

بهبود مدل فیزیک سنگی هرتز-میندلین در یکی از مخازن ماسه‌سنگی خلیج فارس

بهاره فریدونی^۱، علی مرادزاده^{۲*}، امین روشندل کاهو^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود، baharehferidooni@gmail.com

^{۲*}استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران a_moradzadeh@ut.ac.ir

^۳استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

روابط فیزیک سنگ به عنوان پل ارتباطی بین خواص پتروفیزیکی و کشسانی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بتوان از خواص کشسانی محاسبه شده برای بررسی خواص لرزه‌ای، پیش‌بینی نگارهای چاه‌پیمایی و یا ایجاد الگوهای فیزیک سنگی استفاده کرد. در این مقاله که مربوط به یکی از مخازن نفتی ماسه‌سنگی خلیج فارس می‌باشد، از رابطه تئوری-تماسی هرتز-میندلین برای محاسبه خواص کشسانی خشک سنگ در یکی از چاه‌های میدان استفاده شده است. نتایج حاصل از این مدل با خواص کشسانی حاصل از روش مستقیم (رابطه گسمن) مقایسه شده است. با توجه به سیمان‌شدگی جزئی مخزن، می‌توان گفت که مدل میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین برای محاسبه مدول حجمی خشک سنگ در این چاه مناسب می‌باشد. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهند مدل میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین با اعمال ضریب اصطکاک ۰/۰۱ برای محاسبه مدول برشی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فیزیک سنگ، خواص کشسانی، خواص لرزه‌ای، رابطه هرتز-میندلین، رابطه گسمن.

Improvement of Hertz-Mindlin rock physics model in one of the sandstone reservoirs in Southwest of Iran

Bahareh Fereidooni¹, Ali Moradzadeh^{2*}, Amin Roshandel Kahoo³

¹MSc graduate in Petroleum Exploration Engineering, Shahrood University of Technology

² Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran

³ Assistant Professor, Shahrood University of Technology

Abstract

Rock physics relations are used as a bridge between the petrophysical and calculated elastic properties of rock in order to investigate seismic properties, prediction of well-log or to create rock physics types. In this article, which corresponds to one of the sandstone oil reservoirs located in Persian Gulf, the theoretical-contact Hertz-Mindlin has been used to calculate the elastic properties of dry rock in one wells of the field. The results of this model was compared with those obtained by the direct method (Gassmann model). Considering to the partial cementation of reservoir, the improved average limits of Hashin-Shtrikman model made by Hertz-Mindlin theory is suitable to calculate the dry bulk modulus of the rock in the this well. The average limits of Hashin-Shtrikman model that improved by Hertz-Mindlin theory can also be used to calculate shear wave modules with 0.01 friction coefficient.

Keywords: Rock physics, elastic properties, seismic properties, Hertz-Mindlin relation, Gassmann relation.

۱ مقدمه

امروزه مدل‌سازی فیزیک سنگ به عنوان ابزاری قدرتمند جهت برقراری ارتباط بین خواص پتروفیزیکی و خواص کشسانی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد (گرانا، ۲۰۱۶). از خواص کشسانی محاسبه شده می‌توان برای ساخت ردلرزه‌های مصنوعی، پیش‌بینی نگارهای چاه‌پیمایی، تشخیص سنگ‌شناسی، نوع سیال و یا ایجاد الگوهای فیزیک سنگی استفاده کرد. مدل فیزیک سنگ رایجی که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل گسمن (۱۹۵۱) است. از میان پارامترهای مدل گسمن، تخمین مدول حجمی سنگ خشک بدلیل وابسته بودن آن به سایر پارامترهای ورودی، بخش مهم این رابطه می‌باشد. علاوه بر مدل گسمن، روش‌های تئوری و تجربی دیگری نیز جهت محاسبه خواص کشسانی خشک سنگ ارائه شده است (کازمینی و همکاران، ۲۰۱۰). از جمله روش‌های تئوری می‌توان به مدل تئوری-تماسی هرتز-میندلین (۱۹۴۹) اشاره کرد. در این مدل، خواص کشسانی خشک سنگ بر اساس خواص دانه و منفذ که در آن دانه‌های سنگ به عنوان یک مجموعه تصادفی کروی می‌باشند، تعیین می‌شود. مدول کشسانی موثر خشک سنگ نیز با استفاده از تخلخل، میانگین عدد کئوردیناسیون، ابعاد دانه و سفتی (Stiffness) محاسبه می‌شود. اگرچه اغلب مدل‌ها به‌عنوان یک مدل ایده‌آل و ساده شده از سنگ واقعی می‌باشند، ممکن است در موارد خاص، این روابط انطباق خوبی را با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان دهند. در این مدل‌ها خواص مربوط به بافت سنگ نیز لحاظ می‌شود که می‌تواند با اطمینان بیشتری برای محاسبه خواص کشسانی سنگ مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های مرزی دسته‌ای دیگر از مدل‌های تئوری می‌باشند که مستقل از تقریب هستند و در آن سنگ به‌عنوان یک ترکیب کشسانی رفتار می‌کند. دو مدل مرزی رایج که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل وویت-رویس و هشین-اشتریکمن می‌باشد (هشین و اشتریکمن، ۱۹۶۳). در این مطالعه مدول‌های حجمی و برشی خشک سنگ با دو روش مستقیم (مدل گسمن) و تئوری-تماسی هرتز-میندلین محاسبه شده و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

