



آنالیز پایداری دیواره چاه با توجه به ملاحظات مکانیک سنگی (جنوب غربی ایران)

رضا طاهر دنگ کو^۱، هادی همیالی^۲، محمد زرگر باشی^۳

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه مهندسی نفت، امیدیه، ایران

Reza.taherdangkoo@gmail.com

چکیده

حفاری اصلی ترین فعالیت به منظور دسترسی به مخازن نفت و گاز می باشد. پایداری چاه یکی از مهمترین ملاحظات در هر عملیات حفاری است. ناپایداری چاه یکی از اصلی ترین علل شکست های دیواره چاه است و مشکلات جدی را در صنعت حفاری ایجاد می کند. عدم تجزیه و تحلیل دقیق پایداری چاه می تواند موجب مشکلات بسیاری مانند ریزش چاه، شکست، گیر کردن لوله ها و مته حفاری شود و همه اینها موجب هزینه های اضافی و اتلاف پول و زمان می شود و این هزینه های اضافی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد هزینه حفاری چاه برآورد شده است. عواملی که پایداری چاه را تحت تاثیر قرار می دهد عبارتند از: مقاومت سنگ، استرس های درجا، فشار منفذی، تراوایی، اثرات حرارتی و شیمیایی. از لحاظ مکانیکی مهمترین عواملی که بر پایداری چاه اثر می گذارند استرس های درجا، وزن گل و خواص سنگ می باشند. در هنگام حفاری دو مشکل اصلی ناپایداری وجود دارد که ریزش دیواره چاه و شکستگی دیواره چاه می باشند. اگر وزن گل خیلی زیاد باشد هرزروی گل اتفاق می افتد و اگر وزن گل خیلی کم باشد ریزش چاه اتفاق خواهد افتاد. برای جلوگیری از این مشکلات، پنجره ایمن گل باید طراحی شود. در این مطالعه یکی از چاه های واقع در میدان مارون (جنوب غربی ایران) بررسی شده است. جهت بررسی و پیش بینی مشکلات پایداری دیواره چاه، یک مدل ژئومکانیکی از چاه مورد نظر ایجاد شد و نوع شکستگی رخ داده در دیواره چاه پیش بینی گردید، سپس محدوده ایمن و پایدار وزن گل حفاری مشخص شد.

واژه های کلیدی: سنگ مخزن، ژئومکانیک، میدان تنش، پایداری دیواره چاه، پنجره ایمن گل

