

ساخت یک مدل زمین به‌منظور تعیین پنجره ایمن گل حفاری در یکی از میادین جنوب غربی ایران

کوروش آریافر^۱ و علی‌نقی دهقان^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

چکیده

امروزه بسیاری از پروژه‌های عملیاتی در چاه‌های نفت و گاز دارای چالش‌های فنی و اقتصادی هستند. از این رو حذف زمان غیر مولد (وقفه‌های موجود) در کنار پیش‌گیری از هرزروی، کیک و ناپایداری چاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روندهای نرمال تراکمی، به‌عنوان پایه‌های اصلی پیش‌بینی فشار منفذی و فشار شکست سازند می‌باشند که دقت در تعیین آن‌ها اهمیت به‌سزایی دارد. در این مطالعه با ساخت یک مدل زمین براساس ویژگی‌های ژئومکانیک یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب کشور عمق ۴۰۰ تا ۴۳۰۹ m (سازند فهلان) پنجره ایمن گل حفاری تعیین شد. ساخت مدل زمین با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ (Geolog.v19) و روابط تجربی انجام شده است. برای ساخت این مدل ابتدا روندهای نرمال تراکمی تعیین و با یکدیگر مقایسه و مناسب‌ترین توابع انتخاب شدند. فشار منفذی تخمین زده شده براساس روش ایتون با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی انطباق خوبی نشان داد و از این رو مناسب‌ترین نگاره برای تعیین پنجره اولیه گل حفاری انتخاب شد. همچنین فشار شکست برآورد شده با روش‌های برکلز-ونیکلن و هابرت-ویلز انطباق خوبی با گزارش حفاری نشان دادند اما روش هابرت-ویلز به مقادیر فشار سازند نزدیکی بیشتری نشان داده است. مقایسه میان اندازه تنش‌های برجا نشان داد که رژیم تنش حاکم در اکثر عمق‌ها برخلاف نقشه رژیم گسلش منطقه که عمدتاً امتداد لغز و معکوس هستند، نرمال می‌باشد. تنش‌های برجای حاصل از نگاره صوتی با چند ضلعی تنش تعیین شده از معیار شکست موگی-کولمب همپوشانی مناسبی دارند. تعیین وزن گل بهینه با استفاده از معیارهای شکست مختلف محدوده وزن گل را ۵/۹۵-۱۳/۱۳ پوند بر گالن در عمق ۴۰۰۲ تا ۴۳۰۹ m نشان می‌دهند. معیار شکست موهر-کولمب نسبت به معیار شکست موگی-کولمب حد پایین پنجره گل را کمی بیشتر تعیین کرده است.

کلمات کلیدی: مدل مکانیکی زمین، پنجره ایمن گل حفاری، ناپایداری چاه، روندهای نرمال تراکمی، معیارهای شکست

