



مقاله پژوهشی

طراحی ژئومکانیکی میدان نفتی شادگان به منظور مدل سازی و برنامه ریزی چاه های
(ERD) در سازندهای بنگستان

مهدی نظری صارم^۱؛ آرش ابراهیم آبادی^{۲*}

۱- استادیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2022.349945.1173

واژگان کلیدی	چکیده
مدل ژئومکانیک، پایداری چاه، تنش برجا، جهت بهینه‌ی حفاری، میدان نفتی شادگان	مطالعه ژئومکانیکی میادین هیدروکربنی به منظور تحلیل پایداری چاه و برنامه‌ریزی برای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طراحی یک مدل ژئومکانیک، عاملی بسیار موثر در تحلیل پایداری موفق چاه‌ها در میادین هیدروکربنی به‌شمار می‌رود که با توجه به اهمیت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند در میدان نفتی شادگان در جنوب غرب ایران، به چنین مطالعه‌ای پرداخته شده‌است. این مهم با استفاده از مدل‌های یک بعدی ژئومکانیکی و با هدف تحلیل‌های پایداری چاه، مربوط به سه چاه کاندید از میدان مورد نظر صورت پذیرفته است که انتخاب چاه‌های کاندید بر اساس تحلیل اولیه داده‌های موجود انجام پذیرفته است. کلیه مراحل ساخت مدل‌های ژئومکانیکی با استفاده از نرم افزار تک لاگ (Techlog) انجام شده و پروفایل فشار سازندهای مختلف در طول چاه بر اساس پارامتر حفاری محاسبه شد که نتایج آن حاکی از وجود ناحیه فرفشار در سازند گچساران می‌باشد. به دلیل محدودیت داده‌ها، دیگر تحلیل‌های مربوط به ساخت مدل ژئومکانیکی در بازه مخزن آسماری محاسبه شده است که نتایج مدل‌های ساخته شده نشان می‌دهد که رژیم میدان تنش حاکم در محدوده مخزن آسماری رژیم تنش نرمال و متمایل به رژیم تنش امتداد لغز است. همچنین تحلیل‌های پایداری چاه نشان داده است که بهترین جهت برای حفر چاه‌های مایل و افقی، جهت شمال غربی می‌باشد. مدل‌های ساخته شده با استفاده از گزارش‌های میدان و نتایج مقالات معتبر و همچنین آزمایش‌های برجا اعتبارسنجی شدند.

۱. پیش‌گفتار

یکپارچگی پوش سنگ (*Cap Rock Integrity*)، شکست هیدرولیکی (*Hydraulic Fracturing*) و موارد مشابه که با مکانیک سنگ ارتباط دارد، به کمک ژئومکانیک نفت قابل بررسی و حل است. چنین مواردی هزینه‌های بسیار زیادی را به پروژه اعمال می‌کند؛ در صورتی که به کمک ژئومکانیک نفت قابل مدیریت است. ساخت مدل‌های ژئومکانیک در طول توسعه میادین هیدروکربوری از مرحله‌ی اکتشاف تا ترک میدان می‌تواند ضمن تولید بهینه از میدان، از اعمال هزینه‌های اضافی به پروژه جلوگیری کند. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان گرادیان فشار شکست و فشار منفذی از جمله

مطالعات ژئومکانیکی در اکتشاف، بهره برداری و توسعه میادین هیدروکربوری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. ساخت چنین مدل‌هایی در صورتی که اعتبارسنجی (*Validation*) شده باشند، می‌توانند در جلوگیری و مدیریت مهندسی بسیاری از پدیده‌های مرتبط به ژئومکانیک موثر باشند. به عنوان مثال پدیده‌هایی چون بهینه‌سازی جهت حفاری (*Trajectory Optimization*)، تولید ماسه (*Sand Production*)، فعال شدن گسل (*Fault Reactivation*) در اثر تولید، آسیب دیدگی لوله جداری چاه (*Casing Damage*)،

* تهران، خیابان اشرفی اصفهانی، بالاتر از میدان پونک، بلوار امام حسن مجتبی (ع)، مجتمع دانشگاهی آیت الله هاشمی رفسنجانی، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، a.abrahimabadi@iautcb.ac.ir

پارامترهای کلیدی در بحث مدل‌های مکانیکی زمین به شمار می‌روند را محاسبه نمود. اطلاع از مقدار این فشارهای تحت‌الارضی می‌تواند کمک شایانی در برنامه‌ریزی ایمن، صرفه‌جویی اقتصادی و مدل‌سازی کارآمد مخزن داشته باشد. هدف اصلی این مطالعه، طراحی ژئومکانیکی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از اطلاعات چاه پیمایی به منظور جلوگیری از شکست سازند و هرزروی گل در یکی از میادین گازی جنوب ایران - میدان شادگان - است. حد بالای پنجره ایمن گل حفاری به فشار شکست سازند و حد پایین پنجره به فشار منفذی یا فشار سازند معروف است.

ساخت مدل ژئومکانیک، به‌عنوان یک مرحله اساسی در مطالعات ژئومکانیکی غیر قابل اجتناب است. مدل‌ها در ابتدا در مقیاس چاه (*Well Scale*) ساخته شده و در صورت لزوم به کل مخزن و یا میدان تعمیم داده می‌شوند. مدل‌های یک بعدی برای مطالعه‌ی پدیده‌های مرتبط به مقیاس چاه و مدل‌های سه‌بعدی برای مطالعه‌ی پدیده‌های ژئومکانیکی در مقیاس مخزن (*Field Scale*) به کار می‌روند. مدل یک‌بعدی چاه شامل پروفایل‌هایی از تنش‌های برجا (*In-situ Stresses*) و خواص الاستیک (*Elastic Properties*) و مقاومتی سازندها می‌باشد که به کمک آن‌ها می‌توان تحلیل‌های پایداری چاه اعم از تعیین جهت و شیب بهینه حفاری، تعیین نقاط پایه لوله جداری (*Casing Shoe Depth*) و بهینه‌سازی برنامه گل حفاری را انجام داد. مدل‌های یک بعدی در اصل یک بانک داده‌های ژئومکانیکی از چاه مورد نظر است؛ در صورتی که ساخت مدل‌های سه‌بعدی نیازمند تحلیل‌های پیچیده‌تری از روش‌های عددی مانند روش المان محدود (*Finite Element Method*) برای انجام محاسبات مربوط به تنش، کرنش و فشار سیال می‌باشد. مدل‌های سه‌بعدی برای انجام مطالعات دقیق‌تر با مدل‌های مخزنی و جریان سیال کوپل شده (*Coupling*) و برای تحلیل‌های حرفه‌ای توسعه‌ی میدان به کار می‌روند. ناپایداری چاه در واقع یک مشکل ژئومکانیکی است که تابعی از تنش‌ها و کرنش‌ها است. در این تحقیق جهت تحلیل پایداری دیواره چاه، پنجره ایمن گل حفاری بوسیله مدل‌سازی ژئومکانیکی بصورت مطالعه موردی در میدان شادگان از میدانهای نفتی در جنوب غربی ایران ارائه می‌گردد که در این راستا با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی شامل عمق، لاگ گاما، لاگ چگالی، لاگ نوترون، زمان عبور موج صوتی تراکمی

و برشی، سایز مته، فشار منفذی و میزان وزن گل که از عملیات چاه‌پیمایی حفاری استخراج شده به محاسبه مدل‌های الاستیک سنگ مخزن در حالت دینامیکی و تبدیل این مدل‌ها به حالت استاتیکی، محاسبه مقدار تنش‌های برجا پرداخته و با استفاده از معیار شکست مناسب برای تعیین محدوده مجاز و مناسب فشار گل با توجه به مدل شکست و گسیختگی (تعیین پایین‌ترین و بالاترین حد مجاز فشار گل برای مدل‌های شکست برشی و مدل‌های شکست کششی توسط معیار موهر-کولمب)، پنجره ایمن گل حفاری تعیین و تحلیل پایداری دیواره چاه انجام می‌پذیرد. این محدوده از فشار گل به این امکان را فراهم می‌کند که از ریزش دیواره چاه و همچنین شکست هیدرولیکی در کل عمق حفاری جلوگیری نمود. به علاوه با توجه به این محدوده از فشار گل می‌توان از ورود سیال سازند به دیواره چاه و همچنین از هرزروی گل حفاری به سازند جلوگیری نمود و در نهایت می‌توان از مشکلات ناشی از ناپایداری دیواره چاه از قبیل گیرکردن لوله‌ها، عملیات مانده‌یابی، یکنواخت‌سازی دیواره چاه، سیمان کاری ضعیف و کنار گذر ممانعت کرد.

