

ارائه معیاری برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری در مخازن کربناته ایران

ناصر بهنام^۱، مهدی حسینی*^۲، محمد احمدی^۳

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۲۵

دریافت مقاله: ۹۹/۰۳/۲۸

چکیده

اهمیت ذخایر طبیعی نفت و گاز در دنیای امروز و غیر قابل تجدید بودن این ذخایر، بکارگیری روش های بهینه در حفاری و بازیابی از این مخازن را امری ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. حفاری با فشار زیر تعادل در واقع بهترین روش برای حفاری مخازن نفتی می باشد که فشار آن ها به دلیل تولید روزمره کاهش یافته است؛ زیرا حفاری به روش فراتعدالی برای دستیابی به مخزن باعث بروز ضایعات بسیار زیاد و همچنین افزایش هزینه ها می شود. حفاری فروتعدالی یک فناوری پیشرفته و نوعی عملیات حفاری می باشد که در آن فشار سیال حفاری درون چاه کمتر از فشار منفذی سازند می باشد. این روش حفاری یک روش بهینه در حفاری است که باعث کاهش هزینه های کلی تولید نفت، کاهش میزان خسارات وارده به مخازن نفت و در نهایت افزایش شاخص بهره دهی چاه های نفت و گاز می شود. این تحقیق با هدف بدست آوردن معیاری برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری به منظور ازدیاد برداشت نفت و جلوگیری از آسیب به سازند در مخازن کربناته ایران انجام شده است. برای رسیدن به این هدف اطلاعات ۱۳ چاه از میدان های مختلف نفتی ایران جمع آوری شده و سپس با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$ که یک برنامه عددی بر مبنای روش تفاضل محدود است، به مدلسازی چاه نفت در فشارهای مختلف گل حفاری پرداخته شده و در نهایت برای تحلیل پایداری و تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری، به روش الاستوپلاستیک از روش تعیین سطح تسلیم نرمالیزه (Normalized Yielded Zone Area) استفاده شده است. پس از رسم نمودار NYZA برای هر چاه به صورت جداگانه، با در نظر گرفتن فشارهای گل حفاری روی نمودار NYZA در بازه بین $NYZA=1$ تا فشار منفذی، حداقل و حداکثر فشار گل حفاری به ترتیب در $NYZA=1$ و $NYZA=0.7$ محاسبه شده و در نهایت رابطه ای به صورت نسبتی از فشار منفذی برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری ارائه شده است. این رابطه به صورت ضریب یا نسبتی از فشار منفذی بیان شده که در آن، تنها با داشتن فشار منفذی سازند می توان حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری را به منظور ازدیاد برداشت نفت و جلوگیری از آسیب به سازند تخمین زد.

کلید واژه ها: پایداری چاه نفت، فشار گل حفاری، حفاری فروتعدالی، روش NYZA

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

^۲ دانشیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد حفاری، دانشگاه صنعتی شاهرود

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

اهمیت ذخایر طبیعی نفت و گاز در دنیای امروز و غیر قابل تجدید بودن این ذخایر، بکارگیری روش های بهینه در حفاری و بازیابی از این مخازن را امری ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. مهندسين حفاری سعی می کنند برای جلوگیری از ایجاد هرگونه ناپایداری در دیواره چاه یک پنجره گل ایمن طراحی کنند (Yousefian et al., 2020; Behnam et al., 2020; Hosseini et al., 2020). حفاری فروتعادلی (Under Balanced drilling) یک فناوری پیشرفته و یک روش بهینه در حفاری است که در آن فشار سیال حفاری درون چاه کمتر از فشار منفذی سازند می باشد (Bennion and Thomas, 1999). کاهش آسیب دیدگی سازند، افزایش سرعت حفاری، کاهش هرزروی گل حفاری، افزایش عمر مته، بهبود ارزیابی سازند،

نیاز کمتر به انگیزش چاه، ایجاد سطح موثر بیشتر در چاه، تولید زود هنگام نفت، عدم نیاز و یا نیاز کمتر به اسید کاری چاه و همچنین کاهش آلودگی های زیست محیطی از مزیت های روش حفاری فرو تعادلی می باشند. روش حفاری فروتعادلی برای سازندهای سخت و عمیق که از سرعت حفاری کم و استهلاک مته زیاد برخوردارند و مخازنی با تروایی کم سنگ مخزن و دارای شکستگی های باز که به شدت آسیب پذیر هستند و همچنین مخازنی با شکستگی های بسیار زیاد که به علت هرزروی های شدید گل حفاری امکان حفاری فرتعادلی در آن ها وجود ندارد و همچنین مخازن تخلیه شده که امکان بالقوه هرزروی های شدید گل حفاری دارند، مناسب می باشد (Lake et al., 2007). در جدول (۱) برخی از مطالعات انجام شده در این خصوص آورده شده است.