مقدمه

در صنعت نفت و گاز ۵/۶٪ از هزینه کل حفاری چاه‌ها، صرف پایداری آن می‌گردد. به‌طور میانگین برای برطرف نمودن مشکلات پایداری چاه به‌ازای هر فوت مبلغ ۱۲۷/۷۳ دلار پرداخت می‌شود. از این رو حذف زمان غیرمولد یک اقدام ضروری در این صنعت می‌باشد، لذا با مدیریت وقفه‌های قابل پیش‌بینی در مسیر حفاری، می‌توان فرآیند حفاری را کم‌هزینه و کوتاه نمود. طراحی عملیات حفاری کم‌هزینه و کم‌خطر نیازمند ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، پتروفیزیک و داده‌های مغزه است که خود شامل اطلاعات آزمون، شیب، مسیر، پارامترهای قابل کنترل، مقاومت سنگ محصور نشده^۱، فشار منفذی و تنش برجا است که سبب افزایش بازدهی عملیات حفاری می‌شود [۳-۸]. روش‌های تجربی زیادی وجود دارد تا بتوان فشار منفذی را در حین حفاری محاسبه نمود، انتخاب روش مناسب جایی اهمیت پیدا می‌کند که پنجره گل باریک باشد. برای بررسی مشکلات حفاری باید اطلاعات جامع زمین‌شناسی را جمع‌آوری نمود و آن را به‌کار برد و برای مدیریت صحیح حفاری و جلوگیری از اتلاف هزینه اضافی، مدل مکانیکی زمین باید در برنامه و عملیات حفاری استفاده شود که این کار در مطالعه موردی در خلیج مکزیک استفاده شده است [۱۳]. بررسی حفاری لایه‌های زیر نمک که هزینه آن تا ۱۰۰ میلیون دلار نیز می‌رسد، نشان می‌دهد استفاده از مدل مکانیکی زمین به‌دلیل آشفتگی تنش‌برجا در آن قسمت بسیار گران‌بها می‌باشد. لذا دانشمندان توانستند جهت تشخیص یک راه مناسب برای تفهیم تأثیر مدل مکانیکی زمین در عدم قطعیت در زیر لایه‌های نمکی در طراحی چاه به محققان و مهندسان نفت کمک شایانی نمایند [۱۴]. بررسی چالش‌های ژئومکانیکی-حفاری مانند حفاری در مخزن تخلیه شده کم عمق یا حفاری با زاویه زیاد در شیل‌های خورد شده و همچنین حفاری افقی نشان داد که افزایش محتاطانه وزن گل

و کاهش زاویه چاه در حین حفاری می‌تواند از بروز مشکلات جلوگیری کند و همچنین بیشتر مشکلات ناپایداری چاه به‌دلیل عملیات لوله بالا-لوله پایین^۲ رشته حفاری اتفاق می‌افتد [۱۶]. می‌توان قبل از عملیات حفاری با استفاده از تطابق اطلاعات چاه‌های مجاور که قبلاً در میدان مورد نظر حفاری شده بود پنجره گل^۳ را با اطلاعات چاه‌های مجاور تعیین کرد و بدین‌وسیله عدم قطعیت در داده‌ها را تشخیص داد. بنابراین نتیجه می‌شود که مدل پنجره گل قبل از زمان شروع حفاری را می‌توان حتی بدون دانستن مقاومت فشاری محصور نشده و استرس در چاه پیش‌بینی کرد [۱۲]. استفاده همزمان از پنجره گل پیش‌بینی شده و بررسی لحظه‌ای فشار حلقوی می‌تواند احتمال عملیات حفاری و عملیات لوله بالا-لوله پایین را در پنجره باریک گل کاهش دهد و فشار را نیز در ناحیه ایمن گل حفاری نگه دارد [۱۸]. ترکیب روش اندازه‌گیری شکاف هیدرولیکی با روش مدل مکانیکی زمین یک مدل جدید را می‌سازد که این مدل قادر است مخزن را دقیق‌تر شبیه‌سازی و به انتخاب محل مناسب برای ایجاد شکاف در چاه کمک کند [۱۹-۲۴]. مقایسه نتایج مدل یک بعدی مکانیکی زمین با مدل محدود شده سه‌بعدی مکانیکی زمین و نشان می‌دهد که نتایج مدل یک بعدی مکانیک زمین مدلی جامع‌تر می‌باشد اما صحت‌سنجی نتایج، نیازمند ابزار دقیق‌تری مانند مدل‌های محدود شده سه‌بعدی است که باعث می‌شود به پیش‌بینی‌های رژیم استرس (جهت و مقدار استرس) بیشتر اعتماد کرد و همچنین نشان داد که می‌توان از طریق ادغام مدل‌های مختلف، اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات، عدم قطعیت را کاهش داد [۳۷]. برای چاه گازی پر فشار با پنجره باریک گل که مقدار فشار منفذی و فشار شکست سازند در آن خیلی نزدیک به هم هستند.