مطالعات مختلفی در زمینه ساخت مدل‌های ژئومکانیکی صورت گرفته است. القحطانی و رحیم در سال ۲۰۰۱ یک مدل ریاضی را برای مدل‌سازی و تعیین خواص ژئومکانیکی در یکی از میادین نفتی عربستان ارائه دادند [۱]. محی‌الدین و همکاران در سال ۲۰۰۱ با ساخت یک مدل ژئومکانیکی مبادرت به تحلیل پایداری و تعیین پنجره گل برای یک مخزن ماسه‌ای در عربستان نمودند [۲]. الرویلی و چاردک در سال ۲۰۰۳ مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی را برای میدان قوار عربستان طراحی کردند و روابطی را برای تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند ارائه نمودند [۳]. ابالیوغلو و همکاران در سال ۲۰۱۱ با ساخت یک مدل ژئومکانیکی در سازند کلوش، ناپایداری چاه را پیش‌بینی نمودند [۴]. رمجان و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی را برای تحلیل پایداری چاه در یکی از میادین نفتی ترینیداد و توباگو طراحی نمودند [۵]. باقری و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک مدل ژئومکانیکی را برای تحلیل پایداری چاه در یک سازند کربناته ارائه دادند [۶].

مسئله اساسی این تحقیق، ساخت مدل‌های یک بعدی سه چاه کاندید (*Candidate Well*) از میدان نفتی شادگان

۵ و ۷ بیشتر از جنس کربناته و لایه‌های ۲ و ۶ از جنس ماسه سنگ هستند. اطلاعات خام میدان بر اساس داده‌های ۲۶ حلقه چاه می‌باشد. تعداد ۲۱ عدد چاه در این میدان در سازند آسماری حفاری شده‌اند که بیشتر اطلاعات این میدان از این چاه‌ها به دست آمده است. بر اساس تاریخچه تولید مخزن آسماری، ۴۹ درصد نفت تولیدی از این مخزن مربوط به چاه ۱ و ۲ می‌باشد. تعداد چاه‌های تولیدی در بنگستان ۵ عدد می‌باشد. به دلیل تعداد کم چاه‌های تولیدی و دوره کوتاه مدت تولید از این مخزن، عدم اطمینان‌های زیادی در این مخزن وجود دارد. در این مقاله تمرکز بر روی مخزن آسماری می‌باشد. بر اساس طرح توسعه میدان سناریوهای مختلفی برای مخازن آسماری و بنگستان ارائه شده است. بدین ترتیب ۱۲ چاه قائم و ۵ چاه افقی برای توسعه مخزن آسماری بالایی و چهار چاه قائم و یک افقی برای مخزن آسماری پائینی باید حفاری شود. بر اساس این سناریو، ۱۱۰ هزار بشکه در روز از دو مخزن آسماری تولید خواهد شد. سناریوی برگزیده برای مخزن بنگستان شامل ۱۰ چاه افقی می‌باشد. که بر این اساس نرخ تولید از این مخزن به ۳۰ هزار بشکه در روز خواهد رسید [۷].

ساختار زمین‌شناسی میدان شادگان در نزدیکی شادگان، جنوب غربی ایران و در فلات خوزستان قرار گرفته است. این طاق‌دیس هیچگونه رخنمونی در سطح زمین نداشته و بوسیله عملیات لرزه‌ای شناسایی شده است. جهت طاق‌دیس میدان شادگان شمال غربی - جنوب شرقی بوده و توسط لایه‌های ماسه سنگی، مارن قرمز و کربناته که متعلق به سازند رسوبی آغاچاری هستند پوشانده شده است. بالاترین نقطه طاق‌دیس ۲۳۹۰ متر زیر سطح دریا و نزدیک به چاه شماره ۱ میدان است. پایین‌ترین نقطه آن نیز در عمق ۳۱۸۰ متری از سطح دریا و بین دو میدان شادگان و رامشیر قرار دارد. نقطه مقعر طاق‌دیس برای مخزن آسماری بالا در عمق ۳۱۵۰ متری از سطح دریا و همین نقطه برای مخزن آسماری پائین ۳۲۲۵ متر از سطح دریا بین دو میدان شادگان و رامشیر قرار دارد. داده‌های مربوط به فشار مخزن حاکی از متصل بودن دو آبران (Aquifer) مخزن میدان شادگان و رامشیر دارد. در شکل ۱ ستون زمین‌شناسی میدان شادگان نشان داده شده است [۸]. در ادامه و در بخش بعدی، در جدول‌های ۱ الی ۳ داده‌های مورد نیاز برای طراحی ژئومکانیکی چاه‌ها در این میدان آورده

واقع در جنوب غربی ایران می‌باشد. هدف از ساخت مدل‌های ژئومکانیکی، بررسی پایداری چاه و تعیین جهت بهینه حفاری برای حفر چاه‌های مایل و افقی در طرح توسعه‌ی میدان می‌باشد. برای انتخاب چاه‌های کاندید، ابتدا داده‌های موجود میدان دسته‌بندی شده و بر اساس کیفیت و کمیت داده‌ها، انتخاب صورت می‌گیرد. بر این اساس، سه چاه با شماره‌های ۲۴، ۱۲ و ۲۱ انتخاب می‌شوند. کلیه‌ی مراحل ساخت مدل‌های تک بعدی ژئومکانیکی با استفاده از نرم افزار تخصصی تک‌لاگ (Techlog) انجام شده است. در نهایت مدل‌های ساخته شده با استفاده از لاگ‌های تصویری (Image Log) چاه‌های مجاور، مطالعات تکمیلی مربوط به میدان و همچنین نتایج حاصل از مطالعات مربوط به میادین هم‌جوار اعتبارسنجی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که رژیم میدان تنش (Stress Field Regime) حاکم بر مخزن آسماری نرمال (Normal) و متمایل به رژیم امتداد لغز (Strike-slip) می‌باشد. همچنین جهت بهینه حفاری برای حفر چاه‌های مایل و افقی جهت شمال غربی - جنوب شرقی است.

در این مقاله، در بخش بعدی ابتدا میدان شادگان معرفی شده و در ادامه، داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی بررسی شده و چگونگی انتخاب چاه‌های کاندید توضیح داده شده است. سپس، مراحل تولید مدل یک بعدی ژئومکانیکی برای چاه شماره ۲۴ توصیف شده و پس از آن با مقایسه‌ی اولیه‌ی نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی هر سه چاه کاندید، اعتبارسنجی مدل‌ها توضیح داده شده است. در بخش انتهایی، نتایج حاصله و بحث‌های تکمیلی آورده شده است.

۲. میدان نفتی شادگان

میدان نفتی شادگان با ۲۳ کیلومتر طول و ۶ کیلومتر عرض در جنوب غرب کشور قرار دارد. این میدان شامل سه مخزن اصلی با نام‌های آسماری بالا (Upper-Asmari)، آسماری پائین (Lower-Asmari)، و بنگستان (Bangestan) می‌باشد. ضخامت متوسط مخزن آسماری حدوداً ۳۸۸ متر بوده و شامل سازندهای‌های از جنس کربناته و ماسه‌سنگ و همچنین میان لایه‌هایی از مارن و شیل می‌باشد. بر اساس زون بندی زمین شناسی این سازند مخزنی شامل ۱۰ لایه بوده که لایه‌های یک و دو در مخزن آسماری بالا و لایه‌های ۵، ۶ و ۷ در آسماری پائین به عنوان مخزن شناخته می‌شوند. لایه‌های ۱،

شده است.

می‌شود. این مقدار ۲ الی ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. روش محاسبه‌ی تنش روباره بدین صورت است که با داشتن متوسط چگالی در یک بلوک فرضی کوچک، وزن آن بلوک محاسبه شده و تنش روباره در هر نقطه برابر با مجموع وزن بلوک‌های بالایی آن می‌باشد. این کار با استفاده از رابطه (۱) انجام می‌شود:

$$S_v = \int_0^v \rho_z g dz = \bar{\rho} g Z \quad (1)$$

محاسبه‌ی پروفایل فشار منفذی اهمیت زیادی در محاسبات ژئومکانیکی چاه‌ها دارد. معمولاً در سازندهای تراوا که خاصیت مخزنی دارند از تست‌های برجای مستقیم مانند *RFT* و یا *DST* استفاده می‌شود. در صورتی که مشکل اصلی حفاری مربوط به سازندهای ناتراوایی می‌باشد که فشار زیاد سیال آن‌ها، مشکلات بسیاری برای حفاری ایجاد می‌کند. در این سازندها، آزمایش‌های مستقیم قابل اجرا نیست. به همین دلیل روش‌هایی برای تخمین فشار سیال آن‌ها وجود دارد. یکی از این روش‌ها بر اساس رفتار نرمال سازندهای ناتراوا مانند شیل، در اثر اعمال تنش همه جانبه است. در این روش، خواص پتروفیزیک شیل مانند مقاومت، سرعت امواج، چگالی و ... نسبت به عمق و یا تنش روباره به صورت نرمال تغییر می‌کند. در صورتی که این تغییر به صورت نرمال نباشد؛ انتظار وجود آنومالی فشار در آن ناحیه وجود دارد و می‌توان مقدار فشار را تخمین زد. با استفاده از روش ایتون (*Eaton*) می‌توان مقدار فشار را محاسبه کرد [۱۰]. با توجه به اینکه لاگ‌های پتروفیزیک فقط در ناحیه مخزنی وجود دارند، استفاده از این لاگ‌ها فقط فشار مخزن را به دست می‌آورد؛ در صورتی فشار مخزن در این ناحیه به صورت مستقیم و به کمک آزمایش برجای *RFT* موجود است.

