



مدل سازی فیزیک سنگی در مخازن ماسه سنگی - مروری بر مدل های نظری و یک مثال کاربردی

محمد امامی نیری*

استادیار؛ انستیتو مهندسی نفت، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۶/۰۵/۱۵؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰

چکیده

مدل سازی فیزیک سنگی امکان مطالعه اثر تغییرات تخلخل، لیتولوژی، اشباع سیال و سایر خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن بر روی پاسخ های لرزه ای و خواص کشسانی سنگ را فراهم می کند. از این مدل ها برای تفسیر کمی داده های لرزه ای، مطالعات ژئومکانیکی مخزن و ساخت مدل های مخزنی مقید به داده های چاه و لرزه استفاده می شود. مدل های نظری فیزیک سنگی را می توان به پنج گروه عمده مدل های تماسی/محیط دانه ای و مدل های میانباری، مدل های محاسباتی، حدود فیزیک سنگی و جایگزینی ها طبقه بندی نمود. در این مقاله، مروری بر سه مدل مهم و کلیدی فیزیک سنگ لرزه ای از گروه مدل های محیط دانه ای انجام می شود که برای مطالعه و بررسی ارتباط فیزیکی مابین نشانگرهای لرزه ای و خواص سنگ و سیال در رسوبات آواری و مخازن ماسه سنگی بکار می روند. این مدل ها عبارتند از: مدل ماسه سست، مدل سیمان-تماسی و مدل سیمان-ثابت. ابتدا مبانی نظری توسعه این مدل ها بیان شده و سپس مثالی از کاربرد و اعمال مدل سازی فیزیک سنگ به کمک مدل های معرفی شده در یک مطالعه موردی واقعی بر روی یک مخزن ماسه سنگی نشان داده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که از بین سه مدل اعمال شده، مقدار میانگین خطای مطلق مربوط به تخمین های حاصل از مدل سیمان-ثابت بسیار پایین تر از مقادیر مربوط به تخمین های حاصل از مدل های ماسه سست و سیمان-تماسی است که بیانگر تطابق بهتر تخمین های حاصل از این مدل با داده های اندازه گیری شده است؛ بنابراین می توان از مدل سیمان-ثابت به عنوان یک مدل فیزیک سنگی مناسب در تفسیر کمی داده های لرزه ای و سرشت نمایی و پایش مخزن در میدان مورد بحث در این پژوهش استفاده نمود.

واژگان کلیدی

فیزیک سنگ
مدل های محیط دانه ای
مدول های کشسانی
سرعت لرزه ای
خواص پتروفیزیکی

۱. پیش گفتار

در مدل سازی خواص سنگ و سیال یک مخزن، معمولاً انواع مختلفی از داده ها از قبیل داده های لرزه ای و نگارهای چاه مورد استفاده قرار می گیرند؛ اما اغلب این داده ها، اندازه گیری های مستقیم خواص سنگ و سیال لایه های زیرزمین نیستند. به عنوان مثال، داده های لرزه ای اطلاعاتی راجع به تفاوت در خواص کشسانی (سرعت لرزه ای و چگالی) لایه های بالا و پایین پهنه های مرزی در زیر زمین را به دست می دهد، با این توضیح که خواص کشسانی ذکر شده به خواص سنگ و سیال لایه های زیر زمین بستگی دارند؛ بنابراین داده های لرزه ای تنها یک اندازه گیری غیر مستقیم از خواص سنگ و سیال لایه های

زیر زمین است. به طور مشابه، نگارهای چاه از قبیل نگارهای اشعه گاما، نوترون، چگالی، سونیک و مقاومت نیز اغلب اندازه گیری های غیر مستقیم از خواص سنگ و سیال لایه های زیر زمین می باشند؛ بنابراین جهت تفسیر کمی داده های لرزه ای و چاه نگاری، بایستی یک سری روابط فیزیکی-ریاضیاتی معرفی نماییم تا این اندازه گیری های غیر مستقیم را به خواص سنگ و سیال مورد نظر ربط دهیم (Emami Niri, 2015; Grana, 2016).

فیزیک سنگ در واقع علم مطالعه ارتباط مابین مشاهدات ژئوفیزیکی و خواص فیزیکی سنگ ها است که نقش بسیار مهمی در سرشت نمایی و پایش مخازن نفت و گاز ایفا می کند.

و خواص سنگ و سیال را در مخازن ماسه‌سنگی بررسی می‌کند. بدین منظور، ابتدا ارتباط بین سرعت لرزه‌ای و تخلخل در رسوبات آواری مورد بحث قرار می‌گیرد تا نشان داده شود که شیب روند داده در نمودار سرعت لرزه‌ای-تخلخل چگونه توسط فرآیندهای زمین‌شناسی (در رسوبات آواری) کنترل می‌گردد. سپس مروری بر مبانی نظری و نحوه توسعه سه مدل فیزیک‌سنگی متداول در مدل‌سازی مخازن ماسه‌سنگی انجام می‌گردد. در انتها به عنوان یک مثال کاربردی، مدل‌های معرفی شده بر روی داده‌های چاه‌نگاری یک مخزن ماسه‌سنگی با تخلخل بالا اعمال می‌گردد.

۲. ارتباط سرعت لرزه‌ای و تخلخل در رسوبات آواری

مدول حجمی، مدول برشی و چگالی کپه‌ای^۶ سنگ وابستگی زیادی به محتوای کانی و میزان تخلخل سنگ دارد. با معلوم بودن تخلخل، ترکیب کانی‌شناسی و مدول‌های کشسانی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، در بهترین حالت تنها می‌توان حدود بالایی و پایینی سرعت‌های لرزه‌ای سنگ را تخمین زد (Avseth et al., 2010).