جدول ۱. برخی از مطالعات انجام شده در مورد حفاری فروتعادلی

Previous studies	References
1 Investigating stability analysis of well wall in underbalanced drilling method	(McLellan and Hawkes, 2001)
2 Considering underbalanced drilling of a horizontal well in depleted reservoir	(Qiu et al., 2007)
3 Investigating underbalanced drilling in shales	(Islam et al., 2009)
4 Geomechanical study for feasibility study of underbalanced drilling in oil fields in northern Iraq	(Soroush et al., 2011)
5 Wellbore stability analysis in underbalanced drilling in Iranian oil fields	(Salehi et al., 2009)
6 Study of oil well wall stability in underbalanced drilling with NYZA analysis in one of the oil reservoirs of Asmari formation	(Gholami and Shahriar, 1386)
7 The stability analysis of oil well wall in underbalanced drilling in one of the oil reservoirs	(Hashemi et al., 1389)
8 Oil well wall stability analysis in underbalanced drilling method	(Sanei, 1390)
9 Determining the minimum safe mud weight in underbalanced drilling using analytical method in one of the oil fields in southwestern Iran	(Heidarian et al., 1391)
10 Studies of oil well stability analysis using discrete element method during underbalanced drilling in fractured reservoir considering the optimal production rate during drilling and the least amount of instability in reservoir A of Parsi field	(Farhi et al., 1394)
11 Considering vertical oil well stability analysis in underbalanced drilling using ABAQUS software in carbonate formation	(Akbari Nia, 1395)
12 Investigating the stability analysis of oil well wall in underbalanced drilling using ABAQUS software	Daniali and Ebrahimabadi, (1397)

منظور ازدیاد برداشت نفت و جلوگیری از آسیب به سازند در مخازن کربناته ایران بدست آورده شود، که این روابط به صورت نسبت یا ضریبی از فشار منفذی سازند بیان می شوند.

در این تحقیق سعی شده با استفاده از مدلسازی عددی و همچنین روش سطح تسلیم نرمالیزه دو رابطه یا معیار برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعادلی گل حفاری به

مقدار استاتیکی این پارامتر با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی مغزه های چاه بدست می آید و مقدار دینامیکی این پارامتر هم در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه اولتراسونیک و هم با استفاده از لاگ صوتی بدست می آید که در این تحقیق با توجه به در دسترس نبودن مغزه های چاه، مقدار دینامیکی آن با استفاده از لاگ صوتی و توسط رابطه (۴) بدست آمده است (Fjaer et al., 2008).

$$v_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4)$$

که در آن v_d ، نسبت پواسون دینامیکی و V_p و V_s ، سرعت موج فشاری و موج برشی برحسب کیلومتر بر ثانیه می باشد.

۲-۲. مدول یانگ

این پارامتر یکی از مهم ترین پارامتر های مورد نیاز در تحلیل های زمین مکانیکی می باشد که مقدار استاتیکی آن در آزمایشگاه و با استفاده از آزمایش مقاومت تک محوره (غیر محصور) بر روی مغزه های چاه بدست می آید و مقدار دینامیکی آن هم در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه اولتراسونیک و هم با استفاده از لاگ صوتی بدست می آید که در این تحقیق با توجه به در دسترس نبودن مغزه های چاه، مقدار دینامیکی آن با استفاده از لاگ صوتی و توسط رابطه (۵) بدست آمده است (Fjaer et al., 2008).

$$E_d = \frac{\rho_b V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5)$$

که در آن E_d ، مدول یانگ دینامیکی برحسب گیگاپاسکال و ρ_b ، چگالی برحسب گرم بر سانتیمترمکعب و V_p و V_s ، سرعت موج فشاری و موج برشی برحسب کیلومتر بر ثانیه می باشد.

در این تحقیق برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی از رابطه (۶) که برای سنگ های کربناته ارائه شده است استفاده شده است (Ameen et al., 2009).

با توجه به اینکه اغلب مخازن ایران از نوع کربناته با شکستگی های فراوان هستند، کاربرد حفاری فرا تعادلی در این مخازن باعث ایجاد مشکلات عدیده ای از جمله هرزروی گل می گردد در نتیجه برای جلوگیری از بروز این مشکل از حفاری فروتعدالی استفاده می شود. تا کنون در ایران رابطه ای برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری در سنگ های کربناته ارائه نشده است که جزو نوآوری های این پژوهش محسوب می شود. برای استفاده از روش حفاری فروتعدالی تنها با داشتن فشار منفذی سازند می توان حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری را تخمین زد.

۲. نحوه محاسبه خواص ژئومکانیکی مخزن از داده های لاگ چاه

در این تحقیق مدول های الاستیک مخزن با استفاده از چگالی و سرعت موج طولی (فشاری) بدست آمده از لاگ چگالی و لاگ صوتی، محاسبه شده اند. با اندازه گیری این خواص پارامترهای ژئومکانیکی سازند از طریق روابط (۱) تا (۱۴) بدست آورده شده است (Fjaer et al., 2008; Mier and Stewart, 1990). فقط لاگ های زمان عبور موج فشاری در داده ها موجود بود.

$$V_p = \frac{1}{\Delta T_p} \quad (1)$$

$$\Delta T_s = \frac{1}{V_s} \quad (2)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = 1.89 \quad (3)$$

که در این روابط V_p و V_s ، سرعت موج فشاری و موج برشی برحسب متر بر ثانیه و ΔT_p و ΔT_s ، زمان عبور موج فشاری و موج برشی برحسب ثانیه برمتر میباشد. رابطه (۳) برای سنگ آهک ارائه شده است (Mier and Stewart, 1990).

۲-۱. نسبت پواسون

به علت عدم وجود مغزه برای انجام آزمایش برزیلی مقدار مقاومت کششی یک دهم مقاومت فشاری تک محوره در نظر گرفته شده است. برای محاسبه این پارامتر از رابطه (۱۰) استفاده شده است (Ali et al., 2003).

$$\sigma_t = \frac{1}{10} \times UCS \quad (10)$$

که در آن UCS ، مقاومت فشاری تک محوره برحسب مگاپاسکال و σ_t ، مقاومت کششی برحسب مگاپاسکال می باشد.