۳. بانک داده‌ها و انتخاب چاه کاندید

برای ساخت مدل ژئومکانیک با دقت بالا و اعتبارسنجی معتبر داده‌های جدول ۱ مد نظر می‌باشد. در این جدول اهمیت داده‌های مورد نیاز با سه درجه‌ی مختلف اهمیت نمایش داده شده است.

در جدول ۲ داده‌های مربوط چاه‌های میدان شادگان آورده شده است. در این جدول عمق داده‌های موجود برای هر چاه آورده شده و رنگ خاکستری نشان دهنده‌ی موجود بودن داده‌ی مد نظر است. همچنین حرف لاتین *A* به معنی مخزن آسماری و حرف لاتین *B* به معنی مخزن بنگستان می‌باشد. حروف لاتین *U* و *L* به ترتیب به معنی بالا و پایین می‌باشد. با استفاده از داده‌های دو جدول مذکور چاه‌های ۲۴، ۱۲ و ۲۱ به عنوان چاه‌های کاندید برای ساخت سه مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در نظر گرفته شد. مطابق با شکل شماره ۲ این چاه‌ها در شرق و جنوب شرقی میدان قرار دارند.

بدین ترتیب و به طور خلاصه از داده‌های جدول ۳ برای ساخت مدل‌های ژئومکانیکی استفاده شده است. در ادامه توضیح داده خواهد شد که کمبود داده (با توجه به جدول ۱) محدودیت‌هایی را برای اعتبارسنجی مدل‌های ژئومکانیک ایجاد خواهد کرد.

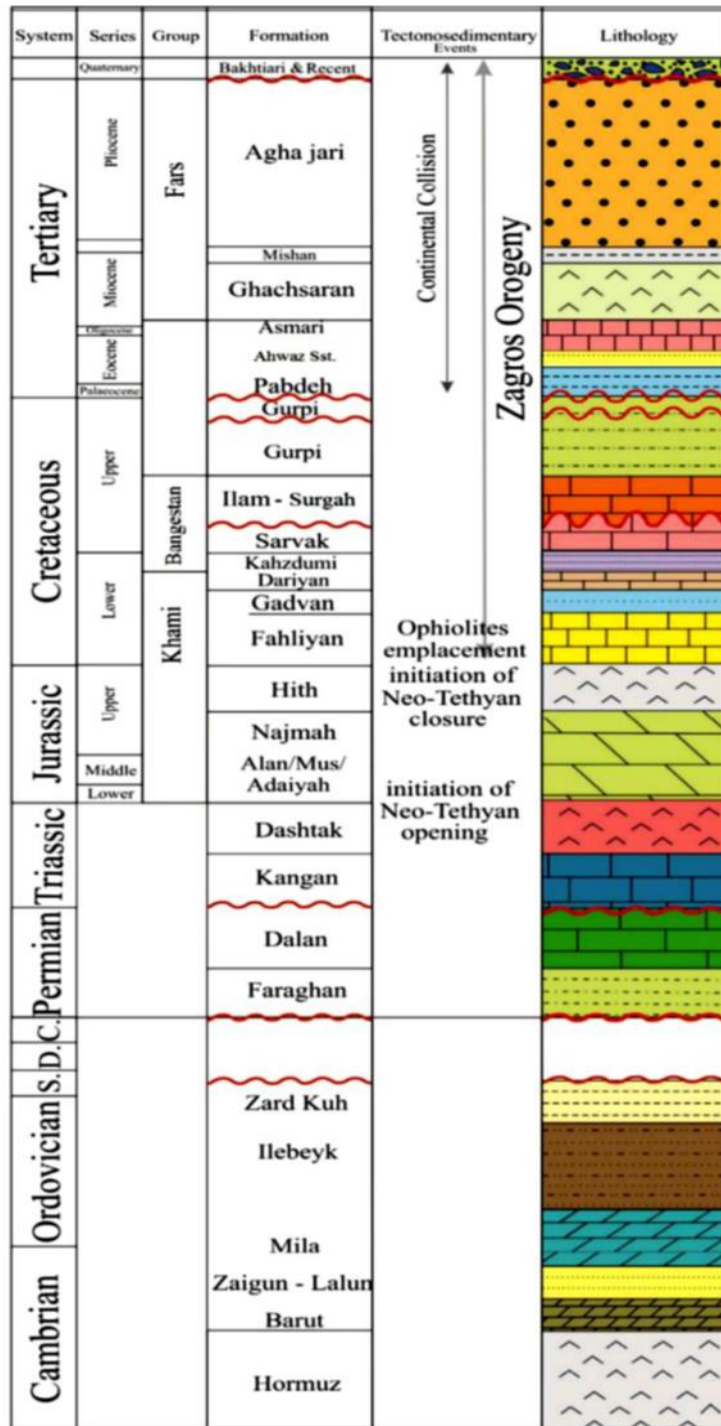
۴. ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی

در این قسمت مراحل ساخت مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی در چهار بخش مجزا توضیح داده می‌شود. لازم به یادآوری است که کلیه‌ی مراحل ساخت مدل‌های ژئومکانیکی با استفاده از نرم افزار تک‌لاگ می‌باشد.

۱.۴. تعیین پروفایل فشار روباره و فشار منفذی در

طول چاه

مرحله اول ساخت مدل‌های ژئومکانیکی تعیین تنش روباره (*Overburden Stress*) بر اساس لاگ چگالی می‌باشد. با توجه به اینکه این لاگ فقط در محدوده‌ی مخزن موجود است؛ برای سازندهای بالا یک مقدار متوسط چگالی در نظر گرفته



شکل ۱. ستون زمین شناسی میدان نفتی شادگان [۹]

جدول ۱. داده‌های مورد نیاز برای انجام مطالعات ژئومکانیکی

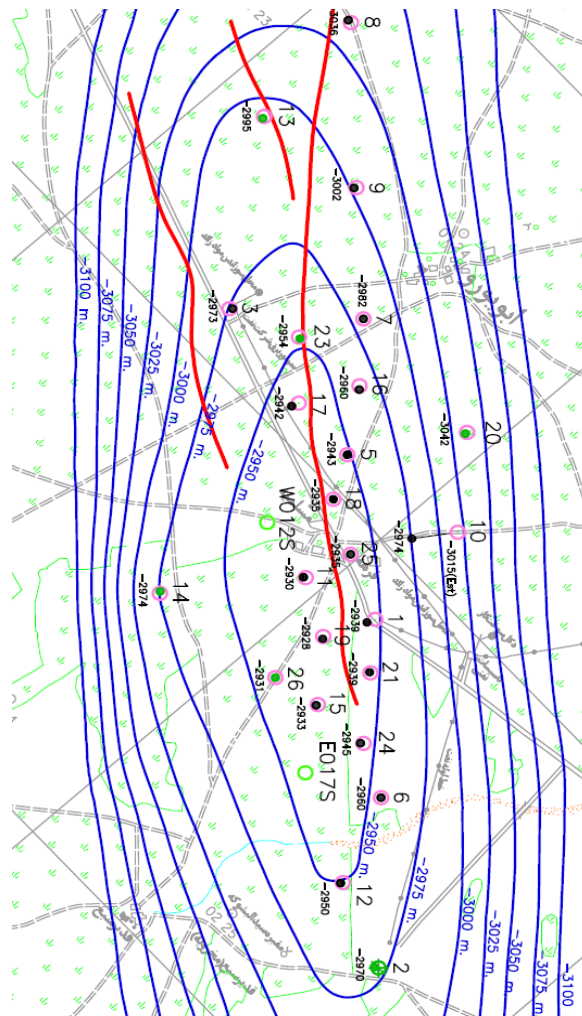
گروه	داده	درجه اهمیت		
		یک	دو	سه
داده‌های زمین-شناسی	سطح سازند (Top Formation)	*		بلی
	لاگ زمین‌شناسی (Lithology Log)	*		خیر
	داده‌های زمین‌ساختاری (Structural Data)	*		نا کافی
	کانی‌شناسی و نوع رس (Mineralogy and Clay Type)	*		بلی
داده‌های پتروفیزیکی و لاگ	لاگ صوتی (Sonic Log)	*		موجود در سازند مخزن
	لاگ تصویری (Image Log)	*		موجود در سازند مخزن برای یک چاه
	لاگ چگالی (Density Log)	*		موجود در سازند مخزن
	لاگ گاما (Gamma Ray Log)	*		موجود در سازند مخزن
	لاگ مقاومت (Resistivity Log)	*		موجود در سازند مخزن
	لاگ مختصات چاه (CDR)	*		بلی
	لاگ کالیپر (Caliper Log)	*		موجود در سازند مخزن
	لاگ تولید (Production Log)	*		خیر
تحلیل مغزه	آنالیز روتین مغزه-CCAL	*		موجود در سازند مخزن برای چند چاه
	آنالیز ویژه مغزه-RCAL	*		موجود در سازند مخزن برای چند چاه
	نمونه مقطع نازک (Thin Section)	*		خیر
داده‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ و میدان تنش	توصیف زمین‌شناسی مغزه (Core Description)	*		خیر
	خواص مقاومتی نمونه آزمایشگاهی	*		خیر
	خواص الاستیک و پروالاستیک (Elastic and Poroelastic Properties)	*		خیر
	نسبت مولفه‌های تنش (Effective Stress Ratio)	*		خیر
داده‌های حفاری	مسیر تنش (Stress Path)	*		خیر
	گزارش‌های روزانه حفاری (Daily Drilling Report)	*		بلی
	گزارش نهایی حفاری (End of Well Report)	*		خیر
	پارامترهای حفاری و لاگ گل حفاری (Mud Logging)	*		خیر
	تست شکست سازند (Leak-off Test)	*		خیر
	تست یکپارچگی سازند (Formation Integrity Test)	*		خیر
	رخداد های حفاری (Drilling Event)	*		ناقص
داده‌های مربوط به مخزن و تولید از میدان	آزمایش ساق مته	*		خیر
	آزمایش فشار سیال سازند	*		موجود در سازند مخزن برای چند چاه
	نرخ تولید	*		موجود در سازند مخزن برای چند چاه
	تاریخچه تولید	*		موجود در سازند مخزن برای چند چاه

