



استفاده از نگارها جهت تعیین تنش‌های برجا روی دیواره‌ی چاه‌های نفتی؛ مطالعه‌ی موردی یکی از میادین نفتی جنوب ایران

فرهاد صادقی زاده^۱، شرکت نفت و گاز اروندگان

شاهو ملکی^{۲*}، علی مرادزاده^۳، رضا قوامی ربایی^۴، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

در پروژه‌های ژئومکانیکی آگاهی از مقاومت دیواره‌ی چاه‌های حفر شده ضروری است. این امر با تعیین مقدار تنش‌های برجا روی دیواره‌ی چاه امکان‌پذیر است. تنش‌های برجا را می‌توان از طریق داده‌های آزمایش نشت سازند (LOT)، آزمایش شکست مویین^۱ و اطلاعات حفاری تعیین کرد. اما علاوه بر هزینه و وقت گیر بودن انجام این آزمایش‌ها، تعداد آزمایش‌هایی که می‌توان برای یک چاه نفتی انجام داد نیز بسیار محدود است (یک یا دو و به ندرت سه آزمایش)؛ چراکه در بیشتر موارد تعداد زیاد این آزمایش‌ها سبب خردشدگی و ریزش دیواره‌ی چاه می‌شود. به دلیل این مشکلات، در ژئومکانیک مخزن برای تعیین مقدار تنش‌های برجا از نگارهای چاه استفاده می‌کنند. از خصوصیات تنش‌های برجا حاصل از نگارهای چاه، پیوسته بودن مقدار آنها در طول چاه حفر شده است. متخصصان چاه‌نگاری روابطی برای تعیین تنش‌های برجا از طریق نگارهای چاه ارائه کرده‌اند. در همین راستا هدف مقاله‌ی حاضر، تعیین مقدار تنش‌های برجا روی دیواره‌ی چاه‌های حفر شده با استفاده از نگارهای چاه برای یکی از میادین نفتی جنوب ایران است.

واژگان کلیدی: نگارهای چاه، تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر، تنش قائم، متغیرهای ژئومکانیکی

مقدمه

حداقل و حداکثر روابطی ارائه کرده‌اند [۷ و ۴]. در اغلب این روابط، تنش‌های افقی حداقل و حداکثر توسط مدول‌های الاستیک سنگ که بر مبنای چاه‌نگاری (سرعت موج فشاری و برشی) است محاسبه می‌شوند.

طی عملیات حفاری وزن گل باید کمتر از تنش افقی حداقل و بیشتر از تنش افقی حداکثر باشد تا بتوان از به وجود آمدن یا انتشار احتمالی شکستگی‌های هیدرولیکی جلوگیری کرد. تنش افقی حداقل می‌تواند به شکل مستقیم از داده‌های آزمایش نشت سازند، شکست هیدرولیکی، آزمایش شکست مویین و داده‌های هرزروی گل برای نقاط خاصی از چاه و به شکل گسسته به دست آید [۷ و ۵]. اما برای تعیین تنش افقی حداکثر رابطه‌ی خاصی ارائه نشده و این تنش معمولاً از تئوری کسلش-اندرسون یا رابطه‌ی پورولاستیک محاسبه می‌شود [۶ و ۵]. در مجموع، تعیین مستقیم تنش‌های برجا پرهزینه، وقت گیر و پرخطر است. همچنین تعداد آزمایش‌های لازم برای این کار نیز محدود بوده و برای عمق‌های خاصی امکان‌پذیر است (یعنی به شکل گسسته است). ضمن آنکه این آزمایش‌ها برای تعدادی از چاه‌های نفتی و برخی میادین نیز قابل انجام نیست. از همین رو، هدف مطالعه‌ی حاضر تعیین غیرمستقیم این تنش‌ها از نگارهای چاه است.