۲ روش تحقیق

برای تخمین مدول حجمی سنگ خشک با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی، می‌توان از رابطه گسمن استفاده کرد. برای این منظور با استفاده از نگار چگالی (ρ_b)، سرعت موج تراکمی (V_p) و سرعت موج برشی (V_s) اندازه‌گیری شده سنگ، مدول حجمی سنگ اشباع شده برای شرایط درجا (K_{sat}) مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از خواص سیال منفذی (ρ_{fl}, K_{fl})، مدول حجمی موثر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ (K_{matrix}) و نگار تخلخل (ϕ)، می‌توان با استفاده از رابطه (۱) مدول حجمی سنگ خشک (K_{dry}) را محاسبه کرد:

$$K_{sat} = \rho_b \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right), \quad K_{dry} = \frac{K_{sat} \left(\frac{\phi K_{matrix}}{K_{fl}} + 1 - \phi \right) - K_{matrix}}{\frac{\phi K_{matrix}}{K_{fl}} + \frac{K_{sat}}{K_{matrix}} - 1 - \phi} \quad (1)$$

مدول برشی سنگ، μ ، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در رابطه گسمن، مدول برشی سنگ برخلاف مدول حجمی، مستقل از سیالات منفذی است. این فرض از عدم فعل و انفعالات شیمیایی بین سیالات منفذی و دانه‌های سنگ ناشی می‌شود (دیورکین-نور، ۱۹۹۶):

$$\mu = \rho_b V_s^2, \quad \mu_{dry} = \mu_{wet} \quad (2)$$

به‌منظور محاسبه خواص سیال منفذی (ρ_f, K_f)، از روابط باتزل و ونگ (۱۹۹۲) و برای محاسبه خواص موثر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، K_{matrix} ، از میانگین حدود بالا و پایین هشین-اشتریکمن (۱۹۶۳) استفاده شده است. مدول‌های کشسانی در تخلخل بالا (تخلخل بحرانی)، می‌توانند به عنوان یک مجموعه کروی کشسانی تحت تاثیر فشار همه جانبه با استفاده از تئوری هرتز-میندلین مدل شوند (دیورکین-نور، ۱۹۹۶). در مدل تماسی، دانه‌ها بصورت همگن، همسانگرد، کروی، کشسان و همراه با کرنش‌های کوچک فرض می‌شوند. در تخلخل بحرانی، مدل هرتز-میندلین مطابق رابطه (۳) می‌باشد:

$$K_{HM} = \left[\frac{n^2 (1-\phi_c)^2 \mu_m^2}{18\pi^2 (1-\nu_m)^2} P \right]^{\frac{1}{3}}, \quad \mu_{HM} = \frac{2+3f-\nu_m(1+3f)}{5(2-\nu_m)} \left[\frac{3n^2 (1-\phi_c)^2 \mu_m^2}{2\pi^2 (1-\nu_m)^2} P \right]^{\frac{1}{3}} \quad (۳)$$

که در آن K_{HM} و μ_{HM} مدول حجمی و مدول برشی سنگ خشک در تخلخل بحرانی (ϕ_c)، n عدد کنوردیناسیون، P فشار موثر، μ_m و ν_m به ترتیب مدول برشی و نسبت پواسون کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و f ضریب اصطکاک می‌باشد.

