

تعیین مسیر بهینه حفاری در یکی از میادین خلیج فارس به کمک مدل مکانیکی زمین

مصطفی اروچی و جواد عامری شهبابی*

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۱۶

چکیده

ناپایداری دیواره چاه به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مشکلات در ضمن حفاری، مطرح است. این پدیده سبب اتلاف وقت و تحمیل هزینه‌های اضافی بر کارفرما می‌گردد. بر این اساس تلاش فراوانی برای رفع این مشکل صورت گرفته است. در این پژوهش سعی شده است تا با ساخت مدل مکانیکی زمین برای ناحیه مخزنی و استفاده از معیار شکست‌های متفاوت، ناپایداری دیواره بررسی گردیده و مسیری پایدار برای جلوگیری از مشکلات مربوط به آن، معرفی شود. بدین‌منظور نخست خواص مکانیکی سنگ به کمک داده‌های لاگ و مغزه برای ناحیه مخزنی محاسبه شد. در ادامه اندازه و جهت تنش‌های برجا در منطقه و در این سازند به کمک لاگ چگالی، چند ضلعی تنش، اطلاعات شکست دیواره و گزارشات حفاری به‌دست آمد. سپس سه معیار شکست به کار بسته شد و پنجره گل برای تمامی مسیرهای ممکن محاسبه گردید تا مسیر بهینه برای ورود به لایه مخزنی، معین و اثر انتخاب معیار بر تعیین آن روشن گردد. معیارهای شکست مورد استفاده شامل مور - کولمب، به‌عنوان رایج‌ترین معیار و موگی - کولمب و لید تصحیح شده، با قابلیت استفاده از تنش میانی می‌باشند. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، بهینه‌ترین مسیر برای حفاری در این لایه، مسیری با شیب 60° و آزیموت 70° تا 80° است. همچنین مشخص شد که انتخاب معیار شکست، تأثیری بر تعیین مسیر بهینه ندارد هرچند معیارهای مختلف مقادیر متفاوتی را برای پنجره گل پیش‌بینی می‌کنند.

کلمات کلیدی: پنجره گل، مسیر بهینه حفاری، مدل مکانیکی زمین، معیار شکست، ژئومکانیک.

مقدمه

برشی^۲ از جمله مهم‌ترین موارد ناپایداری دیواره به شمار می‌آیند. یکی از مشکلات عمده در حفاری در این میدان، تکرار پدیده ناپایداری دیواره چاه در ناحیه مخزنی است، به‌طوری‌که تنها در چاه مورد بررسی ۲۹ شکستگی در اثر حفاری و در ناحیه مخزنی رخ داده است.

ناپایداری چاه ممکن است سبب افزایش هزینه‌های حفاری بین ۱۰ تا ۱۵٪ شده و در موارد حاد می‌تواند به قیمت از دست رفتن چاه و جان کارکنان تمام شود [۱-۳]. در این میان شکست کششی^۱ و شکست

1. Drilling Induced Tensile Fracture
2. Break Out

ameri@aut.ac.ir

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی

افقی بیشینه است. روش‌های ارائه شده در طی دو دهه اخیر به منظور محاسبه تنش بر جای افقی بیشینه پوروالاستیک، معکوس و چندضلعی تنش هستند [۱۳-۱۵]. در این میان روش چند ضلعی تنش از دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است اما تعیین دقیق مکان شکستگی‌های رخ داده در دیواره در حین حفاری از ملزومات این روش می‌باشد [۱۳]. در نهایت تعیین پنجره گل و مسیر بهینه به کمک معیارهای شکست صورت می‌پذیرد. معیارهای مور-کولمب، موگی-کولمب و لید تصحیح شده معیارهای رایج برای تعیین پنجره گل و مسیر بهینه می‌باشند. معیار مور-کولمب به سبب در نظر نگرفتن اثر تنش میانی برخلاف دو معیار دیگر، محافظه کار محسوب می‌شود [۱۲].

تکتونیک و چینه‌شناسی

میدان در دست بررسی واقع در خلیج فارس و در تنگه هرمز، یک طاقدیس گسل خورده در جهت شمال به جنوب است. این میدان گسل خورده به مانند بسیاری از میادین خلیج فارس، حاصل فعالیت سازند نمکی هرمز می‌باشد. فعالیت سازند هرمز سبب وجود گنبد‌های نمکی متعدد در این ناحیه شده است [۱۶]. گسل‌ها و گنبد‌های نمکی می‌توانند سبب ایجاد یک رژیم تنش محلی، نامناسب با شرایط کلی در منطقه شوند. اما در شرایط عادی جهت و میزان تنش‌های برجا توسط نیروهای تکتونیک فعال در منطقه تعیین می‌شوند. تنگه هرمز محل تقاطع چندین پدیده مهم زمین‌شناسی شامل کمر بند زاگرس در شمال غربی، صفحه عربی در جنوب، پهنه مکران در شمال شرق و رشته کوه عمان در جنوب است [۱۳]. تغییرات ایجاد شده در رشته کوه زاگرس ناشی از برخورد صفحات قاره‌ای اوراسیا و صفحه عربی می‌باشد که به نام برخورد زاگرس شناخته شده است [۱۳].

به کمک ساخت مدل مکانیکی زمین^۱ و استفاده از معیارهای شکست می‌توان مسیر چاه را برای ورود به مخزن به گونه‌ای انتخاب نمود که از شدت مشکلات کاسته شود. مدل مکانیکی زمین از دو بخش اساسی تشکیل شده است: نخست پارامترهای مکانیکی سنگ و دیگر رژیم تنش‌های برجا در منطقه. برای محاسبه پارامترهای مکانیکی سنگ در این سازند می‌توان از روابط ارائه شده در مقالات سود جست [۴ و ۵]، اما این روابط از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند. وجود رابطه بین خواص مکانیکی سنگ و داده‌های لاگ امری روشن بوده و در صورت وجود لاگ‌های مورد نیاز می‌توان خواص مکانیکی سنگ را هر چند به صورت خام محاسبه نمود. مقادیر محاسبه شده در نهایت به کمک داده‌های مغزه کالیبره می‌شوند تا نتایج واقعی به دست آید. در بخش دوم و برای تعیین وضعیت رژیم تنش در این سازند، تعیین اندازه و جهت تنش‌های برجا ضروری است. جهت تنش‌های برجا، با استفاده از تفسیر لاگ FMI^۲ تعیین می‌شود [۶-۱۰]. تعیین آزمون شکستگی‌های کششی و برشی به کمک لاگ فوق، جهت تنش بر جای بیشینه را روشن می‌نماید. تانسور تنش‌های برجا، شامل تنش بر جای روباره و دو تنش بر جای افقی نابرابر است. اکثراً در محاسبات وضعیت تنش در منطقه و در اعماق بالا، تنش‌های برجا به‌عنوان تنش اصلی لحاظ می‌شوند [۸-۱۲]. تنش بر جای روباره، تنش وارده ناشی از وزن لایه‌های فوقانی، به کمک داده‌های لاگ چگالی به صورت مستقیم قابل محاسبه است. تنش بر جای افقی کمینه به کمک داده‌های آزمایش‌های شکست کششی در مخزن قابل تعیین است [۶]. اما در صورت عدم وجود چنین داده‌هایی، تنش بر جای افقی کمینه به کمک رابطه الاستیک خطی یا ایتون معین می‌گردد که در صورت عدم تصحیح پارامتر نسبت پوآسون با خطا همراه است [۹]. اما مهم‌ترین و در عین حال دشوارترین بخش در این روند، محاسبه تنش بر جای

