

## جانشینی سیال و مدل سازی پیشرو لرزه‌ای در یکی از مخازن ماسه‌سنگی ایران

بهاره فریدونی<sup>۱</sup>، علی مرادزاده<sup>۲\*</sup>، و امین روشندل کاهو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴)

### چکیده

مشاهده تغییرات ایجاد شده در خواص سیگنال لرزه‌ای که وابسته به تولید هیدروکربور، سیال جایگزین شده و شرایط مخزن است، عملیات لرزه‌نگاری مجدد میادین هیدروکربوری را به منظور پایش حین سناریوهای تزریق پیشنهاد می‌کند. عمر بسیاری از مخازن هیدروکربوری ایران به نیمه دوم تولید خود رسیده است؛ از این رو این امکان در فواصل زمانی مشخص (برای انجام لرزه‌نگاری چهار بعدی) باید بررسی شود. برای این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی، مدل فیزیک سنگ مناسب برای محاسبه خواص کشسانی سنگ ساخته می‌شود. بعد از اعمال جانشینی سیال و با استفاده از مدل سازی پیشرو لرزه‌ای، خواص کشسانی محاسبه شده به خواص لرزه‌ای مخزن مرتبط شود. در نهایت، امکان عملیات لرزه‌نگاری مجدد براساس تغییرات ایجاد شده در خواص لرزه‌ای مخزن بررسی می‌شود. در این مقاله که درباره بررسی یکی از مخازن نفتی ماسه‌سنگی ایران است، برای محاسبه خواص کشسانی سنگ خشک از دو مدل فیزیک سنگ گسمن و مدل هرتز-میندلین (با استفاده از حد پایین هشین-اشتریکمن) در یکی از چاه‌های میدان استفاده شده است. سناریوی منتخب برای جانشینی سیال با توجه به بیشترین تغییرات دامنه لرزه‌ای، جانشینی ۳۰ درصدی گاز با نفت است. پس از جانشینی سیال، مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن، کاهش ۱۷ درصدی و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن کاهش ۱۳ درصدی سرعت موج تراکمی را نسبت به شرایط برجا نشان می‌دهند، اما کاهش سرعت موج تراکمی در اشباع-شدگی ناهمگن حدود ۳ درصد است. نتایج مدل سازی پیشرو لرزه‌ای نشان می‌دهد اگر حدود ۳۰ درصد گاز جانشین نفت شود و توزیع سیال همگن باشد، تغییرات سیگنال لرزه‌ای در بخش مخزنی و تأخیر زمان ایجاد شده در لایه‌های زیرین مخزن قابل مشاهده است و امکان برداشت مجدد عملیات لرزه‌نگاری وجود دارد، اما اگر توزیع سیال ناهمگن باشد، این امکان با جانشینی بیشتر گاز با نفت فراهم خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** فیزیک سنگ، جانشینی سیال، لرزه‌نگاری چهار بعدی، مدل سازی پیشرو لرزه‌ای

## ۱ مقدمه

پایش لرزه‌ای مخازن ابزار مهمی جهت نظارت بر افزایش بازیافت نفت و مدیریت تولید است. در پایش لرزه‌ای، چهار نوع از تغییرات مخزن شامل تغییرات اشباع‌شدگی، تغییرات فشار، تغییرات ژئومکانیکی و تغییرات درجه حرارت مخزن مطالعه می‌شوند (میتاچی و همکاران، ۲۰۱۰). در این میان، تغییرات اشباع‌شدگی و جانشینی سیال بخش مهمی از تحلیل‌های فیزیک‌سنگی داده‌های نگار، داده‌های مغزه و داده‌های لرزه‌ای هستند که برای شناسایی و تعیین سیالات مخزنی، پیش‌بینی نگارهای چاه-پیمایی، ایجاد الگوهای فیزیک سنگی و تغییرات ناشی از سیالات منفذی بر سرعت لرزه‌ای استفاده می‌شوند (ماو کو و همکاران، ۱۹۹۵ و رین، ۲۰۱۵).

به‌منظور بررسی اثر جانشینی سیال بر سیگنال لرزه‌ای لازم است ابتدا برای محاسبه خواص کشسانی سنگ، مدل فیزیک سنگ مناسب از داده‌های پتروفیزیکی ساخته شود. سپس خروجی مدل‌سازی فیزیک سنگی که تغییر سیال بر آن اعمال شده است، با استفاده از مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای به خواص لرزه‌ای مخزن مرتبط شود (هان و باتزل، ۲۰۰۴؛ گرانا، ۲۰۱۶ و فریدونی، ۱۳۹۴).

پژوهشگران بسیاری مطالعات جانشینی سیال انجام داده‌اند. چای و هان (۲۰۰۹) سنگ‌شناسی و تفکیک سیال را با استفاده از الگوی فیزیک سنگ در خلیج مکزیک بررسی کردند. میلوواک (۲۰۰۹)، مدل‌های مختلف فیزیک سنگ را برای یک مخزن تحکیم‌نیافته واقع در خلیج مکزیک مطالعه کرد و درنهایت، مدل ماسه نرم (Soft-sand model) را مدل مناسب فیزیک سنگ برای تفسیر لرزه‌ای آن مخزن معرفی کرد. میتاچی و همکاران (۲۰۱۰) مدل‌های فیزیک سنگ را برای جانشینی سیال در سنگ‌های کربناته در یکی از میدین نفتی جنوب غرب ایران بررسی کردند. آنها با مطالعه نمونه‌های مختلف سنگ کربناته به این نتیجه رسیدند که مدل DEM

(Differential Effective Medium) با توجه به انطباق

خوبی که با نمونه‌های آزمایشگاهی دارد، مدل مناسبی برای محاسبه خواص کشسانی و استفاده در مطالعات جانشینی سیال است. کاظمینی و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه موردی سازند ماسه‌سنگی اشتوتگارت در کترین آلمان، با استفاده از مدل فیزیک سنگ گسمن (۱۹۵۱) اثر  $CO_2$  تزریق‌شده را بر سرعت لرزه‌ای بررسی کردند. براساس این مدل، با استفاده از مدل‌سازی کشسانی یک‌بعدی و مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای دوبعدی با روش تفاضل محدود، پاسخ لرزه‌ای برای مقادیر مختلف  $CO_2$  بررسی می‌شود. ژانگ و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از مدل فیزیک سنگ والتون و ساخت مدل پیشرو لرزه‌ای با استفاده از روش ردیابی پرتو، اثر تغییرات گاز آزاد و گاز هیدراته را بر مخزن تحکیم‌نیافته واقع در خلیج مکزیک بررسی کردند. اید و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور بررسی مهاجرت  $CO_2$ ، از مدل‌سازی فیزیک سنگ و مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای به کمک روش تفاضل محدود استفاده کردند. آنها با استفاده از مدل گسمن و هر دو نوع اشباع-شدگی همگن و ناهمگن، تغییرات سرعت نسبت به گذشت زمان را بررسی کردند و نشان دادند توزیع فضایی و تغییرات زمین‌شناسی در مخزن نیز در تشخیص و شناسایی مهاجرت  $CO_2$  مؤثر است. هانگ و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه موردی یکی از مخازن آلمان با استفاده از روش هم‌میخت برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای و تلفیق اطلاعات چاه و داده لرزه‌ای سه‌بعدی، پاسخ لرزه‌ای در زمان‌های مختلف را با  $CO_2$  تزریق‌شده بررسی کردند.

در این مقاله که یکی از مخازن ماسه‌سنگی ایران بررسی می‌شود، ابتدا با استفاده از دو مدل فیزیک سنگ گسمن و مدل ماسه نرم، خواص کشسانی سنگ خشک محاسبه شده است. در مرحله بعد، خواص کشسانی سنگ اشباع‌شده بعد از اعمال جانشینی محاسبه و به همراه خواص کشسانی سنگ برجا در مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای

برای محاسبه خواص مؤثر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ ( $K_{matrix}$ ) از میانگین حسابی حدود بالا و پایین هشین-اشتریکمن (۱۹۶۳) استفاده شده است (بریمن، ۱۹۹۵). با استفاده از این رابطه، میانگین مدول حجمی و برشی مؤثر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ به ترتیب برابر با ۴۲/۱۸ و ۳۱/۷۹ گیگاپاسکال است.

باتوجه به شرایط مخزن مورد مطالعه (دمای ۴۲/۲۲ درجه سانتیگراد، فشار ۹/۷۵ مگاپاسکال و شوری آب ۱۸۶۵۶۹ پی‌پی‌ام) و درصد اشباع سیالات موجود در چاه، مدول حجمی ( $K_{fl-in}$ ) و چگالی ( $\rho_{fl-in}$ ) هر یک از سیالات مخزن با استفاده از روابط باتزل و ونگ (۱۹۹۲) محاسبه شده است. خواص سیالات موجود و میانگین مؤثر خواص سیالات در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات سیالات محاسبه‌شده مخزن با استفاده از روابط باتزل و ونگ (۱۹۹۲)

خواص سیالات	آب شور	نفت	گاز	میانگین خواص مؤثر سیالات
چگالی سیال ( $g/cm^3$ )	۱/۰۹	۰/۷۵	۰/۱	۱
مدول حجمی سیال (GPa)	۲/۳۸	۱	۰/۰۲	۱/۸۹

سیالات پرکننده منافذ سنگ مخزن به صورت دوفازی یا سه‌فازی هستند؛ بنابراین در جانشینی سیال لازم است پس از محاسبه خواص هر یک از سیالات، خواص میانگین ترکیب سیالات موجود در مخزن نیز محاسبه شود. معادله گسمن فرض می‌کند تمام فازهای سیالات امتزاج‌ناپذیر هستند و در سراسر فضای منفذ به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. در این صورت با فرض یک سیال همگن می‌توان مدول حجمی ( $k_{fl-eff-new-h}$ ) و چگالی ( $\rho_{fl-eff-new-h}$ ) مؤثر سیال را با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه کرد (دومینکو، ۱۹۷۶ و اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

