

روش ساخت مدل ژئومکانیکی^۱ و کاربرد آن در پیش‌بینی و ممانعت از مشکلات ناشی از ناپایداری دیواره چاه در یکی از میداین نفتی فلات قاره ایران

میشم افسری^۲ شرکت نفت فلات قاره ایران

فرهاد بهزادی^۳ مدیریت برنامه‌ریزی تلفیقی شرکت ملی نفت ایران

چکیده

شرکت‌های نفتی وقت و هزینه زیادی را صرف مقابله با مشکلات ناشی از ناپایداری دیواره چاه در عملیات حفاری می‌کنند. برای شناخت و پیش‌بینی دقیق عوامل ناپایداری دیواره چاه در حین حفاری و ممانعت از آنها نیاز به یک مدل جامع از اطلاعات مرتبط می‌باشد. مدل ژئومکانیکی یک مجموعه منطقی شامل اطلاعات مرتبط با زمین‌شناسی، تنش‌های منطقه، خواص مکانیک سنگ و فشار منفذی است که به عنوان ابزاری جهت به روز نمودن سریع اطلاعات برای استفاده در عملیات حفاری و مدیریت مخازن به کار گرفته می‌شود. در این مقاله روش ساخت مدل ژئومکانیکی برای یکی از میداین نفتی دریائی ایران و کاربرد آن در تحلیل و پیش‌بینی ناپایداری دیواره چاه تشریح و راهکارهایی برای حل این مشکل ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی | مدل ژئومکانیکی، پایداری دیواره چاه، گسیختگی دیواره چاه، گرادیان ایجاد شکاف، فشار منفذی، تنش‌های درجا، خواص الاستیک سنگ

مقدمه

مدل ژئومکانیکی در حالت کلی خواص الاستیسیته دینامیک سازند را به خواص الاستیسیته استاتیک معادل آن مرتبط ساخته که این خواص الاستیسیته استاتیک برای تعیین مقاومت سازند و تنش‌های درجای زمین به کار می‌روند. [۴] مدل ژئومکانیکی از پروفایل‌های عمقی شامل پارامترهای الاستیک یا الاستو-پلاستیک، مقاومت سنگ، تنش‌های درجای زمین، فشار منفذی^۵ و جهت تنش‌های درجای زمین تشکیل شده است. [۴]

برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی عبارتند از:

- * پیش‌بینی فشار منفذی و گرادیان ایجاد شکاف^۶ برای طراحی لوله جداری و انتخاب وزن گل حفاری بهینه.
- * کاهش ریسک گیر کردن لوله‌ها به دلیل ناپایداری دیواره چاه.
- * انتخاب نوع تکمیل مناسب، حفظ پایداری مشبک‌ها و تنظیم افت فشار ایمن، جهت جلوگیری از تولید شن در زمان تولید.
- * بررسی افت فشار منفذی در هنگام تخلیه مخزن که باعث فشردگی مخزن و مشکلات نشست سطحی، مچاله شدن لوله‌های جداری و فعال شدن مجدد گسل‌ها می‌شود.

۲- مراحل و روش ساخت مدل ژئومکانیکی میدان مورد نظر

اطلاعات استفاده شده برای ساخت مدل ژئومکانیکی در این

میدان عبارتند از:

- * داده‌های نمودارگیری (شامل نمودارهای معمولی،^۸DSI،^۹FMI و^{۱۰}LWD)

عملیات حفاری میدان مورد مطالعه (که یکی از میداین نفت فلات قاره ایران می‌باشد) در سال‌های اخیر همواره با مشکلات ناشی از ناپایداری دیواره چاه، هزرروی گل، تولید کننده‌های زیاد، تنگی حفره چاه، گیر کردن لوله‌ها و جریان سیالات ناخواسته^۴ به دهانه چاه همراه بوده است که این مشکلات باعث تحمیل زمان از دست‌رفته^۵ زیادی در حین عملیات حفاری شده است.

جهت پیش‌بینی بازه ایمن و پایدار وزن گل حفاری در چاه‌های آینده میدان و درک بهتر پارامترهای مؤثر در ناپایداری دیواره چاه و همچنین به منظور پیش‌بینی بازه ایمن و پایدار وزن گل برای حفاری چاه‌های آینده میدان، ساخت مدل ژئومکانیکی ضروری به نظر می‌رسید. در این مقاله مشکلات اصلی حفاری برای هر کدام از حفره‌های یک چاه ("۳۶" و "۲۶" و ...) مشخص شده و سپس مراحل و روش ساخت مدل ژئومکانیکی با استفاده از اطلاعات حفاری و نمودارگیری تشریح می‌شود. در پایان کاربرد این مدل برای پیش‌بینی جلوگیری از مشکلات معمول ناپایداری دیواره چاه و طراحی وزن بهینه گل حفاری بیان خواهد شد.

