نشریه زمین شناسی ژئوتکنیک
سال ۱۰(۱۳۹۳)، شماره۲: ۱۳۹-۱۲۸
WWW.appliedgeology.ir

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

ناصر عبادتی*[1] و محمد نجاری [2]

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

*) عهده دار مکاتبات

دریافت: ۹۳/۳/۱؛دریافت اصلاح شده: ۹۱/۵/۱۳؛پذیرش: ۹۱/۶/۱۴؛قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۸/۳۰

چکیده

از طریق داده‌های ژئومکانیکی می توان 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 می نماید.در حفای چاه های نفتی تعیین تنش‌های افقی حداقل و حداکثر کمک می کند 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 Vp/Vs پرداخته شدو پارامترهای مقاومتی نظیر مقاومت فشاری تک محوره، ضریب اصطکاک داخلی و مقامت 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 بررسی های 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، ۱۱۲PCF-۹۲ و آزیموت حفاری در بازه ۴۵-۳۰ درجه پیشنهاد گردید.

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

۱-مقدمه

این مقاله بر آن است تا با تعیین کمی و کیفی وضعیت ژئومکانیکی سازند کژدمی، و پایداری دیواره چاه با استفاده از داده های چاه شامل داده های گزارش پایان چاه، اطلاعات پتروفیزیکی و ژئوفیزیکی و نیز داده های دیگر در دسترس، سازند شیل کژدمی را با دقت مناسب از نظر ژئومکانیکی توصیف و پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مدول های

حجمی و برشی سنگ، نسبت پواسون، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی سازند و نظیر آن تعیین می شوند. 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 لاگ های پتروفیزیکی که در این تحقیق برای تعیین میدان تنش استفاده می شود، لاگ تصویری Fullbor Formation MicroImager (FMI) می باشد. از کاربردهای FMI می توان به تحلیل های ساختمانی، بررسی های ژئومکانیکی، سنجش تعادل چاه و شناسایی واحدهای رسوبی، آنالیز بافتی رخساره ها، ارزیابی شبکه های شکست، جهت یابی و مطالعه مغزه ها اشاره نمود (قاسم العسگری ۱۳۸۹). در طول دوران حفاری میدان رشادت در شیل کژدمی، مسائل عمده ای ایجاد شده است. تعدادی چاه ها در این زون، دارای ریزش دیواره هستند به طوری که سالانه هزینه زیادی برای رفع گیر ابزارها و متوقف سازی عملیات حفاری در محدوده شیل های کژدمی وارد می آید. به دلیل انیزوتروپی سازند در شیل کژدمی محاسبه پارامترهای الاستیک سنگ ضروری است. تعیین تنش های افقی و برشی کمک می کند 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 می باشد. بنابراین ابزار اساسی تحلیل پایداری دیواره چاه،انالیز تنش،انتخاب معیار مناسب بسط داده شده برای ژئومتری، قوانین اصلی و شرایط مرزی می باشد (Nawrocki et al. 1998). به همین دلیل رعایت محاسبات دقیق ژئومکانیکی باعث برطرف شدن عمده مسائل حفاری بلاخص در چاه های انحرافی در محدوده شیل کژدمی می گردد. مطالعات ژئومکانیکی برای توصیف بهتر رفتار مکانیکی سنگ مخزن به کار می روند. 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 می باشد. با توجه که در میدان مورد مطالعه و داده های 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.

