

# تأثیر تخلخل بر مدول‌های کشسان در ناحیه مخزنی میدان پارس جنوبی

حمید نجارزاده<sup>۱\*</sup>، ملیحه‌سادات کاظمی<sup>۲</sup> و محمدکمال قاسم‌العسکری<sup>۳</sup>

۱- واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

۲- دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۳- دانشگاه صنعت نفت، دانشکده مهندسی نفت، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱۸

## چکیده

هدف از این مطالعه، محاسبه سرعت امواج کشسان، تعیین مدول‌های کشسان و بررسی تأثیر تخلخل بر مدول‌های کشسان در سازندهای کنگان و دالان در میدان گازی پارس جنوبی است. در این پژوهش سرعت امواج تراکمی و برشی به ترتیب با استفاده از زمان سیر امواج تراکمی و برشی حاصل از ابزار تصویرگر صوتی - برشی دو قطبی (DSI) محاسبه گردیدند. مدول حجمی، مدول برشی، مدول یانگ، پارامتر لامه، نسبت پواسون و نسبت مدول حجمی به مدول برشی (K/G) با استفاده از روابط موجود بین سرعت امواج صوتی، چگالی و مدول‌های کشسان تعیین شدند. با بررسی رابطه تخلخل و مدول‌های کشسان مشخص شد که مدول‌های کشسان با افزایش تخلخل کاهش می‌یابند. مقایسه مدول‌های کشسان و تخلخل نشان داد که در بین مدول‌های کشسان، مدول حجمی بیشترین همبستگی را با تخلخل دارد. همچنین روابط بین نسبت‌های سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی ( $V_p/V_s$ )، پواسون و K/G با تخلخل مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن نشان‌دهنده کاهش ملایم این سه نسبت با افزایش تخلخل می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مدول‌های کشسان، تخلخل، نمودار DSI، سازندهای کنگان و دالان، میدان گازی پارس جنوبی

## مقدمه

استفاده از ابزار DSI<sup>۱</sup> (ابزار تصویرگر صوتی - برشی دو قطبی) می‌تواند سرعت امواج تراکمی و برشی را با دقت نسبتاً زیاد تعیین کرد. روابط همبستگی بین سرعت‌های امواج تراکمی و برشی برای سازندهای کنگان و دالان در میدان پارس جنوبی با استفاده از نگاره DSI به دست آمده است [۲]. نسبت پواسون یک ویژگی مکانیکی مهم است که می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار ژئومکانیکی حین حفاری چاه‌ها و فرآیندهای بازیافت مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی تغییرات پارامترهای کشسان در اکتشاف نفت و گاز بسیار مهم است. کمیت‌هایی مانند مدول یانگ، مدول حجمی، مدول برشی و نسبت پواسون از پارامترهای مکانیک سنگ هستند که برای محاسبه آنها سرعت‌های امواج تراکمی و برشی و نمودار چگالی (که پارامترهای ضروری برای ارزیابی ژئومکانیکی می‌باشند) مورد نیاز است [۱]. با

1. Dipole Sonic Imager

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی: najjarzadeh\_hamid@yahoo.co.uk

تخلخل، جنس کانی‌ها، چگونگی تماس دانه‌ها با یکدیگر و نوع سیال بستگی دارد. در محیط کشسان و همسان‌گرد، سرعت امواج تراکمی و برشی با استفاده از روابط زیر به مدول‌های کشسان مربوط می‌گردند:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (۱)$$

در رابطه بالا  $u$  جابه‌جایی،  $t$  زمان،  $z$  مختصات فضایی،  $M$  مدول کشسان و  $\rho$  چگالی است. همچنین سرعت امواج تراکمی و برشی با روابط ۲ و ۳ تعیین می‌شود:

$$V_p = \left( \frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۲)$$

$$V_s = \left( \frac{G}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

$V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت امواج تراکمی و برشی بر حسب km/s، مدول‌های برشی ( $G$ ) و حجمی ( $K$ ) بر حسب GPa و چگالی ( $\rho$ ) بر حسب  $g/cm^3$  است. پارامترهای مکانیک سنگ مانند نسبت پواسون، مدول یانگ، مدول حجمی و مدول برشی را می‌توان با استفاده از داده‌های چگالی و سرعت امواج تراکمی و برشی محاسبه نمود.

مدول برشی ( $G$ ) به‌عنوان نسبت تنش برشی به کرنش برشی تعریف می‌شود. با حل معادله ۳ مدول برشی به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$G = \rho V_s^2 \quad (۴)$$

با استفاده از تجزیه و تحلیل نمودار یا از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی می‌توان  $\rho$  و  $V_s$  را تعیین نمود.

در اجسام همسان‌گرد نسبت تنش هیدروستاتیک به کرنش برشی، مدول حجمی نامیده می‌شود. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نمودارهای چاه‌پیمایی از روش‌های محاسبه مدول حجمی می‌باشد. با توجه به معادله ۵ مدول حجمی سنگ به‌دست می‌آید:

$$K = \rho V_p^2 - \frac{4}{3}G \quad (۵)$$

ممکن است نسبت پواسون دینامیکی میزان قابل توجهی با نسبت پواسون استاتیکی تفاوت داشته باشد [۳ و ۴]. هاپکرافت و همکاران مقادیر ناهمسان‌گردی مدول یانگ، نسبت پواسون و کمیت‌های دیگر کشسان را به‌طور کامل برای طراحی یا تجزیه و تحلیل ساختارهای سیلیکون توصیف کردند [۵]. مورفی و همکاران مدول حجمی نمونه سنگ‌های خشک ( $K_{dry}$ ) و مدول برشی ( $G$ ) را برای ماسه‌سنگ کوارتزی تمیز (بدون شیل) اندازه‌گیری نموده و دریافتند که نسبت  $K_{dry}/G$  برای تخلخل‌های مختلف ثابت است [۶]. باچل و همکاران کربنات‌ها را با استفاده از سختی فضای منفذی مدل‌سازی کردند. آنها نشان دادند که تغییرات مدول حجمی در مقابل تخلخل، در مورد دولومیت‌های با تخلخل کم حدود  $0.2 (K=0.2)$  و برای دولومیت‌های با تخلخل حفره‌ای حدود  $0.1$  مطابقت دارد [۷]. هامادا با مطالعه دولومیت‌ها، سنگ آهک‌ها و ماسه سنگ‌های اشباع نشان داد که می‌توان از نسبت  $V_p/V_s$  برای شناسایی نوع سیال (آب، نفت، گاز) استفاده کرد [۸]. پراید مدول‌های برشی و حجمی ماسه‌سنگ خشک را به‌عنوان تابعی از تخلخل و پارامتر تحکیم سنگ ارائه داد. پارامتر تحکیم سنگ به اختلاف فشار و درجه تحکیم بستگی دارد [۹] و با افزایش اختلاف فشار و کاهش تخلخل، نسبت سرعت ( $V_p/V_s$ ) کاهش می‌یابد. مدول‌های کشسان توصیه شده توسط پراید روش صحیح پیش‌بینی سرعت موج برشی از سرعت موج تراکمی و تخلخل را فراهم می‌کند [۹]. مدول حجمی و مدول برشی در اختلاف فشارهای زیاد با افزایش تخلخل کاهش می‌یابند [۱۰]. نظریه تماسی نشان می‌دهد که نسبت مدول حجمی به مدول برشی سنگ به تخلخل و اختلاف فشار وابسته است [۶].

### مدول‌های کشسان و تخلخل

سرعت امواج تراکمی و برشی به ماتریکس سنگ،

تنش، اگر تغییر شکل جانبی به اندازه تغییر شکل طولی باشد، نسبت پواسون آن  $0.5$  است. نسبت پواسون برای محاسبه فشار شروع شکستگی، فشار بسته شدن شکستگی و همچنین تخمین گسترش شکستگی‌های هیدرولیکی به کار می‌رود. نسبت پواسون از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{3K-2G}{2(3K+G)} \quad (10)$$

مدول یانگ مقاومت یک جسم یا محیط کشسان است که برای توصیف اجسام و محیط سنگی کاربرد دارد. در حالت تنش تک محوری، مدول یانگ ( $E$ ) به‌عنوان نسبتی از تنش کششی به کرنش کششی تعریف می‌شود. در اجسام همسان‌گرد، مدول یانگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E=2G(1+\sigma) \quad (11)$$

زمانی که جسم تحت تأثیر نیروهای فشاری یا کششی قرار می‌گیرد، مدول یانگ از تغییر طول جسم تعیین می‌شود. این مدول اساساً اندازه مقاومت سنگ می‌باشد.

پارامتر لامه به‌عنوان تراکم‌ناپذیری تعریف می‌شود و با استفاده از رابطه بین مدول حجمی، مدول برشی و چگالی به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda = \rho(K-2G/3) \quad (12)$$

پارامتر لامه برای اغلب اجسام مثبت است، البته این پارامتر می‌تواند منفی نیز باشد. رابطه پارامتر لامه با مدول یانگ و نسبت پواسون به‌صورت زیر است:

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (13)$$

تخلخل یک عامل حساس در تعیین سرعت امواج است و معمولاً با افزایش آن سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه سرعت در سنگ‌های کربناته به پارامترهای دیگری نظیر دپانز، کانی‌شناسی، ساختار خلل و فرج، نوع سیال، فشار و دما و همچنین در کربناته‌های نامتراکم به نسبت دانه به خمیره، شکل، اندازه و جورشدگی بستگی دارد، پیش‌بینی

اگر  $V_p$ ،  $\rho$  و  $V_s$  حاصل از تجزیه و تحلیل نمودارها مورد استفاده قرار گیرند، مدول حجمی محاسبه شده ( $K_{sat}$ )، مدول حجمی درجای سنگ با سیال پرکننده منافذ خواهد بود، اما اگر  $V_p$ ،  $\rho$  و  $V_s$  از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یک نمونه مغزه خشک به‌دست آیند، مدول حجمی محاسبه شده مدول حجمی سنگ خشک ( $K_{dry}$ ) خواهد بود. مدول حجمی به نوع سیال حساس است، درحالی‌که مدول برشی به نوع سیال، وابسته نیست. این یک مفهوم اساسی برای کاربرد معادله گشمن است. گشمن روابطی را ارائه داد که مدول‌های حجمی و برشی سنگ را به تخلخل، اشباع سیالات و سنگ‌شناسی مرتبط می‌ساخت [۱۱]. معادلات گشمن با استفاده از امواج لرزه‌ای و صوتی برای شناسایی سیال منفذی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدول‌های حجمی و برشی بر مبنای نظریه بیوت-گشمن با استفاده از ضریب بیوت به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شوند [۱۱ و ۱۲]:

$$K=K_{ma}(1-\beta)+\beta^2 M \quad (6)$$

$$G=G_{ma}(1-\beta) \quad (7)$$

که:

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

در رابطه بالا  $K_{ma}$ ،  $G_{ma}$  و  $K_{fl}$  به ترتیب مدول حجمی زمینه سنگ، مدول برشی زمینه سنگ و مدول حجمی سیال منفذی می‌باشد. لی معادله زیر را برای مدول برشی ارائه نمود [۱۳]:

$$G = \frac{\mu_{ma} A^2 (1-\phi)^{2n} K}{K_{ma} + 4 \mu_{ma} [1-A^2(1-\phi)^{2n}]/3} \quad (8)$$

در تعیین این معادله، چنین فرض شده که سرعت موج برشی از طریق معادله زیر به سرعت موج تراکمی وابسته است:

$$V_s = V_p A \alpha (1 - \phi)^n \quad (9)$$

در این رابطه  $\alpha$  نسبت  $V_p/V_s$  برای مواد زمینه سنگ و  $A$  ضریب مقیاس می‌باشد.

نسبت پواسون نشان‌دهنده افزایش شعاع در توده با توجه به کاهش طول آن است. در جسم تحت

نگار به دست می‌آید. زمان گذر موج تراکمی نیز هنگام آشکارسازی اولین حرکت موج تعیین می‌شود. همچنین ابزار DSI دارای دو فرستنده دوقطبی عمود برهم می‌باشد که برای ثبت امواج برشی استفاده می‌شود. فرستنده دوقطبی می‌تواند زمان گذر امواج برشی را در مقایسه با فرستنده‌های تک قطبی، بهتر ثبت کند. عمق نفوذ امواج صوتی با فاصله بین گیرنده‌ها و فرستنده‌ها تغییر می‌کند. این ابزار در سازندهای تراوا خصوصیات ناحیه آغشته به گل حفاری را اندازه‌گیری می‌کند [۱۴]. سرعت نمودارگیری متغیر بوده و بستگی به سرعت موجی دارد که در طول نمودارگیری به دست می‌آید. با دانستن شکل موج ثبت شده، ابزار می‌تواند با سرعت ۳۶۰۰ ft/hr به کار رود.

#### میدان مورد بررسی

میدان گازی پارس جنوبی یکی از میداین جنوب غربی ایران است که در موقعیت ۵۲ تا ۵۲/۵ درجه شرقی و ۲۶/۵ تا ۲۷ درجه شمالی، در حدود ۱۰۰ کیلومتری بندر عسلویه و ۱۷۵ کیلومتری سواحل قطر واقع شده است. ساختمان زمین شناسی میدان گازی پارس جنوبی، بخش شمالی گنبد پارس جنوبی - شمال قطر را تشکیل می‌دهد. ناحیه مورد مطالعه شامل دو سوم منابع نفت شناخته شده و تقریباً یک سوم منابع گاز دنیا است. سازندهای کنگان به سن تریاس پایین و دالان بالایی به سن پرمین بالا از مخازن میدان گازی پارس جنوبی محسوب می‌شوند. مطالعات انجام شده منجر به تقسیم سازندهای کنگان - دالان به چهار بخش K1، K2، K3 و K4 گردیده است.

#### مطالعه موردی

زمان‌های سیر امواج تراکمی و برشی برای تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی در سازند و پارامترهای وابسته به آنها به کار می‌روند. سرعت موج برشی را می‌توان با استفاده از روابط تجربی سرعت‌های امواج تراکمی تعیین کرد.

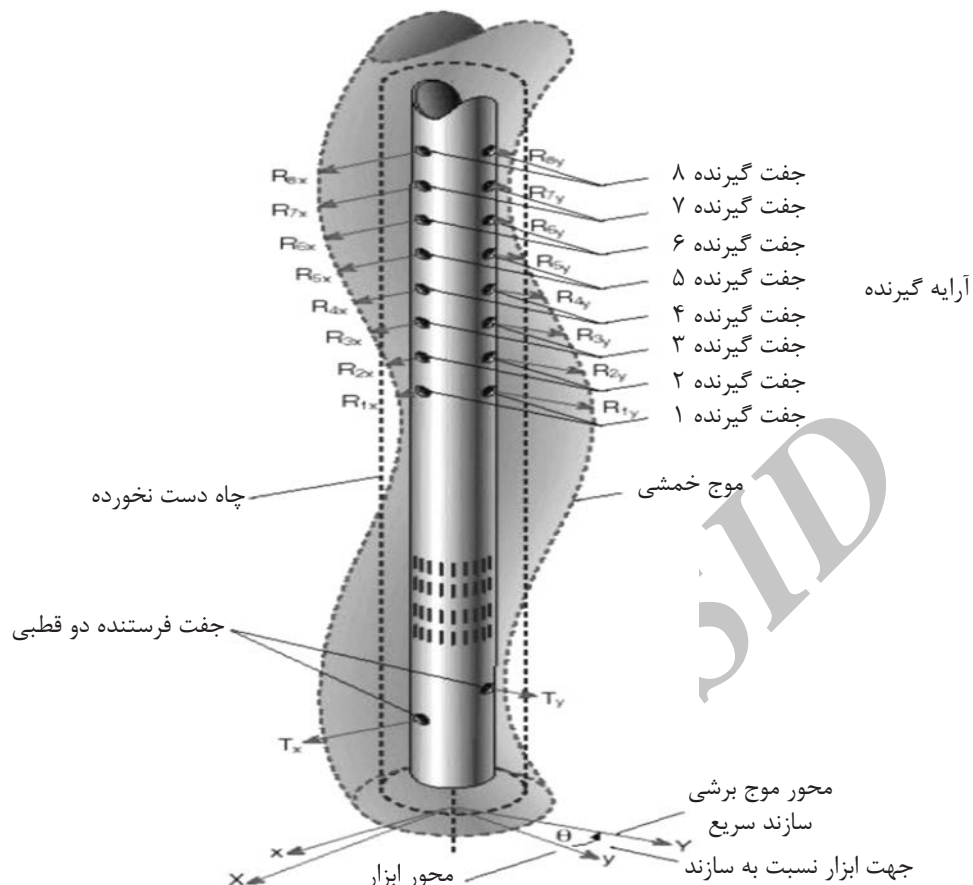
تخلخل صرفاً از روی داده‌های سرعت مشکل است. کانی‌شناسی و ساختار خلل و فرج رسوبات کربناته تحت تأثیر تغییرهای دیاژنتیکی به صورت مداوم تغییر می‌یابد. فرآیندهای سیمان‌شدگی و انحلال، ساختار خلل و فرج را دگرگون می‌کنند و باعث ایجاد و یا کاهش تخلخل می‌شوند. یکی از روش‌های تخمین تخلخل، استفاده از نمودارهای چاه است. نمودارهای صوتی، چگالی و نوترون مقادیر تخلخل، تخلخل صوتی، تخلخل چگالی و تخلخل نوترون را تعیین می‌نمایند. برای رسوبات خشک اگر اختلاف فشار بزرگ‌تر از ۱۰ MPa باشد، نسبت سرعت به تخلخل حساب است. نسبت سرعت رسوبات سخت با تخلخل ۰/۲۱۷ تقریباً برابر رسوبات سست با تخلخل ۰/۳۸۲ می‌باشد. برای رسوبات مرطوب، نسبت سرعت بستگی به تخلخل دارد. بر مبنای معادلات ۶ و ۷، نسبت  $V_p/V_s$  به صورت زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{K_{ma}}{G_{ma}} + \frac{\beta^2 M}{G_{ma}(1-\beta)} \quad (14)$$

این معادله نشان می‌دهد که نسبت سرعت، تابعی از ضریب بیوت در یک تخلخل معلوم است و بستگی به تخلخل با مدول  $M$  و  $\beta$  دارد. زیرا مقدار  $\frac{\beta^2 M}{G_{ma}(1-\beta)}$  در معادله ۱۴ برای تخلخل کمتر از تخلخل بحرانی، کوچک است.

#### ابزار تصویرگر صوتی - برشی دوقطبی (DSI)

نمودارهای صوتی دارای انواع مختلفی است و از انواع پیشرفته و پرکاربرد آنها می‌توان به ابزار تصویرگر صوتی-برشی دوقطبی (DSI) اشاره کرد که قادر به اندازه‌گیری زمان سیر امواج صوتی تراکمی و برشی می‌باشد. در ابزار DSI فرستنده‌های تک قطبی و دو قطبی با هشت گیرنده وجود دارد (شکل ۱). فرستنده تک قطبی می‌تواند در بسامدهای استاندارد برای تعیین زمان کندی امواج تراکمی و برشی مورد استفاده قرار گیرد. زمان کندی امواج برشی، تراکمی و استونلی در سازند توسط همبسته



شکل ۱- تصویر ابزار تصویرگر صوتی- برشی دو قطبی (DSI)

جنوبی در محدوده مخزنی سازندهای کنگان و دالان محاسبه شده است. همچنین داده‌های چگالی از نمودار چگالی در این محدوده به دست آمده است. با استفاده از سرعت‌های امواج تراکمی و برشی و چگالی، مدول‌های کشسان محاسبه و مقایسه گردیدند. مقادیر مدول‌های کشسان برای سازندهای کنگان و دالان در جدول ۱ ارائه شده است.

البته بهتر است روابط بین سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  برای یک ناحیه، با توجه به شرایط خاص آن ناحیه به دست آید. با استفاده از ابزار DSI می‌توان سرعت‌های امواج تراکمی و برشی را با دقت نسبتاً بالایی تعیین نمود.

در این تحقیق نسبت  $V_p/V_s$  در میدان گازی پارس

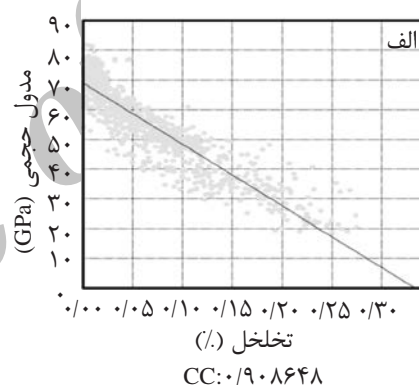
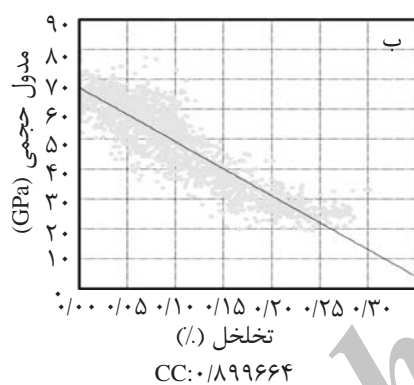
جدول ۱- مقادیر مدول‌های کشسان برای سازندهای کنگان و دالان

سازند	کمیت	مدول برشی (G)	پارامتر لامه ( $\lambda$ )	مدول حجمی (K)	مدول یانگ (E)	نسبت پواسون (PR)
کنگان	کمینه	۱۴/۴۳	۷/۵۵	۱۸/۷	۱۶/۷۳	-
	بیشینه	۳۹/۶۳	۶۰/۶۲	۸۱/۶۸	۵۶/۶۵	۰/۳۷
	میانگین	۲۸/۵۷	۳۶/۱۳	۵۵/۱۸	۴۰/۴	۰/۲۷
دالان	کمینه	۱۳/۱۷	۴/۲۸	۱۹/۵	۱۷/۰۶	۰/۰۷
	بیشینه	۳۶/۹۳	۵۹/۱۳	۷۹	۵۲	۰/۳۶
	میانگین	۲۵/۴۳	۳۱/۲	۴۸/۱۵	۳۵/۴۲	۰/۲۷

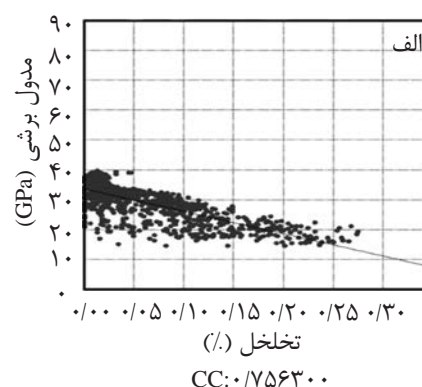
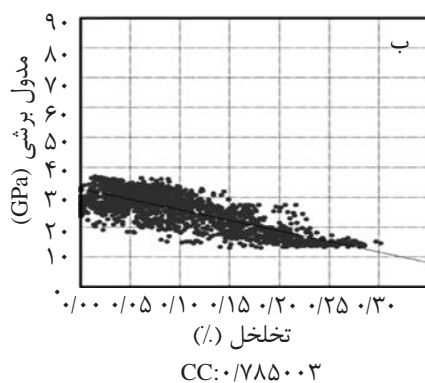
بین مدول حجمی و تخلخل نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر مدول حجمی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. در شکل ۳ نیز کاهش مقادیر مدول برشی با افزایش تخلخل نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های ۴ و ۵، مدول یانگ و پارامتر لامه با افزایش تخلخل کاهش می‌یابند. از مقایسه شکل‌های ۲ تا ۵ نتیجه می‌شود که مدول حجمی و مدول برشی به ترتیب بیشترین و کمترین همبستگی را با تخلخل دارند.

مقایسه نمودارهای تخلخل و مدول‌های کشسان نشان می‌دهد که در اعماقی که مدول‌های کشسان کاهش می‌یابند، تخلخل افزایش پیدا می‌کند. همچنین تغییرات نمودارهای نسبت  $V_p/V_s$  نسبت پواسون و نسبت  $K/G$  با نمودار تخلخل مقایسه گردیدند که نتیجه آن، کاهش نسبت‌های  $V_p/V_s$ ، پواسون و  $K/G$  با افزایش میزان تخلخل می‌باشد. در این مطالعه رابطه بین مدول‌های کشسان و تخلخل با استفاده از نمودارها در سازندهای کنگان و دالان مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲ رابطه

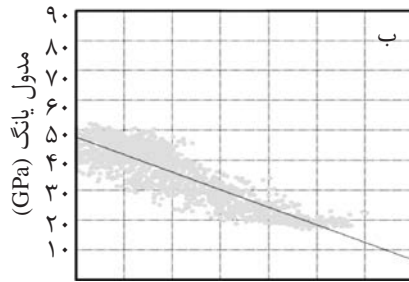


شکل ۲- نمودارهای مدول حجمی - تخلخل برای سازندهای الف) کنگان و ب) دالان در میدان گازی پارس جنوبی

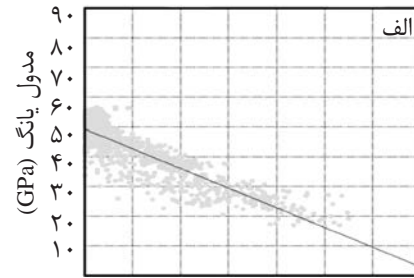


شکل ۳- نمودارهای مدول برشی - تخلخل برای سازندهای الف) کنگان و ب) دالان در میدان گازی پارس جنوبی



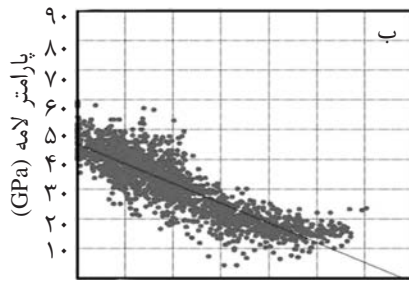


تخلخل (%)  
CC: 0.878446

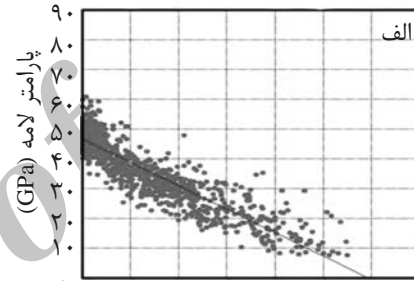


تخلخل (%)  
CC: 0.864444

شکل ۴- نمودارهای مدول یانگ- تخلخل برای سازندهای الف) کنگان و ب) دالان در میدان گازی پارس جنوبی



تخلخل (%)  
CC: 0.863135



تخلخل (%)  
CC: 0.898888

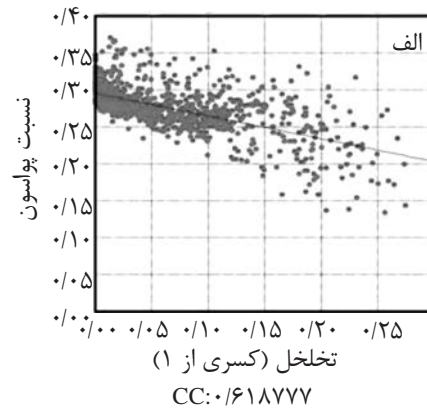
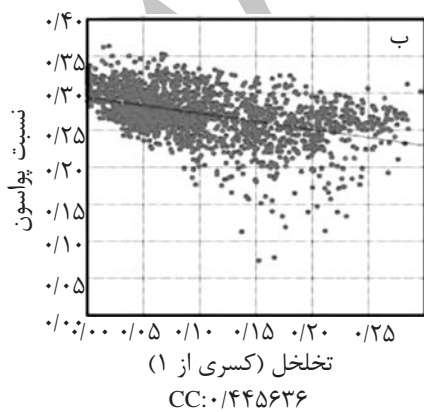
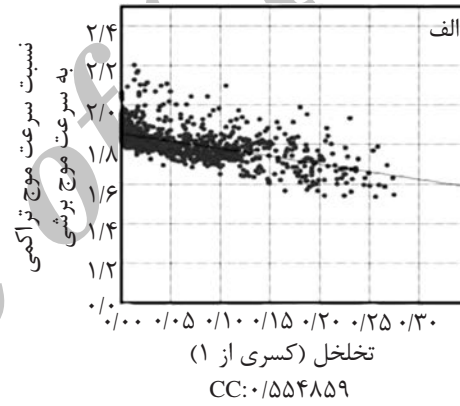
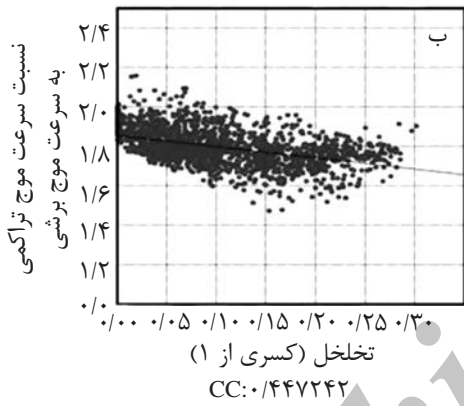
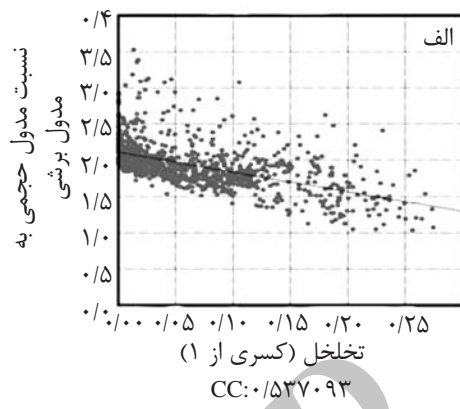
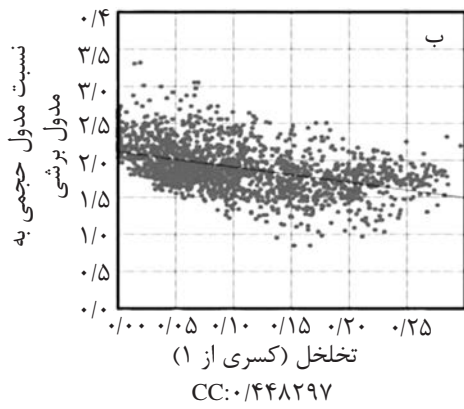
شکل ۵- نمودارهای مدول لامه- تخلخل برای سازندهای الف) کنگان و ب) دالان در میدان گازی پارس جنوبی