۱- تعریف و کاربردهای مدل ژئومکانیکی

مدل ژئومکانیکی نمایشی عددی از وضعیت تنش‌های درجا و خواص مکانیک سنگ برای یک ستون چینه‌شناسی در میدان می‌باشد.



که در آن ρ چگالی و g شتاب ثقل می‌باشد.

ب- تنش افقی حداقل (σ_h)

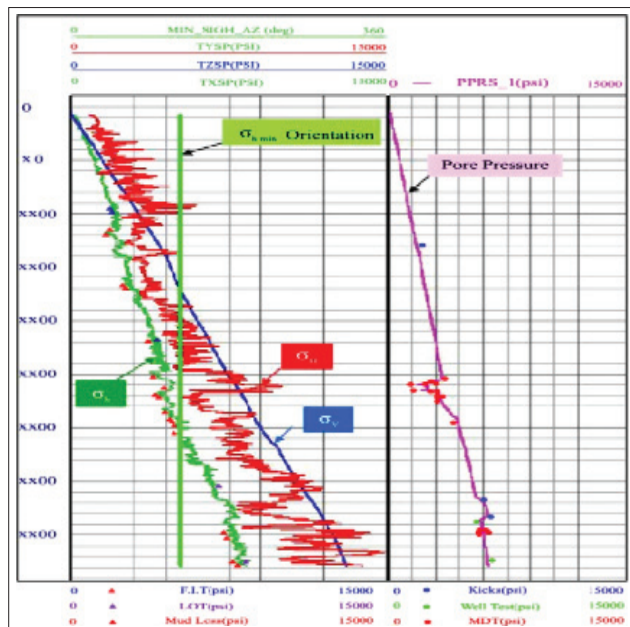
به عنوان حدس اولیه برای تعیین مقادیر σ_h در میدان از مدل Poro-Elastic به صورت زیر استفاده گردید.

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

که در آن ν ضریب پواسون، P_p فشار منفذی، α ثابت الاستیک Biot، E مدول یانگ و ϵ_x و ϵ_y به ترتیب مقادیر کشش در جهت‌های تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر می‌باشند.

مقادیر E و ν و P_p از مدل ژئومکانیکی به دست می‌آید. مقادیر ϵ_x و ϵ_y به صورت حدس و خطا تغییر داده می‌شود تا اینکه همخوانی مناسبی برای پروفایل تنش بر مبنای مقایسه با داده‌های واقعی LOT^{۱۲} و هرزروی گل به دست آید. پروفایل نهایی کالیبره شده تنش افقی حداقل در شکل ۱ نشان داده شده است.

جهت تنش افقی حداقل، موازی جهت گسیختگی و ریزش دیواره چاه بر روی دیواره چاه قائم می‌باشد که به صورت دو ناحیه توسعه یافته بر روی دیواره چاه از روی نمودارهای تصویری قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است جهت غالب این گسیختگی‌ها و در نتیجه جهت تنش افقی حداقل به صورت WNW-ESE می‌باشد.



شکل ۱ | پروفایل کالیبره شده از تنش‌های درجا و فشار منفذی و همچنین جهت تنش افقی حداقل در میدان

* اطلاعات حفاری (وزن گل، نواحی هرزروی گل، نواحی جریان سیال ناخواسته به چاه، FIT^{۱۱} و LOT^{۱۲})
* اطلاعات چاه آزمایشی (DST^{۱۳} و MDT^{۱۴})

۱-۲- خلاصه مشکلات مراحل مختلف حفاری

* در حفره ۳۶" و ۲۶" مشکل خاصی مشاهده نشد.
* در حفره ۱۷" جریان سیالات ناخواسته به درون چاه، هرزروی خفیف گل و چند مورد تنگی دهانه چاه مشاهده شد.
* در حفره ۱۲" چندین مورد تنگی حفره چاه و گیر لوله‌ها مشاهده شد.
* در حفره ۸" مشکلات تنگی حفره چاه و گیر لوله‌ها و همچنین هرزروی کامل^{۱۵} در چند ناحیه مشاهده شد.