1. Unconfined Compressive Strength (UCS)

2. Tripping

3. Mud-Window

استفاده می‌شود و میزان انحراف تنش نزدیک ناحیه برشی (مانند گسل) در چندین چاه بررسی شده و شکستگی چاه را در طاق‌دیس اهواز تطابق داده و توانستند جهت شکستگی را تشخیص دهند (با استفاده از روش بررسی مورفولوژی شکستگی) و گسل فعال و غیرفعال را شناسایی کنند [۳۱]. مطالعه گسترده بر پنجره گل پیش از حفاری برای مدل‌سازی ژئومکانیک و مقاومت بسیار عمیق (جهت مشخص کردن فاصله، جهت مرزهای زمین‌شناسی) به توسعه یک نقشه راه برای بررسی فرآیند حفاری چاه ایمن کمک می‌کند [۳۲]. پایداری دیواره چاه یک جنبه ضروری از عملیات چاه است و دارای استانداردهای سخت‌گیرانه درباره این موضوع است. فرسایش لوله مغزی و لوله جداری بیشترین خطر را در این موضوع دارد و به‌طبع آن باید چالش‌های آن بررسی شود. برای رفع این موضوع یک مدل عددی پیش‌بینی روند کاهش مقاومت لوله مغزه ایجاد شده است تا موانعی که باعث کوتاه کردن عمر لوله مغزه شود را مرتفع کند و برای اولین بار روش بیشترین مقدار فشار قابل قبول در سطح به‌کارگیری شد و باعث کاهش این مشکلات شده است [۳۳]. کنترل و اندازه‌گیری خواص سیال حفاری برای ایمنی و موفقیت در عملیات‌ها ضروری است. روش‌های قدیمی کند هستند و نیاز به نیروی کار فراوان و نظارت دیجیتال (مانیتورینگ) دارند. بر روی یک سیستم جدید برخط برای نظارت دیجیتال سیال حفاری کار شده است و قابلیت کنترل هوشمند سیال حفاری را دارد. سیستم نظارت دیجیتال برخط علاوه‌براینکه باعث ایمنی در این صنعت حفاری شده است بلکه خواص سیال را به‌طور موفق و دقیق تشخیص داده و همچنین (به‌موقع) ارتباط بین وسایل هوشمند را برقرار می‌کند. این سیستم باعث پیشرفت مدیریت سیال حفاری به‌صورت چشم‌گیری شده است.

می‌توان از حفاری با فشار مدیریت شده تمام اتوماتیک^۱ استفاده کرد و فشار ته چاه را کنترل کرد. همچنین با این کار می‌توان موفق به صرفه جویی در وقت، کاهش هزینه گل، کاهش هزرزروی گل و کاهش گیر لوله نیز شد [۱۸]. منطبق کردن نمودار مچالگی لوله جداری با نمودار پنجره گل و شکست سازند می‌تواند باعث پیش‌بینی قابل اعتمادتری شود و همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که عدم قطعیت در فشار منفذی تأثیر زیادی در عدم قطعیت گرادیان شکست و گرادیان مچالگی در طول مسیر چاه دارد که در نتیجه این روش باعث کاهش عدم قطعیت در پنجره گل می‌گردد [۱۸]. فشار منفذی به پارامترهایی مانند: تنش افقی، گرادیان شکست، خواص سنگ وابستگی مستقیم دارد. همچنین با استفاده از آنالیز روند نرمال تراکمی^۲ و مدل کردن فشار منفذی می‌توان عدم قطعیت را کاهش داد [۱۹ و ۲۰]. علی‌رغم پیشرفت در این صنعت هنوز مشکل ناپایداری در چاه‌های پرریسک وجود دارد که فقط محدود به گیر لوله نمی‌شود، بلکه شامل مشکلات هزرزروی و شکستگی نیز می‌شود [۲۵]. بررسی پایداری دیواره چاه نیازمند مجموعه اطلاعات کاملی است، شامل مغزه، داده‌های پتروفیزیک که همیشه موجود نیستند [۲۶]. معیار شکست موگی-کولمب در مدل‌سازی، دقیق‌تر از معیارهای موهر-کولمب و دراکر-پراگر می‌باشد و نیز اثر تنش میانی را در تقویت سنگ در نظر می‌گیرد [۲۷]. ایو نشان داد که معیارهای موهر-کولمب و دراکر-پراگر برای پیش‌بینی حداقل وزن گل که دیواره چاه را نگه دارد، نامناسب می‌باشد [۲۸]. نتایج ویبلز-کووک و لید اصلاح شده از لحاظ آماری شبیه هم هستند [۲۹]. مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های رسوبی یک پارامتر اصلی برای مشخص کردن بازه مشکلات ژئومکانیکی از مشکلات ناپایداری دیواره چاه در حین حفاری است [۳۰]. به‌منظور بهره‌برداری از ویژگی‌های شکستگی چاه شامل آزمونوت، پهنا و عمق شکست از ابزار فراصوتی