۲- روش کار

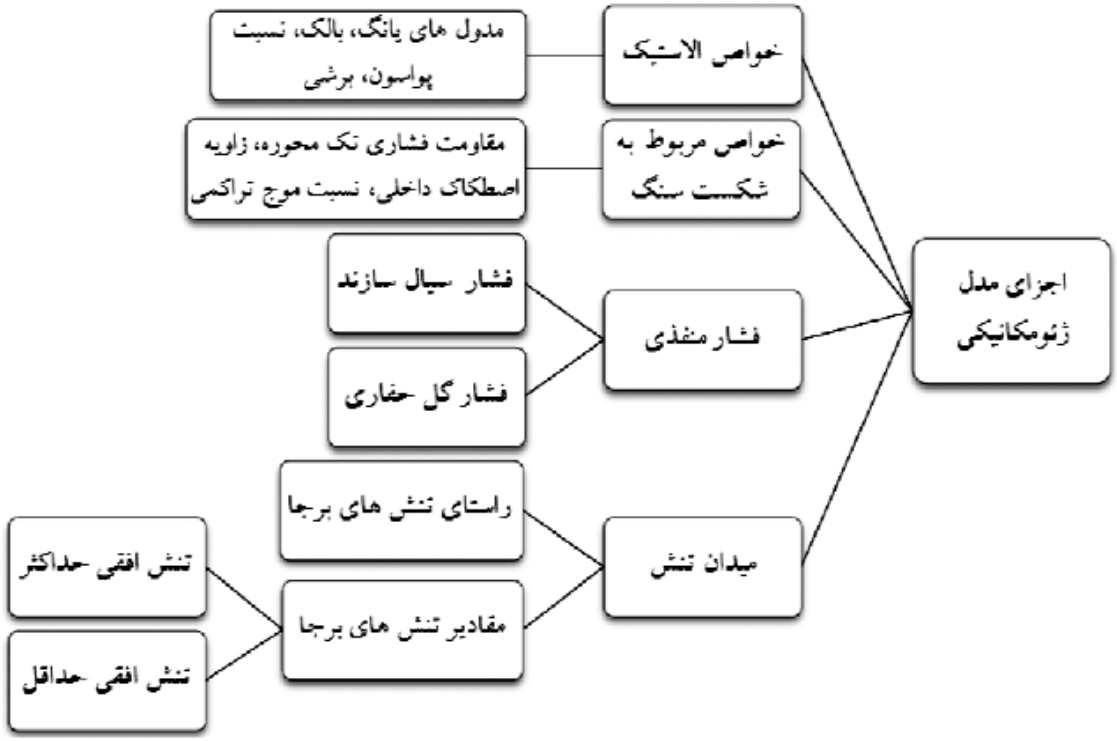
در ابتدای روند پروژه پس از محاسبه داده ها از روی لاگ های صوتی، چگالی و تخلخل اطلاعات را در نرم افزار ژئولاگ ۷ بارگذاری می کنیم تا خصوصیات مکانیکی را محاسبه کرده و با استفاده از تطابق مناسب تمام ورودی ها به حالت استاتیک تبدیل گردد. بطوریکه با استفاده از ابزارهای دانسیته و تخلخل موثر بتوان مقادیر نسبت 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 محدوده های فشار منفذی و شکست برشی سنگ (Shear Failure) و منطقه هرز روی (loss zone) می باشد. در بیان کلی مساله می توان 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 تنش های حداقل و حداکثر به تحلیل مسیرحفاری (Trajectory Analysis) و پس آن تعیین و بررسی پایداری چاه دست می یابیم.

۲-۱-اجزای مدل ژئومکانیکی مخزن

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

۲-۲- روش های محاسبه ثابت های الاستیک

یکی از مهم ترین مسائل مورد مطالعه در زمینه زمین شناسی مهندسی، مهندسی نفت و مهندسی معدن خواص الاستیک سنگ می باشد؛ 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 می باشند. در حالی که در بیشتر موارد این اطلاعات در دسترس نمی باشند. در واقع تمام چاه های نفت و گاز به عنوان اولین منبع اطلاعات، از یک ثبت استاندارد لاگ ها برخوردار نیستند و بیشتر لاگ ها در اکثر مواقع به تخمین خصوصیات فیزیکی سنگ و به طور کلی اطلاعات مرتبط با محاسبه خواص الاستیک سنگ می پردازند. پارامترهای ژئومکانیکی به دو گروه اطلاعات استاتیک و دینامیک تقسیم می شوند. مرسوم ترین



تصویر ۱- نمودار اجزای تشکیل مدل ژئومکانیکی مخزن

و قدیمی‌ترین روش‌های محاسبه این خواص انجام آزمایش‌های استاتیک است. روش های دینامیکی نیز در محاسبه خواص الاستیک سنگ واجزای 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 آزمایش‌های استاتیک است. اطلاعات استاتیکی با انجام آزمون‌های فیزیکی-مکانیکی مستقیم بر روی نمونه سنگ مخزن در آزمایشگاه و یا به صورت برجا به دست می‌آیند. معمولا پارامترهای الاستیک سنگ و خواص ژئومکانیکی سنگ مخزن از آزمون های آزمایشگاهی (آزمون مقاومت فشاری تک محوری) بر روی مغزه به دست می‌آید. لازم به ذکر است که محاسبه مدول‌های الاستیکی و مقاومت تراکمی تک محوره از روش استاتیکی دارای محدودیت هایی از قبیل در دسترس نبودن مغزه، نقطه‌ای بودن نتایج، هزینه زیاد انجام مغزه‌گیری و آزمایش‌های مکانیک سنگی می‌باشد. برای اکثر مدل‌های 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 می‌شود و به وسیله پوش شکست دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توصیف می‌شود. پارامترهای استاتیک را از طریق یک زنجیره آزمایش سه محوره فشاری می‌توان به دست آورد (Jose et al. 2000). خواص الاستیک سنگ مطابق روابط زیر بدست می آید.

رابطه (۱)
$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_{ax}}$$

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

رابطه (۳)
$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)}$$

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 υ 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

نمودارهای پتروفیزیکی (چگالی، اشعه گاما و غیره) می باشند. از محاسن استفاده از روش دینامیکی می توان به هزینه مناسب وپیوسته بودن نتایج آن در تمام طول چاه مورد مطالعه و از معایب آن می توان به اندازه گیری بصورت غیر مستقیم اشاره نمود.