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت

۳- کارشناسی ارشد مهندسی نفت

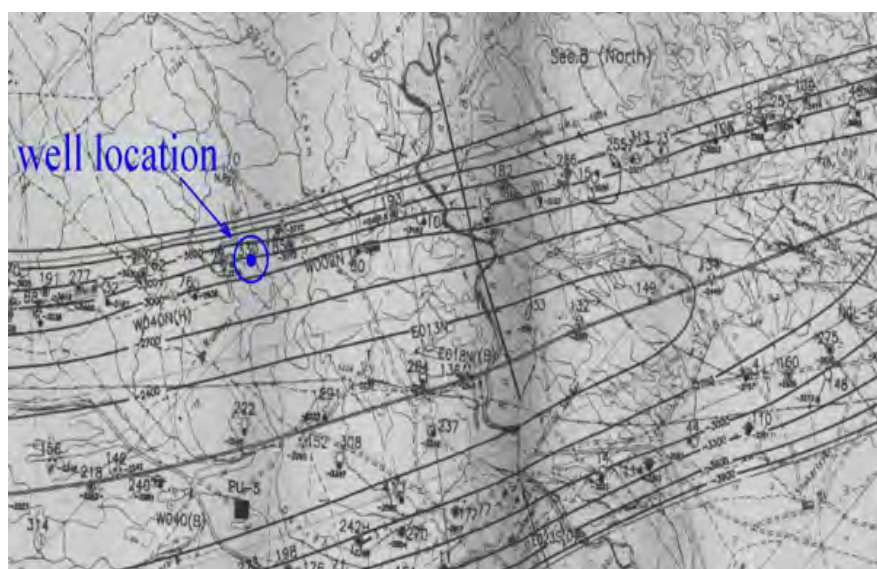


۱- مقدمه

بسیاری از میادین نفتی با مشکلات ژئومکانیکی همچون ناپایداری دیواره چاه، شکست لوله جداری، ریزش ماسه و ... مواجه می باشند. ابتدایی ترین شرایط برای پایدار ماندن یک چاه در حین حفاری، وجود تعادل و توازن بین تمرکز تنش در نزدیک دیواره چاه و استحکام سنگ می باشد. ناپایداری چاه به دلیل شکست سنگ اطراف دیواره چاه در حالتی که مقدار تنش مؤثر در دیواره چاه از استحکام سنگ تجاوز کند، ایجاد می شود [1]. و به طور کلی باید گفت که ناپایداری دیواره چاه بستگی به آن دارد که سنگ دیواره چاه چگونه به تمرکز تنش القایی ناشی از عملیات حفاری جواب خواهد داد. اگر استحکام سنگ بیشتر از مقدار تنش القایی باشد، چاه پایدار خواهد ماند و در شرایط عکس سنگ تسلیم خواهد شد و احتمال ناپایداری در چاه وجود دارد [2]. به مسئله پایداری چاه از دو دید کلی می توان نگریست: دید اول روش شیمیایی و پایداری چاه بوسیله تمهیدات بر گرفته از علم شیمی است. موضوع اصلی این روش شناسایی و کنترل برهم کنش بین گل حفاری و سازند موجود در دیواره است. دید دوم پایداری فیزیکی دیواره چاه ه موضوع این تحقیق است. در روش فیزیکی رایج کنونی پارامترهای زمین شناسی مهندسی و ژئومکانیکی سازند ها به شدت حس می شود. زیرا روشن است که بسیاری از پارامترهای مربوط به سازند مثل وزن مخصوص، تخلخل، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت فشارشی و می تواند در محاسبات فیزیکی دیواره چاه وارد شوند. در طی حفاری دو مشکل اساسی در پایداری دیواره چاه به نام شکست برشی و شکست کششی القایی وجود دارد که می توان با تعیین پنجره ایمن گل حفاری این مشکل را برطرف کرد. برای تعیین پنجره ایمن نیاز به شناخت میدان تنش های برجا است که تشریح این میدان نیاز به جهت و مقدار تنش های اصلی دارد [3].

۲- بحث

سازند آسماری تقریباً ۸۵ درصد نفت خام ایران را تولید می کند و یکی از مخازن اصلی شناخته شده در جهان و از مخازن شاخص دارای درز و شکستگی در جهان است. سن آن الیگو - میوسن بوده و عموماً از سنگ های کربناته (آهک و دولویت) تشکیل شده است. در این مطالعه یکی از چاه های واقع در میدان مارون در سازند آسماری بررسی شده است. از رسم نمودار کراس پلات فوتو الکتریک - دانسیته لیتولوژی عمدتاً کربناته به همراه مقداری ماسه سنگ و مقادیر بسیار محسوس شیل تعیین شده است [4]. شکل ۱ نقشه UGC و محل قرار گیری چاه مورد مطالعه در میدان نفتی مارون را نشان می دهد.



شکل ۱- نقشه UGC و محل قرار گیری چاه مورد مطالعه در میدان نفتی مارون



۱-۲- ضرایب الاستیک سنگ مخزن

طراحی مناسب عملیات حفاری ایجاب می کند که خواص ژئومکانیکی سازند را بشناسیم. خواص کشسانی سنگ برای بیان مقاومت سنگ در برابر تنش، بدون اینکه تغییر شکل دائم رخ دهد، تعریف می شود. که شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، مدول برشی، مدل حجمی و ضریب تراکم پذیری میباشد. ضرایب الاستیک سنگ را می توان ای تک محوره و و سه محوره بر روی نمونه مغزه و یا از طریق لاگ های الکتریکی، بخصوص داده های صوتی بدست آورد. در این مطالعه به جهت در دسترس نبودن اطلاعات مغزه از نمودارهای صوتی و چگالی جهت محاسبه ضرایب الاستیک استفاده می شود. روابط موجود در حالت دینامیک مربوط به مدول یانگ (E)، مدول بالک (K) و مدول برشی (G) به ترتیب بوسیله روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه می شوند. همچنین نسبت پواسون بوسیله رابطه (۵) محاسبه می گردد. در روابط ارائه شده زمان گذر موج فشاری (Δt_s) بر حسب میکرو ثانیه بر فوت، زمان گذر موج برشی (Δt_c) بر حسب میکرو ثانیه بر فوت و چگالی بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب می باشند. به دلیل اینکه در نمودارهای صوتی گرفته شده از چاه تنها زمان گذر موج فشاری ثبت می گردد، از رابطه (۱) که برای سازند آسماری ارائه شده برای محاسبه زمان گذر موج برشی استفاده شده است [5].

