

طراحی مدل ژئومکانیکی و تعیین محدوده پنجره ایمن گل حفاری در سازندهای تولیدی یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی

صابر تقی زاده^{۱*}، محمد آبدیده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه مهندسی نفت، امیدیه، ایران

۲- دکتری زمین شناسی، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه مهندسی نفت، امیدیه، ایران

saber_taghizadeh268@yahoo.com

چکیده

امروزه یکی از مباحث مطرح در صنعت نفت دنیا، تهیه مدل ژئو مکانیکی از چاه های نفت و گاز می باشد. تهیه چنین مدلی مستلزم استفاده از داده های مختلف اعم از داده های پتروفیزیکی که از نمودارگیری چاه بدست می آید، داده های لرزه نگاری سه بعدی و غیره می باشد. در این مقاله با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی، یک مدل ژئو مکانیکی از ۳ سازندی که در میدان مورد نظر تولیدی به حساب می آیند، تهیه گردید. بر این اساس خواص الاستیک سنگ مخزن در حالت دینامیک و استاتیک محاسبه شده و سپس از طریق همین خواص و سایر اطلاعات و روابط موجود، به محاسبه مقاومت تراکمی تک محوری (UCS) اقدام گردید. در مرحله بعد، تنش های برجا و القایی محاسبه و براساس اندازه و مقدار تنش های برجا، رژیم تنش در سازندهای مورد نظر تعیین شده است. رژیم تنش، معیار بسیار مهمی در تحلیل میدان تنش زمین می باشد. در قدم بعد با استفاده از خواص استاتیک و تنش های برجا و القایی، معیار شکست برای سنگ مخزن انتخاب شده و براساس این معیار، مدل ژئو مکانیکی سنگ مخزن در هر کدام از سازندها طراحی گردیده و پنجره ایمن و پایدار گل حفاری تحلیل شده است.

کلمات کلیدی: ژئو مکانیک، لرزه نگاری سه بعدی، خواص الاستیک، تنش برجا و القایی، پنجره ایمن گل حفاری

مقدمه

کاربرد مکانیک سنگ از سالها پیش در بخشهای مختلف صنعت نفت دنیا و در موضوعاتی چون شکاف هیدرولیکی، ذخیره سازی زیرزمینی گاز، ماسه دهی چاهها، نشست سطح زمین یا کف دریا، فعال شدن گسلها، تغییر تراوایی، بهره دهی چاهها، ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و غیره، مطرح شده و پروژه های زیادی در رابطه با آن تعریف گردیده است. [۱] در ایران به رغم ثبت مشکلاتی نظیر مجالگی لوله جداری، تولید ماسه، بهره دهی چاهها در مخازن شکافدار، مشکلات آینده ذخیره سازی گاز و غیره، مطالعات ژئومکانیکی مورد توجه جدی قرار نگرفته است. ژئومکانیک در مهندسی نفت با تأثیر تنش و مقاومت سنگ بر رفتار سازندها در نتیجه فعالیت های نفتی سر و کار دارد. [۱]

علم لرزه نگاری به مطالعه علمی گسترش امواج الاستیک در زمین می پردازد و بعنوان یکی از شاخه های ژئوفیزیکی شناخته می شود. همچنین این امواج توسط یک منبع به داخل زمین فرستاده شده، از لایه های متفاوت عبور کرده و قسمتی از آن به سمت منبع یا نقطه ای مشخص انعکاس می یابد. امواج در اثر اختلاف چگالی و سرعت صوت در لایه های ژئوفیزیکی انعکاس های گوناگون دارند و توسط ژئوفونها (در خشکی) و هیدروفون ها (در دریا) جذب می شوند. حال وقتی علم لرزه نگاری با علم ژئومکانیک تلفیق گردد و به ابزاری جهت صرفه جویی در وقت و هزینه های حفاری تبدیل شود، نتایج جالبی به همراه خواهد داشت که به بررسی بیشتر آن خواهیم پرداخت.