1. 1 Fully Automated Managed-Pressure-Drilling

2. Normal Compaction Trend (NCT)

این سیستم ده پارامتر اساسی را به صورت مداوم اندازه گیری می کند که این پارامترها شامل رئولوژی، دانسیته، pH و تمرکز یون^۱ هستند که برای اندازه گیری ویسکوزیته و دانسیته از تکنولوژی لوله با قطر متغیر استفاده شده است. این سیستم راه را برای آنالیز داده به صورت اتوماتیک برای فرآیند تصمیم گیری هوشمندانه، توسعه و آینده این صنعت هموار می سازد [۳۵]. بعد از فوران در چاه شماره MC 252-1 (چاه ماکندو^۲) در ۲۰ اپریل در خلیج مکزیک تلاش های زیادی برای بهبود واکنش این صنعت در مقابل حوادث این چنینی انجام شده است. مدل کردن، نظارت دیجیتال (مانیتورینگ) مخزن و فشارهای دهانه چاه نقش اساسی در تصمیم گیری برای کشتن چاه دارند. مدل سازی فشار باید به عنوان اهرمی برای تصمیم گیری ایمن باشد که خود شامل خواص سیال حذف شده از مخزن (به عنوان مثال مقدار فشار تخلیه) است که این کار معمولاً بعد از فوران در دکل های دریایی برای انتخاب استراتژی Well-capping (چاه هایی که دیگر قابل استفاده نیستند ولی در آینده ممکن است کلاhek بالای هر لوله جداری به منظور جلوگیری از ورود آلودگی نصب شود) صورت می گیرد که می تواند از به خطر افتادن یکپارچگی چاه توسط فوران های زیرزمین (شکستگی کششی در قسمت هایی از چاه) جلوگیری کند. این فوران های زیر زمین به صورت بالقوه می توانند به سطح زمین برسند. برای تکمیل ارزیابی یکپارچگی چاه ممکن است گسیختگی های دیگری در قسمت جداری در طی زمان ترخیص فوران اتفاق بیافتد. این گسیختگی ها مکان های کم عمقی ایجاد کند که فوران از آنجا می تواند اتفاق بیافتد [۳۵]. لایه آسماری-چهرم واقع در جنوب غربی ایران یکی از مخازن شکافدار اصلی جهان است. تشخیص شکستگی ها در افزایش نرخ هیدروکربن و تراوایی بیشترین نقش را دارد. نگاره های مرسوم پتروفیزیکی (نوترون، دانسیته، صوتی و گاما) و نگاره های تصویری (مانند نگاره FMI) برای بررسی خواص مخزن بررسی