جدول ۲. داده‌های موجود مربوط به چاه‌های میدان

شماره چاه	لاگ پتروفیزیک	برنامه حفاری	داده‌های تکمیل	آزمایش ساق مته	لاگ تصویری	نسبت فشار سازند	وزن گل	گزارشات حفاری	مقاطع نازک	محدوده مشبک کاری	آزمایش چاه	لاگ تولیدی	MDT	PVT	SCAL	RCAL
۱	۲۹۰۰-۳۳۰۰			A						LA, UA						
۲	۳۹۰۰-۴۸۰۰									LA						
۳	۲۹۵۰-۳۳۰۰					A				UA						
۴	۴۲۰۰-۴۴۵۰			B		A				B				U B	A	A/B
۵	۲۹۵۰-۳۲۰۰					A				LA, UA						
۶	۲۹۰۰-۳۳۰۰									LA						
۷	۳۰۰۰-۳۴۰۰			A		A				LA					A	A
۸	۲۲۰۰-۳۰۰۰			A		A				UA					A	A
	۳۰۰۰-۳۴۰۰															
۹	۳۰۰۰-۳۴۰۰									LA						
۱۰	۳۱۰۰-۳۶۰۰					A				LA						
۱۱	۲۹۵۰-۳۳۵۰			A		A				LA					A	A
۱۲	۲۹۵۰-۳۲۵۰			A		A				LA					A	A
۱۳	۳۹۰۰-۴۹۰۰			B	A					B				L B	B	B
۱۴	۳۰۰۰-۴۰۰۰					A				B				U B	B	B
۱۵	۲۹۵۰-۳۲۵۰									LA				L A		A
۱۶	۲۸۰۰-۳۲۰۰									LA						
۱۷	۲۹۵۰-۳۲۵۰									LA						
۱۸	۲۹۵۰-۳۲۵۰									LA						
۱۹	۲۹۵۰-۳۲۵۰									LA						
۲۰	۳۰۰۰-۴۶۰۰				B					UA				U A		B
۲۱	۲۹۰۰-۳۲۰۰									LA						
۲۲	۳۰۰۰-۳۵۰۰									B				U B		
	۳۹۰۰-۴۹۰۰															
۲۳	۲۹۵۰-۳۴۵۰									B						
	۳۹۰۰-۴۴۰۰															
۲۴	۲۹۵۰-۳۲۰۰					A				LA						
۲۵	۲۹۰۰-۳۳۰۰									LA						
۲۶	۲۹۰۰-۳۴۰۰															
	۳۸۰۰-۴۸۰۰															
۲۷	۲۹۰۰-۳۳۰۰															

جدول ۳. داده‌های استفاده شده در ساخت مدل‌های ژئومکانیک

داده	زون	توضیحات
داده‌های حفاری	در تمام سازندها	از این گزارشات پارامترهای حفاری استخراج شده و در نهایت <i>Drilling exponent</i> محاسبه شده است
لاگ‌ها	در سازند آسماری	<i>BS, CALI, RHOB, NPHI, DT, RT, CGR, SGR, PHIT, PHIE</i>
عمق سازندها	در تمام سازندها	تعیین زون بندی مدل
لاگ مختصات چاه	در تمام سازندها	تعیین لاگ <i>reference</i>
تست فشار سازند	در سازند آسماری	تعیین پروفایل فشار مخزن



شکل ۲. پلان جانمایی چاه‌های میدان شادگان [۹]

گل و پارامترهای حفاری به دست می‌آید؛ بدین ترتیب می‌توان پروفایل فشار منفذی را در طول چاه و با استفاده از روش ایتون به دست آورد. رابطه‌ی ایتون برای محاسبه‌ی

یکی دیگر از لاگ‌هایی که با استفاده از روش ایتون می‌توان پروفایل فشار را تخمین زد؛ لاگ Dc یا نمای حفاری (*Drilling Exponent*) است. این لاگ با استفاده از داده‌های

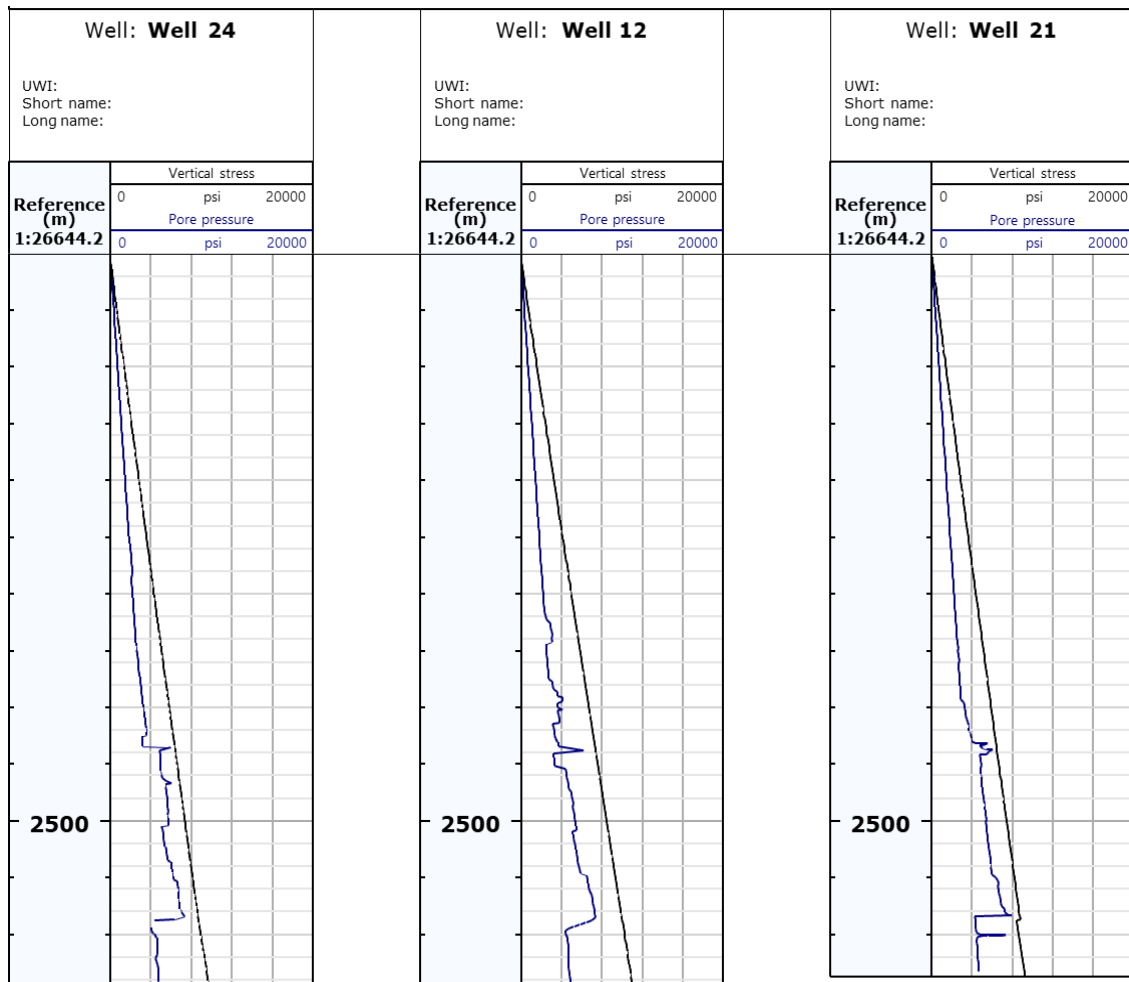
$$Dc = \frac{\log_{10} \left(\frac{ROP}{RPM} \right)}{\log_{10} \left(\frac{12WOB}{1000 BS} \right)} \times \frac{MW_n}{MW} \quad (3)$$