۲-۶. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از داده های آزمایشگاهی مقاومت فشاری سه محوره بدست می آیند که در این تحقیق با استفاده از رابطه (۱۱) چسبندگی و از رابطه (۱۲) زاویه اصطکاک داخلی محاسبه شده اند (Yuan et al., 2013).

$$UCS = 2S_0 \left[(\mu_i^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu_i \right] \quad (11)$$

که در آن UCS ، مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال و S_0 ، چسبندگی برحسب مگاپاسکال و μ_i تانژانت زاویه اصطکاک داخلی می باشد.

زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از لاگ های مربوط به چاه ها شامل لاگ نوترون و لاگ اشعه گاما به دست می آید که در این تحقیق با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) بدست آورده شده است (Maleki et al., 2014).

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (12)$$

که در آن ϕ ، تخلخل و $NPHI$ ، تخلخل نوترون و V_{shale} حجم شیل می باشد (Maleki et al., 2014).

$$E_s = 0.541E_d + 12.852 \quad (6)$$

که در آن E_s ، مدول یانگ استاتیکی برحسب گیگاپاسکال و E_d ، مدول یانگ دینامیکی برحسب گیگاپاسکال می باشد.

۲-۳. مدول برشی و مدول بالک

مدول برشی دینامیکی و مدول بالک دینامیکی توسط لاگ صوتی و چگالی بدست می آیند. در این تحقیق با استفاده از مقادیر مدول یانگ استاتیکی و نسبت پواسون استاتیکی توسط روابط (۷) و (۸) محاسبه شده اند (Yuan et al., 2013).

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\nu)} \quad (8)$$

که در آن G_s و K_s و E_s ، به ترتیب مدول برشی استاتیکی، مدول بالک استاتیکی و مدول یانگ استاتیکی برحسب گیگاپاسکال و ν_s ، نسبت پواسون استاتیکی می باشد.

۲-۴. مقاومت فشاری تک محوره

این پارامتر عمدتاً در آزمایشگاه و به طریقه استاتیکی با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی مغزه های چاه محاسبه می شود که در این تحقیق با توجه به در دسترس نبودن مغزه های چاه، مقدار آن توسط رابطه (۹) که برای سنگ آهک ارائه شده، بدست آورده شده است (Najibi et al., 2015).

$$UCS = 2.45V_p^{1.82} \quad (9)$$

که در آن UCS ، مقاومت فشاری تک محوره برحسب مگاپاسکال و V_p ، سرعت موج فشاری برحسب کیلومتر برثانیه می باشد.

۲-۵. مقاومت کششی

و (۱۷) برای حالات مختلف گسلش می توان مقدار تنش های افقی حداقل و حداکثر را محاسبه کرد

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_v - P_p}{S_{h_{min}} - P_p} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu \right]^2 \quad (16) \quad (\text{گسلش نرمال})$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{H_{max}} - P_p}{S_v - P_p} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu \right]^2 \quad (17) \quad (\text{گسلش معکوس})$$

که در آن σ_1 ، تنش اصلی حداکثر و σ_3 ، تنش اصلی حداقل و S_v ، تنش قائم و P_p ، فشار منفذی سازند و $S_{h_{min}}$ ، تنش افقی حداقل و $S_{H_{max}}$ ، تنش افقی حداکثر و μ ، تانژانت زاویه اصطکاک داخلی می باشد.

۴. روش تعیین سطح تسلیم نرمالیزه (NYZA)

برای تعیین فشار گل حفاری روش های مختلفی از جمله روش الاستیک، روش الاستوپلاستیک وجود دارد. ساده ترین روش، روش الاستیک است؛ چرا که حل آن نیازمند متغیرهای کمتری است. اما فشار گل حاصل از این روش، محافظه کارانه است.

از این رو با وجود پیچیده بودن معادلات روش الاستوپلاستیک، برای یافتن فشار گل نزدیک به واقعیت از این روش استفاده می شود. در این حالت مقاومت باقیمانده سنگ می تواند بارهای القایی اطراف دیواره چاه را تحمل کند. یکی از روش های تعیین فشار گل حفاری در شرایط الاستوپلاستیک، استفاده از متغیر سطح تسلیم نرمالیزه (NYZA) است. سطح تسلیم نرمالیزه از تقسیم مساحت ناحیه پلاستیک یا تسلیم اطراف دیواره چاه به مساحت اولیه چاه بدست می آید. شکل (۱) سطح تسلیم نرمالیزه را نشان می دهد که مقدار آن از رابطه (۱۸) بدست می آید (Hawkes and McLellan, 1996).

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR - GR_{max}} \quad (13)$$

که در آن V_{shale} ، حجم شیل و GR ، مقدار اشعه گاما ری و GR_{min} و GR_{max} ، حداقل و حداکثر مقدار اشعه گاما در عمق مورد نظر می باشد.