1. Mechanical Earth Model

2. Formation Microimager Incorporate

پارامترهای مکانیکی سنگ

مدول‌های الاستیک

رابطه مشخصی بین مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (ν) با سرعت انتشار موج در سنگ و چگالی آن، وجود دارد [۱۲]. بدین منظور داده‌های لاگ صوتی و چگالی برای محاسبه مدول‌های الاستیک به کار می‌روند. در صورت مقایسه روابط انتشار موج در سنگ با روابط هوک، روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند [۱۰]:

$$E_d = \rho v_s^2 \frac{3v_p^2 - 4v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \quad (۱)$$

$$E_d = 0.5 \frac{(v_p - 4v_s)^2 - 2}{2(v_p - v_s)^2 - 1} \quad (۲)$$

در روابط فوق v_p و v_s سرعت موج برشی و فشاری برحسب $\frac{km}{s}$ و ρ چگالی سنگ برحسب $\frac{gr}{cm^3}$ است. زیرنویس d در روابط فوق نشانگر این حقیقت است که مقادیر به دست آمده از روابط ۱ و ۲ از نوع دینامیک هستند. پس داده‌های مغزه باید به کار گرفته شوند تا این مقادیر دینامیک به مقادیر استاتیک تبدیل شوند. به صورت معمول نسبت پواسون دینامیک با نسبت پواسون استاتیک برابر فرض می‌شود [۱۵]. کالیبره کردن مدول یانگ به کمک رابطه وان هیردن انجام شده است [۱۲]:

$$E_s = aE_d^b \quad (۳)$$

در این رابطه a و b پارامترهایی هستند که باید به کمک داده‌های مغزه تعیین شوند.

مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)

مقاومت فشاری تک‌محوره پارامتری مهم و اثرگذار در محاسبات است. به همین سبب روابط فراوانی برای تعیین آن به کمک دیگر پارامترهای سنگ ارائه شده است. چانگ و همکاران تعدادی از این روابط را گردآوری نموده‌اند [۵]. در اکثر این روابط تلاش شده است تا رابطه‌ای بین مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیک سنگ برقرار شود. در این پژوهش از یک رابطه توانی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استفاده شد، که می‌توان آن را به شکل زیر نوشت:

$$UCS = cE_s^d \quad (۴)$$

در سوی دیگر فرو رفتن صفحه اقیانوسی هند به زیر صفحه ایران از حدود کرتاسه آغاز و هنوز ادامه دارد که از دیگر نیروهای تکتونیکی مهم در منطقه به‌شمار می‌رود [۱۶]. این دو پدیده توسط سیستم گسل میناب واقع در شرق تنگه هرمز از یکدیگر جدا می‌شوند.

سازندهای ایلام و سروک اهداف اصلی بررسی در این میدان می‌باشند. سازند ایلام متعلق به کرتاسه بالایی بوده و دارای ضخامت اندکی است. در بیشتر مناطق این سازند مشاهده نشده و در عین حال قابلیت تولیدی چندانی هم ندارد. اما سازند سروک، سازند مخزنی اصلی در این میدان که متعلق به کرتاسه میانی است از سه لایه مجزا شکل گرفته است. در قسمت‌های فوقانی این سازند ناپیوستگی رسوبی مشاهده شده و با توجه به عدم وجود سازند ایلام سازند گورپی به صورت مستقیم بر سازند سروک قرار گرفته و نقش سنگ پوشش را ایفا می‌کند. در حالی که در قسمت تحتانی و در ارتباط با سازند کژدمی، سنگ مادر میدان که دارای بیش‌ترین بلوغ در این ناحیه است، اثری از ناپیوستگی دیده نشده است. سازند سروک در این میدان مشتمل بر سه لایه شامل آهک‌های تمیز در بالا (میشریف)، آهک‌های رس‌دار در قسمت میانی که می‌توان آن را برابر با احمدی در نظر گرفت (خطیا) و آهک‌های نسبتاً تمیز در قسمت تحتانی (معدود) است.

ساخت مدل مکانیکی زمین

در اختیار داشتن این مدل، کمک شایانی به درک بهتر شرایط حفاری و شرایط مخزن در اعماق نموده و همچنین می‌تواند در طراحی چاه‌های توسعه‌ای، شکافت هیدرولیکی و بررسی تولید ماسه مورد استفاده قرار گیرد. مدل مکانیکی زمین شامل خواص مکانیکی سنگ و رژیم تنش‌های برجا است که در ادامه نحوه محاسبه هر کدام شرح داده خواهد شد.

تنش برجای قائم، P_{pn} گرایان فشارمنفذی عادی، Δt زمان عبور موج فشارشی یا همان آهستگی و NCT^۲ خط روند فشرده عادی است که از طریق عبور یک خط یا منحنی از داده‌های لاگ موج فشارشی به دست می‌آیند [۱۲].

رژیم تنش‌های برجا

تنش برجای قائم (S_v)

تنش برجای قائم در هر عمقی عبارت است از وزن لایه‌های فوقانی. بنابراین برای محاسبه، کافی است تا چگالی لایه‌ها از سطح تا عمق مربوطه موجود باشد. به صورت معمول لاگ چگالی هیچ‌گاه تا سطح رانده نمی‌شود، پس برون‌یابی تا سطح ضروری است. رابطه زیر برای برون‌یابی چگالی تا سطح استفاده شده است [۸]:

$$\rho_b = \rho_{sur} + A(TVD - WD - AG)^a \quad (۸)$$

در رابطه فوق ρ_b ، ρ_{sur} ، AG ، WD ، TVD ، به ترتیب چگالی، چگالی در سطح، عمق واقعی، ارتفاع آب دریا و فاصله میزدوار تا سطح دریا می‌باشند. دو پارامتر A و a به وسیله داده‌های لاگ چگالی در ناحیه مخزنی کالیبره می‌گردند.