ساده‌ترین حدود فیزیکی تعریف شده در علم فیزیک‌سنگ، حدود وُیت (Voigt) و رُویس (Reuss) می‌باشند. حد بالایی وُیت برای مدول‌های کشسانی مؤثر، میانگین حسابی مدول‌های کشسانی N جزء تشکیل‌دهنده فاز جامد سنگ است (Voigt, 1928):

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (1)$$

در این رابطه، f_i درصد حجمی و M_i مدول کشسانی (حجمی یا برشی) i امین جزء تشکیل‌دهنده می‌باشند. در واقعیت امکان اینکه کانی‌های مختلف یک سنگ طوری ترکیب شوند که سنگ از نظر کشسانی سخت‌تر از میانگین حسابی مدول‌های کشسانی اجزاء تشکیل‌دهنده باشد وجود ندارد. حد پائینی رُویس برای مدول‌های کشسانی مؤثر، میانگین هارمونیک

مدل‌های فیزیک‌سنگی می‌توانند یک سری روابط تجربی بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی (Castagna, 1985) و (Han et al., 1986; Grrenberg & Castagna, 1992) یا به صورت مدل‌های نظری توسعه یافته بر اساس فیزیک و وضعیت ریز ساختار رسوبات (Gal 1998; Kuster & Tokoz, 1974; Berryman 1995) باشند. محققین متعددی خواص لرزه‌ای سنگ‌ها را مطالعه کرده و روابط تجربی و نظری مهمی مابین پارامترهای کشسانی سنگ و خواص مخزنی از قبیل تخلخل و محتوای رس، دیاژنز، لیتولوژی، سیال حفره‌ای و فشار توسعه داده‌اند (Mavko et al., 2009). مدل‌های نظری فیزیک‌سنگی را می‌توان به پنج گروه عمده مدل‌های تماسی/محیط دانه‌ای^۱ و مدل‌های میانباری^۲، مدل‌های محاسباتی^۳، حدود فیزیک‌سنگی^۴ و جایگزینی‌ها^۵ طبقه‌بندی نمود. در توسعه مدل‌های محیط دانه‌ای، یک سنگ متخلخل یک آرایش تصادفی از دانه‌های کروی فرض می‌شود، به نحوی که دانه‌های سنگ در تماس با یکدیگر هستند. در توسعه مدل‌های میانباری فرض بر این است که سنگ با جای گرفتن میانبارها (به عنوان مثال حفره‌ها) در ماتریکس جامد سنگ تشکیل شده است. در مدل‌های محاسباتی، ریز ساختار و وضعیت هندسی قرارگیری دانه و حفره نسبت به هم توسط تصویربرداری سی‌تی‌اسکن یا مقاطع نازک تعیین می‌گردد. حدود فیزیک‌سنگی، در حقیقت حد بالایی و حد پائینی مقادیر پارامترهای کشسانی سنگ را، بدون هیچ‌گونه فرضی در مورد وضعیت هندسی دانه‌ها و فضاهای خالی، به دست می‌دهد. در نهایت جایگزینی‌ها شامل مدل‌هایی مانند مدل گاسمن برای جایگزینی سیال در فضای حفره‌ای سنگ است که معمولاً عاری از هرگونه فرضی در مورد بافت هندسی سنگ است (Grana, 2016; Avseth et al., 2000).

به کمک علم فیزیک‌سنگ، مدل‌های مختلفی توسعه یافته‌اند؛ مدل‌های توصیف‌کننده ارتباط بین تخلخل-سرعت لرزه‌ای، تخلخل-تراوایی، اشباع سیال-مقاومت و غیره. در این مقاله، تمرکز اصلی بر روی گروهی از مدل‌های فیزیک‌سنگی است که ارتباط فیزیکی ما بین نشانگرهای کشسانی (لرزه‌ای)

¹Contact/Granular media models

²Inclusion models

³Computational models

⁴Bounds

⁵Transformations

⁶Bulk Density

در روابط بالا K_{max} و G_{max} به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی بیشینه و K_{min} و G_{min} به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی کمینه می‌باشند. برای یک ترکیبی از دو جزء مختلف (به‌عنوان مثال ترکیب دو کانی مختلف یا ترکیب یک کانی و یک سیال)، مدول کشسانی مؤثر بین حدود بالایی و پایینی قرار می‌گیرد؛ اما تخمین دقیق‌تر مدول کشسانی مؤثر و خواص لرزه‌ای سنگ نیازمند دانستن جزئیات هندسی بافت سنگ شامل چگونگی قرارگیری دانه‌ها و حفره‌های سنگ نسبت به یکدیگر است. مدل‌های فیزیک‌سنگی متعددی وجود دارد که در توسعه آن‌ها فرض‌هایی برای وضعیت ریزساختار و بافت هندسی سنگ در نظر گرفته شده است. این مدل‌های فیزیک‌سنگی به دو گروه مختلف طبقه‌بندی می‌شوند: مدل‌های تماسی/ محیط دانه‌ای و مدل‌های میانباری.

در مدل‌های محیط دانه‌ای عموماً یک سنگ متخلخل یک آرایش تصادفی از دانه‌های کروی فرض می‌شود، به‌نحوی که دانه‌های سنگ در تماس با یکدیگر هستند (Mindlin, 1949)؛ اما رسوبات معمولاً زمانی که تحت تأثیر تراکم مکانیکی و شیمیایی قرار گیرند سفت و محکم شده و از میزان دانه‌ای بودن فاز جامد سنگ کاسته می‌شود که این در حالت مدل‌های میانباری برای مدل‌سازی فیزیک‌سنگ مناسب‌تر می‌باشند. در مدل‌های میانباری فرض بر این است که سنگ خشک با جای گرفتن میانبارها در ماتریکس جامد سنگ تشکیل شده است (Norris, 1985; Zimmerman, 1991).

در شکل ۱ سرعت موج تراکمی برحسب تخلخل برای تعدادی از نمونه‌های اشباع از آب نشان داده شده است. در این شکل حدود ویت و روئیس نیز برای ترکیبی از کوارتز و آب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه و رسم شده‌اند. قبل از نهشته شدن، رسوبات به‌صورت ذرات کوارتز شناور در آب می‌باشند. انتظار می‌رود در حالت شناوری، مدول‌های حجمی و برشی ترکیب بر روی حد روئیس قرار گیرند، چراکه میانگین روئیس سست‌ترین حالت ترکیب دو جزء مختلف است. زمانی که رسوبات در کف آب نهشته می‌شوند از آنجا که هنوز رسوبات سست و نرم هستند انتظار می‌رود خواص کشسانی همچنان خیلی نزدیک به حد روئیس قرار گیرند (Hamilton, 1956). تخلخل در زمان نهشته شدن با توزیع اندازه دانه‌ها که اصطلاحاً

مدول‌های کشسانی N جزء تشکیل‌دهنده فاز جامد سنگ است (Reuss, 1929):

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (2)$$

در واقعیت امکان اینکه کانی‌های مختلف یک سنگ طوری ترکیب شوند که سنگ از نظر کشسانی سست‌تر از میانگین هارمونیک مدول‌های کشسانی اجزاء تشکیل‌دهنده باشد وجود ندارد. نوع دیگری از حدود فیزیکی تعریف‌شده در علم فیزیک‌سنگ برای یک ترکیب کشسانی و همسانگرد، حدود هشین-اشتریکمن است (Hashin & Strikman, 1963). درواقع حدود هشین-اشتریکمن باریکترین بازه ممکن مدول کشسانی در حالتی که وضعیت هندسی بافت سنگ نامعین باشد را به دست می‌دهد. حدود بالایی و پایینی هشین-اشتریکمن، اولین بار برای یک ترکیبی از دو جزء مختلف ارائه گردید که در سال ۱۹۹۵ توسط بری‌من به فرم روابط زیر بسط داده شده‌اند (Berryman, 1995).