۷-۲. فشار منفذی

برای بدست آوردن فشار منفذی روش ها و معادلات تجربی گوناگونی وجود دارد که در این تحقیق فشار منفذی با استفاده از سرعت عبور موج فشاری از طریق زمان عبور موج فشاری توسط رابطه (۱۴) بدست آورده شده است.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^x \quad (14)$$

که در آن P_{pg} ، گرادیان فشار منفذی سازند و OBG ، گرادیان تنش روباره و P_{ng} ، گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک (که معمولا برابر با 0.45 psi/ft) و Δt_n ، زمان عبور موج فشاری (طولی) بر روند طبیعی و Δt ، زمان عبور موج فشاری (طولی) بدست آمده از نگار صوتی چاه و x ، ضریب نمایی رابطه ایتون می باشد (آدیم و همکاران، ۱۳۹۷).

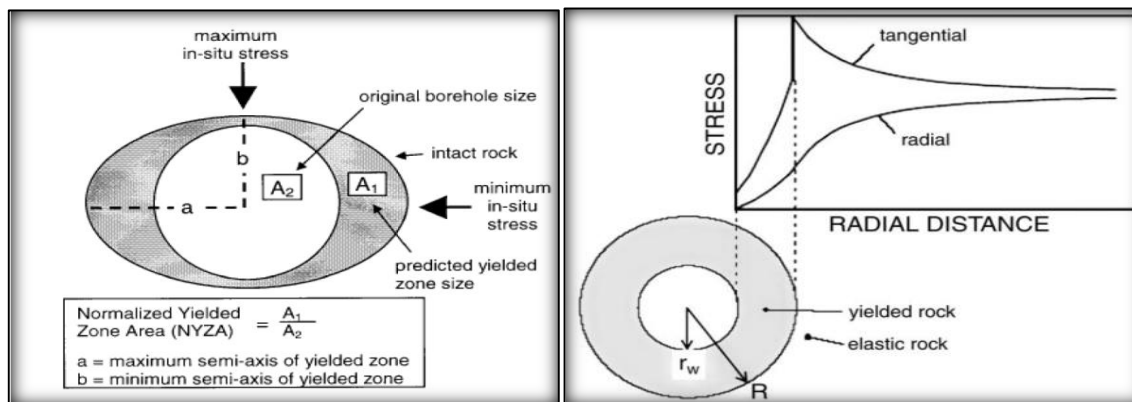
۳. نحوه محاسبه تنش های برجای قائم، افقی حداقل و افقی حداکثر

تنش قائم در هر نقطه از چاه، معادل وزن روباره می باشد که با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می شود (Yuan et al., 2013).

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i g \quad (15)$$

که در آن σ_v ، تنش قائم و ρ_i ، چگالی و h_i ، ضخامت لایه i ام و g ، ثابت شتاب گرانشی می باشد.

برای به دست آوردن تنش افقی حداقل و حداکثر از تئوری گسلش اندرسون استفاده شده است. با استفاده از روابط (۱۶)



شکل ۱. مفهوم شاخص سطح تسلیم نرمالیزه NYZA (Hawkes and McLellan, 1996)

۵. مدل‌سازی عددی چاه نفت با استفاده از نرم افزار

FLAC^{2D}

در این تحقیق برای بدست آوردن معیاری برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری در چاه‌های نفت، مدل‌سازی ۱۳ چاه از میدان‌های مختلف نفتی ایران با استفاده از نرم افزار FLAC^{2D} در فشار گل‌های مختلف، انجام شده و مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد مدل در این مدل‌سازی ۳ در ۳ متر و شعاع چاه در تمام مدل‌ها برابر ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مرزهای مدل در این مدل‌سازی به اندازه ۱۰ برابر شعاع چاه از مرکز چاه فرض شده است. تراکم مش بندی در اطراف چاه بیشتر می‌باشد و با فاصله گرفتن از مرکز مدل و دیواره چاه تراکم مش بندی کمتر می‌شود. در این مدل‌سازی آنالیز الاستوپلاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. معیار رایج در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی که غالباً در تحلیل پایداری چاه نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد معیار موهر- کلمب می‌باشد. مرزهای چپ و راست مدل در راستای X و مرزهای بالا و پایین در راستای Y ثابت و فیکس شده است. در تمام مدل‌ها وزن مخصوص توده سنگ ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است (شکل ۲). در این تحقیق برای مشخصات سیال که همان نفت بوده میزان چگالی ۶۹۲ کیلوگرم بر متر مکعب و مقدار مدول بالک ۰/۶۳ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده و در مدل‌سازی لحاظ شده است و همچنین سایر ویژگی‌های مکانیکی لایه سنگی با توجه

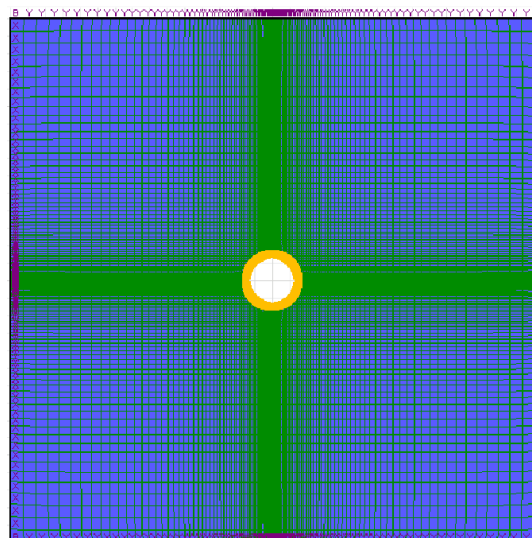
$$NYZA = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{R}{r_w}\right)^2 - 1 \quad (18)$$

که در آن NYZA، سطح تسلیم نرمالیزه و A_1 ، مساحت ناحیه پلاستیک اطراف دیواره چاه، A_2 ، مساحت اولیه چاه، R شعاع منطقه پلاستیک چاه و r_w شعاع اولیه چاه می‌باشد.