تنش برجای افقی کمینه (S_h)

در صورت وجود آزمایش نشت^۳، فشار ستون سیال حفاری را در زمانی که نمودار فشار برحسب زمان از حالت یک خط با شیب ثابت خارج می‌شود، می‌توان به عنوان تخمینی مناسب از تنش برجای افقی کمینه در نظر گرفت [۷]. همچنین به کمک تست‌های آزمایش شکافت کوچک^۴ یا شکافت هیدرولیک می‌توان مقدار دقیق تری را برای تنش برجای افقی کمینه تعیین نمود [۶]. با توجه در اختیار نبودن نتایج آزمایش فوق رابطه زیر برای تعیین مقدار تنش برجای افقی کمینه مورد استفاده قرار گرفته است [۹].

در رابطه ۴ ثابت‌های c و d به کمک داده‌های مغزه کالیبره می‌شوند.

زاویه اصطکاک (ϕ)

کارهای انجام شده در این زمینه اندک است که شاید ناشی از اهمیت کم‌تر آن در مقایسه با UCS یا خواص الاستیک باشد. اما به طور مشخص رابطه‌ای بین تخلخل سنگ و زاویه اصطکاک آن موجود است؛ به طوری که هرچه تخلخل سنگ بیشتر باشد، زاویه اصطکاک کمتر خواهد بود. با توجه به این موضوع که مقطع مورد نظر ما در این پروژه یک مقطع کرناته با لایه‌های شیلی است، بنابراین رابطه پلامب برای محاسبه زاویه اصطکاک استفاده شده که دارای دقت خوبی در سنگ‌های رسوبی دارای شیل است. این رابطه را می‌توان به فرم زیر نمایش داد [۱۲]:

$$\phi = 26.5 - 37.4 * (1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1 * (1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (۵)$$

در رابطه ۵، $NPHI$ مقادیر قرائت شده توسط لاگ نوترون است. همچنین حجم شیل به کمک رابطه ۶ و با استفاده از داده‌های لاگ گاما تعیین می‌شود.

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (۶)$$

در رابطه ۶، GR مقدار خوانده شده توسط لاگ گاما و GR_{max} و GR_{min} کم‌ترین و بیشترین مقادیر خوانده شده توسط لاگ گاما در مقطع مورد نظر می‌باشند.

فشار منفذی

تعیین دقیق مقدار فشار منفذی برای تعیین اندازه تنش‌های برجای موثر ضروری است. انجام تست‌های فشاری مانند MDT^۱ دارای هزینه‌های بسیار بالایی است، بنابراین روابطی برای تخمین فشار منفذی ارائه شده‌اند. از جمله مهم‌ترین روابط ارائه شده در این زمینه، رابطه ایتون است [۱۲].

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{pn}) \left(\frac{NCT}{\Delta t} \right)^3 \quad (۷)$$

در رابطه فوق P_{pg} گرایان فشار سازند، OBG گرایان

1. Modular Dynamic Test
2. Normal Compacted Trend Line
3. Leak Off Test
4. Mini Fracture

خواهد آمد که مقدار تنش برجای افقی بیشینه به یک ناحیه محدود می‌کند. شکست کششی و برشی برای هرچه محدود تر کردن این چندضلعی استفاده می‌شود.

شکست کششی

با افزایش وزن گل حفاری، تنش مماسی (σ_θ) کاهش می‌یابد و با ادامه همین روند در یک نقطه بحرانی تنش مماسی، کششی خواهد شد. در صورتی که مقدار تنش مماسی از حد کششی سنگ فراتر برود، سنگ در اثر کشش خواهد شکست. معیار شکست کششی را به می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_3 = -T_0 \quad (11)$$

در رابطه فوق σ_3 مقدار کم‌ترین تنش اصلی است. برای رعایت احتیاط در محاسبات، T_0 برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. حال اگر برای بررسی توزیع تنش روابط شناخته شده کرش به کار بسته شوند، یک حد پایین برای S_H مشخص می‌گردد [۱۲].

$$\sigma_{\theta, \min} = 3(S_h - P_p) - (S_H - P_p) - \Delta P \quad (12)$$

در معادله فوق ΔP اختلاف فشار سازند و چاه (P_w) در دیواره و P_p فشار سازند می‌باشد.

شکست برشی

به کمک این پدیده می‌توان یک حد بالا برای S_H تعیین کرد. تنش مماسی با کاهش وزن گل، افزایش خواهد یافت. این امر سبب تمرکز تنش پیرامون دیواره می‌گردد. حال اگر در عمقی خاص، شکستگی برشی به عرض β رخ داده باشد با در نظر گرفتن معادلات کرش می‌توان نوشت [۸]:

$$S_H \leq \frac{P_w(1+q) + P_p(1-q) + UCS - (1-2\cos\beta)S_h}{1+2\cos\beta} \quad (13)$$

در رابطه فوق q به کمک رابطه ۱۴ برحسب زاویه اصطکاک تعیین می‌شود:

$$q = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (14)$$

معیار شکست و مسیر بهینه

مقادیر تنش‌های اصلی باید در معیارهای شکست جایگزین شوند تا پایداری دیواره بررسی و حد پایین

$$S_h = \frac{v}{1-v}(S_v - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (9)$$

در رابطه ۹، S_v ، P_p و S_h به ترتیب فشار منفذی، تنش برجای قائم و تنش برجای افقی بیشینه برحسب mPa و همچنین α و v ضریب بایوت و نسبت پوآسون هستند. نکته مهم در استفاده از رابطه ایتون، کالیبره کردن پارامتر v است. با توجه به عدم وجود داده‌های تست شکاف یا نشتی، از داده‌های هرزروی برای کالیبره کردن نسبت پوآسون بهره برده شده است. فشار چاه در زمان هرزروی کامل با دقتی قابل قبول مقدار تنش را به ما می‌دهد البته در صورتی که با کاهش وزن گل در همان شرایط میزان هرزروی کاهش یافته باشد [۱۵].

تنش برجای افقی بیشینه (S_H)

تعیین S_H به چندین روش امکان‌پذیر است که در این میان چند ضلعی تنش، روشی به مراتب دقیق‌تر است. این روش از تئوری گسل اندرسون برای تعیین نحوه حرکت صفحات نسبت به هم در یک گسل و از تئوری کولمب برای تعیین نسبت تنش اصلی بیشینه به تنش اصلی کمینه برای ایجاد گسل استفاده می‌کند [۱۲].