حد بالایی هشین-اشتریکمن برای مدول‌های حجمی (K) و برشی (G) مؤثر، برای ترکیبی از N جزء مختلف تشکیل‌دهنده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{HS+} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i + \frac{4}{3} G_{max}} \right)^{-1} - \frac{4}{3} G_{max} \quad (3)$$

$$G_{HS+} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{G_i + \frac{G_{max} 9K_{max} + 8G_{max}}{6 K_{max} + 2G_{max}}} \right)^{-1} - \frac{G_{max} 9K_{max} + 8G_{max}}{6 K_{max} + 2G_{max}} \quad (4)$$

حد پایینی هشین-اشتریکمن برای مدول‌های کشسانی مؤثر، به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$K_{HS-} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i + \frac{4}{3} G_{min}} \right)^{-1} - \frac{4}{3} G_{min} \quad (5)$$

$$G_{HS-} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{G_i + \frac{G_{min} 9K_{min} + 8G_{min}}{6 K_{min} + 2G_{min}}} \right)^{-1} - \frac{G_{min} 9K_{min} + 8G_{min}}{6 K_{min} + 2G_{min}} \quad (6)$$

زمین‌شناسی کنترل‌کننده تخلخل معین می‌گردد. اگر کاهش تخلخل حاصل تراکم و فرآیندهای دیاژنزی از قبیل سیمان‌شدگی باشد شاهد شیب تندتری در روند سرعت-تخلخل خواهیم بود، اما اگر کاهش تخلخل حاصل تغییر در میزان جورشدگی سنگ و نهشته شدن مواد جامد در محلی غیر از محل تماس دانه‌ها باشد، روندی با شیب کم در ارتباط بین سرعت-تخلخل مشاهده خواهد شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در رسوبات آواری، اثر سیمان‌شدگی بر روی میزان سختی سنگ بیشتر از اثر جورشدگی است (Avseth et al., 2000; Saul, 2014).

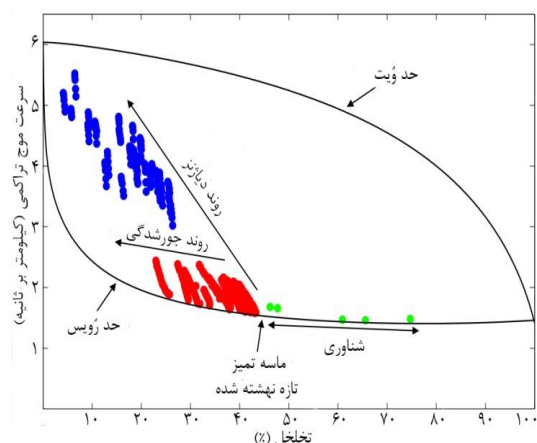
۳. مدل‌های نظری فیزیک‌سنگی در ماسه‌سنگ‌ها

در این بخش، سه مدل نظری فیزیک‌سنگی محیط دانه‌ای که رفتار سرعت-تخلخل را در ماسه‌سنگ‌هایی با میزان تخلخل متوسط به بالا توصیف می‌کنند مرور می‌شود.

۱.۳ مدل ماسه سست

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است مدل ماسه سست^۷، یک مدل نظری فیزیک‌سنگی برای ماسه‌های با تخلخل بالا است که چگونگی تغییرات رابطه سرعت-تخلخل را برحسب میزان جورشدگی سنگ (در یک فشار مؤثر معین) توصیف می‌کند (Dvorkin & Nur, 1996). در این مدل در تخلخل حدی، یک آرایش تصادفی از دانه‌های کروی هم‌اندازه (جورشدگی بالا) مفروض است که نقطه انتهایی مدل را معین می‌کند. کاهش تخلخل از میزان تخلخل حدی، حاصل ضعیف‌تر شدن وضعیت جورشدگی دانه‌ها در نتیجه نهشته شدن مواد جامد در محلی به غیر از محل تماس دانه‌ها است. مدول‌های حجمی (K_{HM}) و برشی (G_{HM}) مؤثر نمونه‌ی سنگی خشک در تخلخل حدی با استفاده از تئوری تماس-دانه هرتز-میندلین (Mindlin, 1949) با فرض اینکه ماسه‌سنگ یک آرایش تصادفی از دانه‌های کروی همسان و تحت تأثیر فشار مؤثر P (برحسب GPa) است محاسبه می‌شود:

جورشدگی دانه‌ها خوانده می‌شود کنترل می‌شود، به نحوی که رسوبات دارای جورشدگی بالا تخلخل اولیه بالاتری دارند. این تخلخل اولیه که مربوط به زمان نهشته شدن رسوبات است اصطلاحاً تخلخل حدی (ϕ_c) نامیده می‌شود (Nur et al., 1995). در تخلخل‌های بیشتر از تخلخل حدی، تماس دانه به دانه از بین رفته، سیال متحمل بار می‌شود و سنگ متخلخل به حالت تعلیق یا شناوری^۸ درمی‌آید؛ اما در تخلخل‌های کمتر از تخلخل حدی، تماس دانه به دانه در سنگ وجود داشته و دانه‌های سنگ متحمل بار^۹ هستند. وقتی رسوبات بعد از نهشته شدن، تدفین شوند، فرآیندهای دیاژنزی، تراکم مکانیکی و افزایش فشار باعث کاهش تخلخل و افزایش مدول‌های کشسانی و سرعت‌های لرزه‌ای می‌شود (Avseth et al., 2010).



