



مقاله پژوهشی

تعیین پنجره ایمن وزن گل و مسیر بهینه حفاری سازند گدوان با استفاده از معیارهای شکست سنگ در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غرب ایران

حسین جهان محمدی^۱؛ حسین مصدق^{۲*}؛ مهران عزیززاده^۳؛ حمید سرخیل^۴؛ محمد محمدنیا^۵

۱- کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

۲- دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

۳- استادیار، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۵- مربی، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.406379.1200

واژگان کلیدی	چکیده
مدل ژئومکانیکی، ناپایداری چاه، سازند گدوان، دشت آبادان، مسیر بهینه حفاری	امروزه اقتصاد کشورهای حوزه خاورمیانه در گرو افزایش نرخ بهره‌برداری و تولید نفت خام می‌باشد. با درک این واقعیت که کشف میادین هیدروکربوری عظیم در آینده به ندرت رخ خواهد داد، از این رو برنامه‌ریزی شرکت‌های نفتی، تولید بهینه از میادین موجود می‌باشد. سازند گدوان یکی از مخازن مهم دشت آبادان محسوب می‌شود که از توالی‌های شیل و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. حفر چاه‌های تولیدی در این سازند به دلیل ماهیت ضعیف توالی شیلی همواره یک چالش بوده است. بیش از ۹۰٪ مشکلات چاه در سازند گدوان ناشی از ناپایداری چاه است. از جمله این مشکلات می‌توان به ریزش چاه، تنگ‌شدگی و گیرکردن مته اشاره نمود که منجر به افزایش زمان غیرمولد (NPT) و هزینه‌های حفاری می‌شوند. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی پایداری چاهی واقع در یکی از میادین جنوب غرب ایران براساس یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی می‌باشد. پس از ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی، جهت ارزیابی پایداری چاه از معیارهای شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب استفاده شد. با بررسی نتایج مشخص شد که معیار شکست موهر-کولمب، تخمین بهتری در مورد فشار ریزش ارائه می‌دهد. همچنین امتداد ریزش‌های شناسایی شده بر روی نگار تصویری، به صورت شمال غرب-جنوب شرق بوده که نمایانگر جهت تنش افقی حداقل می‌باشد. برطبق نتایج آنالیز حساسیت، جهت بهینه حفاری برای سازند گدوان، شمال غرب-جنوب شرق بوده و برای انجام حفاری قائم در این سازند مطابق با مدل ژئومکانیکی چاه مورد مطالعه، وزن گل ایمن برابر با ۱۴/۹ LB/G تخمین زده شد. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان یک مرجع برای تعیین پنجره وزن گل بهینه در برنامه‌ریزی چاه‌های آتی در این میدان برای مقابله با مشکلات پایداری حفاری استفاده شود.

بهبود کارایی عملیات حفاری است [2]. ناپایداری دیواره چاه تحت تأثیر فشار منفذی، تنش‌های برجا و ویژگی‌های مقاومتی سنگ قرار دارد. به محض اینکه حفاری آغاز شود و سیال حفاری جایگزین سنگ حذف شده گردد، تعادل تنش‌های برجا در اطراف چاه به هم می‌ریزد که باعث تمرکز تنش در دیواره چاه می‌شود. تمرکز تنش در اطراف چاه به عوامل متعددی از جمله بزرگی و جهت تنش‌های برجا، فشار گل، شیب و

۱. پیش‌گفتار
علی‌رغم پیشرفت‌های روزافزون و استفاده از تکنولوژی‌های جدید در صنعت نفت و گاز، ناپایداری چاه از نظر هزینه حفاری و تکمیل چاه همچنان یکی از چالش برانگیزترین جنبه‌ها است. هر ساله میلیاردها دلار صرف مشکلات ناپایداری چاه‌ها می‌شود که باعث افزایش ۱۰ درصدی بودجه حفاری می‌شود [1]. بنابراین، مطالعه دقیق پایداری چاه یک گام کلیدی در

اصلی تشکیل شده است: تنش قائم (S_v)، تنش افقی حداقل (Sh_{min})، تنش افقی حداکثر (Sh_{max})، فشار منفذی (P_p) و خواص الاستیک و مقاومتی سنگ [7].

تجزیه و تحلیل پایداری چاه به طور پراکنده توسط محققین مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است، از جمله این مطالعات می توان به پژوهش صورت گرفته توسط بردلی (1979) اشاره نمود که برای اولین بار بحث پایداری چاه را معرفی کرد و یک مدل خطی سه بعدی برای پیش بینی ریزش برشی متقارن چاه و شکست کششی القا شده و برآورد فشار گل بهینه ارائه داد [8]. عظیم و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای از مدل‌های ژئومکانیکی مبتنی بر پوروالاستیک خطی و ناهمسانگرد برای شبیه سازی رفتار سازند زبیر در حین حفاری در چاه‌های قائم و انحرافی برای درک رویداد ناپایداری چاه استفاده کردند [9]. کولاوله و همکاران (2018) یک مدل ژئومکانیکی با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی برای پیش بینی و تعیین کمیت ناپایداری چاه و پتانسیل ماسه زایی در میدانی واقع در بخش شرقی حوضه پانونین مجارستان تهیه نمودند [10]. ملکی و همکاران (۱۳۹۳) جهت ارزیابی پایداری دیواره چاه‌های حفار شده، به بررسی و تحلیل مقدار و جهت تنش‌های برجا در دیواره چاه‌ها با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی برای یکی از میادین نفتی جنوب ایران پرداختند [11]. منصورزاده و همکاران (۲۰۱۶) از یک مدل ژئومکانیکی جامع برای پیش بینی پایداری چاه و فشار ریزش متقارن در چاه‌های عمودی و انحرافی با استفاده از معیارهای شکست استفاده کردند [12]. عزتی و همکاران (۲۰۲۰) یک تحلیل ژئومکانیکی یکپارچه برای مخزن سروک سه حلقه چاه واقع در یکی از میادین نفتی دشت آبادان انجام دادند. پارامترهای الاستیک و مقاومتی سازند مستقیماً با استفاده از آزمون‌های مکانیک سنگ تعیین شدند. پس از آن مدل ژئومکانیکی یک بعدی برای سه حلقه چاه شمالی، مرکزی و جنوبی میدان مورد مطالعه ساخته شد. بر اساس تجزیه و تحلیل پایداری چاه، این نتیجه حاصل شد که جهت‌های پایدارتر برای حفاری، جهت‌های حفاری $NW-SE$ در قسمت شمالی، $E-W$ و $N-S$ در بخش مرکزی و $NE-SW$ در قسمت جنوبی میدان مورد مطالعه می باشد. حسین پور و ریاحی (۲۰۲۲) تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی در تعیین پنجره‌ی ایمن وزن گل و مسیرهای حفاری ایمن برای مخزن سروک یکی از میادین واقع در

آزیموت چاه بستگی دارد. زمانی که تمرکز تنش از مقاومت سنگ فراتر رود منجر به شکست برشی و فشارشی در اطراف چاه می شود.

در بسیاری از موارد، ناپایداری چاه ممکن است به دلیل ترکیبی از این عوامل مکانیکی (به عنوان مثال، تنش‌های بالا، مقاومت کم سنگ و روش نامناسب حفاری) و یا شیمیایی (به دلیل برهمکنش بین سیال حفاری و سنگ) رخ دهد. ناپایداری مکانیکی به دلیل بالارفتن مقدار تنش از مقاومت سازند می باشد که می توان به سه گروه تقسیم کرد [3]: نوع اول که به صورت افزایش قطر چاه می باشد و به عنوان گسیختگی چاه معرفی می شود. این نوع ناپایداری زمانی رخ می دهد که فشار گل حفاری کمتر از مقاومت فشاری سازند باشد، این گروه تحت عنوان گسیختگی برشی نیز شناخته می شوند. از جمله پیامدهای این گروه می توان به سیمان کاری ضعیف و پاسخ نامناسب به ابزارهای چاه پیمایی اشاره کرد. سیمان کاری ضعیف باعث بروز مشکلاتی همچون تولید ماسه، ورود آب به داخل چاه و همچنین گیر کردن مته حفاری درون چاه می شود. نوع دوم ناپایداری، تحت عنوان مچالگی چاه نامیده می شود، که در سازندهای شیلی، گچی و نمکی که پتانسیل خزشی بالایی دارند رخ می دهد. این نوع ناپایداری نیز باعث گیر افتادن لوله و مشکلاتی در نصب لوله جداری شود. نوع سوم از ناپایداری چاه، تحت عنوان شکست هیدرولیکی معرفی می شود، این نوع ناپایداری زمانی رخ می دهد که وزن گل حفاری فراتر از مقاومت کششی سازند باشد. پیامد این نوع ناپایداری هرزروی گل حفاری و حتی فوران چاه می باشد [4]. مسیر چاه و وزن گل عوامل مهمی در تجزیه و تحلیل پایداری چاه هستند، برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه، فشار داخلی چاه (فشار گل) باید تغییر داده شود تا تمرکز تنش تنظیم شود. علاوه بر این، جهت گیری چاه باید با توجه به تنش‌های برجا در نظر گرفته شود تا از شکست چاه جلوگیری گردد.

روش مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین بزرگی و جهت گیری تنش بر جای عهد حاضر، تعیین پنجره ایمن وزن گل و مسیر بهینه حفاری است. این روش امکان ادغام میدان تنش منطقه‌ای، فشار منفذی و خواص مکانیکی سنگ را در تحلیل‌های پایداری چاه فراهم می کند [5,6]. یک مدل ژئومکانیکی یک بعدی از پنج مولفه

۱۹۰ متر و از عمق ۳۶۳۵ تا ۳۸۲۵ متری می‌باشد. سنگ‌شناسی این سازند شامل آهک، مارن، شیل و ماسه‌سنگ می‌باشد که قابل تفکیک به سه بخش گدوان بالایی، عضو خلیج و گدوان پایینی می‌باشد (شکل ۲).

