

تعیین فشار بهینه گل حفاری توسط معیارهای موهر - کلمب و موگی - کلمب در یکی از چاه‌های نفت جنوب غرب ایران

محمد رضا آصف^۱، علیرضا نجیبی^۲

۱- عضو هیئت علمی دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

(asef@khu.ac.ir; najibi.alireza@gmail.com)

چکیده

بررسی پایداری چاه‌های نفت پیش از عمل حفاری باعث کاهش هزینه حفر و افزایش بهره‌برداری می‌گردد. یکی از پارامترهای تحلیل پایداری، پیش‌بینی فشار مجاز گل حفاری می‌باشد که توسط معیارهای شکست انجام می‌شود. در یکی از چاه‌های نفت جنوب غرب ایران، بدلیل اعمال فشار کمتر از مقدار مورد نیاز گل حفاری، شکستگی برشی بریکات در مقطعی از آن مشاهده گردیده است. در این تحقیق، حداقل فشار مجاز گل حفاری در این مقطع توسط معیارهای شکست گمانه موهر - کلمب و موگی - کلمب تعیین، و با مقدار فشار گل اعمال شده به سازند مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که هر دو معیار حداقل مقدار فشار گل مورد نیاز جهت حفاری این مقطع بیش از مقدار فشار گل اعمال شده می‌باشد. همچنین به دلیل عدم تاثیر تنش اصلی حد واسط در معیار موهر - کلمب، این معیار حداقل فشار مجاز گل حفاری را محافظه کارانه و بیش از معیار سه بعدی موگی - کلمب پیش‌بینی می‌کند. بر اساس نتایج این تحقیق، پیش‌بینی حداقل فشار مجاز گل حفاری بر اساس معیار شکست گمانه موگی - کلمب موجب تخمین منطقی این پارامتر می‌گردد و کاهش خطرپذیری و هزینه حفاری را به همراه دارد.

کلمات کلیدی: چاه، گل حفاری، معیار شکست، تنش برجا.

۱- مقدمه

در هنگام حفاری چاه‌های نفتی، عدم اعمال فشار بهینه گل حفاری، باعث بروز ناپایداری‌هایی در دیواره چاه می‌گردد (Zoback, M., 2007). در صورتی که فشار گل اعمالی کمتر از فشار گل مورد نیاز باشد، چاه در شرایط فشارش قرار می‌گیرد و شکستگی‌های برشی (بریکات) در جهت تنش بر جای افقی حداقل (S_H) گسترش می‌یابند. همچنین، اعمال فشار گل بیشتر از حد مجاز به سازند باعث می‌گردد که چاه در شرایط کشش قرار گیرد و شکستگی‌های کششی القایی در جهت تنش بر جای افقی حداکثر (S_H) گسترش یابند (Amadei, B., and Stephansson, O., 1997). معمولا برای رفع این مشکلات، گشادکردن دیواره چاه، نصب لوله جدار و یا انحراف چاه ضروری می‌باشد که خسارت‌های مالی فراوانی به همراه دارد (Zoback, M., et al., 2003). بنابراین تعیین حداقل و حداکثر فشار بهینه گل حفاری در هنگام حفر چاه الزامی می‌باشد. در این تحقیق مقادیر حداقل فشار بهینه گل حفاری در یکی از چاه‌های نفت جنوب غرب ایران توسط معیارهای شکست موهر - کلمب و موگی - کلمب تعیین و با مقادیر فشار گل اعمال شده به سازند جهت حفاری مقایسه می‌گردد.