شکل ۱. سرعت موج تراکمی بر حسب تخلخل برای تعدادی از نمونه‌های ماسه‌سنگی اشباع از آب و مقایسه آن با حدود ویت و روئیس. نقاط آبی رنگ مربوط به نمونه‌های ماسه‌سنگی سخت (Han et al., 1986) نقاط قرمز رنگ مربوط به ماسه‌سنگ‌های سیمان نشده (Zimmer 2003) و نمونه‌های سبز رنگ داده‌های مربوط به حالت شناوری Hamilton (1956) می‌باشند.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، شیب روند داده در نمودار سرعت-تخلخل تا حد زیادی توسط فرآیندهای

⁷ Suspension

⁸ Load-bearing

⁹ Friable-Sand model

دیگر، در نقطه آغازین مدل (تخلخل صفر) مدول های کشسانی سنگ برابر مدول های کشسانی فاز جامد سنگ (G_m و K_m) در نظر گرفته می شود. سپس برای مقادیر تخلخل مؤثر بین تخلخل صفر و تخلخل حدی، جهت محاسبه مدول های کشسانی سنگ خشک، مابین نقاط آغازین و پایانی مدل با استفاده از حد تصحیح شده پائینی هشین-اشتریکمن درون یابی انجام می گیرد:

$$K_{HM} = \left[\frac{n^2(1 - \phi_c)^2 G_m^2}{18\pi^2(1 - v_m)^2} P \right]^{1/3} \quad (7)$$

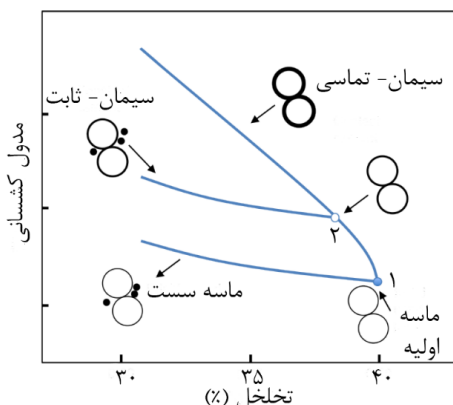
$$G_{HM} = \frac{5 - 4v_m}{5(2 - v_m)} \left[\frac{3n^2(1 - \phi_c)^2 G_m^2}{2\pi^2(1 - v_m)^2} P \right]^{1/3} \quad (8)$$

در روابط بالا، ϕ_c تخلخل حدی، n عدد هم آرای (متوسط تعداد نقاط تماس بین دانه های یک سنگ)، G_m و v_m به ترتیب مدول برشی و نسبت پواسن فاز جامد سنگ می باشند. از طرف

$$K_{dry} = \left[\frac{\phi/\phi_c}{K_{HM} + \frac{4G_{HM}}{3}} + \frac{1 - (\phi/\phi_c)}{K_m + \frac{4G_{HM}}{3}} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{HM} \quad (9)$$

$$G_{dry} = \left[\frac{\phi/\phi_c}{G_{HM} + Z} + \frac{1 - (\phi/\phi_c)}{G_m + Z} \right]^{-1} - Z \quad (10)$$

$$Z = \frac{G_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}} \right) \quad (11)$$



شکل ۱. نمودار شماتیک برای سه مدل نظری فیزیک سنگ برای ماسه سنگ هایی با میزان تخلخل بالا. ضخیم تر شدن خطوط دایره نشان دهنده اضافه شدن سیمان بر روی سطوح دانه ها است. شکل از منبع (Avseth et al., 2010) باز ترسیم شده است.

۲.۳ مدل سیمان-تماسی

سیمان دقیقاً در محل تماس دانه ها نهشته شده است به دست آورد. در این مدل ابتدا فرض می شود که ماسه سیمان شده یک ترکیب تصادفی از دانه های کروی یکسان ماسه است که با اضافه شدن سیمان به دانه های ماسه تخلخل کاهش و مدول های کشسانی مؤثر سنگ افزایش می یابد. سپس مدول های حجمی و برشی سنگ خشک از روابط زیر به دست می آیند (Dvorkin & Nur, 1996):

طی فرایند تدفین رسوبات، در محل تماس دانه های ماسه، سیمان می تواند تشکیل شود. این سیمان ممکن است از جنس کوارتز، کلسیت، آلبیت و یا از جنس کانی های دیگر باشد، بنابراین می تواند دارای خواص کشسانی متفاوت با دانه های ماسه باشد. عموماً سیمان شدگی باعث سختی مضاعف ماسه سنگ ها می شود، چراکه باعث چسبندگی بیشتر دانه های ماسه به هم می شود. در مدل فیزیک سنگی ماسه سیمان شده می توان مدول های کشسانی سنگ خشک را با این شرط که

دانه‌ها و v_m و v_c به ترتیب نسبت پواسن دانه‌ها و سیمان می‌باشند. مقدار سیمان در محل تماس دانه‌ها با استفاده از پارامتر α تعیین می‌شود که عبارت است از نسبت شعاع لایه سیمان (A) به شعاع دانه (R):

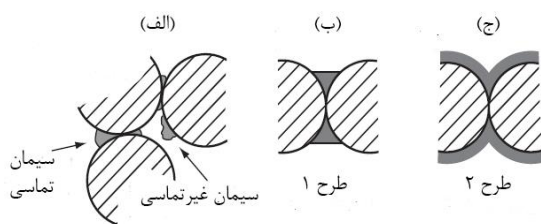
$$\alpha = \frac{A}{R} \quad (26)$$

شعاع لایه سیمان (A) الزاماً برابر با مقدار کل سیمان نیست، قسمتی از سیمان ممکن است در محلی غیر از محل تماس دانه‌ها نهشته شود (شکل ۳ الف). با این وجود، با فرض اینکه کاهش تخلخل در ماسه‌ها تنها به دلیل سیمان شدگی است و با در نظر گرفتن طرح‌های شماتیک معین برای نحوه نهشته شدن سیمان در محل تماس دانه‌ها می‌توان پارامتر α را به تخلخل ماسه سیمان شده نسبت داد. به عنوان مثال در شکل ۳ ب (طرح شماتیک ۱) فرض می‌شود که تمام سیمان در محل تماس دانه‌ها نهشته شده که در این حالت پارامتر α طبق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = 2 \left[\frac{\phi_c - \phi}{3n(1 - \phi_c)} \right]^{1/4} \quad (27)$$

همچنین در شکل ۳ ج (طرح شماتیک ۲) فرض می‌شود که لایه‌های سیمان به‌طور یکنواخت روی سطوح دانه‌های ماسه نهشته شده است که در این حالت پارامتر α با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = 2 \left[\frac{2(\phi_c - \phi)}{3n(1 - \phi_c)} \right]^{1/2} \quad (28)$$



