تخمین پارامتر شکنندگی سنگ با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای پیش از برانبارش

امیدرضا سلمیان[۱]، هادی مهدوی بصیر[۲]
[۱] دانش آموخته مهندسی اکتشاف نفت، دانشگاه تهران، omidrezasalmian@ut.ac.ir
[۲] استادیار دانشکده نفت، دانشگاه امیرکبیر، basir.m@aut.ac.ir

چکیده

یکی از ملاحظات اصلی برای برنامه‌ریزی انجام شکست هیدرولیکی، میزان تاثیر آن در افزایش مقدار هیدروکربن قابل‌استخراج است. پارامتر شکنندگی یک ابزار برای سنجش پتانسیل یک سازند در ایجاد شبکه شکستگی برای جابه‌جایی هیدروکربن در فرایند شکست هیدرولیکی است. شکنندگی را می‌توان به‌طور مستقیم از با استفاده از روش‌هایی مانند اندازه‌گیری تنش-کرنش بر روی مغزه در آزمایشگاه، اندازه‌گیری خواص الاستیک سنگ و یا تجزیه و تحلیل کانی‌های تشکیل دهنده با استفاده از آنالیز پتروفیزیکی بر روی نگاره‌های مربوط به چاه تخمین زد. با این حال، شکنندگی تخمین زده‌شده با استفاده از این روش‌ها فقط تخمین‌هایی را در اطراف چاه ارائه می‌کنند ولی روش‌هایی که بر پایه داده‌های لرزه‌ای هستند می‌تواند تخمینی از این پارامتر در سراسر میدان ارائه دهند. در این تحقیق با استفاده از روش وارون‌سازی پیش از برانبارش بر روی داده‌های لرزه‌ای یک میدان نفتی و استخراج مکعب‌های پارامترهای ژئومکانیکی از جمله مدول یانگ و نسبت پواسون و ادغام آن‌ها با داده‌های چاه، شکنندگی در کل میدان مورد مطالعه تخمین زده شده و نتایج مورد بحث قرارگرفته است.

واژه‌های کلیدی: شکنندگی، وارون سازی، پیش از برانبارش، شکست هیدرولیکی، پارامترهای ژئومکانیکی

Estimation of rock brittleness parameter using pre-stack seismic inversion

Omidreza Salmian[1], Hadi Mahdavi Basir[2]
MSc Petroleum Exploration Engineering, Tehran University
Assistant professor at Petroleum Engineering Department, Amirkabir University

Abstract

One of the main considerations for planning of hydraulic fracturing is its impact on the increase of recoverable hydrocarbon. The brittleness parameter is known as a tool for evaluation of formation's potential in terms of fracture network generation for hydrocarbon movement in the hydraulic fracturing process. Brittleness can be estimated directly from methods such as stress-strain measurement on the core in a laboratory, measurement of rock elastic properties, or analysis of mineral content using petrophysical analysis on well logs. However, the estimated brittleness using these methods only provides an estimation around the well, but by the methods based on seismic data, brittleness can be estimated in the whole field. In this study, the brittleness is estimated in the whole field using pre-stack seismic inversion and extracting geomechanical parameters cubes including Young's modulus and Poisson ratio and their integration with well data in an oil field, and the results are discussed.

Keywords: Brittleness, Pre-stack Inversion, Hydraulic fracturing, Geomechanical parameters

۱ مقدمه

برای توصیف رفتار تغییر شکل سنگ تحت تنش از شاخص شکنندگی (Brittleness Index; BI) و شکل‌پذیری استفاده می‌شود. اگر سنگ، قبل از شکستن مقدار زیادی انرژی جذب کند و تغییر شکل دهد، شکل‌پذیر محسوب می‌شود

در صورتی که سنگ‌های شکننده قادر به تحمل فشار قابل توجه قبل از شکستگی هستند ولی تغییر شکلی در آن‌ها حاصل نمی‌شود. به تعبیری دیگر، این سنگ‌ها محدوده رفتار پلاستیکی بسیار کوچکی دارند و به صورت ناگهانی دچار شکست می‌شوند (جین و همکاران ۲۰۱۴). روش‌های ارزیابی شکنندگی سنگ‌ها عمدتاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱) اندازه‌گیری مستقیم تنش-کرنش آزمایشگاهی، (۲) محتوای سنگ‌شناسی و (۳) روش‌های تجربی مبتنی بر مدول الاستیک. شکنندگی بر اساس آزمایش تنش-کرنش آزمایشگاهی ارتباط مستقیمی با داده‌های لرزه‌ای ارائه نمی‌دهد (آلتینداگ و گونی، ۲۰۱۰). بنابراین، تمرکز این تحقیق برای ارزیابی شکنندگی بر روی روش آخر می‌باشد.

تخمین شاخص شکنندگی بر اساس نگاره‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای به طور گسترده‌ای برای ارزیابی شکنندگی مخازن استفاده می‌شود (جاروی و همکاران، ۲۰۰۷؛ وانگ و گیل، ۲۰۰۹). کانی‌های مختلف خواص کشسان متفاوتی از خود نشان می‌دهند، مانند امپدانس صوتی، امپدانس برشی، نسبت پواسون σ، تراکم ناپذیری λ و مدول برشی μ. به عنوان مثال، تراکم ناپذیری کوارتز، کمتر از رس و کلسیت است، در حالی که μ کوارتز بالاتر از رس و کلسیت است (ماوکو و همکاران،۲۰۲۰). ریکمن و همکاران (۲۰۰۸) یک معادله شکنندگی را بر اساس پارامترهای الاستیک نسبت پواسون و مدول یانگ پیشنهاد کردند. معادله آن‌ها فرض می‌کند که سنگ‌های ترد بیشتر مدول یانگ نسبتاً بالا و نسبت پواسون پایین را نشان می‌دهند، در حالی که سنگ‌های شکل‌پذیر بیشتر مدول یانگ پایین و نسبت پواسون بالا را نشان می‌دهند. تخمین شکنندگی بر اساس پارامترهای الاستیک در زمینه ژئومکانیک بیشتر از تخمین بر اساس محتوای کانی رایج است که دلیل آن این واقعیت است که پارامترهای الاستیک به راحتی از نگاره‌های چاه‌ها حاصل می‌شوند، که مستقیماً توانایی سنگ را برای شکست تحت تنش توصیف می‌کنند (ریکمن و همکاران ۲۰۰۸).

۲ روش تحقیق

هدف از انجام این تحقیق آشکارسازی مناطق با سنگ‌شناسی ترد و شکنندگی بالا سنگ‌ها است که آگاهی از آن برای اهداف مختلفی از جمله حفر چاه جدید، بحث‌های مربوط به شکست هیدرولیکی و ... ضرورت دارد. شناسایی این مناطق با استفاده از وارون‌سازی پیش از برانبارش انجام خواهد شد. ریکمن و همکاران (۲۰۰۸) رابطه‌ای را تعریف کردند که شکنندگی را به صورت درصد بیان می‌کند و آن را به مدول یانگ و نسبت پواسون مرتبط می‌کند، که هر دو آن‌ها می‌توانند از داده‌های لرزه‌ای حاصل شوند. معادله ۱، ۲ و ۳ شکل تعمیم یافته این معادلات است. همین معادلات را می‌توان برای نتایج وارون‌سازی اعمال کرد:

$$B_E \approx 100(E-E_{min})/(E_{max}-E_{min}) \quad (۱)$$

$$B_V \approx 100(V- V_{min})/ (V_{max}- V_{min}) \quad (۲)$$

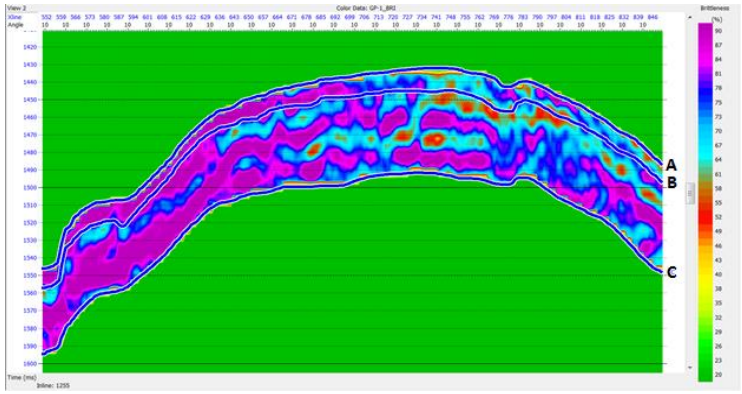
$$B \approx (B_E + B_V)/2 \quad (۳)$$

در روابط بالا B_E شکنندگی تخمین زده شده توسط مدول یانگ، B_V شکنندگی تخمین زده شده از نسبت پواسون، E مدول یانگ و V نسبت پواسون می‌باشد. زیرنویس‌های min و max نشان دهنده مقادیر کمترین و بیشترین می‌باشد. پارامترهای استفاده شده در این رابطه را می‌توان با استفاده از وارون سازی لرزه‌ای پیش برانبارش به دست آورد.

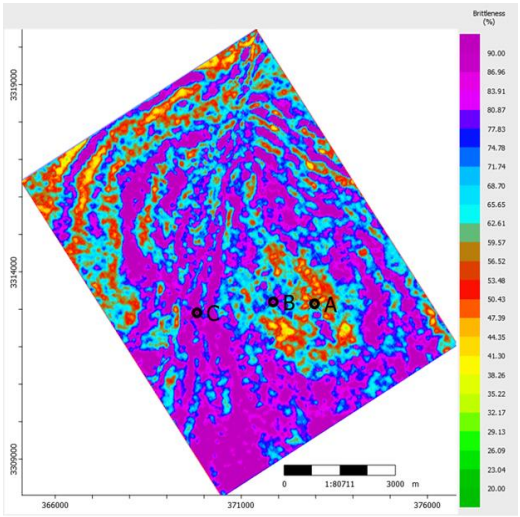
برای اجرا فرایند وارون‌سازی همزمان پیش از برانبارش در ابتدا یک فرض وجود دارد که باید داده‌ها برحسب زاویه فرود مرتب باشند بنابراین اولین مرحله وارون‌سازی همزمان پیش از برانبارش تولید برانبارش زاویه‌ای (angle stack) است. برای ایجاد این برانبارش‌ها از رابطه زمان - عمق یکی از چاه‌ها استفاده شده است. مرحله بعدی استخراج موجک از هر انبارش زاویه‌ای است تا با میانگین‌گیری از آن‌ها، موجک تقریبی زمین که بیشترین درجه تطابق با داده‌ها را دارد، برای ادامه فرایند وارون‌سازی انتخاب شود. بعد از آن از آن‌جایی که داده‌های لرزه‌ای دارای باند فرکانسی محدود هستند و فاقد

فرکانس‌های پایین است، ساخت یک مدل اولیه که حاوی فرکانس‌های پایین باشد برای انجام فرایند وارون‌سازی مدل پایه لازم و ضروری است. این مدل فرکانس پایین به صورت مجزا برای مقاومت صوتی، مقاومت برشی و چگالی با استفاده از داده‌های چاه و افق‌های لرزه‌ای ساخته می‌شود. در ادامه آنالیز وارون‌سازی در محل چاه که یکی از مراحل مهم در طی فرایند وارون‌سازی است، اجرا می‌شود. در این مرحله با تغییر پارامترها می‌توان تغییراتی مؤثر بر روی نتیجه حاصل کرد به طوری که کیفیت کار وارون سازی ارتقا یابد. بنابراین باید با توجه به درصد تطابق حاصل شده در محل چاه، بهترین و مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترها انتخاب شود. بعد از اجرا آنالیز وارون‌سازی در محل چاه و انتخاب پارامترهای بهینه، حال در این مرحله وارون‌سازی بر کل حجم داده‌ها اعمال می‌شود و مکعب مقاومت تراکمی، مکعب مقاومت برشی و مکعب چگالی که به عنوان نتایج این فرایند می‌باشد، حاصل می‌شود.

در این مرحله و با استفاده از روابط موجود در بخش قبل به همراه نشانگرهای لرزه‌ای حاصل شده از فرایند وارون‌سازی پیش از برانبارش، مکعب پارامتر شکنندگی سنگ در کل منطقه که داده لرزه‌ای در آن برداشت شده است، حاصل می‌شود. شکل ۱ مقطع لرزه‌ای شکنندگی را در حدفاصل افق A تا C را نمایش می‌دهد. شکل ۲ برش زمانی پارامتر شکنندگی را در افق B که سنگ‌شناسی آن ماسه ای و در این میدان به عنوان سنگ مخزن شناخته می‌شود را، نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقطع لرزه‌ای شکنندگی را در حدفاصل افق A تا C. افق‌های لرزه‌ای با خطوط آبی در شکل نمایش داده شده است. همچنین اعداد مربوط به تغییرات رنگی نیز در قسمت راست شکل آورده شده است.



شکل ۲. مقطع زمانی شکنندگی بر روی افق B. محل چاه‌های این مطالعه بر روی مقطع نمایش داده شده است. همچنین اعداد مربوط به تغییرات رنگی نیز در قسمت راست شکل آورده شده است

۳ نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از ترکیب نگاره‌های ۳ چاه، افق‌های لرزه‌ای و وارون‌سازی همزمان پیش از برانبارش داده‌های لرزه‌ای، پارامتر شکنندگی در کل میدان مورد مطالعه تخمین زده شد. با استفاده از پارامتر شکنندگی، امکان ارزیابی پتانسیل شکست هیدرولیکی و یا برنامه‌ریزی برای حفر چاه جدید فراهم می‌شود. داده‌های لرزه‌ای این امکان را فراهم می‌کنند که در جایی که چاهی حفر نشده است و اطلاعاتی وجود ندارد، پارامتر شکنندگی را تخمین زد و به کمک آن بتوان تجزیه و تحلیل دقیق‌تری ارائه داد. افق مخزنی B که لیتولوژی آن ماسه سنگی است، مورد مطالعه قرار گرفت و پارامتر شکنندگی برای این افق تخمین زده شد. در شکل ۱ ملاحظه می‌شود که در قسمت‌هایی شکنندگی کاهش می‌یابد که نشان از متخلخل بودن این افق دارد و در بخش‌هایی نیز شکنندگی بالا مشاهده می‌شود. از طرفی در شکل ۲ که برش زمانی از افق مدنظر ما می‌باشد، تغییرات شکنندگی در کل منطقه دیده می‌شود که دید بهتری برای تجزیه و تحلیل این پارامتر به ما می‌دهد. به عنوان مثال در جایی که چاه‌های این مطالعه قرار گرفته‌اند، تغییرات قابل توجه‌ای در پارامتر شکنندگی دیده می‌شود (تغییر رنگ از بنفش به تقریباً زرد) که این حاکی از وجود تخلخل بالا دارد که مستعد ذخیره-سازی هیدروکربن می‌باشد (وجود تخلخل در سنگ باعث ایجاد رفتار پلاستیکی بیشتر سنگ می‌شود و از تردی آن می‌کاهد). بر اساس شکل ۲ در قسمت‌های شمالی این میدان نیز یک کاهش قابل توجه در شکنندگی نسبت به اطراف دیده می‌شود که می‌توان به علت وجود تخلخل و به تبع آن وجود هیدروکربن باشد. در حالی که قسمت‌های جنوبی این میدان بالاترین میزان شکنندگی (رنگ بنفش) را نشان می‌دهند که می‌توان گفت در این قسمت‌ها سنگ‌هایی با میزان تردی بالا، رفتار الاستیکی بالایی از خود نشان می‌دهند که با توجه به بحث مربوط به شکست هیدرولیکی این مناطق بیشتر مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرند.

منابع

سراج امانی، م.، نیکروز، ر.، کدخدائی، ع.، ۱۳۹۹، تخمین شاخص شکنندگی با استفاده از وارون‌سازی پس از برانبارش داده‌های لرزه ای با مثالی از حوضه پرت واقع در استرالیای غربی: مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۶، شماره۳، ۴۵۷-۴۷۱

Altındağ, R., & Güney, A. (2010). Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks.

Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., & Pollastro, R. M. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. AAPG bulletin, 91(4), 475-499.

Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J. C., & Zhang, B. (2014, February). Fracability evaluation in shale reservoirs-an integrated petrophysics and geomechanics approach. In SPE hydraulic fracturing technology conference. OnePetro

Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J. (2020). The rock physics handbook. Cambridge university press.

Perez, R., & Marfurt, K. (2013). Brittleness estimation from seismic measurements in unconventional reservoirs: Application to the Barnett Shale. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013 (pp. 2258-2263). Society of Exploration Geophysicists.

Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W. V., & Kundert, D. (2008, January). A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale. In SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Russell, B. H. (1988). Introduction to seismic inversion methods (No. 2). SEG Books.

Wang, F. P., & Gale, J. F. (2009). Screening criteria for shale-gas systems.