در بسیاری از فرآیندهای زمین‌شناسی و مشکلات مهندسی، تنش‌های برجای زمین نقش مهمی ایفا می‌کنند که از آن جمله می‌توان به تعیین مسیر مهاجرت هیدروکربن‌ها در زمین اشاره کرد. ممکن است در میادینی که با مهاجرت هیدروکربن مواجهند این تنش‌ها روی دیواره‌ی چاه‌های حفر شده به قدری باشد که سبب ریزش دیواره‌ی چاه گردد. تعیین مقدار و جهت این تنش‌ها روی دیواره‌ی چاه‌های حفر شده جهت جلوگیری از مشکلات مهندسی چاه (مثل پایداری چاه و مقدار تولید ماسه‌ی همراه نفت) و همچنین جلوگیری از مشکلات زمین‌شناسی مانند مهاجرت هیدروکربن و نفوذپذیری شکستگی‌ها ضروری است. کنترل مقدار و جهت تنش‌های برجا از اصلی‌ترین عوامل در حفاری، استخراج، تکمیل چاه و به ویژه در عملیات شبیه‌سازی تولید مخزن است [۳ و ۱]. بنابراین داشتن اطلاعات کامل از تنش‌های برجا در هنگام حفاری چاه‌های نفتی (به ویژه در نواحی با تکتونیک فعال که مخازن نفتی شکستگی‌های طبیعی دارند) ضروری است. تنش‌های برجا شامل تنش افقی حداقل (S_H)، تنش افقی حداکثر (S_H) و تنش افقی قائم (S_V) هستند. متخصصان چاه‌نگاری و حفاری در نواحی مختلف دنیا برای تعیین تنش افقی

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (sh.maleki.ch@gmail.com)

۱- روش تحقیق

۱-۱- تعیین مدول‌های الاستیک

بر اساس روابط الاستیکی دینامیکی، در صورت داشتن سرعت امواج فشاری و برشی و در اختیار داشتن چگالی لایه‌های زیرسطحی می‌توان متغیرهای الاستیک سنگ از طریق روابط ۱-۵ تا ۵ را تعیین کرد [۷۶]:

$$G_{dyn} = \rho V_s^2 \quad (۱)$$

$$\lambda_{dyn} = \rho V_s^2 - 2\rho V_p^2 \quad (۲)$$

$$k_{dyn} = \rho V_p^2 - \frac{4}{3}\rho V_s^2 \quad (۳)$$

$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۴)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (۵)$$

در این روابط، V_p و V_s سرعت موج فشاری و برشی، ν نسبت پواسون، E مدول یانگ، G مدول برشی، λ مدول لامه و K مدول بالک دینامیکی است.

۲-۱- تعیین تنش‌های عمودی

برای تعیین تنش روباره، به چگالی سنگ نیاز داریم. ابزار چاه‌نگاری تعیین چگالی سازند، اشعه‌ی گامای فعال دارد. تنش قائم برابر با تنش روباره است. با در نظر گرفتن این شرایط، مقدار تنش روباره یا تنش عمودی (S_v) توسط انتگرال گیری چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق مورد نظر و از رابطه‌ی ۶-۶ به دست می‌آید [۶۵]:

$$S_v = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (۶)$$

در این رابطه ($\rho(Z)$) چگالی سنگ در عمق Z و $\bar{\rho}$ چگالی متوسط لایه‌های سنگی است. بنابراین می‌توان گفت که اندازه‌ی تنش قائم (S_v) در واقع برابر است با انتگرال چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق مدنظر [۸]. از آنجا که نگار چگالی از سطح تا عمق مدنظر در دسترس نیست می‌توان چگالی را با استفاده از برون‌یابی نگار چگالی یا از طریق سایر نگارها تعیین کرد. برای نواحی دریایی بر اساس عمق آب تصحیحات لازم انجام می‌شود و مقدار تنش روباره از رابطه‌ی ۷-۷ تعیین می‌شود.

$$S_v = \rho_w g z_w + \int_{z_w}^z \rho(z) g dz \approx \rho_w g z_w + \bar{\rho} g (z - z_w) \quad (۷)$$

در این رابطه (ρ_w) چگالی آب و Z_w عمق آب است.

۳-۱- تعیین تنش‌های افقی

جهت تحلیل پایداری چاه، تعیین دقیق مقدار تنش‌های افقی ضروری خواهد بود. از طریق تخمین دقیق این تنش‌ها می‌توان از به وجود آمدن ترک یا شکستگی دیواره‌ی چاه پیشگیری کرد. تنش‌های افقی شامل دو تنش افقی حداکثر (σ_{Hmax}) و حداقل (σ_{Hmin}) است. اگر تنش عمودی اعمال شده روی یک توده‌ی سنگ مقدار مشخصی باشد، در نتیجه‌ی تراکم عمودی سنگ، تنش افقی نیز به سنگ وارد می‌شود. تعیین تنش‌های افقی به دو روش مستقیم و غیرمستقیم امکان‌پذیر است. در روش مستقیم تنش‌های افقی از طریق آزمایش‌های مکانیک سنگ و در روش غیرمستقیم به کمک نگارهای حاصل از چاه‌نگاری محاسبه می‌شوند. در صورت محدودیت داده‌های حاصل از آزمایش‌های مکانیک سنگ، جهت تعیین پیوسته‌ی این تنش‌ها می‌توان از روابط تجربی استفاده کرد. روابط تجربی مختلفی جهت تخمین تنش‌های افقی حداکثر ارائه شده است. اما برای تعیین تنش‌های افقی حداکثر دو روش وجود دارد. از جمله روابط بسیار رایج و پرکاربرد جهت محاسبه‌ی تنش افقی حداکثر و حداکثر رابطه‌ی پوروالاستیک است. در این رابطه از فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکنیکی استفاده می‌شود [۶].