رابطه (۴) $$E_d = \left[\frac{9K_P.V_P^2}{3k+\rho.V_P^2}\right]$$

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

رابطه (۶) $$G_d = \rho.V_P^2$$

رابطه (۷) $$\upsilon_d = \frac{1}{2}\left(\left[\frac{V_S^2}{V_P^2}\right]-2\Big/\left[\frac{V_S^2}{V_P^2}\right]-1\right)$$

که در آن E_d، K_d، G_d، υ_d به ترتیب مدول یانگ دینامیکی، مدول بالک دینامیکی، مدول برشی دینامیکی و ضریب پواسون دینامیکی می باشند و Vs، Vp، ρ نیز به ترتیب سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری و چگالی سازند است.

پارامترهای الاستیک سنگ حاصل از روش استاتیکی نسبت به روش دینامیکی معمولا با هم متفاوت هستند. اغلب مدول های دینامیکی از مدول‌های استاتیکی متناظر خود بزرگ تر هستند، این تفاوت در سنگ های ضعیف بیشتر می باشد این اختلاف به دلیل آن است که حفرات و ناپیوستگی های موجود در سنگ در خواص الاستیک سنگ بدست آمده در روش استاتیکی نسبت به روش دینامیکی تاثیر بیشتری می گذارد، 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 شایع ترین پارامترهای برآورد شده از قدرت سنگ می باشد. 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 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 لیتولوژی های مختلف ارائه شده است. با توجه به اینکه سنگ مخزن در میدان مورد مطالعه از جنس کربناته می باشد.

از آن جا که مقاومت کششی سنگ (TSTR) معمولا ۱/۱۲ تا ۱/۸ مقاومت فشاری محوری (UCS) آن می باشد در صورت عدم وجود اطلاعات برای سنگ‌های شیل و کربناته مقاومت کششی سنگ در نظر گرفته شده ۱/۱۰ مقاومت فشاری محوری آن در نظر گرفته شده است.

۲-۵- زاو اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی، یکی از پارامترهای مهم مکانیک سنگ می‌باشد که مقاومت سنگ را محسابه می کند. بطور کلی، با افزایش میزان شیل در سازند، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که زوایه 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 علویجه 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 می‌باشدو فشاری منفذی با فشار هیدروستاتیک متفاوت می باشد 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 می گویند.

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

۲-۷- مقادیر تنش های حداقل و حداکثر

در اعماق مناسب برای اکتشاف نفت و گاز، جهت تنش های برجا به وسیله چندین پدیده مختلف تعیین می‌شود. این پدیده‌ها شامل گسل های فعال ریزشی در دیواره چاه، تورق مغزه‌ها، شکاف های القایی در اثر عملیات حفاری، وجود شکاف مرکزی در مغزه و زمین لرزه های طبیعی و القایی می‌باشند. این نوع از ریزش دیواره، وسیله تشخیص تراکم ناهمگن به دور دیواره چاه می باشند. هنگامی که اختلاف عمده‌ای میان σ_H، σ_h در سنگ‌های 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 می‌باشد، احتمالا 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 آن‌ها 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 می‌باشد. (Garbutt & Donna 2004) برای تعیین تنش های افقی روش های متعددی وجود دارد. مقدار σh را می توان از طریق آزمایش های نشت و شکست هیدرولیکی بدست آورد. در نهایت مقدار σH را نیز با استفاده از روابط موجود می‌توان بدست آورد. اگر داده‌های 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، مدل 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 σH تنش افقی حداکثر، σh تنش افقی حداقل، υ ضریب پواسون، α ضریب بایوت، Pw فشار سیال حفاری، E مدول یانگ (برحسب GPa) و εx و εy نیز به ترتیب کرنش در جهت x و y هستند.

رابطه (۸)
$$\sigma_h = \frac{\upsilon}{1-\upsilon}(\sigma_v - \alpha P_w) + \alpha P_w + \frac{E\varepsilon_y}{1-\upsilon^2} + \frac{\upsilon E\varepsilon_x}{1-\upsilon^2}$$

رابطه (۹)
$$\sigma_H = \frac{\upsilon}{1-\upsilon}(\sigma_v - \alpha P_w) + \alpha P_w + \frac{E\varepsilon_x}{1-\upsilon^2} + \frac{\upsilon E\varepsilon_y}{1-\upsilon^2}$$

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 می‌باشد. در واقع در هنگام آغاز و توزیع میکرو شکاف‌ها 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 می‌باشد. 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 بیش‌تر 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 می‌شود و نتایج قابل قبولی از آن ها به دست آمده است (Grandi et al. 2002) .