می شوند. از تخلخل سه گانه برای بررسی مخزن و شناسایی واحدهای جریان در مخازن آسماری-چهرم توسط نگاره های تصویری چاه و پتروفیزیکی استفاده شده است. این مدل مخازن شکافدار به خصوص شکاف های طولی کمک کردند تا تخلخل ثانویه بهبود یابد و کمک کند تا کیفیت بهره برداری (واحد جریان) بهبود یابد. این موضوعات اهمیت شناسایی شکاف در بهینه سازی مخازن و نرخ تولید به خصوص در مخازن هیدروکربنی دارد. ادغام نگاره های FMI و پتروفیزیکی به عنوان یک روش مؤثر برای شناسایی شکاف ها در این سازندها را دارد. شناسایی مرز چینه ها، شکاف های باز، شکاف های پر، شکاف های القایی، استریولتها و انواع تخلخل به شناخت ساختار پیچیدگی های مخزن کمک می کند و نتایج نشان داد که شکاف موجود در سارند چهرم دانسته ی بالایی دارد. به صورت کلی، پارامترهای پتروفیزیکی و زمین شناسی در مخزن آسماری-چهرم پایه و اساس شناخت مخازن و روش های پیدایش هیدروکربن است. ادغام روش های نمودارگیری و استفاده از منابع داده ها، خروجی های را بهبود داد و نتایج قابل اعتمادتر و دقیق تر شدند که این موضوع می تواند راه را برای تحقیقات بیشتر در زمینه مدیریت میدان-مخازن هموار سازد [۳۶]. در این تحقیق با ساخت یک مدل زمین با استفاده از اطلاعات چاه شماره ۱۲۳ در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران و با بررسی پارامترهای ژئومکانیک و به حداقل رساندن عدم قطعیت داده ها، پنجره ایمن گل حفاری تعیین می شود. از این رو ابتدا فشار هیدرواستاتیکی و فشار روباره (وزن روباره) توسط روابط تجربی برآورد می گردد. سپس روندهای نرمال تراکمی، فشار منفذی و فشار شکست توسط پارامترهای برآورد شده، تخمین زده شده و سپس پنجره گل با استفاده از جای گذاری پارامترهای به دست آمده در معیارهای شکست مختلف، تعیین می شوند.

1. Ionic Concentrations
2. Macondo Well

است. مهم‌ترین ساختار این منطقه نفتی شامل میدان‌های جفیر، دارکین، امید و هنديجان است. چهار لایه تولیدی این چاه شامل سروک، کژدمی، گدوان و فهلپان است. قسمت فوقانی کرتاسه سازند سروک عمدتاً شامل کربنات‌های توده‌ای در عمق کم است. عمده تولید نفت مربوط به لایه کا-سند^۱ از سازند کژدمی است. میزان نفت در مخزن این میدان بیش از ۳۳۰۰۰ میلیون بشکه و مقدار نفت قابل بازیابی در این میدان، حدود ۶ میلیون بشکه است. یکی از لایه‌های مهم آن فهلپان است، محدوده شروع سازند فهلپان عمق ۴۰۸۰ m است و جنس این لایه با سنگ آهک سفید دارای لکه‌های سفید و شیل شروع (جنس آن با سختی متوسط و سختی بالا است) و در ادامه جنس آن ماسه سنگ قهوه‌ای-قهوه‌ای تیره (نوع چالکی و جنس آن با سختی متوسط) است. درصد شیل در این لایه حدوداً ۳۳٪، درصد سنگ آهک ۷۳٪ و درصد کلسیت ۱۸٪ تعیین شده است. سازند فهلپان با سنگ آهک نوع ۱-۲ (I/II) با رنگ سفید کم رنگ و سفید با لکه‌های مشکی است. سختی شیل در این ناحیه متوسط تا سخت است، در ادامه سنگ آهک ۱-۲ (I/II) (نوع چالکی) به رنگ قهوه‌ای تیره قرار گرفته است، سن این لایه نئوکومین است. خصوصیات توده سنگ برای سازندها در میدان مورد مطالعه در **جدول ۱** گردآوری شده است (گزارش تکمیل زمین‌شناسی چاه عمودی توصیفی یکی از میادین جنوب غربی ایران) [۳۷].

معرفی نرم‌افزار

نرم‌افزار ژئولاگ نسخه ۱۹، نرم‌افزار شرکت امرسون می‌باشد که برای ارزیابی سازند و آنالیز پتروفیزیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1. 1 Modular Formation Dynamics Tester
2. Formation Integrity Test
3. Leak-Off Test
4. Formation Miro Imager
5. The Repeat Formation Tester
6. Outcrop
7. K-Sand Member

صحت‌سنجی مدل مکانیکی براساس مقادیر فشار به‌دست آمده از آزمایش MDT^۱، FIT^۲، LOT^۳، نتایج آزمایش تک محوری، نگاره تصویری (FMI)^۴ و آزمایش RFT^۵ صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند گام مؤثری در بهبود و کاهش چالش‌های پیش‌رو در زمان حفاری چاه از جمله مشکلات پارگی لوله حفاری، پدیده شستشوی دیواره چاه و گیرلوله و غیره در چاه‌های با خصوصیات زمین‌شناسی مشابه (سازند فهلپان) داشته باشد.