شکل ۲. الف) طرح شماتیک انواع نهشته شدن سیمان در رسوبات آواری، ب) تمام سیمان در محل تماس دانه‌ها نهشته شده است، ج) لایه‌های سیمان به‌طور یکنواخت روی سطوح دانه‌های ماسه نهشته شده است. شکل از منبع *Mavko et al., (2009)* باز ترسیم شده است.

$$K_{dry} = \frac{1}{6} n(1 - \phi_c) M_c S_n \quad (12)$$

$$G_{dry} = \frac{3}{5} K_{dry} + \frac{3}{20} n(1 - \phi_c) G_c S_\tau \quad (13)$$

$$M_c = \rho_c V_{pc}^2 \quad (14)$$

$$G_c = \rho_c V_{sc}^2 \quad (15)$$

در روابط بالا ϕ_c تخلخل حدی، n عدد هم آرائی، K_c و G_c به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی سیمان و $M_c = K_c + \frac{4}{3} G_c$ مدول تراکمی سیمان است. پارامترهای S_n و S_τ به ترتیب متناسب با سختی نرمال و برشی برای یک ترکیب دو دانه ماسه سیمان شده می‌باشند که به میزان سیمان موجود در محل تماس دانه‌ها و همچنین خواص سیمان و دانه‌های ماسه بستگی دارند:

$$S_n = A_n \alpha^2 + B_n \alpha + C_n \quad (16)$$

$$A_n = -0.024153 \Lambda_n^{-1.3646} \quad (17)$$

$$B_n = 0.20405 \Lambda_n^{-0.89008} \quad (18)$$

$$C_n = 0.00024649 \Lambda_n^{-1.9864} \quad (19)$$

$$S_\tau = A_\tau \alpha^2 + B_\tau \alpha + C_\tau \quad (20)$$

$$A_\tau = -10^{-2} (2.2v^2 + 2.07v + 2.3) \Lambda_\tau^{0.0079v^2 + 0.175v - 1.342} \quad (21)$$

$$B_\tau = (0.057v^2 + 0.0937v + 0.202) \Lambda_\tau^{0.0274v^2 + 0.0529v - 0.8765} \quad (22)$$

$$C_\tau = 10^{-4} (9.654v^2 + 4.945v + 3.1) \Lambda_\tau^{0.001867v^2 + 0.4011v - 1.8186} \quad (23)$$

$$\Lambda_n = \frac{2G_c (1 - v_m)(1 - v_c)}{\pi G_m (1 - 2v_c)} \quad (24)$$

$$\Lambda_\tau = \frac{G_c}{\pi G_m} \quad (25)$$

در روابط بالا K_m و G_m به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی

نمودارهای پتروفیزیکی حاصل از ارزیابی سازند (تخلخل مؤثر، محتوای رس و اشباع آب) است. مجموعه‌ای از داده‌های ورودی در محدوده عمقی موردنظر در شکل ۴ نمایش داده شده است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی قبلی سازند مشخص کرده است که سه واحد ماسه‌سنگی در بین لایه‌های شیلی قرار گرفته‌اند که بر روی شکل ۴ نشان داده شده است. محدوده عمقی لایه ماسه‌سنگی اول ۲۱۲۲ تا ۲۲۹۳ متری، لایه ماسه‌سنگی دوم ۲۳۷۷ تا ۲۴۳۲ و لایه ماسه‌سنگی سوم ۲۷۱۷ تا ۲۷۹۸ متری است. سه لایه ماسه‌سنگی دارای تخلخل حداکثر حدود ۳۳ درصد و کاملاً اشباع از آب می‌باشند.

در این مطالعه در نرم‌افزار متلب (MATLAB)، هر سه مدل فیزیک‌سنگی ماسه سست، سیمان-تماسی و سیمان-ثابت کد نویسی شده و بر روی داده‌های ورودی اعمال گردیده است. با استفاده از نتایج آنالیز مغزه که به صورت گزارش کاملی از شرایط کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و خواص پتروفیزیکی بر روی مغزه‌های موجود از بازه‌های عمقی موردنظر در دسترس بوده است، پارامترهای مورد نیاز مدل‌های فیزیک‌سنگی انتخاب شده است. بر اساس نتایج آنالیز مغزه، در هر سه مدل برای فاز جامد، از مدل ترکیبی دو کانی کوارتز و ایلیت استفاده شده است. همچنین بر اساس نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته در مخازن مشابه ماسه‌سنگی و همچنین روش حساسیت-سنجی، مقدار تخلخل حدی برابر با ۰/۴ و عدد هم آرائی برابر با ۹ انتخاب شده است.

در مدل ماسه سست، بر اساس اطلاعات مخزن، فشار مؤثر برابر با ۳۰ مگاپاسکال استفاده شده است. در مدل سیمان-ثابت مقدار بهینه سیمان برابر با ۲ درصد و در مدل سیمان-تماسی، سیمان از جنس کوارتز با مقادیر معمول مدول‌های حجمی و برشی به ترتیب برابر با ۳۶/۶ و ۴۵ گیگا پاسکال استفاده شده است. در شکل ۵-الف در کل محدوده عمقی حدود ۸۰۰ متر، کراس-پلات سرعت موج تراکمی بر حسب تخلخل نشان داده شده است، بطوریکه مقادیر حجم شیل به صورت بعد سوم با رنگ‌بندی آورده شده است. در شکل ۵-ب، حد برش ۲۵ درصد برای مقادیر حجم شیل در نظر گرفته شده است و نقاط باقی‌مانده محدود به سه لایه ماسه‌سنگی در بازه‌های عمقی مورد نظر است.

همان‌گونه که اشاره شد، رسوب‌گذاری سیمان در محل تماس دانه‌ها، باعث تقویت چسبندگی بین دانه‌های ماسه شده، در نتیجه میزان سختی ماسه‌سنگ افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که اثر سیمان شدگی اولیه در ماسه‌سنگ‌ها حائز اهمیت ویژه‌ای است، بدین صورت که اضافه شدن اولیه یک مقدار جزئی سیمان در محل تماس دانه‌ها، بدون اینکه کاهش آن‌چنانی در تخلخل سنگ ایجاد کند باعث افزایش زیاد در میزان سختی سنگ و در نتیجه در میزان سرعت لرزه‌ای می‌شود. طرح ارائه شده در شکل ۳ ج اساس یک مدل فیزیک‌سنگی متداول تحت عنوان مدل سیمان-تماسی^{۱۰} است که در آن مفروض است که سیمان در محل تماس دانه‌ها، باعث تقویت چسبندگی بین دانه‌ها شده، در نتیجه میزان سختی ماسه‌سنگ و سرعت لرزه‌ای افزایش می‌یابد.

