱] خارج شد و پس از اندازه‌گیری وزن ابعاد و آن‌ها، آزمایش التراسونیک (تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی) بر اساس استاندارد ASTM D2845 انجام گرفت و مقدار مدول یانگ دینامیکی هر نمونه توسط این رابطه محاسبه شد:

$$E_d = \rho.V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \qquad (۲۲)$$

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ استاتیکی بر اساس استاندارد D2938 و ASTM D3148 انجام شد. در این آزمایش، پس از آماده‌سازی نمونه و نصب کرنش‌سنج‌های محوری و جانبی، نمونه در دستگاه بارگذار قرار گرفت و با افزایش پیوستهٔ بار محوری با سرعت ثابت و ثبت پیوستهٔ نیروی اعمال شده و کرنش‌های محوری و قطری ایجاد شده، هر نمونه در مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه شکسته شد. با ثبت حداکثر نیروی اعمال شده (F)، مقاومت فشاری تک‌محوره با رابطهٔ (۲۳) به‌دست آمد [۱]:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \qquad (۲۳)$$

که در این رابطه A مساحت سطح مقطع نمونه است. شیب قسمت کم و بیش صاف منحنی تنش محوری (σ_z) به کرنش محوری (ε_z) بیان‌گر مدول یانگ استاتیکی است توسط رابطهٔ (۲٤) به‌دست آمد:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \qquad (۲٤)$$

آنالیز داده و ایجاد روابط تجربی

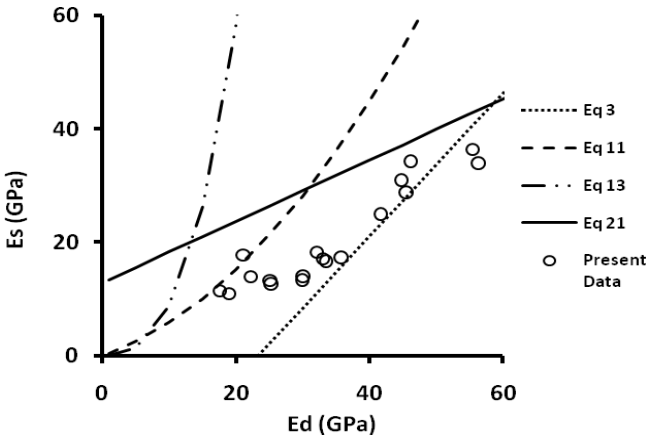
در اولین مرحله از آنالیز داده‌ها، میزان هم‌پوشانی داده‌های این تحقیق با برخی روابط ارائه شده توسط محققان قبلی بررسی شد تا در صورت هم‌پوشانی مناسب، روابط مذکور برای سنگ

۱. Soxhlet

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

آهک‌های بررسی شده در این تحقیق نیز پیشنهاد شوند. بنا بر این مقادیر مدول‌های یانگ دینامیکی و استاتیکی اندازه‌گیری شده در دستگاه مختصاتی که روابط (۷)، (۱۳)، (۱۹) و (۲۰) ترسیم شده بودند قرار گرفتند. شکل ۱ نحوهٔ هم‌پوشانی مقادیر مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی این تحقیق با این روابط را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوهٔ هم‌پوشانی مقادیر مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی نمونه‌های این تحقیق توسط روابط (۷)، (۱۳)، (۱۹) و (۲۰).

رابطهٔ (۷) برای سنگ‌های آذرین و دگرگونی صفحه کانادا و رابطهٔ (۱۳) برای سنگ‌های رسوبی خلیج مکزیک پیشنهاد شده‌اند. روابط (۱۹) و (۲۰) به‌ترتیب برای تخمین مدول یانگ استاتیکی از مدول یانگ دینامیکی شیل‌های خلیج مکزیک و سنگ آهک سازند عرب میدان نفتی قوار ارائه شده‌اند. چنان‌که ملاحظه می‌شود، هیچ یک از روابط فوق نمی‌توانند معیار مناسبی برای تحلیل داده‌های بررسی شده در این تحقیق باشند. بنا بر این در مطالعات ژئومکانیک مخازن نفتی، به‌منظور تخمین پارامترهای استاتیکی مکانیک سنگ بر اساس داده‌های پتروفیزیکی، لازم است از روابط ارائه شده با استفاده از داده‌های همان نوع سازند یا سازندهای با خواص ژئومکانیکی مشابه استفاده شود. در ادامه با استفاده از نتایج آزمایش‌های این تحقیق، به ایجاد روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیکی با داده‌های دینامیکی خواهیم پرداخت.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