۲-۲- اطلاعات نمودارگیری و زمین‌شناسی

مدل ژئومکانیکی برای کل عمق چاه از کف دریا تا عمق نهایی ساخته شده است. از آنجایی که اکثر نمودارها در حفره‌های بالایی چاه رانده نمی‌شوند، این نمودارها بر پایه روابط تجربی بین نمودارهای چگالی و نمودارهای صوتی ساخته شدند. [۱]

۳-۲- فشار منفذی

محاسبات مربوط به گرادیان فشار منفذی^{۱۶} برای پیش‌بینی فشار منفذی در هر قسمت انجام شد. از اطلاعات فشارهای اندازه‌گیری شده توسط DST و MDT و وزن گل مورد استفاده در نواحی جریان سیالات ناخواسته به دهانه چاه، برای کالیبره کردن پروفایل فشار منفذی استفاده شد. (شکل ۱)

۴-۲- تنش‌های درجا

مقدار و جهت تنش‌های درجا در مدل ژئومکانیکی باید مشخص شود. این تنش‌های اصلی شامل تنش قائم (σ_v)، تنش افقی حداکثر (σ_H) و تنش افقی حداقل (σ_h) می‌باشند.

به طور کلی دو نوع شکست در دیواره چاه از روی نمودارهای تصویری^{۱۸} قابل مشاهده می‌باشد که عبارتند از گسیختگی دیواره چاه^{۱۹} و شکاف‌های ناشی از عملیات حفاری^{۲۰}. این شکستگی‌ها در تعیین جهت و مقدار تنش‌های درجا در مدل ژئومکانیکی نقش به‌سزایی دارند. [۱]

الف - تنش قائم (σ_v)

مقادیر تنش قائم از انتگرال‌گیری چگالی سازند نسبت به عمق به صورت زیر محاسبه می‌شود. این مقادیر در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) \cdot g \cdot dz \quad (1)$$

ج- تنش افقی حداکثر (σ_H)

برای تعیین مقادیر تنش افقی حداکثر، ابتدا نواحی دارای شکستگی (گسیختگی و/یا شکاف‌های ناشی از عملیات حفاری) از روی نمودارهای تصویری و نمودار Orthogonal Caliper تعیین می‌شوند. سپس به کمک نرم‌افزار و به روش مدل‌سازی محاسبه پارامترهای مکانیکی (P_p, ν, UCS و زاویه شکست) و همچنین محاسبه تنش‌های اصلی (σ_H و σ_V) انجام می‌شود. در مرحله پایانی مقدار تنش افقی حداکثر (σ_H) به صورتی کالیبره می‌شود که مدل بتواند دوباره شکست مشاهده شده در آن نواحی را پیش‌بینی کند. [۱] جهت تنش افقی حداکثر، موازی با جهت شکاف‌های ناشی از عملیات حفاری بر روی دیواره چاه می‌باشد که در اینجا با توجه به نتایج نمودار FMI (شکل ۳) و نتایج رز دیاگرام (شکل ۴) جهت σ_H به صورت NNW-SSW می‌باشد.

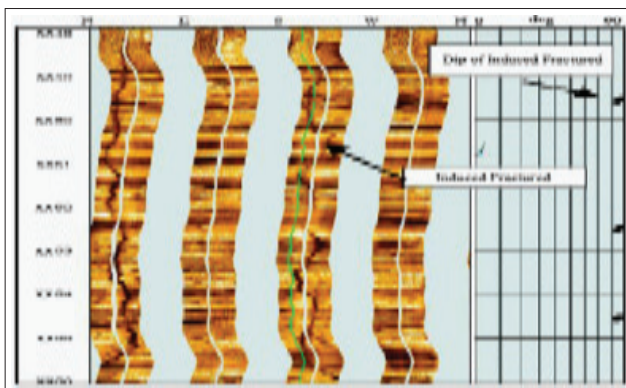
۳- پیش‌بینی پایداری دیواره چاه با استفاده از مدل ژئومکانیکی

با استفاده از اطلاعات فوق، مدل ژئومکانیکی در چاه مورد نظر ساخته شد و سپس پروفایل پایداری دیواره چاه برای تمامی نواحی چاه از سطح تا عمق نهایی مشخص گردید. این پروفایل شامل نواحی جریان سیالات ناخواسته به دهانه چاه، گسیختگی دیواره چاه، شکست کششی، هرزروی گل و پنجره وزن گل بهینه و پایدار می‌باشد. در این پروفایل وزن گل بهینه معادل فشاری از گل می‌باشد که بیشتر از فشار منفذی (P_p) و کمتر از مقدار تنش افقی حداقل (σ_H) است. وقتی که فشار گل کمتر از فشار منفذی باشد، سیال سازند وارد دهانه چاه می‌شود و چنانچه فشار گل بیشتر از مقدار تنش افقی حداقل در آن ناحیه باشد، شکاف‌های ناشی از عملیات حفاری بر روی دیواره چاه ایجاد می‌شوند که در واقع نقطه شروع هرزروی گل است.