میدان نفتی مورد مطالعه

میدان نفتی جنوب غربی-ایران که شامل قسمت‌های عظیم مخزنی نیز هست برای اولین بار کشف شد. چاه در این میدان حفاری شده بود، که تاکنون بیشترین عمق حفاری شده ۵۳۴۰ m در سازند نیزاران بوده است. چهار چاه توصیفی در میدان حفاری شده است که یکی از این چاه‌ها تا عمق ۳۹۱۵ m حفاری و پایان یافته و چاه دیگر تا عمق ۴۳۰۰ m در سازند فهلپان حفاری شده است. این میدان همسو با خط مرزی ایران-عراق است. حفاری این میدان در امتداد محور طولی تاقدیس در جهت شمال جنوب بوده است که طول آن به‌طور تقریبی ۶۰ km و پهنای آن ۲۰ km است که این طاقدیس با طول زیاد متعلق به صفحه‌ی عربی است نه صفحه زاگرس. صفحه آبادان به‌صورت ساختاری طاقدیس است و در جنوب غربی ایران واقع شده است. مرزهای آن شامل کمر بند زاگرس در شمال شرق و خلیج فارس در جنوب است. به‌صورت کلی، طاقدیس‌های در جهت شمال جنوب از صفحه آبادان به‌صورت رخنمون^۶ ظاهر نشدند اما در زیرسطح زمین قرار دارند. از منظر زمین‌شناسی، صفحه آبادان ادامه قسمت شمال شرق صفحه‌ی عربی است و ساختار اصلی آن با کویت، جنوب عراق، جنوب خلیج فارس و شمال شرقی عربستان سعودی منطبق است. در لرزه نگاری دو بعدی و سه‌بعدی هیچ رخنمونی برای این میدان مشاهده نشده

جدول ۱ ویژگی‌های زمین‌شناسی برای سازندهای مختلف در میدان مورد مطالعه [۲۸]