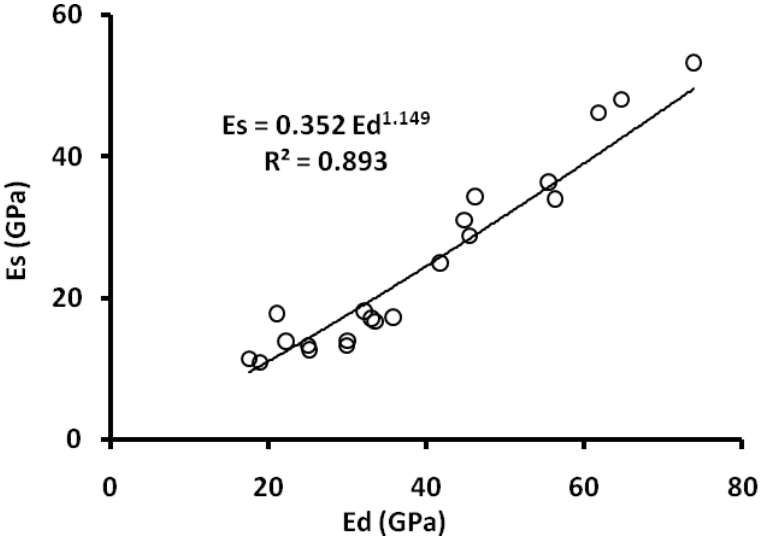
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

۱. پیش‌بینی مدول یانگ استاتیکی

با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی التراسونیک و مقاومت فشاری تک‌محوری و تحلیل آماری داده‌ها، رابطهٔ (۲۵) بین E_d و E_s نمونه‌های بررسی شده برقرار شد. شکل ۲ پراکنش داده‌ها را بر اساس رابطهٔ (۲۵) نشان می‌دهد:

$$E_s = 0.352E_d^{1.149}, R^2 = 0.89 \qquad (۲۵)$$

که در این رابطه، E_s و E_d بر حسب گیگاپاسکال هستند.



شکل۲. ارتباط مدول یانگ دینامیکی (E_d) با مدول یانگ استاتیکی (E_s).

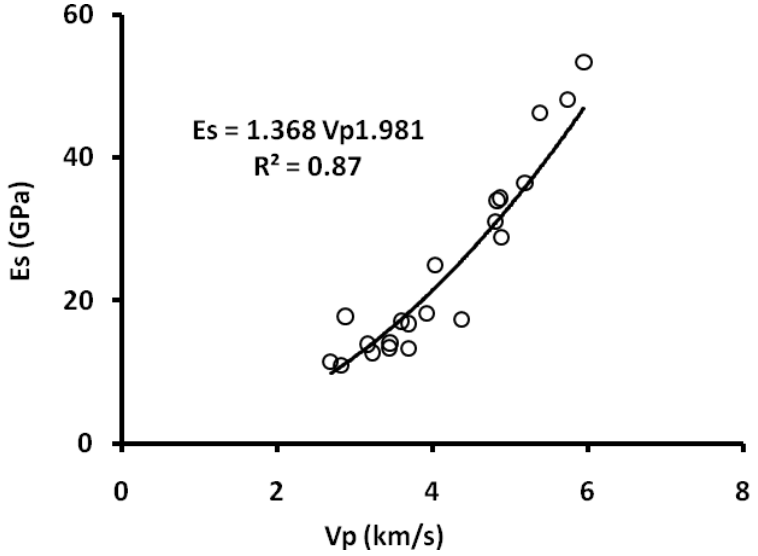
درون اغلب مخازن هیدروکربنی، نگار صوتی برشی دو قطبی رانده می‌شود که با این ابزار، سرعت امواج تراکمی و برشی اندازه‌گیری می‌شوند. بنا بر این با محاسبهٔ مدول یانگ دینامیکی سازند (E_d) با رابطهٔ (۲۲)، مدول یانگ استاتیکی (E_s) آن با استفاده از رابطهٔ (۲۵) قابل پیش‌بینی است. اما معمولاً از بالای مخازن تا نزدیکی سطح زمین، نگار پروفیل لرزه‌ای قائم رانده می‌شود که این نگار، تنها مقادیر سرعت موج تراکمی (V_p) را نشان می‌دهد. بنا بر این به‌منظور ترسیم نگار پارامترهای استاتیکی مکانیک سنگ برای مناطق بالای مخزن، ضروری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

است که بین این پارامترها و سرعت موج تراکمی نیز روابط تجربی برقرار شود. رابطهٔ (۲۶) ارتباط سرعت موج تراکمی با مدول یانگ استاتیکی را نشان می‌دهد:

$$E_s = 1.368E_p^{1.198}, R^2 = 0.89 \quad (۲۶)$$

که در این رابطه، V_p و E_s به‌ترتیب بر حسب کیلومتر بر ثانیه و گیگاپاسکال هستند. شکل ۳ پراکنش داده‌ها را بر اساس رابط G (۲۶) نشان می‌دهد.



شکل۳. ارتباط مدول یانگ استاتیکی (E_s) با سرعت موج تراکمی (V_p)

۲. پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره

با ترسیم مقاومت فشاری تک‌محوره در برابر مدول یانگ استاتیکی، رابطه آن‌ها به روش رگرسیون خطی به‌دست آمد. رابطهٔ (۲۷)، ارتباط موجود بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد:

$$\sigma_c = 3.4 \times E_s + 3.64, R^2 = 0.88 \quad (۲۷)$$

که در این رابطه σ_c بر حسب مگاپاسکال و E_s بر حسب گیگاپاسکال بیان شده‌اند. از آن‌جا که در تخمین E_s از E_d مقداری خطا رخ می‌دهد، انتظار می‌رود تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره از E_s با خطای بیش‌تری توام شود. بنا بر این پیشنهاد می‌شود که مقاومت فشاری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

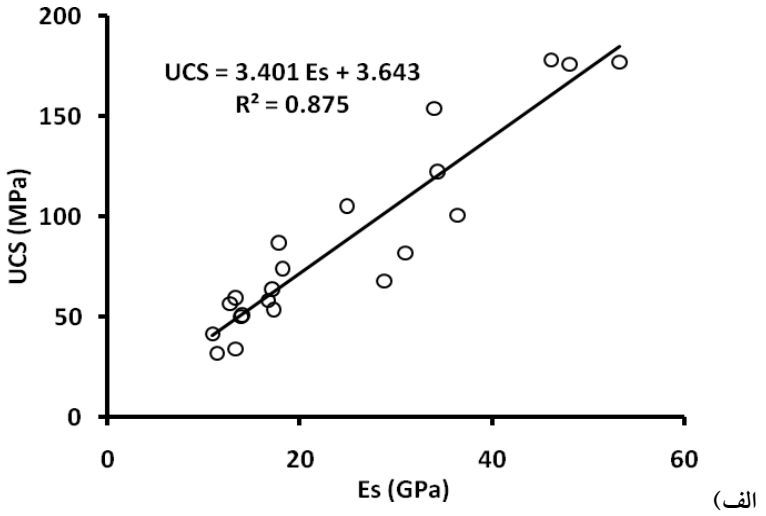
تک‌محوره به‌صورت مستقیم و بر اساس E_d پیش‌بینی گردد که این ارتباط در رابطهٔ (۲۸) نشان داده شده است:

$$\sigma_c = 15.32(E_d/10)^{1.255}, R^2 = 0.88 \quad (۲۸)$$

که در این رابـطه σ_c برحسب مگاپاسکال و E_d برحسب گیگاپاسکال است. چنان‌که پیش‌تر بیان شد، در اغلب مناطق بالای مخازن هیدروکربنی، به‌دلیل عدم استفاده از نگار صوتی برشی دوقطبی، محدودیت دسترسی مستقیم به سرعت موج برشی وجود دارد. بنا بر این به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره سازندهای بالای مخازن، رابطهٔ تجربی (۲۹) بین این پارامتر با سرعت موج تراکمی ایجاد گردید:

$$\sigma_c = 6.6V_p^{1.76}, R^2 = 0.64 \quad (۲۹)$$

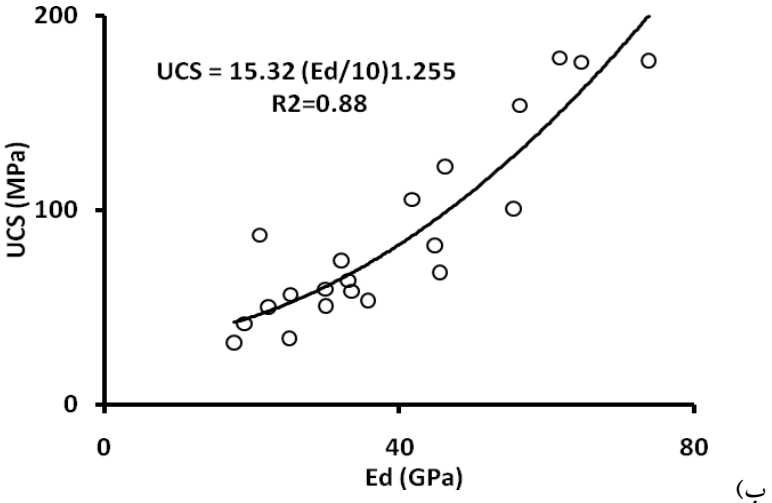
که در این رابطه σ_c بر حسب مگاپاسکال و V_p بر حسب کیلومتر بر ثانیه است. شکل ٤ پراکنش داده‌ها را بر اساس روابط (۲۷) تا (۲۹) نشان می‌دهد.



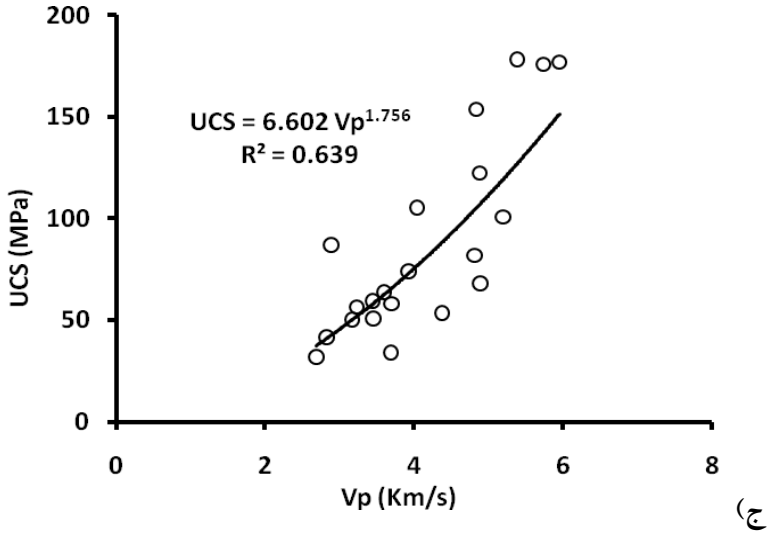
الف)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]



ب)



ج)

شکل٤. الف) ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c) با مدول یانگ استاتیکی (E_s)، ب) مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده در برابر مقاومت فشاری پیش‌بینی شده از رابطهٔ (۲۹)، ج) ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c) با سرعت موج تراکمی (V_p).

در ادامه دقت مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره پیش‌بینی شده به سه روش فوق (شکل ٤) بررسی می‌شود. در روش اول، مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس رابطهٔ (۲۷) از E_s تخمین

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

زده شد که در این روش مقادیر E_s توسط روابط (۲۵) یا (۲٦)، از E_d یا V_p به‌دست می‌آیند. در روش دوم، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره توسط رابطهٔ (۲۸)، از E_d به‌دست آمد و در روش سوم، مقاومت فشاری تک‌محوره، توسط رابطهٔ (۲۹) و بر اساس V_p پیش‌بینی شد. مقاومت فشاری تک‌محوره ۲۱ عدد نمونهٔ مورد آزمایش به سه روش فوق پیش‌بینی و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. جدول زیر میانگین قدر مطلق خطای هر روش در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره هر نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۳. میانگین قدر مطلق خطای روابط (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) در تخمین مقاومت فشاری تک محوره.

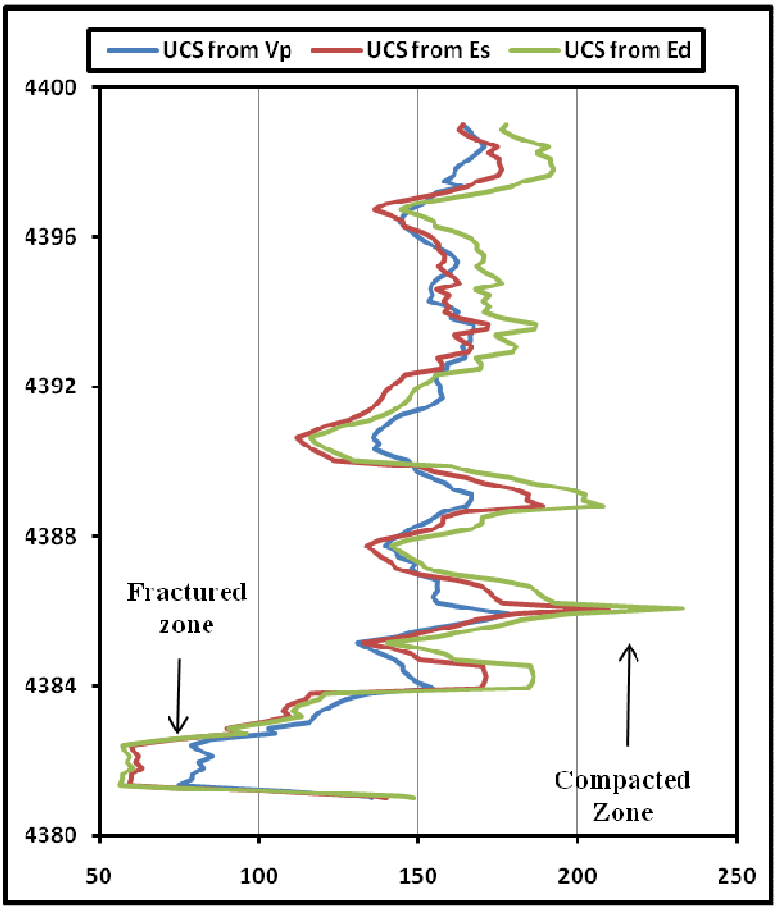
میانگین قدر مطلق خطا	روش	رابطه
۱٦.۵۵	UCS پیش‌بینی شده از E_s	(۲۷)
۱٤.۲	UCS پیش‌بینی شده از E_d	(۲۸)
۲۰.۰۷	UCS پیش‌بینی شده از V_p	(۲۹)

چنان‌که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره از E_d با مقدار ۱٤.۲ مگاپاسکال خطا برای هر نمونه، بهترین روش است. چنان‌که که قبلا بیان شد، پیش‌بینی مدول یانگ استاتیکی از مدول یانگ دینامیکی و استفاده از مدول یانگ استاتیکی پیش‌بینی شده در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (رابطهٔ ۲۸)، باعث کاهش نسبی دقت این روش شده است. توجه به این نکته ضروری است که تخمین مقاومت فشاری از E_s دارای دقت بیش‌تری نسبت به روش تخمین آن از V_p است. بنا بر این استفاده از روش تخمین مقاومت فشاری تک محوره از V_p محدود به شرایطی است که به‌دلیل محدودیت‌های تکنیکی دسترسی به E_d مقدور نباشد.

با استفاده از نگارهای دانسیته و سرعت امواج تراکمی و برشی چاه بررسی شده، نگار مقاومت فشاری تک‌محوره به سه روش فوق در مقطعی از چاه ترسیم شد که در این شکل نشان داده شده است:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]



شکل ۵. پیش‌بینی نگار مقاومت فشاری تک‌محوره چاه بررسی شده بر اساس پارامترهای E_s، E_d و V_p.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در اغلب مناطق (به‌جز مناطق شکسته شده) مقاومت فشاری تک‌محوره پیش‌بینی شده بر اساس E_s کوچک‌تر از مقاومت فشاری تک‌محوره پیش‌بینی شده توسط E_d است. در مناطق خرد شده (متخلخل) و اشباع، سرعت موج برشی به‌شدت کاهش می‌یابد در حالی که سرعت موج تراکمی دامنهٔ تغییرات کم‌تری نسبت به سرعت موج برشی دارد. به‌همین دلیل تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس مدول یانگ (دینامیکی و استاتیکی) به‌خوبی زون‌های شکسته شده و متراکم را از یک‌دیگر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

متمایز می‌کند. تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس V_p، حساسیت کم‌تری نسبت به شکستگی‌ها و زون‌های بسیار متراکم نشان می‌دهد و در مناطق شکسته شده، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره را بیش از مقدار به‌دست آمده بر اساس E_d پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین در زون‌های متراکم، مقاومت فشاری تک‌محوره پیش‌بینی شده بر اساس V_p، کم‌تر از مقدار به‌دست آمده توسط E_d است. با توجه به مطالب ارائه شده پیشنهاد می‌شود مقاومت فشاری تک‌محوره توسط رابطهٔ (۲۸) و به‌صورت مستقیم از E_d تخمین زده شود و در شرایط عدم دسترسی به سرعت موج برشی و دانسیته، این پارامتر توسط رابطهٔ (۲۹) و بر اساس V_p پیش‌بینی گردد.

نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره و التراسونیک (اندازه‌گیری سرعت امواج)، بر روی مغزه‌های سنگی سازندهای کربناته سروک و آسماری، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره به همراه مدول‌های یانگ استاتیکی و دینامیکی اندازه‌گیری شدند. برخی روابط تجربی موجود بین مدول‌های یانگ دینامیکی و استاتیکی که محققان قبلی انتشار داده بودند، توسط داده‌های به‌دست آمده در این تحقیق بررسی شدند. چهار رابطهٔ انتخابی، قادر به هم‌پوشانی داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این پژوهش نبودند. بر همین اساس نتیجه‌گیری شد که با توجه به اهمیت پارامترهای استاتیکی مکانیک سنگ در مطالعات ژئومکانیک مخازن نفتی، بهتر است تخمین این پارامترها بر پایه روابط تجربی پیشنهاد شده برای سنگ‌های همان سازند یا سازندهای دارای ویژگی‌های ژئومکانیکی مشابه انجام گیرد. بنا بر این روابطی تجربی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیکی بر اساس مدول یانگ دینامیکی و سرعت موج تراکمی در سازندهای کربناته سروک و آسماری پیشنهاد شد. از آن‌جا که در بالای مخازن نفتی تا نزدیکی سطح زمین، بندرت نمودار صوتی برشی دوقطبی رانده می‌شود، و به‌جای آن نگار پروفیل لرزه‌ای قائم تهیه می‌شود، دسترسی به سرعت موج برشی محدود است و سرعت موج تراکمی، تنها داده پتروفیزیکی موجود می‌باشد. بنا بر این روابطی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

تجربـی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیکی بر اساس سرعت موج تراکمی ارائه شد. در قسمت پایانی این تحقیق، دقت پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس E_d، E_s و V_p بررسی شد. تحلیل‌های آماری و مقایسه‌ای نشان داد که پیش‌بینی مقاومت فشاری توسط E_d نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده بر اساس E_s خطای کم‌تری دارد و این روش برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره پیشنهاد شد. تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس V_p دقت پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر دارد و حساسیت کم‌تری نسبت به شکستگـی‌ها و زون‌های متراکـم نشان مـی‌دهد. بر اساس روابط ارائه شده در این تحقیق و با استفاده از نگار صوتی برشی دوقطبی چاه (یا نگار پروفیل لـرزه‌ای قائم)، نگارهای مدول یانگ استاتیکـی و مقاومت فشاری تک‌محوره برای طول چاه‌های دارای سازندهای کربناته سروک و آسماری قابل ترسیم است. نگارهای مذکور کاربرد فراوانی در پژوهش‌های ژئومکانیک مخازن هیدروکربنـی نظیر تخمین تنش‌های برجا، تحلیل پایداری دیوارهٔ چاه و ارزیابی تراکم و نشست مخزن در اثر برداشت سیال دارند.

تشکر و قدردانی

مؤلفان مراتب قدردانی و تشکر صمیمانه خود را از مدیریت و کارشناسان شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب به‌خصوص واحد پژوهش و فناوری، به‌دلیل ارائه داده‌های میدانی، مغزه‌های مربوط به سنگ مخزن و پشتیبانی مالی بیان می‌دارند.

منابع

۱. فهیمی‌فر. احمد و سروش. حامد، *آزمایش‌های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها، جلد اول جلد اول آزمون‌های آزمایشگاهی*، مرکز نشر پروفسور حسابی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد تفرش (۱۳۸۰).

۲. درویش‌زاده. علی، *زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم*، انتشارت امیرکبیر، چاپ دوم (۱۳۸۵).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

3. Ameen, M. S., Smart, B. G. D., Somerville, J. M. C., Hammilton, S., Naji, N. A., "Prediction rock mechanical properties of carbonated from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghavar field, Saudi Arabia)", Int. J. Rock. Mech. Min Sci., 26, (2009) 430-444.
4. Asef. M. R., Farrokhrouz, M., "Governing parameters for approximation of carbonates UCS", EJGE, (15), (2010) 1581-1592.
5. Bradford, I. D. R., Fuller, J., Thompson, P. J., Walsgrove, T. R., "Benefits of assessing the solids production risk in a North Sea reservoir using elastoplastic modeling", SPE47360 (1988).
6. Eissa, A., Kazi, A., "Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 25 (6), (1988) 479-482.
7. Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M. Risnes, R., "Petroleum related rock mechanics", 2nd ed Amesterdam, Elsevier (2008).
8. Golubev, A. A., Robinovich, G. Y., "Resultaty primeneia appartury akusticeskogo karotasa dlja predeleina proconstych svoistv gormych porod na mestorosdeniaach tverdych isjopaemych", Prikl Geofiz. Moskova, 73 (1976) 109-116.
9. Horsrud, P., "Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations", SPE Drilling & Completion 16, (2001) 68-73.
10. King, M. S., "Static and dynamic elastic properties of rock from the Canadian Shield", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 20, (1983) 247-241.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

11. Lacy, L. L., "Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs", SPE38716 (1997).
12. Lama, R. D., Vutukuri, V. S., "Handbook on mechanical properties of rocks", Vol, II Trans Tech Publications, Clausthal Germany (1978).
13. Lashkaripour, G. R., "Predicting mechanical properties of mudroek from index parameters", Bull. Eng. Geol. Envir., 61 (2002) 73-77.
14. Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., "The rock physics handbook: Toolsfor seismic analysis in porous media", 2nd (2009) Cambridge University Press.
15. Militzer, H., Stoll, R., "Einige Beitr□ige der Geophysik zur prim□datenerfassung im Bergbau", Neue Bergbautechnik. Leipzig, 3, (1973) 21-25.
16. Morales, R. H., Marcinew, R. P., "Fracturing of high permeability formations: Mechanical properties correlations", SPE 26561 (1993).
17. Ohen, H. A., "Calibrated wireline mechanical rock properties method for predicting and preventing wellbore collapse and sanding", SPE 82236 (2003).
18. Savich A. I., "Generalized relations between static and dynamic indices of rock deformability", Translated from Gidrotekhnieheskoe Stroitel'stvo. 8 (1984) 50-54.
19. Smorodinov. M. I., Motovilove, E. A., Volkov, V. A., "Determination of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks", It proceeding of the second Congress of the Int. Soc. for Rock Mech. (1970).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]

20. Van Heerden, W. L., "General relations between Static and dynamic moduli of rocks", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 24, (6), (1987) 381-385.
21. Wang, Z., Nur, A., (eds.), "Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks", vol. 3, Recent Developments, Geophysics Reprint Series, no. 19. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists (2000).
22. Wyllie, M. R. J., Gardner, G. H. F., Gregory, A. R., "Studies of elastic wave attenuation in porous media", Geophysics 27, (1963) 569-589.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.4.9]