علم لرزه نگاری و تأثیر گذاری در فرآیند اکتشاف مخازن هیدروکربنی

لرزه نگاری بزرگ ترین پیشرفت پیش بینی نشده در اکتشاف نفت خام و گاز طبیعی است. لرزه نگاری بر مطالعه شکل موج های ارتعاشی استوار است که از میان لایه های زمین عبور می کند و با انواع تشکل های زیرزمینی به طور متفاوت تعامل دارد. در سال

۱۸۵۵، ال.پالمیر، اولین لرزه نگار را به عنوان ابزاری برای تشخیص و ثبت زمین لرزه ها کشف کرد. این دستگاه قادر به ثبت ارتعاش های زمین بود که در یک زمین لرزه به وجود می آید. موج های ارتعاشی یک منبع ایجاد می کند که از لایه های متفاوت زمین عبور می کند و قسمتی از آن را لایه های زیرزمینی مختلف به سمت منبع انعکاس می دهند. ژئوفیزیک ها قادرند ارتعاش هایی را در سطح زمین ایجاد و چگونگی بازگشت این ارتعاش ها را به سطح ثبت کنند. موج های ارتعاش ارسال شده در برخورد با صخره ها و لایه های سخت زمین نسبت به لایه های با منفذ زیاد، بازتاب متفاوتی دارند و همین تفاوت به زمین شناس امکان می دهد تا محدوده و عمق سنگ های متخلخل را که احتمالاً حاوی نفت و گاز هستند، تخمین بزنند. لرزه نگاری به روش های مختلفی انجام می شود: لرزه نگاری دو بعدی، لرزه نگاری سه بعدی و لرزه نگاری چهار بعدی. هدف کلی لرزه نگاری سه بعدی که از داده های آن در مقاله استفاده شده است، بدست آوردن قدرت تفکیک بهتر زمین شناسی منطقه نسبت به لرزه نگاری دوبعدی است. [۲] در لرزه نگاری سه بعدی برداشت داده ها منحصر به یک صفحه عمودی شامل چشمه و گیرنده نیست بلکه گیرنده ها در سطح زمین به صورت یک صفحه مشبک قرار دارند. [۲] بنابراین در این روش یک حجم از داده های لرزه ای بدست می آید. لرزه نگاری سه بعدی با مشخص کردن موقعیت چاهها و کاهش حفاری های بی ثمر بخصوص در مناطقی که ساختارهای زیرسطحی پیچیده دارند، میزان قابل توجهی از هزینه های حفاری را می کاهش دهد.

طراحی مدل ژئومکانیکی با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی

ژئومکانیک دانشی است که به بررسی و تحلیل رفتار زمین در برابر تنش ها می پردازد. این تنش ها ممکن است تنش های طبیعی درون زمین یا تنش های القا شده توسط انسان در عملیات مختلف از جمله حفاری باشد. [۳] یک مدل ژئومکانیکی با مطالعه جمعی بر روی حالت های تنش، فشار منفذی، ویژگی های سنگ مخزن، شکاف های طبیعی، گسل ها و غیره، یک سری اطلاعات مفید را فراهم می کند که در صنعت نفت کاربردهای متنوعی دارند. [۴]

تخمین ضرایب الاستیک

ابتدا باید از طریق روابط تجربی و رگرسیونی بین Δt_s و Δt_c برای سازندهای مورد مطالعه، مقدار Δt_s را بدست آوریم سپس به محاسبه ضرایب الاستیک پردازیم.

$$\Delta t_s = 1.5452 * \Delta t_c + 21.2075 \quad (1) \text{ سازندهای ایلام، سروک، فهلیان}$$

در آن: (Δt_s) سرعت موج برشی بر حسب ($\mu s/ft$)، (Δt_c) سرعت موج تراکمی (فشاری) بر حسب ($\mu s/ft$) می باشند.

مدول های الاستیک سنگ مخزن در حالت دینامیکی به وسیله روابط (۲) زیر محاسبه می شود. [۵]

$$v_d = \frac{0.5 \times \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

$$G_d = \frac{92915.71429 \times \rho}{\Delta t_s^2}$$

$$E_d = 2 \times G_d \times (1 + v_d)$$

که زمان گذر موج فشاری و موج برشی بر حسب ($\mu s/ft$)، چگالی بر حسب (gr/cm^3) و مدول یانگ و مدول برشی بر حسب (Gpa) در نظر گرفته می شوند. با توجه به این که در طراحی مدل های ژئومکانیکی مقادیر استاتیکی باید مورد استفاده قرار گیرند، از رابطه (۳) مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی تبدیل می شود. [۵]

$$E_s = 0.4145 E_d - 1.0593 \quad (3)$$

که مدول یانگ در حالت استاتیکی بر حسب (Gpa) محاسبه می شود.