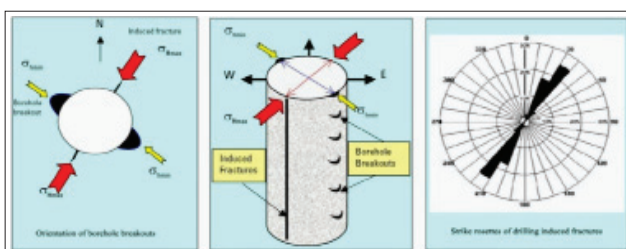
وزن گل پایدار معادل فشاری از گل است که بیشتر از فشار گسیختگی دیواره چاه و کمتر از مقدار تنش افقی حداقل (σ_H) باشد. وزن گل حداقل، وزن گلی است که کمتر از آن، دیواره چاه شروع به ریزش می‌کند و حفره چاه به شکل بیضوی در می‌آید. همچنین وزن گل حداکثر نیز وزن گلی است که بیشتر از آن، شکاف در دیواره چاه به وجود می‌آید و باعث ایجاد هرزروی کلی می‌شود. (شکل ۵)

۲-۵- خواص الاستیک سنگ

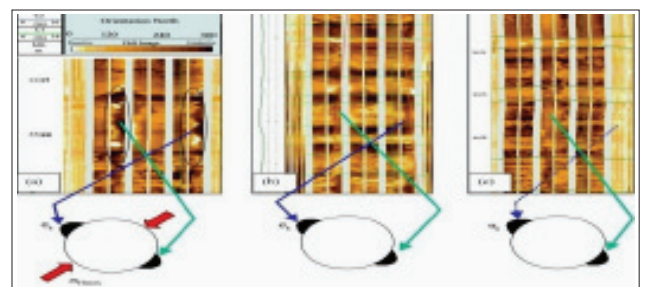
از آنجا که در این پروژه اطلاعات مغزه در دسترس نبود، بنابراین از روابط موجودی که از پارامترهای اندازه‌گیری شده نمودار DSI استفاده می‌کنند، برای محاسبه خواص الاستیک سنگ استفاده شد. نمودار DSI علاوه بر اندازه‌گیری مقدار Δt_s^{11} ، مقدار Δt_s^{22} را نیز ثبت می‌کند که با استفاده از این پارامترها و مقادیر نمودار چگالی می‌توان خصوصیات الاستیک سنگ را بر پایه روابط موجود به دست آورد. اما از آنجا که در نمودارگیری، پارامترها در فرکانس‌های بسیار بالا ثبت می‌شوند، مقادیر به دست آمده از این روابط خواص دینامیک سنگ می‌باشند. فرآیند شکست و تغییر شکل دهانه چاه در مقایسه با فرآیند انتشار امواج با فرکانس بالا یک فرآیند کند محسوب می‌شود، بنابراین خواص دینامیک توسط روابط تجربی موجود به خواص استاتیکی معادل آن تبدیل شدند. پارامترهای محاسبه شده عبارتند از: مدول یانگ، مقاومت تراکمی تک محوری^{۲۳}، ضریب پواسون و زاویه اصطکاک داخلی.



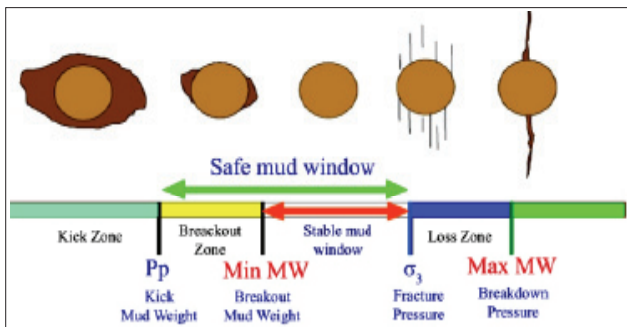
شکل ۳ | شکاف‌های ناشی از عملیات حفاری بر روی نمودار FMI، جهت این شکاف‌ها موازی تنش افقی حداکثر (σ_H) می‌باشد.