بر اساس روش مک لیلان و هاوکس، چاه در شرایط الاستوپلاستیک زمانی پایدار است که سطح تسلیم نرمالیزه کوچکتر از ۱ باشد یعنی محدوده فشار گل اعمالی به دیواره چاه در حدی باشد که سطح تسلیم نرمالیزه تشکیل شده کمتر از ۱ باشد. اگر مقدار عددی پارامتر NYZA بیشتر از یک باشد باعث مشکلات جدی در عملیات حفاری و ناپایداری دیواره چاه خواهد شد. بنابراین مقدار بحرانی پارامتر NYZA برابر یک می‌باشد. تجارب میدانی نشان

داده که شروع مشکلات ناپایداری چاه معمولاً با NYZA بزرگتر از یک اتفاق می‌افتد (Hawkes and McLellan, 1996). بنابراین در این تحقیق برای بدست آوردن معیاری برای تخمین حداقل فشار فروتعدالی گل حفاری مقدار NYZA=۱ بعنوان یک مقدار آستانه برای حفاری چاه در شرایط الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است.

به جدول (۲) وارد نرم افزار شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای بدست آمده برای هر چاه مربوط به عمقی می باشد که مخزن در آن قرار دارد.



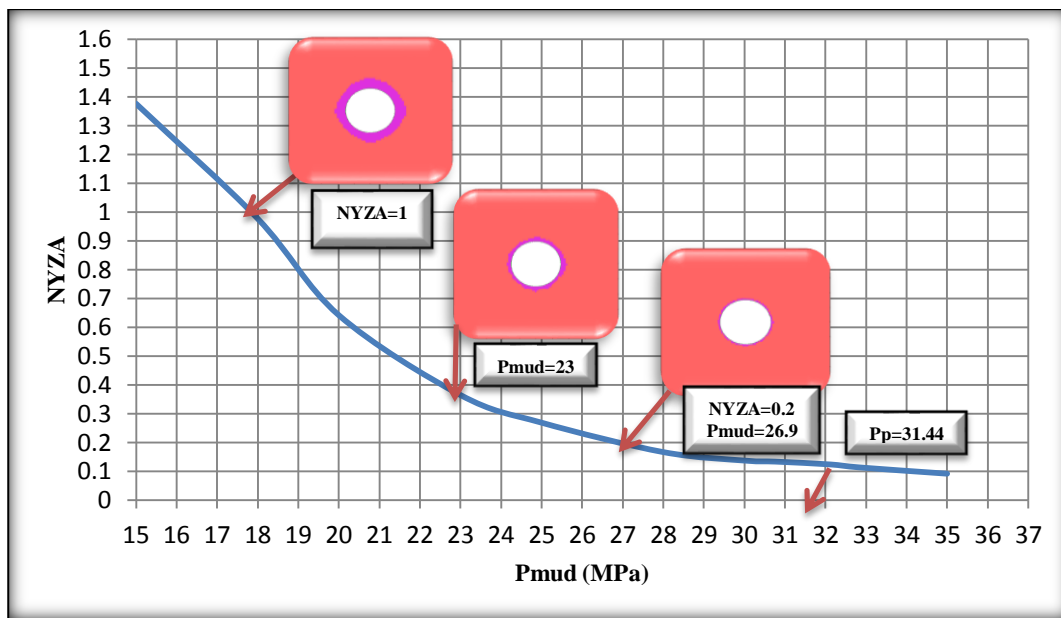
شکل ۲. ابعاد مدل ساخته شده و شبکه زون بندی در اطراف چاه

جدول ۲. داده‌های ورودی ۱۳ چاه جهت مدل‌سازی

Well number	H (m)	K (GPa)	G (GPa)	C (MPa)	Φ (Degree)	UCS (MPa)	T (MPa)	σ_v (MPa)	σ_{Hmax} (MPa)	σ_{Hmin} (MPa)	Pp (MPa)
1	3720	36.66	16.92	14.205	38.775	136	13.6	96.7	59.4	44.5	31.1
2	3838	38.49	17.76	9.055	57.366	53	5.3	99.8	84	63.5	43.5
3	4146	40.22	18.56	11.205	51.592	78	7.8	107.8	71.2	57.8	42
4	4300	33.33	15.38	8.418	55.655	52	5.2	111.8	94.7	84.5	53.5
5	3980	26.04	19.53	11.411	49.993	83	8.3	103.5	75	68	54.3
6	4192	36.66	22	11.418	54.973	72	7.2	109	79.8	60	40
7	3011	26.353	14.612	7.66	55.11	47	4.7	78.29	54.8	50.89	32.56
8	3764	6.8	3.14	13.07	38	40	4	97.87	59	49.5	34.4
9	3743	30.178	17.501	9.8	53.5	65	6.5	97.37	68.16	63.29	31.61
10	3759	30.197	15.488	8.1	54	51	5.1	97.83	68.48	63.59	34.42
11	2634	13.55	10.16	6.564	49.805	48	4.8	68.5	51.4	37.8	27
12	2851	25	11.53	9.762	40.716	89.5	8.95	73.6	66	56	40
13	3167	25.445	16.155	9	53	60	6	82.36	57.65	53.54	31.44

مدلسازی عددی که شامل خروجی‌های مدل از نرم افزار $FLAC^{2D}$ بود به نرم افزار اتوکد انتقال داده شد، سپس مساحت سطح پلاستیک (سطح تسلیم نرمالیزه) اطراف دیواره چاه در فشار گل‌های مختلف محاسبه شده و با نمودار شکل (۳) بدست آمده از مدل‌سازی عددی چاه شماره ۱۳ رسم شده است.