۲-۸-۱- معیار شکست موهر کلمب

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

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)

رابطه (۱۰) $$\acute{o}_c = \frac{2C.\cos\phi}{1-\sin\phi}$$

رابطه (۱۱) $$\acute{o}_t = \frac{2C.\cos\phi}{1+\sin\phi}$$

رابطه (۱۲) $$\sigma 1 = \sigma_C + \sigma_3 \tan\phi$$

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

در این روابط، τ مقاومت برشی، C مقاومت چسبندگی، σn فشار عمود بر صفحه برش، Φ زاویه اصطکاک، σc 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 نهایی برای این دایره می باشند. به عبارت دیگر با استفاده از این نمودار، هر نقطه ای براساس (τو σ) 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).

۳- معرفی میدان

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش قسمتی از میدان نفتی رشادت که در گذشته به نام میدان رستم شناخته شده است، می‌باشد. 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 می‌شود. بستگی ساختاری میدان رشادت در افق‌های مخزنی مختلف شامل رأس مخزن سروک، رأس مخزن داریان، رأس مخزن سرمه و رأس سازند دالان می باشد. (Ghazban 2007) وضعیت عمومی میدان‌های

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

نفتی منطقه خلیج فارس دارای راستای چیره شمال غربی - جنوب شرقی (نظیرمبارک،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 حاشیهٔ جنوبی کوه‌های 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 می‌باشد. 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 حاشیه‌ای است که به طور کامل روی فلات قاره قرار دارد و سراشیبی (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 نقطهٔ آن در کرانه ی ایرانی تنگه ی هرمز است که ژرفایی تا ۱۶۵ متر دارد، ولی میانگین آن در کناره‌های محور، ۷۴ تا ۹۲ متر است (آقانباتی ۱۳۸۳).

۴- بحث و نتایج

در ابتدا با بارگذاری داده های ورودی در قسمت تعیین خصوصیات مکانیکی (Mechanical Properties) از روی داده‌های پتروفیزیکی نرم افزار ژئولاگ طبق تصویر(۳) خروجی خواص الاستیک دینامیکی را داریم که مقدار میانگین هر کدام در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر می باشد سازند کژدمی معادل سازند عربی Nuhrumr می باشد.

در ادامه همانگونه که در مفاهیم پژوهش ارائه شد از روی خواص دینامیک و سرعت موج تراکمی Vp 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 آن‌ها 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 کاملا شکسته بودن سازند، داده ای وجود ندارد.

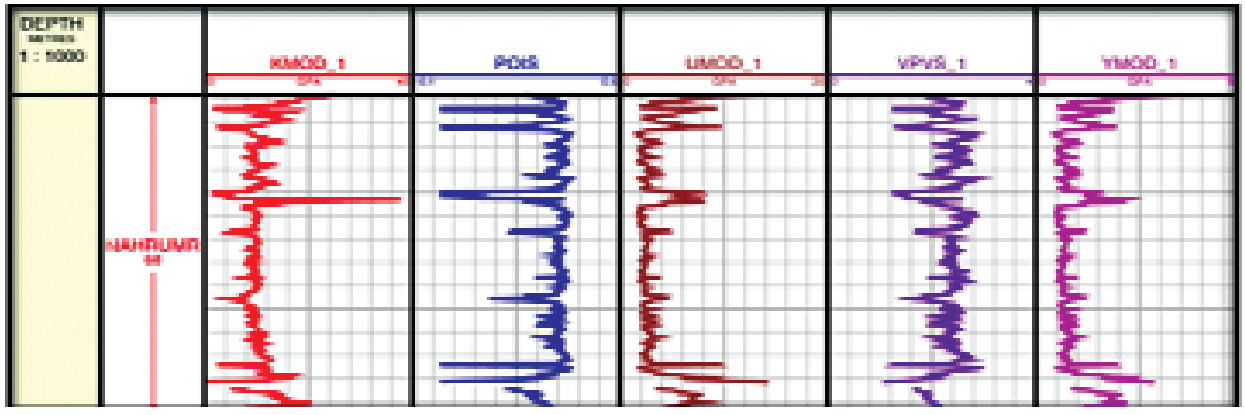
همانگونه که در مفاهیم اولیه پژوهش توضیح داده شد از طریق برداشت مستقیم از لاگ های پتروفیزیکی از چاه مورد مطالعه و داده