۲- طراحی حداقل فشار بهینه گل حفاری با استفاده از معیار شکست

با حفاری چاه، حالت تنش‌های برجا تغییر می‌کند (S_V, S_H, S_H) که این عمل منجر به تمرکز تنش در اطراف دیواره می‌شود (Zhang, L., et al., 2010). در مواد الاستیک خطی، بیشترین تمرکز تنش در دیواره رخ می‌دهد و بنابراین انتظار می‌رود اولین شکستگی چاه از آنجا آغاز شود (Zoback, M., et al., 1985). برای آنالیز ناپایداری دیواره چاه، در اولین گام تنش‌های دیواره در برابر معیار شکست باید محاسبه شوند. بر اساس روابط کرش، تنش در دیواره یک چاه قائم توسط روابط زیر قابل محاسبه است (Peng, P., and Zhang, J., 2007; Kirsch, G., 1898):

$$\sigma_r = P_w$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= S_H + S_h - 2(S_H - S_h) \cos 2\theta - P_w \\ \sigma_z &= S_v - 2\nu (S_H - S_h) \cos 2\theta\end{aligned}\quad (1)$$

که θ زاویه چرخش درون چاه (حول محور چاه) نسبت به S_H در جهت عقربه‌های ساعت و P_w فشار گل حفاری است. از آن جا که تنش‌های برشی وجود ندارند، σ_z ، σ_{θ} و σ_r تنش‌های اصلی هستند که بر معیار شکست تاثیر می‌گذارند. بر اساس رابطه (۱) تنش‌های محوری و مماسی تابع θ هستند. این زاویه بیانگر جهت تنش‌ها در اطراف چاه هستند و از صفر تا 360° درجه به شکل سینوسی تغییر می‌کند (Moss, D., and Zoback, M., 1990). رابطه (۱) نشان می‌دهد که حداکثر مقادیر تنش محوری و مماسی در $\theta = \pm \pi/2$ و حداقل آنها در $\theta = 0$ یا π است. این نقاط بحرانی برای هر مقدار تنش برجا ثابت می‌ماند. تنش‌های مماسی و شعاعی در رابطه (۱) تابع فشار گل است، در حالی که تنش قائم این گونه نیست. بنابراین هر تغییری در فشار گل، فقط بر تنش‌های مماسی و شعاعی تاثیر می‌گذارد (Zoback, M., 2007). هنگامی که P_w کاهش می‌یابد، σ_{θ} به سمت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. بنابراین حد پائینی فشار گل در ارتباط با شکستگی بریکات است که لازمه آن $\sigma_{\theta} > \sigma_r$ است. در این شرایط ممکن است یکی از سه حالت زیر پیش آید (Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R., 2006):

$$1: \sigma_z \geq \sigma_{\theta} \geq \sigma_r$$

$$2: \sigma_{\theta} \geq \sigma_z \geq \sigma_r$$

$$3: \sigma_{\theta} \geq \sigma_r \geq \sigma_z$$

در $\theta = \pm \pi/2$ جایی که حداکثر تنش محوری و مماسی داریم، تنش فشاری زیاد شده و متعاقب آن تنش‌های اصلی گمانه به شکل زیر بدست می‌آیند (Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R., 2006).

$$\begin{aligned}\sigma_r &= P_w \\ \sigma_{\theta} &= A - P_w \\ \sigma_z &= B\end{aligned}\quad (2)$$

و برای A و B داریم:

$$\begin{aligned}A &= 3S_H - S_h \\ B &= S_v + 2\nu (S_H - S_h)\end{aligned}\quad (3)$$

۲-۱ معیار شکست گمانه موهر - کلمب

این معیار ساده‌ترین و پرکاربردترین معیار شکست است و بیان می‌کند که شکستگی برشی هنگامی رخ می‌دهد که مقدار تنش برشی در صفحه، از مقادیر مقاومت اصطکاکی و چسبندگی تجاوز کند. این معیار پیش‌بینی می‌کند که نسبت مقاومت برشی و تنش نرمال موثر بر سطح شکست، بصورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به مفهوم تنش موثر، توسط معیار موهر - کلمب داریم (Jaeger, J., et al, 2007):