۳.۳ مدل سیمان-ثابت

در مدل فیزیک‌سنگی سیمان-ثابت^{۱۱}، فرض بر این است که ماسه‌ها با میزان جورشدگی متغیر (و در نتیجه میزان تخلخل متغیر) همگی دارای حجم ثابت و معینی از سیمان در محل تماس دانه‌ها هستند و کاهش تخلخل تنها به دلیل قرار گرفتن مواد پرکننده فضای حفره‌ای در محلی به غیر از محل تماس دانه‌ها است (Avseth et al., 2000).

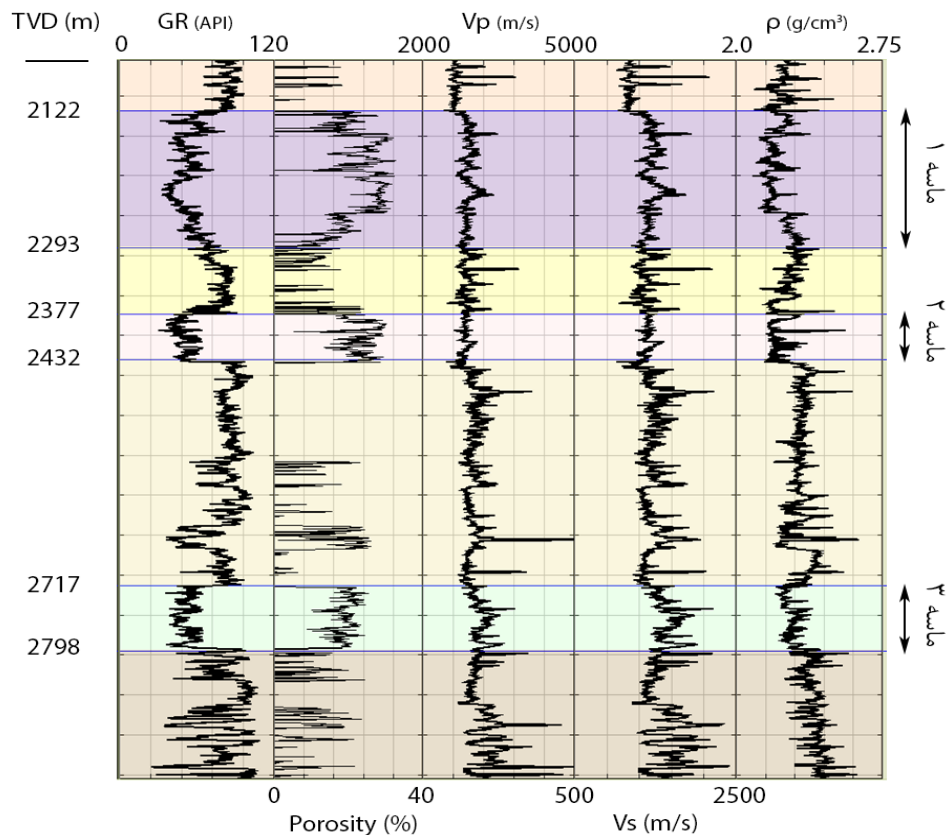
از نظر ریاضیاتی، این مدل ترکیبی از مدل‌های فیزیک‌سنگی سیمان-تماسی و ماسه-سست است، بدین صورت که ابتدا به دلیل رسوب‌گذاری سیمان در محل تماس دانه‌ها، تخلخل از میزان تخلخل حدی (\emptyset_c) (نقطه ۱ در شکل ۲) به میزان تخلخل \emptyset_2 (نقطه ۲ در شکل ۲) کاهش می‌یابد، سپس به دلیل نهشته شدن مواد جامد در محلی غیر از محل تماس دانه‌ها و همچنین بر هم خوردن میزان جورشدگی دانه‌ها، تخلخل از میزان تخلخل \emptyset_2 کاهش می‌یابد.

۴. مثال کاربردی

در این بخش، مثالی از کاربرد و اعمال مدل‌سازی فیزیک‌سنگ در یک مطالعه موردی واقعی بر روی یک مخزن آواری نشان داده شده است. داده‌های ورودی شامل داده‌های چاه‌نگاری (نمودارهای چگالی، سرعت موج P و سرعت موج S) و

¹⁰ Contact-cement model

¹¹ Cnstant-cement model



شکل ۳. داده‌های چاه‌نگاری در محدوده عمقی موردنظر. سه واحد ماسه‌سنگی قرارگرفته در بین لایه‌های شیلی نیز نشان داده شده است. تخلخل نشان داده شده در این شکل از طریق ترکیب لاگ نوترون و دانسیته محاسبه و با تخلخل حاصل از آنالیز مغزه کالیبره شده است. صحت سرعت حاصل از سونیک نیز از طریق تطابق حدودی رنج سرعت در واحدهای ماسه‌ای با سرعت لرزه‌ای اثبات شده است.

سخت‌شدگی آنی در اثر سیمان‌شدگی اولیه بدون کاهش آن‌چنانی در تخلخل، مدل در مقادیر تخلخل متوسط به بالا به‌خوبی عمل می‌کند اما در مقادیر تخلخل پایین معتبر نیست. همچنین لازم به ذکر است که پارامترهای کلیدی مدل‌های تماسی مورد بحث در این مقاله اعم از تخلخل حدی، عدد هم‌آرایی، درصد سیمان و حجم شیل برای هر سه لایه ماسه‌سنگی، یکسان تشخیص داده شد که گزارش‌های زمین‌شناسی موجود از میدان این موارد را تایید می‌کرد. در صورتی که خصوصیات فیزیک سنگی سه واحد ماسه‌سنگی متفاوت تشخیص داده می‌شد می‌بایستی لایه‌های ماسه‌سنگی جداگانه مورد تحلیل قرار گرفته و مدل می‌شدند.