$$\Delta t_s = 1.7891\Delta t_c + 7.622 \quad (1)$$

$$E_d = \frac{\rho_b \left(3 - 4 \left(\frac{\Delta t_c}{\Delta t_s} \right)^2 \right)}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \quad (2)$$

$$K_d = \rho_b \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right) \quad (3)$$

$$G_d = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \quad (4)$$

$$v = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1}{\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1} \quad (5)$$

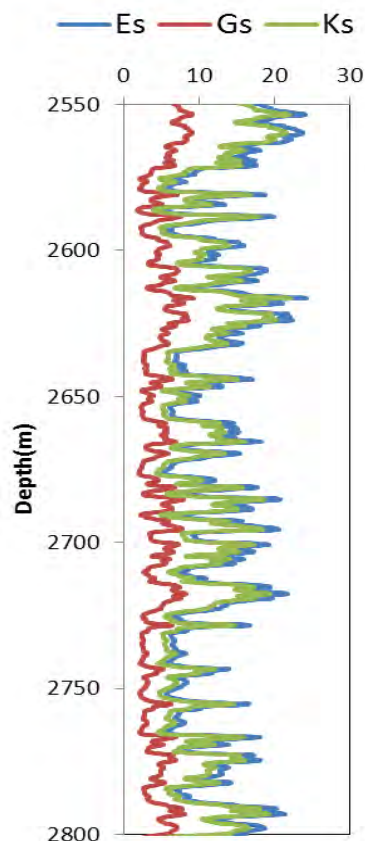
روابط دینامیکی را نمی توان بطور مستقیم در ساخت مدل ژئومکانیکی بکار برد و باید ابتدا به حالت استاتیکی تبدیل شوند. از این رو نسبت تبدیل روابط دینامیکی به استاتیکی براساس روابط همبستگی وانگ بصورت زیر می باشند [6]. در شکل ۱ نمودار مدول های یانگ، برشی و حجمی در حالت استاتیکی نشان داده شده است.

$$E_s = 0.4145E_d - 1.0593 \quad (6)$$

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2v)} \quad (7)$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+v)} \quad (8)$$

$$v_s = 0.7v_d \quad (9)$$



شکل 1- نمودار مدول یانگ، برشی و حجمی در حالت استاتیکی

مقاومت تراکم تک محوری سنگ مخزن (UCS)، نشان دهنده حداکثر مقاومت نمونه در برابر شکست در جهت تنش تراکمی تک محوری می باشد و معمولاً به وسیله آزمایش فشار و به صورت تجربی به دست می آید. با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات مغزه بوسیله رابطه (10) تخمین زده می شود که در این رابطه ضریب اصطکاک داخلی می باشد.

$$UCS = 143.8e^{-6.95\sigma} \quad (10)$$

۲-۲- تنش های برجا

تشریح کامل میدان تنش در زمین تنها نیازمند تعیین جهت و مقدار تنش های اصلی می باشد. تنش های اصلی، تنش های قائمی هستند که در صفحه آنها تنش های برشی صفر است. یکی از تنش های اصلی، تنش قائم (σ_v) است که ناشی از وزن طبقات بالایی است و بطور ریاضی با انتگرال گیری دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر بصورت زیر بدست می آید. دانسیته متوسط در چاه مورد بررسی ۲,۵۸ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد.