که در آن ROP نرخ نفوذ بر حسب فوت بر ساعت، RPM سرعت سرمته بر حسب دور بر دقیقه، WOB وزن روی سرمته بر حسب کیلو پوند، BS قطر سرمته بر حسب اینچ و MW وزن گل در حالت می باشد. تندیس n بیانگر وزن گل معادل فشار سازند در شرایط فشار هیدرواستاتیک است. پروفایل فشار منفذی داخل مخزن آسماری با استفاده از نتایج تست RFT به این پروفایل اضافه می شود. در شکل ۳ پروفایل تنش روباره و فشار منفذی در طول چاه نمایش داده شده است.

پروفایل فشار منفذی در طول چاه و سازندهای بالای مخزن با استفاده از رابطه (۲) به دست می آید [۱۰]:

$$\frac{P_p}{Z} = \frac{S_v}{Z} - \left(\frac{S_v}{Z} - \frac{P_n}{Z} \right) \left(\frac{Dc}{DC_n} \right)^{1.2} \quad (2)$$

که در آن P_p : فشار منفذی، p_n فشار هیدرواستاتیک، S_v تنش روباره، Z عمق و پسوند n بیانگر لاگ نرمال (در شرایط فشار هیدرواستاتیک) می باشد. محاسبه ی لاگ نمای حفاری با استفاده از پارامترهای حفاری مانند وزن روی مته، دور مته، وزن گل و قطر سرمته مطابق با رابطه (۳) محاسبه شده است [۱۰]:



شکل ۳. پروفایل تنش روباره و فشار منفذی

معمولا ۰/۹ مقدار آن در حالت دینامیک در نظر گرفته می‌شود.

در مرحله‌ی بعد، خواص مقاومتی سازندها اعم از مقاومت فشاری تک‌محوری (*UCS – Unconfined Compressive Strength*)، مقاومت چسبندگی (*Cohesion Strength*)، زاویه اصطکاک داخلی (*Internal Friction Angle*) و مقاومت کششی (*Tensile Strength*) محاسبه می‌شود. تعیین این خواص نیز همانند مدول الاستیک استاتیک نیازمند آزمایش‌های ژئومکانیک بر روی نمونه‌های سازند است. به عبارت دیگر این آزمایش‌ها با هدف اعتبارسنجی روش‌های تجربی و تخمین بهتر خواص مقاومتی انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری برای نواحی و سازندهای مختلف وجود دارد. در این روش‌ها از لاگ‌های پتروفیزیک و خواص الاستیک استفاده می‌شود. در این مقاله، با توجه به این که سازند آسماری بیشتر از جنس کربناته است، روش *RNC* که مربوط به سنگ‌های کربناته است، استفاده شده است. رابطه‌ی آن به صورت زیر می‌باشد [۱۲]:

$$UCS = 143.8 \times \exp(-6.95\phi) \quad (۸)$$

که در آن ϕ بیان‌گر تخلخل می‌باشد. همین مبنای جنس سازند در مورد تعیین خواص مقاومتی دیگر نظیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مورد استفاده قرار گرفته است. از روش پلامب (*Plumb*) برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی استفاده شده است:

$$\phi = 25.6 - 37.4 \times (1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (۹)$$

که در آن *NPHI* بیان‌گر لاگ نوترون تخلخل و *Vshale* بیان‌گر حجم شیل است که از لاگ گاما به دست می‌آید. مقدار مقاومت کششی نیز ۰/۱ مقاومت فشاری تک‌محوری در نظر گرفته شده است. این تخمین برای بیشتر سنگ‌های پوسته زمین برقرار است [۱۳].

۳.۴. تعیین تنش‌های برجا و پنجره ایمن گل حفاری

تعیین اندازه تنش‌های افقی حداقل و حداکثر از مهم‌ترین بخش‌های ساخت مدل ژئومکانیکی در طول چاه می‌باشد. تعیین دقیق این تنش‌ها تلفیقی از داده‌های تست‌های برجای تنش مانند آزمایش نشت، یکپارچگی سازند و لاگ‌های

۲.۴. تعیین خواص الاستیک و مقاومتی

خواص دینامیک الاستیک شامل مدول یانگ (*Young Modulus*)، دینامیک، ضریب پواسون (*Poisson's Ratio*)، دینامیک، مدول برشی (*Shear Modulus*) و مدول بالک (*Bulk Modulus*) دینامیک با استفاده از لاگ چگالی و لاگ سرعت امواج فشاری و برشی قابل محاسبه است. با توجه به اینکه مبنای محاسبه‌ی این خواص سرعت امواج است، بنابراین مقدار آن‌ها از مقادیر استاتیک نظیر آن بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل ناقص بودن داده‌های مورد نیاز، این محاسبات فقط در سازند مخزنی انجام شده است. همچنین با استفاده از محاسبات پتروفیزیکی و بر اساس روش لاگ سرعت امواج برشی با استفاده از لاگ سرعت امواج فشاری محاسبه شده است. روابط تعیین ضرایب الاستیک دینامیک به شرح زیر می‌باشد [۱۱]:

$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۴)$$

$$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - 2V_s^2} \quad (۵)$$

$$K_{dyn} = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} \rho V_s^2 \quad (۶)$$

$$G_{dyn} = \rho V_s^2 \quad (۷)$$

که در آن *E* مدول یانگ، v ضریب پواسون، *G* مدول برشی، *K* مدول یانگ و ρ چگالی است. *V_p* و *V_s* به ترتیب سرعت امواج فشاری و برشی می‌باشند. با توجه به این که مقدار خواص سنگ در شرایط دینامیک غیر واقعی و بیش از مقدار نرمال آن است، برای انجام محاسبات ژئومکانیکی خواص الاستیک در شرایط استاتیک استفاده می‌شود. خواص الاستیک استاتیک بر اساس روابط تجربی با استفاده از خواص الاستیک دینامیک به دست می‌آیند. به طور کلی روش استاندارد بدین صورت است که لاگ خواص دینامیک بر اساس نتایج آزمایش‌های استاتیک که بر روی سازند نمونه‌های انجام شده است، کالیبره می‌شود. این آزمایش‌ها منجر به تولید روابط تجربی متنوع برای سازندهای مختلف شده است. در این مقاله محاسبه مدول یانگ استاتیک بر اساس روش جان فولر (*John Fuller*) انجام شده است. مقدار ضریب الاستیک پواسون

شکل مشاهده می‌شود، میدان تنش غالب در مخزن آسماری نرمال و متمایل به امتداد لغز می‌باشد. پس از محاسبه‌ی تنش‌های حداکثر و حداقل افقی و با داشتن خواص مقاومتی سازند آسماری می‌توان پنجره‌ی ایمن گل (*Mud Weight Window*) چاه را به ازای معیارهای مختلف شکست به دست آورد. در این مقاله، این تحلیل بر اساس معیار شکست موگی-کولمب (*Mogi-Coulomb*) ارائه شده است. این روش سازگاری بیشتری با مخازن کربناته ایران دارد [۱۵]. روش کار بدین ترتیب است که بر اساس پروفایل‌های فشار سیال، فشار شکست سازند، معیار شکست برشی و همچنین محاسبه‌ی تنش‌های اطراف چاه، می‌توان نواحی مربوط به فوران گل (*Kick*)، از دست دادن گل (*Mud Loss*)، شکست برشی (*Shear Failure*) و شکست کششی (*Tensile Fracture*) سازند را مشخص کرد. در شکل ۵ پنجره گل ایمن حفاری، برای سه چاه موردنظر نشان داده شده است. در این شکل وزن گل حفاری نیز با خط چین نمایش داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، وزن گل در حفاری مخزن آسماری نزدیک به مرز حداقل آن قرار دارد. اگرچه در برخی نواحی احتمال شکست برشی سازند و تشکیل ریزش گوه‌ای (*Breakout*) در دیواره چاه وجود دارد. در صورت وجود نمودارهای تصویری چاه می‌توان این مورد را بررسی کرد که متأسفانه برای این چاه این اطلاعات موجود نبود. در قسمت‌های بعدی این مقاله، اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از لاگ‌های تصویری یکی دیگر از چاه‌های میدان انجام می‌شود.