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

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

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

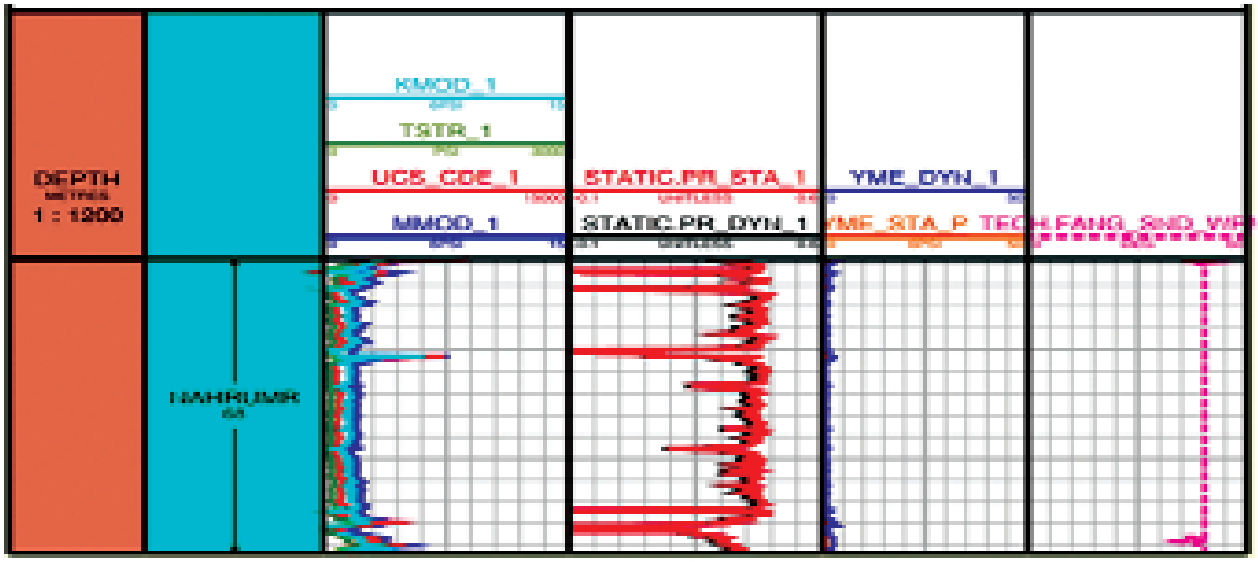
سازند	مدول بالک (GPa)	نسبت پواسون	مدول موج (GPa) P	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت فشاری تک محوره (PSI)	مقاومت کششی سازند (PSI)
کژدمی	۹/۰۵۷۸	-۱۱۷/۳۴۵۸۳	۱۶/۱۷۸۸	موجود نیست	۶۸۳/۷۶۵۶۷	۶۸/۳۷۶۵۷



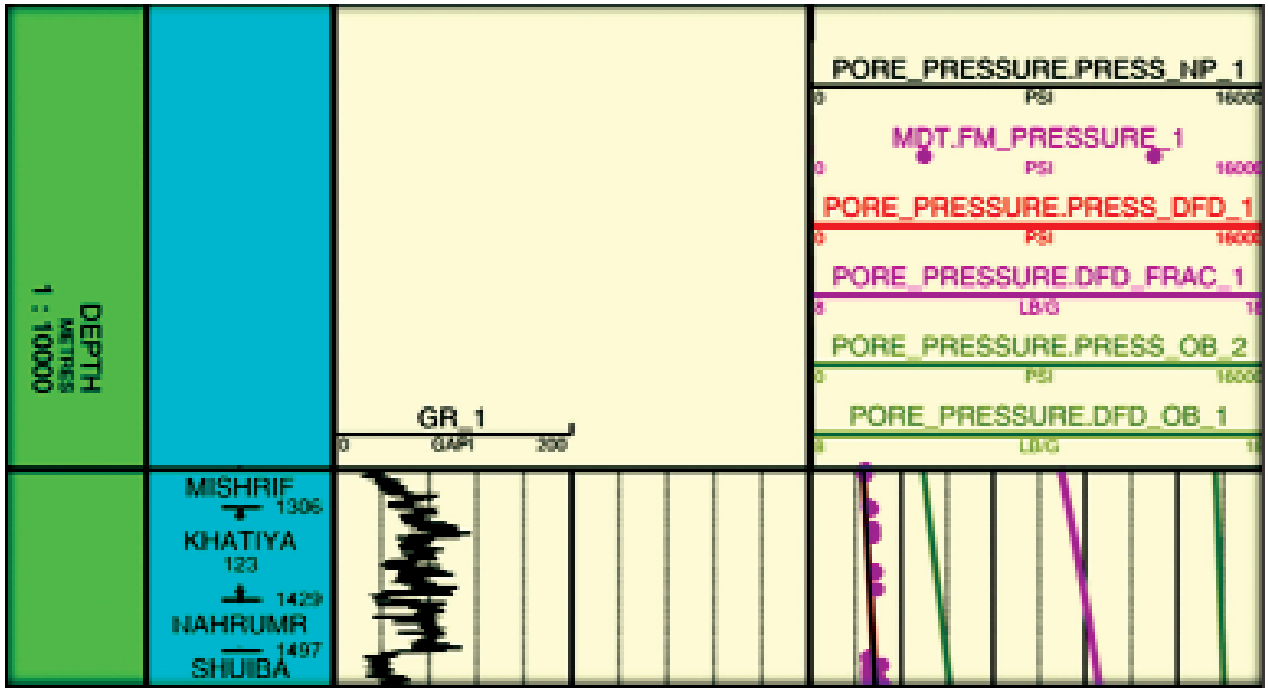
تصویر ۳- لاگ خواص الاستیک دینامیک در محدوده سازند کژدمی که در شکل KMOD = مدول بالک ، POIS= نسبت پواسون ، UMOD= مدول برشی، VPVS= ضریب نسبت Vp/Vs و YMOD = مدول یانگ