برای محاسبه مدول حجمی و برشی ماسه خشک در محدوده کمتر از تخلخل بحرانی، از مدل مرزی هشین-اشتریکمن استفاده می‌شود. برای این منظور، با توجه به وضعیت سیمان‌شدگی سطح تماس دانه‌ها، برای ماسه سیمانی‌نشده از حد پایینی هشین-اشتریکمن و برای ماسه سیمانی‌شده از حد بالایی هشین-اشتریکمن استفاده می‌شود. معادلات (۴) و (۵) به ترتیب مربوط به مدول حجمی و مدول برشی ماسه خشک در مدل ماسه سیمانی‌نشده، و روابط (۶) و (۷) به ترتیب مربوط به مدول حجمی و مدول برشی ماسه خشک در مدل ماسه سیمانی‌شده می‌باشند (دیورکین-نور، ۱۹۹۶):

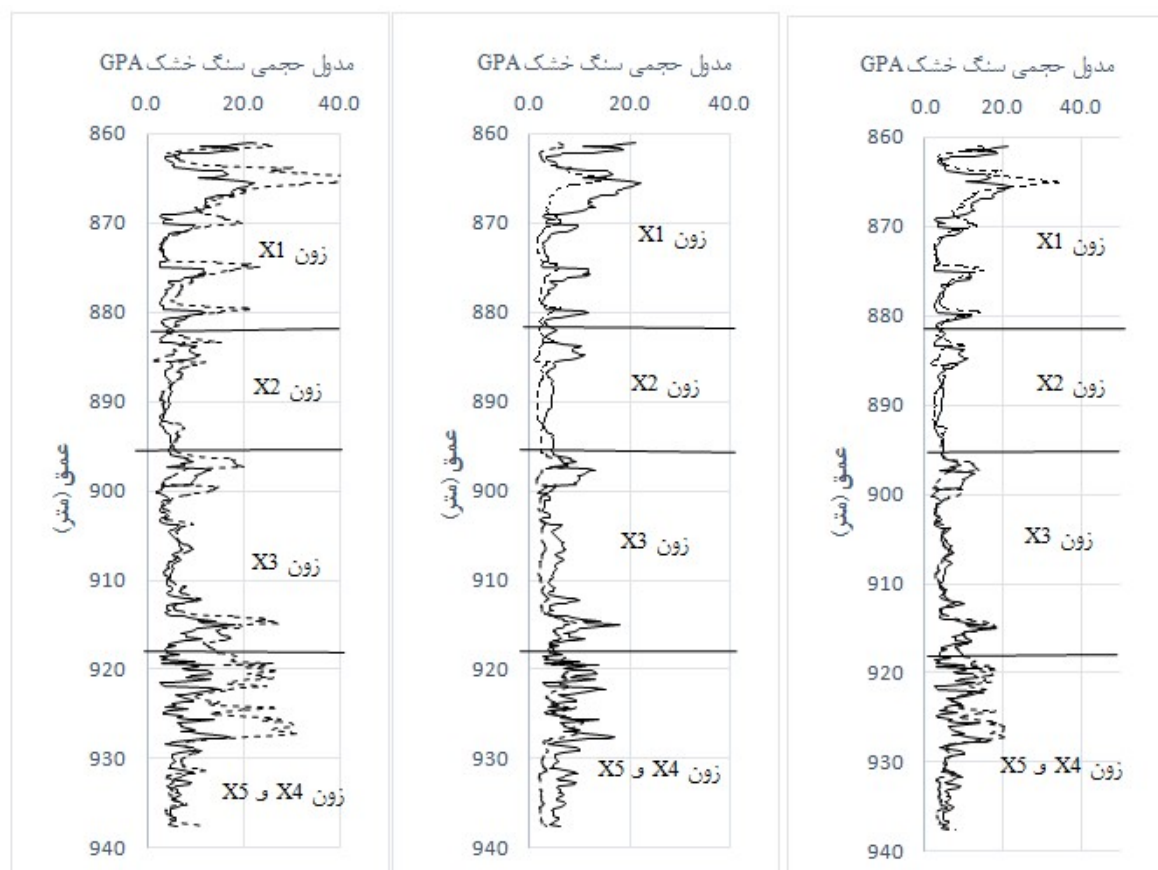
$$K_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3}\mu_{HM}} + \frac{1-\frac{\phi}{\phi_c}}{K + \frac{4}{3}\mu_{HM}} \right]^{-1} - \frac{4}{3}\mu_{HM} \quad (۴)$$