تصویری، داده‌های تکتونیک، داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های مهندسی را می‌طلبد. در این تحقیق، بر اساس داده‌های موجود، این تنش‌ها بر اساس روابط پرولاستیک محاسبه شده است. ابتدا با استفاده از روابط پرولاستیک و خواص الاستیک مخزن، کرنش‌های تکتونیکی مربوط محاسبه می‌شود و سپس مقدار تنش‌های افقی تخمین زده می‌شود. این روابط به شرح زیر می‌باشند [۱۴]:

$$S_{hmin} = \frac{\nu}{1-\nu} S_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_h + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_H \quad (10)$$

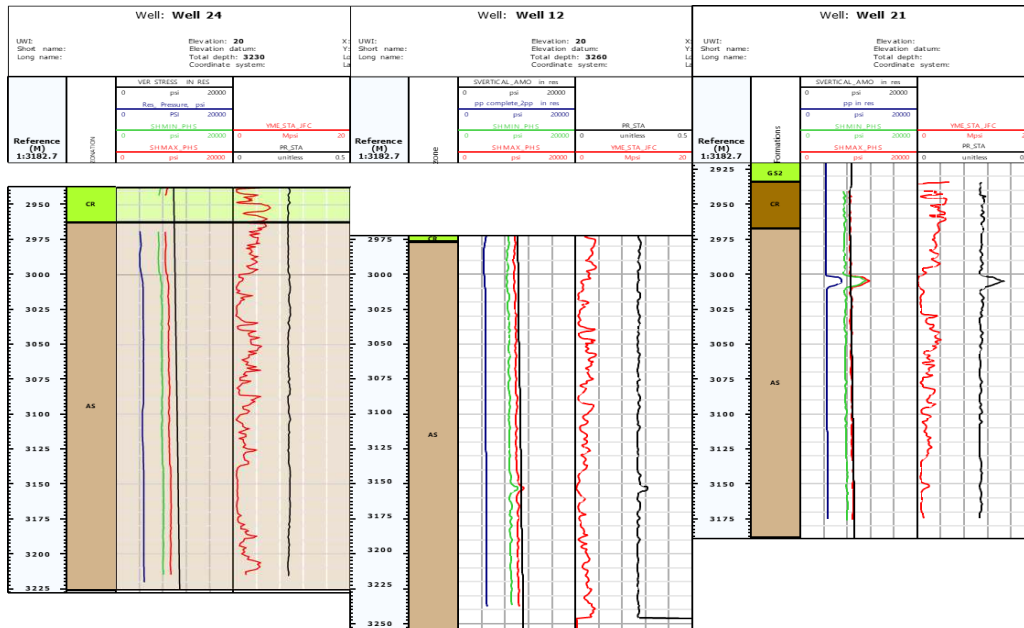
$$S_{hmax} = \frac{\nu}{1-\nu} S_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_H + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_h \quad (11)$$

که در آن S_v تنش قائم، P_p فشار سیال، E مدول یانگ استاتیک، α ضریب بایوت و ν نسبت پواسون در حالت استاتیک می‌باشد. کرنش‌های تکتونیکی ε_h و ε_H نیز از طریق روابط زیر به دست می‌آیند:

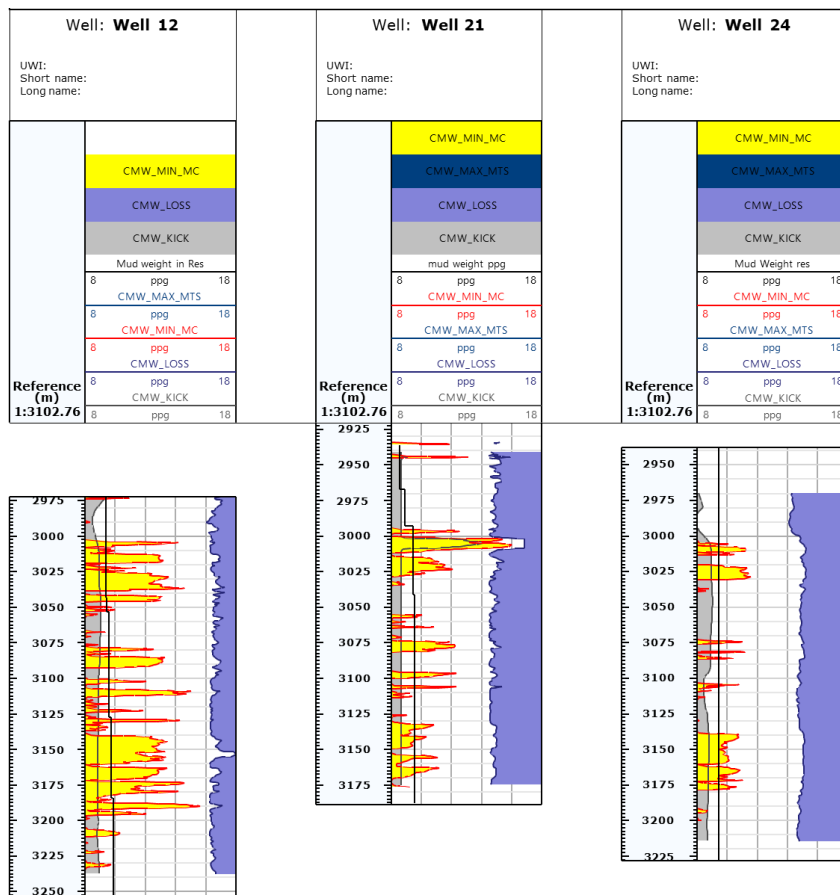
$$\varepsilon_h = \frac{S_v \times \nu}{E} \left(\frac{1}{1-\nu} - 1 \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_H = \frac{S_v \times \nu}{E} \left(1 - \frac{\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (13)$$

در شکل ۴ تنش‌های چاه‌های کاندید به همراه خواص الاستیک استاتیک نشان داده شده است. همان طوری که در



شکل ۴. میدان تنش در مخزن آسماری

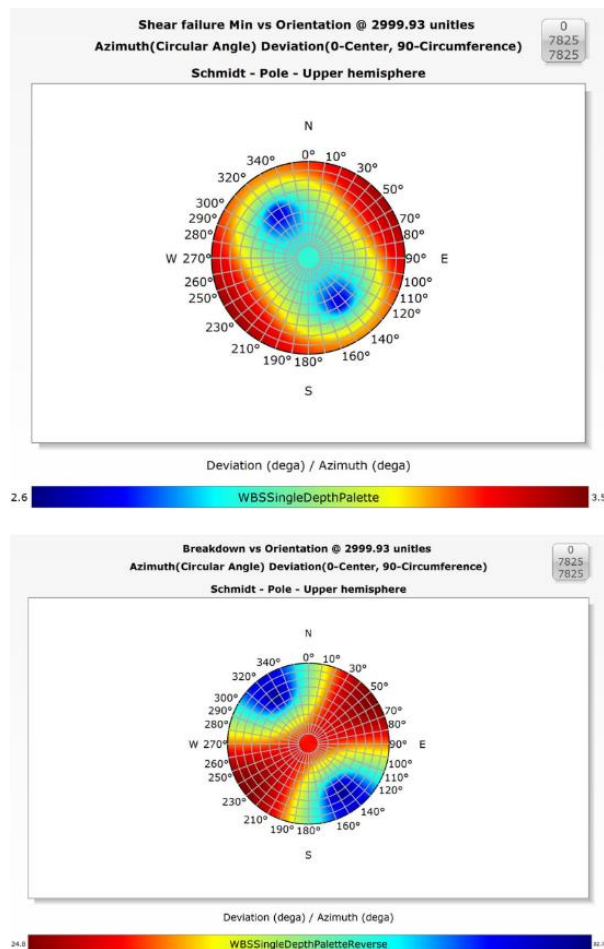


شکل ۵. پنجره‌ی ایمن گل حفاری

۴.۴. تعیین جهت بهینه‌ی حفاری

در این قسمت می‌توان با تعیین تنش‌های اطراف چاه در اثر تغییرات شیب و جهت شیب چاه بهینه‌ترین جهت حفاری را در هر عمق مشخص کرد. آزمون تنش افقی حداکثر نسبت به شمال ۲۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. این زاویه بر اساس جهت تنش حاکم در منطقه به صورت تخمینی در نظر گرفته شده است [۱۶]. در صورت وجود اطلاعات مربوط به کالیپر چند بازویه و یا لاگ تصویری اندازه این زاویه مشخص می‌شود. در شکل ۶ نمودار استریونوت مربوط به جهت بهینه حفاری چاه در عمق ۳۰۰۰ متر برای چاه شماره ۱۲ نشان

داده شده است. مناطق آبی رنگ بیانگر مناطق کم مخاطره حفاری می‌باشند. در این نمودار اعداد روی محیط بیانگر آزمون حفاری و اعداد در جهت شعاع بیانگر شیب چاه می‌باشند. نقطه مرکز بیانگر شیب ۹۰ درجه و چاه قائم بوده و نقاط روی محیط بیانگر چاه افقی می‌باشد. قسمت بالای شکل، آسیب دیدگی چاه از نظر ایجاد شکست دیواره چاه و تولید شکست گوه‌ای بررسی می‌کند. بر این اساس، حفاری با شیب ۴۵ درجه در جهت شمال غرب و جنوب شرق از ایمن می‌باشد. در قسمت پائین شکل، حفاری در آزمون ۳۳۰ درجه و به صورت افقی از نظر ایجاد شکست سازند بهترین شرایط را دارد.