طبق تئوری اندرسون سه نوع گسل ممکن است اتفاق بیفتد. اگر $S_v > S_H > S_h$ گسل نرمال، در صورتی که $S_H > S_v > S_h$ گسل امتداد لغز و در شرایطی که $S_H > S_h > S_v$ از نوع معکوس است. اما بر اساس نظریه کولمب، در صورتی که از چسبندگی سنگ صرف‌نظر گردد، که این فرض در عمق‌های بالا با توجه به شکستگی‌های فراوان فرضی منطقی است، رابطه بین تنش اصلی بیشینه و کمینه در گسل به شکل زیر به دست خواهد آمد [۶]:

$$\frac{\sigma_1 - P_p}{\sigma_3 - P_p} = (\mu + \sqrt{(\mu^2 + 1)})^2 \quad (10)$$

در رابطه فوق μ ضریب اصطکاک زمین است که به صورت معمول ۰/۶ فرض می‌شود [۶]. حال در صورت ترکیب این دو برای هر سه حالت گسل و در نظر گرفتن خط $S_H \geq S_h$ ؛ یک چند ضلعی به دست

۳ استفاده گردید. در این رابطه مقادیر α و b باید کالیبره شوند که مقادیر α بین ۰/۰۹ تا ۰/۳ و مقادیر b بین ۱/۲ تا ۱/۴ متغیر است [۱۲]. به کمک داده‌های مغزه این دو مقدار به ترتیب ۰/۲۴۳ و ۱/۲۹۷ به دست آمده‌اند. همچنین برای محاسبه UCS با استفاده از رابطه ۴ مقادیر c و d به ترتیب ۰/۷۱۹۵ و ۱/۲۵۴۷ محاسبه شدند. در ادامه مقادیر زاویه اصطکاک توسط رابطه پلامب محاسبه گردید. خواص مکانیکی سنگ در عمق در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. نقاط متمایز بر روی نمودارها، داده‌های مغزه هستند.

فشار منفذی

برای تعیین فشار منفذی از داده‌های آزمایش MDT در چاه مجاور استفاده شده است که مجموع در ۵۲ نقطه فشار منفذی ثبت شده و تنها در ۲۵ نقطه فشار ثبت شده از صحت برخوردار است. رابطه خطی زیر به کمک روش کم‌ترین مربعات خطا و داده‌های آزمایش فشار منفذی محاسبه گردید.

$$P_p = 0.0052 * Depth + 29.027 \quad (15)$$

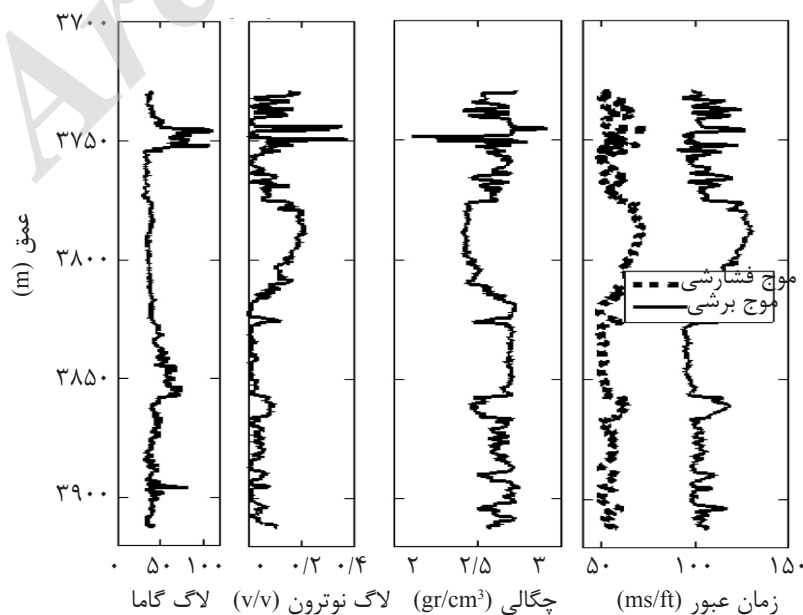
در رابطه نشانگر عمق برحسب متر و فشار منفذی برحسب mPa است. در شکل ۳ داده‌های تست MDT به صورت نقاط برجسته دیده می‌شوند.

و بالای پنجره گل تعیین گردد. معیار مور-کولمب از نخستین معیارهای ارائه شده و پرکاربردترین آن‌ها است. این معیار به سبب در نظر نگرفتن اثر تنش میانی به‌عنوان معیاری محافظه‌کار شناخته می‌شود [۱۷]. همچنین برای بررسی بیشتر و مقایسه، دو معیار موگی-کولمب و لید تصحیح شده که اثر تنش میانی را لحاظ می‌کنند، هم در محاسبات به کار گرفته شده‌اند [۱۸ و ۱۹]. به کمک معیارهای ارائه شده پنجره گل باید برای تمامی مسیره‌های ممکن در محدوده‌ای که تنش‌ها در دسترس هستند، محاسبه شود تا بتوان در باب بهینه‌ترین مسیر سخن گفت.

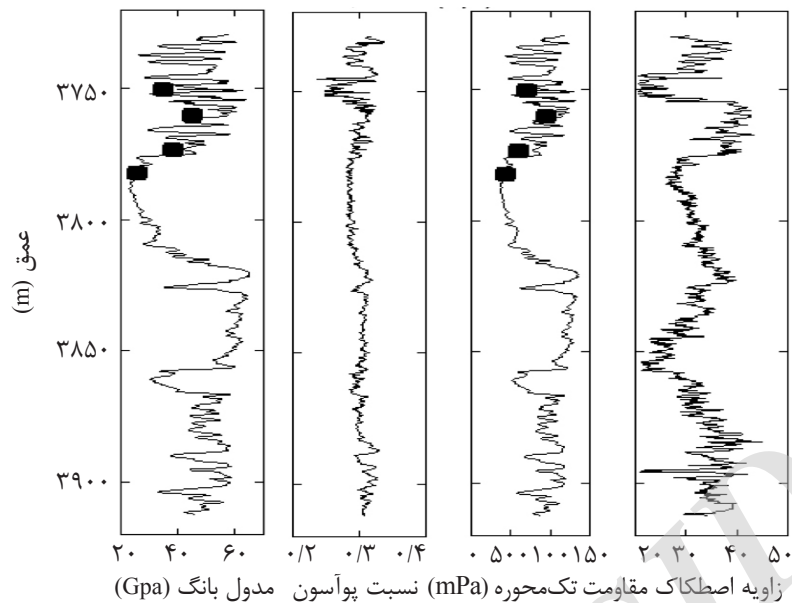
بررسی چاه مورد نظر

خواص مکانیکی

برای تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ از لاگ‌های نوترون، گاما، چگالی و صوتی برای محاسبه مقادیر خام خواص مکانیکی سنگ استفاده شده است. اطلاعات لاگ‌های مربوطه در شکل ۱ آورده شده است. لاگ‌های موجود همگی در بخش سروک و ایلام گرفته شده و از کیفیت قابل قبولی برخوردار بوده‌اند. برای کالیبره کردن مدول یانگ از رابطه



شکل ۱ نمودار لاگ‌های گرفته شده.

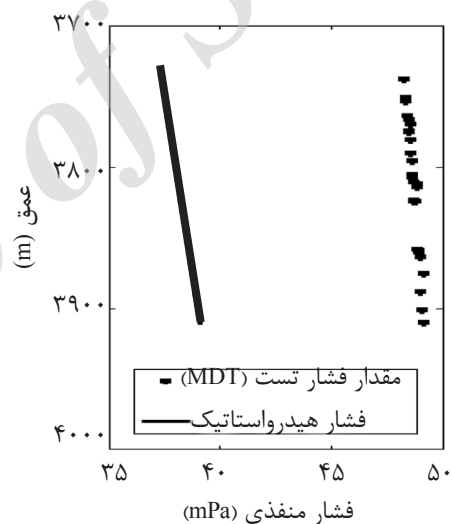


شکل ۲ نمودار خواص مکانیکی سنگ.

شود که چگالی در مناطق سطحی کم بوده و با افزایش بیشتر عمق با نرخ بالایی افزایش یابد. مقادیر به دست آمده برای چگالی در شکل ۴ دیده می شود. مقادیر تنش برجای قائم بر حسب عمق در شکل ۵ به همراه تنش برجای افقی کمینه، به منظور مقایسه، آورده شده است. تنش برجای قائم برخلاف دو تنش دیگر تا سطح قابل محاسبه است.

تنش برجای افقی کمینه

برای محاسبه تنش برجای افقی کمینه، مقدار ۷ با توجه به اطلاعات هرزروی کامل در دو عمق، ۰/۳۱۸۲۶ به دست آمده و ضریب بایوت برابر با ۰/۸۲۵۶ تعیین گردید. مقادیر به دست آمده برای تنش برجای افقی کمینه، به کمک رابطه ۹، به همراه محدوده های به دست آمده از چند ضلعی تنش برای تنش برجای افقی کمینه در شکل ۵ نمایش داده شده اند. مقادیر به دست آمده با بازه های تعیین شده توسط چند ضلعی تنش همخوانی دارد که نشان دهنده صحت روش است. باید توجه نمود که مقادیر حاصل شده برای تنش برجای افقی کمینه به هیچ عنوان قابل تعمیم به اعماق دیگر نمی باشد.

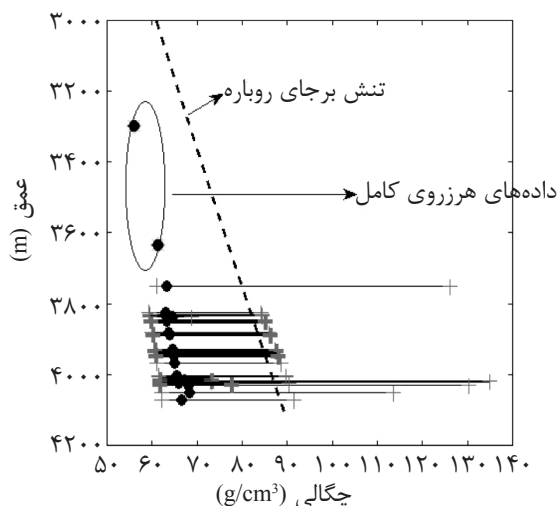


شکل ۳ فشار هیدرواستاتیک و مقادیر تست MDT.

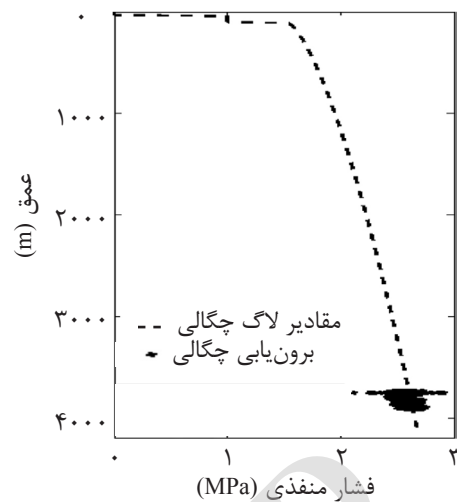
همان گونه که در شکل پیدا است مقادیر فشار منفذی بیش از مقادیر فشار هیدرواستاتیک هستند.

تنش برجای قائم

برای محاسبه تنش برجای قائم، چگالی به کمک رابطه ۸ تا سطح برون یابی شد. در این رابطه مقادیر α و A باید کالیبره شوند که به کمک داده های لاگ چگالی این مقادیر به ترتیب ۰/۳۰۲۱۰۹ و ۰/۱۰۷۷۳۲ محاسبه شدند. در محاسبات کالیبراسیون، چگالی سطح با فرض تخلخل ۶۰٪ در کف دریا به دست آمده است. این برون یابی باید به گونه ای انجام



شکل ۵ تخمین تنش برجای افقی کمینه (mPa).



شکل ۴ مقادیر چگالی برون‌یابی شده.

فراهم می‌شود [۹]. این شرایط به صورت معمول در رژیم تنش امتداد لغز، در صورتی که چاه قائم باشد، فراهم است.

آزموت تنش‌های برجا

برای تعیین جهت رژیم تنش، اطلاعات آزمون شکستگی‌ها در نمودار رز رسم شد. در شکل ۸ شکستگی‌های کششی به وسیله مربعات و شکستگی‌های برشی توسط دوایر نشان داده شده‌اند. شکستگی‌های کششی، حدوداً در راستای N ۴۲ E (شمال و E شرق) قرار گرفته‌اند. بنابراین جهت تنش برجای افقی بیشینه در راستای N ۴۲ E می‌باشد که منطبق است بر جهت نیروی وارده از صفحه عربستان در ناحیه برخورد زاگرس. همچنین روشن است که تنش برجای افقی کمینه با زاویه ۹۰° نسبت به این آزمون وارد می‌گردد. نتیجه با مطالعات پیشین در خلیج فارس به دست آمده خلیج فارس همخوانی دارد [۱۳]. برای تعیین دقیق جهت تنش‌ها در سراسر این میدان نیاز به داده‌های چاه‌های مجاور است. وجود گسل‌ها و گنبد‌های نمکی می‌تواند سبب تغییر جهت تنش در چاه‌های مجاور شود.

مسیر بهینه

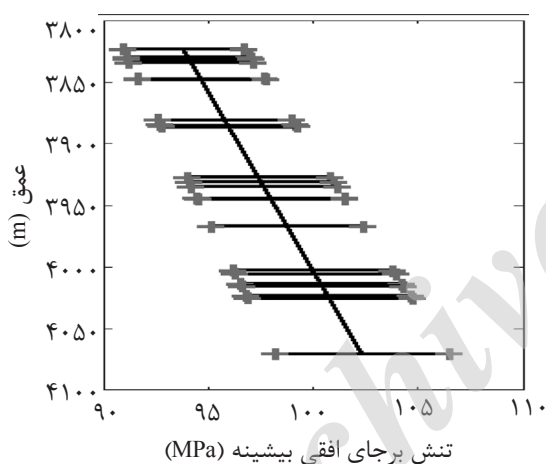
برای انتخاب مسیر بهینه روش‌های متعددی ارائه شده است.