در ادامه برای تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی های صورت گرفته، از روش سطح تسلیم نرمالیزه (NYZA) استفاده شده است به این صورت که تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف چاه حاصل از فشارهای مختلف گل حفاری، بدست آمده از تقسیم آن بر مساحت اولیه چاه، مقدار NYZA در فشارهای مختلف گل حفاری محاسبه شده و نمودار NYZA در مقابل فشارهای مختلف گل حفاری برای تک تک چاه ها، مانند



شکل ۳. وضعیت الاستوپلاستیک اطراف مدل و میزان NYZA در فشارهای مختلف گل حفاری چاه شماره (۱۳)

مشکلات ناپایداری چاه معمولاً با NYZA بزرگتر از یک اتفاق می افتد و مقدار بحرانی پارامتر NYZA برابر یک می باشد لذا برای تعیین حداقل فشار فروتعدالی گل حفاری برای تمام ۱۳ چاه، میزان فشارهای گل در NYZA=۱ مد نظر قرار گرفته شد و با توجه به اینکه کمترین میزان NYZA که پایداری تمام ۱۳ چاه در آن برقرار شد مقدار NYZA=۰/۲ بود، لذا برای تعیین حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری برای تمام ۱۳ چاه، این مقدار در نظر گرفته شد که در نهایت با تقسیم هر دسته از این فشارگل ها به فشار منفذی سازند نسبت ها یا ضرایبی بدست آمد که در جدول (۳) آورده شده اند.

۶. معادله تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری

پس از رسم نمودار NYZA در مقابل فشارهای مختلف گل حفاری برای تک تک چاه ها، با توجه به اینکه در حفاری فروتعدالی فشار گل حفاری کمتر از فشار منفذی سازند می باشد و اینکه افزایش میزان بازدهی و تولید نفت مد نظر می باشد که در آن چاه پایدار باشد لذا برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری، فشارهای گل کمتر از فشار منفذی در روی نمودار NYZA را می توان در نظر گرفت. با توجه به اینکه تجارب میدانی نشان داده که شروع

جدول ۳. میزان حداقل فشار گل در NYZA=۱ و حداکثر فشار گل در NYZA=۰/۲

و نسبت این فشارگل ها به فشار منفذی سازند برای ۱۳ چاه

Well number	P _p (MPa)	P _{mud} (MPa)		P _{mud} UBDmin / P _p (MPa)	P _{mud} UBDmax / P _p (MPa)
		NYZA= 1	NYZA=0.2		
1	31.1	19.85	29	0.638	0.932
2	43.5	30.25	40.6	0.695	0.933
3	42	30.25	39.4	0.720	0.938
4	53.5	38.9	50.8	0.727	0.949
5	54.3	39.8	49.8	0.733	0.917
6	40	24.7	37.3	0.617	0.932
7	32.56	21.15	29.6	0.649	0.909
8	34.4	22.15	32.6	0.644	0.947
9	31.61	16.25	28.7	0.514	0.908
10	34.42	21.75	32.7	0.632	0.95
11	27	18.25	25	0.676	0.926
12	40	24.3	34.8	0.607	0.87
13	31.44	17.8	26.9	0.566	0.855

که در این روابط $P_{mud_{UBDmax}}$ ، $P_{mud_{UBDmin}}$ به ترتیب مقدار حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری برحسب مگاپاسکال و P_p فشار منفذی سازند بر حسب مگاپاسکال می باشد.

۷. صحت سنجی روابط پیشنهاد شده

برای صحت سنجی روابط (۱۹) و (۲۰) داده‌های ۶ چاه از میدان های مناطق نفت خیز ایران در جداول (۴) و (۵) مورد بررسی قرار گرفته شده است که نتایج مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری استفاده شده با نتایج مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری بدست آمده از روابط (۱۹) و (۲۰) با هم مقایسه شده است. این نتایج در جداول (۴) و (۵) آورده شده است.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می شود، نسبت های بدست آمده از تقسیم هر فشارگل به فشار منفذی سازند بدست آورده شده اند که برای حداقل فشار فروتعدالی گل حفاری این اعداد بین ۰/۵۱۴ تا ۰/۷۳۳ و برای حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری این اعداد بین ۰/۸۵۵ تا ۰/۹۵ می باشند. در ادامه با گرفتن میانگین از نسبت های بدست آمده دو رابطه به صورت جداگانه برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری بدست آورده شد که این روابط به عنوان ضریبی از فشار منفذی به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) ارائه شده است.

$$P_{mud_{UBDmin}} = 0.65 P_p \quad (19)$$

$$P_{mud_{UBDmax}} = 0.92 P_p \quad (20)$$

جدول ۴. میزان فشار منفذی سازند مربوط به سه چاه از میدان های مناطق نفت خیز ایران و مقایسه نتایج

مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری استفاده شده با نتایج مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری بدست آمده از رابطه (۱۹)