وارد شده است. با مقایسه نتایج مدل‌سازی پیشرو لوزه‌ای برای شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال می‌توان اثر تغییر سیگنال لوزه‌ای در بخش مخزنی و تأخیر زمانی ایجادشده در لایه‌های زیرین مخزن را مشاهده کرد. در نهایت، مقدار هیدروکربور لازم برای بازینی لوزه‌ای به شکل موفقیت-آمیز به دست می‌آید.

$$K_{sat\_new} = K_{dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_{matrix}}\right)^2}{\frac{\phi}{K_{fl\_eff\_new}} + \frac{(1-\phi)}{K_{matrix}} - \frac{K_{dry}}{K_{matrix}^2}} \quad (1)$$

مدول حجمی سنگ اشباع‌شده در شرایط برجا مخزن ( $K_{sat-in}$ ) با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی سرعت موج تراکمی ( $V_p$ )، سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و چگالی حجمی سنگ ( $\rho_b$ ) مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$K_{sat\_in} = \rho_b \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (2)$$

مدول موج برشی سنگ ( $\mu_{in}$ ) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

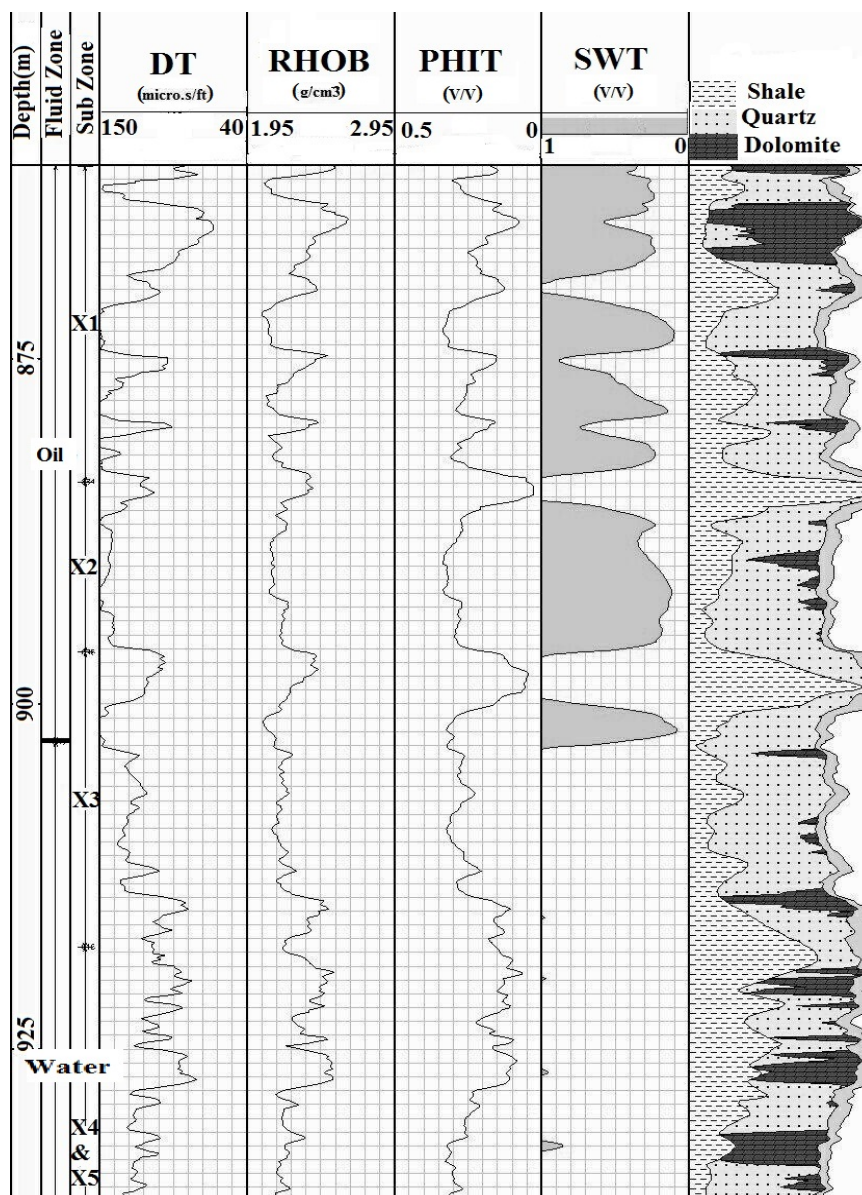
$$\mu_{in} = \rho_b V_s^2 \quad (3)$$

در رابطه گسمن، برخلاف مدول‌های حجمی سنگ که به تغییر سیالات منفذی حساس است، مدول موج برشی سنگ مستقل از تغییر سیالات منفذی است؛ یعنی مدول موج برشی در سه حالت برجا ( $\mu_{in}$ ) خشک ( $\mu_{dry}$ ) و اشباع با سیال جدید ( $\mu_{sat-new}$ ) یکسان است. این فرض از نبود فعل و انفعالات شیمیایی بین سیالات منفذی و دانه‌های سنگ ناشی می‌شود (بریمن، ۱۹۹۹). در ادامه، در تمام روابط، مدول موج برشی با  $\mu$  نمایش داده می‌شود.

که  $S_w$  اشباع‌شدگی آب،  $K_w$  مدول حجمی آب،  $S_o$  اشباع‌شدگی نفت،  $K_o$  مدول حجمی نفت،  $S_g$  اشباع‌شدگی گاز،  $K_g$  مدول حجمی گاز،  $\rho_w$  چگالی آب،  $\rho_o$  چگالی نفت و  $\rho_g$  چگالی گاز است. نماد (...) بیان‌کننده میانگین حجمی پارامترهای ذکر شده است. اندیس  $h$  بیانگر توزیع همگن سیال مخزن است.

$$K_{fl\_eff\_new\_h} = \left[ \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + \frac{S_g}{K_g} \right]^{-1} = \left\langle \frac{1}{K_{fl}(x,y,z)} \right\rangle \quad (4)$$

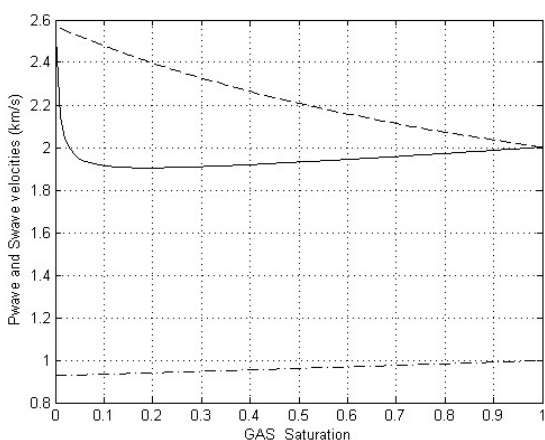
$$\rho_{fl\_eff\_new\_h} = \rho_g S_g + \rho_o S_o + \rho_w S_w = \langle \rho_{fl}(x,y,z) \rangle \quad (5)$$



شکل ۱. از چپ به راست: نمایش نگارهای عمق (ستون ۱)، بخش آب و نفت (ستون ۲)، بخش‌های مخزنی (ستون ۳)، سونیک (ستون ۴)، چگالی (ستون ۵)، تخلخل کل (ستون ۶)، اشباع‌شدگی (ستون ۷) و سنگ‌شناسی (ستون ۸) در یکی از چاه‌های میدان

$$K_{eff} = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\left( K_i + \frac{4}{3} \mu \right)} \right]^{-1} - \frac{4}{3} \mu, \quad (7)$$

که  $n$  تعداد تکه‌های سیالات مختلف،  $x_i$  کسر حجمی مربوط به تکه سیال  $i$ ام،  $K_i$  مدول حجمی سنگ اشباع-شده با سیال  $i$ ام و  $K_{eff}$  مدول حجمی مؤثر سنگ است.



شکل ۲. سرعت موج تراکمی مخزن در شرایط اشباع‌شدگی همگن (خط)، ناهمگن (خط‌چین) و سرعت موج برشی (خط‌نقطه) در شرایط برجای مخزن با تخلخل میانگین ۲۳/۶٪

شکل ۲ نمودار مقاطع سرعت موج تراکمی و موج برشی نسبت به اشباع گاز را برای شرایط برجای مخزن (با تخلخل میانگین ۲۳/۶٪) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش گاز، سرعت موج برشی (خط-نقطه) به دلیل کاهش چگالی سیال به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. در اشباع‌شدگی ناهمگن (خط‌چین)، سرعت موج تراکمی به صورت تدریجی کاهش می‌یابد تا اینکه به کمترین مقدار خود در اشباع‌شدگی ۱۰۰٪ گاز می‌رسد. در اشباع‌شدگی همگن (خط)، سرعت موج تراکمی با افزایش ۱۵ تا ۳۰ درصدی گاز، بیشترین کاهش را دارد و پس از آن با افزایش اشباع گاز، به دلیل کاهش سریع‌تر چگالی حجمی سنگ نسبت به کاهش مدول