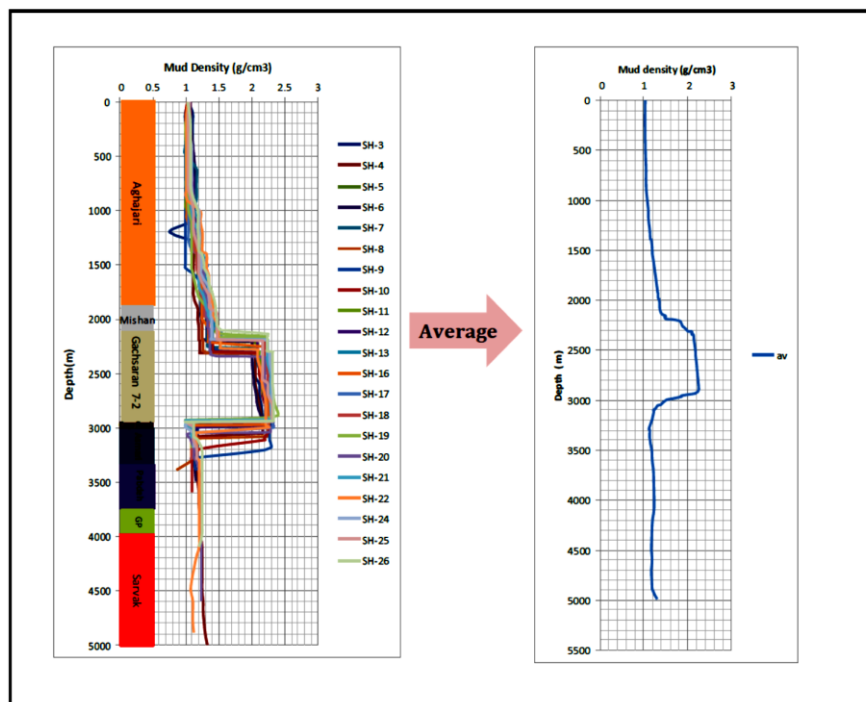


شکل ۶. گراف تعیین جهت بهینه‌ی حفاری

نیست که این پروفایل با چه روشی محاسبه شده است ولی نتایج نشان می‌دهد سازگاری قابل قبولی بین این شکل و محاسبات مدل ژئومکانیکی وجود دارد. لازم به ذکر است که واحد فشار منفذی در این شکل بر حسب چگالی است در صورتی که پروفایل فشار حاصل از سه چاه بر حسب پوند بر اینچ مکعب می‌باشد [۹].

۵. اعتبارسنجی مدل‌های ژئومکانیک

در شکل ۲ پروفایل فشار منفذی و تنش قائم هر سه چاه نشان داده شده است. همان طوری که از شکل مشخص است مقدار فشار سازندها و همچنین فشار روباره در یک اندازه می‌باشد. مقدار ناحیه فرفشار در هر سه چاه در سازند گچساران مشهود است. این چاه را می‌توان با پروفایل فشار سازندهای میدان در طرح توسعه‌ی میدان و شکل ۷ مقایسه کرد. هر چند مشخص



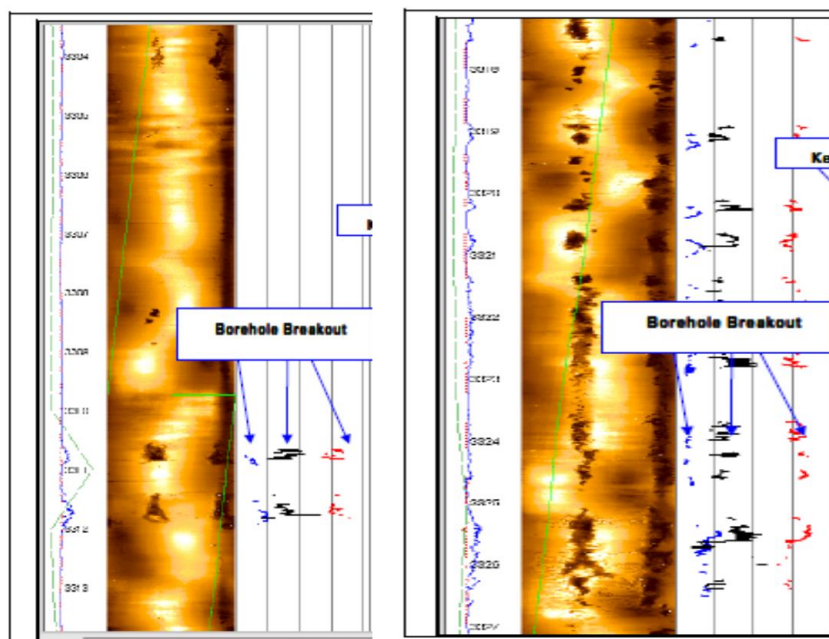
شکل ۷. پروفایل فشار سیال در طول چاه‌های میدان [۹]

میدان واقع شده است. در شکل ۸ لاگ تصویری این چاه نمایش داده شده است. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد سازگاری قابل قبولی بین شکست گوه‌ای محاسبه شده حاصل از مدل‌های ژئومکانیک و لاگ تصویری چاه شماره ۱۳ در مخزن آسماری وجود دارد [۱۷].

نکته دیگری که در خصوص اعتبارسنجی مدل‌های ژئومکانیکی وجود دارد بررسی رژیم غالب تنش در مخزن آسماری میدان مورد نظر می‌باشد. همان طور که در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است رژیم تنش در مخزن آسماری نرمال و نزدیک به رژیم تنش امتداد لغز می‌باشد. با اندکی جستجو در مقالات مختلف می‌توان این قضیه را ثابت کرد [۱۸-۲۰]. طالبی و همکاران به طور

مورد دیگری که می‌توان به کمک آن اعتبارسنجی مدل‌های ژئومکانیک را انجام داد، لاگ‌های تصویری از دیواره چاه می‌باشد. در این لاگ‌ها شکست‌های کششی به صورت یک خط و شکست‌های برشی به صورت ناحیه ریخته شده و یا شکست گوه‌ای نمایش داده می‌شود. بدین ترتیب می‌توان این لاگ‌ها را با محاسبات مربوط به پنجره ایمن گل که در آن چهار مرز شکست سازند، هرزروی گل حفاری، شکست برشی و مرز فوران گل نمایش داده شده است (شکل ۳)، مقایسه کرد. متأسفانه از میان ۲۶ چاه میدان شادگان، فقط برای یک چاه در مخزن آسماری لاگ تصویری گرفته شده است. این چاه شماره ۱۳ است و همانگونه که در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است؛ در طرف دیگر

کامل این قضیه را اثبات کرده اند [۲۱].



شکل ۸. لاگ تصویری چاه شماره ۱۳ [۱۷]

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق، پس از کنترل داده‌های خام میدان، سه چاه کاندید با شماره های ۱۲، ۲۱ و ۲۴ بر اساس داده‌های موجود انتخاب شد. همان طوری که توضیح داده شد، تولید مدل‌های ژئومکانیکی قابل اعتماد، نیازمند طیف وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی و برجا در زمینه حفاری، پتروفیزیک، مخزن و مکانیک سنگ است. متأسفانه علیرغم وجود داده‌های بسیار، فقر داده‌های با درجه‌ی اهمیت بالاتر از منظر ساخت مدل‌های ژئومکانیکی، قابل اطمینان بودن این مدل‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با این وجود مدل‌های مورد نظر بر اساس داده‌های موجود تولید شد.

همان طوری که در متن اشاره شد یکی از نواقص بزرگ داده‌ها، محدود بودن آن‌ها به سازند مخزنی آسماری است. بدین ترتیب تولید پروفایل‌های فشار منفذی سازندها و تنش در طول چاه با چالش مواجه خواهد شد. برای رفع این مشکل و برای محاسبه پروفایل فشار منفذی در طول چاه از داده‌های گزارش‌های روزانه حفاری استفاده شد. بدین ترتیب کلیه پارامترهای حفاری برای چاه‌های کاندید از گزارشات روزانه استخراج شده و نمای حفاری بدست آمد. سپس با استفاده از

این پارامتر پروفایل فشار منفذی محاسبه شد. این پروفایل در مقایسه با تحلیل‌های مشابه مطابقت بسیار قابل قبولی دارد. با توجه به محدودیت‌ها برای محاسبه‌ی خواص الاستیک و مقاومتی سازندها و همچنین تنش‌های برجا و پنجره‌ی ایمن گل حفاری، این موارد در بازه مخزنی محاسبه شد.