	P_p (MPa)	$P_{mud_{UBDmin}}$ (MPa) used in drilling	References	$P_{mud_{UBDmin}}$ (MPa) obtained from the relationship (18)	Percentage error
1	56.34	35.54	(Najafipour et al., 1396)	36.62	% 3
2	31.05	19.22	(Saeedi Moghadam et al., 1391)	20.18	% 5
3	28.88	21.4	(Malai, 1395)	18.77	% 12.3

جدول ۵. میزان فشار منفذی سازند مربوط به سه چاه از میدان های مناطق نفت خیز ایران و مقایسه نتایج

مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری استفاده شده با نتایج مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری بدست آمده از رابطه (۲۰)

	P_p (MPa)	$P_{mud_{UBDmax}}$ (MPa) used in drilling	References	$P_{mud_{UBDmax}}$ (MPa) obtained from the relationship (19)	Percentage error
1	29.98	24.71	(Gholami and Shahriar, 1386)	27.58	% 11.6
2	16.63	15.95	(Hashemi et al., 1389)	15.3	% 4.1
3	15	12	(Sanei, 1390)	13.8	% 15

حدوداً بین ۰/۹۶ تا ۲/۶۳ مگاپاسکال و در جدول (۵) حدوداً بین ۰/۶۵ تا ۲/۸۷ مگاپاسکال می باشد.

همانطور که در جدول (۴) و (۵) کاملاً مشهود است نتایج فشار فروتعدالی گل حفاری استفاده شده با نتایج مقدار فشار فروتعدالی گل حفاری بدست آمده از روابط (۱۹) و (۲۰)، نزدیک به هم بوده و درصد اختلاف نتایج نسبتاً کمی با یکدیگر دارند. اختلاف بدست آمده بین نتایج در جدول (۴)

۸. نتیجه گیری

در این تحقیق برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری به منظور ازدیاد برداشت نفت و جلوگیری از آسیب به سازند ابتدا یک سری اطلاعات شامل ۱۳ چاه از میدان های مختلف نفتی ایران جمع آوری شده و سپس با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$ که یک برنامه عددی بر مبنای روش تفاضل محدود است، به مدلسازی چاه نفت در فشارهای مختلف گل حفاری پرداخته شده و در نهایت برای تحلیل پایداری و تخمین فشار فروتعدالی گل حفاری، به روش الاستوپلاستیک از روش تعیین سطح نرمالیزه (NYZA) استفاده شده است که پس از رسم نمودار NYZA برای هر چاه به صورت جداگانه، با در نظر گرفتن فشارهای گل حفاری روی نمودار NYZA در بازه بین $NYZA=1$ تا فشار منفذی، حداقل و حداکثر فشار گل حفاری به ترتیب در $NYZA=1$ و $NYZA=0/2$ محاسبه شده و در نهایت رابطه ای به صورت نسبتی از فشار منفذی برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری ارائه شده است. در این رابطه، تنها با داشتن فشار منفذی سازند می توان حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری را به منظور ازدیاد برداشت نفت و جلوگیری از آسیب به سازند تخمین زد. نتایج این پژوهش عبارتند از:

۱. با توجه به نمودار رسم شده NYZA می توان دریافت که مقدار فشار گل حفاری با مقدار NYZA رابطه معکوس دارد بطوریکه هر چه میزان فشار گل حفاری افزایش یابد دیواره چاه پایدارتر و میزان NYZA کاهش پیدا می کند.
۲. در جدول (۳) نسبت های فشارگل به فشار منفذی سازند بدست آورده شده اند که این نسبت ها برای حداقل فشار فروتعدالی گل حفاری بین $0/514$ تا $0/733$ و برای حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری بین $0/855$ تا $0/95$ می باشند.
۳. با گرفتن میانگین از نسبت های بدست آمده در جدول (۳)، دو عدد $0/65$ و $0/92$ حاصل شده که به صورت ضرایبی از فشار منفذی سازند برای تخمین حداقل و حداکثر فشار فروتعدالی گل حفاری به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) ارائه شده است.
۴. با توجه به اینکه اغلب مخازن ایران از نوع کربناته با شکستگی های فراوان هستند، کاربرد حفاری فرا تعدالی در این مخازن باعث ایجاد مشکلات عدیده ای از جمله هرزروی گل می گردد که برای جلوگیری از بروز این مشکل از حفاری فروتعدالی استفاده می شود در نتیجه استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) می تواند در حفاری این چاه ها مفید باشد.

منابع

- آدیم، ع.، ریاحی، م.، باقری، م.، ۱۳۹۷. تخمین فشار منفذی به روش های ایتون و باورز با استفاده از داده های لرزه نگاری و چاه پیمایی، نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، صص ۲۶۷-۲۷۵.
- اکبری نیا، ص.، ۱۳۹۵. تحلیل پایداری چاه عمودی در حالت حفاری فروتعدالی با استفاده از نرم افزار ABAQUS در سازند کربناته، اولین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و مکاترونیک ایران.
- حیدریان، م.، شفیع، م.، جلالی فر، ح.، جعفری، س.، ۱۳۹۱. تعیین حداقل وزن مجاز گل در حفاری تحت تعادل به روش تحلیلی در یکی از میداین جنوب غرب ایران، اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی.
- دانیالی، م.، ابراهیم آبادی، آ.، ۱۳۹۷. تحلیل پایداری دیواره چاه نفت در حفاری فروتعدالی به وسیله ی نرم افزار ABAQUS، هفتمین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی بارویکرد توسعه ارتباط دولت، دانشگاه و صنعت.