$$\sigma_1 - P_0 = \sigma_c + q (\sigma_3 - P_0) \quad (4)$$

که در آن $q = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \sigma_c$ است. با مرتب کردن رابطه (۴)، این رابطه به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_1 = \sigma + q\sigma_3 \quad (5)$$

$$\sigma = \sigma_c - P_0 (q-1) \quad (6)$$

با توجه نسبت تنش‌های اصلی $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ، برای اولین حالت تشکیل بریکات $(\sigma_z \geq \sigma_{\theta} \geq \sigma_r)$ و $\sigma_1 = \sigma_z$ و $\sigma_r = \sigma_{\theta}$ است. با استفاده از معیار شکست موهر- کلمب و روابط (۵) و (۶)، حداقل فشار گل مجاز برای حالت اول داریم:

$$P_{wb1} = B - \sigma / q \quad (7)$$

اگر فشار چاه کمتر از P_{wb1} شود و تنش‌های اصلی در حالت اول صدق کنند، بریکات در دیواره چاه تشکیل می‌شود ($P_w < P_{wb1}$). به همین ترتیب حداقل فشار گل مجاز برای دو حالت دیگر در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۱. حداقل فشار گل مجاز در معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R., 2006).

حالت تنش‌های اصلی	حداقل فشار گل مجاز
$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = B - \sigma / q$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = A - \sigma / 1 + q$
$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = A - \sigma - qB$

۲-۲ معیار شکست گمانه موگی - کلمب

تابع شکست موگی غیرخطی است. چنین تابع شکستگی، زیاد مورد انتقاد قرار می‌گیرد زیرا پارامترهای آن به راحتی در ارتباط با پارامترهای معیار موهر-کلمب نیستند. بنابراین Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R., (2005) این تابع f را به شکل خطی زیر بیان کردند:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (8)$$

که در آن τ_{oct} تنش برشی اکتاهدرال و $\sigma_{m,2}$ تنش میانگین است که برای آنها داریم:

$$\tau_{oct} = 1/3 \sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$$

$$\sigma_{m,2} = \sigma_1 + \sigma_3 / 2 \quad (9)$$

رابطه (۸) توسعه معیار خطی کولمب به محدوده تنش موگی است ($\sigma_{m,2} - \tau_{oct}$) که به معیار شکست موگی - کولمب شناخته می‌شود. پارامترهای a و b توسط روابط زیر و بوسیله پارامترهای مقاومتی کولمب بدست می‌آیند:

$$a = (2\sqrt{2} / 3) c \cos \varphi$$

$$b = (2\sqrt{2} / 3) \sin \varphi \quad (10)$$

که در آن C چسبندگی و φ زاویه اصطکاک داخلی است. برای آزمایش‌های سه محوره ($\sigma_1 = \sigma_3$ یا $\sigma_2 = \sigma_3$) معیار موگی - کلمب همانند معیار موهر-کلمب عمل می‌کند. این معیار بر اساس ثابت‌های اولیه و ثانویه تنش، به شکل زیر بیان می‌شوند (Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R., 2006):

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \quad (11)$$

با استفاده از مفهوم تنش موثر، معیار موگی - کلمب به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$(I_1^2 - 3I_2)^{1/2} = a' + b' (I_1 - \sigma_2 - 2P_0) \quad (12)$$

که در آن

$$a' = 2c \cos \varphi$$

$$b' = \sin \varphi \quad (13)$$

که در این روابط C و φ چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ است. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، یکی از سه حالت تغییر بین تنش‌های اصلی در چاه اتفاق می‌افتد: ($\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$). از آن جا که ثوابت اول دوم تنش در تمام حالات یکسان