توزیع واقعی اشباع‌شدگی در مخزن می‌تواند بازه‌ای از اشباع‌شدگی تکه‌ای (ناهمگن) تا یکنواخت (همگن) را دربرگیرد (ماوکو و موکرچی، ۱۹۹۸). به‌طور کلی انتظار می‌رود که افزایش فشار منفذی القا شده ناشی از موج به-صورت فضایی با تغییر سیال منفذی تغییر کند. در فرکانس‌های لرزه‌ای، انتظار می‌رود که این فشارها در فواصل کمتر از طول پخش  $L_c$  (diffusion length) به تعادل برسند. هر نقطه از سنگ همانند یک سیال مؤثر اشباع‌شده رفتار خواهد کرد که میانگین محلی از فازهای گاز، نفت و آب شور است. معادلات (۴) و (۵) مربوط به میانگین یک تکه با اندازه  $L_c$  است. نقاطی که در فواصل کمتر از  $L_c$  قرار گرفته‌اند، فشار منفذی در آنها به تعادل خواهد رسید درحالی‌که در فواصل بیشتر از  $L_c$  اختلاف فشار باقی می‌ماند؛ بنابراین یک سنگ می‌تواند از تعداد زیادی تکه با اندازه  $L_c$  تشکیل شده باشد که هر یک از آنها فاز یا سیال مؤثر محلی خاص خود را دارد (ماوکو و موکرچی، ۱۹۹۸). در فرکانس لرزه‌ای  $f$ ، طول پخش  $L_c$  با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود (سنگوپتا و ماوکو، ۲۰۰۳):

$$L_c \approx \sqrt{\frac{4D}{f}}, \quad (6)$$

که  $D = \frac{\kappa K_{fl}}{\eta}$ ،  $\kappa$  تراوایی و  $\eta$  گرانروی سیال است. اگر آب و هیدروکربور در منافذ سنگ به صورت ناهمگن توزیع شده باشند، رابطه (۴) برای محاسبه مدول حجمی ترکیب سیالات مناسب نخواهد بود (ماوکو و موکرچی، ۱۹۹۸). در شرایط اشباع‌شدگی ناهمگن، مدول حجمی هر فاز سیال به همراه درصد اشباع‌شدگی آنها به-طور مجزا استفاده و مدول حجمی سنگ اشباع‌شده متشکل از هر سه فاز سیال محاسبه می‌شود. هیل (۱۹۶۳) و ماوکو و همکاران (۲۰۰۹) رابطه (۷) را برای تخمین مدول‌های حجمی مؤثر سنگ در این شرایط ارائه دادند:

خشک را براساس خواص دانه و منفذ با مجموعه‌ای از دانه‌های کروی تصادفی توصیف می‌کنند. در این مدل‌ها، مدول کشسانی مؤثر سنگ خشک پارامتری وابسته به تخلخل، میانگین تعداد تماس‌ها در سطح هر دانه، اندازه دانه و صلیبت آنها است. به‌طور کلی مدل‌های نظری، تخمینی کلی از مدول حجمی سنگ خشک ارائه می‌دهند که می‌تواند در جاهایی که داده چاه در دسترس نیست، به مدل‌سازی فیزیک سنگ کمک کند (کاظمینی و همکاران، ۲۰۱۱).

در این مقاله از دو روش برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک استفاده شده است. روش اول استفاده از رابطه گسمن (روش مستقیم و نگارهای چاه‌پیمایی) است:

$$K_{dry} = \frac{K_{sat\_in} \left( \frac{\phi K_{matrix}}{K_{fl\_in}} + 1 - \phi \right) - K_{matrix}}{\frac{\phi K_{matrix}}{K_{fl\_in}} + \frac{K_{sat\_in}}{K_{matrix}} - 1 - \phi} \quad (8)$$

و روش دوم مدل ماسه نرم است. در تخلخل بحرانی، مدول هرترز-میندلین با رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$K_{HM} = \left[ \frac{n^2 (1 - \phi_c)^2 \mu_m^2}{18\pi^2 (1 - \nu_m)^2} P \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

$$\mu_{HM} = \frac{2 + 3f - \nu_m (1 + 3f)}{5(2 - \nu_m)} \left[ \frac{3n^2 (1 - \phi_c)^2 \mu_m^2}{2\pi^2 (1 - \nu_m)^2} P \right]^{\frac{1}{3}}$$

که  $K_{HM}$  و  $\mu_{HM}$  مدول حجمی و مدول موج برشی سنگ خشک در تخلخل بحرانی  $(\phi_c)$ ، عدد کئوردیناسیون،  $P$  فشار مؤثر،  $\mu_m$  و  $\nu_m$  به‌ترتیب مدول برشی و نسبت پواسون

حجمی سنگ، به‌تدریج افزایش می‌یابد. برای مدل‌سازی پاسخ لرزه‌ای سیال در یک درجه اشباع‌شدگی مشخص، عدم قطعیت تخمین سرعت موج تراکمی بین دو مدل اشباع‌شدگی بسیار زیاد است. به‌عبارت‌دیگر، در مقیاس بزرگ، اشباع‌شدگی ناهمگن و در مقیاس کوچک، اشباع‌شدگی همگن به‌ترتیب حدهای بالایی و پایینی سرعت موج تراکمی خواهند بود و مقادیر صحیح بین این دو اشباع‌شدگی قرار می‌گیرند (کاظمینی و همکاران، ۲۰۱۰)؛ بنابراین در این مطالعه از هر دو مدل اشباع‌شدگی ناهمگن و همگن برای به‌دست‌آوردن سرعت موج تراکمی استفاده شده است.

### ۳-۱ محاسبه خواص کشسانی سنگ خشک

مدول حجمی سنگ خشک ( $K_{dry}$ )، یکی از پارامترهای مهم و پیچیده در رابطه گسمن است و محاسبه نادرست آن می‌تواند باعث ایجاد خطا و عدم قطعیت در نتایج شود. این پارامتر مستقل از سیال منفذی است و در طول جاننشینی سیال ثابت باقی می‌ماند. به‌طور کلی، مدول حجمی سنگ خشک با سه روش محاسبه می‌شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

۱. سرعت‌های اندازه‌گیری‌شده از داده‌های مغزه با کنترل رطوبت آن؛

۲. روابط تجربی و نظری متوسط مؤثر؛

۳. روش مستقیم با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی (رابطه گسمن).

اگر داده‌های نگار چاه‌پیمایی قابل اعتمادی در دسترس باشد، روش مستقیم با بازنویسی مجدد رابطه گسمن برای تخمین مدول حجمی سنگ خشک، دقیق‌ترین روش است (ژو و مک‌مکان، ۱۹۹۰).

از روش‌های نظری و تجربی برای برقراری ارتباط بین مدول حجمی مؤثر سنگ خشک و خواص دانه و منفذ استفاده می‌شود. مدل‌های نظری، خواص کشسان سنگ

و همکاران، ۲۰۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مدل انطباق خوبی با هم نشان می‌دهند. دلایل استفاده از روش مستقیم (رابطه گسمن) برای اعتبارسنجی، در دسترس بودن نگاره‌های چاه‌پیمایی قابل اعتماد (ژو و مک‌مکان، ۱۹۹۰) و برقرار بودن فرضیات گسمن است.

### ۲-۳ بررسی تأثیر سناریوهای مختلف درجه اشباع‌شدگی بر سرعت و دامنه لرزه‌ای

در مخزن مورد مطالعه نسبت گاز به نفت (GOR) بالا و برابر با ۶۲ L/L است؛ بنابراین در اثر تولید نفت، بخشی از گاز همراه آن آزاد می‌شود و بخشی از گاز موجود در پوش سنگ نیز به داخل مخزن نفوذ می‌کند. نتیجه این امر، تغییر سرعت لرزه‌ای و چگالی حجمی سنگ خواهد بود. همچنین ممکن است آب موجود در زیر سطح تماس نفت و آب، جانشین نفت تولیدشده شود. از آنجایی که خواص آب و نفت نزدیک به هم است، جانشینی نفت با آب تغییرات زیادی را در سرعت لرزه‌ای ایجاد نخواهد کرد. به‌منظور انتخاب سناریوی جانشینی سیال، تغییرات دامنه لرزه‌ای به ازای تغییر درجه اشباع‌شدگی گاز به صورت همگن و ناهمگن از ۰ تا ۱۰۰٪ در بخش نفتی منطقه مخزنی محاسبه شده است. برای انجام این مرحله، ابتدا خواص سیال (شامل مدول حجمی و چگالی سیال)، مدول حجمی سنگ خشک (با استفاده از دو مدل گسمن و ماسه نرم) و مدول حجمی کانی‌های تشکیل‌دهنده ماتریکس سنگ محاسبه شدند. مدول موج برشی سنگ نیز با استفاده از رابطه (۳) به‌دست‌آمد و اثر نوع اشباع‌شدگی همگن یا ناهمگن بررسی شد.