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_h}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \varepsilon_H}{1-\nu^2} \quad (۸)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_H}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \varepsilon_h}{1-\nu^2} \quad (۹)$$

در این روابط α ضریب بایوت، ν نسبت پواسون، P_p فشار منفذی و ε_H و ε_h کرنش در جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل است.

۲-۲- بحث و بررسی

همان‌طور که گفته شد برای تعیین تنش‌های برجا روابط متفاوتی ارائه شده است. در این تحقیق از روابط متداول‌تر و پرکاربردتر استفاده شده است. برای تعیین تنش‌های برجا در چاه مورد مطالعه (با جنس سنگ مخزن آهک بایومیکرایت) در میدان تحت بررسی، ابتدا از طریق نگارهای چاه و با استفاده از روابط ۱-۵ تا ۵ مقادیر مدول‌های الاستیکی دینامیکی سنگ تعیین شد.

سپس با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی (سه نمونه سنگ تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره) برای مدول یانگ کالیبراسیون انجام گرفت و مقادیر به حالت الاستیکی استاتیکی تبدیل شد (شکل ۱-۱). گولوبو و



رایین اویچ بر اساس مطالعاتی که روی سنگ‌های کربناته انجام دادند رابطه‌ی ۱۰- را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس تغییرات زمان موج فشاری ارائه کردند [۹].

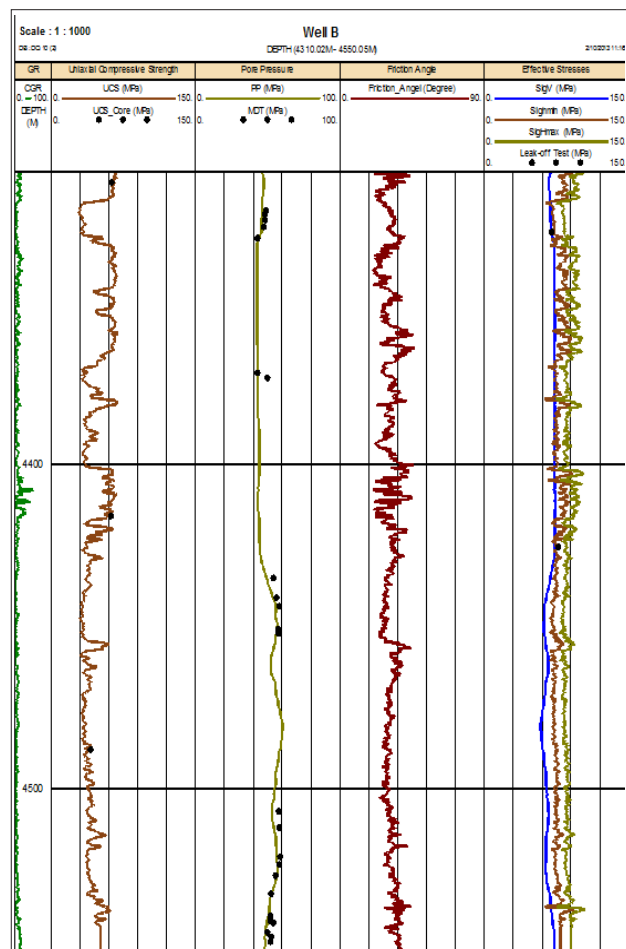
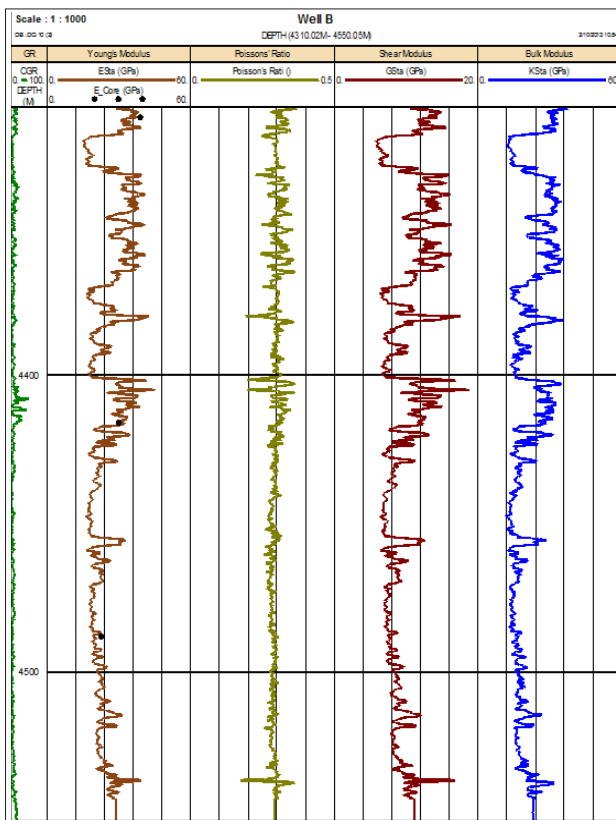
$$UCS = 10^{(2.44+109.14/\Delta t)} / 145 \quad (10)$$