شکل ۴ | جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل در میدان



شکل ۵ | نتایج نمودار تصویری FMI که در آن گسیختگی بیضوی در دیواره چاه مشخص شده است که این گسیختگی‌ها در جهت تنش افقی حداقل (σ_H) ایجاد می‌شود.



شکل ۵ | شمایک اثرات تغییر وزن گل در ایجاد نواحی ناپایدار در دیواره چاه

از نقطه نظر ژئومکانیکی، وزن گل پایدار، چاه را در ناحیه ایمن از نظر شکست کششی و یا گیر اختلاف فشاری که نتیجه وزن بالای گل است قرار می دهد. به علاوه این وزن گل چاه را در ناحیه ایمن از نظر شکست برشی یا گسیختگی چاه که نتیجه وزن پایین گل است نگاه می دارد.

روابط زیر حد بالا و پایین وزن گل را بیان می کند که در آن P_{mud} فشار هیدروستاتیک گل در عمق مورد نظر و T مقاومت کششی سنگ دیواره چاه می باشد که در اکثر سازندها مقدار T در حدود $\frac{1}{3}$ مقاومت تراکمی است.

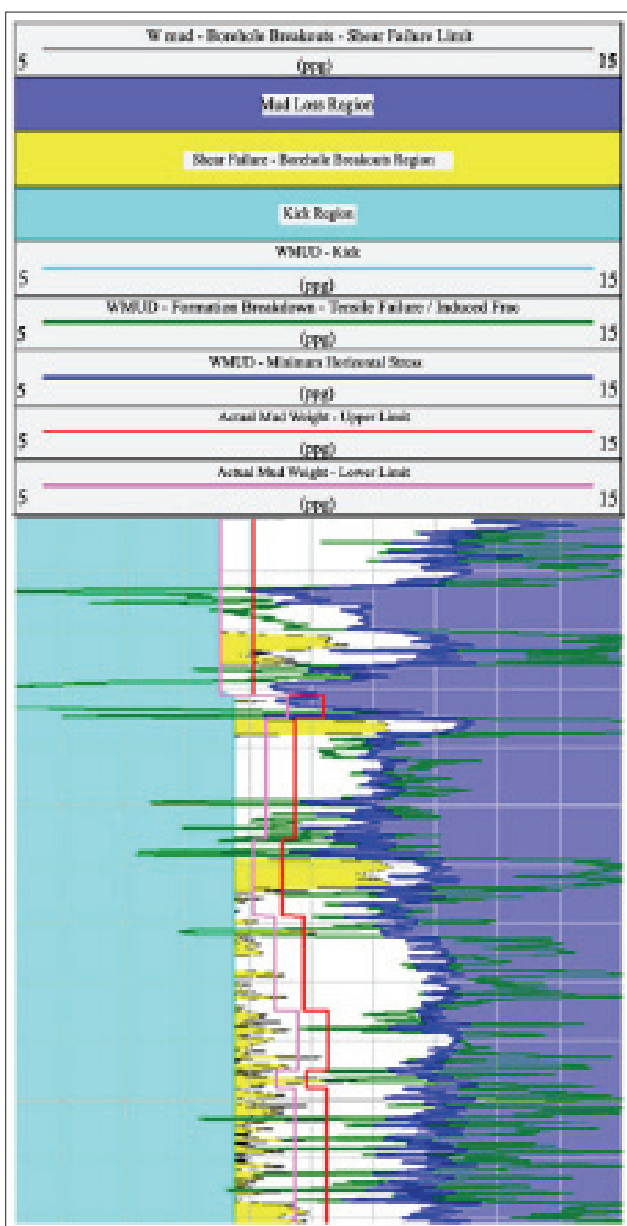
$$P_{mud} \geq 3\sigma_H - \sigma_V - P_p - UCS \quad (3)$$

$$P_{mud} \leq 3\sigma_H - \sigma_H - P_p + T \quad (4)$$

نتایج پیش بینی پایداری دیواره چاه حاصل از مدل ژئومکانیکی برای حفره های $17\frac{1}{4}$ " و $12\frac{1}{4}$ " و $8\frac{1}{4}$ " به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ و ۸ نشان داده شده است که هر کدام شامل پنجره ایمن برای وزن گل، ناحیه ایجاد جریان سیالات ناخواسته به دهانه چاه، ناحیه شکست برشی، حد ایجاد شکست کششی و ناحیه ایجاد هرزروی گل در مقایسه با وزن گل واقعی استفاده شده در عملیات حفاری در هر ناحیه می باشد.

مدل ژئومکانیکی ساخته شده نشان می دهد که پنجره وزن گل پایدار برای عمق های متوسط و زیاد معمولاً نازک می باشد؛ در حالی که برای نواحی کم عمق این پنجره قابل قبول می باشد. نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی نشان می دهد که حفره $17\frac{1}{4}$ " قسمت بالایی حفره $12\frac{1}{4}$ " مقادیر فشار منفذی، فشار گسیختگی و گردان ایجاد شکاف کمتری را دارا می باشند (شکل های ۶ و ۷). در حفاری این نواحی، گسیختگی و هرزروی گل به وفور اتفاق افتاده است که بنا بر نتایج مدل ژئومکانیکی وزن گل مورد استفاده در برخی نواحی خارج از پنجره پایدار وزن گل بوده است. در قسمت های پایین حفره $12\frac{1}{4}$ " تا عمق نهایی چاه، فشار منفذی، فشار گسیختگی و شیب شکست سازند دارای مقادیر بیشتری هستند که این موضوع باعث نازک تر شدن پنجره ایمن وزن گل می شود (شکل های ۷ و ۸).

عملیات حفاری در موارد زیادی در این قسمت ها در ناحیه گسیختگی دیواره چاه قرار گرفته است. فرآیند گسیختگی دیواره چاه بدین صورت است که در ابتدا دیواره چاه در امتداد تنش افقی حداقل (σ_H) دچار شکست برشی می شود. این شکست های برشی ناپایدار هستند و پس از مدت کوتاهی



شکل ۶ | نتایج پیش بینی پایداری دیواره حاصل از MEM برای حفره $17\frac{1}{4}$ "

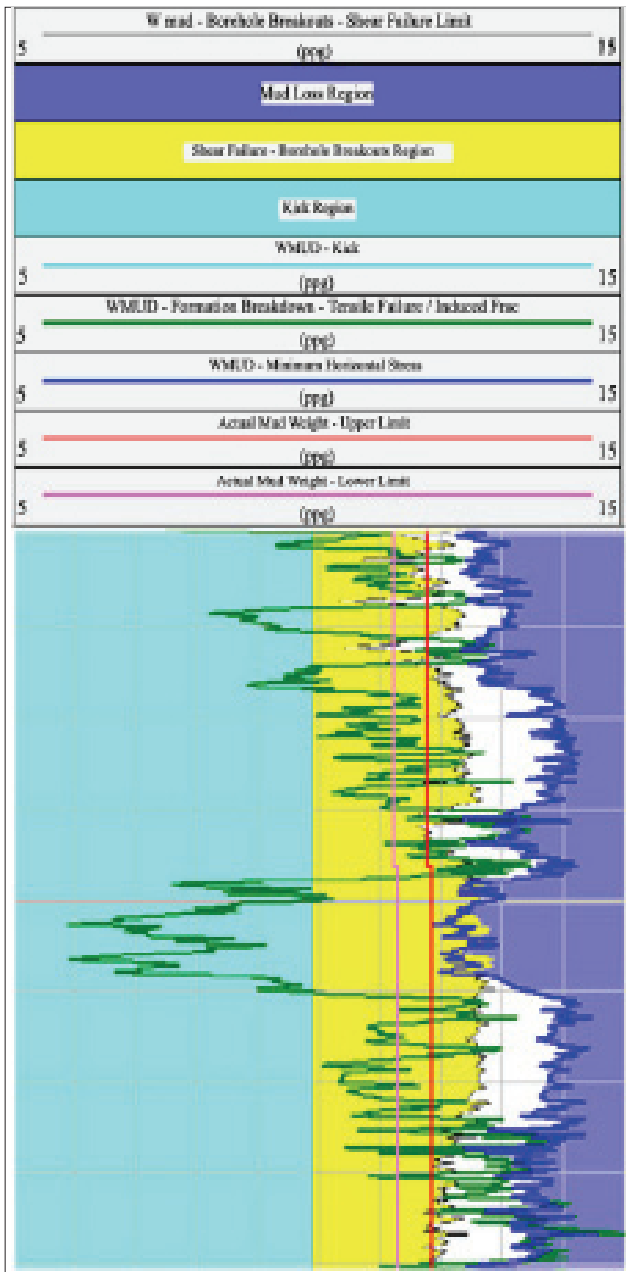
نتیجه گیری

۱) بر اساس نتایج نمودارهای تصویری و مدل ژئومکانیکی، جهت تنش افقی حداکثر (σ_{H1}) و تنش افقی حداقل (σ_{H3}) در میدان مورد مطالعه به ترتیب WNW-ESE و NNE-SSW می باشد که منطبق با رژیم محلی تنش های منطقه است.