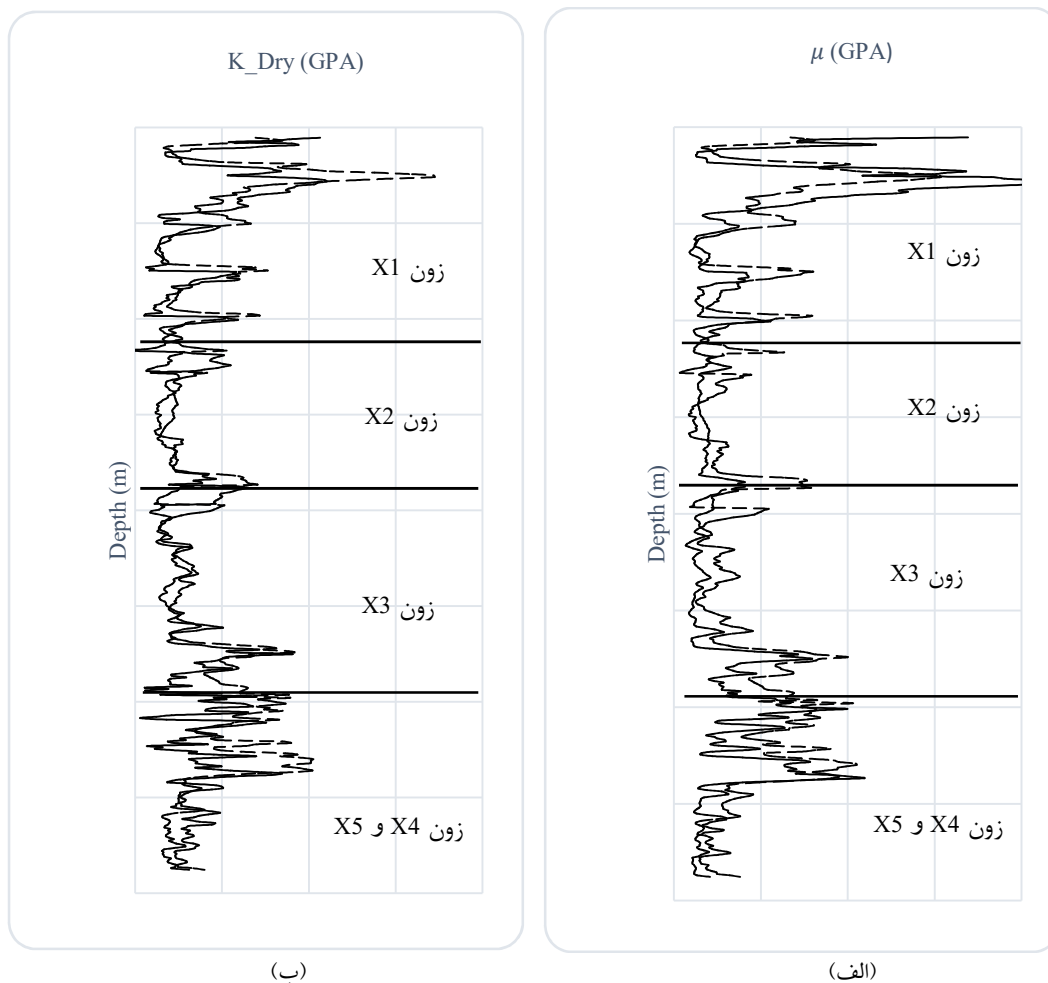
برای محاسبه مدول حجمی سنگ اشباع در شرایط اشباع‌شدگی همگن، خواص مؤثر سیال شامل مدول حجمی  $(k_{fl-eff-new-h})$  و چگالی  $(\rho_{fl-eff-new-h})$  برای درجات اشباع-شدگی مختلف با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه شدند و درنهایت، به کمک رابطه (۱) مدول حجمی سنگ اشباع-شده برای سناریوهای مختلف اشباع‌شدگی محاسبه شد.

ماتریکس تشکیل‌دهنده سنگ و  $f$  ضریب اصطکاک است. از ضریب اصطکاک برای بررسی لغزش بین سطح دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ استفاده می‌شود. گفتنی است چون مدول موج برشی محاسبه‌شده با استفاده از رابطه هرترز-میندلین، لغزش بین دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ را در نظر نمی‌گیرد (ضریب اصطکاک برابر با یک است)، مقدار مدول موج برشی تخمینی، بیشتر از مدول موج برشی حاصل از چاه است؛ بنابراین این ضریب باید لحاظ و بررسی شود. برای محاسبه خواص کشسانی سنگ خشک در تخلخل‌های کمتر از تخلخل بحرانی از حد پایینی هشین-اشتریکمن استفاده شده است:

$$K_{dry} = \left[ \frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3}\mu_m} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{K_m + \frac{4}{3}\mu_m} \right]^{-1} - \frac{4}{3}\mu_m \quad (10)$$

$$\mu = \left[ \frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_{HM} + \frac{\mu_m}{6} \left( \frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \right)} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_m + \frac{\mu_m}{6} \left( \frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \right)} \right]^{-1} - \frac{\mu_m}{6} \left( \frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \right) \quad (11)$$

مقدار تخلخل بحرانی برابر با ۰/۳۶، عدد کنوردیناسیون برابر با ۹ و ضریب اصطکاک ۰/۰۱ است. شایان ذکر است که ضریب اصطکاک ۰/۰۱ براساس بهترین انطباق با مدول برشی سنگ حاصل از رابطه گسمن انتخاب شده است. برای اعتبارسنجی، نتایج مدول‌های حجمی و برشی سنگ خشک با استفاده از روش مستقیم (رابطه گسمن) و مدل ماسه نرم در شکل ۳ آورده شده است (برگرفته از کاظمینی



شکل ۳. (الف) مدول موج حجمی سنگ خشک با روش مستقیم (رابطه گسمن) (به رنگ مشکی) و مدل هرتز-میندلین با استفاده از حد پایین هشین-اشتریکمن (خط چین) (ب) مدول موج برشی محاسبه‌شده از نگار چاه‌پیمایی (مشکی) و مدل هرتز-میندلین با استفاده از حد پایین هشین-اشتریکمن (خط چین) با ضریب اصطکاک ۰/۰۱. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مدل انطباق خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند.

در مرحله بعد، یک موجک لرزه‌ای با فاز ۱۸۰ درجه، فرکانس غالب ۴۵ هرتز و طول موجک ۱۰۰ میلی‌ثانیه با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه‌پیمایی ساخته شد (شکل ۴). سپس ردلرزه‌های مصنوعی، با هم‌امیخت موجک لرزه‌ای و ضرایب بازتاب برای شرایط برجا و درجات اشباع‌شدگی مختلف ساخته شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۶ تفاضل ردلرزه‌های مصنوعی برای شرایط برجا و بعد از اعمال جاننشینی سیال را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با جاننشینی ۳۰٪ گاز علاوه بر تغییر دامنه لرزه‌ای در بخش

برای محاسبه مدول حجمی مؤثر سنگ در شرایط اشباع‌شدگی ناهمگن ( $K_{eff}$ ) برای سناریوهای مختلف اشباع‌شدگی ( $x_i$ )، مدول موج برشی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه و در رابطه (۷) جایگزین شد. مدول حجمی سنگ اشباع‌شده با سیال  $i$ ام ( $K_i$ )، با فرض اینکه تمام سنگ از یک سیال اشباع شده است، برای سنگ ۱۰۰٪ اشباع از آب، سنگ ۱۰۰٪ اشباع از نفت و سنگ ۱۰۰٪ اشباع از گاز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و به‌ازای اشباع‌شدگی‌های مختلف ( $x_i$ ) در رابطه (۷) جایگزین شد تا  $K_{eff}$  به‌دست آید.

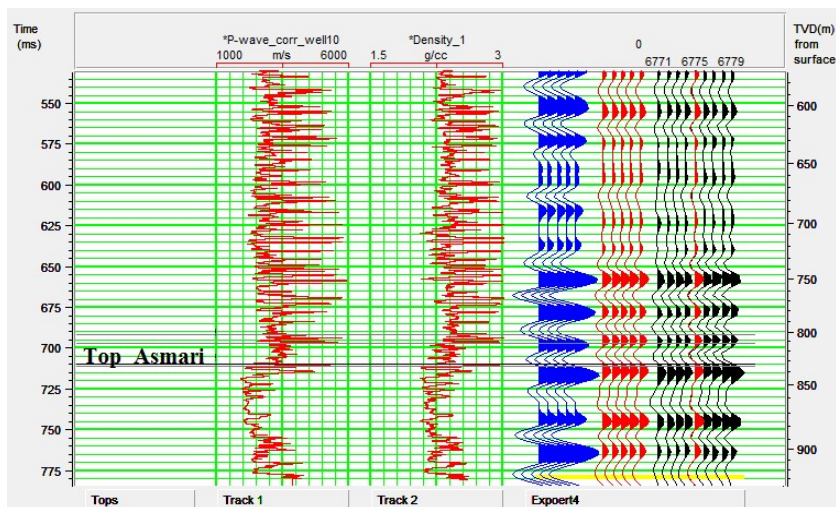


سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن حدود ۳ درصد است. همچنین زمان تأخیر، که میزان اختلاف زمان رسید موج قبل و بعد از جانشینی سیال است، در اشباع-شدگی همگن پس از جانشینی ۳۰٪ گاز بیشترین مقدار را نشان می‌دهد، اما در اشباع‌شدگی ناهمگن زمان تأخیر بسیار کم است و به‌ازای افزایش درصد اشباع‌شدگی گاز، این زمان تأخیر افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به اختلاف کم سرعت موج تراکمی حاصل از دو مدل فیزیک سنگ گسمن و مدل ماسه نرم، تنها از نتایج مدل گسمن برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای استفاده شده است.

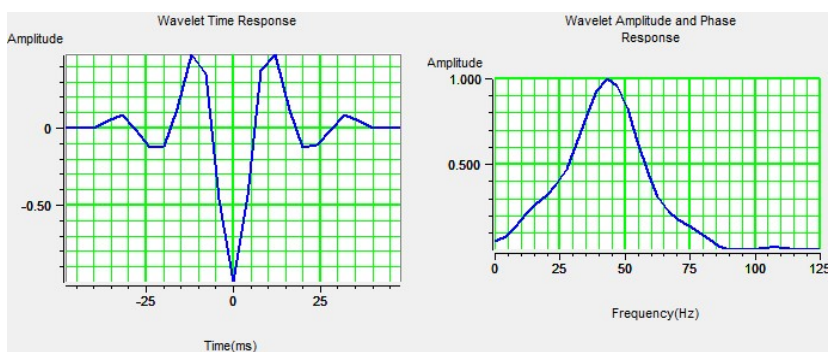
مخزنی، به‌علت کاهش سرعت موج تراکمی و در نتیجه کاهش مقاومت صوتی در بخش مخزن، زمان سیر موج در لایه‌های زیرین افزایش یافته است. در جدول ۲ مقادیر میانگین سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی، چگالی و زمان تأخیر ایجاد شده به‌ازای مقایسه مختلف اشباع‌شدگی گاز در بخش نفتی به همراه درصد این تغییرات آورده شده است. براساس این جدول، مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن پس از جانشینی ۳۰٪ گاز با نفت، کاهش ۱۷ درصدی سرعت موج تراکمی را نسبت به شرایط برجا نشان می‌دهد. در مدل ماسه نرم این کاهش سرعت حدود ۱۳ درصد است در حالی که مقدار کاهش

جدول ۲. مقادیر میانگین سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی، چگالی و تأخیر زمان ایجاد شده به‌ازای مقادیر مختلف اشباع‌شدگی گاز در بخش نفتی مخزن و درصد این تغییرات. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش سرعت موج تراکمی (در اشباع‌شدگی همگن) و همچنین بیشترین زمان تأخیر نظری در اشباع ۳۰٪ گاز دیده می‌شود.