Age	Formation	Thickness (m)	Lithology
Miocene-Pliocene	Aghajari	900-1350	
Miocene	Gachsaran	320-650	
Oligocene-Miocene	Asmari	150-370	
Paleocene-Oligocene	Pabdeh-Jahrum	260-650	
	Gurpi	290-450	
Upper Cretaceous	Laffan-Illam	80-130	
	Sarvak	650-730	
Lower Cretaceous	Kazhdumi	170-230	
	Dariyan	160-210	
	Gadvan	110-270	
	Fahliyan	550 *	
	Garau	400 *	
Jurassic	Gotria	200 *	
	Najmeh-Sargelu	400 *	
Triassic	Neyriz		
	Dashlak		
Permian	Kangan-Nar-Dalan		
	Faraghan		

Conglomerate	Sandstone	Shale
Dolomite	Limestone	Anhydrite
Argillaceous sandstone	Argillaceous limestone	

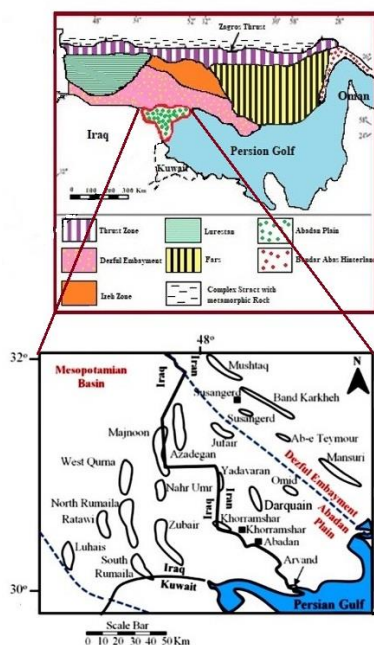
شکل ۲. چینه‌شناسی حوضه دشت آبادان به همراه ضخامت‌های گزارش شده سازندها [14]

خلیج فارس را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه از نمودارهای پتروفیزیکی، تصویری، نتایج MDT و گزارشات حفاری برای ساخت مدل ژئومکانیکی استفاده شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تنش افقی حداکثر و نسبت پواسون بیش‌ترین تأثیر را در تعیین پنجره‌ی ایمن وزن گل و مسیرهای بهینه حفاری دارند. در مقابل، تنش قائم و مدول یانگ کم‌ترین تأثیر را بر پنجره‌ی ایمن وزن گل و مسیرهای حفاری ایمن دارند.

در این مطالعه با استفاده از تحلیل داده‌ها و نمودارهای زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی سازند گدوان برای چاهی در میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ نسخه ۲۰ ساخته شد. پس از محاسبه پارامترهایی چون فشار منفذی، خواص الاستیک سنگ، خصوصیات مقاومتی و جهت و بزرگی تنش‌های برجای سازند گدوان، با استفاده از دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب پنجره ایمن وزن گل و مسیر بهینه حفاری برای چاه مورد نظر تهیه می‌شود. همچنین برای صحت‌سنجی و تأیید پنجره تعیین‌شده از تطابق وضعیت پیش‌بینی شده ناپایداری چاه با وضعیت واقعی آن بر مبنای نمودارهای تصویری و قطرسنجی استفاده شد.

۲. ناحیه مورد مطالعه

میدان نفتی مورد مطالعه که در دشت آبادان واقع شده، یکی از میدادین نفتی مهم جنوب غرب ایران است (شکل ۱). این میدان دارای روند شمالی-جنوبی بوده و چهار سازند سروک، کژدمی، گدوان و فهلیان به‌عنوان سنگ مخزن آن شناخته می‌شوند. به‌طور کلی گدوان با توالی شیل و سنگ‌آهک بسیار هوازده در روی سازند فهلیان و زیر سازند داریان مشخص می‌شود. هر دوی این تماس‌ها تدریجی و هم‌شیب هستند و مرز بالایی به‌عنوان بالاترین لایه شیلی در توالی سنگ‌آهک و شیل تعریف می‌شود [13]. لایه‌های ماسه‌سنگی گدوان که معادل و امتداد عضو دلتای زبیر در کشور عراق هستند، یکی از مخازن اصلی نفت در میدان مورد مطالعه می‌باشد. بیش از ۵۵ درصد از سازند گدوان را شیل تشکیل می‌دهد. ناپایداری چاه غالباً به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات در طول حفاری در سازند گدوان در چندین میدان در جنوب ایران گزارش شده است. در میدان مورد مطالعه سازند گدوان دارای ضخامت



شکل ۱. نقشه موقعیت میدادین هیدروکربوری ناحیه دشت آبادان

۳. روش مطالعه

در این مطالعه، یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی برای سازند گدوان ساخته شد. داده‌های موجود جهت تخمین بزرگی و جهت‌گیری تنش‌های اصلی برجا، فشار منفذی و خواص مکانیکی سنگ مورد استفاده قرار گرفتند. مدل ساخته‌شده با استفاده از تمام داده‌های در دسترس (به‌عنوان مثال، نمودار قطرسنجی، نگارهای تصویری، تست دینامیک سازند (MDT) تائید و کالیبره شد، به‌طوری‌که با دقت بالایی شکست برشی در اطراف چاه را پیش‌بینی می‌کند. سپس، جهت اجرای فرآیند تحلیل پایداری چاه، از معیارهای شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب جهت تطابق وضعیت ناپایداری پیش‌بینی شده با وضعیت واقعی چاه مطابق با نمودارهای تصویری و کالیپر (قطرسنجی) استفاده گردید.

۱.۳. داده‌ها

در دسترس بودن داده‌ها چالش اصلی در توصیف خواص ژئومکانیکی سازند گدوان است. ژئومکانیک به‌عنوان بخش مهمی از مشخصات مخزن در گذشته در سازند گدوان در نظر گرفته نشده است. بنابراین، حداقل داده‌ها یا مطالعات مربوط به خواص ژئومکانیکی در این سازند وجود دارد. مجموعه‌ای از نگارهای چاه‌پیمایی متداول (نظیر: نگار گاما، چگالی، نوترون، مقاومت ویژه و فتوالکتریک) به همراه نگارهای صوتی برشی دوقطبی DSI^2 ، تصویری FMI و داده‌های آزمایش فشارسنجی MDT از چاه مورد مطالعه در دسترس بودند. پس از جمع‌آوری داده‌ها، یک بررسی کیفیت QC^3 قبل از مرحله محاسبه بر روی این داده‌ها انجام شده است.

۴. خواص مکانیکی سازند

خواص مکانیکی سنگ عمدتاً شامل پارامترهای مقاومتی و الاستیک است که شامل مقاومت تراکمی تک‌محوره (UCS^4)، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (ν) می‌باشد. درک این پارامترها برای هر مطالعه ژئومکانیکی ضروری است. نمودار پیوسته خواص مکانیکی پیش‌بینی شده شاخص خوبی از تغییرات طبیعی در

مقاومت سازند و پایداری اطراف چاه در لایه‌های مختلف محدوده مورد مطالعه فراهم می‌نماید. خواص مکانیکی به دو دسته دینامیکی و استاتیکی تقسیم می‌شوند. خواص مکانیکی که از طریق نگارهای چاه‌پیمایی و روابط مربوطه تعیین می‌گردند، به‌عنوان خواص دینامیک سنگ شناخته می‌شوند و خواص مکانیکی که به کمک تست‌های آزمایشگاهی مانند تست تک‌محوره یا سه محوره به دست می‌آیند، خواص استاتیکی سنگ هستند [15].

منبع اصلی برای ارزیابی مقاومت سنگ‌ها، تست‌های مکانیک‌سنگ آزمایشگاهی، نمودارهای پتروفیزیکی و آنالیز خرده‌های حفاری است. به‌طور معمول، تست‌های آزمایشگاهی مکانیک‌سنگ (داده‌های استاتیک) منبع خوب و قابل اعتمادی برای ارزیابی مقاومت سنگ می‌باشند، با این وجود دارای کاستی‌هایی نظیر: تعداد محدود مغزه‌های در دسترس، زمان‌بر، پرهزینه، ناپیوسته بودن و فاکتور بازبایی پایین هستند. با این حال، نمودارهای پتروفیزیکی در تمام چاه‌ها در دسترس هستند، که به‌صورت پیوسته و برای ضعیف‌ترین فواصل هم ارائه شده‌اند [16].

۱.۴. تخمین پارامترهای الاستیک

محاسبه خواص الاستیک دینامیک سنگ عمدتاً به داده‌های چاه‌نگاری بستگی دارد. معادلات زیر برای محاسبه خواص الاستیک سنگ‌ها از نمودارهای صوتی (برشی و تراکمی) و چگالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۳):

$$\nu = \frac{0.5 \times (DTs/DTco)^2 - 1}{(DTs/DTco)^2 - 1} \quad (1)$$

$$E(psi) = \frac{\rho_b}{DTs^2} \times \left(\frac{3DTs^2 - 4DTco^2}{DTs^2 - DTco^2} \right) \times 1.34 \times 10^{10} \quad (2)$$

$$G(psi) = \frac{\rho_b}{DTs^2} \times 1.34 \times 10^{10} \quad (3)$$

که در این روابط، ν بیانگر نسبت پواسون، E مدول یانگ، G مدول برشی، ρ_b چگالی برحسب (g/cc) ، DTs کندی موج صوتی برشی برحسب $\mu s/ft$ و $DTco$ کندی موج صوتی تراکمی برحسب $\mu s/ft$ است.

مقادیر خواص الاستیک دینامیک معمولاً بالاتر از مدول الاستیک استاتیکی به‌دست‌آمده از تست‌های آزمایشگاهی است. تخمین بالاتر پارامترها در حالت دینامیک به ماهیت

Quality control ^۲

Uniaxial compressive strength ^۴

modular dynamics tester ^۱

Dipole shear sonic imager ^۲

جدول ۱. روابط مورد استفاده برای تبدیل مدول یانگ دینامیک به استاتیک

رابطه	نویسنده
$\ln E_{stat} = 14.9 - 0.61 \ln(\Delta T_p) - 2.18 \ln(\Delta T_s) + 1.42 \ln \rho_b$	(Elkatany et al., 2018)
$E_{stat} = 0.014 E_{dyn}^{1.96}$	(Najibi et al., 2015)
$E_{stat} = 0.541 E_{dyn} + 12.852$	(Ameen et al., 2009)
$E_{stat} = \frac{\ln(E_{dyn} + 1)(E_{dyn} - 1)}{4.5}$	(Wang, 2000)
$\log_{10} E_{stat} = 0.77 \log_{10}(\rho_{bulk} E_{dyn}) + 0.02$	(Eissa & Kazi, 1988)
$E_{stat} = 0.0293 E_{dyn}^2 + 0.4533 E_{dyn}$	(Lacy, 1996)
$E_{stat} = 0.0428 E_{dyn}^2 + 0.2334 E_{dyn}$	(Lacy, 1996)

۲.۴. مقاومت تراکمی تک محوره

مقاومت تراکمی تک محوره یک پارامتر کلیدی در مقاومت سنگ و محدود کردن بزرگی حداکثر تنش افقی است. روش‌های متعددی برای تخمین UCS مورد استفاده قرار می‌گیرد از جمله روش‌های مستقیم و غیرمستقیم. بهترین روش برای تخمین مقادیر UCS از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مغزه و تحت شرایط بارگذاری تک محوری حاصل می‌شود. با این حال، به دلیل عدم وجود نمونه‌های مغزه برای تست‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی زیادی بین مقاومت سنگ و داده‌های چاه‌نگاری ایجاد شده است [19].