$$\mu_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_{HM} + \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right)} + \frac{1-\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_m + \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right)} \right]^{-1} - \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right) \quad (۵)$$

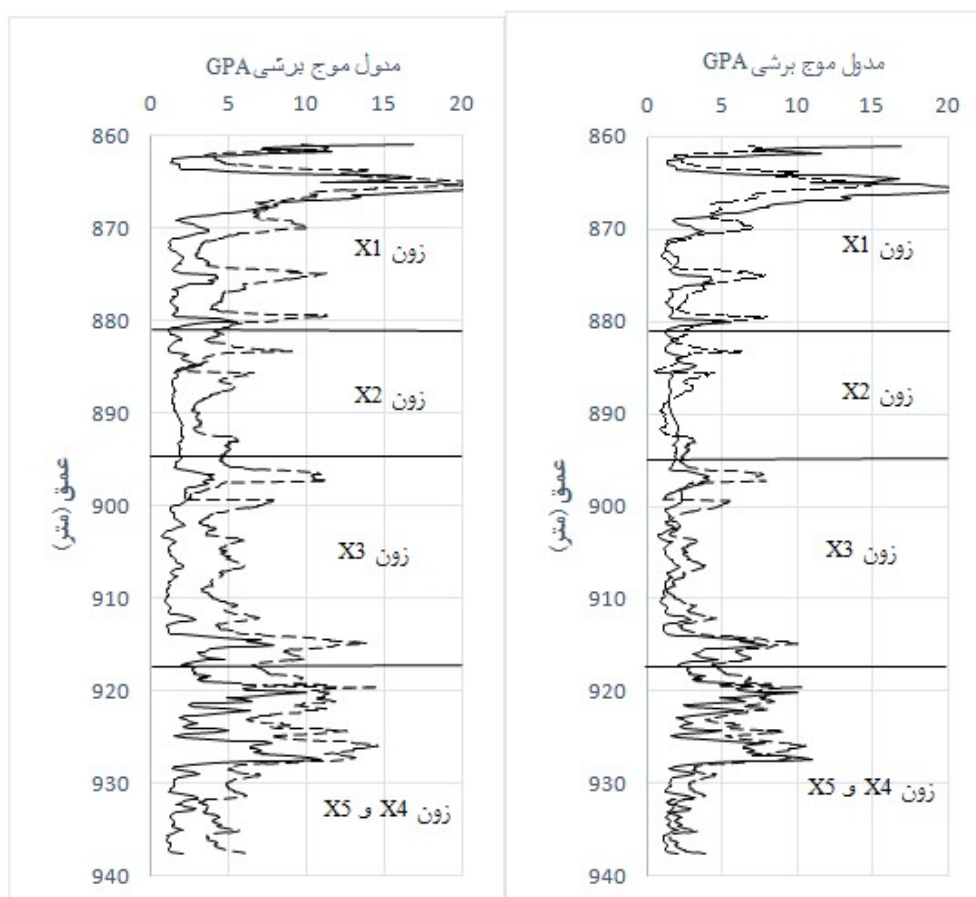
$$K_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3}\mu_m} + \frac{1-\frac{\phi}{\phi_c}}{K_m + \frac{4}{3}\mu_m} \right]^{-1} - \frac{4}{3}\mu_m \quad (۶)$$

$$\mu_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_{HM} + \frac{\mu_m}{6} \left(\frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \right)} + \frac{1-\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_m + \frac{\mu_m}{6} \left(\frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \right)} \right]^{-1} - \frac{\mu_m}{6} \left(\frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \right) \quad (۷)$$