اشباع گاز (%)	سرعت موج تراکمی (Km/s)	سرعت موج تراکمی (Km/s)	سرعت موج تراکمی (Km/s)	سرعت موج برشی (Km/s)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	زمان تأخیر نظری در اشباع‌شدگی همگن-گسمن (ms)	زمان تأخیر نظری در اشباع‌شدگی ناهمگن-گسمن (ms)
۰	۲/۴۸۷۷	۲/۴۸۷۷	۲/۴۸۷۷	۱/۰۴۲۸	۲/۲۲۹۶	۰	۰
۱۰	۲/۰۸۵۲	۲/۴۵۳۹	۲/۱۹۰۳	۱/۰۴۲۸	۲/۲۲۶۴	۸/۲۰۶	۰/۵۸۶
۲۰	۲/۰۶۲۶	۲/۴۲۳۰	۲/۱۷۳۴	۱/۰۴۶۰	۲/۲۱۲۲	۸/۷۶۲	۱/۱۳۶
۳۰	۲/۰۵۸۰	۲/۳۹۴۷	۲/۱۷۱۱	۱/۰۴۹۲	۲/۱۹۸۱	۸/۸۷۷	۱/۶۵۲
۴۰	۲/۰۵۸۵	۲/۳۶۸۵	۲/۱۷۳۰	۱/۰۵۲۴	۲/۱۸۴۰	۸/۸۶۵	۲/۱۳۹
۵۰	۲/۰۶۴۴	۲/۳۲۸۵	۲/۱۸۰۰	۱/۰۵۷۴	۲/۱۶۲۴	۸/۷۱۸	۲/۹۰۷
۶۰	۲/۰۷۱۶	۲/۲۹۲۵	۲/۱۸۸۱	۱/۰۶۲۴	۲/۱۴۰۹	۸/۵۴۰	۳/۶۲۱
۷۰	۲/۰۷۹۶	۲/۲۵۹۹	۲/۱۹۶۹	۱/۰۶۷۶	۲/۱۱۹۳	۸/۳۴۳	۴/۲۸۵
۸۰	۲/۰۸۸۲	۲/۲۳۰۴	۲/۲۰۶۲	۱/۰۷۲۹	۲/۰۹۷۸	۸/۱۳۴	۴/۹۰۴
۹۰	۲/۰۹۷۳	۲/۲۰۳۵	۲/۲۱۵۹	۱/۰۷۸۳	۲/۰۷۶۳	۷/۹۱۴	۵/۴۸۳
۱۰۰	۲/۱۰۵۰	۲/۱۸۴۰	۲/۲۲۴۱	۰/۸۲۸	۲/۰۵۸۴	۷/۷۳۰	۵/۹۱۲
درصد تغییرات							
در اشباع ۳۰٪ گاز	-۱۷/۲۷۳۶	-۳/۷۳۹۹	-۱۲/۷۲۵۰	+۰/۰۱	-۱/۴۱۲۸	-	-

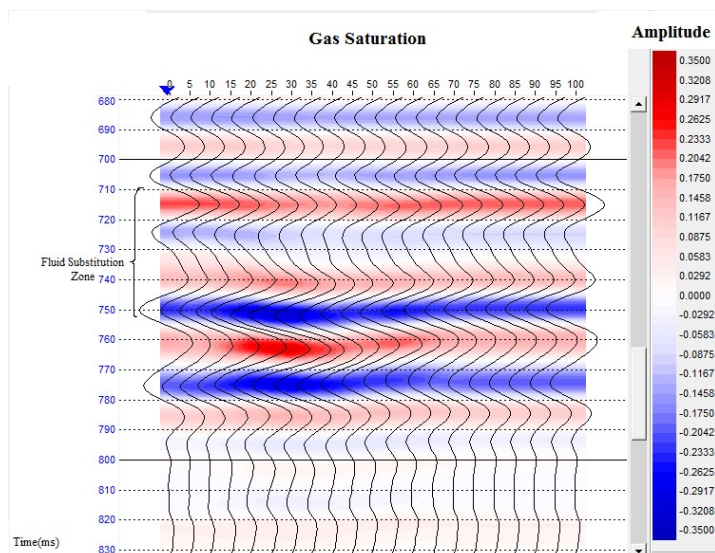


(الف)

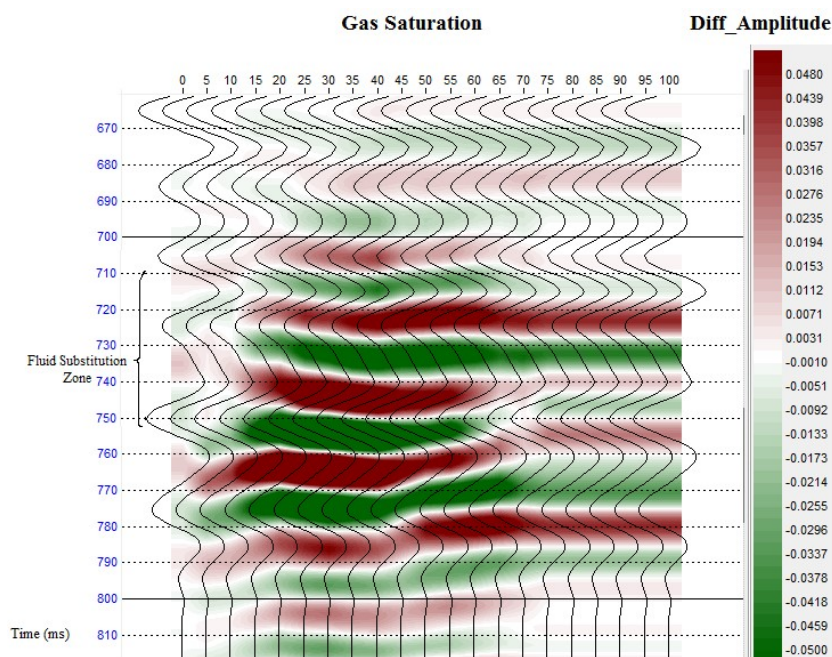


(ب)

شکل ۴. الف) مقایسه بین ردلرزه واقعی اطراف چاه (رنگ قرمز) و ردلرزه مصنوعی حاصل از هم‌امیخت موجک لرزه‌ای استخراج‌شده با ضریب بازتاب اطراف چاه (رنگ آبی)؛ ب) موجک مصنوعی استخراج‌شده با استفاده از داده چاه و داده لرزه‌ای در حوزه زمان و فرکانس.



شکل ۵. تغییر دامنه و ردلرزه‌های مصنوعی با افزایش اشباع گاز برای اشباع‌شدگی همگن. ردلرزه‌ها در محل چاه برای حالت برجا (اولین ردلرزه از سمت چپ) تا اشباع گاز ۱۰۰٪ (اولین ردلرزه از سمت راست) ساخته شده است. بیشترین میزان تغییرات دامنه مربوط به اشباع گاز ۱۵ تا ۳۰ درصدی است.



شکل ۶. تفاضل بین دامنه لرزه‌ای برای شرایط برجا و بعد از اعمال جانشینی سیال با افزایش اشباع گاز برای اشباع‌شدگی همگن. ردلرزه‌ها مربوط به حالت برجا (اولین ردلرزه از سمت چپ) تا اشباع گاز ۱۰۰٪ (اولین ردلرزه از سمت راست) است. نمایش رنگی مربوط به اختلاف دامنه اولین ردلرزه از سمت چپ (حالت برجا) با سایر ردلرزه‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف دامنه مربوط به اشباع گاز ۱۵ تا ۳۰ درصدی است.

همگن با رنگ نارنجی و برای اشباع‌شدگی ناهمگن با رنگ سبز مشخص شده است. نتایج مدل کشسانی یک‌بعدی برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای دو‌بعدی استفاده شده است.

### ۳-۴ مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای

برای انجام مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای، ابتدا افق‌های لرزه‌ای منطبق با نگارهای بلوک‌بندی شده با استفاده از چک‌شات از حوزه زمان به حوزه عمق منتقل شده است. افق‌های عمقی و خواص مربوط به هر لایه شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی قبل و بعد از جانشینی سیال مطابق جداول ۲ و ۳ اعمال شده است. جانشینی سیال در گستره جانبی کمتر از ۲۰۰۰ متر در بخش نفتی لایه مخزنی اعمال شده است. مقطع لرزه‌ای واقعی در شکل ۹ و مدل زمین‌شناسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با انتخاب فواصل نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه، چشمه موج تراکمی با فرکانس غالب ۴۵ هرتر و طول موج ۱۰۰ میلی‌ثانیه، مدل لرزه‌ای