سپس مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره از رابطه‌ی ۱۰- محاسبه شده و با مقادیر حاصل از مقاومت فشاری تک‌محوره کالیبره گردید. مقادیر محاسبه شده، در شکل ۲- در بخش اول نشان داده شده است. پس از آن فشار هیدرواستاتیک از رابطه ۶- محاسبه شد؛ با این تفاوت که مقدار چگالی را برابر چگالی آب در نظر گرفتیم. در نهایت نیز فشار منفذی از رابطه‌ی ایتون (رابطه‌ی ۱۱) محاسبه گردید که مقادیر آن در شکل ۲- در بخش ۲- نشان داده شده است. ایتون برای پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی از طریق زمان عبور موج

فشاری، رابطه‌ی ۱۱- را که رابطه‌ی تجربی است ارائه کرد [۱۰]:

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^3 \quad (11)$$

در این رابطه، Δt_n زمان عبور موج یا کندشدگی در فشار نرمال و Δt زمان عبور موج حاصل از نگار صوتی چاه است. همان‌طور که گفته شد در این تحقیق با جایگزینی مقادیر مربوطه در رابطه‌ی ۱۱-، فشار منفذی برای تعیین تنش‌های برجا محاسبه گردید که شماتیک این مقادیر در شکل ۲- نشان داده شده است. رابطه‌ی ایتون یکی از متداول‌ترین روابط جهت پیش‌بینی فشار منفذی است. هرچند استفاده از این رابطه به معنای صحت مقدار فشار منفذی حاصل نیست و این فشار باید با داده‌های آزمایش فشار منفذی واقعی سازند که از ابزار MDT به دست می‌آید کالیبره شود که در تحقیق حاضر این کار انجام گردید (شکل ۲-، بخش ۲-، نقاط سیاه‌رنگ). در نهایت با جایگزینی این مقادیر در روابط-



در این شکل نمایی از مقاومت فشاری به دست آمده از رابطه‌ی گلوبو و رایین اویچ (بخش ۱-) و کالیبره شدن آن توسط مقادیر حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (نقاط سیاه‌رنگ)، فشار منفذی به دست آمده از رابطه‌ی ایتون (بخش ۲-) مقادیر کالیبره شده‌ی آن توسط MDT و با نقاط سیاه‌رنگ نشان داده شده و در بخش آخر مقادیر تنش حداقل افقی، تنش حداکثر افقی حاصل از رابطه‌ی پور و الاستیک، تنش قائم و همچنین مقادیر کالیبره شده‌ی تنش حداقل افقی حداقل از طریق آرمایش leak off (نقاط سیاه‌رنگ) برای چاه مورد مطالعه نشان داده شده است

نمایی از مدول‌های الاستیکی سنگ که از روابط ۱- تا ۵ به دست آمده و مقادیر کالیبره شده‌ی مدول یانگ که از مقادیر آرمایشگاهی و شیب نمودار تنش-کشش محاسبه شده (نقاط سیاه‌رنگ بخش اول)