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z)gdz \cong \bar{\rho}gz \quad (11)$$

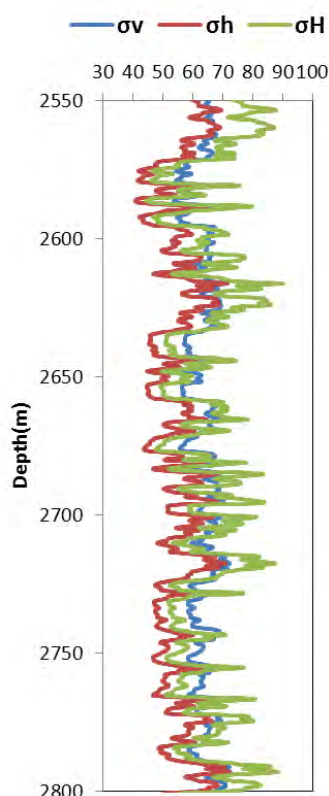


دو تنش اصلی دیگر، تنش افقی حداکثر (σ_H) و تنش افقی حداقل (σ_h) می باشند. براساس میزان بزرگی این تنش ها تئوری اندرسون پایه گذاری شد که براساس این تئوری سه نوع رژیم تنش در اعماق وجود دارد: رژیم نرمال، رژیم امتدادلغز و رژیم معکوس. این تنش ها توسط روابط پروالاستیک به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s}{1-\nu^2} \epsilon_y + \frac{\nu E_s}{1-\nu^2} \epsilon_x \quad (12)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s}{1-\nu^2} \epsilon_x + \frac{\nu E_s}{1-\nu^2} \epsilon_y \quad (13)$$

در روابط فوق ν ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و ϵ_x و ϵ_y کرنش در جهت افقی حداقل و حداکثر می باشند [7]. در چاه مورد مطالعه α برابر با ۱ و ϵ_x و ϵ_y به ترتیب ۱،۵ و ۰،۵ در نظر گرفته شده است. گرادیان فشار منفذی متوسط با استفاده از چارت های شرکت شلمبرژه برابر ۰،۳۶۵ در نظر گرفته شد. در شکل ۲ نمودار تنش های قائم، افقی حداقل و افقی حداکثر برحسب (Mpa) نشان داده شده است.



شکل ۲- تنش های قائم، افقی حداقل و افقی حداکثر برحسب (Mpa)

۳-۲- تعیین محدوده فشار شکست

برای این منظور ابتدا باید تنش های القایی را که بعد از عملیات حفاری به وجود می آیند محاسبه کرد. تنش های القایی، حاصل اندرکنش بین فشار گل حفاری و تنش های برجا هستند و تا زمانیکه چاهی حفر نشده باشد تنش های القایی بوجود نخواهند آمد. تنش های القایی به سه صورت مماسی ($\sigma_{\theta\theta}$)، محوری (σ_{zz}) و شعاعی (σ_{rr}) هستند و از روابط (14) تا



(18) محاسبه می شوند. در روابط زیر P_w ، فشار ناشی از وزن گلی است که حفار استفاده کرده و با داشتن عمق از رابطه (19) محاسبه می شود. در شکل ۳ نمودار تنش های القایی در چاه مورد مطالعه نشان داده شده است.

$$\sigma_{\theta\theta max} = 3S_{H max} - S_{h min} - P_w - P_p \quad (14)$$

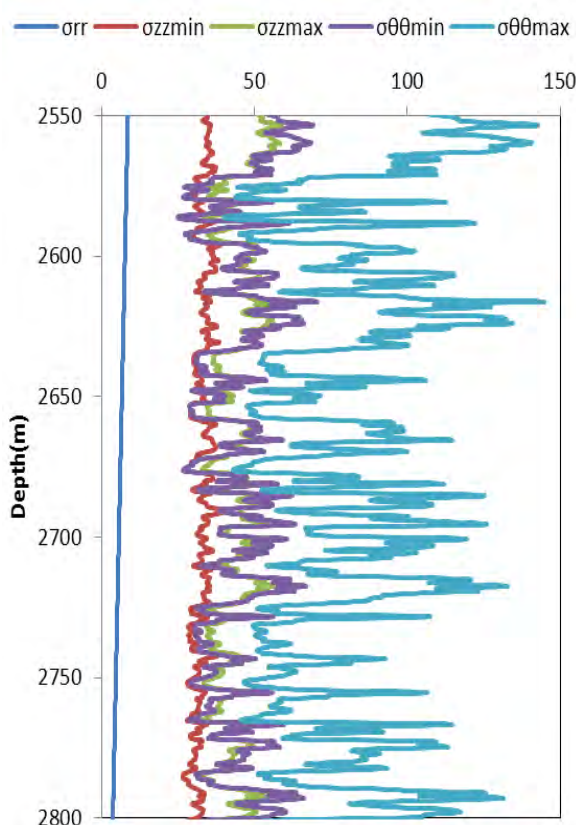
$$\sigma_{\theta\theta min} = 3S_{h min} - S_{H max} - P_w - P_p \quad (15)$$

$$\sigma_{zz max} = S_v + 2\nu(S_{H max} - S_{h min}) - P_p \quad (16)$$

$$\sigma_{zz min} = S_v - 2\nu(S_{H max} - S_{h min}) - P_p \quad (17)$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_3 = P_w - P_p \quad (18)$$

$$P_w = M_w \times 9.81 \times Z \quad (19)$$



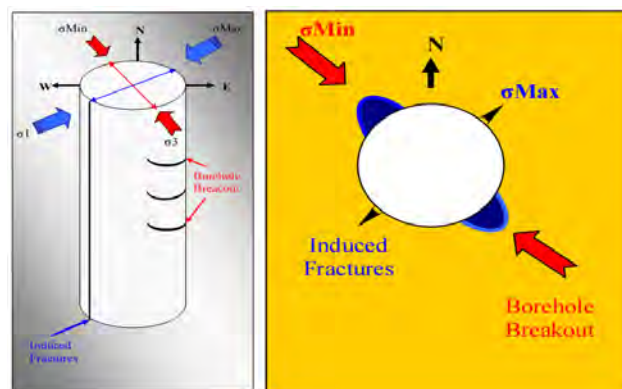
شکل 3- نمودار تنش های القایی مماسی، شعاعی و محوری

۳- تعیین نوع شکستگی ایجاد شده در دیواره چاه

در طی حفاری دو مشکل اصلی در پایداری چاه به نام شکستگی برشی و شکستگی کششی القایی وجود دارد. با توجه به علم مکانیک شکست، شکستگی های کششی القایی حفاری (DITF) عمود بر تنش اصلی حداقل (S_{hmin}) و در راستای تنش اصلی حداکثر (S_{Hmax}) بوده و شکستگی های برشی (BO) در راستای تنش اصلی حداقل (S_{hmin}) و عمود بر تنش اصلی حداکثر (S_{Hmax}) می باشند. این گسیختگی ها بر اثر تنش های القایی (σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$) ناشی از عملیات حفاری ایجاد می شوند. با توجه به جایگشت هر کدام از این تنش ها که می توانند تنش حداقل یا حداکثر باشند مدل شکستگی برشی و سه مدل شکستگی کششی ممکن است رخ دهد [8]. اگر تنش مماسی ($\sigma_{\theta\theta}$) کمتر از مقاومت کششی سنگ (T)



باشد شکستگی کششی القایی حفاری (DITF) و اگر تنش مماسی بزرگتر از مقاومت فشاری (UCS) سنگ باشد ریزش (BO) روی می دهد. مدل های شکست برشی در جدول ۱ و مدل های شکست کششی در جدول ۲ گردآوری شده اند. همچنین در شکل ۴ شکستگی های ناشی از حفاری در جهت بیشترین تنش افقی و در جهت کمترین تنش افقی نشان داده شده است.



شکل ۴- شکستگی های ناشی از حفاری در جهت بیشترین تنش افقی و در جهت کمترین تنش افقی

جدول ۱- مدل های شکست برشی در دیواره چاه

مدل	تعاریف
(SWBO) گسیختگی برشی عریض	ریزش مرسوم
(SHAE) گسیختگی برشی پله ای با زاویه زیاد	بصورت مقابل هم در دیواره چاه و بصورت ریزش مرسوم شکل میگیرد اما سنگ شکسته شده به درون چاه سقوط نمی کند.
(SSKO) گسیختگی برشی پله ای با زاویه زیاد	شکست در همه جهات میباشد.
(SLAE) گسیختگی برشی پله ای با زاویه کم	برای ایجاد این شکست نیاز به وزن گل بالا است.
(SNBO) گسیختگی برشی باریک	وزن گل بالای غیر معقول این نوع شکست را بوجود میآورد.
(SDKO) گسیختگی برشی ضربه ای عمیق	وزن گل بالای غیر معقول این نوع شکست را بوجود می آورد.

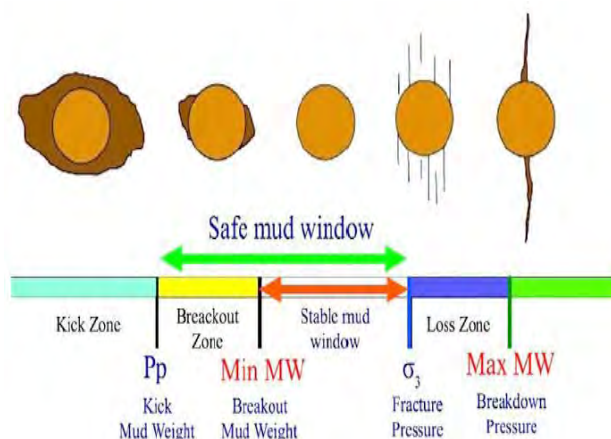
جدول ۲- مدل های شکست کششی در دیواره چاه

مدل	تعاریف
(TVER) گسیختگی کششی قائم	شکستگی کششی در این حالت بصورت عمودی می باشد.
(THOR) گسیختگی کششی افقی	شکستگی کششی در این حالت بصورت افقی می باشد.
(TCYL) گسیختگی کششی شعاعی	شکستگی کششی در این حالت بصورت شعاعی می باشد.

پنجره گل، حفار را در انتخاب وزن گل ایمن جهت جلوگیری از شکست برشی و کششی در دیواره کمک خواهد کرد تا با انتخاب وزن صحیح گل عملیات حفاری را ادامه دهد. اگر فشار هیدروستاتیک گل حفاری از فشار آستانه برای ریزش دیواره کمتر شود، سیال سازندی وارد چاه شده و فوران جزئی اتفاق می افتد و باعث شکست برشی در یک جهت می شود. اگر این فشار هیدروستاتیک کمتر از فشار منفذی باشد فوران کامل اتفاق افتاده و باعث شکست برشی در تمام جهات می شود. هنگامی که فشار گل از تنش افقی حداقل تجاوز کند، دیواره چاه در آستانه شکست کششی قرار گرفته و هرزروی جزئی گل اتفاق می افتد، حال اگر فشار گل زیادتر شود شکستگی کششی ایجاد شده که باعث هرزروی کامل می شود. شکل پنجره ایمن گل را در

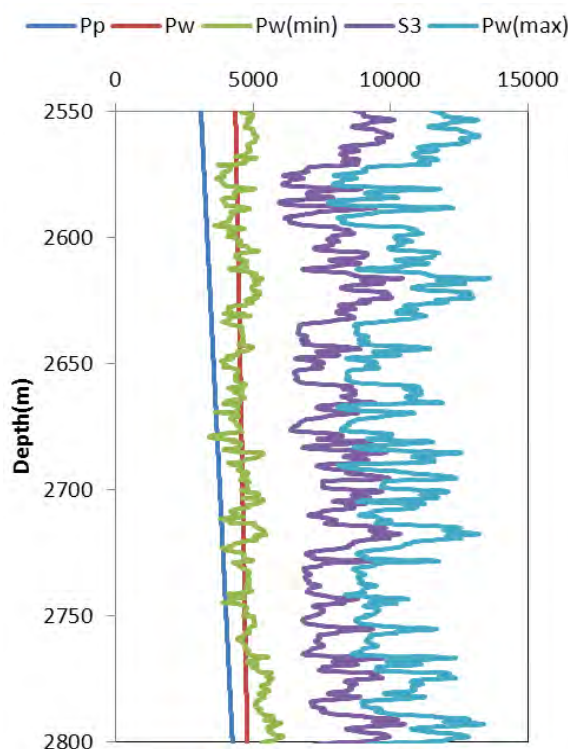


چاه مورد مطالعه نشان می دهد که بیان می کند که وزن گلی باید انتخاب شود که بین فشارسازندی و حداقل تنش افقی برجا باشد که دیواره چاه در حالت ایمن قرار گیرد [3]. شکل ۵ نمایی شماتیک از پنجره گل حفاری را نشان می دهد.