دوره زمین‌شناسی	سن	سازند	عمق (m)	ویژگی‌های زمین‌شناسی
سنوزوئیک	موسین-پلیسین	آقاجاری	۰ تا ۱۰۲۵/۴	این لیتولوژی شامل ماسه سنگ، سنگ لای (Siltstone)، مارل (قرمز قهوه‌ای-قهوه‌ای)، سنگ رس، سنگ آهکی نرم تا سخت. حفاری در این لایه با وزن گل 68 lb/ft^3 انجام شده و به آرامی تا 83 lb/ft^3 زیاد شد
		گچساران	۱۰۲۵/۴ تا ۱۳۴۶/۲	سازند شامل انیدریت، مارل، سنگ رس، سنگ آهکی. (اندریت آن نرم تا سخت متوسط است، مارل خاکستری نرم و چسبناک است)
		آسماری	۱۳۴۶/۲ تا ۱۵۹۰/۵۳	سنگ آهکی کرم رنگ با مقاومت متوسط-سخت، ارجیلیت (Argillaceous) و دولومیت، مارل خاکستری که نرم و چسبناک است
		پابده/چهرم	۱۵۹۰/۵۳ تا ۱۶۸۵/۷۱	دولومیت قهوه‌ای روشن، سنگ آهکی سفید خاکستری با ارجیلیت زیاد و مارل
	دوره قبل از پلیوسین و دوره قبل از اولیگوسین	چهرم	۱۶۸۵/۷۱ تا ۱۹۶۰/۸۳	دولومیت قهوه‌ای روشن، سنگ رسوبی نوع چالکی که مقاومت آن نرم است و مابین لایه‌های انیدریت واقع شده است
مزوزوئیک	قسمت بالایی پالتوسن و دوره قبل از اولیگوسین	پابده	۱۹۶۰/۸۳ تا ۲۲۳۹/۳۵	مارل خاکستری-خاکستری تیره دارای مقاومت نرم، با ماسه سنگ-ارجیلیتی که رنگ آن قهوه‌ای تیره است که نرم و چسبناک است
	کامپرین و ماستریکتین ^۱	گورپی	۲۲۳۹/۳۵ تا ۲۶۱۶/۹۲	ارجیلیت-سنگ آهکی به رنگ خاکستری روشن با مقاومت نرم تا متوسط سخت و چسبناک
	قسمت بالایی کرتاسه	ایلام	۲۶۱۶/۹۲ تا ۲۷۰۵/۲۲	سنگ رسوبی سفید-کرم با مقاومت نرم تا متوسط سخت، ماسه سنگ قرمز رنگ متمایل به قهوه‌ای که بین دو ناحیه شیل قرار گرفته به همراه ارجیلیت و لکه‌های نفتی
		لافان	۲۷۰۵/۲۲ تا ۲۷۱۱/۶۶	ماسه سنگ خاکستری، نرم و چسبناک
	دوره کرتاسه پسین (سنومینین) و تورونین	سروک	۲۷۱۱/۶۶ تا ۳۳۶۵/۹۷	سنگ‌های کرم روشن که در آن مقداری سنگ آهکی تیره رنگ قرار دارد و عمده سنگ رسوبی در این سازند خاکستری و کرم رنگ با مقاومت نرم تا متوسط سخت است. این سازند دارای شکستگی‌هایی پر از نفت است که به وضوح در نمونه‌ها دیده شده است شیل ناحیه اصلی سازند خاکستری تیره-مشکی با مقاومت متوسط سخت است. سنگ آهکی و سنگ آهکی-ارجیلیتی به رنگ خاکستری-خاکستری روشن با سختی متوسط (مقاومت متوسط سخت)

ادامه جدول ۱

دوره زمین‌شناسی	سن	سازند	عمق (m)	ویژگی‌های زمین‌شناسی
	آلبین-سنومنین ^۱	کژدمی	۳۳۶۵/۹۷ تا ۳۵۷۳/۰۵	این سازند شامل شیل خاکستری تیره و مارل خاکستری تیره و آرجلیت-سنگ آهکی، قسمت میانی دارای سنگ‌های چالکی-سنگ رسوبی است و قسمت پایینی ماسه سنگ سفید با دانه بندی خیلی ریز-ریز بین لایه‌های شیل قرار گرفته است
	قسمت فوقانی کرتاسه	داریان	۳۵۷۳/۰۵ تا ۳۷۲۸/۴۲	سنگ آهکی کرم روشن با مقاومت متوسط سخت همراه با سنگ رسوبی آرجلیتی با مقاومت متوسط سخت، قسمتی اصلی سازند دارای سنگ رسوبی آرجلیتی است
	قسمت فوقانی کرتاسه (بارمین و اپشن ^۲)	گدوان	۳۷۲۸/۴۲ تا ۴۰۳۹/۹۸	سنگ آواری، شیل خاکستری با مقاومت متوسط سخت، سنگ رسوبی خاکستری روشن با مقاومت متوسط سخت همراه آرجلیت، قسمت پایینی سازند دارای ماسه سنگ خاکستری نرم، چسپناک و آهکی
	نیوکومین ^۳	فهلپیان	۴۰۳۹/۹۸ تا ۴۳۰۶	سنگ آهکی خاکستری همراه با لکه‌های تیره و شیل (نوع چالکی) دارای مقاومت نرم تا متوسط سخت. همچنین در این سازند سنگ آهکی چالکی به رنگ سفید دیده شده است

پتروفیزیک‌دان‌ها و مهندسی‌ن کمک می‌کند تا عملیات روزانه خود را انجام دهند و همچنین باعث فرآیند بهبود آن‌ها در تمام مراحل عملیات چاه شود [۳۸].