در این مطالعه عدد کثوردیناسیون برابر با ۹ و مقدار تخلخل بحرانی $0/36$ در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در بعضی از اعماق مدل سیمانی‌شده و در بعضی از اعماق نیز مدل سیمانی‌نشده مناسب می‌باشند. با توجه به گزارشات زمین‌شناسی مبنی بر سیمان‌شدگی جزئی مخزن، از میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک استفاده شده است. این میانگین‌گیری، تخمین بهتری از مدول حجمی سنگ خشک ارائه کرده است. مدول برشی محاسبه شده با استفاده از رابطه هرتز-میندلین با ضریب اصطکاک $(f = 1)$ ، به دلیل اینکه لغزش بین سطح دانه‌های تشکیل دهنده سنگ را در نظر نمی‌گیرد، مقدار بیشتری را نسبت به مدول برشی حاصل از رابطه (۲) نشان می‌دهد. بنابراین لازم است تا مدول برشی رابطه هرتز-میندلین تصحیح شود. برای این منظور با در نظر گرفتن دو مقدار ضریب اصطکاک $0/01$ و ۱، از روابط (۵) و (۷) برای محاسبه مدول موج برشی ماسه سیمانی‌نشده و سیمانی‌شده در مقادیر کمتر از تخلخل بحرانی استفاده شده و میانگین آنها در شکل ۲ نشان داده است. با افزایش ضریب اصطکاک، به دلیل اینکه صلبیت برشی بین دانه‌های سنگ افزایش می‌یابد، مقدار مدول برشی افزایش یافته است. بنابراین می‌توان اینگونه استنباط کرد که ضریب اصطکاک بین دانه‌های تشکیل دهنده سنگ بسیار پایین است و دانه‌های سنگ نسبت به یکدیگر لغزش دارند. بنابراین مدول برشی محاسبه شده با در نظر گرفتن شرایط سیمان‌شدگی جزئی با استفاده از میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن و ضریب اصطکاک $0/01$ ، انطباق خوبی با مدول برشی حاصل از رابطه (۲) نشان می‌دهد. در نتیجه از این مدل می‌توان برای محاسبه مدول برشی استفاده کرد.



شکل ۱. مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرتز-میندلین (خط چین) سیمانی‌شده (چپ)، سیمانی نشده (وسط) و میانگین (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط پر).



شکل ۲: مدول برشی مربوط به مدل میانگین هرتز-میندلین (خط چین) و مدول برشی محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط پر) با ضرایب اصطکاک ۰/۰۱ (سمت راست) و ۱ (سمت چپ).

۳ نتیجه‌گیری

با توجه به سیمان‌شدگی جزئی مخزن، میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین تخمین خوبی از مدول حجمی و برشی سنگ خشک ارائه کرده است. با توجه به عدم تحکیم‌یافتگی مخزن و با در نظر گرفتن لغزش بین دانه‌ها، مدول برشی محاسبه شده با استفاده از میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و با اعمال ضریب اصطکاک ۰/۰۱، انطباق خوبی را با مدول برشی حاصل از نگارهای نشان می‌دهد.

منابع

- Batzle, M., and Wang, Z., 1992, Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57, 1396–1408
- Berryman, J. G., 1999, Origin of Gassmann's equations. *Geophysics*, 64, 1627–1629.
- Dvorkin, J., and Nur, A., 1996, Elasticity of high-porosity sandstones: theory for two North Sea data sets. *Geophysics*, 5, 61, 1363–1370.
- Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poröser medien. *Vier. der Natur: Gesellschaft in Zürich*, 96, 1–23.
- Grana, D., Verma, S., and 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.
- Hashin, Z., and Shtrikman, S., 1963, A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials, pp 127–140, In: "The Rock Physics Handbook", 2, Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin. Cambridge University Press, USA.
- Kazemini, H., Julin, C., and Fomel, S., 2010, Monitoring CO2 response on surface seismic data; a rock physics and seismic modeling feasibility study at the CO2 sequestration site, Ketzin, Germany. *Geophysics*, 71, 109-124.