پس از تولید مدل‌های یک بعدی ژئومکانیکی، یک تحلیل پایداری چاه برای چاه‌ها ارائه شد که با توجه به حفاری چاه‌های مایل و افقی در طرح توسعه‌ی میدان، اهمیت این موضوع بیشتر می‌شود. بدین ترتیب بر اساس مدل‌های ساخته شده، حفاری چاه‌های افقی در جهت شمال غربی و جنوب شرقی ایمنی بیشتری دارد. از جهت شکست سازند، چاه‌های افقی نسبت به چاه‌های قائم و مایل پایداری بیشتری دارند. به عبارت دیگر بهترین جهت و شیب برای حفر چاه از منظر شکست سازند به ترتیب جهت شمال غرب و شیب صفر (چاه افقی) می‌باشد. از نظر شکست برشی و ریزش دیواره چاه نیز، چاه‌های در راستای شمال غرب و شیب ۴۵ درجه پایداری بهتری خواهند داشت. البته این مورد ممکن است برای اعماق مختلف با تغییراتی همراه باشد.

بدیهی است تولید مدل‌های مدنظر نیازمند اعتبار

۷. فهرست نمادها

جدول ۴. سیاهه نمادها

نماد	واحد	شرح
S_v	Pa	تنش روباره
ρ_z	Kg/m ³	چگالی
$\bar{\rho}$	Kg/m ³	چگالی متوسط
g	m/s ²	شتاب گرانش زمین
Z	m	عمق
P_p	Pa	فشار منفذی
P_n	Pa	فشار منفذی در حالت نرمال
D_c	-	نمایه حفاری
D_{cn}	-	نمایه حفاری در حالت نرمال
ROP	m/s	نرخ نفوذ سرمته
RPM	Rotate/min	سرعت دور سرمته
WOB	Kg	وزن روی سرمته
BS	m	قطر مته
MW	N/m ³	وزن گل
MW_n	N/m	وزن گل در حالت نرمال
V_p	m/s	سرعت امواج فشاری
V_s	m/s	سرعت امواج برشی
UCS	Pa	مقاومت تک محوری
ϕ	-	تخلخل
\emptyset	Deg	زاویه اصطکاک داخلی
V_{shale}	V/V	حجم شیل
$NPFI$	-	لاگ نوترون تخلخل
S_{hmin}	Pa	تنش افقی حداقل
S_{hmax}	Pa	تنش افقی حداکثر
ν	-	ضریب پواسون
E	Pa	مدول یانگ
ϵ_h	-	کرنش افقی حداقل
ϵ_H	-	کرنش افقی حداکثر
α	-	ضریب بایوت

سنجی است که این کار با نتایج حاصل از تست های برجا، نمودارهای درون چاهی و تست های آزمایشگاهی قابل انجام است. با توجه محدودیت داده ها در این زمینه، یکی از روش های اعتبارسنجی کار استفاده از لاگ های تصویری چاه دیگر بود. اگرچه این چاه طرف دیگر میدان قرار داشت اما عدم وجود ساختار زمین شناسی پیچیده در میدان، تا حدودی این مقایسه را توجیه می کند. نتایج این مقایسه نشان می دهد که سازگاری قابل قبولی در این خصوص برقرار است. تعیین فشار منفذی و تنش های برجا به عنوان مهم ترین بخش های مدل ژئومکانیکی یکی دیگر از موارد برای اعتبارسنجی می باشد. مقایسه پروفایل فشار منفذی در طول چاه با مطالعات دیگر در طرح توسعه میدان کاملاً همخوانی دارد. اندازه گیری تنش های برجا و تعیین رژیم تنش حاکم بر مخزن آسماری با مقالات موجود و تحقیقات گذشته در این زمینه هم خوانی دارد. از طرفی تکرارپذیری نتایج مربوط به هر سه مدل مورد مطالعه می تواند به صورت قابل توجهی، احتمال وجود خطای انسانی در محاسبات را کاهش دهد.

۸. مراجع

[1] Al-Qahtani, M. Y., & Rahim, Z. (2001). A mathematical algorithm for modeling geomechanical rock properties of the Khuff and Pre-Khuff reservoirs in Ghawar field, SPE 68164.

[2] Mohiuddin, M. A., Awal, M. R., Abdulraheem, A., & Khan, K. (2001). A new diagnostic approach to identify the causes of borehole instability problems in

fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141, 38-51.

[15] Khaksar Manshad, A., Jalalifar, H., & Aslannejad, M. (2014). Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4, 359-369.

[16] Rajabi, M., Sherkati, S., Bohlooli, B., & Tingay, M. (2010). Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonate (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran. *Tectonophysics*, 492 (1-4), 192-200.

[۱۷] صابری، ا. (۱۳۹۲). مطالعه زمین شناسی و به روز رسانی مدل زمین شناسی شادگان. اداره مطالعات زمین شناسی مخازن هیدروکربوری، مناطق نفت خیز جنوب.

[۱۸] فارسی مدان، م؛ احمدی، م؛ آهنگری، ک؛ دشت بزرگی، ج. (۱۳۹۳). تعیین محدوده تنش برجا در اطراف چاه های آسیب دیده میدان نفتی مارون. نشریه زمین شناسی نفت ایران، ۳ (۶)، ۱-۲۱.

[۱۹] نجیبی، ع؛ غفوری، م؛ لشکری پور، غ؛ آصف، م. (۱۳۹۶). تخمین جهت و مقدار تنشهای برجا به روش تحلیل بریکات در یکی از چاه های نفت جنوب غرب ایران. نشریه زمین شناسی مهندسی، ۱۱ (۴)، ۴۵۵-۴۷۰.

[۲۰] میرانی، م؛ حبیب نیا، ب. (۱۳۹۳). تحلیل پایداری دیواره چاه در زمان حفاری با استفاده از مدل ژئومکانیکی و نرم افزار FLAC 3D در مخزن آسماری میدان نفتی شادگان. نشریه زمین شناسی نفت ایران، ۳ (۷)، ۶۸-۸۴.

[۲۱] طالبی، ح؛ علوی، ا؛ قاسمی، م؛ شرکتی، ش. (۱۳۹۸). تفاوت رژیم بر جای وابسته به موقعیت ساختاری و ویژگی های ژئومکانیکی، نمونه موردی در سازند گچساران و آسماری جنوب باختری ایران. فصلنامه زمین شناسی ایران، دوره ۱۳ (۴۹)، ۹۹-۱۱۵.

an offshore Arabian field, SPE 68095.

[3] Al-Ruwaili, S. B., & Chardoc, O. (2003). 3D model for rock strength and in-situ stresses in Khuff formation of Ghawar field, SPE 81476.

[4] Abalioglu, I., Legarre, H., & Salier, B. (2011). The role of geomechanics in diagnosing hazards and providing solutions to the northern Iraq fields, SPE 142022.

[5] Ramjohn, R., Gan, T., & Sarfare, M. (2018). 3D geomechanical modeling for wellbore stability analysis: Starfish, ECMA, Trinidad and Tobago, SPE 191242.

[6] Bagheri, H., Ayatizadeh Tanha, A., Doulati Ardejani, F., Heydari-Tajareh, M., & Larki, E. (2021). Geomechanical model and wellbore stability analysis utilizing acoustic impedance and reflection coefficient in a carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11, 3935-3961.

[۷] ماهیگیر، ع. ح. (۱۳۸۸). مطالعه جامع مخزن آسماری. فاز تعیین مشخصات مخزن شادگان، شرکت مناطق نفت خیز جنوب.

[۸] فرازمنده، ک. ح. (۱۳۹۰). مطالعه جامع میدان شادگان، شرکت مناطق نفت خیز جنوب.

[9] Tenco. (2018). Shadegan Oil Field Study Master Development Report. Tehran: TENCO.

[10] Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108 (1-2), 50-63.

[11] Najibi, A. R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G., & Asef, M. (2017). Reservoir geomechanical modeling: In-situ stress, pore pressure, and mud design. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151, 31-39.

[12] Rzhnevsky, V., & Novick, G. (1971). *The Physics of Rocks*. MIR Publication.

[13] Gholami, R., Rasouli, V., Aadnoy, B., & Mohammadi, R. (2015). Application of in situ stress estimation methods in wellbore stability analysis under isotropic and anisotropic conditions. *Journal of Geophysics and Engineering*, 12 (4), 657-673.

[14] Kidambi, T., & Kumar, G. (2016). Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally