



بررسی خصوصیات ژئومکانیکی سازند شیل کژدمی و محاسبه پنجره وزن گل حفاری چاه نفتی در میدان نفتی رشادت

ناصر عبادتی*^۱ و محمد نجاری^۲

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلام شهر، drebadati@yahoo.com

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، Mohammad.najjari88@yahoo.com

(*عاهده دار مکاتبات)

دریافت: ۹۳/۳/۱؛ دریافت اصلاح شده: ۹۷/۵/۱۳؛ پذیرش: ۹۷/۶/۱۴؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۸/۳۰

چکیده

از طریق داده‌های ژئومکانیکی می‌توان به مدل‌سازی و کنترل رفتار توده سنگ در مسیر حفاری در مواجهه با تنش‌های وارد بر آن، فشار سیالات منفذی، دما دست یافت. درک صحیح و مدیریت ریسک حاصل از تغییر شکل توده سنگ، کمک قابل توجهی در اجرای فرآیندهای عملیاتی نظیر، پایداری دیواره چاه، کنترل تولید ماسه در چاه، انجام شکافت هیدرولیکی می‌نماید. در حفای چاه‌های نفتی تعیین تنش‌های افقی حداقل و حداکثر کمک می‌کند تا در جهت حداقل تنش، مسیر حفاری را طراحی نمود تا با ریزش دیواره چاه و گیر لوله حفاری روبرو نشویم. در این مقاله با هدف رعایت محاسبات دقیق ژئومکانیکی برای برطرف شدن عمده مسائل حفاری بلاخص در چاه‌های انحرافی در محدوده شیل کژدمی در میدان مورد مطالعه تلاش شد برای ایجاد مدل ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های لاگ تصویری و تلفیق آن با اطلاعات پارامترهای ژئومکانیکی ابتدا با محاسبه مدول بالک، مدول برشی، مدول یانگ، ضریب پواسون و نسبت V_p/V_s پرداخته شد و پارامترهای مقاومتی نظیر مقاومت فشاری تک محوره، ضریب اصطکاک داخلی و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته استاتیک و سپس تعیین جهت و مقدار تنش‌های حداقل و حداکثر افقی در طول ضخامت سازند مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت با بررسی‌های مدل ژئومکانیکی و محاسبه وزن گل در طول حفاری چاه مورد مطالعه و با استفاده از خروجی نرم افزار STAB Viwe، پنجره وزن گل مورد نظر برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه برای سازند کژدمی، ۹۲-۱۱۲ PCF و آزیموت حفاری در بازه ۴۵-۳۰ درجه پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: سازند کژدمی، مدل ژئومکانیکی، پنجره وزن گل، نرم افزار STAB View.

۱- مقدمه

داده‌های گزارش پایان چاه، اطلاعات پتروفیزیکی و ژئوفیزیکی و نیز

داده‌های دیگر در دسترس، سازند شیل کژدمی را با دقت مناسب از

نظر ژئومکانیکی توصیف و پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مدول‌های

این مقاله بر آن است تا با تعیین کمی و کیفی وضعیت ژئومکانیکی

سازند کژدمی، و پایداری دیواره چاه با استفاده از داده‌های چاه شامل

۲- روش کار

در ابتدای روند پروژه پس از محاسبه داده‌ها از روی لاگ‌های صوتی، چگالی و تخلخل اطلاعات را در نرم افزار ژئولاگ ۷ بارگذاری می‌کنیم تا خصوصیات مکانیکی را محاسبه کرده و با استفاده از تطابق مناسب تمام ورودی‌ها به حالت استاتیک تبدیل گردد. بطوریکه با استفاده از ابزارهای دانسیته و تخلخل موثر بتوان مقادیر نسبت پواسون و مدول یانگ در دو حالت دینامیک و استاتیک، تنش افقی، مقاومت فشاری محوری و گرادیان شکست مخزن محاسبه گردد که در نهایت هدف اصلی تعیین بازه پنجره وزن گل بین فشار شکست کششی (Breakout) و فشار شکستگی در محدوده‌های فشار منفذی و شکست برشی سنگ (Shear Failure) و منطقه هرزروی (loss zone) می‌باشد. در بیان کلی مساله می‌توان گفت که ابتدا با تعیین چینه شناسی سازند و سپس محاسبه ضرایب الاستیک و فشار منفذی به تعیین قدرت سنگ و بعد از آن با تعیین تنش‌های حداقل و حداکثر به تحلیل مسیر حفاری (Trajectory Analysis) و پس آن تعیین و بررسی پایداری چاه دست می‌یابیم.

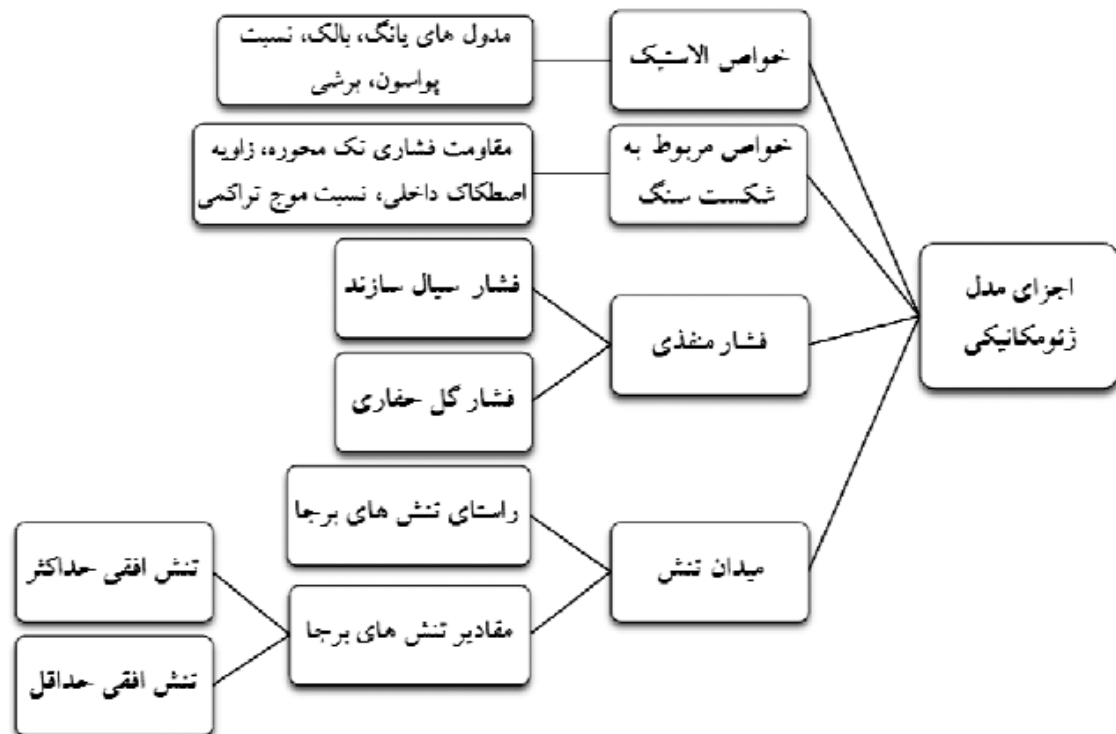
۲-۱- اجزای مدل ژئومکانیکی مخزن

ارزیابی رفتار ژئومکانیکی مخزن نیازمند اطلاعات ورودی مناسب می‌باشد، اجزای مدل ژئومکانیکی مخزن را می‌توان به صورت تصویر (۱) دسته بندی کرد:

۲-۲- روش‌های محاسبه ثابت‌های الاستیک

یکی از مهم‌ترین مسائل مورد مطالعه در زمینه زمین‌شناسی مهندسی، مهندسی نفت و مهندسی معدن خواص الاستیک سنگ می‌باشد؛ مدل سازی ژئومکانیکی مخازن هیدروکربنی و عملیات مختلفی در صنایع بالادستی نفت نیازمند پارامترهای الاستیک سنگ هستند، زیرا این پارامترها وابسته به خصوصیات فیزیکی سنگ می‌باشند. در حالی که در بیشتر موارد این اطلاعات در دسترس نمی‌باشند. در واقع تمام چاه‌های نفت و گاز به عنوان اولین منبع اطلاعات، از یک ثبت استاندارد لاگ‌ها برخوردار نیستند و بیشتر لاگ‌ها در اکثر مواقع به تخمین خصوصیات فیزیکی سنگ و به طور کلی اطلاعات مرتبط با محاسبه خواص الاستیک سنگ می‌پردازند. پارامترهای ژئومکانیکی به دو گروه اطلاعات استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شوند. مرسوم‌ترین

حجمی و برشی سنگ، نسبت پواسون، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی سازند و نظیر آن تعیین می‌شوند. همچنین با استفاده از رژیم تنش منطقه و اطلاعات ژئوفیزیکی وضعیت تنش در عمق با دقت مناسب مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. یکی از لاگ‌های پتروفیزیکی که در این تحقیق برای تعیین میدان تنش استفاده می‌شود، لاگ تصویری FMI Fullbor Formation MicroImager (FMI) می‌باشد. از کاربردهای FMI می‌توان به تحلیل‌های ساختمانی، بررسی‌های ژئومکانیکی، سنجش تعادل چاه و شناسایی واحدهای رسوبی، آنالیز بافتی رخساره‌ها، ارزیابی شبکه‌های شکست، جهت یابی و مطالعه مغزه‌ها اشاره نمود (قاسم العسگری ۱۳۸۹). در طول دوران حفاری میدان رشادت در شیل کژدمی، مسائل عمده‌ای ایجاد شده است. تعدادی چاه‌ها در این زون، دارای ریزش دیواره هستند به طوری که سالانه هزینه زیادی برای رفع گیر ابزارها و متوقف سازی عملیات حفاری در محدوده شیل‌های کژدمی وارد می‌آید. به دلیل این‌ویژوئروپی سازند در شیل کژدمی محاسبه پارامترهای الاستیک سنگ ضروری است. تعیین تنش‌های افقی و برشی کمک می‌کند تا در جهت حداقل تنش، مسیر حفاری را طراحی نمود تا با ریزش دیواره چاه روبرو نشویم. شکست مکانیکی دیواره چاه نتیجه فعل و انفعال بین تنش درجا، استحکام سنگ و تجربه مهندسی می‌باشد. بنابراین ابزار اساسی تحلیل پایداری دیواره چاه، آنالیز تنش، انتخاب معیار مناسب بسط داده شده برای ژئومتری، قوانین اصلی و شرایط مرزی می‌باشد (Nawrocki et al. 1998). به همین دلیل رعایت محاسبات دقیق ژئومکانیکی باعث برطرف شدن عمده مسائل حفاری بلاخص در چاه‌های انحرافی در محدوده شیل کژدمی می‌گردد. مطالعات ژئومکانیکی برای توصیف بهتر رفتار مکانیکی سنگ مخزن به کار می‌روند. بطور کلی به منظور ساخت یک مدل ژئومکانیکی برای یک میدان یا مزخ نفتی، نیاز به پارامترهای الاستیک، خصوصیات مکانیکی سنگ و مدل میدان تنش می‌باشد. با توجه که در میدان مورد مطالعه و داده‌های چاه مورد نظر، در محدوده سازند کژدمی در حین حفاری شاهد گیر لوله حفاری (Stuck pipe) در داخل سازند هستیم لذا در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده از تعیین خواص الاستیک سنگ و تعیین مقدار تنش در نهایت به پنجره وزن گل مناسبی جهت جلوگیری از ریزش دیواره چاه و یا هرز روی گل دست یابیم.



تصویر ۱- نمودار اجزای تشکیل مدل ژئومکانیکی مخزن

می شود. پارامترهای استاتیک را از طریق یک زنجیره آزمایش سه محوره فشاری می توان به دست آورد (Jose et al. 2000). خواص الاستیک سنگ مطابق روابط زیر بدست می آید.

$$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_{ax}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در روابط بالا E مدول یانگ، K مدول بالک، G مدول برشی، ϵ_{ax} کرنش در جهت محور X و σ_x تنش محوری در جهت محور X و ν ضریب پواسون می باشد.

روش دینامیک: کاربرد روش های دینامیک بدلیل عدم آسیب رسانی به نمونه در سال های اخیر گسترش روزافزونی داشته است. در این روش با عبور امواج برشی و تراکمی از نمونه سنگ مخزن و تعیین زمان گذر امواج، بدون آسیب رساندن به سنگ خواص الاستیک سنگ را محاسبه می کنند. مهم ترین منابع اطلاعاتی برای تخمین دینامیکی پارامترهای الاستیک سنگ مخزن و پارامترهای ژئومکانیکی در طول چاه، چاه نگارهای صوتی برشی دو قطبی و

و قدیمی ترین روش های محاسبه این خواص انجام آزمایش های استاتیک است. روش های دینامیکی نیز در محاسبه خواص الاستیک سنگ و اجزای مدل ژئومکانیکی جایگاه ویژه ای را به خود اختصاص داده اند.

روش استاتیک: مرسوم ترین و قدیمی ترین روش محاسبه خواص الاستیک سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی، انجام آزمایش های استاتیک است. اطلاعات استاتیکی با انجام آزمون های فیزیکی - مکانیکی مستقیم بر روی نمونه سنگ مخزن در آزمایشگاه و یا به صورت برجا به دست می آیند. معمولاً پارامترهای الاستیک سنگ و خواص ژئومکانیکی سنگ مخزن از آزمون های آزمایشگاهی (آزمون مقاومت فشاری تک محوری) بر روی مغزه به دست می آید. لازم به ذکر است که محاسبه مدول های الاستیکی و مقاومت تراکمی تک محوره از روش استاتیکی دارای محدودیت هایی از قبیل در دسترس نبودن مغزه، نقطه ای بودن نتایج، هزینه زیاد انجام مغزه گیری و آزمایش های مکانیک سنگی می باشد. برای اکثر مدل های رایج در دسترس، پارامتر مقاومت بحرانی سنگ به صورت مقاومت کششی و برشی سازند مطرح شده است. مقاومت برشی به صورت معمول از طریق معیار شکست موهر - کولمب تعریف می شود و به وسیله پوش شکست دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توصیف

مقاومت سنگ بکر می‌باشد. بررسی‌های مبتنی بر آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه، از روش‌های اصلی و رایج تخمین مقاومت تراکمی تک محوری محسوب می‌شود. در بیشتر چاه‌های حفر شده، در بسیاری از بازه‌های چاه که این اطلاعات مورد نیاز هستند، مغزه‌ای موجود نمی‌باشد به همین منظور در چند دهه‌ی گذشته، روابط تجربی متعددی برای محاسبه مقاومت تراکمی تک محوری بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه سرعت موج فشاری، چگالی و تخلخل، در لیتولوژی‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به اینکه سنگ مخزن در میدان مورد مطالعه از جنس کربناته می‌باشد.

از آن جا که مقاومت کششی سنگ (TSTR) معمولاً ۷۱۲ تا ۷۸ مقاومت فشاری محوری (UCS) آن می‌باشد در صورت عدم وجود اطلاعات برای سنگ‌های شیل و کربناته مقاومت کششی سنگ در نظر گرفته شده ۷۱۰ مقاومت فشاری محوری آن در نظر گرفته شده است.

۲-۵- زاویه اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی، یکی از پارامترهای مهم مکانیک سنگ می‌باشد که مقاومت سنگ را محاسبه می‌کند. بطور کلی، با افزایش میزان شیل در سازند، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که زاویه اصطکاک داخلی در پیش بینی تولید ماسه از مخزن، مفید می‌باشد. به همین منظور روابط تجربی متعددی برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه سرعت موج فشاری، تخلخل و میزان شیل موجود ارائه شده است. (قندهاری علویچه ۱۳۹۱)

۲-۶- فشار منفذی (Pure Pressure)

فشار منفذی یکی از مهمترین پارامترهای طراحی یک مدل ژئومکانیکی و طراحی حفاری و یکی از پارامترهای تاثیرگذار برای محاسبه تنش‌های برجا و تحلیل پایداری چاه می‌باشد و فشار منفذی با فشار هیدروستاتیک متفاوت می‌باشد و در مناطق فرا فشار حدود ۴۸ - ۹۸ درصد تنش روباره (Overburden Pressure) می‌باشد. اگر فشار منفذی بیشتر یا کمتر از فشار هیدروستاتیک (فشار منفذی نرمال) باشد به ترتیب به آن فرا فشار و فرو فشار می‌گویند.

نمودارهای پتروفیزیکی (چگالی، اشعه گاما و غیره) می‌باشند. از محاسبات استفاده از روش دینامیکی می‌توان به هزینه مناسب و پیوسته بودن نتایج آن در تمام طول چاه مورد مطالعه و از معایب آن می‌توان به اندازه گیری بصورت غیر مستقیم اشاره نمود.

$$E_d = \left[\frac{9K_p V_p^2}{3k + \rho V_p^2} \right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$K_d = \rho \left[C - \frac{4}{3} V_s^2 \right] \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$G_d = \rho V_p^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$v_d = \frac{1}{2} \left(\left[\frac{V_s^2}{V_p^2} \right] - 2 \sqrt{\left[\frac{V_s^2}{V_p^2} \right] - 1} \right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن E_d, G_d, K_d, V_p, V_s به ترتیب مدول یانگ دینامیکی، مدول بالک دینامیکی، مدول برشی دینامیکی و ضریب پواسون دینامیکی می‌باشند و ρ, V_p, V_s نیز به ترتیب سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری و چگالی سازند است.

پارامترهای الاستیک سنگ حاصل از روش استاتیکی نسبت به روش دینامیکی معمولاً با هم متفاوت هستند. اغلب مدول‌های دینامیکی از مدول‌های استاتیکی متناظر خود بزرگ تر هستند، این تفاوت در سنگ‌های ضعیف بیشتر می‌باشد این اختلاف به دلیل آن است که حفرات و ناپیوستگی‌های موجود در سنگ در خواص الاستیک سنگ بدست آمده در روش استاتیکی نسبت به روش دینامیکی تاثیر بیشتری می‌گذارد، به عنوان مثال مدول یانگ استاتیک.

۲-۳- قدرت سنگ (Rock Strength)

قدرت سنگ عبارت است از توانایی سنگ سازند و مقاومت آن در برابر محیط تنش در اطراف چاه. مقاومت فشاری محوری (UCS) یکی از شاخص‌ترین پارامترهای برآورد شده از قدرت سنگ می‌باشد. در مطالعه پیش رو، UCS بر اساس روابط تجربی اختصاصی برای شیل و کربنات‌ها محاسبه گردیده است. مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک، (UCS) خواص مربوط به شکست سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری داخلی است.

۲-۴- مقاومت تراکمی تک محوری

(Uniaxial compressive strength)

مقاومت تراکمی تک محوره سنگ، یکی از معیارهای رایج در ارزیابی

پواسون، α ضریب بایوت، P_w فشار سیال حفاری، E مدول یانگ (برحسب GPa) و ϵ_x و ϵ_y نیز به ترتیب کرنش در جهت x و y هستند.

(Zhang 2011) فشار منفذی را می توان با اندازه گیری مستقیم یا با استفاده از لاگ های ژئوفیزیکی و داده های لرزه ای بدست آورد (Reynolds et al. 2006).

۲-۸- معیارهای شکست

کاربرد معیار شکست، پیش بینی یا تخمین شکست سنگ است. مدل سازی فرایند شکست و چگونگی آن بر پایه یک معیار شکست متناسب و سازگار با شرایط اولیه سازند می باشد. در واقع در هنگام آغاز و توزیع میکرو شکاف ها و هم در هنگام به هم پیوستن این میکرو شکاف ها و شکست کامل سنگ، به درستی مکانیزم شکست قابل توصیف نیست، در هر دو حالت فرایند بسیار پیچیده می باشد و توصیف آن از طریق مدل های ساده شده، آسان نمی باشد (Grandi et al. 2002). ابتدایی ترین شرایط برای پایدار ماندن دیواره 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 موثر در دیواره چاه از استحکام سنگ تجاوز کند، ایجاد می شود (Grandi et al. 2002). اگر استحکام سنگ بیش تر از مقدار تنش القایی باشد، چاه پایدار خواهد ماند و در شرایط عکس سنگ تسلیم خواهد شد و احتمال ناپایداری در دیواره چاه وجود دارد. معیارهای شکست گوناگونی وجود دارد. هر کدام از این معیارها با ایجاد رابطه بین چند فاکتور، سعی در توصیف شرایط شکست دارند. به عنوان مثال معیار موهر-کولمب ارتباط بین تنش نرمال و تنش برشی را در حالت شکست توصیف می کند. معیار گریفیت، مقاومت کششی تک محوره را بر حسب انرژی کرنش مورد نیاز برای توزیع و گسترش ریزشکاف ها و مقاومت فشاری تک محوره را بر حسب مقاومت کششی توصیف می کند. در صنعت نفت، به خصوص به منظور بررسی پایداری چاه از معیارهای موهر-کولمب (Mohr-Coulomb)، دراکر-پراگر (Drucker-Prager) و ون میسز (Von Mises) بیشتر استفاده می شود و نتایج قابل قبولی از آن ها به دست آمده است (Grandi et al. 2002).

۲-۸-۱- معیار شکست موهر کولمب

در این پژوهش برای بررسی و تحلیل پایداری دیواره چاه از معیار

۲-۷- مقادیر تنش های مداخل و حداکثر

در اعماق مناسب برای اکتشاف نفت و گاز، جهت تنش های برجا به وسیله چندین پدیده مختلف تعیین می شود. این پدیده ها شامل گسل های فعال ریزشی در دیواره چاه، تورق مغزه ها، شکاف های القایی در اثر عملیات حفاری، وجود شکاف مرکزی در مغزه و زمین لرزه های طبیعی و القایی می باشند. این نوع از ریزش دیواره، وسیله تشخیص تراکم ناهمگن به دور دیواره چاه می باشند. هنگامی که اختلاف عمده ای میان σ_H ، σ_h در سنگ های اطراف چاه باشد، ریزش ایجاد خواهد شد. علاوه بر موارد ذکر شده زمان کافی برای توزیع و یکی شدن این شکاف و در نهایت سقوط سنگ لازم می باشد، احتمالاً لرزش رشته حفاری نیز به توسعه ریزش کمک خواهد کرد. تعیین جهت تنش ها بسیار مهم است، زیرا جهتی است که بیشترین احتمال برای توزیع و پخش شکاف های القایی در آن وجود دارد. همچنین، به کمک آن ها می توان جهت شکاف های طبیعی را نیز مشخص کرد (Mengiiao et al. 2003). جهت σ_H ، موازی شکاف های کششی و عمود بر جهت ریزش می باشد (Garbutt & Donna 2004) برای تعیین تنش های افقی روش های متعددی وجود دارد. مقدار σ_h را می توان از طریق آزمایش های نشت و شکست هیدرولیکی بدست آورد. در نهایت مقدار σ_H را نیز با استفاده از روابط موجود می توان بدست آورد. اگر داده های این آزمایش در دسترس نباشند، می توان مقدار تنش های افقی حداکثر و حداقل را از طریق فرمول به دست آورد. معمولی ترین مدل برای محاسبه این مقادیر در ارتباط با عمق، مدل کرنش سطحی می باشد (مدل پورو الاستیک). در این مدل با استفاده از مقادیر فشار روباره، مدول یانگ، ضریب پواسون، کرنش های افقی می توان مقادیر تنش های افقی را یافت که در زیر روابط آن ارائه شده است.

که در آن σ_H تنش افقی حداکثر، σ_h تنش افقی حداقل، ν ضریب

$$\sigma_h = \frac{1}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_w) + \alpha P_w + \frac{E \epsilon_v}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \epsilon_y}{1-\nu^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_w) + \alpha P_w + \frac{E \epsilon_v}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \epsilon_y}{1-\nu^2} \quad \text{رابطه (۹)}$$

نهایی برای این دایره می باشند. به عبارت دیگر با استفاده از این نمودار، هر نقطه ای براساس $(\sigma$ و τ) اگر بروی نمودار مربوطه رسم شود، سه حالت به وجود خواهد آمد

۱- اگر این نقطه زیرمنحنی شکست باشد، شکست رخ نخواهد داد.
۲- اگر این نقطه روی منحنی شکست باشد، سنگ در حالت بحرانی قرار دارد.

۳- اگر این نقطه بالای منحنی شکست باشد سنگ خواهد شکست. البته لازم به ذکر است این حالت هیچ گاه در عمل به وجود نمی آید زیرا قبل از رسیدن به این حالت سنگ خواهد شکست (Grandi et al. 2002).

شکست موهر- کلمب استفاده شده است که به صورت مختصر بصورت زیر شرح داده می شود. طبق نظریه موهر- کولمب تنش قائم و تنش برشی حداکثر، هیچ یک به تنهایی سبب شکستگی نمی شوند بلکه ترکیبی بحرانی از آن ها است که منجر به شکستگی می شود. طبق این نظریه، شکستگی در صفحه سنگ زمانی رخ خواهد داد که بین صفحه تنش برشی و قائم، رابطه زیر برقرار شود. (پارسامهر و همکاران ۱۳۸۹)

$$\sigma_c = \frac{2C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sigma_t = \frac{2C \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan \phi \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\tan \phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

۳- معرفی میدان

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش قسمتی از میدان نفتی رشادت که در گذشته به نام میدان رستم شناخته شده است، می باشد. میدان رشادت در بخش جنوب شرقی خلیج فارس در نزدیکی خط مرزی با قطر و حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی جزیره لاوان و ۱۳۰ کیلومتری جنوب غربی جزیره کیش قرار دارد. نفت تولیدی آن بیشتر از مخازن سروک بالایی، داریان و سرمه ناشی می شود. بستگی ساختاری میدان رشادت در افق های مخزنی مختلف شامل رأس مخزن سروک، رأس مخزن داریان، رأس مخزن سرمه و رأس سازند دالان می باشد. (Ghazban 2007) وضعیت عمومی میدان های

در این روابط، τ مقاومت برشی، C مقاومت چسبندگی، σ_n فشار عمود بر صفحه برش، Φ زاویه اصطکاک، σ_c مقاومت تک محوری سنگ، σ_t مقاومت کششی سنگ است.

از طریق تنش های اصلی اولیه، تنش های نرمال و برشی بر روی هر سطحی، با هر زاویه ای را می توان به وسیله معادلات تبدیلی مربوط به دایره موهر به دست آورد. با استفاده از مفاهیم ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، نمودار خطی موهر به دست می آید که حد



تصویر ۲- عکس ماهواره ای محل قرارگیری میدان رشادت در خلیج فارس (Map data 2014 google)

نشان داده شده است. لازم به ذکر می باشد سازند کژدمی معادل سازند عربی Nuhrum می باشد.

در ادامه همانگونه که در مفاهیم پژوهش ارائه شد از روی خواص دینامیک و سرعت موج تراکمی V_p به خواص الاستیک استاتیک دست پیدا می کنیم و مقدار زاویه اصطکاک داخلی به تفکیک هر سازند، مقامت فشاری تک محوره و مقاومت کششی سازند از روی مدول بالک و مدول موج P (مدول سرعت تراکمی) خروجی آن در نرم افزار ژئولاگ ترسیم و مقادیر آن ها طبق جدول (۲) محاسبه می گردد.

نسبت پواسون بدون واحد، واحد مدول یانگ GPa، واحد زاویه اصطکاک داخلی درجه می باشد. لازم به ذکر است در محدوده سازند کژدمی برای خروجی زاویه اصطکاک به دلیل عدم نمودار گیری مناسب یا کاملاً شکسته بودن سازند، داده ای وجود ندارد.

همانگونه که در مفاهیم اولیه پژوهش توضیح داده شد از طریق برداشت مستقیم از لاگ های پتروفیزیکی از چاه مورد مطالعه و داده

جدول ۱- مقدار میانگین خواص الاستیک دینامیکی سازند کژدمی در چاه مورد مطالعه

مدول یانگ (GPa)	نسبت V_p/V_s	مدول برشی (GPa)	نسبت پواسون	مدول بالک (GPa)	سازند
۹/۱۴۳۰۶	۲/۲۶۴۱۶	۳/۴۵۴۵۹	۰/۳۶۰۴۶	۱۱/۶۰۶۳۲	کژدمی

جدول ۲- مقدار میانگین خواص الاستیک استاتیکی سازند کژدمی در چاه مورد مطالعه

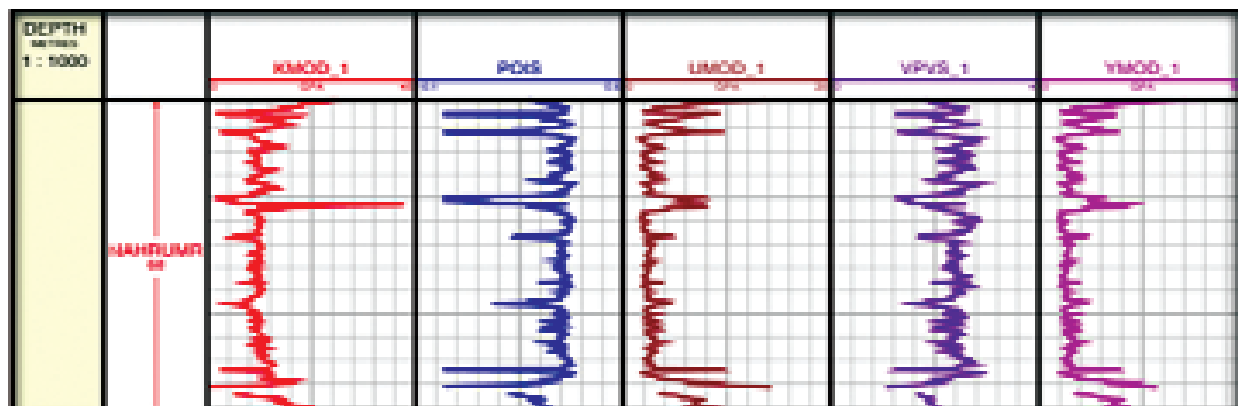
مقاومت کششی سازند (PSI)	مقاومت فشاری تک محوره (PSI)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول موج P (GPa)	نسبت پواسون	مدول بالک (GPa)	سازند
۶۸۳۳۷۶۵۷	۶۸۳۳۷۶۵۶۷	موجود نیست	۱۶/۱۷۸۸	-۱۱۷/۳۴۵۸۳	۹/۰۵۷۸	کژدمی

نفتی منطقه خلیج فارس دارای راستای چیره شمال غربی - جنوب شرقی (نظیر مبارک، سلمان، رشادت، رسالت) و شمال شرقی - جنوب غربی (نظیر سیری، والا، صالح، هنگام) هستند.

از نگاه زمین شناسی، خلیج فارس فرونشست زمین ساختی کم ژرفایی است که در زمان ترشیری پسین در حاشیه جنوبی کوه های زاگرس، به علت فرورانش صفحه عربستان تشکیل شده و باقیمانده اقیانوس نئوتتیس می باشد. میدان رشادت در منطقه خلیج فارس در صفحه عربستان واقع شده است. صفحه عربستان شامل اکثریت ذخایر نفت و گاز خاورمیانه می باشد. برخی از مخازن فوق عظیم نفتی و گازی جهان در این صفحه واقع اند و این منطقه در حال حاضر نیز مستعد اکتشافات جدید و دارای پتانسیل هیدروکربنی بالایی است. خلیج فارس یک دریای حاشیه ای است که به طور کامل روی فلات قاره قرار دارد و سراسیمی (Slope) آن در دریای عمان است. این خلیج ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر پهنا و سطحی در حدود ۲۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع را زیر پوشش دارد. ژرفای میانگین آن حدود ۳۵ متر و ژرف ترین نقطه آن در کرانه ی ایرانی تنگه ی هرمز است که ژرفایی تا ۱۶۵ متر دارد، ولی میانگین آن در کناره های محور، ۷۴ تا ۹۲ متر است (آقباتی ۱۳۸۳).

۴- بحث و نتیجه

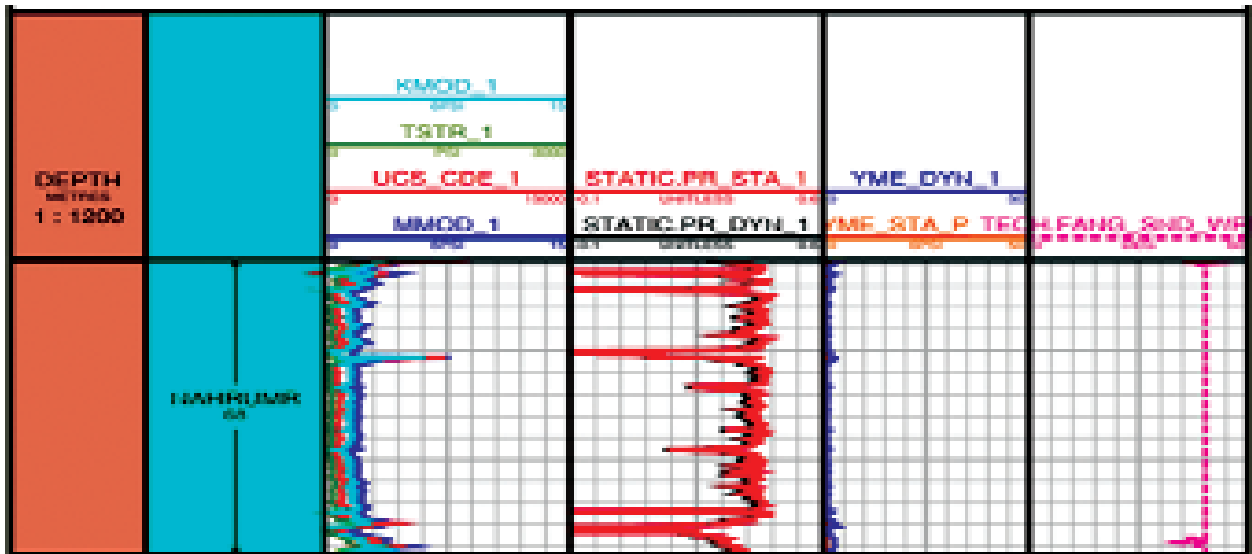
در ابتدا با بارگذاری داده های ورودی در قسمت تعیین خصوصیات مکانیکی (Mechanical Properties) از روی داده های پتروفیزیکی نرم افزار ژئولاگ طبق تصویر (۳) خروجی خواص الاستیک دینامیکی را داریم که مقدار میانگین هر کدام در جدول (۱)



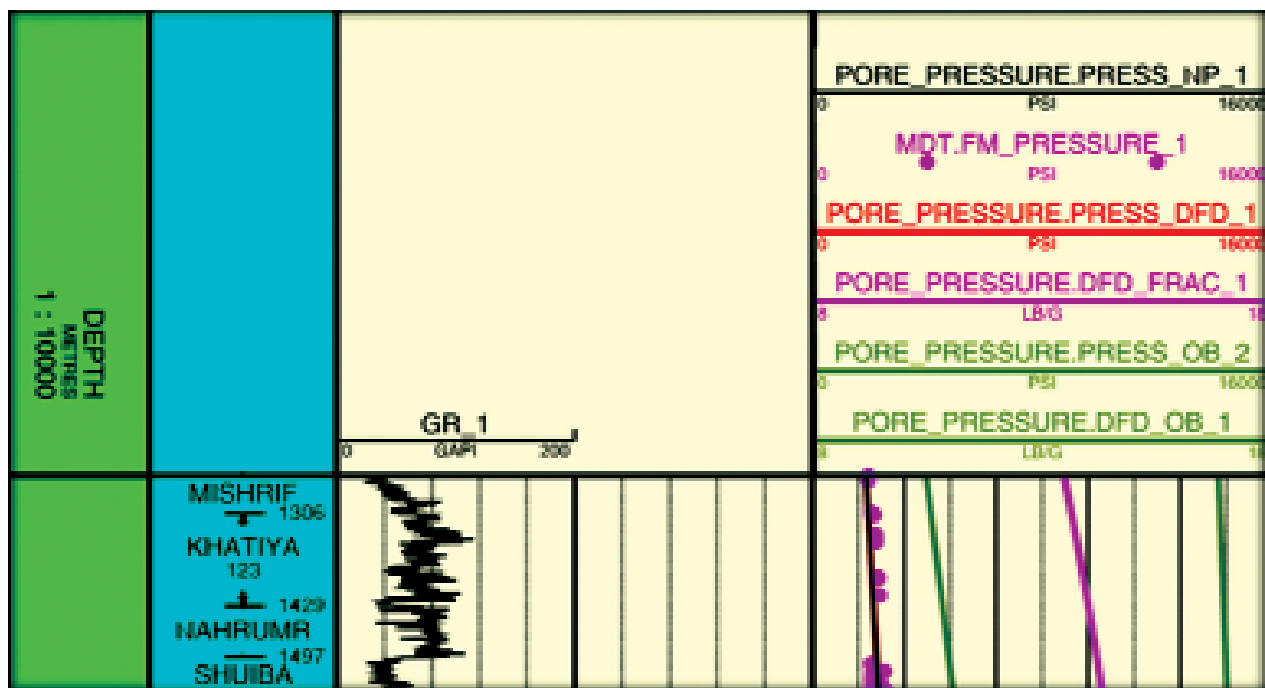
تصویر ۳- لاگ خواص الاستیک دینامیک در محدوده سازند کژدمی که در شکل KMOD = مدول بالک، POIS = نسبت پواسون، UMOD = مدول برشی، VPVS = ضریب نسبت V_p/V_s و YMOD = مدول یانگ

جدول ۳- مقدار میانگین فشارهای منفذی در محدوده سازند کزدمی در چاه مورد مطالعه

سازند	PORE_PRESSURE PRESS_NP	PORE_PRESSURE PRESS_DFD	PORE_PRESSURE PRESS_FRAC	PORE_PRESSURE PRESS_OB 1	PORE_PRESSURE DFD_OB 2	MDT FM_PRESSURE
کزدمی	۲۱۸۰/۲۲۱۴۵	۲۱۸۷/۹۴۱۱	۳۴۳۰/۱۷۸۴۹	۴۶۴۵/۵۵۳۷۲	۱۶/۹۷۴۵۶	۰



تصویر ۳- نمودار حاصل از خواص الاستیسیته استاتیک و محاسبه خواص الاستیک، TSTR = مقاومت کششی سازند، UCS = مقاومت فشاری تک محوره، MMOD = مدول موج P



PORE_PRESSURE PRESS_NP = Normal pressure
 PORE_PRESSURE PRESS_DFD = Mud weight converted to pressure
 PORE_PRESSURE PRESS_FRAC = Fracture pressure
 PORE_PRESSURE PRESS_OB 1 = Overburden pressure
 PORE_PRESSURE DFD_OB 2 = Mud weight from overburden pressure
 MDT FM_PRESSURE = Formation pressure from MDT log

تصویر ۴- لاگ فشار منفذی در محدوده سازندهای سروک، کزدمی و داریان

باشد، عدم پایداری دیواره چاه محتمل است. حداقل وزن گل (Mw): پایین تر از این مقدار وزن گل، شاهد شکست سنگ و در نتیجه شکست در دیواره چاه هستیم. وزن گل زیر این مقدار باعث شکست کششی (Break Out) شدیدی در چاه خواهد شد.

حداقل تنش درجا ($P_{frac} = \sigma_3$): اگر شکستگی طبیعی و یا هر شکاف دیگری در اطراف چاه وجود داشته باشد و یا چاه در یک منطقه بسیار نفوذپذیر باشد، با افزایش وزن گل حفاری به بالاتر از مقدار حداقل تنش درجا، باعث ایجاد شکستگی هایی در اطراف چاه می گردد و هرز روی گل حفاری را خواهیم داشت.

فشار شکست سازند (FBP): هنگامی که فشار وزن گل بالاتر از مقاومت فشاری سازند باشد مجددا شاهد شکست کششی در سنگ سازند و شکستگی های هیدرولیکی در دیواره چاه خواهیم بود. هم چنین اگر این مقدار فشار گل بیش از حداقل مقدار تنش درجا باشد ممکن است سازند را به حالت کاملا شکسته تبدیل کند (Schlumberger 2011).

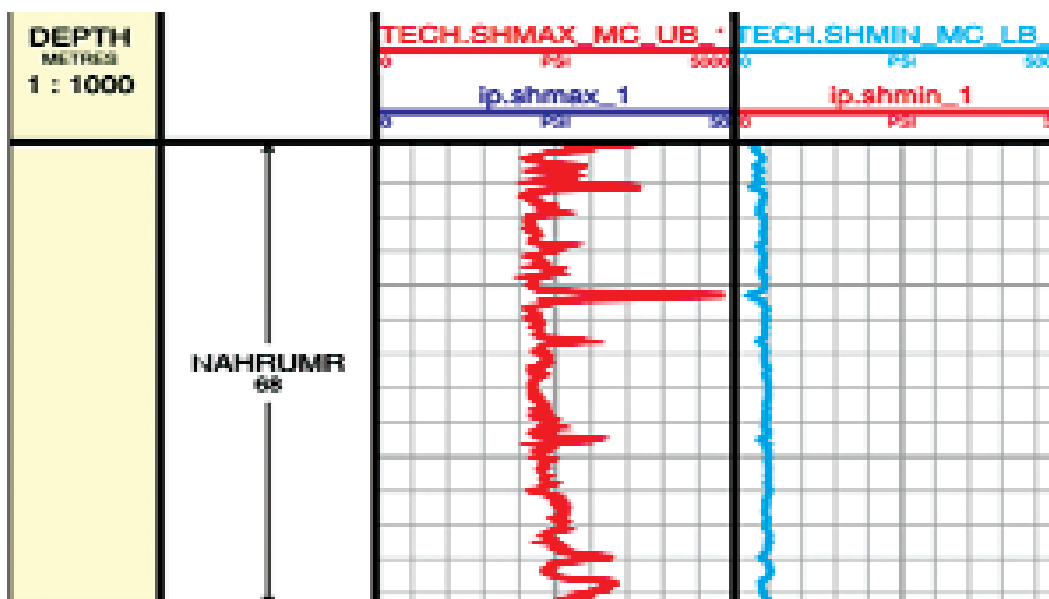
به طور کلی تعیین پنجره گل پایدار برای پایداری دیواره چاه به زاویه حفاری و انحراف چاه (Well Deviation) بستگی دارد که در تفاسیر خروجی از نرم افزار Stab View بین گرادیان فشار شکست سازند (Formation Breakdown Pressure Gradient) (حداکثر وزن گل برای جلوگیری از شکست شکل گیری) و گرادیان فشار شکست (Breakout Pressure Gradient) (حداقل وزن

های لرزه ای موجود خروجی لاگ فشار منفذی از نرم افزار ژئولاگ بصورت تصویر (۵) می باشد و مقادیر میانگین هر یک از موارد فشار منفذی در جدول (۳) برای سازند کزدمی محاسبه شده است.

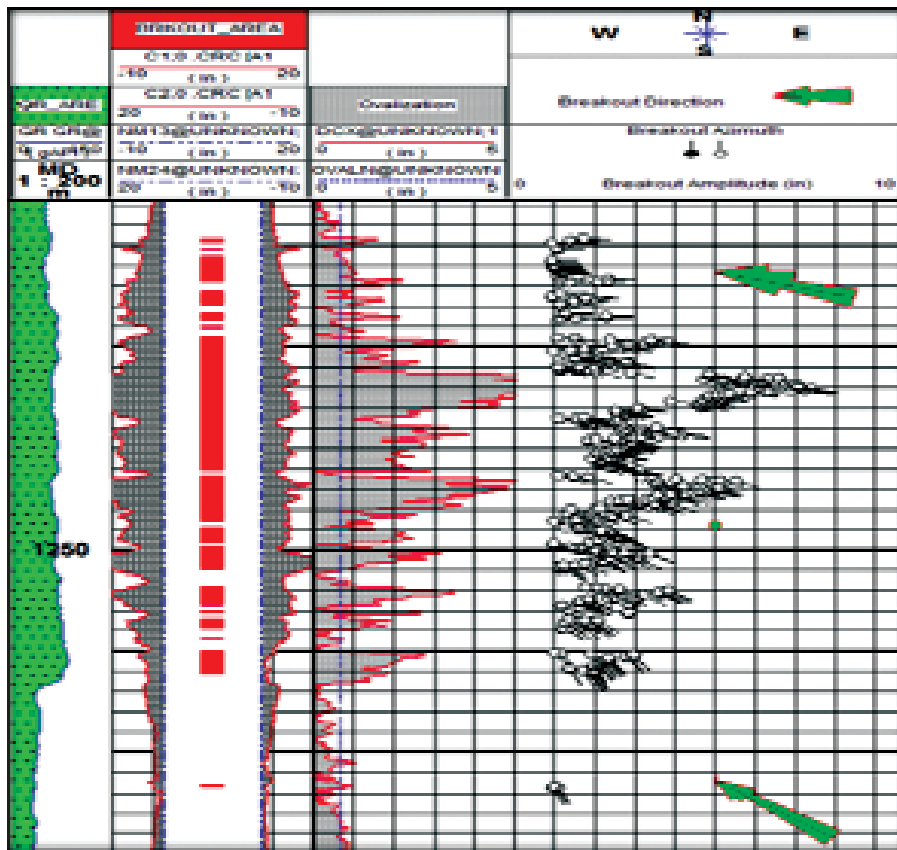
مرحله بعدی برای تشکیل مدل ژئومکانیکی سازند مورد نظر تعیین راستا و محاسبه مقادیر تنش ها در محدوده سازند می باشد، بر این اساس شکستگی های هیدرولیک به طور کلی در جهت حداکثر تنش اصلی در اطراف چاه رخ می دهد. در یک چاه عمودی، حداکثر جهت تنش اصلی مربوط به جهت حداکثر تنش افقی است، بنابراین جهت شکست هیدرولیکی در چاه های عمودی حداکثر تنش افقی را نشان می دهد. جهت شکستگی های هیدرولیکی را می توان از لاگ های تصویری به دست آورد. استفاده از لاگ های تصویری برای تفسیر جهت تنش افقی کاربرد دارد، رایج ترین لاگ تصویری در این بخش لاگ FMI می باشد. با استفاده از داده لاگ FMI در چاه مورد مطالعه شکستگی های طبیعی و شیب لایه در سازند های مورد مطالعه، حداقل تنش افقی در جهت NW-SE می باشد و حداقل تنش افقی در جهت SW-NE می باشد براساس تصویر (۷) مقدار میانگین تنش افقی حداقل (Shmin)، $440/64$ psi و مقدار میانگین تنش حداکثر (Shmax)، $2456/9$ psi در طول سازند کزدمی می باشد.

۱-۴- عوامل اصلی در بررسی پنجره گل حفاری

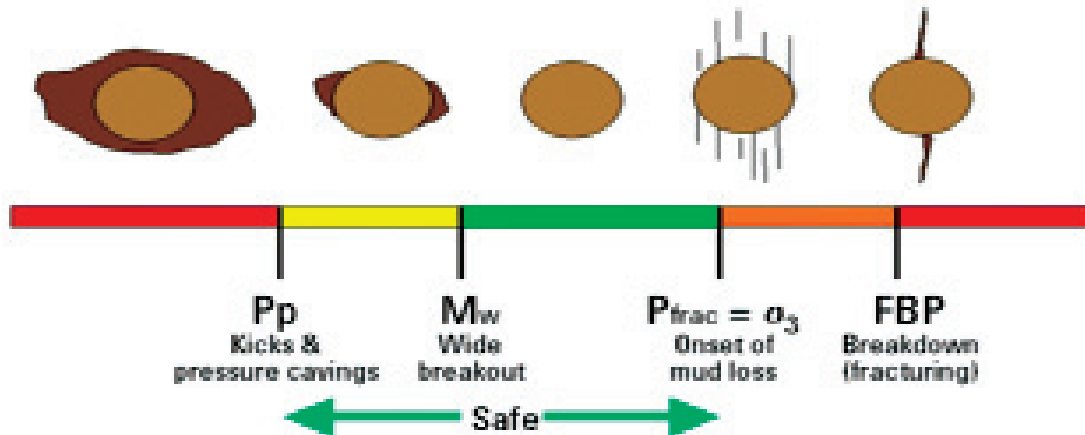
فشار منفذی (Pp): اگر فشار وزن گل کمتر از فشار منفذی داخل چاه



تصویر ۶- لاگ مقدار تنش حداقل و حداکثر در محدوده سازند کزدمی



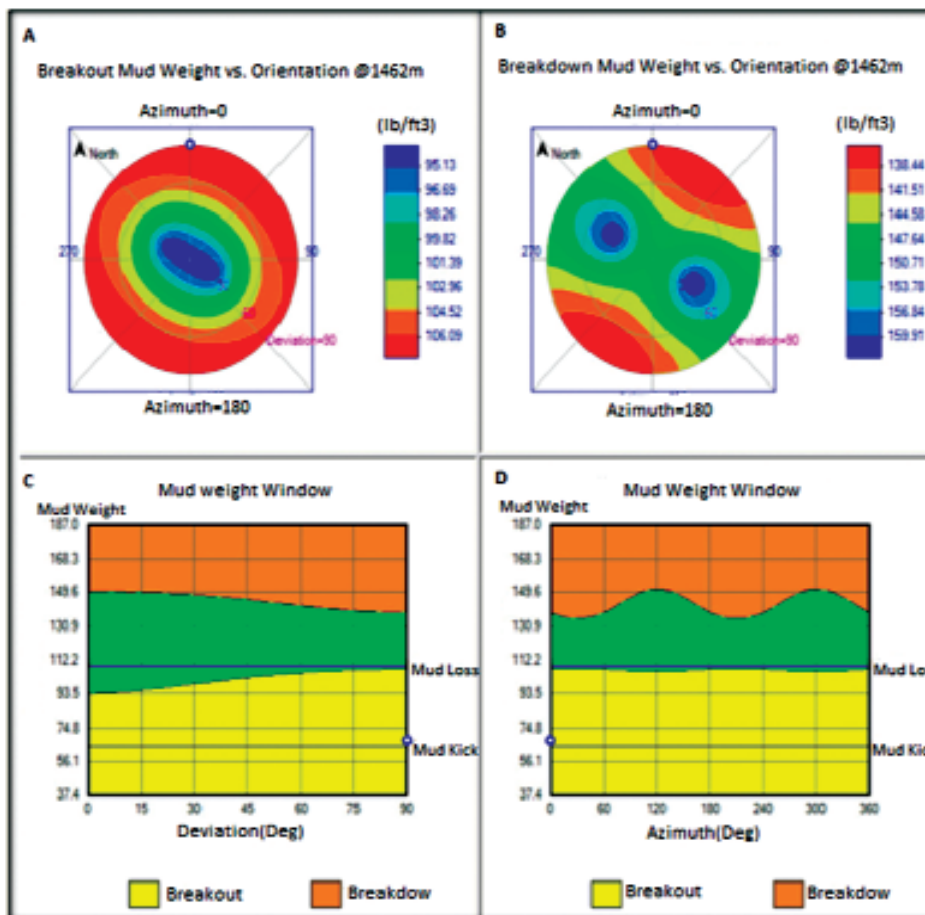
تصویر ۷- لاگ نتایج حاصله در تعیین جهت حداقل تنش افقی که جهت آن NW-SE می باشد



تصویر ۸- عوامل موثر بر شکستگی های مختلف بر اثر وزن گل

کمتراز مقاومت حداقل شکست سازند باشد، شکست کششی یا Breakout و اگر فشار وزن گل بیشتر از حداکثر مقاومت شکست سازند باشد شکست برشی یا Breakdown رخ می دهد و منطقه مطمئن باید بین این دو محدوده و در راستای تنش افقی حداقل در هر یک از سازندهای مورد مطالعه باشد. طبق خروجی نرم افزار برای سازند کژدمی می باشد که قسمت B که نشانگر منطقه BreakDown است، در آزمون N0 تا N60 درجه

گل مورد نیاز برای جلوگیری از شکست چاه) تعریف می گردد. با توجه به موارد ذکر شده در بالا و داده های ورودی از قبیل پارامترهای الاستیک استاتیک و مدول الاستیسیته دینامیک و هم چنین مقدار و جهت و مقادیر تنش های حداقل و حداکثر از نرم افزار STAB Veiw خروجی دریافتی برای سازند کژدمی در طول ضخامت آن به صورت تصویر (۹) می باشد. همانگونه که در مباحث گذشته بیان شد در حالتی که وزن گل حفاری



تصویر ۹- خروجی نرم افزار STAB View برای تعیین پنجره وزن گل و تعیین آزمون در سازند کژدمی

۵- نتیجه گیری

پس از ساخت مدل ژئومکانیکی و تحلیل پنجره وزن گل حفاری در سازند کژدمی، نتایج پیش رو در برگیرنده تعیین پنجره وزن گل حفاری برای به حداقل رساندن ریسک و مدیریت بی ثباتی دیواره چاه و جلوگیری از گیر لوله و هرز روی گل و در کل کاهش هزینه های حفاری می باشد. ثابت های الاستیک (مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی) در حالت دینامیک با استفاده از لاگ های پتروفیریکی و لاگ های تصویری با استفاده از امواج اولتراسونیک ارزیابی گردید، سپس ثابت های الاستیک برای ضخامت سازند مورد مطالعه رسم گردید. نتایج بدست آمده برای مدول یانگ دینامیک در سازند کژدمی، ۹/۱ گیگاپاسکال و مدول بالک در سازند کژدمی، ۱۱/۶ گیگاپاسکال و مدول برشی در سازند کژدمی، ۳/۴۵ گیگاپاسکال محاسبه گردید. مدول یانگ در حالت استاتیک در این پژوهش در طول ضخامت سازند کژدمی، ۹/۰۶ گیگاپاسکال محاسبه گردید. با استفاده از تحلیل های آماری داده های حاصل از آزمون های مقاومت فشاری تک محوری بر روی مغزه های مخزن مورد مطالعه، روابط

که منطبق بر راستای عمومی شکستگی ها و تقریباً مطابق با میانگین محور تنش افقی حداکثر می باشد، وضعیت وزن گل حفاری جهت جلوگیری از شکست باید دارای کمترین مقدار باشد لذا مطابق شکل D نیز در محدوده ۶۰-۹۰ درجه کمترین مقدار وزن گل در حدود ۱۱۲ تا ۱۲۰ PCF را نشان می دهد و در مقابل در آزمون N60 تا N180 میزان وزن گل حفاری افزایش می یابد و بیشترین این مقدار در راستای تنش افقی حداقل یعنی N120 یا N60W(N300) خواهد بود با وزن گل ۱۰۰ تا ۱۴۰ PCF را مشاهده می کنیم. در تصویر (۹) قسمت A که نشانگر ایجاد حالت BreakOut می باشد اگر زاویه انحراف چاه به ۹۰ درجه نزدیک شود احتمال ایجاد Kick و Loss وجود دارد و هرچه این زاویه انحراف کمتر باشد بین ۳۰-۰ درجه وضعیت وزن گل حفاری در مقدار ۹۲ تا ۱۱۲ PCF دارای کمترین مقدار جهت جلوگیری از BreakOut در چاه را نشان می دهد. با تطبیق در دو حالت Breakdown و BreakOut و ایجاد نشدن Kick و Loss در سازند کژدمی وزن گل حفاری در محدوده ۹۲ تا ۱۱۲ PCF با آزمون حفاری ۳۰ تا ۴۵ درجه ارزیابی می شود.

Grandi, S., Rao, R., Toksoz, M. N., 2002. Geomechanical modeling of in-situ stresses Around a Borehole. *Earth Resources Laboratory Industry Consortia Annual Report; 06,P.150.*

Jose L. Falcao, Carlos F. Fonseca, Petrobras S.A, 2000. Underbalanced Horizontal Drilling: A Field Study of Wellbore Stability in Brazil. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Vol.1:16-18.*

Mengjiao, Y.; Chenevert, M.E. , Sharma, M.M., 2003. Chemical-mechanical wellbore instability model for shale: accounting for solute diffusion. *Journal of petroleum science and engineering, No. 38:131-143.*

Nawrocki, P.A.; Dusseault, M.B. , Bratli, R.K., 1998. Use of uniaxial compression test result in stress modeling around opening in nonlinear geo materials. *Journal of petroleum science and engineering, Vol. 21(1-2) :79-94.*

Reynolds, S. D., Mildren, S. D., Hillis, R. R., Meyer, J. J. 2006. Constraining stress magnitudes using petroleum exploration data in the Cooper-Eromanga Basins, Australia. *Tectonophysics 415:123-140.*

Schlumberger, 2011. Wellbore Stability Study for IOOC Company. *report 1,P.29.*

Zeng, Z. W., Roegierd, J. C. , Grigg, R. B. 2004. Experimental determination of geomechanical and petrophysical properties of Jackfork sandstone-A tight gas formation. *At 6th North America Rock Mechanics Symposium, Houston, Texas.abstract book,No.1.P.30.*

تجربی ذکر شده بین مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مدول یانگ دینامیک (Ed) و روابط آن با سرعت موج تراکمی در طول مخزن مورد مطالعه، نتایج محاسبه مقدار میانگین مقاومت فشاری تک محوری برآورده شده در سازند کزدمی، ۶۸۳/۷۷ در واحد PSI می باشد. مقادیر تنش حداقل در طول ضخامت سازند کزدمی، ۴۴۰/۴۶ در واحد PSI و مقادیر تنش حداکثر برای سازند کزدمی، ۲۴۶۵/۹ PSI محاسبه گردید.

با توجه به حفاری در بهترین مسیر جهت دار در راستای حداقل تنش افقی برای غلبه بر ناپایداری دیواره چاه در سازند کزدمی از وزن گل PCF ۹۲ تا PCF ۱۱۲ با آزمون ۳۰ تا ۴۵ درجه توصیه در راستای شمال غربی - جنوب شرقی می شود. مدل ژئومکانیکی به دست آمده در بسیاری از طراحی های روش های بازیابی نفت از جمله بهبود بازیابی مخازن مانند شکستن هیدرولیکی، یافتن نوع، مقدار و خصوصیات فیزیکی، سیال مناسب برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی، یافتن مناسب ترین زون های تولیدی برای برداشت حداکثری و بهینه سازی سیلابزنی و تزریق بخار در بهره برداری ثانویه کاربرد فراوانی دارد. این مدل ژئومکانیکی می تواند در مهندسی مخزن و تکمیل چاه از جمله تعیین روش های بهینه تکمیل چاه، تعیین ناهمسانگرد نفوذپذیری در مخازن شکسته، پیش بینی تغییر در عملکرد مخزن در خلال تولید و یافتن تولید پتانسیل ماسعه از مخزن کاربرد چشمگیری دارد.

مراجع

آقائباتی، م.ع، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، ۷۰۸ صفحه.

پارسا مهر، ه.، معارف وند، پ، عطایی پور، م، ۱۳۸۹. بررسی انواع ریزش ها در پایداری دیواره چاه های نفتی و روش های پایداری سازی آن ها، فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع طبیعی لاهیجان، سال ۳، شماره ۴، صفحات ۱۵-۲۴.

قاسم العسکری، م، ۱۳۸۹. اصول پتروفیزیک، انتشارات ستایش، ۴۹۹ صفحه.

قندهاری علویجه، س، ۱۳۹۱. توصیف ژئومکانیکی مخزن با استفاده از داده های چاه جهت ارزیابی طراحی، ایجاد و انتشار شکست هیدرولیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۱۸ صفحه.

Garbutt ., Donna., 2004. Unconventional Gas White" *Paper. Schlumberger Oilfield Services,pp.30-38.*

Ghazban, F., 2007. Petroleum Geology of the Persian Gulf. *University of Tehran and National Iranian Oil Company,P.707.*