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی ناپایداری چاه توسط معیارهای شکست، مقاومت فشار تک محوره (UCS) می باشد که از رابطه زیر که توسط (Mc Nally (1987) ارائه گردید، بدست می آید:

$$UCS = 1200 * e^{(-0.036 * \Delta t c)} \quad (4)$$

برای محاسبه فشار عملیاتی سیال حفاری و تنش های برجا، پارامترهای وزن سیال حفاری و فشار سیال منفذی را از داده های حفاری و چاه آزمایی به دست می آیند. فشار عملیاتی سیال حفاری از رابطه ی (۵) محاسبه می شود [۵].

$$P_w = (M_w \times 9.81 \times Depth) / 1000 \quad (5)$$

که M_w وزن سیال حفاری بر حسب (gr/cm^3) و $Depth$ عمق سازند حفاری بر حسب (m) در نظر گرفته شده است.

محاسبه تنش های برجا و تعیین رژیم تنش

تنش های برجا نیز براساس رابطه ی (۶) محاسبه می شوند [۵].

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) \times g \times dz = \bar{\rho}gz$$

$$\sigma_h = \frac{v_s}{1-v_s} \sigma_v - \frac{v_s}{1-v_s} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_y + \frac{E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_x \quad (6)$$

$$\sigma_H = \frac{v_s}{1-v_s} \sigma_v - \frac{v_s}{1-v_s} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_x + \frac{E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_y$$

$$\alpha = 1, \varepsilon_x = 1.5, \varepsilon_y = 0.5$$

که در این روابط $\rho(z)$ دانسیته سنگ که تابعی از عمق می باشد، g ثابت شتاب گرانشی، $\bar{\rho}$ دانسیته متوسط روباره می باشد. دانسیته متوسط در چاه مورد مطالعه برابر با $2.56 \frac{g}{cm^3}$ در نظر گرفته شده است. σ_v تنش بر جای قائم، σ_h تنش بر جای افقی حداقل، σ_H تنش بر جای افقی حداکثر بر حسب (MPa)، v ضریب پواسون، S_v تنش قائم بر حسب (MPa)، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی بر حسب (MPa)، E مدول یانگ بر حسب (MPa)، ε_x و ε_y کرنش در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر می باشد. ضریب بایوت برابر با یک، ε_x برابر یک و نیم و ε_y برابر یک در نظر گرفته شده است.

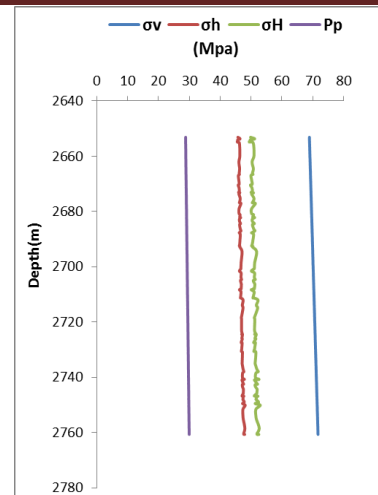
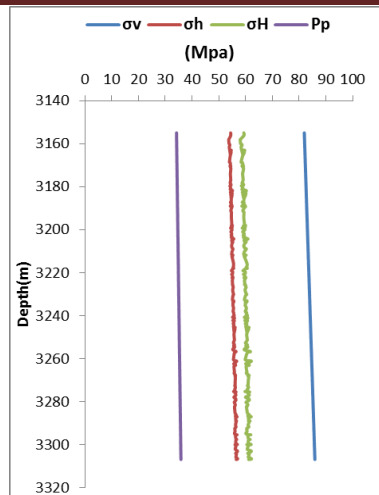
گرادیان فشار منفذی متوسط برای سازندهای ایلام، سروک و فهلیان برابر 0.480 (psi/ft) در نظر گرفته شده است. اندرسون^۱ در سال ۱۹۵۱ توصیفی را برای رژیم تنش های برجا براساس مقادیر نسبی بین تنش های افقی و عمودی منطقه، ارائه کرد. او پیشنهاد داد که، رژیم تنش ها در گسلش نرمال یا کششی (NF^2) بصورت $(\sigma_v \geq \sigma_H \geq \sigma_h)$ و در گسلش معکوس (RF^3) بصورت $(\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_v)$ و در گسلش امتداد لغز (SS^4) بصورت $(\sigma_H \geq \sigma_v \geq \sigma_h)$ می باشد.

¹ Anderson

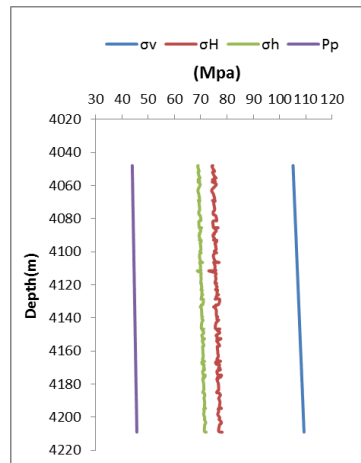
² Normal or extensional faulting

³ Reverse or thrust faulting

⁴ Strike-slip



شکل ۲- سازند ایلام: رژیم تنش نرمال بوده $(\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h)$ شکل ۳- سازند سروک: رژیم تنش نرمال بوده $(\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h)$



شکل ۴- سازند فهلیان: رژیم تنش نرمال بوده $(\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h)$

با محاسبه میزان تنش های عمودی، افقی حداقل و افقی حداکثر مشخص شد که رژیم تنش حاکم در سازندهای مورد نظر، رژیم تنش نرمال می باشد که بصورت $(\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v)$ می باشد (شکل ۲- a). اما در هر مرحله با توجه به پیچیدگی های ساختاری و عمق های مختلف، خواص مکانیک سنگی و ژئومکانیکی در هر سازند، متفاوت بوده و رفتارهای مختلفی در برابر محاسبات تنش های مورد نظر در هر سازند مشاهده گردید.

تعیین تنش های القایی

برای تعیین محدوده ی فشار شکست باید ابتدا تنش های القایی مماسی، محوری و شعاعی را محاسبه کرد. پس بر پایه رابطه

(۷) قابل محاسبه می باشند: [۶]

$$\sigma_{\theta\theta} \text{ Max} = 3 \sigma_H - \sigma_h - P_w - P_p$$

$$\sigma_{\theta\theta} \text{ Min} = 3 \sigma_h - \sigma_H - P_w - P_p$$

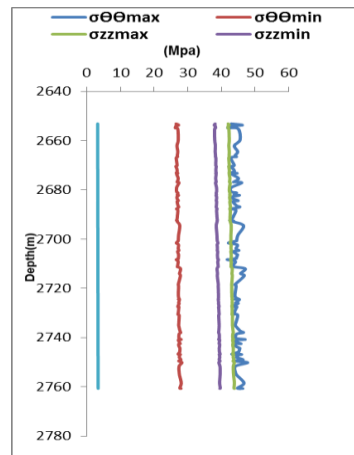
$$\sigma_{zz} \text{ Max} = \sigma_v + 2v (\sigma_H - \sigma_h) - P_p$$

$$\sigma_{zz} \text{ Min} = \sigma_v - 2v (\sigma_H - \sigma_h) - P_p$$

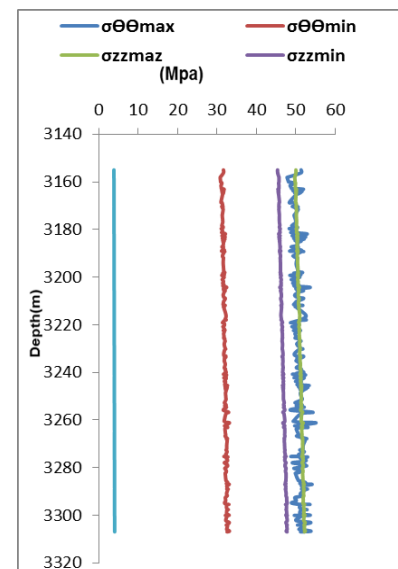
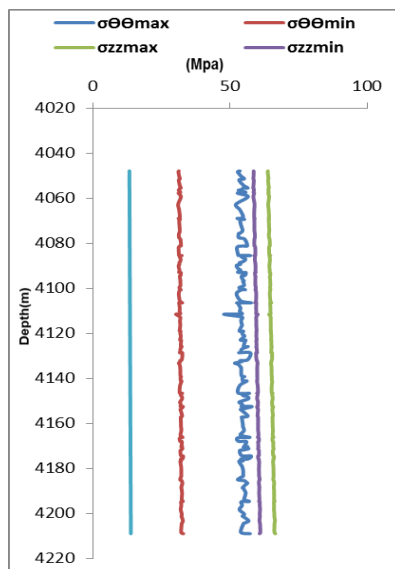
$$\sigma_{rr} = P_w - P_p$$

(۷)

در این روابط تنش القایی مماسی، σ_{zz} تنش القایی محوری و σ_{rr} تنش القایی شعاعی هستند. که با محاسبه ی تنش های القایی مماسی، محوری و شعاعی در نهایت شکل های زیر حالت هر کدام را نسبت به هم و در راستای عمق در سازندهای مورد مطالعه نشان می دهد.



شکل ۵- نمودار مربوط به تنش های القایی نسبت به عمق در سازند ایلام



شکل ۶- نمودار مربوط به تنش های القایی نسبت به عمق در سازند سروک شکل ۷- نمودار مربوط به تنش های القایی نسبت به عمق در سازند فهلیان برای طراحی مدل ژئومکانیکی سنگ مخزن در سازندهای مورد نظر، باید براساس تنش های القایی به وجود آمده، معیار شکست مناسب برای تعیین محدوده ی مجاز و مناسب فشار گل انتخاب شود. در این پژوهش معیار شکست مور-کلمب انتخاب شده است. پارامترهای این معیار براساس روابط (۸) و (۹) محاسبه می شوند [۶].

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h$$

$$B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$$

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H$$

$$E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$$

(۸)

$$(\sigma_1 - P_p) = C_0 + q(\sigma_3 - P_p) \quad (9)$$

$$\sigma_1 = C + q\sigma_3$$

$$C = C_0 - P_p(q-1)$$

$$T = 0.1C_0$$

که در این روابط C_0 مقاومت تراکمی تک محوری، T مقاومت کششی تک محوری و C مقاومت چسبندگی است و مقدار q توسط رابطه‌ی (۱۰) مشخص می‌گردد:

$$q = \tan^2(\pi/4 + \phi/2) \quad (10)$$

که ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی است.

مطالعه و بررسی وضعیت و نوع مدل‌های شکست برشی براساس تنش‌های القایی به‌وجود آمده در دیواره‌ی چاه پس از عملیات حفاری در جدول (۱) آمده است. [۶]

جدول ۱- مطالعه و بررسی وضعیت و نوع مدل‌های شکست برشی براساس تنش‌های القایی

مدل شکست های برشی	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	شکست رخ می دهد اگر
گسیختگی برشی عمیق <i>SWBO</i>	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$	$P_w \leq A - C/1 + q$
گسیختگی برشی ضربه ای کم عمق <i>SSKO</i>	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$	$P_w \leq B - C/q$
گسیختگی برشی پله ای با زاویه زیاد <i>SHAE</i>	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_w \geq C - E/q + D$
گسیختگی برشی باریک <i>SNBO</i>	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_w \geq C + qD/1 + q$
گسیختگی برشی ضربه ای عمیق <i>SDKO</i>	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz}$	$P_w \geq C + qE$
گسیختگی برشی پله ای با زاویه کم <i>SLAE</i>	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{zz}$	$P_w \leq A - C - qB$

مطالعه و بررسی وضعیت و نوع مدل‌های شکست کششی براساس تنش‌های القایی به‌وجود آمده در دیواره‌ی چاه پس از عملیات حفاری در جدول (۲) آمده است. [۶].

جدول ۲- مطالعه و بررسی وضعیت و نوع مدل‌های شکست کششی براساس تنش‌های القایی

مدل شکست های کششی	σ_3	شکست رخ می دهد اگر
گسیختگی کششی قائم <i>TVER</i>	$\sigma_{\theta\theta}$	$P_w \geq D - P_p - T$
گسیختگی کششی افقی <i>THOR</i>	σ_{zz}	$P_w \leq D - E$
گسیختگی کششی شعاعی <i>TCYL</i>	σ_{rr}	$P_w \leq P_p + T$

حال با توجه به نمودارهای بدست آمده از تنش‌های القایی، مدل‌های شکستگی برشی و کششی تعیین می‌گردد و از طریق روابط موجود در جداول بالا مقدار آنها در هر کدام از سازندهای مورد نظر محاسبه می‌شود. در سازند ایلام و سروک مدل شکستگی برشی *SWBO* (گسیختگی برشی عمیق) ($\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$) بوده ولی در سازند فهلیان این مدل تغییر کرده و مدل شکستگی برشی آن *SSKO* (گسیختگی برشی ضربه ای کم عمق) ($\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$) بدست آمده است. در ۳ سازند مورد مطالعه، مدل شکستگی کششی *TVER* (گسیختگی کششی قائم) تعیین شده است.

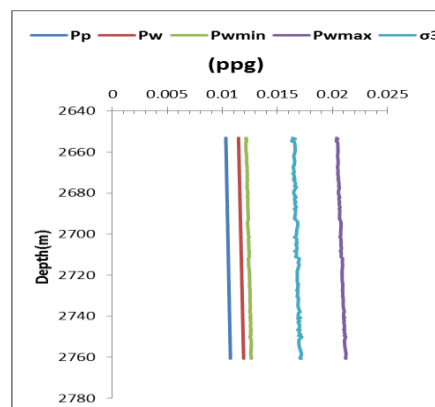
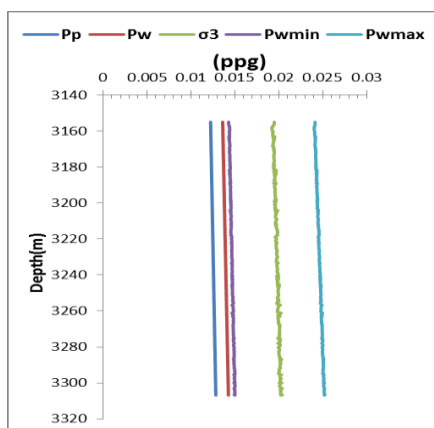
طراحی مدل ژئومکانیکی و تحلیل پایداری دیواره چاه

حال در این مرحله با داشتن فشار منفذی و میزان تنش افقی حداقل می توان پنجره گل را طراحی و ترسیم نمود. این پنجره ما را در انتخاب وزن گل مناسب یاری می کند. پنجره گل مطمئن بگونه ای است که فشار گل کمتر از فشار سازند باشد در نتیجه سیال دچار فوران شده و از مخزن به سمت چاه جاری می شود. اگر فشار گل از تنش افقی حداقل تجاوز کند، شکستگی های کششی القایی ناشی از حفاری ایجاد شده و هرزروی گل بصورت جزئی روی می دهد. محدوده پنجره گل پایدار میان کمترین وزن گل حفاری و تنش افقی حداقل است. از نقطه نظر ژئومکانیکی، پنجره گل پایدار این اجازه را می دهد که چاه از شکستگی های کششی و یا گیر لوله ها که در اثر وزن گل ایجاد می شوند، همچنین شکستگی های برشی که به دلیل وزن کم گل صورت می گیرد ایمن باشد [۶].



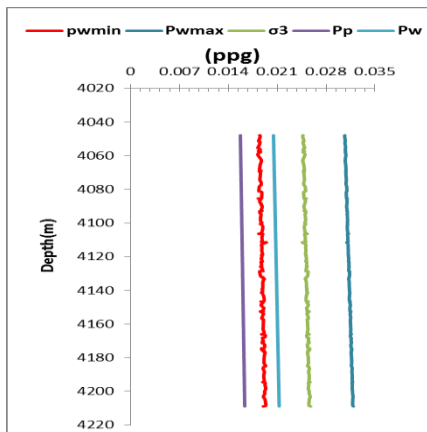
شکل ۸ - تصویر مربوط به تعریف پنجره ی ایمن و پایدار گل با نشان دادن پارامترهای ژئومکانیک

با توجه به توضیحات بالا شکل های زیر در هر کدام از سازندهای مورد مطالعه به تعیین مدل ژئومکانیکی پرداخته و محدوده پنجره ایمن گل حفاری را مشخص می کند.