هستند، بنابراین با توجه به رابطه (۱۲) تنها تنش اصلی حدواسط از حالتی به حالت دیگر تغییر می کند. بنابراین سه حالت تغییر تنش های اصلی، بیانگر حالتی هستند که σ_2 معادل σ_z ، σ_θ ، σ_r می شود. برای هر یک از این سه حالت، فشار تشکیل بریکات بدست می آید. رابطه (۲) بیانگر بیشترین تمرکز تنشی است که باعث تشکیل بریکات می شود. با جایگزینی رابطه (۲) در رابطه (۱۱)، ثوابت اول و دوم تنش، به شکل زیر بدست می آیند:

$$I_1 = A + B$$

$$I_2 = AB + AP_w - P_w^2 \quad (14)$$

با در نظر گرفتن حالت $\sigma_2 = \sigma_\theta = A - P_w$ و $P_w = P_{wb1}$ با اجرای معیار موگی-کلمب (رابطه ۱۲) و رابطه (۱۴) داریم:

$$k = \sqrt{((A + B)^2 - 3(AB + AP_{wb1} - P_w^2))} - bP_{wb1} \quad (15)$$

و برای K داریم:

$$k = a' + b'(B - 2P_0) \quad (16)$$

بنابراین پائین ترین حد فشار گل در حالت اول برابر است با:

$$P_{wb1} = 3A + 2b'k - \sqrt{(H + 12(k^2 + b'Ak)) / 6 - 2b'^2} \quad (17)$$

$$H = A^2 (4b'^2 - 3) + (B^2 - AB) (4b'^2 - 12) \quad (18)$$

حداقل فشار مجاز گل برای دو حالت دیگر در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. حداقل فشار مجاز گل در معیار موگی - کلمب (Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R., 2006).

حالت تنش های اصلی	حداقل فشار گل مجاز
$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = 3A + 2b'k - \sqrt{(H + 12(k^2 + b'Ak)) / 6 - 2b'^2}$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = 1/2A - 1/6\sqrt{12[a' + b'(A - 2P_0)]^2 - 3(a - 2B)^2}$
$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = 1/6-2b'^2 [(3A - 2b'G) - \sqrt{(H + 12(G^2 - b'AG))}]$

در رابطه سوم، G برابر است با

$$G = K + b'/A \quad (19)$$

۳- تعیین حداقل فشار گل مجاز در چاه مورد مطالعه

در عمق ۴۶۸۱ متری چاه مورد مطالعه، با اعمال ۵۲ مگاپاسکال فشار گل حفاری به سازند، که کمتر از مقدار مجاز بوده است، چاه در حالت فشارش قرار گرفته و بریکات در آن ایجاد شده است. جدول زیر ویژگی های بریکات و چاه را در مقطع شکستگی نشان می دهد.

جدول ۳. ویژگی های بریکات و چاه در مقطع شکستگی

Depth	4.681 km
Breakout's degree from S_H (θ_b)	22.5°
Radius of the breakout (r_b)	3.35 Inch

Radius of the hole (R)	2.9375 Inch
Pore pressure (P_0)	48.2 MPa
Mud pressure (P_w)	52 MPa
Uniaxial compressive strength (σ_c)	100.4 MPa
Cohesion (C)	12 MPa
Internal Friction (φ)	50°
Density (ρ)	2.65 gr/cm ³

در عمق ۴۶۸۱ متری، با محاسبه تنش‌های برجای افقی و قائم داریم:

$$S_H = 163 \text{ MPa}$$

$$S_v = 122 \text{ MPa}$$

$$S_h = 87 \text{ MPa}$$

بنابراین نرخ تغییرات تنش‌های برجا با عمق به صورت زیر است:

$$S_H = 34.72 \text{ MPa / km}$$

$$S_v = 26.00 \text{ MPa / km}$$

$$S_h = 18.66 \text{ MPa / km}$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، شرایط گسلش امتداد لغز در منطقه حاکم است. به منظور تعیین حداقل فشار بهینه گل، تنش‌های اصلی نیز باید محاسبه گردند. بنابراین با استفاده از رابطه کرش (رابطه ۱) تنش‌های مماسی، شعاعی و محوری محاسبه شدند:

$$\sigma_r = 57.05 \text{ MPa}$$

$$\sigma_\theta = 348.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = 169.8 \text{ MPa}$$