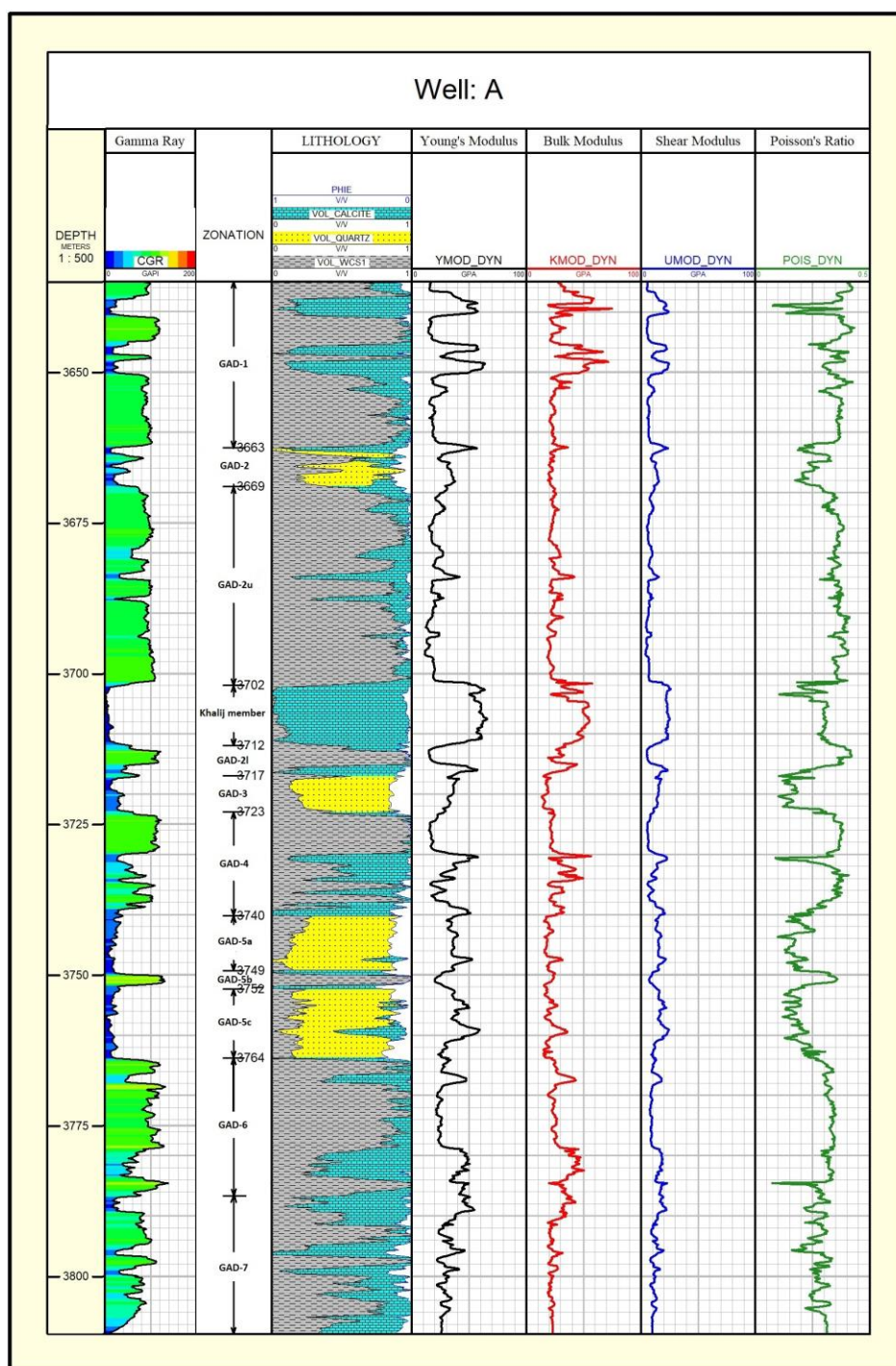
در این مطالعه، از آنجایی که هیچ نمونه مغزه‌ای در دسترس نیست، مقادیر UCS از روابط تجربی متناسب با سنگ‌شناسی سازند گدوان استفاده می‌شود. در ادامه همانند محاسبه خواص الاستیک از روش میانگین‌گیری برای محاسبه مقاومت تراکمی تک محوره نهایی استفاده شد. در ادامه فهرست روابط مربوط به سازندهای ماسه‌سنگی، شیلی و کربناته در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

خصوصیات مرتبط با نحوه عبور موج صوتی تراکمی از سازند باز می‌گردد که در آن، با در نظر گرفتن قدرت تفکیک موج گذرنده، بسیاری از درزه‌ها و خلل و فرج ریزمقیاس سنگ که معرف اصلی خواص الاستیک سنگ هستند، تأثیر کمی بر رفتار موج دارند. در این حالت، خواص الاستیک همان سنگ در حین یک آزمایش تک محوره مقادیر کمتری را به دست می‌دهد زیرا درزه‌های ریزمقیاس در ساختار بلوری سنگ در حین اعمال فشار بسته شده و در نهایت، سنگی با خواص الاستیک ضعیف‌تری را توصیف می‌کند. از این رو تمام مدول‌های دینامیکی باید به معادل‌های استاتیکی خود تبدیل شوند تا در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گیرند [17,18]. قابل اعتمادترین روش برای اندازه‌گیری خواص الاستیک سنگ‌ها، استفاده از تست‌های مکانیک سنگ می‌باشد. اما این روش با مشکلاتی همچون محدود بودن نمونه‌های مغزه به اعماق خاصی از چاه روبه‌رو است، که سبب می‌شود نمودارهای پیوسته‌ای از مقادیر واقعی برای رخساره‌های تشکیل‌دهنده سازندهای زمین‌شناسی حاصل نشود. از این رو، روش بهینه برای تخمین دقیق خواص الاستیک در حالت استاتیک، ایجاد همبستگی بین مدول‌های الاستیک دینامیکی با اندازه‌گیری‌های حاصل از تست‌های مکانیک سنگ می‌باشد. هرچه اندازه‌گیری‌های بیشتری در دسترس باشد، این فرآیند تبدیل قابل اعتمادتر است و کیفیت داده‌های ورودی برای مدل عددی بالاتر خواهد بود.

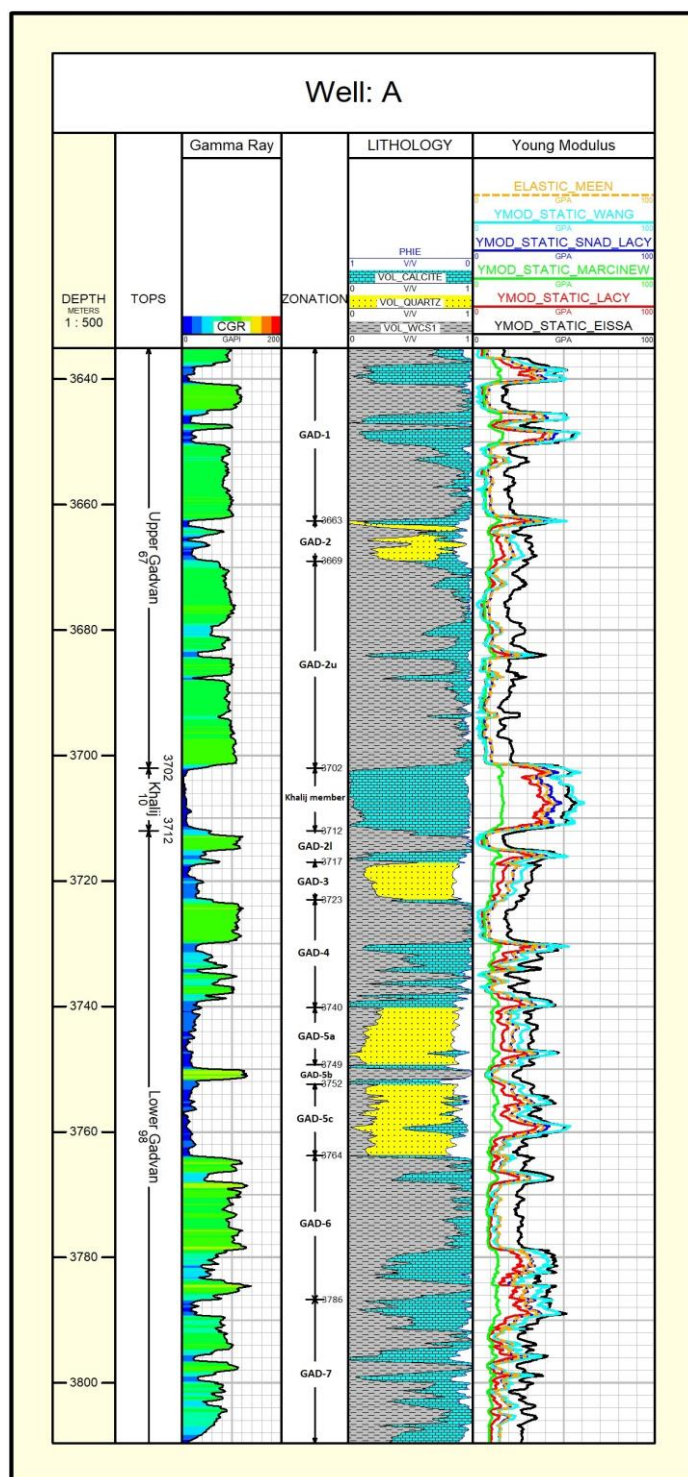
در این مطالعه، به دلیل نبود مغزه و نتایج حاصل از آزمایشات مکانیک سنگ برای سازند گدوان، از روابط تجربی متناسب با سنگ‌شناسی این سازند برای تبدیل خواص الاستیک دینامیک به استاتیک بهره گرفته شده است. با محاسبه مدول یانگ در حالت استاتیک با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۱، در نهایت رابطه‌ای که مدول یانگ حاصل از آن به میانگین حسابی مدول‌های یانگ محاسبه شده از این روابط نزدیک‌تر بود، به عنوان رابطه مناسب برای محاسبه مدول یانگ استاتیک در نظر گرفته می‌شود. با مقایسه نمودار میانگین حسابی حاصل با نمودارهای بدست آمده از روابط جدول ۱، رابطه Sand-Lacy به عنوان مناسب‌ترین رابطه برای تبدیل خواص الاستیک دینامیک به استاتیک بخش مخزنی و رابطه Shale-Lacy برای نواحی شیلی سازند گدوان در نظر گرفته شد (شکل ۴).

جدول ۲. روابط مورد استفاده برای محاسبه مقاومت تراکمی تک محوره برای رخساره‌های مختلف

رابطه	سنگ‌شناسی	منطقه مورد مطالعه	نویسنده
$UCS = 0.035V_p \times 31.5$	Sand	Thuringia, Germany	(Freyburg, 1972)
$UCS = 1200 \times \exp(-0.036\Delta Tp)$	Sand	-	(McNally, 1987)
$UCS = 1.413 \times 10^7 DT^{-3}$	Sand	Gulf Coast	(Fjaer et al., 1992)
$UCS = 1.745 \times 10^{-9} \rho_{bulk} \times V_p^2 - 21$	Sand	Cook Inlet, Alaska	(moos & Zoback, 2001)
$UCS = (1.4138 \times 10^7 \times DT^{-3}) \times 145$	sand	Gulf Coast	(Chang et al., 2006)
$UCS = (1/(2.48 \times 10^{-6} \times (DT - 23.87)^{2.35}))$	Sand	North Sea	(Nygaard & Hareland, 2007)
$UCS = (1.001 \times PHIE^{-1.143}) \times 145$	Shale	-	(Lashkaripour & Dusseault, 1993)
$UCS = 1450 \times (304.8/DT - 1)$	Shale	North Sea	(Lal, 1999)
$UCS = 0.77 \times (304.8/DT)^{2.93}$	Shale	North Sea	(Horsrud, 2001)
$UCS = 195.75 \times (304.8/DT)^{2.6}$	Shale	Global	(Chang et al., 2006)
$UCS = (1/(1.83 \times 10^{-5} \times (DT - 23.87)^{1.8}))$	Shale	North Sea	(Nygaard & Hareland, 2007)
$UCS = 133.3 \times V_p - 227.19$		India	(Khandelwal & Singh, 2009)
$UCS = (10^{(2.44+109.14/DT)})/145$	Limestone	-	(Golubev & Rabinovich, 1976)
$UCS = (V_p - 2.0195)/0.032$	Limestone	-	(Yasar & Erdogan, 2004)
$UCS = 20851 \exp(-6.95 \times PHIE)$	Limestone	Middle East	(Chang et al., 2006)
$UCS = 2.65 \times (E_{stat}^{0.8}/PHIE^{0.2})$	Limestone	Global	(Asef & Farrokhrouz, 2010)



شکل ۳. نمودار خواص الاستیک دینامیک سازند گدوان. ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست: نمودار گاما، زون‌بندی، سنگ‌شناسی، مدول یانگ، مدول حجمی، مدول برشی، نسبت پواسون



شکل ۴. نمودار مدول یانگ استاتیک سازند گدوان با روابط مختلف به همراه نمودار مدول یانگ میانگین (ELASTIC-MEEN). ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست: نمودار گاما، زون‌بندی، سنگ‌شناسی، مدول یانگ، مدول حجمی، مدول برشی، نسبت پوآسون

۳.۴. زاویه اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) معیاری از توانایی یک واحد سنگی برای مقاومت در برابر تنش برشی است و پارامتر مهمی در پیش‌بینی شکست سنگ است. به‌منظور محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ، روش‌هایی مانند تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی مغزه و جداول سنگ خاص را می‌توان استفاده کرد [20]. علاوه بر این، چندین معادله تجربی به دلیل عدم وجود نمونه مغزه توسعه داده شده است. در این مطالعه معادله ارائه شده توسط پلاب به‌عنوان تابعی از تخلخل و حجم شیل جهت محاسبه زاویه اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\phi = 26.5 - 37.4 \times (1 - PHIE - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - PHIE - V_{shale})^2 \quad (۴)$$

که در آن، ϕ زاویه اصطکاک داخلی برحسب درجه، $PHIE$ تخلخل و V_{shale} بیانگر حجم شیل است.

۴.۴. مقاومت کششی

مقاومت کششی سنگ یکی از پارامترهای کلیدی در محاسبه و محدود کردن حداقل و حداکثر تنش‌های افقی است. برای سازندهای سست، به‌دلیل تغییرات ایجاد شده توسط نفوذ مته حفاری در شرایط سنگ بکر، مقاومت کششی معمولاً صفر فرض می‌شود. این فرض در مورد سازندهای بسیار فشرده و مقاوم تحت تنش‌های درجای بالا قابل استناد نخواهد بود. بهترین راه برای بدست آوردن داده‌های مقاومت کششی، انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مغزه است. با این حال، در غیاب نمونه‌های مغزه (مانند مطالعه حاضر)، مقاومت کششی معمولاً ۱۰ تا ۱۲ درصد از UCS برای همه رخساره‌ها تخمین زده می‌شود.

$$Tensile\ strength = \frac{UCS\ (psi)}{10} \quad (۵)$$

۵. فشار منفذی

فشار منفذی عبارت است از فشار سیال محبوس در فضای متخلخل سنگ‌های تشکیل‌دهنده لایه‌ها و سازندهای زمین‌شناسی. فشار منفذی یکی از عوامل اصلی در تجزیه و تحلیل ژئومکانیکی و تولید نفت است و تأثیر قابل‌توجهی بر تجزیه و تحلیل پایداری چاه و تغییر شکل اطراف چاه دارد

[21]. هر دو روش مستقیم و غیرمستقیم در صنعت نفت برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده می‌شوند. روش‌های غیرمستقیم به‌طور معمول برای تخمین فشار منفذی به‌عنوان تابعی از نمودارهای صوتی و مقاومت ویژه (ایتون، ۱۹۶۹) استفاده می‌شوند، درحالی‌که روش‌های اندازه‌گیری مستقیم نظیر آزمون دینامیک سازند (MDT) و آزمون مکرر سازند (RFT) هستند.

روش ژانگ از پرکاربردترین روش‌ها در محاسبه‌ی فشار منفذی می‌باشد. برای تخمین فشار منفذی با این روش به پارامترهایی نظیر تنش قائم، فشار هیدرواستاتیک و نمودار صوتی نیاز داریم. از مزایای استفاده از روش ژانگ می‌توان به فراهم نمودن امکان تعمیم خط روند طبیعی نمودار صوتی تا اعماق زیاد اشاره کرد. مزیت دیگر این روش این است که امکان محاسبه فشار منفذی برحسب عمق را فراهم می‌نماید، درحالی‌که سرعت صوت در گل حفاری را نیز در نظر می‌گیرد. جهت محاسبه فشار منفذی به روش ژانگ می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود [22]:

$$P_p = S_v - (S_v - P_{pn}) \left(\frac{\Delta t_m + (\Delta t_{ml} - \Delta t_m) e^{-cZ}}{\Delta t} \right)^3 \quad (۶)$$

که در آن P_p فشار منفذی برحسب Psi ، S_v تنش قائم، P_{pn} فشار هیدرواستاتیک، Δt_m کندی موج صوتی در گل حفاری برحسب $\mu s/ft$ ، Δt_{ml} کندی موج صوتی در ماتریکس ناحیه شیلی برحسب $\mu s/ft$ ، Z بیانگر عمق برحسب ft و C یک ثابت تجربی می‌باشند.

پس از محاسبه فشار منفذی با استفاده از این رابطه، مقادیر فشار محاسبه شده با استفاده از نتایج مربوط به فشارسنجی درون‌چاهی (MDT) کالیبره شده‌اند تا نمودار فشار منفذی محاسبه شده کاملاً بر روی نقاط مربوط به فشار حاصل از تست MDT منطبق شود (شکل ۶). پس از کالیبره نمودن نتایج مقدار C برابر با 0.0001 و همچنین مقدار 0.4 به‌جای توان ۳ در رابطه ژانگ در نظر گرفته شد. خروجی حاصل از این روش در شکل ۶ ارائه شده است.

۶. تنش‌های اصلی

در زیر سطح زمین، تنش‌های اصلی به ترتیب عبارتند از S_v ، S_{Hmax} و S_{Hmin} که به‌عنوان تنش عمودی، تنش افقی

عنوان رایج‌ترین روابط جهت محاسبه‌ی مقادیر تنش‌های افقی حداکثر و حداقل شناخته می‌شوند. تنش افقی حداقل از طریق رابطه‌ی پورو الاستیک به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$S_h = \frac{\nu}{1-\nu} (S_v) + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_h + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \varepsilon_H \quad (8)$$

که در آن E مدول یانگ، ν ضریب پواسون، ε_H و ε_h پارامترهای کرنش الاستیک به ترتیب در راستای تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، P_p فشار منفذی، α ضریب بایوت می‌باشند.

۳.۶. تخمین بزرگی تنش افقی حداکثر

تنش افقی حداکثر چالش برانگیزترین پارامتری است که در بحث مدل‌سازی ژئومکانیکی باید تخمین زده شود. هیچ روش مستقیمی برای اندازه‌گیری مقدار تنش افقی حداکثر وجود ندارد، با این حال، روش‌هایی برای پیش‌بینی SH_{max} براساس این واقعیت که فشار منفذی نباید از حداقل تنش اصلی برای جلوگیری از شکست کششی فراتر رود و تفاوت تنش حداکثر و حداقل نمی‌تواند از مقاومت پوسته فراتر رود، توسعه یافته است. روابط پورو الاستیک به عنوان بهترین روابط جهت محاسبه‌ی بزرگی تنش افقی حداکثر شناخته می‌شود. تنش افقی حداکثر با استفاده از رابطه‌ی پورو الاستیک به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$S_H = \frac{\nu}{1-\nu} (S_v) + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_H + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \varepsilon_h \quad (9)$$

۴.۶. جهت‌گیری تنش‌های افقی

جهت‌گیری تنش‌های افقی اصلی عوامل مهمی هستند که بر پایداری چاه تأثیر می‌گذارند. موقعیت ریزش در دیواره چاه جهت آزمون تنش‌های اصلی را نشان می‌دهد و زمانی اتفاق می‌افتد که تنش محیطی بیش‌ترین تمرکز را در جهت تنش افقی حداقل داشته باشد و تمرکز تنش از مقاومت سنگ تجاوز کند. تنش محیطی کمترین فشار را در جهت تنش افقی حداکثر دارد که باعث شکستگی‌های ناشی از حفاری می‌شود [25]. چندین روش برای شناسایی جهت‌گیری تنش از روی نمودارهای چاه‌پیمایی در دسترس می‌باشد از جمله جهت‌گیری ریزش‌های چاه، جهت‌گیری شکست طبیعی و

حداکثر و تنش افقی حداقل در نظر گرفته می‌شوند. تنش قائم توسط وزن رسوبات فوقانی تحت تأثیر قرار می‌گیرد، درحالی‌که تنش افقی توسط فرآیندهای زمین‌ساختی و زمین‌شناسی ایجاد می‌شود [20]. به دلیل تأثیر فشار روباره که سنگ را به صورت عمودی متراکم می‌کند، سنگ تمایل به حرکت افقی دارد. این حرکت بر روی تنش‌های افقی تأثیر می‌گذارد. در سازندهای همسانگرد بدون هیچ‌گونه فعالیت زمین‌ساختی، حداقل و حداکثر تنش افقی از نظر بزرگی یکسان هستند. با این حال، هنگامی که یک گسل بزرگ و فعالیت‌های تکتونیکی وجود دارد، تنش‌های افقی مقادیر مختلفی دارند و باید محاسبه شوند [23].

۱.۶. تنش قائم

تنش قائم یا روباره، اساسی‌ترین پارامتر ورودی در تحلیل مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی است. در نواحی با فعالیت تکتونیکی پایین، تنش قائم نشان‌دهنده وزن سازندهای پوشاننده است. این تنش به طور معمول ساده‌ترین نوع تنش، نسبت به تنش‌های افقی اصلی، به لحاظ نحوه محاسبه می‌باشد. در هر نقطه عمقی در زیر سطح، تنش قائم برابر جمع وزن لایه‌های بالاتر از آن نقطه خواهد بود. بزرگی این تنش را می‌توان از طریق معادله زیر محاسبه کرد [20]:

$$S_v = \int_0^z \rho(z)g dz \quad (7)$$

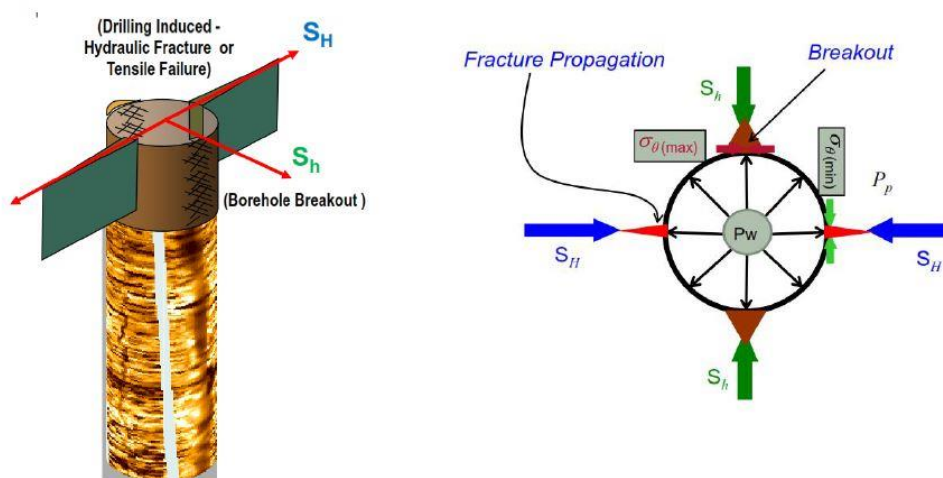
که در آن S_v تنش قائم، z عمق عمودی، g ثابت شتاب ناشی از گرانش، و ρ چگالی سنگ در یک عمق خاص است.

۲.۶. تخمین بزرگی تنش افقی حداقل

آگاهی کامل از جهت‌گیری و بزرگی تنش‌های افقی برای یافتن راه حلی برای بسیاری از مسائل ژئومکانیک ضروری است. بزرگی تنش افقی حداقل برای تعیین رژیم تنش مهم است. برای به دست آوردن حداقل تنش افقی می‌توان از روش‌های مستقیم مانند تست نشت (LOT^s)، تست نشت گسترده ($XLOT^s$)، تست $mini-frac$ و یا حوادثی مانند هرزروی گل حفاری استفاده کرد [24]. با این حال، این آزمون‌ها زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند. روابط پورو الاستیک به

شناسایی شده، جهت تنش افقی حداقل در سازند گدوان برابر با $N32W$ درجه می‌باشد. همچنین جهت تنش افقی حداکثر عمود بر روند ذکر شده برای تنش افقی حداقل و برابر با $N58E$ تعیین شد. در شکل ۷ نمودار گل‌سرخ‌ی فراوانی ریزش‌های برشی شناسایی شده با استفاده از نمودار تصویری ارائه شده است.

هیدرولیکی، ناهمسانگردی موج صوتی برشی. جهت‌گیری ریزش‌ها و شکستگی‌های هیدرولیکی نشانه خوبی از جهت حداقل و حداکثر تنش‌های افقی در یک چاه عمودی است. برای یک چاه عمودی در ناحیه‌ای که S_v تنش اصلی است، ریزش‌های برشی دیواره چاه در جهت Sh_{min} و شکستگی‌ها در جهت SH_{max} رخ می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از تفسیر تعداد ۱۲ نقطه ریزشی متقارن



شکل ۵. ریزش‌ها در جهت Sh_{min} ، گسترش شکستگی‌ها موازی با جهت SH_{max} [26]

۷. رژیم تنش

آندرسون در دهه ۱۹۳۰ کشف کرد که میدان تنش نتیجه فرآیندهای زمین‌شناسی است که می‌توان آن را به سه رژیم تنش اصلی طبقه‌بندی کرد. این رژیم‌های تنش براساس این واقعیت استوار است که سه تنش اصلی از نظر بزرگی با توجه به فرآیند زمین‌شناسی غالب متفاوت هستند. تنش‌های مؤثر اصلی وارد بر سنگ در عمق، به یک تنش قائم (S_v) و دو تنش افقی حداکثر (SH_{max}) و حداقل (Sh_{min}) تقسیم می‌شوند. تغییرات این سه تنش منجر به رژیم‌های مختلف تنش می‌شود. بر اساس اینکه کدام‌یک از این سه تنش اصلی بزرگ‌ترین مقدار را دارا می‌باشد، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان یک رژیم تنش نرمال، رژیم تنش امتدادلغز یا یک رژیم تنش معکوس توصیف کرد [20,27].

• رژیم تنش نرمال:

$$S_v > SH_{max} > Sh_{min}$$

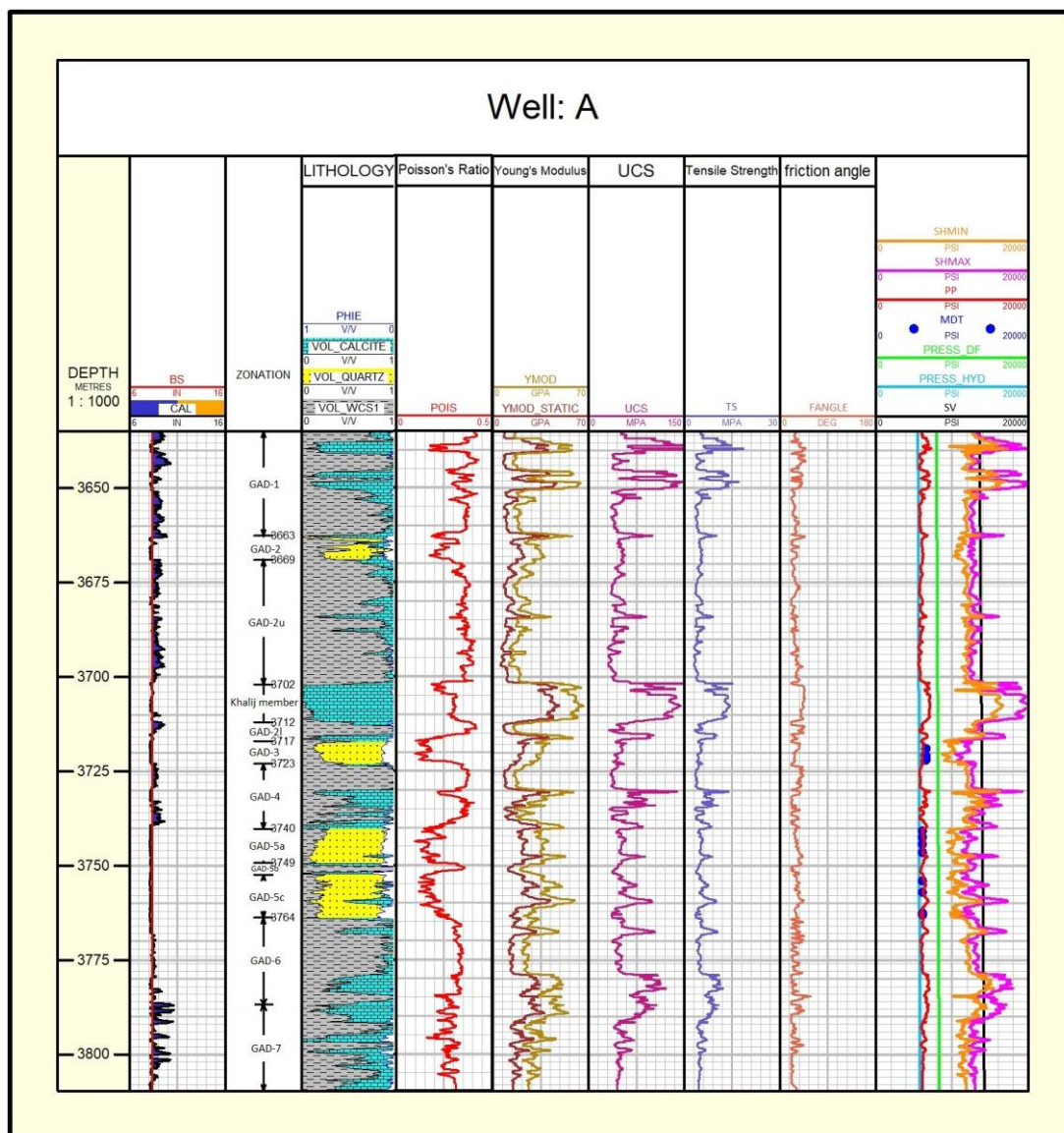
• رژیم تنش امتدادلغز:

$$SH_{max} > S_v > Sh_{min}$$

• رژیم تنش معکوس

$$SH_{max} > Sh_{min} > S_v$$

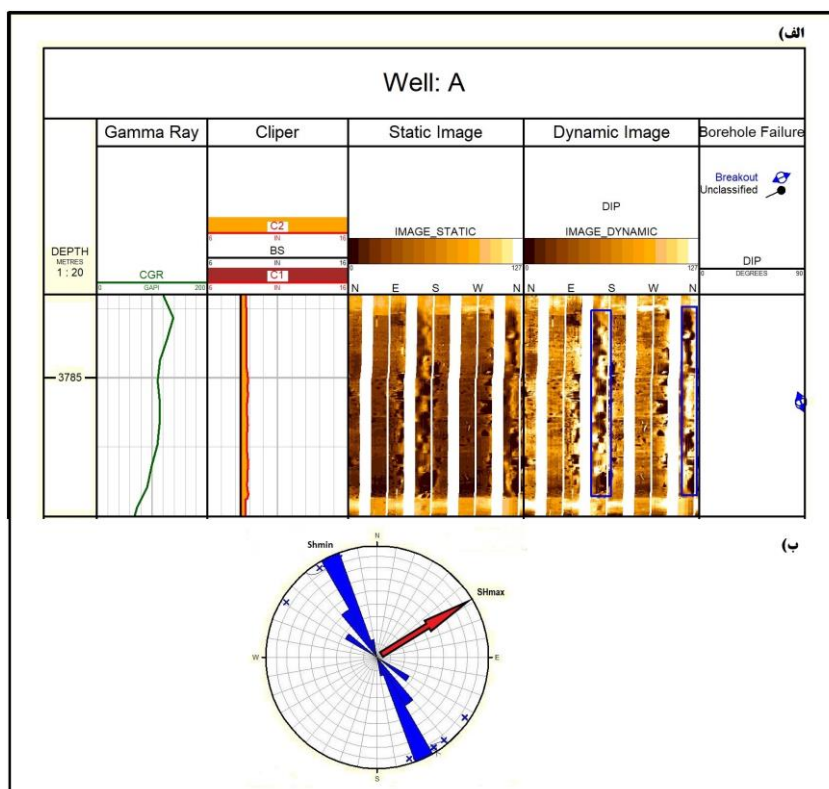
بر اساس رژیم تنش آندرسون و پروفیل تنش‌های نمایش داده‌شده در شکل ۶، بخش عمده سازند گدوان دارای رژیم تنش نرمال ($S_v > SH_{max} > Sh_{min}$) و در مواردی به‌صورت امتدادلغز می‌باشد.



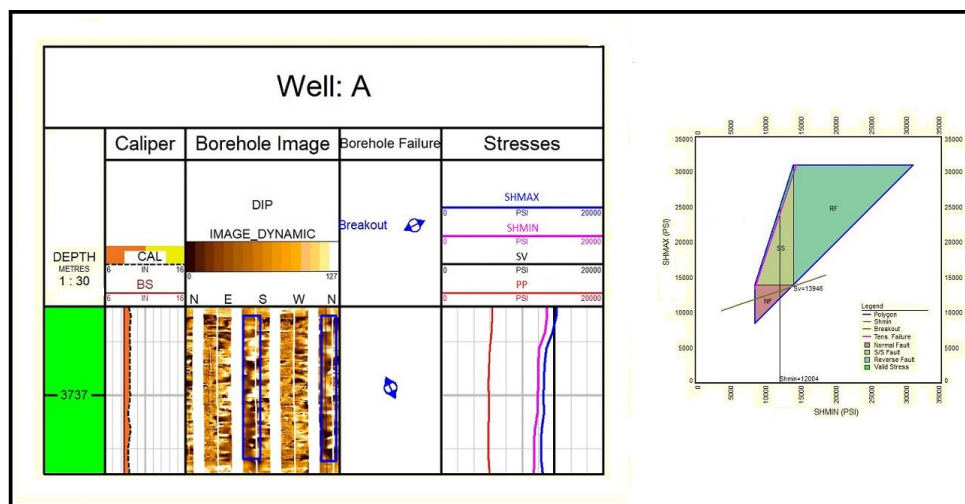
شکل ۶. مدل ژئومکانیکی یک بعدی سازند گدوان. نمودارها از چپ به راست عبارتند از عمق، قطرسنجی، لیتولوژی، نسبت پواسون، مدول یانگ، UCS، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک داخلی و تنش/فشار.

جهت اطمینان از رژیم تنش تعیین شده برای سازند گدوان از روش ترسیم چندضلعی تنش استفاده شد. بدین منظور، برای محدوده عمقی ۳۷۳۷ متری که ریزش برشی متقارن در آن شناسایی شده بود (شکل ۸) و محدوده عمقی ۳۷۵۹ متری که فاقد هرگونه ریزش برشی و یا شکستگی بود (شکل ۹) به عنوان فواصل کاندید در نظر گرفته شد و در ادامه چندضلعی تنش برای این فواصل ترسیم شد.

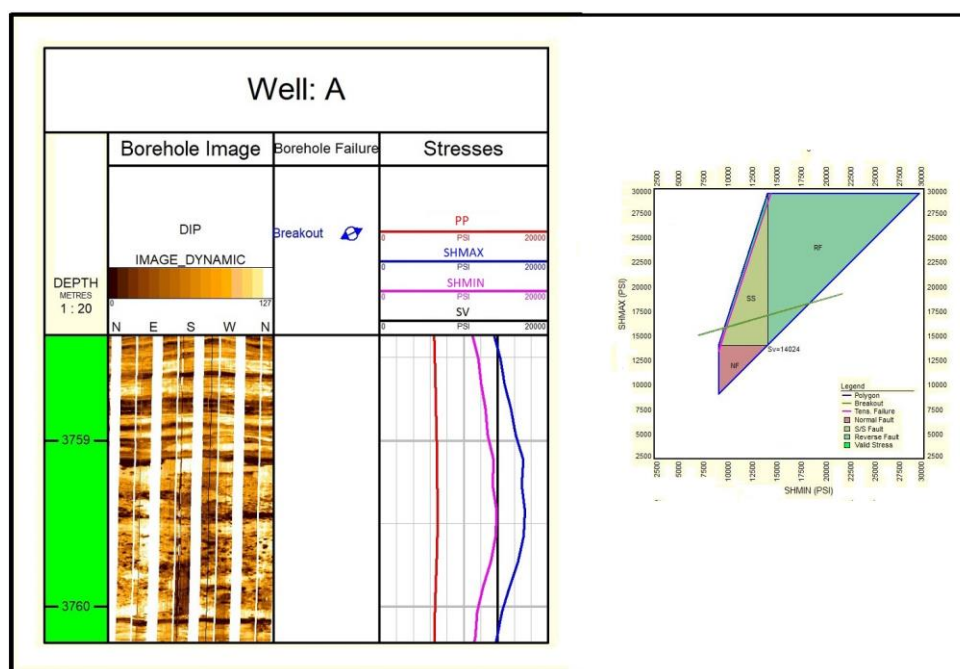
مطابق شکل ۶ از مقایسه خصوصیات مکانیکی بدست آمده با سنگ‌شناسی سازند می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مکانیک سنگی با تغییرات سنگ‌شناسی دچار تغییر می‌شوند، نواحی با سنگ‌شناسی غالب شیلی از ضعیف‌ترین کیفیت ژئومکانیکی برخوردارند و مستعد ریزش در هنگام حفاری هستند، در مقابل اما نواحی با سنگ‌شناسی غالب آهکی بیانگر نواحی با کیفیت ژئومکانیکی بالاتر و پایدارتر می‌باشند. به



شکل ۷ الف) یک جفت ریزش شناسایی شده در سازند گدوان که با کادرهای آبی در تصویر دینامیک *FMI* مشخص شده است، ب) جهت Sh_{min} و Sh_{max} حاصل از تفسیر ریزش‌های شناسایی شده در سازند گدوان



شکل ۸. رژیم تنش حاصل از چندضلعی تنش برای عمق ۳۷۳۷ متری، خط سبز بیانگر ریزش برشی متقارن و خط صورتی بیانگر شکست کششی. حالت مجاز تنش بر اساس چندضلعی تنش، رژیم نرمال است، با استفاده از روابط پوروالاستیک نیز در این عمق رژیم تنش نرمال بدست آمده است.



شکل ۹. رژیم تنش حاصل از چندضلعی تنش برای عمق ۳۷۵۹ متری. حالت‌های مجاز تنش بر اساس چندضلعی تنش، رژیم امتدادلغز و معکوس می‌باشد، با استفاده از روابط پوروالاستیک نیز در این عمق حالت تنش امتدادلغز بدست آمده است.

۸. بحث و نتیجه‌گیری

ناپایداری چاه می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های مختلفی باشد، لیتولوژی‌های مختلف به شیوه‌های مختلف دچار گسیختگی می‌شوند، ماسه‌سنگ‌ها ممکن است در اثر تنش برشی گسیخته شوند، در حالی که سنگ‌های رسی در اثر تغییر شکل پلاستیک گسیخته می‌شوند. برای پیش‌بینی پایداری چاه، باید یک معیار شکست مناسب مورد استفاده قرار گیرد که نشان‌دهنده تنش بر جای اصلی و شرایط فشار منفذی باشد. بنابراین، طراحی پنجره گل مناسب با استفاده از معیارهای شکست سنگ نقش مهمی در پایداری چاه ایفا می‌کند. در هر تحلیلی، انتخاب معیارهای شکست مناسب امری ضروری است، این انتخاب بر مبنای نوع سنگ (شکل‌پذیر یا شکننده) می‌باشد. با استفاده از معیارهای شکست فشار بهینه گل حفاری برای جلوگیری از ایجاد شکستگی و یا ریزش دیواره چاه محاسبه می‌شود. معیار شکست‌های مختلفی وجود دارد، که در ادامه، دو معیار شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب مورد استفاده در این مطالعه برای تجزیه و تحلیل پایداری چاه به‌طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱.۸. معیار شکست موهر-کولمب

این روش به دلیل سادگی آن، رایج‌ترین معیار شکست مورد استفاده در صنعت نفت و گاز برای پیش‌بینی ناپایداری چاه است. در این معیار شکست، شکست برشی در یک صفحه به دلیل اثر تنش برشی در آن صفحه رخ می‌دهد. علاوه بر این، معیار شکست موهر-کولمب به‌عنوان یک روش خطی دوبعدی در نظر گرفته می‌شود، زیرا فرض می‌کند که تنش اصلی میانی هیچ تأثیری بر مقاومت سنگ ندارد. بر اساس معیار موهر-کولمب، پارامترهایی نظیر تنش قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت برشی سنگ تأثیرگذار هستند.

بر این اساس، گسیختگی در یک صفحه زمانی رخ می‌دهد که رابطه میان تنش برشی و قائم به‌صورت معادله زیر باشد [27]:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (10)$$

که در آن τ تنش برشی، c چسبندگی، σ_n تنش نرمال، φ زاویه اصطکاک داخلی است.

معیار شکست موهر-کولمب را می‌توان با حداکثر و حداقل تنش‌های اصلی به شرح زیر بیان کرد:

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (11)$$

$$P_{wf} = \frac{((C_0 - (q-1)P_p) - (\sigma_v - 2v(\sigma_3 - \sigma_1)))}{(q + 3\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (19)$$

۲.۸. معیار شکست موگی-کولمب

موگی (۱۹۷۱) مطالعات آزمایشگاهی متعددی بر روی انواع مختلف سنگ‌ها با استفاده از تست‌های تراکمی سه محوری انجام داد. او دریافت که مقاومت سنگ به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مقدار تنش اصلی میانی است و شکست در امتداد جهت σ_2 رخ می‌دهد. موگی بر اساس مشاهدات خود به معیار جدیدی دست یافت که تأثیر تنش اصلی میانی را در نظر می‌گیرد. پس از این مطالعه، اهمیت σ_2 مشخص شد و در ادامه بسیاری از معیارهای شکست سه‌بعدی نیز توسعه داده شدند. بر این اساس معیار موگی به‌صورت زیر بیان می‌شود: [27]

$$\tau_{oct} = \alpha + b\sigma_{m,2} \quad (20)$$

که در آن τ_{oct} تنش برشی اکتاهدرال، α و b پارامترهای مقاومت کولمب و $\sigma_{m,2}$ تنش اصلی میانی هستند. تنش برشی اکتاهدرال و پارامترهای مقاومت کولمب به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (21)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \quad (22)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \cos\varphi \quad (23)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \sin\varphi \quad (24)$$

فشار بهینه گل حفاری (P_{wb}) برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه قائم بر مبنای معیار شکست موگی-کولمب برای شرایط $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$ به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$P_{wb} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(A - 2P_0)]^2 - 3(A - 2B)^2} \quad (25)$$

• برای شرایط $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$

$$P_{wb} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A + 3b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right] \quad (26)$$

• برای شرایط $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$

$$P_{wb} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right] \quad (27)$$

همچنین فشار بهینه گل حفاری (P_{wf}) برای جلوگیری از ایجاد شکستگی نیز با استفاده از روابط زیر برای حالت‌های مختلف قابل محاسبه می‌باشد:

که در آن σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل هستند، C_0 مقاومت تراکمی تک‌محوره است، که تابعی از چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی (φ) است و q ضریب جریان است، که با زاویه اصطکاک داخلی مرتبط است و می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود:

$$q = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (12)$$

$$C_0 = 2C \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (13)$$

به‌طور کلی تنش‌های موجود در دیواره چاه عبارتند از: تنش‌های مماسی (σ_θ)، تنش شعاعی (σ_r)، و تنش محوری (σ_z) که این تنش‌ها با تغییر فشار گل (P_m) کنترل می‌شوند. اما این تغییر بر روی تنش محوری تأثیرگذار نمی‌باشد. به همین علت هرگونه تغییر در فشار گل فقط روی تنش مماسی و شعاعی مؤثر خواهد بود.

فشار بهینه گل حفاری (P_{wb}) برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه با در نظر گرفتن پارامترهای مذکور به همراه فشار منفذی (P_p) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

• برای شرایط $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$

$$P_{wb} = \frac{3\sigma_1 - \sigma_3 - C_0 + (q-1)P_p}{(1+q)} \quad (14)$$

• برای شرایط $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$

$$P_{wb} = \frac{\sigma_v + 2v(\sigma_3 - \sigma_1) - C_0 + (q-1)P_p}{q} \quad (15)$$

• برای شرایط $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$

$$P_{wb} = (3\sigma_1 - \sigma_3) - C_0 + (q-1)P_p - (q(\sigma_v + 2v(\sigma_3 - \sigma_1))) \quad (16)$$

که در آن، σ_1 تنش افقی حداکثر، σ_3 تنش افقی حداقل و v نسبت پواسون می‌باشد.

برای محاسبه فشار بهینه گل حفاری جهت جلوگیری از ایجاد شکستگی (P_{wf}) از روابط زیر استفاده می‌شود [27]:

• برای شرایط $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$

$$P_{wf} = C_0 - (q-1)P_p + q(\sigma_v - 2v(\sigma_3 - \sigma_1)) \quad (17)$$

• برای شرایط $\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$

$$P_{wf} = \frac{((C_0 - (q-1)P_p) + q(3\sigma_1 - \sigma_3))}{(1+q)} \quad (18)$$

• برای شرایط $\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$

- تعیین مسیر بهینه حفاری، شامل جهت و انحراف از قائم به منظور دستیابی به کمترین مشکلات حفاری به‌ویژه وضعیت ناپایداری دیواره چاه
- در صورت طراحی مسیر چاه با آزمایش و انحراف از قائم مشخص، بهینه‌سازی وزن گل حفاری برای به حداقل رساندن وضعیت ناپایداری دیواره چاه

برای دستیابی به پاسخ مناسب برای هر یک از دو رویکرد فوق، آنالیز حساسیت پایداری دیواره چاه نسبت به میزان انحراف از قائم و آزمایش مسیر حفاری چاه بسیار سودمند می‌باشند. آنالیز حساسیت پایداری دیواره‌ی چاه برای هر عمق، مسیر بهینه حفاری را همراه با تغییرات وزن گل به جهت جلوگیری از وقوع یا به حداقل رساندن ریزش‌های برشی متقارن یا شکستگی‌های القایی را نتیجه می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت پایداری دیواره‌ی چاه نسبت به انحراف از قائم و آزمایش مسیر حفاری، در قالب نمودارهای قطبی اشمیت نمایش داده می‌شود که براساس آزمایشات صفر تا ۳۶۰ درجه با فاصله‌بندی ۱۰ درجه مدرج شده‌است. هر بازه‌ی ۱۰ درجه‌ای آزمایشات نیز به ۱۰ بخش تقسیم می‌شود، که هر بخش از مرکز دایره‌ی اشمیت به سمت بیرون آن، نشان‌دهنده‌ی افزایش ۱۰ درجه‌ای میزان انحراف از قائم حد پایین (معادل صفر درجه برای چاه قائم) تا حد بالا (معادل ۹۰ درجه برای چاه افقی) می‌باشد. بدین ترتیب، تحلیل حساسیت پایداری دیواره‌ی چاه، برای سازند گدوان پیاده‌سازی شد. نتیجه این تحلیل به‌صورت ذیل قابل ارائه می‌باشد (شکل ۱۱):

پنجره ایمن وزن گل برای حفظ پایداری چاه در محدوده سازند گدوان بین ۱۴/۵ تا ۱۵/۹ LB/G می‌باشد. بر اساس معیار موهر-کولمب پایداری دیواره‌ی چاه با انحراف مسیر چاه به سمت تنش افقی حداقل (NW-SE) از حالت بهینه برخوردار خواهد بود. در این حالت، با حفاری در جهت (۱) (N32W)، و با زاویه انحراف از قائم ۴۳ درجه، کمترین میزان وزن گل ممکن یعنی ۱۴/۵ LB/G مورد نیاز است. اما با تغییر مسیر حفاری به سمت جهت (۲) (N58E)، بیشترین وزن گل ممکن یعنی ۱۵/۹ LB/G مورد نیاز است. برای حفاری قائم نیز وزن گل LB/G ۱۴/۹ به‌عنوان وزن گل بهینه برای حفظ پایداری چاه تعیین شد.

- برای شرایط $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$:

$$P_{wf} = \frac{1}{6-2b^{1/2}} \left[(3D + 2b'N) + \sqrt{J + 12(N^2 + b'DN)} \right] \quad (28)$$

- برای شرایط $\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$:

$$P_{wf} = \frac{1}{2}D + \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(D - 2P_0)]^2 - 3(D2E)^2} \quad (29)$$

- برای شرایط $\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$:

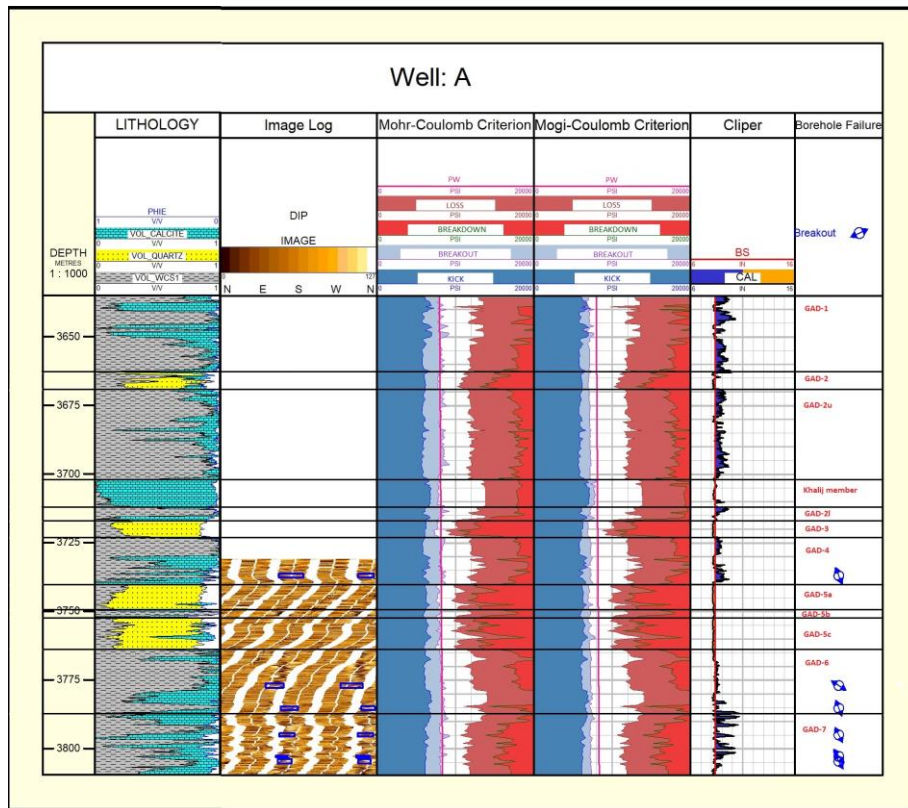
$$P_{wf} = \frac{1}{6-2b^{1/2}} \left[(3D - 2b'M) + \sqrt{J + 12(M^2 - b'DM)} \right] \quad (30)$$

در شکل ۱۰ نتایج حاصل از معیار شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب در مقایسه با ریزش‌های شناسایی شده بر روی نمودار تصویری ارائه شده است. در این شکل رنگ‌های آبی، آبی روشن، صورتی و قرمز به ترتیب بیانگر فشار گل‌هایی است که سبب پس‌زنی، ریزش برشی، هرزروی و گسیخت کششی در چاه می‌شود. با مقایسه معیار شکست‌های استفاده شده، مشخص شد که معیار شکست موهر-کولمب نسبت به معیار موگی-کولمب نتایج بهتری را برای بازه‌ی فشار گل بهینه ارائه می‌دهد، زیرا با توجه به ریزش‌های شناسایی شده بر روی نمودار تصویری FMI و نمودار قطرسنجی مشخص شد که سازند گدوان دارای فواصل ریزشی فراوانی می‌باشد و شرایط ناپایداری دارد. مطابق شکل ۱۰ محدوده پیش‌بینی شده توسط معیار شکست موهر-کولمب به همراه نمودار فشار گل، عمده‌تاً در محدوده ریزشی قرار دارد، درحالی‌که معیار موگی-کولمب وضعیت چاه را پایداری و فاقد ریزش پیش‌بینی کرده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که معیار شکست موهر-کولمب تخمین بهتری از پنجره ایمن وزن گل ارائه نموده است.

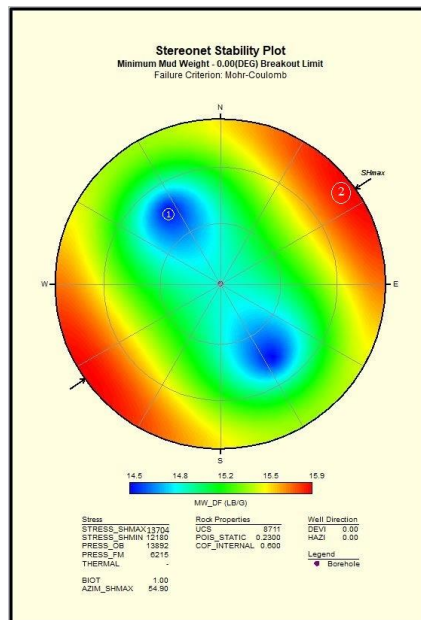
۳.۸. تحلیل حساسیت: تعیین وزن گل و مسیر

بهینه حفاری

با نهای شدن مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی سازند گدوان شامل خصوصیات الاستیک و مقاومتی سازند، فشار منفذی و تنش‌های اصلی برجا و پنجره‌ی ایمن وزن گل بر مبنای معیار شکست موهر-کولمب، می‌توان به دو رویکرد در خصوص بهینه‌سازی حفاری پاسخ داد:



شکل ۱۰. تجزیه و تحلیل پایداری چاه برای چاه A- در بیشتر اعماق، خط فشار گل (PW) در ناحیه ریزش (Breakout) قرار دارد، اما فشار ریزش برشی معیار موهر-کولمب با توجه به ریزش‌های شناسایی شده قابل قبول تر است.