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

سازند	PORE_PRESSUR E PRESS_NP	PORE_PRESSURE PRESS_DFD	PORE_PRESSURE PRESS_FRAC	PORE_PRESSURE PRESS_OB 1	PORE_PRESSURE DFD_OB 2	MDT FM_PRESSURE
کژدمی	۲۱۸۰/۲۲۱۴۵	۲۱۸۷/۹۴۸۱۱	۳۴۳۰/۱۷۸۴۹	۴۶۴۵/۵۵۳۷۲	۱۶/۹۷۴۵۶	۰



تصویر ۴- 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 ۵- لاگ فشار منفذی در محدوده سازندهای سروک، کژدمی و داریان

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 کژدمی 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)، ۴۴۰/۶۴ psi و مقدار میانگین تنش حداکثر (Shmax)، ۲۴۵۶/۹ psi در طول سازند کژدمی می باشد.

۴-۱- عوامل اصلی در بررسی پنجره گل حفاری

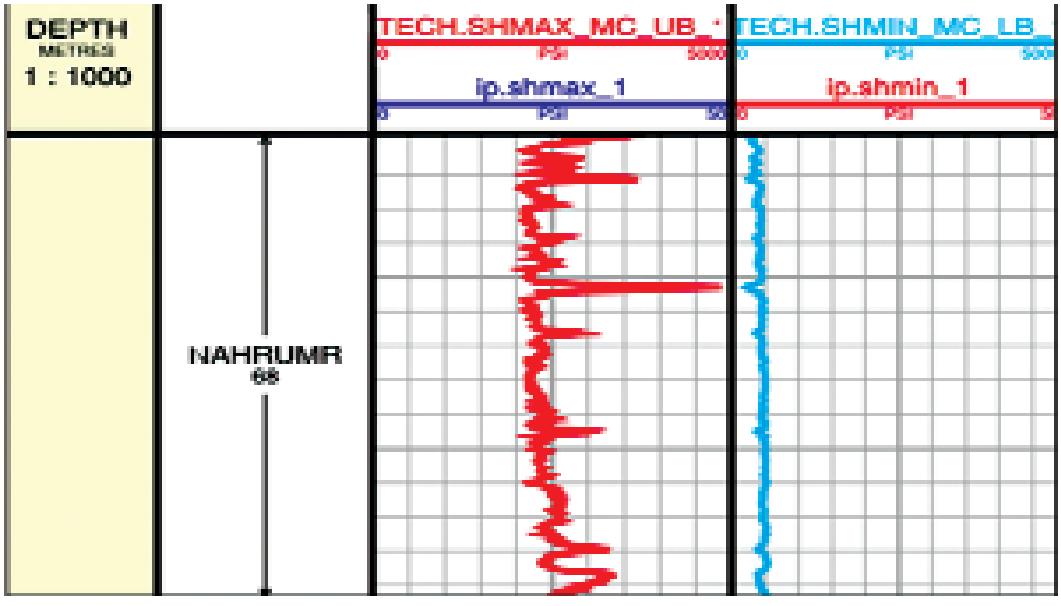
فشار منفذی (Pp): اگر فشار وزن گل کمتر از فشار منفذی داخل چاه باشد ، عدم پایداری دیواره چاه محتمل است.

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.