شکل ۵- نمایی شماتیک از پنجره ایمن و پایدار گل حفاری

پس از محاسبه تنش های القایی، از بین مدل های شکست برشی مدل SWBO و از بین مدل های شکست کششی مدل TVER انتخاب شد و سپس با توجه به مقادیر محاسبه شده، پنجره گل حفاری ترسیم شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به اینکه دو احتمال شکستگی در دیواره چاه وجود دارد از این رو بالاترین حد وزن گل حفاری متعلق به نوع شکستگی برشی عریض (SWBO) و پایین ترین حد وزن گل متعلق به نوع شکستگی کششی قائم (TVER) می باشد.



شکل ۶- پنجره گل حفاری بر حسب psi



۴- نتیجه گیری

پس از انجام محاسبات و بررسی های لازم نتایج زیر برای چاه مورد مطالعه بدست آمد:

- ۱- رژیم تنش برای سنگ مخزن مذکور از نوع رژیم امتداد لغز ($\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$) شناخته شد.
- ۲- نوع شکستگی برشی ایجاد شده در دیواره چاه بصورت گسیختگی عریض (SWBO) و شکستگی کششی ایجاد شده با مقایسه تنش های القایی بصورت شعاعی (TVER) خواهد بود.
- ۳- با تعیین میزان حد بالا و پایین فشار شکست در سازند مشخص شد پایین ترین حد وزن گل متعلق به گسیختگی برشی عریض و بالاترین وزن گل نیز همواره متعلق به نوع شکستگی کششی قائم است. همچنین با مشاهده اشکال ۵ و ۶ در می یابیم که وزن گل انتخابی، باید بین فشارسازندی و حداقل تنش افقی برجا باشد که در اینصورت چاه پایدار خواهد بود و ریزش و شکستگی نخواهیم داشت.
- ۴- همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود گل حفاری بکار رفته در این چاه کمتر از حداقل وزن گل حفاری تعیین شده می باشد و پیش بینی می شود که در دیواره چاه ریزش (Braek out) رخ خواهد داد و جهت ایجاد آن هم جهت با تنش افقی حداقل خواهد بود.

منابع

- 1- Birchwood, R. 2002, "Options for enhanced wellbore stability", p. 5-25
- ۲- داروئی، م، آبدیده، م، ۱۳۹۲، " آنالیز دیواره چاه با توجه به ملاحظات مکانیک سنگی، چاه ۱۹۱ مخزن آسماری میدان اهواز"، هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، ۲۰-۱۱
- ۳- فتحی، ح، ۱۳۹۱، "تهیه مدل ژئومکانیکی چاه به منظور تحلیل پایداری و طراحی وزن گل حفاری ایمن"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه، امیدیه
- ۴- نریمی زاده، ل، آبدیده، م، تحلیل شکستگی های سنگ مخزن بوسیله ارائه مدل مکانیکی زمین، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، شیراز شهریور ماه ۱۳۹۱
- ۵- Nabaei, M., Shahbazi, K., Shadravan, A., Moazzeni. A. R., 2009, "Artificial Neural Network Modeling Enhances Shear Wave Transit Time Prediction in Ahwaz 85 Oilfield", 6th International Congress on Chemical Engineering
- ۶- Amadie, B., Stephansson, O., 1997, "Rock Stress and its Measurement", Chapman & Hall 1st edition
- ۷- Richard Birchwood, Ph.D. Geomechanics Specialist, "Options for Enhanced Wellbore Stability". Schlumberger Oilfield Services Caracas, Venezuela
- ۸- امید، د، رسولی، و، ۱۳۸۵، "تاثیر تنش های برجا بر مکانیسم گسیختگی چاه های نفتی"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران



مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدرولوژی و صنایع بالادستی
تهران، ۲۹ خرداد ماه ۱۳۹۳ مجری: هم اندیشان انرژی کیمیا
تلفن: ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
www.Reservoir.ir