شکل ۱۱. مسیر بهینه حفاری و تغییرات وزن گل لازم برای پایداری دیواره‌ی چاه برای کل چاه در محدوده سازند گدوان

۹. نتیجه گیری

در این مطالعه، تجزیه و تحلیل پایداری چاه در محدوده سازند گدوان به کمک مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی در یکی از چاه های واقع در یکی از میادین دشت آبادان با استفاده از نمودارهای چاه پیمایی متداول و پیشرفته *DSI* در محیط نرم افزار ژئولاگ نسخه ۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به روند کاری اجرا شده در این مطالعه موارد زیر قابل ذکر می باشند:

- تنش قائم سازند گدوان، پس از تصحیح نمودار چگالی و با استفاده از انتگرال گیری از نمودار چگالی محاسبه شد. گرادیان تنش قائم برابر با 1.14 psi/ft به دست آمد و دامنه تغییرات آن از $11926-14253 \text{ PSI}$ می باشد.
 - برای محاسبه فشار منفذی از روابط ایتون و ژانگ استفاده گردید. فشارهای منفذی محاسبه شده با استفاده از روش های مذکور به یکدیگر نزدیک بود، اما نتایج حاصل از رابطه ژانگ با نتایج حاصل از تست *MDT* در سازند گدوان تطابق بیشتری نشان داد و به عنوان فشار منفذی سازند در نظر گرفته شد. گرادیان فشار منفذی سازند معادل با 0.5 psi/ft می باشد. فشار منفذی در مخزن گدوان میدان نفتی مورد مطالعه کم و نزدیک به حالت هیدرواستاتیک است. بنابراین، برای تولید آینده، برنامه های بازیافت نفت باید در نظر گرفته شود. همچنین با کاهش فشار منفذی، سازند گدوان ممکن است به وزن گل متفاوتی برای حفاری نیاز داشته باشد.
 - نتایج حاصل از تفسیر نمودار تصویری *FMI* نشان داد که ریزش های برشی متقارن در جهت *N32W* رخ می دهند که بیانگر جهت تنش افقی حداقل (*Shmin*) می باشد و عمود بر آن (*N58E*) نمایانگر جهت تنش افقی حداکثر (*SHmax*) است.
 - برای محاسبه تنش های افقی حداکثر و حداقل، از رابطه پوروالاستیک استفاده شد. گرادیان تنش های افقی حداکثر و حداقل به ترتیب 1.12 psi/ft و 0.9 psi/ft بدست آمد.
- پس از نهایی شدن مدل پایداری چاه، وزن گل مورد نیاز برای کنترل و جلوگیری ریزش های برشی و شکستگی های القائی در دیواره چاه با استفاده از معیارهای شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب محاسبه گردید. با بررسی نتایج

بدست آمده در چاه مورد مطالعه، پنجره ایمن گل حفاری بین $14/5$ تا $15/9 \text{ LB/G}$ تخمین زده شد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت مشخص شد که جهت بهینه حفاری در سازند گدوان به سمت شمال غرب-جنوب شرق (*NW-SE*) می باشد و برای انجام حفاری قائم در این سازند مطابق با مدل ژئومکانیکی ساخته شده، وزن گلی معادل $14/9 \text{ LB/G}$ مناسب می باشد.

۱۰. مراجع

- [1] Peng S, Zhang J (2007), Engineering geology for underground rocks. New York, Springer.
- [2] Abbas, A.K., Al-Asadi, Y.M., Alsaba, M., Flori, R.E., & Alhussainy, S. (2018), Development of a geomechanical model for drilling deviated wells through the Zubair formation in Southern Iraq. In the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, (pp. 1-15). Abu Dhabi, UAE.
- [3] Chen, X., Gao, D., Yang, J., Luo, M., Feng, Y., & Li, X. (2018), A comprehensive wellbore stability model considering poroelastic and thermal effects for inclined wellbores in deepwater drilling. Journal of Energy Resources Technology, 140(9). pp. 1-10.
- [4] Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., & Young, F.S. (1986), Applied drilling engineering, Vol. 2, Society of Petroleum Engineers.
- [5] Ganguli, S. S., & Sen, S. (2020). Investigation of present-day in-situ stresses and pore pressure in the south Cambay Basin, western India: Implications for drilling, reservoir development and fault reactivation. Marine and Petroleum Geology, 118, p. 104422.
- [6] Guerra, C., Fischer, K. and Henk, A., (2019). Stress prediction using 1D and 3D geomechanical models of a tight gas reservoir—A case study from the Lower Magdalena Valley Basin, Colombia. Geomechanics for Energy and the Environment, 19, p.100113.
- [7] Rajabi, M., Tingay, M. and Heidbach, O., (2016). The present-day state of tectonic stress in the Darling Basin, Australia: Implications for exploration and production. Marine and Petroleum Geology, 77, pp.776-790.
- [8] Bradley, W.B., (1979), Mathematical concept-stress cloud can predict borehole failure. Oil Gas J, 77(8), pp. 92-102 .

- [18] Herwanger, J., Koutsabeloulis, N.C., (2011), *Seismic Geomechanics - How to build and calibrate geomechanical models using 3D and 4D seismic data*, 1ed. EAGE Publications b.v. Houten.
- [19] Peng, S., Wang, X., Xiao, J., Wang, L., & Du, M. (2001), Seismic detection of rock mass damage and failure zone in tunnel. *J China Univ Min Tech*, 30(1), pp. 23-26.
- [20] Zoback, M.D., (2010), *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press. New York.
- [21] Detournay, E., & Cheng, A.D. (1988), Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 25, pp. 171-182
- [22] Zhang, J., (2011), Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. In *Earth-Science Reviews*, 108(1-2), pp. 50-63.
- [23] Aadnoy, B., & Looyeh, R. (2019), *Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design*. 2nd Edition, Gulf Professional Publishing.
- [24] Yamamoto, K. (2003), Implementation of the extended leak-off test in deep wells in Japan. In *Rock stress*, pp. 579-584.
- [25] Barton, C.A., Zoback, M.D., Lovell, M., & Parkinson, N. (2002), Wellbore imaging technologies applied to reservoir geomechanics and environmental engineering. *Geological applications of well logs: AAPG Methods in Exploration*, Vol. 13, pp. 229-239.
- [26] Soroush, H., Ginty, W., Pan, C., Ferguson, W., Bere, A., Farid, S.M.U., & Hussain, Z. (2018), Geomechanics-based hydraulic fracturing modelling for tight gas carbonates: case study of naushahro feroz field in pakistan. In *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Seattle, Washington, pp. 1-17.
- [27] Anderson, E.M., (1951) *The dynamics of faulting and dyke formation, with applications to Britain*, 2 ed. Oliver and Boyd, Edinburgh,
- [28] Al-Ajmi, A.M. and Zimmerman, R.W. (2006), Stability Analysis of Vertical Boreholes using the Mogi-Coulomb Failure Criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (8), pp. 1200-1211.
- [29] Ameen, M.S., Smart, B.G., Somerville, J.M., [9] Azim, S.A., Mukherjee, P., Al-Anezi, S.A., Al-Otaibi, B., Al-Saad, B., Perumalla, S., & Babbington, J.F. (2011), Using Integrated Geomechanical Study to Resolve Expensive Wellbore Instability Problems While Drilling Through Zubair Shale/Sand Sequence of Kuwait: A Case Study. In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Muscat, Oman. pp. 1-14.
- [10] Kolawole, O., Federer-Kovács, G., & Szabó, I. (2018), Formation susceptibility to wellbore instability and sand production in the Pannonian Basin, Hungary. In *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Seattle, Washington, pp. 1-12.
- [۱۱] ملکی، ش.، مرادزاده، ع.، قوامی ربایی، ر.، صادق زاده، ف.، (۱۳۹۳). استفاده از نگارها جهت تعیین تنش‌های برجا روی دیواره‌ی چاه‌های نفتی؛ مطالعه‌ی موردی یکی از میادین نفتی جنوب ایران. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۱۶، صص ۶۰-۶۳.
- [12] Mansourizadeh, M., Jamshidian, M., Bazargan, P., & Mohammadzadeh, O., (2016), Wellbore stability analysis and breakout pressure prediction in vertical and deviated boreholes using failure criteria – A case study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, pp. 482-492
- [13] Ghorbani, M., (2019), *Lithostratigraphy of Iran*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- [14] AbdollahieFard, I., Alavi, S.A., and Mokhtari, M., (2006), Structural framework of the Abadan Plain (SW Iran) and the North Persian Gulf based on the geophysical data, *Iranian International Journal of Science*, 32, pp. 107-120
- [۱۵] مطهری، م و هاشمی، ع و ملقب، ع، (۱۳۹۸). ساخت مدل ژئومکانیکی برای یک عدد چاه در میدان جنوب غربی ایران، سومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران، اهواز. صص ۱-۱۰.
- [16] Kadkhodaie, A. (2021), The impact of geomechanical units (GMUs) classification on reducing the uncertainty of wellbore stability analysis and safe mud window design. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 91, pp. 1-14.
- [17] Holt, R.M., Fjær, E., Bauer, A., (2013), Static and Dynamic Moduli – so equal, and yet so different, *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, USA, pp. 1-10.

- [36] Chang, C. D., M. D. Zoback, and A. Khaksar. (2006), Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51, no. 3-4, pp.223-237.
- [37] Hareland, G., & Nygaard, R. (2007). Calculating unconfined rock strength from drilling data. In *ARMA Canada-US Rock Mechanics Symposium* (pp. 1-15).
- [38] Lal, M. (1999), Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia*, pp. 1-10.
- [39] Horsrud, P. (2001), Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. *SPE Drilling & Completion*, 16(02), pp. 68-73.
- [40] Golubev, A. A., & Rabinovich, G. Y. (1976). Resultaty primeneia apparturny akusticeskogo karotasa dlja predeleina proconstykh svoistv gornych porod na mestorosdeniaach tverdych isjopaemych. *Prikl. Geofiz. Moskva*, 73, 109-116.
- [41] Asef, M. R., & Farrokhrouz, M. (2010, April). Empirical Approach for Evaluation of Compressive Strength of Shale. In *Second EAGE Workshop on Shales* (pp. cp-158). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Hammilton, S., & Naji, N.A. (2009), Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). *Marine and Petroleum Geology*, 26(4), pp. 430-444.
- [30] Wang, Z. (2000), Dynamic versus static elastic properties of reservoir rocks. *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks*, Vol. 3, pp. 531-539.
- [31] Eissa, E.A., Kazi, A., (1988), Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 25, pp. 479-482.
- [32] Lacy, L.L. (1996). Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs. In *SPE annual technical conference and exhibition, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas*, pp. 1-13.
- [33] Freyburg, E., (1972), Der Untere und mittlere Buntsandstein SW-Thuringen in seinen gesteintechnischen Eigenschaften. *Ber. Dtsch. Ges. Geol. Wiss., A, Berlin*, Vol. 176, pp. 911-919.
- [34] Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.R. and Risnes, R., (1992) *Petroleum Related Rock Mechanics*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, 1st edition, 338p.
- [35] Moos, D., Zoback, M.D., & Bailey, L. (2001), Feasibility study of the stability of openhole multilaterals, Cook Inlet, Alaska. *SPE Drilling & Completion*, 16(03), pp. 140-145.