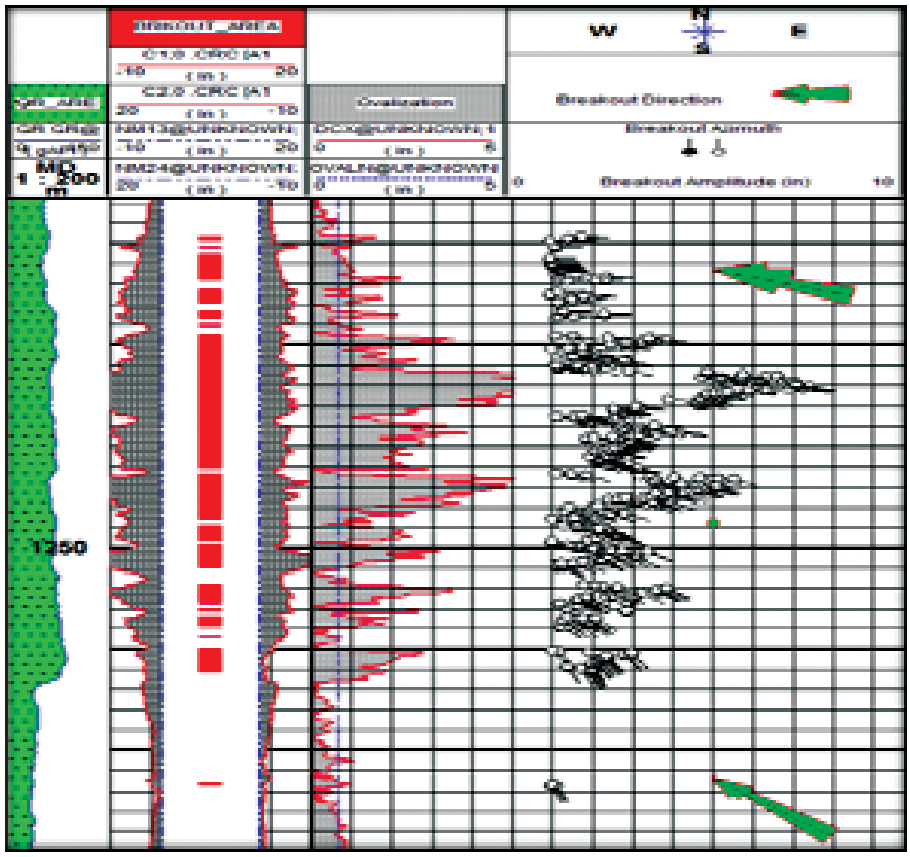
حداقل تنش درجا ($P_{frac} = \sigma_3$): اگر شکستگی طبیعی و یا هر شکاف دیگری در اطراف چاه وجود داشته باشد و یا چاه در یک منطقه بسیار نفوذپذیر باشد، با افزایش وزن گل حفاری به بالاتر از مقدار حداقل تنش درجا، باعث ایجاد شکستگی هایی در اطراف چاه می گردد و هرز روی گل حفاری را خواهیم داشت.

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) .

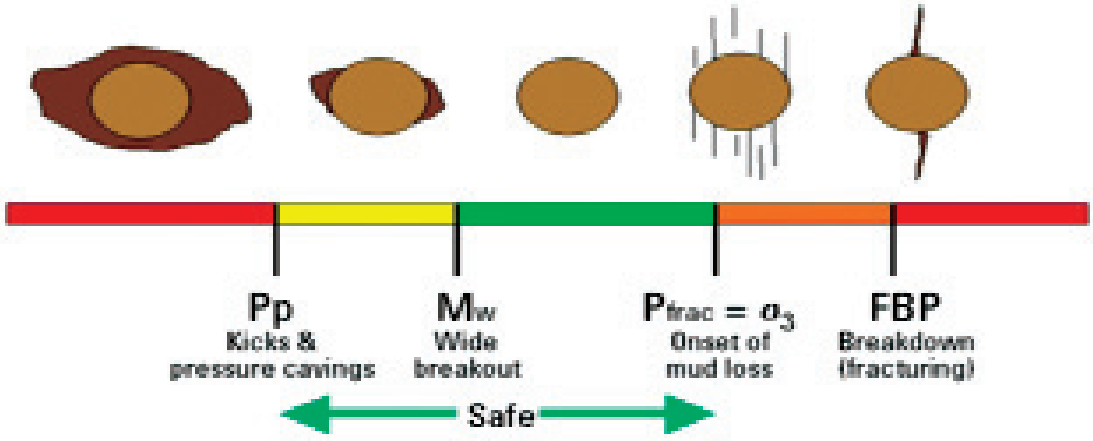
به طور کلی تعیین پنجره گل پایدار برای پایداری دیواره چاه به زاویه حفاری و انحراف چاه (Well Deviation) بستگی دارد که در تفاسیر خروجی از نرم افزار Stab View بین گرادیان فشار شکست سازند (Formation Breakdown Pressure Gradient) (حداکثر وزن گل برای جلوگیری از شکست شکل گیری) و گرادیان فشار شکست (Breakout Pressure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