تنش برجای افقی بیشینه

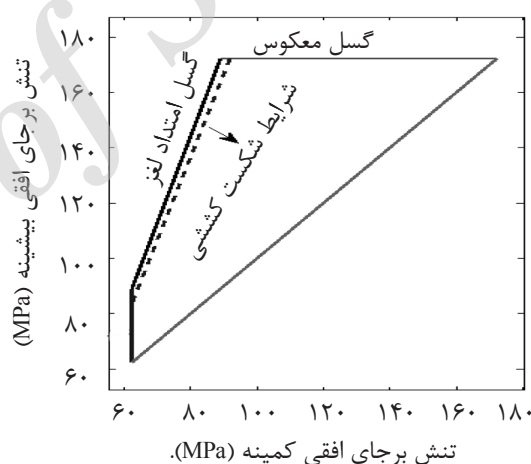
در محاسبه تنش برجای افقی بیشینه، از چند ضلعی تنش کمک گرفته شد. در ناحیه مخزنی این چاه، ۲۲ شکستگی کششی و ۷ شکستگی برشی رخ داده است که در ۵ عمق شکستگی برشی و کششی هم‌زمان بوده است. اطلاعات برخی از این شکستگی‌ها در جدول ۱ زیر آورده شده است. مقادیر S_H به دست آمده در بخش پیشین و اطلاعات شکست برای محدود کردن هر چه بیشتر S_H استفاده شده است. در شکل ۶ یک نمونه از چند ضلعی‌های تنش محاسبه شده ارائه شده است. محور عمودی در این شکل تنش برجای افقی بیشینه و محور افقی، تنش برجای افقی کمینه است. در شکل ۷ بازه‌های محاسبه شده برای تنش برجای افقی بیشینه بر حسب عمق، نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده برای تنش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که رژیم تنش در منطقه امتداد لغز است که با شرایط فعال تکتونیکی در منطقه همخوان است. اختلاف تنش برجای بیشینه و تنش برجای افقی از نظر مقدار به صورت متوسط سه برابر مقدار اختلاف آن با تنش برجای قائم است. این اختلاف علت رخداد فراوان شکست کششی را نشان می‌دهد. به صورت کلی هرگاه اختلاف تنش برجای افقی بیشینه و کمینه بالا باشد، شرایط برای شکست کششی

جدول ۱ اطلاعات شکست در دیواره حین حفاری در ناحیه مخزنی

عمق (m)	آزیموت شکست کششی (درجه)	ارتفاع شکست کششی در چاه (m)	آزیموت شکست برشی (درجه)	ارتفاع شکست برشی در چاه (m)
۳۸۳۱	۱۸۷/۸۳	۱/۵۵	-	-
۳۸۳۴	۲۲۰/۸۲	۱/۹۹	۳۱۶/۸۶	۱/۵۰
۳۸۴۷	۲۱۳/۵۵	۲/۴۷	-	-
۳۸۴۸	۵۰/۲۱	۲/۳۱	-	-
۳۸۸۰	۲۱۴/۲۵	۱/۹۸	-	-
۴۰۰۵	۳۰/۳۳	۳/۰۸	-	-
۴۰۲۳	۳۷/۹۸	۲/۶۷	۱۲۸/۱۶	۲/۱۶
۴۰۳۰	-	-	۲۹۰/۳۱	۲/۷۶
۴۰۵۰	-	-	۳۱۵/۵۲	۲/۵۵
۴۰۷۰	۱۹۷/۸۴	۳/۹۰	-	-

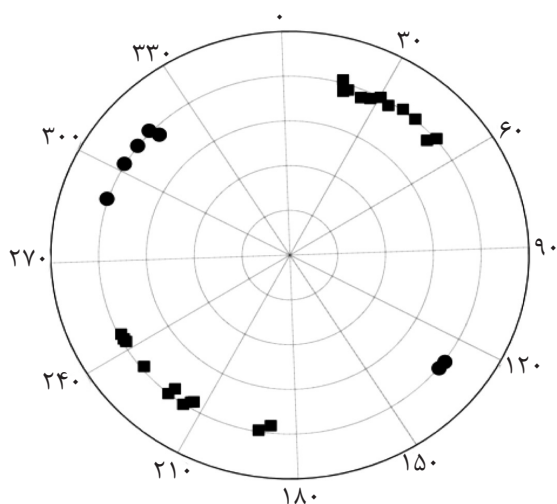


شکل ۷ تعیین حدود تنش بر جای افقی بیشینه.



شکل ۶ چند ضلعی تنش.

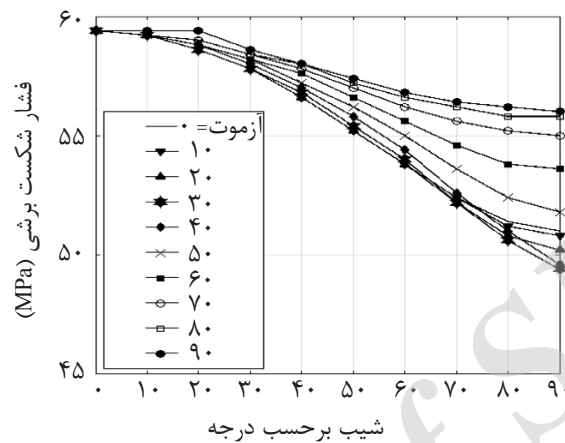
بعضی از این روش‌ها دارای دید مخزنی بوده و بعضی بر مبنای ملزومات حفاری ارائه گشته‌اند [۲۱]. در این بخش بهینه‌سازی بر اساس معیار بیش‌ترین پایداری در حفاری از نگاه ژئومکانیکی بررسی شده است [۱۴ و ۲۲]. طبق اطلاعات حفاری بیش‌ترین ناپایداری در فاصله ۴۰۱۲ تا ۴۰۲۳ m رخ داده است که از جنس آهک است. بدین منظور پنجره گل به کمک سه معیار ارائه شده برای این قسمت از مخزن، در آزیموت‌ها و شیب‌های متفاوت محاسبه شد. با توجه به تقارن مسئله آزیموت تنها تا ۹۰° در نظر گرفته شده است. مقدار فشار مورد نیاز برای جلوگیری از شکست برشی در دیواره براساس



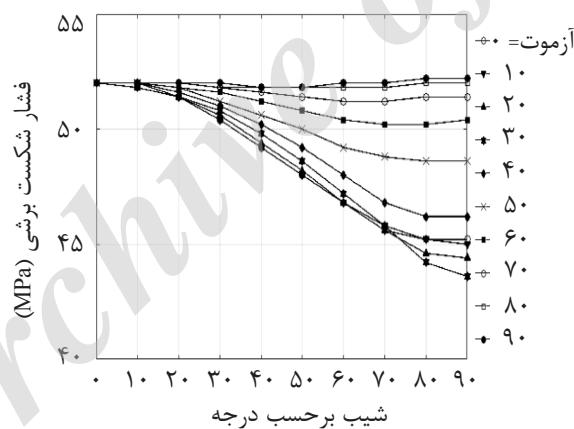
شکل ۸ نمودار رز شکستگی‌های کششی و برشی.

افقی شیب مسیر مورد نظر و هر خط نشان‌دهنده یک آزمون است که نسبت به تنش بر جای افقی بیشینه در نظر گرفته شده است. آزمون و شیب مسیر با گام‌های ۱۰° در محاسبات لحاظ شده‌اند.

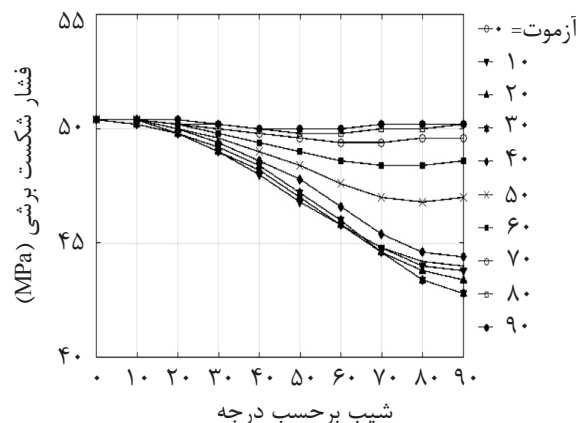
معیار مور - کولمب، موگی - کولمب و لید تصحیح شده به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. در این نمودارها، محور عمودی فشار مورد نیاز برای جلوگیری از شکست برشی است که هرچه کمتر باشد، بهینه‌تر است. همچنین محور



شکل ۹ حد پایین پنجره گل براساس معیار مور- کولمب.



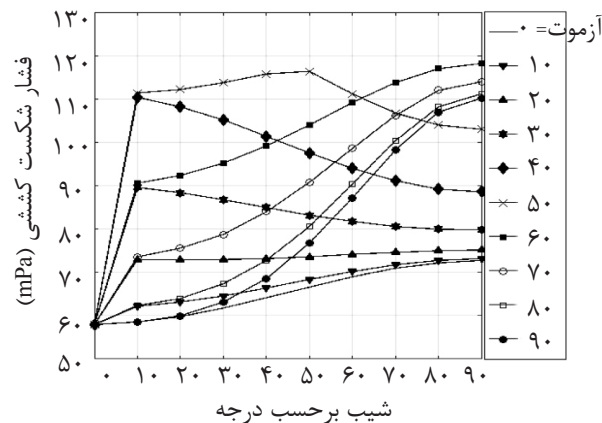
شکل ۱۰ پنجره گل به کمک معیار موگی - کولمب.



شکل ۱۱ پنجره گل به کمک معیار لید تصحیح شده.

به مانند شکل ۹ و محور عمودی فشار مورد نیاز برای ایجاد شکست کششی است که هرچه بیشتر باشد بهتر است. به‌طور کلی یکسان با روند مطرح شده در حد پایین، می‌توان گفت که با افزایش شیب در هر آزمایش پایداری چاه افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر چاه‌های افقی با زاویه ۷۰ تا ۹۰° نسبت به تنش برجای افقی بیشینه دارای بالاترین فشار لازم برای شکست کششی می‌باشند که انجام عملیات شکاف در این جهت را با سختی‌های بسیار روبرو خواهد نمود. در نهایت از دید حد بالا بهترین مسیر چاهی است افقی با زاویه ۷۰ تا ۹۰° نسبت به تنش برجای افقی بیشینه که خلاف مسیر تعیین شده توسط حد پایین است. با توجه به پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های مالی فراوان حفر چاه افقی و تضاد موجود در تعیین آزمایش چاه افقی از دید حد بالا و پایین، هدف یافتن مسیری است که هم‌زمان پایداری حد بالا و پایین و امکان‌پذیری را داشته باشد. با در نظر گرفتن نتایج برای حد بالا و پایین به صورت هم‌زمان و نظر به فشار مخزن می‌توان مسیر بهینه‌ای را تعیین نمود که تمام شرایط را دارا باشد. در نمودارهای حد پایین، کاهش فشار مورد نیاز برای جلوگیری از شکست برشی در شیب‌های ۳۰ تا ۸۰° و زوایای ۰ تا ۴۰° با روند بسیار سریع‌تری صورت می‌پذیرد. اما با بررسی این بازه در حد بالا می‌توان متوجه شد می‌توان نتیجه گرفت که در تمام این بازه چاه‌هایی با زاویه ۳۰ تا ۴۰° از پایداری بالاتری برخوردار هستند. پس می‌توان گفت که با بررسی حد بالا و پایین، چاه‌هایی با شیب ۳۰ تا ۸۰° و زاویه ۳۰ تا ۴۰° نسبت به تنش برجای افقی بیشینه، پایداری مناسبی برای ورود به دشواری حفاری و راندن جداری در شیب‌های بیش از ۶۰°، بازه مورد نظر کوچک‌تر می‌شود. در نهایت می‌توان گفت مسیری با شیب ۶۰° و زاویه ۴۰° نسبت به تنش برجای افقی بیشینه، بهترین مسیر ممکن برای ورود به مخزن است.

با مقایسه مقادیر به‌دست آمده توسط سه معیار ارائه شده آشکار است که انتخاب معیار شکست تأثیری بر تعیین مسیر بهینه ندارد. اما مقادیر تعیین شده توسط معیار مور- کولمب در تمام مسیرها بیش از مقادیر تعیین شده توسط دو معیار دیگر است که نشان از محافظه‌کاری معیار مور- کولمب دارد که پیش از این گزارش شده است [۲۰]. همچنین معیار لید تصحیح شده دارای کمترین مقادیر محاسبه شده برای حد پایین پنجره گل می‌باشد. معیارهای موگی- کولمب و لید تصحیح شده مقادیر و روند تقریباً یکسانی را ارائه می‌دهند. به‌طور کلی معیارهای مختلف در مسیرهای متفاوت مقادیر متفاوتی را پیش‌بینی می‌کنند اما روند یکسانی را با افزایش یا کاهش شیب و آزمایش ارائه می‌دهند. از دیگر سو با توجه به نمودارهای ارائه شده، روشن است که چاه قائم در ناحیه مورد نظر دارای کم‌ترین میزان پایداری در حد پایین است. عطف به امتداد لغز بودن رژیم تنش که از محاسبه مقادیر تنش‌های برجا روشن گردید، این نتیجه کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. از دیگر سو با کاهش زاویه چاه نسبت به تنش برجای افقی بیشینه شرایط چاه پایدارتر خواهد گشت که پیشتر هم گزارش شده است [۱۴]. اما به روشنی ناهمگونی‌هایی در آزمایش‌های ۴۰° برای تمامی معیارها دیده می‌شود که نشان می‌دهد این امر نمی‌تواند ناشی از خطای معیار شکست باشد. این ناهمگونی توسط العجمی هم گزارش شده است که البته با داده‌های غیر واقعی صورت پذیرفته است [۱۷]. این ناهمگونی نشان می‌دهد که تعیین مسیر بهینه برای هر شرایطی باید به‌صورت مشخص و معین صورت پذیرد. در نهایت از حیث حد پایین پنجره گل می‌توان گفت که چاهی افقی با زاویه ۳۰ تا ۴۰° نسبت به تنش برجای افقی بیشینه دارای بیشینه پایداری در میان مسیرهای پیش رو است. همچنین حد بالای پنجره گل هم به کمک معیار شکست کششی محاسبه شده و نتایج در شکل ۱۲ آورده شده است. در این نمودار محور افقی و خطوط



شکل ۱۲ حد بالای معیار شکست کششی.