گولوبو و رابین ویچ به دست آمد که در نهایت نتایج آن با نتایج حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی کالیبره شد. نتیجه‌ی این کالیبراسیون نشان داد که مناسب‌ترین رابطه برای منطقه‌ی مورد مطالعه رابطه‌ی تجربی گولوبو در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره است. بنابراین می‌توان این رابطه را به‌عنوان ورودی جهت تعیین پایداری چاه در این میدان به کار برد و سپس از رابطه‌ی ایتون مقدار فشار منفذی را تعیین کرد. پس از کاربرد و کالیبره شدن این رابطه مشخص شد که می‌توان آن را به‌عنوان رابطه‌ای مناسب جهت تعیین فشار منفذی میدان مورد مطالعه و میدانی با خصوصیات مشابه به کار برد. در نهایت مقدار تنش‌های برجا از نگارها محاسبه شد. نتایج حاصل نشان داد که مقادیر به‌شکل پیوسته هستند؛ یعنی برخلاف مقادیر حاصل از نمونه‌ی مغزه که تنش‌های برجا را به‌شکل محدود و گسسته نشان می‌دهند، این مقادیر نشان‌دهنده‌ی تنش‌های برجا برای کل مخزن هستند. این مقادیر همچنین می‌توانند در نقاطی که به‌دلیل شکستگی‌ها و شرایط ناپایدار چاه، امکان برداشت نمونه وجود ندارد به‌عنوان مقادیر مناسب جایگزین شوند. ضمن آنکه محاسبه‌ی مقادیر حاصل از نگارها نسبت به مقادیر آزمایشگاهی بسیار آسان‌تر بوده و هزینه‌ی کمتری نیز دارد. ■

۹ و ۸، مقادیر تنش‌های بر جای افقی حداقل و حداکثر به دست آمد و با قرار دادن چگالی سنگ در عمق مدنظر از نگار RHOB در رابطه ۶-، مقدار تنش قائم نیز محاسبه شد. نتایج محاسبات در شکل ۳- در بخش ۴- نشان داده شده است. البته این مقادیر دینامیکی و همراه با خطا هستند که مقدار این خطا برای تنش افقی حداقل زیاد است و باید توسط مقادیر واقعی (معمولاً آزمایش نشت سازند) کالیبره شود. در تحقیق حاضر با توجه به موجود بودن داده‌ها این کار انجام گردید

نتیجه‌گیری

متغیرهای ژئومکانیکی سنگ (مانند مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی تنش‌های بر جای افقی و تنش قائم) در هنگام حفاری چاه‌های نفتی و گازی، به‌عنوان ورودی جهت تعیین پایداری چاه یا محاسبه‌ی مقدار تولید ماسه‌ی همراه نفت چاه‌ها به کار می‌روند. به‌همین دلیل نیز تعیین آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو مطالعه‌ی حاضر جهت تعیین تنش‌های برجا در یکی از میدانی جنوب ایران انجام شد. مقاومت فشاری تک‌محوره از نگارهای چاه و با استفاده از روابط تجربی

پانویس‌ها

¹ Mini-Fracture Test

² Modular Dynamics Tester (MDT)

منابع

- [1] Moos, D., Zoback, M.D. (1990) Utilization Of Observations Of Wellbore Failure To Constrain The Orientation And Magnitude Of Crustal Stresses: Application To Continental, Deep Sea Drilling Project And Ocean Drilling Program Boreholes. J Geophys Res, 95: 930525-.
- [2] Plumb, R.A., Edwards, S., Pidcock, G., Lee, D. (2000) The Mechanical Earth Model And Its Application To High-Risk Well Construction Projects. In: SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Paper SPE 59128.
- [3] Sanaee, R., Shadizadeh, S.R., Riahi M.A. (2010) Determination Of The Stress Profile In A Deep Borehole In A Naturally Fractured Reservoir, International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences, 47, 599605-.
- [4] Haimson, B.C., Cornet, F.H. (2003) ISRM Suggested Methods For Rock Stress Estimation-Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) And/Or Hydraulic Testing Of Pre-Existing Fractures (HTPF). Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 40, 1011-1020
- [5] Zoback, M.D., Barton C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollimund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D., Wiprut D.J. (2003) Determination Of Stress Orientation And Magnitude In Deep Wells, International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 1049-1076.
- [6] Zoback, M. (2007) Reservoir Geomechanic, Cambridge University Press.
- [7] Fjaer, E., Holt, R.M., Hordrud, P., Raaen, A.M., Risnes, R. (2008) Petroleum Related Rock Rock Mechanic, Developments In Petroleum Science, Elsevier
- [8] Bell, J. S. (1989). "Investigating Stress Regimes In Sedimentary Basins Using Information From Oil Industry Wireline Logs And Drilling Records." Geological Applications Of Wireline Logs. Special Publication 48(Geological Society Of London), 305-325.
- [9] Chang, C., Zoback, M. D. Et Al. (2006) Empirical Relations Between Rock Strength And Physical Properties In Sedimentary Rocks, Journal Of Petroleum Science And Engineering, 51, 223-237.
- [10] Eaton, B.A. (1969) Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations, Journal of Petroleum Technology, 246, 13531360-.