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



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



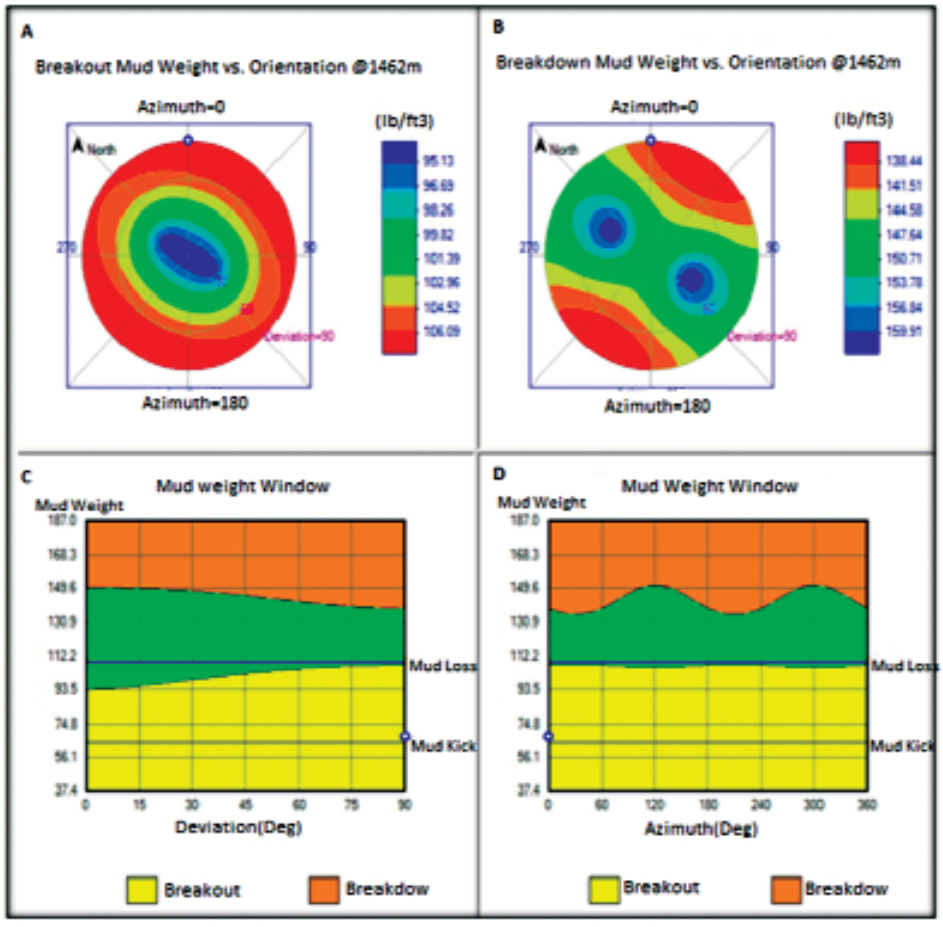
تصویر ۸- عوامل موثر بر شکستگی های مختلف بر اثر وزن گل

گل مورد نیاز برای جلوگیری از شکست چاه) تعریف می گردد.

با توجه به موارد ذکر شده در بالا و داده‌های 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 کمتر از 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 آزیموت N0 تا N60درجه



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

که منطبق بر راستای عمومی شکستگی ها و تقریبا 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 ۰-۶۰ درجه کمترین مقدار وزن گل در حدود ۱۱۲ تا ۱۲۰ PCF را نشان می دهد و در مقابل در آزیموت N60 تا N180 میزان وزن گل حفاری افزایش می‌یابد و بیش ترین 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 می‌باشد اگر زاویه انحراف چاه به ۹۰ درجه نزدیک شود احتمال ایجاد Loss و Kick وجود دارد و هرچه این زاویه انحراف کمتر باشد بین ۰-۳۰ درجه وضعیت وزن گل حفاری در مقدار ۹۲ تا ۱۱۲PCF دارای کمترین مقدار جهت جلوگیری از BreakOut در چاه را نشان می‌دهد. با تطبیق در دوحالت BreakOut و Breakdown و ایجاد نشدن Loss و Kick در سازند کژدمی وزن گل حفاری در محدوده ۹۲ تا ۱۱۲ PCF با آزیموت حفاری ۳۰ تا ۴۵ درجه ارزیابی می شود.

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. ثابت‌های الاستیک (مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی) در حالت دینامیک با استفاده از لاگ های پتروفیزیکی و لاگ های تصویری با استفاده از امواج اولتراسونیک ارزیابی گردید، سپس ثابت‌های 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 گیگا پاسکال محاسبه گردید. مدول یانگ در حالت استاتیک در این پژوهش در طول ضخامت سازند کژدمی، ۹/۰۶ گیگا پاسکال محاسبه گردید. با استفاده از تحلیل های آماری داده های حاصل از آزمون های مقاومت فشاری تک محوری بر روی مغزه‌های مخزن مورد مطالعه، روابط

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 کژدمی،۶۸۳/۷۷ در واحد PSI می‌باشد. مقادیر تنش حداقل در طول ضخامت سازند کژدمی، ۴۴۰/۴۶ در واحد PSI و مقادیر تنش حداکثر برای سازند کژدمی، 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 کژدمی از وزن گل ۹۲ PCF تا ۱۱۲ PCF با آزیموت ۳۰ تا ۴۵ درجه توصیه در راستای شمال غربی- جنوب شرقی می شود. مدل ژئومکانیکی به دست آمده در بسیاری از طراحی‌های روش‌های بازیابی نفت از جمله بهبود بازیابی مخازن مانند شکستن هیدرولیکی، یافتن نوع، مقدار و خصوصیات فیزیکی، سیال مناسب برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی، یافتن مناسب‌ترین زون‌های 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

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

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،۴۹۹صفحه.

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

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.*

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.*

Mengiiao, 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.*