شکل ۹- نمودار مدل ژئومکانیکی سنگ مخزن در سازند سروک

شکل ۱۰- نمودار مدل ژئومکانیکی سنگ مخزن در سازند ایلان



شکل ۱۱- نمودار مدل ژئومکانیکی سنگ مخزن در سازند فهلیان

نتیجه گیری

با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی و پس از انجام محاسبات و بررسی های لازم بر روی این داده هانتایج زیر برای سازندهای مورد مطالعه حاصل شد:

۱. رژیم تنش در سازندهای مورد نظر از نوع نرمال بوده ($\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v$) و در هر نمودار با توجه به عمق های هر کدام از سازندها، مقادیر مختلفی برای تنش های برجا محاسبه شده است.

۲. در سازند ایلام و سروک مدل شکستگی برشی $SWBO$ ($\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$) که نشان از گسیختگی برشی عمیق دارد و عامل اصلی ایجاد این مدل تنش القایی مماسی می باشد. در سازند فهلیان این مدل تغییر کرده و مدل شکستگی برشی آن $SSKO$ ($\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$) که نشان دهنده گسیختگی برشی ضربه ای کم عمق بوده و عامل اصلی ایجاد این مدل تنش القایی محوری است.

۳. با تعیین پنجره گل ایمن مشخص شد که فشار مناسب که باید توسط وزن گل ایجاد شود در سازند ایلام باید در محدوده ای بین $0.0105 - 0.0167$ ppg، در سازند سروک $0.0125 - 0.0197$ ppg و در سازند فهلیان $0.0160 - 0.0252$ ppg قرار گیرد.

۴. با بررسی نمودارهای مدل ژئومکانیکی برای هر سازند مشخص می گردد که در سازند ایلام و سروک، فشار گل (P_w) بین فشار منفذی (P_p) و فشار گل حداقل (P_{wmin}) قرار گرفته است که شامل محدوده Breackout می شود، که در ناحیه گسیختگی دیواره چاه خواهد بود. به این صورت که در ابتدا دیواره چاه در امتداد تنش افقی حداقل (σ_h) دچار شکستگی می شود. این شکست های برشی ناپایدار هستند و پس از مدت کوتاهی ریزش می کنند که باعث ایجاد دو ناحیه پهن تر در مقابل هم روی دیواره چاه می شود.

در سازند فهلیان، فشار گل (P_w) بین فشار گل حداقل (P_{wmin}) و تنش افقی حداقل (σ_3) قرار گرفته است که شامل محدوده پنجره پایدار گل (Stable mud window) می باشد. در این حالت وزن گل وضعیتی ثابت داشته و درست انتخاب شده است.

۵. با بررسی نمودارهای تنش بر جای سازندهای مورد مطالعه و انتخاب رژیم تنش آنها (رژیم تنش نرمال) می توان دریافت که بیشترین پایداری برای حفاری افقی در جهت تنش افقی حداقل (σ_h) می باشد زیرا ایمن ترین و عریض ترین محدوده وزن گل ایمن را داراست، و کمترین تمایل برای گسیختگی برشی را دارد.

منابع

- [۱] م. علی پور، ب. بهلولی، "ژئومکانیک در مهندسی نفت کاربردها بررسی شکافت هیدرولیکی و مدل سازی ژئومکانیکی"، مجله اکتشاف و تولید، شماره ۸۶ بهمن ۸۹.
- [۲] ه. قلاوند، م. پولادزاده، ع. ارزانی، ض. مهدی پور، "کاربرد لرزه نگاری در توسعه مخازن هیدروکربنی".
- [۳] هادی آشتیانی عبدی، "دانش نوپای ژئومکانیک مخازن هیدروکربوری"، مجله ی اکتشاف و تولید (۱۳۸۸).
- [۴] آ. احمدی فر، م. آبدیده، "طراحی پنجره ایمن گل به منظور پایداری دیواره چاه به کمک مدل ژئومکانیکی"، اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، تهران. اردیبهشت ۹۱.

[5]. Zoback, M.D., Barton, C.D., Wiprut, D.J. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells, *Int. J. Rock Mech. Mini. Sci* vol.40, pp- 1049-1076 (2003).

[6]. Al-Ajmi AM, Zimmerman RW. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion. *Int J Rock Mech Min Sci* 2006;43(3):1200-11.