از آن‌جا که تنش‌های مماسی و شعاعی به ترتیب حداکثر و حداقل تنش‌های اصلی می‌باشند، بنابراین حالت دوم شرایط تشکیل بریکات برقرار می‌باشد ($\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$). به منظور تعیین حداقل فشار مجاز گل (P_{wb2}) توسط معیار موهر-کلمب، با توجه به جدول ۱ داریم:

$$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r \rightarrow P_{wb2} = 71.8 \text{ MPa}$$

و جهت تعیین حداقل فشار گل مجاز توسط معیار موگی-کلمب، با توجه به جدول ۲ داریم:

$$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r \rightarrow P_{wb2} = 57.7 \text{ MPa}$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هر دو معیار حداقل فشار مجاز گل را بیش از فشار گل اعمال شده به سازند (۵۲ مگاپاسکال) پیش‌بینی می‌کنند. به دلیل تاثیر تنش اصلی حدواسط در معیار موگی-کلمب، این معیار حداقل فشار گل مجاز را کمتر و واقع بینانه‌تر از معیار موهر-کلمب پیش‌بینی می‌کند.

۴- نتیجه گیری

اعمال فشار گل حفاری کمتر از مقدار مورد نیاز باعث تشکیل شکستگی برشی بریکات در چاه می‌گردد که در صورت تشدید خسارت‌های فراوانی به همراه دارد. از این رو، به منظور تحلیل پایداری چاه، پیش‌بینی حداقل فشار مورد نیاز گل حفاری ضروری می‌باشد. در این تحقیق، در یکی از چاه‌های نفتی جنوب غرب کشور که شکستگی بریکات مشاهده شده بود، حداقل فشار مجاز گل حفاری توسط دو معیار موهر - کلمب و موگی - کلمب تعیین و با مقدار فشار گل اعمال شده در هنگام حفاری مقایسه شد. هر دو معیار حداقل فشار مجاز گل جهت حفر را بیش از مقدار فشار گل اعمال شده در هنگام حفاری پیش‌بینی نمودند. همچنین، به دلیل عدم تاثیر تنش اصلی حدواسط در معیار موهر - کلمب، این معیار این پارامتر را محافظه کارانه تر و بیش از معیار موهر - کلمب پیش‌بینی نمود. بنابراین، پیش‌بینی حداقل فشار مجاز گل حفاری توسط معیاری منطقی مانند معیار سه بعدی موگی - کلمب به منظور کاهش خطرپذیری عمل حفر و تحلیل مناسب پایداری چاه ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

- Al-Ajmi, A. M., and Zimmerman, R. W. (2005). "Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria". *Int. J. Rock mech. Min. Sci.*, 42(3), 431 - 439.
- Al-Ajmi, A. M., and Zimmerman, R. W. (2006). "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criteria". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43(8), 1200 - 1211.
- Amadei, B., and Stephansson, O. (1997). "Rock stress and its measurement". Chapman & Hall, London.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. W. (2007). "Fundamentals of rock mechanics" (4 ed.). Blackwell Publishing.
- Moos, D., and Zoback, M. D. (1990). "Utilization of Observations of Well Bore 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, 9305 - 9325.
- Peng, P., and Zhang, J. (2007). "Engineering geology for underground rocks". Springer, Berlin.
- Zhang, L., Cao, P., and Radha, K. C. (2010). "Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis". *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 10, 1016.
- Zoback, M. D., et al., (2003). "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 1049 - 1076.
- Zoback, M. D. (2007). "Reservoir geomechanics". Cambridge University Press, New York .
- Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L., and Anderson, R. N. (1985). "Well bore breakouts and in situ stress". *J. Geophys. Res.*, 90, 5523 - 5530.