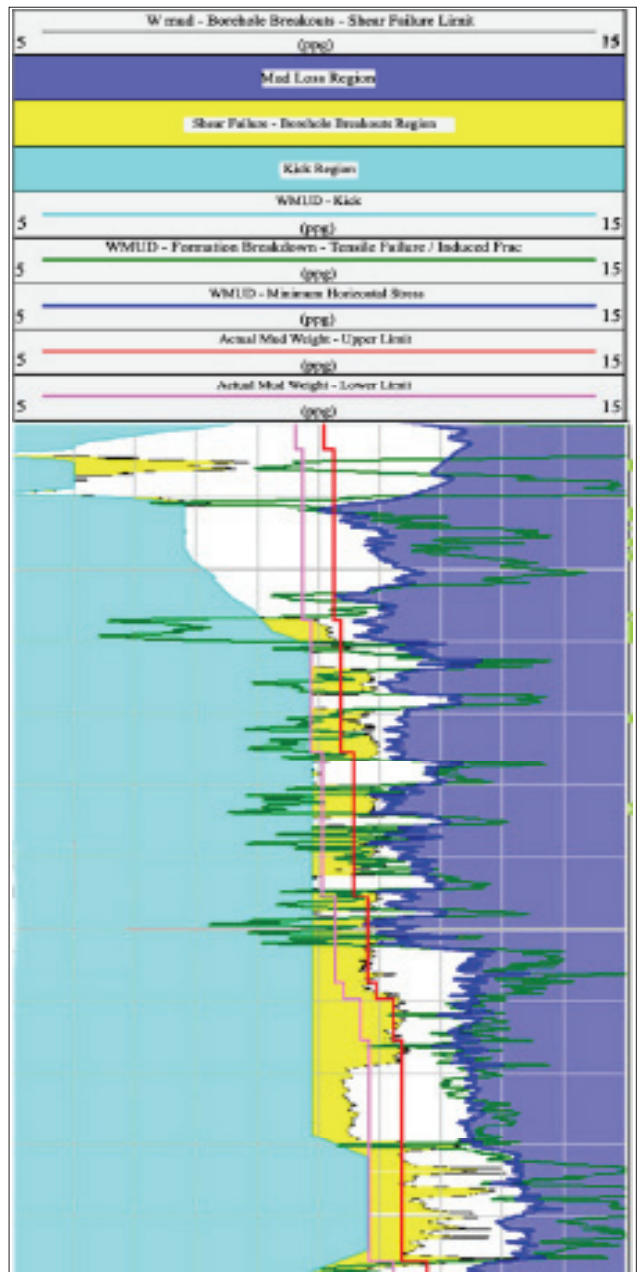
۲) نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی نشان می دهد که بک تغییر آشکار در پروفایل فشار منفذی، شکست برشی و شیب شکست سازند در ناحیه بین

ریزش می کنند که باعث ایجاد دو ناحیه پهن تر در مقابل هم روی دیواره چاه می شود که شرایط ناپایدار چاه را به دنبال خواهد داشت.

همچنین در برخی از نواحی وزن کم گل مورد استفاده، باعث قرارگیری در ناحیه ورود سیال ناخواسته به درون چاه شده است. در برخی نواحی نیز وزن زیاد گل باعث ایجاد شکاف در دهانه چاه و هرزروی گل شده است.



۸ | نتایج پیش بینی پایداری دیواره حاصل از MEM برای حفرة ۸ ۱/۳



۷ | نتایج پیش بینی پایداری دیواره حاصل از MEM برای حفرة ۱۲ ۱/۳



عمق ۳۰۱۵ متر (قسمت پایین حفره ۱۲-۱) تا عمق نهایی چاه قابل مشاهده است. بنابراین ناحیه بین عمق ۳۰۱۵ متر تا عمق نهایی چاه باید به صورت جداگانه از قسمت بالایی آن حفاری شود و پیشنهاد می شود که پاشنه لوله جداری^{۲۴} تقریباً در عمقی نزدیک به این عمق قرار گیرد. (۳) این مطالعه نشان می دهد که پیش بینی پایداری دیواره چاه به وسیله مدل ژئومکانیکی می تواند اکثر مشکلات حفاری را مرتفع نماید، بنابراین مدل ژئومکانیکی ساخته شده می تواند برای طراحی چاه های آینده میدان به کار برده شود.