برای مسیرهای متفاوت در ناحیه مخزنی محاسبه گردید. به کمک نمودارهای به دست آمده، نشان داده شد که انتخاب معیار شکست تأثیری بر انتخاب مسیر بهینه ندارد.

۴- پایدارترین مسیر برای ورود به مخزن از نظر حد پایین چاهی افقی با آزمون ۷۰ تا ۸۰° و برای حد بالا چاهی افقی با آزمون ۱۱۰ تا ۱۳۰° معین گردید.

۵- بهینه‌ترین مسیر برای حفاری در ناحیه مخزنی که امکان‌پذیری و پایداری را به صورت هم‌زمان فراهم کند، چاهی با شیب ۶۰° و آزمون ۷۰ تا ۸۰° انتخاب شد. این مسیر پایدارترین مسیر برای ورود به مخزن است.

نتیجه‌گیری

میدان بررسی شده دارای مشکلاتی عدیده در زمینه ناپایداری دیواره چاه در ناحیه مخزنی بوده است. برای رفع این مسئله تلاش شد تا مسیری بهینه برای حفاری‌های توسعه‌ای یافته شود. بدین منظور: ۱- مدل مکانیکی زمین به کمک داده‌های موجود برای ناحیه مخزنی در این میدان محاسبه شده و روابطی برای خواص مکانیکی سنگ مخزن سروک در ناحیه ارائه شد.

۲- رژیم تنش‌های برجا در منطقه به کمک اطلاعات شکست و حفاری تبیین گردید و روشن شد که رژیم تنش در منطقه از نوع امتداد لغز است.

۳- به کمک معیارهای شکست متفاوت، پنجره گل

مراجع

- [1]. Rabia H., "Well engineering and construction," Entrac Consulting Publishing, 2001.
- [2]. Kang Y., Yu M., Miska S. and Takash N., "Wellbore stability: A critical review and introduction to DEM," Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [3]. Liz-Losada R. J. and Alejano L. R., "New safe mud weight window representation to prevent wellbore instability," Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [4]. Najibi A., Ghafoori M., Lashkaripour GH. and Asef M., "Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestone, two main oil reservoirs in Iran," Petroleum Science and Engineering, Vol. 126, pp. 78-82, 2014.
- [5]. Chang C., Zoback M D. and Khaksar A., "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks," Petroleum Science and Engineering., Vol. 51, No.3, pp. 223-237, 2006.
- [6]. Zoback M. D., Barton C. A., Brudy M., Castillo D. A., Finkbeiner T., Grollimund B. R., Moos D. B., Peska P., Ward C. D. and Wiprut D. J., "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells", Rock Mechanics

- and Mining Sciences., Vol. 40, No. 7, pp. 1049–1076, 2003.
- [7]. Lund B. and Zoback M. D. "Orientation and magnitude of in situ stress to 6.5 km in the Baltic Shield", Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 36, No. 2, pp. 169-190, 1999.
- [8]. Wiprut D. and Zoback M. D., "Constraining the stress tensor in the Visund field, Norwegian North Sea: Application to wellbore stability and sand production", Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 37, No. 1-2, pp. 317-336, 1999.
- [9]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanic," New York: Cambridge University Press., 2007.
- [10]. Fajer E., Holt R. M., Horsrud P., Raean A. M. and Risnes R., "Petroleum related rock mechanics," Second ed., Elsevier, Amsterdam, 2008.
- [11]. Peska P. and Zoback M. D., "Compressive and tensile failure of inclined well bores and determination of in situ stress and rock strength", Geophysical Research., Vol. 100, No. 7, pp. 12791-12811, 1995.
- [12]. Maleki SH., Gholami R., Rasouli V., Moradzadeh A., Ghavami R. and Sadeghzadeh F., "Comparison of difference failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice", Earth-Science Review., Vol. 136, pp. 36-58, 2014.
- [13]. Haghi A. H., "Present-day stress of the central Persian Gulf: implications for drilling and well performance," Tectonophysics., Vol. 608, pp. 1429-1441, 2013.
- [14]. Kaydrov T. and TutuncuA., "Integrated wellbore stability analysis for well trajectory optimization and field development in the west Kazakhstan field," American Rock Mechanic Association., Vol. 46, 2012.
- [15]. Djurhuus J. and Adony B. S., "In-situ stress data from inversion of fracturing data from oil wells," Petroleum Science and Engineering., Vol. 38, No. 3-4, pp. 121-130, 2001.
- [۱۶]. پاژنگ س., کدخدائی ع., زمانی ب., برگریزان م., یوسف‌پور م., "معرفی ۱۷ گنبد نمکی مدفون و غیر مدفون بر اساس داده‌های لرزه‌ای در تنگه هرمز (بلوک F)", نشریه پژوهش نفت ایران، دوره ۸۴، صفحات ۱۵۰-۱۶۰، ۱۳۹۴.
- [17]. Al-AjmiAM., ZimmermanRW., "Stability analysis of vertical borehole using the Mogi-Coulomb failure criteria," Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 43, No. 8, pp. 1200-1211, 2006.
- [18]. Al-Ajmi A. M. and Zimmerman R. W., "Relation between the Mogi and the coulomb failure criteria", Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 43, No. 8, pp. 1200-1211, 2005.
- [19]. Ewy R. T., "Wellbore stability predictions by use of a modified Lade criterion," SPE Drilling and Completion., Vol. 14, No. 2, 2005.
- [20]. Gholami R., Moradzadeh A., Rasouli V. and Hanachi J., "Practical application of failure criteria in determination safe mud weighs windows in drilling operation," Rock Mechanics and Geotechnical Engineering., Vol. 6, pp. 13-25, 2013.
- [21]. Immerlberg N. and A. Eckert., "Wellbore trajectory planning for complex stress states," 47th US Rock Mechanics/Geomechanic Symposium, American Rock Mechanics Association, 2013.
- [22]. Zare-ReisabadiMR., KaffashA., ShadizadehSR., "Determination of optimal well trajectory during drilling and production based on borehole stability," Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 56, pp. 77-87, 2012.