هر سه مدل فیزیک‌سنگی ماسه سست، سیمان-تماسی و سیمان-ثابت با پارامترهای بهینه بر روی نمودار رسم شده است. پر واضح است که مدل فیزیک‌سنگی سیمان-ثابت تطابق بهتری را با داده‌ها نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در مورد شکل ۵ پایین‌تر بودن مقادیر سرعت تخمینی با استفاده از مدل سیمان-تماسی نسبت به دو مدل دیگر است. در مدل سیمان-تماسی، از مدل هرترزمیندلین برای وارد کردن اثر سیمان در محل تماس دانه‌ها به نحوی استفاده شده که بدون کاهش آن‌چنانی در میزان تخلخل، سختی ماسه‌سنگ افزایش قابل‌توجهی می‌یابد. در مقادیر تخلخل کمتر از تخلخل حدی، مدل همانند حد تصحیح‌شده پائینی هشین‌اشتریکمن عمل می‌کند؛ اما به دلیل تأثیر زیاد

۵. نتیجه‌گیری

مدل‌های فیزیک‌سنگی می‌توانند یک سری روابط تجربی بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باشند و یا به صورت مدل‌های نظری توسعه یافته بر اساس فیزیک و وضعیت ریز ساختار رسوبات باشند. در این مقاله سه مدل نظری فیزیک‌سنگی متداول برای بررسی ارتباط بین خواص مخزنی و سرعت لرزه‌ای در مخازن ماسه‌سنگی دارای تخلخل متوسط به بالا مورد بحث قرار گرفت. مدل ماسه سست یک مدل نظری برای ماسه‌های با تخلخل بالا است که تغییرات سرعت-تخلخل را بر حسب میزان جورشدگی سنگ توصیف می‌کند. در مدل ماسه سیمان-تماسی مدول‌های کشسانی ماسه‌سنگ با این شرط که سیمان دقیقاً در محل تماس دانه‌ها نهشته شده است به دست می‌آید. در این مدل ابتدا فرض می‌شود که ماسه سیمان شده یک ترکیب تصادفی از دانه‌های کروی یکسان ماسه است که با اضافه شدن سیمان به دانه‌های ماسه تخلخل کاهش و مدول‌های کشسانی مؤثر سنگ افزایش می‌یابد.

در مدل فیزیک‌سنگی سیمان-ثابت، فرض بر این است که ماسه‌ها با میزان جورشدگی متغیر (و در نتیجه میزان تخلخل متغیر) همگی دارای حجم ثابت و معینی از سیمان در محل تماس دانه‌ها هستند. در این مقاله مثالی از کاربرد مدل‌سازی فیزیک‌سنگی در یک مطالعه موردی نشان داده شد. هر سه مدل فیزیک‌سنگی ماسه سست، سیمان-تماسی و سیمان-ثابت با پارامترهای بهینه بر روی داده‌های مربوط به یک مخزن ماسه‌سنگی اعمال گردید.

برای بررسی کمی انطباق نمودارهای تخمینی و واقعی از میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد که نتایج نشان داد مقدار MAE مربوط به تخمین‌های حاصل از مدل سیمان-ثابت پایین‌تر از مقادیر MAE مربوط به تخمین‌های حاصل از مدل‌های ماسه سست و سیمان-تماسی است؛ بنابراین از بین سه مدل اعمال شده، فیزیک سنگ و شرایط ریز ساختار میدان مورد مطالعه نزدیک به شرایط و فرض‌های در نظر گرفته شده در توسعه مدل سیمان-ثابت است. لذا می‌توان از این مدل به عنوان یک مدل فیزیک‌سنگی مناسب در تفسیر کمی داده‌های لرزه‌ای و سرشت‌نمایی مخزن در

در مرحله بعد، با استفاده از هر سه مدل فیزیک‌سنگی مذکور، سرعت امواج تراکمی و برشی برای هر سه واحد ماسه‌سنگی تخمین زده شد. برای بررسی کمی انطباق نمودارهای تخمینی و واقعی از میانگین خطای مطلق^{۱۲} مطابق با رابطه ۲۹ استفاده گردید؛ بدین صورت که برای هر کدام از واحدهای ماسه‌سنگی بطور جداگانه، مقدار MAE یک بار بین مقادیر سرعت تراکمی تخمینی و اندازه‌گیری شده و بار دیگر بین مقادیر سرعت برشی تخمینی و اندازه‌گیری شده محاسبه شده‌اند.

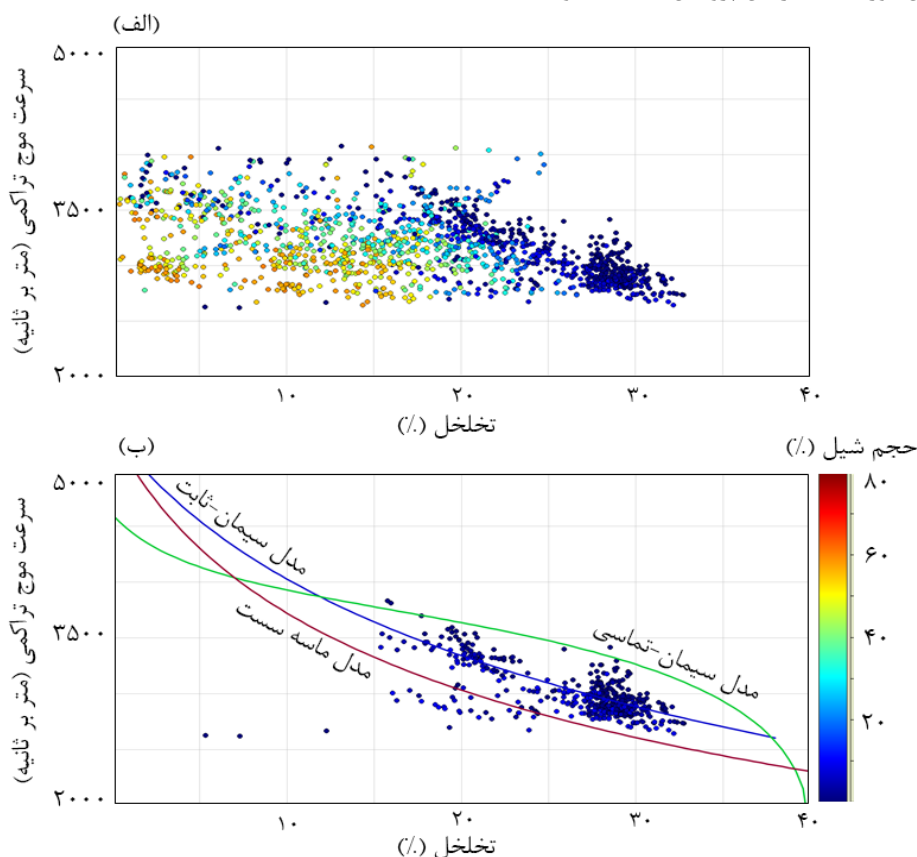
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{p,s,predicted} - V_{p,s,observed}| \quad (29)$$

در این رابطه، $V_{p,s,predicted}$ مقدار تخمینی سرعت موج تراکمی یا برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه و $V_{p,s,predicted}$ مقدار ثبت شده سرعت موج تراکمی یا برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه است و N تعداد نمونه‌ها در هر کدام از واحدهای ماسه‌سنگی است.

تحلیل نتایج حاصل که در جدول ۱ آورده شده است نشان می‌دهد که در هر سه واحد ماسه‌سنگی و برای هر دو سرعت موج تراکمی و برشی، مقدار MAE مربوط به تخمین‌های حاصل از مدل سیمان-ثابت بسیار پایین‌تر از مقادیر مربوط به تخمین‌های حاصل از مدل‌های ماسه سست و سیمان-تماسی است که بیانگر تطابق بهتر تخمین‌های حاصل از مدل سیمان-ثابت با داده‌های اندازه‌گیری شده است. می‌توان نتیجه گرفت که فیزیک‌سنگی و شرایط ریز ساختار میدان مورد مطالعه نزدیک به شرایط و فرض‌های در نظر گرفته شده در توسعه مدل سیمان-ثابت است. بنابراین می‌توان از این مدل به عنوان یک مدل فیزیک‌سنگی مناسب در تفسیر کمی داده‌های لرزه‌ای و سرشت‌نمایی مخزن در مطالعه میدان مورد بحث در این پژوهش استفاده نمود. قابل ذکر است در صورتی که اطلاعات کامل‌تری از وضعیت زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه (از قبیل ساختار سیمان‌شدگی دانه‌ها و ...) در دسترس باشد، می‌توان تحلیل جامع‌تری در مورد میزان تطبیق‌پذیری هر کدام از مدل‌های تماسی مورد بحث در این پژوهش با مشاهدات زمین‌شناسی انجام داد.

¹²MAE (Mean Absolute Error)

مطالعه میدان مورد بحث در این پژوهش استفاده نمود.



شکل ۴. نمودار سرعت موج تراکمی بر حسب تخلخل (الف) در کل محدوده عمقی حدود ۸۰۰ متر، (ب) برای حالتی که حد برش ۲۵ در صد برای مقادیر حجم شیل در نظر گرفته شده است (فقط نقاط مربوط به سه لایه ماسه‌سنگی در بازه‌های عمقی مورد نظر نمایش داده شده است). هر سه مدل فیزیک‌سنگی ماسه سست، سیمان-تماسی و سیمان-ثابت با پارامترهای بهینه نیز بر روی نمودار رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که این مدل‌ها در مقادیر تخلخل متوسط به بالا به خوبی عمل می‌کنند اما در مقادیر تخلخل پایین معتبر نیستند.

جدول ۱: مقادیر MAE مربوط به تخمین‌های حاصل از مدل‌های فیزیک‌سنگی با داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت امواج تراکمی و برشی.

		ماسه ۱	ماسه ۲	ماسه ۳	
MAE	سرعت موج تراکمی	مدل ماسه سست	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۷۴
		مدل سیمان-تماسی	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۸۷
		مدل سیمان-ثابت	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۶
MAE	سرعت موج برشی	مدل ماسه سست	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۵۱
		مدل سیمان-تماسی	۰/۶۴	۰/۵۱	۰/۵۲
		مدل سیمان-ثابت	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۴

۶. مراجع

- Avseth, P., J. Dvorkin, G. Mavko, and J. Rykkje, (2000). Rock physics diagnostic of North Sea sands: Link between microstructure and seismic properties: *Geophysical Research Letters*, 27, 2761–2764.
- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G., (2010). *Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk*. Cambridge University Press.
- Berryman, J. G., (1995). Mixture theories for rock properties. In T. J. Ahrens (Ed.), *Rock physics and phase relations: A handbook of physical constants* (pp. 205–228). Washington: American Geophysical Union.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., & Eastwood, R. L., (.985), Relationships between compressional wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 50, 571–581.
- Greenberg, M. L., & Castagna, J. P., (1992). Shear-wave velocity estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary verification and applications. *Geophysical Prospecting*, 40, 195–209.
- Dvorkin, J. and Nur, A., (1996). Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets. *Geophysics*, 61(5), 1363-1370.
- Emami Niri, M.E., (2015). *Seismic data integration and multi-objective optimization for 3D reservoir characterization and model building*. Ph.D dissertation, University of Western Australia.
- Gal, D., Dvorkin, J., & Nur, A., (1998). A physical model for porosity reduction in sandstones. *Geophysics*, 63, 454–459.
- Grana, D., (2016). *Rock Physics Modeling in Conventional Reservoirs*. In *New Frontiers in Oil and Gas Exploration*, Springer International Publishing, 137-163.
- Hamilton, E.L., (1956). Low Sound Velocities in High-Porosity Sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(1), 16-19.
- Han, D.H., Nur, A. and Morgan, D., (1986). Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51(11), 2093-2107.
- Hashin, Z. and Shtrikman, S., (1963). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(2), 127-140.
- Kuster, G. T., & Toksoz, M. N., (1974). Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. *Geophysics*, 39, 587–618.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., (2009). *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media*. Cambridge University Press.
- Mindlin, R., (1949). Compliance of elastic bodies in contact: *Journal of Applied Mathematics*, 16, 259–268.
- Norris, A. N., (1985). A differential scheme for the effective moduli of composites: *Mechanics of Materials*, 4 (1), 1–16.

- Nur, A.M., Mavko, G., Dvorkin, J. and Gal, D., (1995). Critical porosity: The key to relating physical properties to porosity in rocks. In SEG Technical Program Expanded Abstracts, 878-881.
- Reuss, A., (1929). Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 9(1), 49-58.
- Saul, M.J., (2014). Pressure-dependent elastic properties of sandstones, with applications to seismic reservoir characterisation and monitoring, Ph.D dissertation, The University of Western Australia.
- Zimmer, M., (2003). Seismic velocities in unconsolidated sands: Measurements of pressure, sorting, and compaction effects, Ph.D dissertation, Stanford University.
- Zimmerman, R. W., (1991) Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions: Mechanics of Materials, 12, 17-24. W.H. Freeman & Co.