(E) و نسبت  $K/G$  برحسب عمق برای سازند کنگان رسم شده‌اند. در این شکل، در محدوده‌های عمقی ۲۸۰۰ تا ۲۸۲۰ m و ۲۹۰۰ تا ۲۹۰۸ m، تخلخل مقدار بالایی دارد. در این نواحی عمقی، مقادیر مدول‌های کشسان کاهش یافته است.

برای سازند دالان، نمودارهای  $V_p/V_s$ ،  $V_p/V_s$ ،  $V_p$ ،  $V_s$ ، نسبت پواسون، چگالی و نمودار تخلخل برحسب عمق در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل (داخل کادر) مشخص شده است، در محدوده‌های عمقی ۲۹۲۰ تا ۲۹۳۵ m و ۳۰۶۰ تا ۳۱۰۰ m مقدار تخلخل زیاد است. در این نواحی کاهش  $V_p/V_s$ ،  $V_p$ ،  $V_s$ ، نسبت پواسون و چگالی به وضوح مشاهده می‌گردد. در شکل ۱۰ نمودارهای مدول‌های  $E$ ،  $K$ ،  $G$ ،  $\lambda$  و نسبت  $K/G$  برحسب عمق برای سازند دالان رسم شده است.

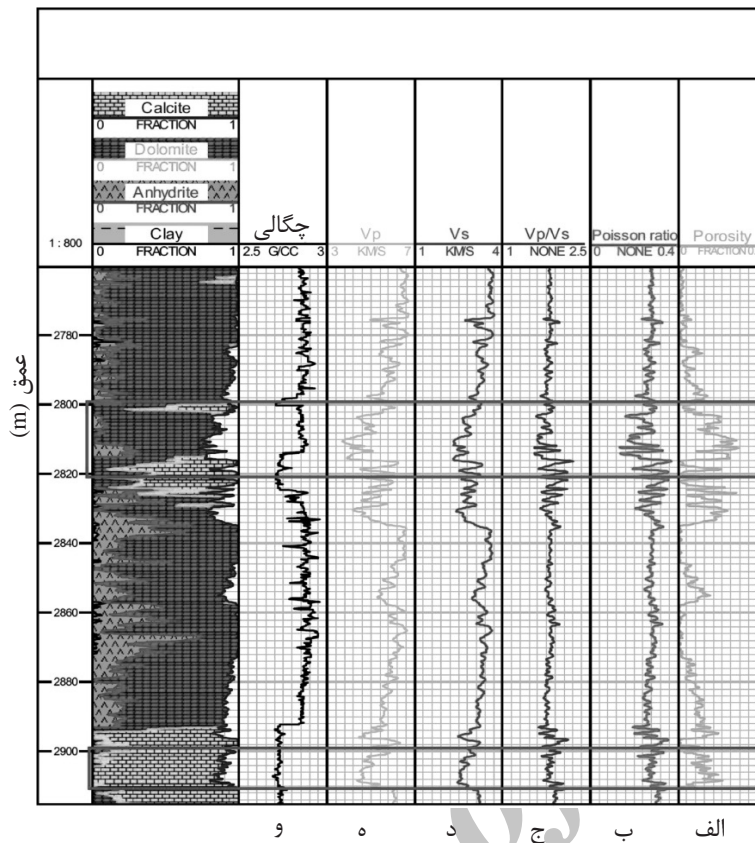
در شکل ۶ رابطه بین نسبت‌های پواسون،  $V_p/V_s$  و  $K/G$  با تخلخل برای سازندهای کنگان و دالان با استفاده از نمودارها بررسی گردیدند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، با افزایش تخلخل نسبت‌های پواسون،  $V_p/V_s$  و  $K/G$  با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابند.

در شکل ۷ نمودارهای  $V_p/V_s$ ،  $V_s$ ،  $V_p$ ، نسبت پواسون، چگالی و نمودار تخلخل برحسب عمق برای سازند کنگان نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل (داخل کادر) مشخص شده، در محدوده‌های عمقی ۲۸۰۰ تا ۲۸۲۰ m و ۲۹۰۰ تا ۲۹۰۸ m افزایش تخلخل به همراه کاهش سرعت امواج  $P$  و  $S$ ، نسبت  $V_p/V_s$ ، نسبت پواسون و چگالی روی می‌دهد. در شکل ۸ نمودارهای پارامتر لامه ( $\lambda$ )، مدول برشی ( $G$ )، مدول حجمی ( $K$ )، مدول یانگ

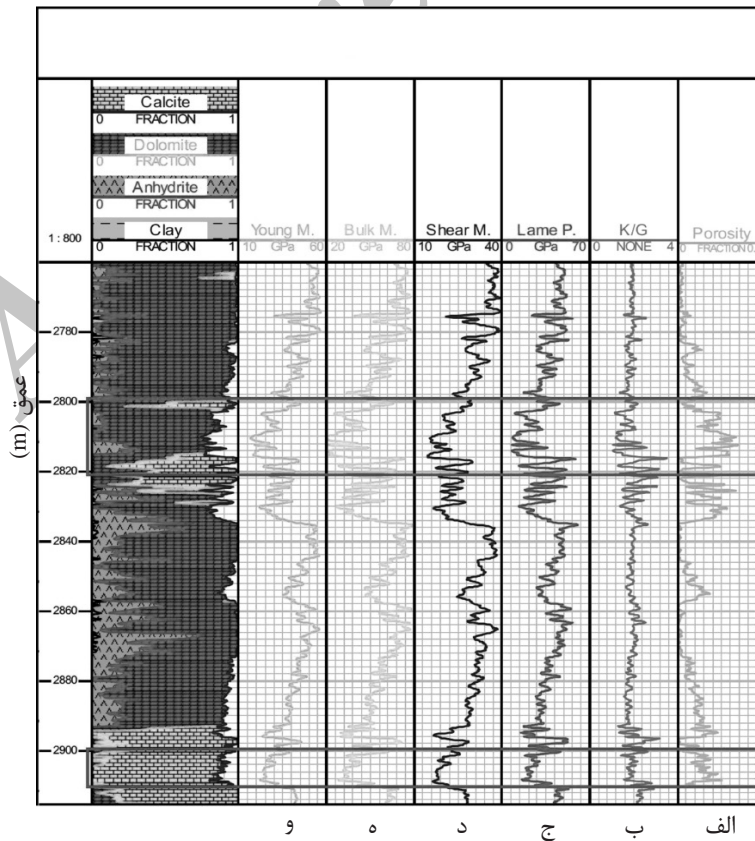


شکل ۶- نمودارهای K/G برحسب تخلخل،  $V_p/V_s$  برحسب تخلخل و نسبت پواسون برحسب تخلخل برای سازندهای الف) کنگان و ب) دالان در میدان گازی پارس جنوبی

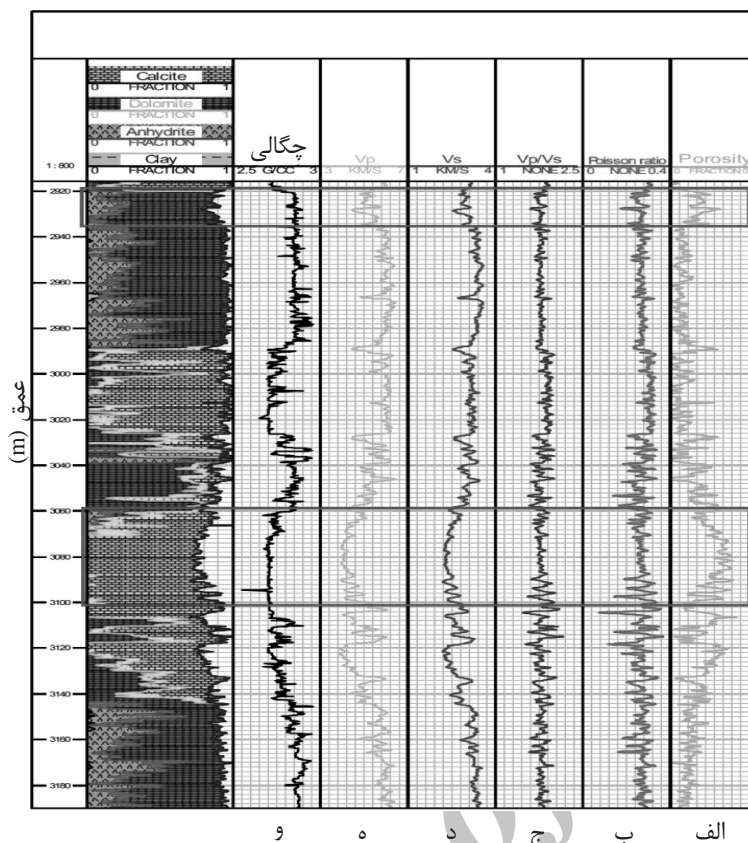




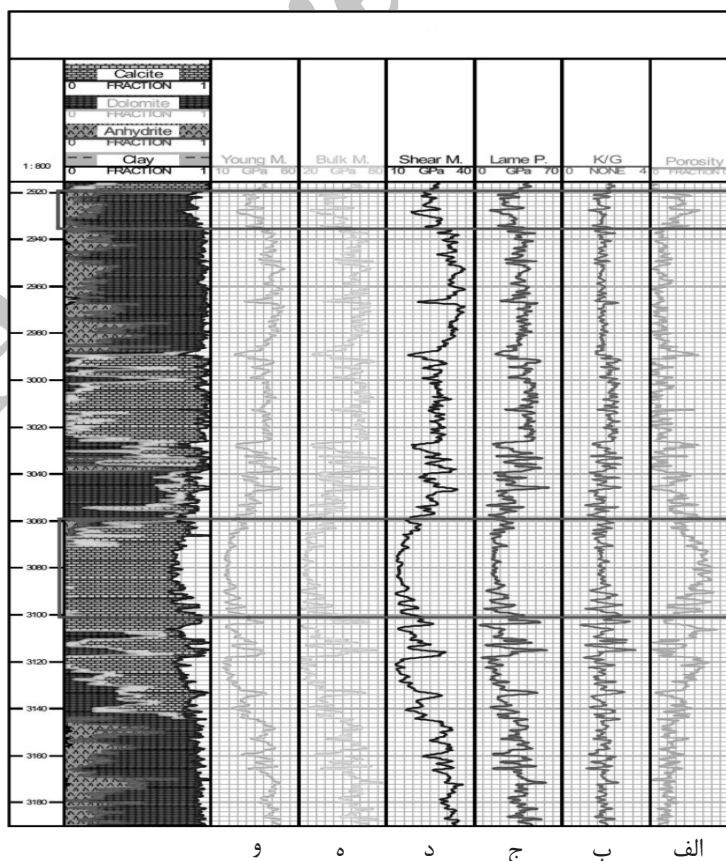
شکل ۷- نمودارهای چاه در سازند کنگان: (الف) تخلخل نوترن، (ب) نسبت پواسون، (ج)  $V_p/V_s$ ، (د)  $V_s$ ، (ه)  $V_p$  و (و) چگالی برحسب عمق



شکل ۸- نمودارهای مدول کشسان در سازند کنگان: (الف) تخلخل، (ب)  $K/G$ ، (ج)  $\lambda$ ، (د)  $G$ ، (ه)  $K$  و (و)  $E$  برحسب عمق



شکل ۹- نمودارهای چاه در سازند دالان: (الف) تخلخل نوترون، (ب) نسبت پواسون، (ج)  $V_p/V_s$ ، (د)  $V_s$  و (ه)  $V_p$  و (و) چگالی برحسب عمق



شکل ۱۰- نمودارهای مدول کشسان در سازند دالان: (الف) تخلخل، (ب)  $K/G$ ، (ج)  $\lambda$ ، (د)  $G$ ، (ه)  $K$  و (و)  $E$  برحسب عمق

افزایش تخلخل، این نسبت‌ها کاهش می‌یابند.  
 ۵- در نواحی متخلخل، میزان کاهش مدول حجمی به مراتب بیشتر از مدول برشی است.  
 ۶- با بررسی نمودارها و مدول‌های کشسان برحسب عمق مشخص گردید که در نواحی عمقی مخزن، مدول‌های کشسان کاهش و تخلخل افزایش یافته است.

#### علائم و نشانه‌ها

$\rho$ : چگالی سازند (g/cc)

$V_p$ : سرعت موج تراکمی (km/s)

$V_s$ : سرعت موج برشی (km/s)

$K$ : مدول حجمی (GPa)

$G$ : مدول برشی (GPa)

$E$ : مدول یانگ (GPa)

$\lambda$ : پارامتر لامه (GPa)

$\sigma$ : نسبت پواسون (بدون بعد)

در این شکل، در اعماق ۲۹۲۰ تا ۲۹۳۵ m و ۳۰۶۰ تا ۳۱۰۰ m (در کادر مشخص شده است)، مقدار تخلخل بالا است و در این نواحی کاهش مدول‌های کشسان روی داده است.

#### نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده در این تحقیق به اختصار عبارتند از:

- ۱- مدول‌های کشسان در نواحی گازی با استفاده از داده‌های DSI با دقت بالایی قابل محاسبه می‌باشند.
- ۲- با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که با افزایش تخلخل، مدول‌های کشسان کاهش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند.
- ۳- با مقایسه روابط بین مدول‌های کشسان و تخلخل مشخص شد که مدول حجمی بیشترین همبستگی و مدول برشی کمترین همبستگی را با تخلخل دارد.
- ۴- با بررسی روابط بین نسبت‌های پواسون،  $V_p/V_s$  و  $K/G$  با تخلخل مشخص گردید که با

#### مراجع

- [1]. Goodway B., Chen T., and Downton J., "Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters," 67<sup>th</sup> Ann. Int. Mtg: SEG, pp.183-186, 1997.
- [۲]. کاظمی م. س.، مقایسه نسبت  $V_p/V_s$  از رابطه کاستاگنا و نگاره DSI، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۶، ۱۱۲-۱۲۳، ۱۳۹۱.
- [3]. Fjaer E., Horsrud P., Raaen A.M., and Risnes R., "Petroleum related rock mechanics," Elsevier Science Publishers B. V., 1992.
- [4]. Fjaer E., and Holt R. M., "Rock acoustics and rock mechanics, their link in petroleum engineering," The Leading Edge., Vol. 13, pp. 255-258, 1994.
- [5]. Hopcroft M. A., Nix W. D., and Kenny T. W., "What is the Young's modulus of silicon?," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 19, No. 2, April, 2010.
- [6]. Murphy W., Reischer A., and Hsu K., "Modulus decomposition of compressional and shear velocities in sand bodies," Geophysics, Vol. 58, pp. 227-239, 1993.
- [7]. Baechle G. T., Weger R., Eberli G. P., and Colpaert A., "Pore size and pore type effects on velocity – Implications for carbonate rock physics models," Abstract of paper Presented at Sound of Geology, Workshop in Bergen, Norway, 2006.

- [8]. Hamada G. M., "Reservoir fluids Identification using  $V_p/V_s$  ratio", Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 59, No. 6, pp. 649-654, 2004..
- [9]. Pride S. R., "Relationships between seismic and hydrological properties," in Rubin, Y., and Hubbard, S., eds., Hydrogeophysics: New York, Kluwer Academy, pp. 217–255, 2005.
- [10]. MacBeth C., "A classification for the pressure-sensitivity properties of a sandstone rock frame," Geophysics, Vol. 69, pp. 497–510, 2004.
- [11]. Gassmann F., "Über die Elastizität poroser Medien," Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, Vol. 96, pp.1-23, 1951.
- [12]. Biot M. A., "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, 1956.
- [13]. Lee M. W., "Biot-Gassmann theory for velocities of gas-hydrate-Lee, bearing sediments," Geophysics, Vol. 67, pp. 1711–1719, 2002.

[۱۴]. قاسم العسکری م. ک.، اصول جاه پیمایی، مؤسسه انتشارات ستایش، تهران، ۱۳۹۱.

Archive of SID