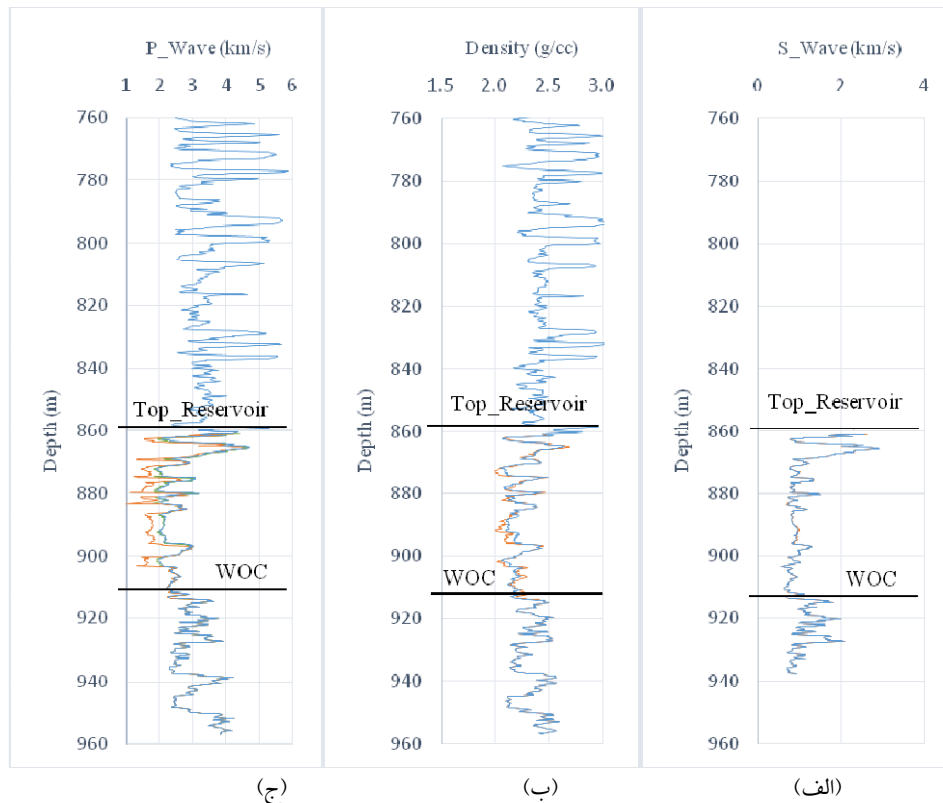
### ۳-۳ مدل‌سازی کشسانی یک‌بعدی

مدل یک‌بعدی بلوک‌بندی شده روی نگارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی، براساس مرزهای زمین‌شناسی، افق‌های تفسیر شده و تغییرات ناگهانی روی نگار سرعت موج تراکمی صورت گرفته است. این مدل بلوک‌بندی شده برای شرایط قبل و بعد از جانشینی سیال، با استفاده از مدل فیزیک سنگ گسمن و در دو حالت اشباع‌شدگی همگن و ناهمگن به دست آمده است. مقادیر سرعت و چگالی مدل بلوکی در بخش نفتی در جدول ۲ و در بخش آبی و بخش‌های غیرمخزنی در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۷ نگارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی را در محل چاه برای شرایط برجا (با رنگ آبی) و بعد از جانشینی سیال (به رنگ نارنجی و سبز) نشان می‌دهد. مدل بلوک‌بندی شده قبل (خط مشکی) و بعد از جانشینی سیال (به رنگ نارنجی و سبز) در شکل ۸ نشان داده شده است. روی نگار سرعت موج تراکمی، مدل گسمن برای اشباع‌شدگی

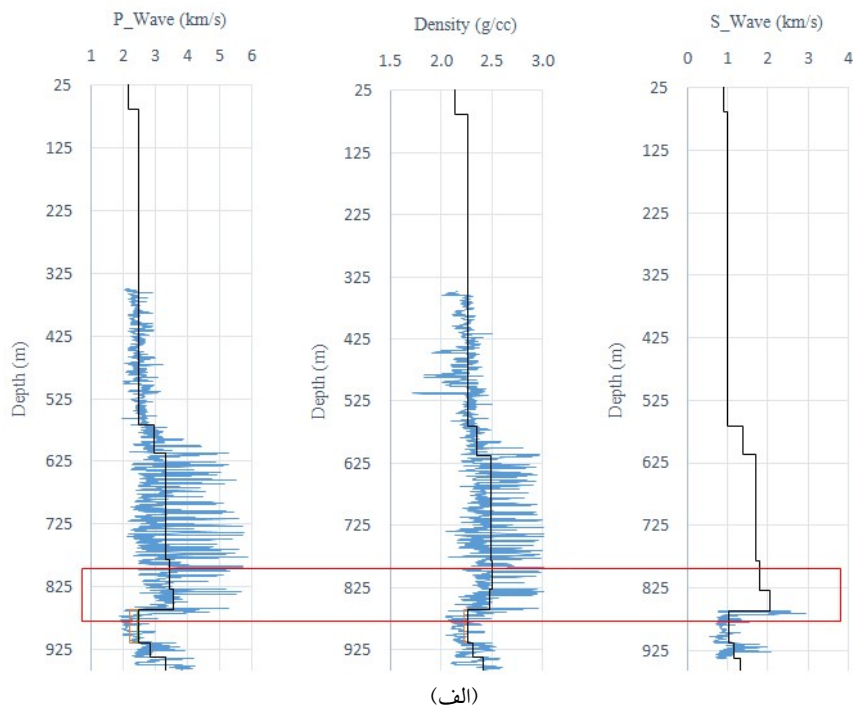
جدول ۳. میانگین سرعت و چگالی به‌کاررفته در مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای

لایه	سرعت موج تراکمی (km/s)	سرعت موج برشی (km/s)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
۱	۲/۱۸۵	۰/۹	۲/۱۴
۲	۲/۴۷۴	۰/۹۹۳	۲/۲۵۹
۳	۲/۹۷۷	۱/۳۶۹	۲/۳۵۰
۴	۳/۳۲۶	۱/۷۱۶	۲/۴۹۱
۵	۳/۴۴۷	۱/۸۰	۲/۵۰۹
۶	۳/۵۸۴	۲/۰۵۵	۲/۴۷۴
۷	-	-	-
بخش نفتی			
بخش آبی	۲/۸۶۶	۱/۱۷۲	۲/۳۶۰
۸	۲/۴۱۹	۱/۳۲۰	۳/۳۲۶

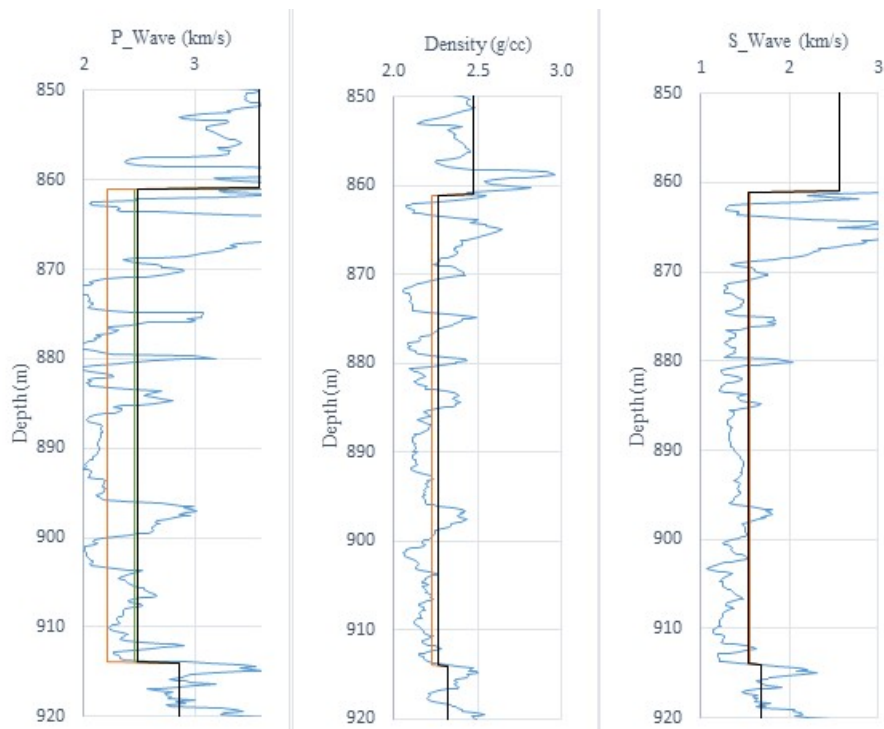
مصنوعی دوبعدی با روش ردیابی پرتو با دورافت صفر ساخته شده است. نتایج مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای برای شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال در شکل ۱۱ و تفاضل بین مقطع لرزه‌ای مصنوعی برای شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در اشباع‌شدگی همگن، افزایش دامنه لرزه‌ای در بخش مخزنی و افزایش زمان سیر در لایه زیرین مخزن به‌وضوح مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۱-ب و ۱۲-الف)، اما چون در اشباع‌شدگی ناهمگن با افزایش اشباع‌شدگی گاز، کاهش سرعت تدریجی است، جانشینی ۳۰ درصد گاز اثر کمی بر دامنه لرزه‌ای داشته است (شکل-های ۱۱-ج و ۱۲-ب)؛ بنابراین لازمه افزایش تغییرات دامنه در اشباع‌شدگی ناهمگن، جانشینی بیشتر گاز است که این موضوع به‌وضوح در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۷. (الف) سرعت موج برشی بعد از جانشینی سیال (رنگ نارنجی) و شرایط برجا (رنگ آبی) (ب) چگالی بعد از جانشینی سیال (رنگ نارنجی) و شرایط برجا (رنگ آبی) (ج) مدل‌های اشباع‌شدگی ناهمگن (رنگ سبز) و همگن (رنگ نارنجی) با استفاده از مدل گسمن بعد از جانشینی سیال و شرایط برجا (رنگ آبی)

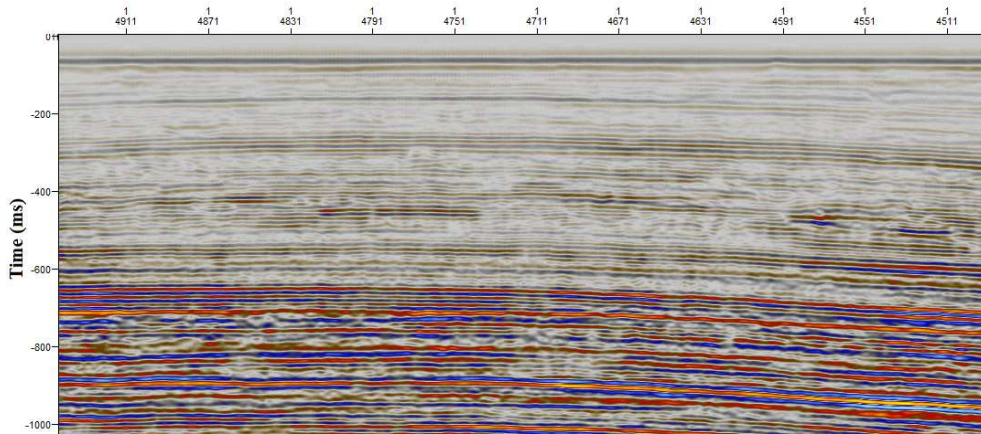


(الف)