(۴) پیشنهاد می شود که از روش حفاری کنترل فشار^{۲۵} برای کاهش ریسک ناشی از نازک شدن پنجره ایمن و پایدار وزن گل (ناحیه بین فشار منفذی و ضعیف ترین گرادیان شکست) استفاده شود. در این روش، حفاری با ستون هیدروستاتیک کمتر از مقدار مورد نیاز برای تعادل با فشار منفذی صورت می گیرد. در حالی که این مقدار اختلاف توسط فشار اصطکاکی فضای حلقوی^{۲۶} در هنگام گردش گل و توسط پس فشار سطحی در موارد ایستا و حالت اتصالات و عملیات لوله بالا/

پایین جبران می شود.

(۵) پیشنهاد می شود از روش حفاری APWD^{۲۷} که قابلیت ثبت تغییرات در چگالی معادل گردشی به صورت هم زمان با عملیات حفاری را دارد استفاده شود تا از قرار گرفتن وزن گل ته چاه در پنجره پایدار وزن گل اطمینان حاصل شود.

(۶) برای حصول نتایج بهتر، باید خواص مکانیک سنگ به دست آمده از نمودارگیری و روابط موجود توسط آزمایش های مقاومت سنگ بر روی مغزه ها کالیبره شود.

(۷) مدل ژئومکانیکی ساخته شده برای این میدان باید در حین عملیات حفاری چاه های جدید میدان به روز شود، زیرا پشتیبانی ژئومکانیک هم زمان با عملیات حفاری، امکان تصمیم گیری های حیاتی در صورت وقوع حوادث پیش بینی نشده را فراهم می سازد.

(۸) مدل ژئومکانیکی ساخته شده برای میدان علاوه بر پیش بینی پایداری دیواره چاه برای پیش بینی تولید شن، تخلیه مخزن و نشست سطحی و موارد دیگر نیز کاربرد دارد.

پانویس ها

- | | | |
|--|---|---|
| ¹ Mechanical Earth Model (MEM) | ¹¹ Formation Integrity Test | ²⁰ Drilling Induced Fracture |
| ² Meisam_afsari@yahoo.com | ¹² Leak-off Test | ²¹ Compressional transit time |
| ³ Farhad_fb@yahoo.com | ¹³ Drill-stem Test | ²² Shear transit time |
| ⁴ Kick | ¹⁴ Modular formation Dynamics Tester | ²³ Unconfined Compressive Strength (UCS) |
| ⁵ Non Productive Time (NPT) | ¹⁵ Complete Loss | ²⁴ Casing Shoe |
| ⁶ Pore Pressure | ¹⁶ Pore Pressure Gradient | ²⁵ Managed Pressure Drilling |
| ⁷ Fracture Gradient | ¹⁷ In-Situ Stresses | ²⁶ Annular Friction Pressure |
| ⁸ Dipole Shear sonic Imager | ¹⁸ Image Logs | ²⁷ Annular Pressure While Drilling |
| ⁹ Full-bore Microresistivity Imager | ¹⁹ Borehole Breakout | |
| ¹⁰ Logging While Drilling | | |

منابع

- [1] Afsari, M., Ghafoori, M.R., Roostaeian, M., Haghshenas, A., Ataei, A., Masoudi, R., " Mechanical Earth Model (MEM); an Effective Tool for Borehole Stability Analysis and Managed Pressure Drilling (Case Study)" paper SPE 118780 presented at the 2009 SPE middle east oil and gas show a conference held in Bahrain, Kingdom of Bahrain, 15-18 March 2009.
- [2] Rahim, Z., Al-Qahtani, M. Y., Bartko, K. M., Goodman, H., Hilarides, W. K., and Norman, W. D.: "The Role of Geomechanical Earth Modeling in the Unconsolidated Pre-Khuff Field Completion Design for Saudi Arabian Gas Wells," paper SPE 84258 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, U.S.A., 5-8 October 2003.
- [3] Plumb, R., Edwards, S., Pidcock, G., Lee, D., and Stacey, B.: "The Mechanical Earth Model Concept and Its Application to High-Risk Well Construction Projects," paper IADC/SPE 59128 presented at the 2000 IADC/SPE Drilling Conference.
- [4] http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors03/sum03/p22_39.ashx
- [۵] گزارش های زمین شناسی، حفاری، پتروفیزیک و تولید چاه های منتخب در میدان مورد مطالعه / شرکت نفت فلات قاره ایران.