- سعیدی مقدم، س. افشون، ر. جلالی فر، ح.، ۱۳۹۱. امکان سنجی استفاده از حفاری زیر فشار تعادلی در یکی از مخازن نفتی جنوب ایران، اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی.
- صانعی، م.، ۱۳۹۰. آنالیز پایداری دیواره چاه در روش حفاری زیرفشار تعادلی، هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن.
- غلامی، ک. شهریار، ک.، ۱۳۸۶. بررسی پایداری دیواره چاه در روش حفاری تحت تعادل با آنالیز NYZA در یکی از مخازن نفتی سازند آسماری، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- فرهی، ع. سالاری راد، ح. احمدی، ب.، ۱۳۹۴. تحلیل المان مجزای پایداری دیواره چاه در حین حفاری فروتعدالی در مخازن شکافدار با در نظر گرفتن نرخ تولید بهینه حین حفاری و کمترین میزان ناپایداری (مطالعه موردی: مخزن A میدان پارس)، دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی.
- ملائی، ف.، ۱۳۹۵. تحلیل پایداری دیواره چاه در روش حفاری فروتعدالی با استفاده از روش عددی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.
- نجفی پور، ع. آهنگری، ک. آل علی، س. م.، ۱۳۹۶. تعیین پنجره گل مناسب و آنالیز حساسیت پایداری دیواره چاه افقی با استفاده از مدل سازی عددی در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران، اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۶۰-۶۷.
- هاشمی، م. شهبازی، خ. آبدیده، م.، ۱۳۸۹. تحلیل ناپایداری دیواره چاه در روش حفاری تحت تعادلی در یکی از مخازن نفتی، اولین همایش ملی فناوری های نوین در صنایع نفت و گاز.
- Ali, A.H.A., Brown, T., Delgado, R., Lee, D., Plumb, D., Smirnov, N., Marsden, R., Prado-Velarde, E., Ramsey, L., Spooner, D. and Stone, T., 2003. Watching rocks change—Mechanical earth modeling. *Oilfield Review*, 15(1):22-39.
- Ameen, M.S., Smart, B.G., Somerville, J.M., Hammilton, S. and Najji, N.A., 2009. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). *Marine and Petroleum Geology*, 26(4):430-444.
- Bennion, D. B., & Thomas, F. B., 1990. Underbalanced Drilling: A Reservoir Design Perspective, Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/CIM-99-05-MS.
- Behnam, N., Hosseini, M., & Shahbazi, S., 2020. A Criterion for Estimating the Minimum Drilling Mud Pressure to Prevent Shear Failure in Oil Wells. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1): 227-236.
- Fjaer, E. & Holt, R. M. & Horsrud, P. & Raaen, A. M. & Risnes, R., 2008. *Petroleum Related Rock Mechanics*, 2nd Ed, Amsterdam, Elsevier.
- Hawkes, C.D. and McLellan, P.J., 1996. January. Modeling of yielded zone enlargement around a wellbore, In 2nd North American Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
- Hosseini, M., Behnam, N., & Aria, M., 2020. Determination of a safe drilling mud window and optimal drilling mud pressure by shear and tensile failure criteria. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14): 1-13.
- Islam, M.A., Skalle, P. and Tantserev, E., 2009. December. Underbalanced Drilling in shales-perspective of mechanical borehole instability, In IPTC 2009: International Petroleum Technology Conference.
- Lake, L. W., Fanchi, J. R., Arnold, K., Clegg, J. D., Holstein, E. D., & Warner, H. R., 2007. *Petroleum engineering handbook: reservoir engineering and petrophysics (Vol. 5)*, Society of Petroleum Engineers.
- Maleki, S., Gholami, R., Rasouli, V., Moradzadeh, A., Riabi, R.G. and Sadaghzadeh, F., 2014. Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice, *Earth-Science Reviews*, 136:36-58.
- McLellan, P. and Hawkes, C., 2001. Borehole stability analysis for underbalanced drilling, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 40(05).
- Miller, S. L. M. & Stewart, R. R., 1990. effects of lithology, porosity and shaliness on p_{c} and s_{c} wave velocities from sonic logs, *Canadian Journal of Exploration geophysics*, 26:94-103.
- Najibi, A.R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R. and Asef, M.R., 2015. Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126:78-82.

- Qiu, K., Gerryo, Y., Tan, C.P. and Marsden, J.R., 2007. Underbalanced drilling of a horizontal well in depleted reservoir: A wellbore stability perspective, In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers.
- Salehi, S., Baladehi, H.E., Mojdeh, A. and Darvishi, R., 2009. May. Wellbore stability analysis in UBD wells of Iranian fields. In Shiraz 2009-1st EAGE International Petroleum Conference and Exhibition (pp. cp-125). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Soroush, H., Gao, H.J., Qutob, H.H., Neil, B., Mahli, Z.A. and Abalioglu, I., 2011. January. Geomechanical study for UBD feasibility in the Northern Iraq fields. In SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Yousefian, H., Fatehi Marji, M., Soltanian, H., Abdollahipour, A., & Pourmazaheri, Y., 2020. Wellbore trajectory optimization of an Iranian oilfield based on mud pressure and failure zone. *Journal of Mining and Environment*, 11(1): 193-220.
- Yuan, J.L., Deng, J.G., Tan, Q., Yu, B.H. and Jin, X.C., 2013. Borehole stability analysis of horizontal drilling in shale gas reservoirs, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(5):1157-1164.