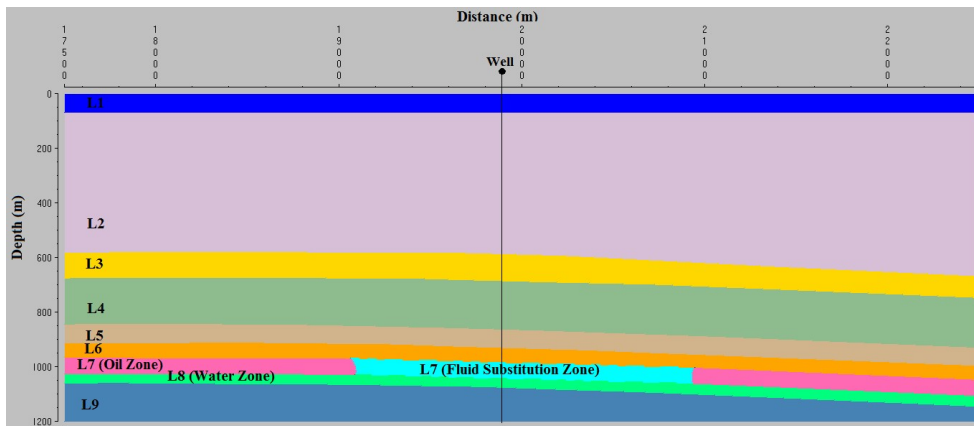


(ب)

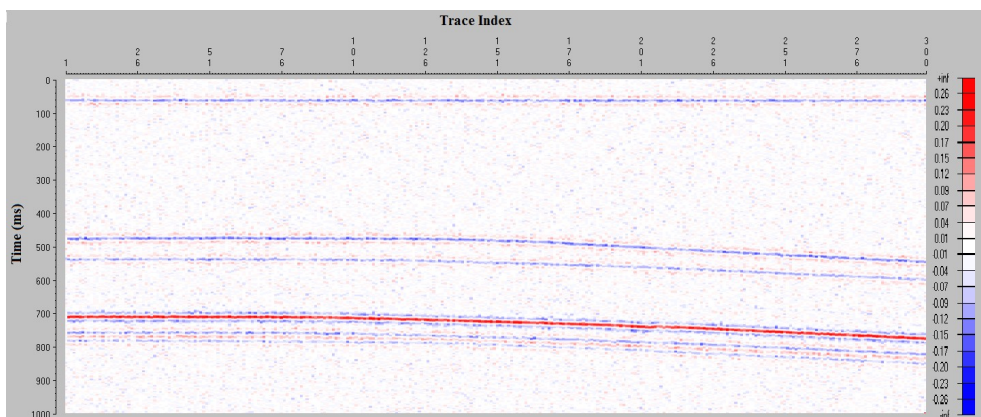
**شکل ۸.** (الف) مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل (خطوط مشکی) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریوی اعمال شده (خطوط نارنجی و سبز) روی نگارهای سرعت موج تراکمی (سمت چپ)، سرعت موج برشی (سمت راست) و چگالی (وسط) اندازه‌گیری شده (منحنی آبی) در محل چاه. روی نگار سرعت موج تراکمی، مدل گسمن برای اشیاع‌شدگی همگن به رنگ نارنجی و برای اشیاع‌شدگی ناهمگن به رنگ سبز است. مستطیل قرمز رنگ مربوط به بزرگ‌نمایی بازه عمقی ۸۵۰-۹۲۰ متری در شکل ۸ (ب) است. (ب) بزرگ‌نمایی مدل‌های بلوک‌بندی شده شکل ۸ (الف) در بازه عمقی ۸۵۰ تا ۹۲۰ متری، با کوچک کردن محدوده مقادیر سرعت و چگالی نشان داده شده است.



شکل ۹. مقطع لرزه‌ای واقعی

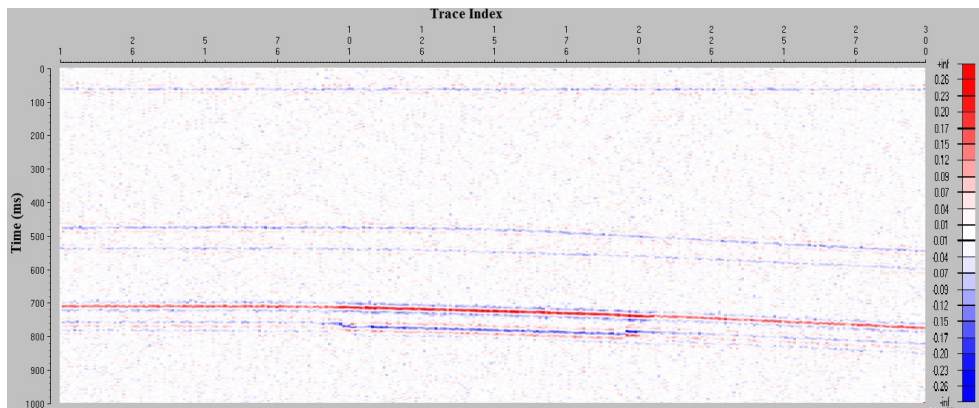


شکل ۱۰. مدل زمین‌شناسی مورد استفاده در مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای. در این مدل مشخصات هر لایه که شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی است، از جداول ۳ و ۴ استخراج شده است. در لایه ۷ که مربوط به بخش نفتی مخزن است، به‌منظور مشاهده بهتر تغییرات ایجاد شده در جانشینی سیال، گستره جانبی با عرض کمتر از ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

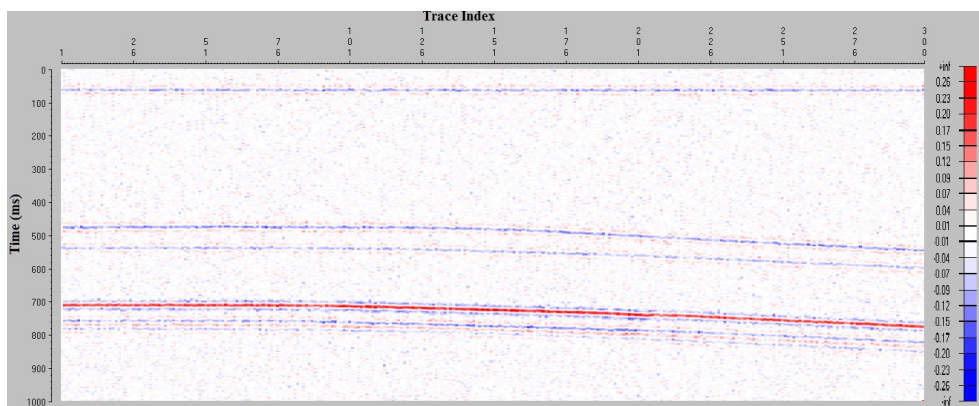


(الف)

شکل ۱۱. (الف) مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته‌شده در شرایط برجا، (ب) مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته‌شده مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن بعد از جانشینی سیال، (ج) مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته‌شده مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن بعد از جانشینی سیال.

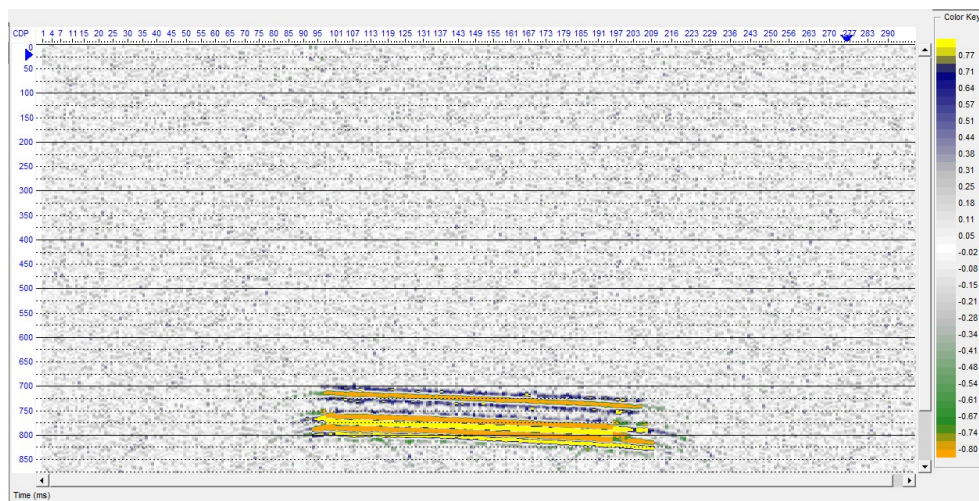


(ب)



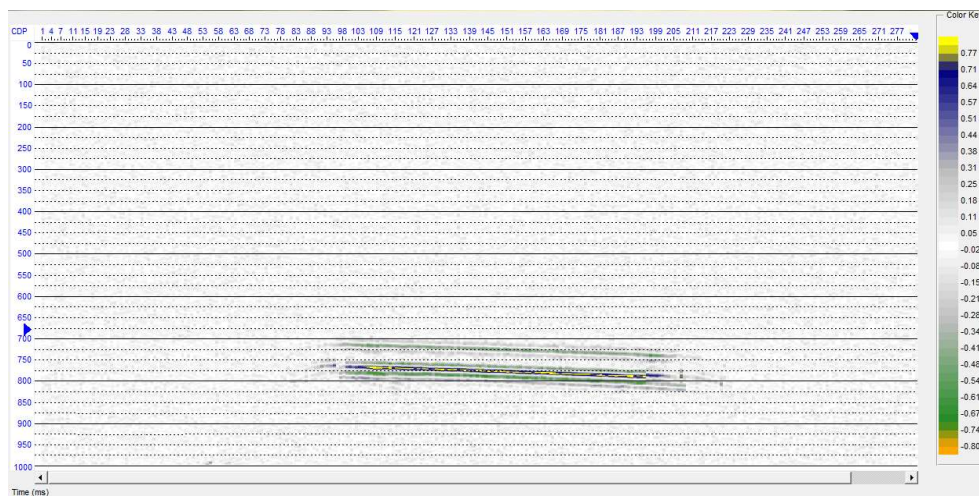
(ج)

ادامه شکل ۱۱.



(الف)

شکل ۱۲. (الف) تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن. (ب) تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع‌شدگی.



(ب)

ادامه شکل ۱۲.

قابل توجهی در دامنه لرزه‌ای شده، اما این تغییر دامنه در اشباع‌شدگی ناهمگن کم است؛ بنابراین با توجه به اینکه اشباع‌شدگی واقعی می‌تواند در بازه بین اشباع-شدگی همگن و ناهمگن قرار گیرد، با جانشینی دست‌کم ۳۰ درصدی گاز، امکان عملیات لرزه‌نگاری مجدد در میدان وجود خواهد داشت.

## منابع

فریدونی، ب.، ۱۳۹۴، مقایسه پاسخ مدل‌های فیزیک سنگ جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای به تغییرات سیال یکی از مخازن نفتی ماسه‌ای ایران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Batzle, M., and Wang, Z., 1992, Seismic properties of pore fluids: *Geophysics*, **57**(11), V1396–V1408.

Berryman, J. G., and Milton, G. W., 1991, Exact results for generalized Gassmann's equation in composite porous media with two constituents: *Geophysics*, **56**(12), V1950–V1960.

Berryman, J. G., 1995, Mixture theories for rock properties: in Ahrens, T. J. (ed.), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*, American Geophysical Union, **3**, 205-228.

## ۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله که به منظور بررسی امکان لرزه‌نگاری مجدد یکی از مخازن ماسه‌سنگی ایران انجام شده است، نتایج زیر حاصل شد:

نتایج محاسبه مدول‌های حجمی و برشی سنگ خشک با دو مدل گسمن و مدل هرترز-میندلین (با استفاده از حد پایین هشین-اشتریکمن) مشابه است؛ بنابراین با توجه به شرایط مخزن به لحاظ تحکیم‌نیافتن و سیمان‌شدگی جزئی می‌توان از هر یک از دو مدل استفاده کرد.

به منظور انتخاب سناریوی جانشینی سیال، تغییرات دامنه لرزه‌ای به‌ازای تغییر درجه اشباع‌شدگی گاز از ۰ تا ۱۰۰٪ محاسبه و با توجه به بیشترین مقدار تغییر دامنه لرزه‌ای در اشباع‌شدگی ۳۰٪ گاز، این سناریو برای جانشینی سیال انتخاب شده است. با در نظر گرفتن این سناریو، تغییرات سرعت موج تراکمی در مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن بیش از ۱۷ درصد، در مدل هرترز-میندلین (با استفاده از حد پایین هشین-اشتریکمن) حدود ۱۳ درصد و در اشباع‌شدگی ناهمگن حدود ۳ درصد است. براساس نتایج مدل‌سازی پیش‌رو لرزه‌ای نیز جانشینی ۳۰ درصد گاز در اشباع‌شدگی همگن، باعث تغییرات



- International Journal of Greenhouse Gas Control, **36**, V66-V77.
- Kazemeini, H., Julin, C., and Fomel, S., 2010, Monitoring CO<sub>2</sub> response on surface seismic data; a rock physics and seismic modeling feasibility study at the CO<sub>2</sub> sequestration site, Ketzin, Germany: Journal of Applied Geophysics, **71**, V109-V124.
- Mavko, G., Chan, C., and Mukerji, T., 1995, Fluid substitution: estimating changes in VP without knowing VS: Geophysics, **60**(6), V1750-V1755.
- Mavko, G., and Mukerji, T., 1998, Bounds on low-frequency seismic velocities in partially saturated rocks: Geophysics, **63**(3), V918-V924.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, 2009, The Rock Physics Handbook: Cambridge University Press.
- Milovac, J., 2009, Rock physics modeling of an unconsolidated sand reservoir: M.Sc. Thesis, University of Houston.
- Misaghi, A., Negahban, S., Landaro, M., and Javaherian, A., 2010, A comparison of rock physics models for fluid substitution in carbonate rocks: Journal of Exploration Geophysics, **41**(2), V146-V154.
- Reine, C., 2015, A rock-physics tutorial: Discovering a supermodel: GeoConvention 2015, New Horizons; [http://www.geoconvention.com/archives/2015/368\\_GC2015\\_A\\_rock-physics\\_tutorial.pdf](http://www.geoconvention.com/archives/2015/368_GC2015_A_rock-physics_tutorial.pdf).
- Sengupta, M., and Mavko, G., 2003, Impact of flow-simulation parameters on saturation scales and seismic velocity: Journal of Geophysics, **68**, 1267-1280, accessed July 2003; <http://geophysics.geoscienceworld.org/content/68/4/1267>.
- Smith, T., Sondergeld, C., and Rai, C., 2003, Gassmann fluid substitutions: A tutorial: Geophysics, **68**(2), V430-V440.
- Zhang, Z., McConnell, D., and Han, D., 2012, Rock physics-based seismic trace analysis of unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas in Green Canyon 955, Northern Gulf of Mexico: Marine and Petroleum Geology, **34**(1), V119-V133.
- Zhu, X., McMechan, G. A., 1990, Direct estimation of the bulk modulus of the frame in fluid saturated elastic medium by Biot Theory: 60th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 787-790.
- Berryman, J. G., 1999, Origin of Gassmann's equations: Geophysics, **64**(5), V1627-V1629.
- Chi, X., and Han, D., 2009, Lithology and fluid differentiation using a rock physics template: Journal of The Leading Edge, **28**, 1424-1428, accessed 13 June 2017; [http://rpl.uh.edu/papers/0901\\_LeadingEdge\\_Xingang.pdf](http://rpl.uh.edu/papers/0901_LeadingEdge_Xingang.pdf).
- Domenico, S. N., 1976, Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir: Geophysics, **41**(5), 882-894.
- Eid, R., Ziolkowski, A., Naylor, M., and Pickup, G., 2014, The detectability of free-phase migrating CO<sub>2</sub>: A rock physics and seismic modelling feasibility study: Journal of Energy Procedia, **63**, 4449-4458, accessed 13 June 2017; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214022954>.
- Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poröser medie. Vier. der Natur: Gesellschaft in Zürich, **96**, 1-23, The English translation is available at: <http://sepwww.stanford.edu/sep/berryman/PS/gassmann.pdf>.
- Grana, D., Verma, S., Podgorney, R., 2016, Rock physics modeling for the potential FORGE site on the Eastern Snake River Plain, Idaho, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 22-24; <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2016/Grana.pdf>.
- Han, D., Batzle, M., 2004, Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities: Journal of Geophysics, **69**, 398-405, accessed April-March 2004; <http://geophysics.geoscienceworld.org/content/69/2/398>.
- Hashin, Z., Shtrikman, S., 1963, A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, **11**(2), V127-140.
- Hill, R., 1963, Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, **11**(5), V357-V372.
- Huang, F., Juhlin, C., Kempka, T., Norden, B., and Zhang, F., 2015, Modeling 3D time-lapse seismic response induced by CO<sub>2</sub> by integrating borehole and 3D seismic data—A case study at the Ketzin pilot site, Germany:

## Fluid substitution and seismic forward modeling in one of the Iranian sandstone oil reservoirs

Bahareh Fereidooni<sup>1</sup>, Ali Moradzadeh<sup>2\*</sup>, and Amin Roshandel Kahoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*M. Sc. graduate in Petroleum Exploration Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran*

<sup>2</sup>*Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

<sup>3</sup>*Associated Professor, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran*

(Received: 18 August 2018, Accepted: 14 May 2019)

### Summary

Changes in seismic signal properties related to the production of hydrocarbon, substituted fluid and reservoir conditions, suggest the seismic reacquisition for monitoring of the hydrocarbon fields during the injection scenarios. Due to the fact that many Iranian hydrocarbon reservoirs are in their second half of the production life, this possibility must be investigated at certain time intervals (in order to carry out 4D seismic survey). Therefore, the rock physics model is constructed using the petrophysical data to calculate the elastic properties of the rock and then, using seismic forward modeling, the calculated elastic properties are related to seismic properties of the reservoir. Finally, the possibility of the seismic reacquisition will be examined based on the seismic properties changes in the reservoir. In this paper which investigates one of the Iranian sandstone oil reservoirs, two rock physics models of Gassmann and the Hertz-Mindlin using the lower limit of Hashin-Shtrikman were used to calculate the elastic properties of the dry rock. Regarding the most significant changes in the seismic amplitude, replacing 30% of oil with gas is considered as a selected scenario for fluid substitution. Compared to the in-situ conditions, after replacing the fluid, the Gassmann model with homogeneous saturation and the Hertz-Mindlin using the lower limit of Hashin-Shtrikman show compressive wave velocity reduction of 17% and 13%, respectively, while the reduction of compression wave velocity in heterogeneous saturation is about 3%. The results of seismic forward modeling show that if the distribution of fluid in the reservoir is homogeneous and about 30% gas is substituted by oil, the change of seismic signal in the reservoir and the time delay created in the underlying reservoir layers will be observable and seismic monitoring will be applicable. However, if the distribution of the fluid is heterogeneous, this will be possible by replacing more oil with gas.

**Keywords:** rock physics, fluid substitution, 4D seismic survey, seismic forward modeling

---

\*Corresponding author:

a\_moradzadeh@ut.ac.ir