

## تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ آهک با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی

\*علیرضا نجیبی، محمدرضا آصف: دانشگاه تربیت معلم تهران

رسول اجل‌لوئیان: گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان

غلام‌عباس صفیان: شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

پذیرش ۹۰/۱۰/۲۲

تاریخ: دریافت ۹۰/۷/۱۹

### 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 به دست 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. به منظور اندازه‌گیری پیوسته ویژگی‌های مکانیک سنگ در طول چاه، ایجاد روابط تجربی بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی ضروری به نظر 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 ( $\sigma_c$ ) 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.

najibi@tmu.ac.ir

\*نویسنده مسئول

## مقدمه

به‌منظور تخمین تنش‌های برجا، تحلیل پایداری دیواره چاه، پیش‌بینی فشار بهینه 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 محوره سنگ تنها به روش استاتیکی به دست 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 به صورت 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<sup>۱</sup> یا پروفیل لرزه‌ای قائم<sup>۲</sup>) به دست می‌آیند. ثابت‌های الاستیک به دست آمده به روش‌های استاتیکی و دینامیکی اغلب با هم متفاوت هستند. به‌عنوان مثال، مدول یانگ استاتیکی حدود ۳ برابر کوچک‌تر از مدول یانگ دینامیک است که بخش عمده‌ای از این اختلاف به دلیل 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 دامنه 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 به دست آوردن ثابت‌های الاستیک دینامیکی است. وجود این مشکلات به این دلیل است که آزمایش‌های استاتیکی بر روی مغزه سنگ انجام می‌شود و ممکن است در تمام چاه‌ها، مغزه مناسب در دسترس نباشد؛ در حالی که ثابت‌های الاستیک دینامیکی، از انجام آزمایش‌های تراسونیک مغزه

---

۱. DSI: Dipole Shear Sonic Imager

۲. VSP: Vertical Seismic Profile

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 [۱۴]. 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 ( $\sigma_c$ ) 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 (۱۹۶۳) استفاده از سرعت موج تراکمی به‌منظور تعیین تخلخل (با معادلهٔ میانگین زمان<sup>۱</sup>) 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<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۷۰) روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوره با دانسیته و تخلخل برقرار کردند [۱۹]. میلیتزر<sup>۳</sup> و استول<sup>۴</sup> (۱۹۷۳) و گلوبو<sup>۵</sup> و روبینوویچ<sup>۶</sup> (۱۹۷۶) به‌ترتیب روابط (۱) و (۲) را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_c$ ) از سرعت موج تراکمی در سنگ آهک ارائه کردند [۱۵] و [۸]:

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

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

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

که در این روابط  $V_p$  بر حسب کیلومتر بر ثانیه و  $\sigma_c$  بر حسب مگاپاسکال است. ساویچ<sup>۱</sup> (۱۹۸۴) با پیشنهاد رابطه لگاریتمی بین  $E_d$  و  $E_s$ ، اظهار داشت که دقت رابطه لگاریتمی حدود ۲۰ درصد بیش از روابط خطی است و فرم کلی (۳) را در مورد نحوه ارتباط  $E_d$  با  $E_s$  ارائه کرد [۱۸]:

مورالس<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۳) با بررسی ماسه سنگ‌های نقاط مختلف جهان، مقادیر  $A_0$  و

$A_1$  رابطه (۳) را در بازه‌های مشخص تخلخل، مطابق جدول ۱ بیان کردند [۱۶]:

جدول ۱. مقادیر  $A_0$  و  $A_1$  در رابطه (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<sup>۳</sup> (۱۹۸۷)، رابطه‌ای کلی بین  $E_d$  و  $E_s$  برقرار کرد. او بر روی چهارده نوع سنگ مختلف که مدول یانگ آن‌ها در بازه ۷ تا ۱۵۰ گیگاپاسکال قرار داشت، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و التراسونیک انجام داد و در فشارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، مدول‌های یانگ دینامیکی و استاتیکی را با یکدیگر مقایسه کرد. وی فرم کلی ارتباط بین  $E_d$  و  $E_s$  را به صورت رابطه (۴) پیشنهاد کرد [۲۰]:

$$E_s = aE_d^b \quad (۴)$$

که ضریب  $a$  در این رابطه، در محدوده ۰.۰۹۷ تا ۰.۱۵۲ تغییر می‌کند و به سطح تنش بستگی دارد. مقدار  $b$  نیز در محدوده ۱.۳۸۸ تا ۱.۴۸۵ قرار دارد و با افزایش سطح تنش کاهش می‌یابد.

مچپرو<sup>۴</sup> 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 ۶).

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

$$E_s = (-2.21 \times n_e + 0.963) \times E_d \quad (5)$$

$$\sigma_c = (3 + 4.1 \times E_s) \quad (6)$$

که در آن‌ها  $\sigma_c$  بر حسب مگاپاسکال،  $E_d$  و  $E_s$  بر حسب گیگاپاسکال و تخلخل مؤثر به صورت اعشاری بیان می‌شود. با بررسی روابط فوق، در می‌یابیم که در تخلخل‌های بالاتر از ۴۳ درصد، مقادیر  $E_s$  به دست آمده منفی می‌شود و هنگامی که تخلخل به سمت صفر میل کند، مقادیر  $E_s$  و  $E_d$  به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند. بنا بر این رابطه (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	عبسی و کازی (۱۹۸۸)
(۱۰)	$\log_{10} E_s = 0.02 + 0.7 \log_{10} \rho E_d$	انواع سنگ‌های رسوبی	عبسی و کازی (۱۹۸۸)
(۱۱)	$\sigma_c = 2.28 + 4.0189E_s$	سنگ‌های نرم	برافورد و همکاران (۱۹۸۸)
(۱۲)	$\sigma_c = 0.278E_s^2 + 2.458E_s$	ملمه سنگ، سنگ آهک، شیل، دولومیت و سیلتستون	لسی (۱۹۹۷)
(۱۳)	$E_s = 0.018E_d^2 + 0.422E_d$	ملمه سنگ، سنگ آهک، شیل، دولومیت و سیلتستون	لسی (۱۹۹۷)
(۱۴)	$E_s = 1.153E_d - 15.2$	سنگ‌های سخت ( $E_s > 15$ GPa)	ولنگ و نور (۲۰۰۱)
(۱۵)	$\sigma_c = 0.77V_P^{2.93}$	شیل	هورسروود (۲۰۰۱)
(۱۶)	$\sigma_c = 243.6n^{-0.96}$	شیل	هورسروود (۲۰۰۱)
(۱۷)	$E_s = 0.076V_P^{3.23}$	شیل	هورسروود (۲۰۰۱)
(۱۸)	$E_s = 0.103\sigma_c^{1.086}$	سنگ کتل	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  $\sigma_c$  بر حسب مگاپاسکال،  $E_s$  و  $E_d$  بر حسب گیگاپاسکال و تخلخل به صورت اعشاری بیان شده‌اند.

### نمونه‌های بررسی شده و آزمون‌های آزمایشگاهی

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

آهک‌های توده‌ای کرم تا قهوه‌ای و خاکستری رنگ و سن آن سنومانین- توروین 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<sup>۱</sup> 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:

$$E_d = \rho \cdot V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (22)$$

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 پیوسته بار محوری با سرعت ثابت و ثبت پیوسته 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 رابطه (۲۳) به دست آمد [۱]:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (23)$$

که در این رابطه A مساحت سطح مقطع نمونه است. شیب قسمت کم و بیش صاف منحنی تنش محوری ( $\sigma_z$ ) به کرنش محوری ( $\epsilon_z$ ) بیانگر مدول یانگ استاتیکی است توسط رابطه (۲۴) به دست آمد:

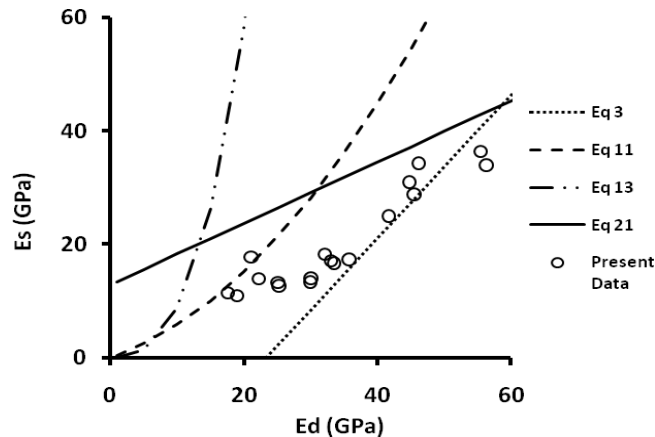
$$\sigma_c = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z} \quad (24)$$

### 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

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 نحوه هم‌پوشانی مقادیر مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی این تحقیق با این روابط را نشان می‌دهد.



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

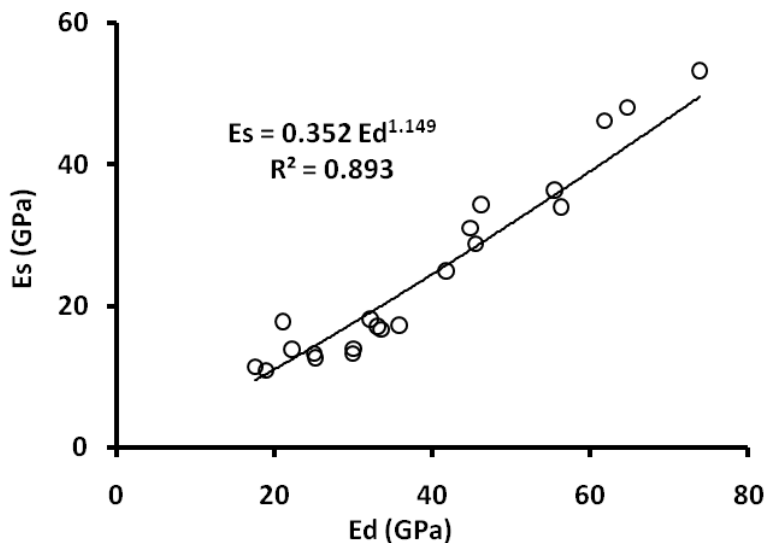
رابطه (۷) برای سنگ‌های آذرین و دگرگونی صفحه کانادا و رابطه (۱۳) برای سنگ‌های رسوبی خلیج مکزیک پیشنهاد شده‌اند. روابط (۱۹) و (۲۰) به ترتیب برای تخمین مدول یانگ استاتیکی از مدول یانگ دینامیکی شیل‌های خلیج مکزیک و سنگ آهک سازند عرب میدان نفتی قوار ارائه شده‌اند. چنان‌که ملاحظه می‌شود، هیچ یک از روابط فوق 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.

## ۱. پیش‌بینی مدول یانگ استاتیکی

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

$$E_s = 0.352E_d^{1.149}, R^2 = 0.89 \quad (25)$$

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



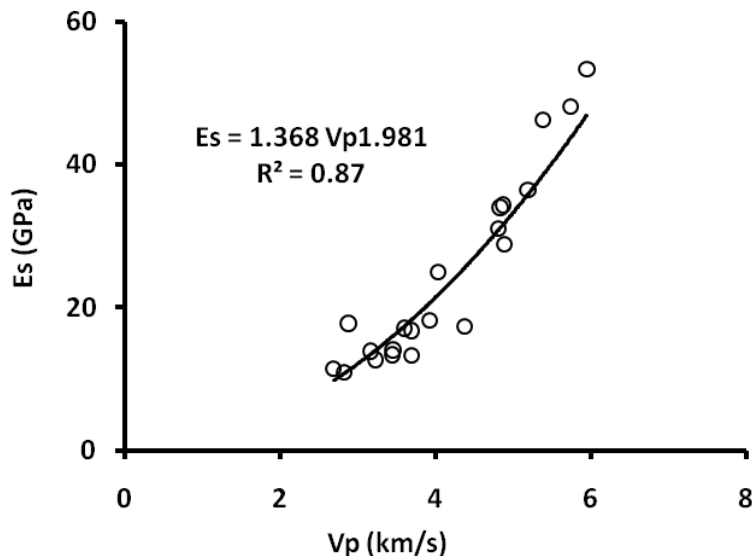
شکل ۲. ارتباط مدول یانگ دینامیکی ( $E_d$ ) با مدول یانگ استاتیکی ( $E_s$ ).

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 محاسبه مدول یانگ دینامیکی سازند ( $E_d$ ) با رابطه (۲۲)، مدول یانگ استاتیکی ( $E_s$ ) آن با استفاده از رابطه (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

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

$$E_s = 1.368 E_p^{1.198}, R^2 = 0.89 \quad (26)$$

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



شکل ۳. 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 به دست آمد. رابطه (۲۷)، ارتباط موجود بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد:

$$\sigma_c = 3.4 \times E_s + 3.64, R^2 = 0.88 \quad (27)$$

که در این رابطه  $\sigma_c$  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 توأم شود. بنا بر این پیشنهاد می‌شود که مقاومت فشاری

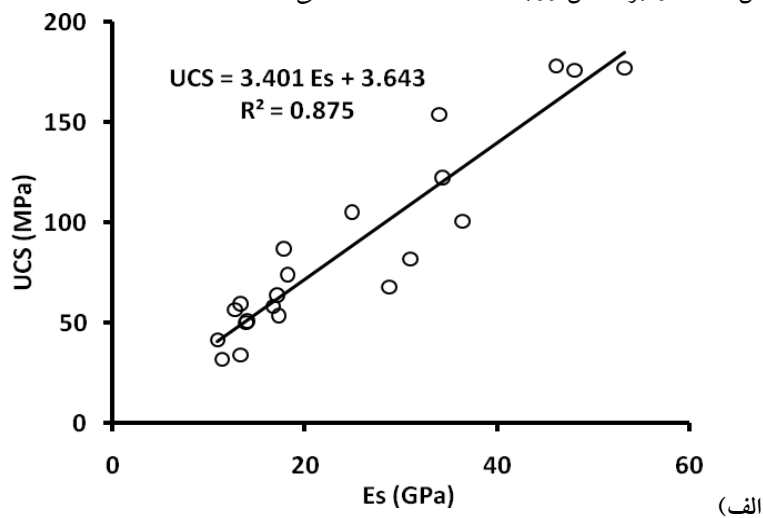
تک‌محوره به‌صورت مستقیم و بر اساس  $E_d$  پیش‌بینی گردد که این ارتباط در رابطه (۲۸) نشان داده شده است:

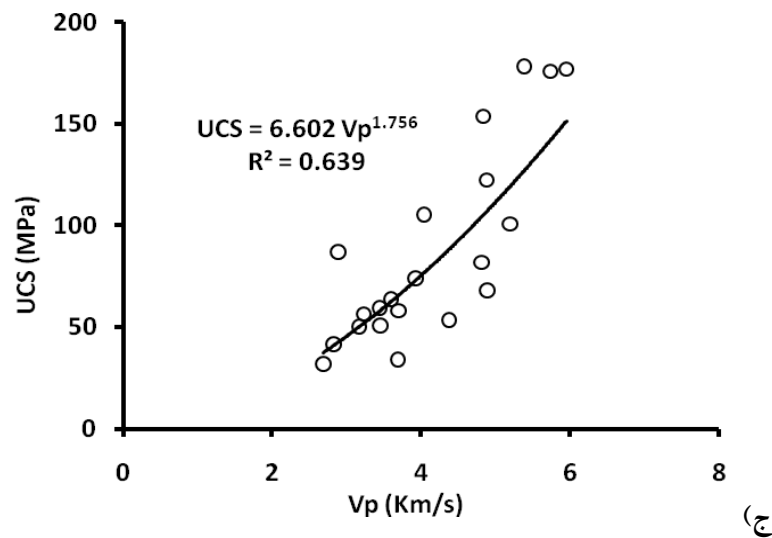
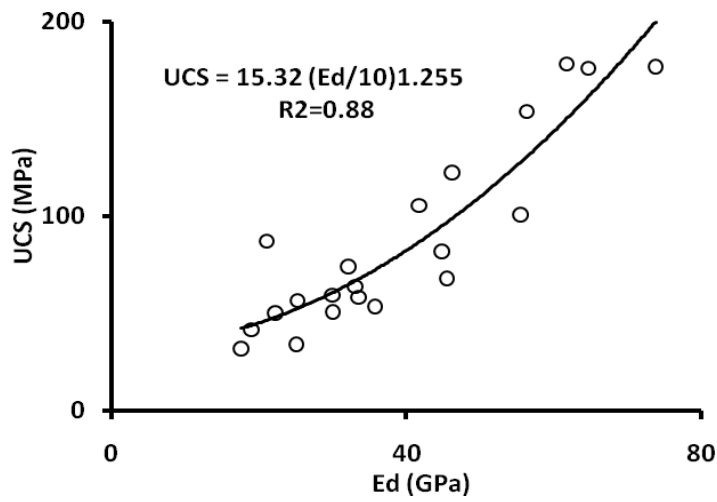
$$\sigma_c = 15.32(E_d / 10)^{1.255}, R^2 = 0.88 \quad (28)$$

که در این رابطه  $\sigma_c$  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، رابطه تجربی (۲۹) بین این پارامتر با سرعت موج تراکمی ایجاد گردید:

$$\sigma_c = 6.6V_p^{1.76}, R^2 = 0.64 \quad (29)$$

که در این رابطه  $\sigma_c$  بر حسب مگاپاسکال و  $V_p$  بر حسب کیلومتر بر ثانیه است. شکل ۴ پراکنش داده‌ها را بر اساس روابط (۲۷) تا (۲۹) نشان می‌دهد.





شکل ۴. الف) ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_c$ ) با مدول یانگ استاتیکی ( $E_s$ )، ب) مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده در برابر مقاومت فشاری پیش‌بینی شده از رابطه (۲۹)، ج) ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_c$ ) با سرعت موج تراکمی ( $V_p$ ).

در ادامه دقت مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره پیش‌بینی شده به سه روش فوق (شکل ۴) بررسی می‌شود. در روش اول، مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس رابطه (۲۷) از  $E_s$  تخمین

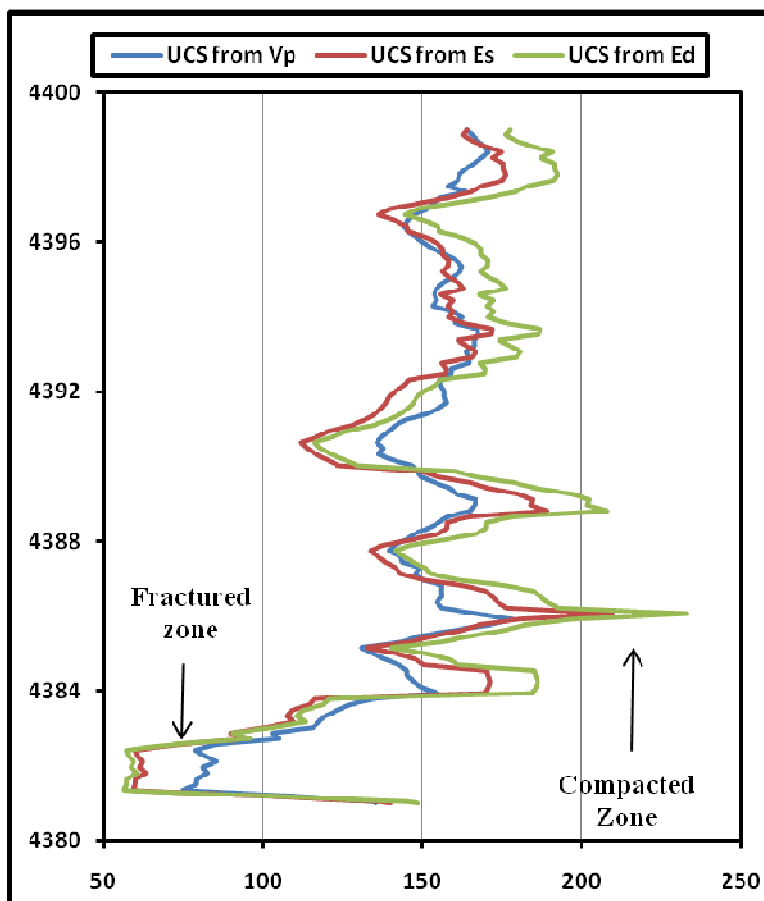
زده شد که در این روش مقادیر  $E_s$  توسط روابط (۲۵) یا (۲۶)، از  $E_d$  یا  $V_p$  به دست می‌آیند. در روش دوم، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره توسط رابطه (۲۸)، از  $E_d$  به دست آمد و در روش سوم، مقاومت فشاری تک‌محوره، توسط رابطه (۲۹) و بر اساس  $V_p$  پیش‌بینی شد. مقاومت فشاری تک‌محوره ۲۱ عدد نمونه مورد 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 تک‌محوره.

رابطه	روش	میانگین قدر مطلق خطا
(۲۷)	UCS پیش‌بینی شده از $E_s$	۱۶.۵۵
(۲۸)	UCS پیش‌بینی شده از $E_d$	۱۴.۲
(۲۹)	UCS پیش‌بینی شده از $V_p$	۲۰.۰۷

چنان‌که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره از  $E_d$  با مقدار ۱۴.۲ مگاپاسکال خطا برای هر نمونه، بهترین روش است. چنان‌که که قبلاً بیان شد، پیش‌بینی مدول یانگ استاتیکی از مدول یانگ دینامیکی و استفاده از مدول یانگ استاتیکی پیش‌بینی شده در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (رابطه 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 تک‌محوره از  $V_p$  محدود به شرایطی است که به دلیل 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:



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 (به جز 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 به شدت کاهش می‌یابد در حالی که سرعت موج تراکمی دامنه تغییرات کم‌تری نسبت به سرعت موج برشی دارد. به همین دلیل تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس مدول یانگ (دینامیکی و استاتیکی) به خوبی زون‌های شکسته شده و متراکم را از یکدیگر

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 رابطه (۲۸) و به‌صورت مستقیم از  $E_d$  تخمین زده شود و در شرایط عدم دسترسی به سرعت موج برشی و دانسیته، این پارامتر توسط رابطه (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 رابطه 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

تجربی 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 تک‌محوره پیشنهاد شد. تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس  $V_p$  دقت پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر دارد و حساسیت کم‌تری نسبت به شکستگی‌ها و زون‌های متراکم نشان می‌دهد. بر اساس روابط ارائه شده در این تحقیق و با استفاده از نگار صوتی برشی دوقطبی چاه (یا نگار پروفیل لزره‌ای قائم)، نگارهای مدول یانگ استاتیکی و مقاومت فشاری تک‌محوره برای طول چاه‌های دارای سازندهای کربناته سروک و آسماری قابل ترسیم است. نگارهای مذکور کاربرد فراوانی در پژوهش‌های ژئومکانیک مخازن هیدروکربنی نظیر تخمین تنش‌های برجا، تحلیل پایداری دیواره 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 پروفیسور حسابدی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد تفرش (۱۳۸۰).
۲. درویش‌زاده. علی، *زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم*، انتشارت امیرکبیر، چاپ دوم (۱۳۸۵).

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", 2<sup>nd</sup> ed Amsterdam, Elsevier (2008).
8. Golubev, A. A., Robinovich, G. Y., "Resultaty primeneia apparturny akusticeskogo karotasa dlja predeleina proconstykh svoistv gormykh porod na mestorosdeniaach tverdych isjopaemykh", *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.

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 mudrock from index parameters", Bull. Eng. Geol. Envir., 61 (2002) 73-77.
14. Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., "The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media", 2<sup>nd</sup> (2009) Cambridge University Press.
15. Militzer, H., Stoll, R., "Einige Beiträge der Geophysik zur primärdatenerfassung 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 *Gidrotekhnicheskoe 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).

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.