ساخت و مدل تجزیه و تحلیل نتایج

در این مطالعه به‌منظور ساخت مدل زمین، روش‌های تخمین فشار منفذی و فشار شکست و نیز عواملی که باعث انحراف نمودار پنجره اولیه گل از روند اصلی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. دقت در تعیین پنجره گل نیازمند تخمین پارامترهای ژئو موثر دارد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد مدل‌سازی توسط نرم‌افزار ژئولاگ انجام شد. مدل ارائه شده در نرم‌افزار ژئولاگ، ابتدا نیازمند یک سری داده‌های ورودی می‌باشد که شامل اندازه‌گیری ارتفاع بالای سطح دریا، ارتفاع زمین از سطح دریا، نوع دکل که شامل خشکی و دریایی است.

ورژن ۱۹ که از فرآیند لرزه‌نگاری تصویری تا مدل‌سازی مخزن را پوشش می‌دهد نسبت به نسخه‌های قبل بهبود یافته است. این نرم‌افزار نمای کلی از سازند را ارائه می‌کند. علاوه‌براین، ماژول‌های جدیدی در این ورژن اضافه شده که به سهولت می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. ژئولاگ دارای یک پایگاه داده قوی از چند چاه است که تعداد زیادی از چاه‌های پر بازده که منحصر به‌فرد هستند را شامل می‌شود. ابزار جدید در ژئولاگ ۱۹ به‌صورت تعاملی داده‌ها را در چاه‌های زیادی پیدا، تصویرسازی و پردازش می‌کند و به‌صورت کاربردی در فرمت‌های مختلف نمایش می‌دهد. خروجی نرم‌افزار به‌صورت جدول نمایش داده می‌شود که می‌تواند یا در پایگاه داده چاه ذخیره یا به‌صورت فایل txt، نشان داد شود. همچنین، خط زمانی مرتبط با ارائه عملیاتی که کامل شده یا در حال تکمیل شدن می‌باشد را در چاه مورد نظر نشان می‌دهد. این نرم‌افزار از نمایش یک‌دست و یکپارچه بهره می‌برد و به‌راحتی ارزیابی تاریخچه عملیات و برنامه‌های هر چاه را نشان می‌دهد. این اطلاعات به زمین‌شناس‌ها،

1. Albion-Cenomanian

2. Lower Cretaceous (Barmian-Aptian)

3. Neocomian

عددی در **جدول ۲** ارائه شده است.

تخمین فشار منفذی توسط روند نرمال تراکمی

طبق گزارش حفاری از سازند آقاجاری تا فلهیان بدون مشکل انجام شده بود (علی‌رغم استفاده از گلیکول، رس^۲، گلیکول پلیمر پتاسیم کلرید^۳ به‌منظور افزایش پایداری چاه، مشکل ناپایداری همچنان ادامه داشت). مشکلات حفاری در حفره ۱/۴ ۱۲ اینچ واقع در عمق ۲۲۰۴ m متر منجر به حفاری کنارگذر^۴ شد، همچنین از عمق ۱۸۳۶ m تا ۲۹۸۸ m مشکلات پارگی لوله^۵ حفاری و پدیده شستشوی دیواره چاه^۶ و در نهایت منجر به گیر لوله شده بود که این عمل مجدد سبب شده تا دوباره حفاری کنارگذر انجام شود. همچنین، از عمق ۲۶۱۱ تا ۴۰۳۵ شاهد مشکلات پارگی لوله و پدیده شستشو دیواره چاه بوده است. در این پژوهش به بحث درباره حل این مشکلات پرداخته شده است.

روند نرمال تراکمی نگاره صوتی^۷

نتایج حاصل از تخمین فشار منفذی با روند نرمال تراکمی نگاره صوتی در **شکل ۱** نشان داده شده است. همان‌گونه که در **شکل ۱** نشان داده شده است روند نرمال تراکمی نگاره صوتی در بخش‌های الف، ب، ج، د، ه، و به ترتیب مربوط به توابع هاتمن، ایتون، میلر، باورز و ژانگ می‌باشند. در **شکل ۱**، نقاط آبی و خطوط سبز رنگ نشان‌دهنده روند نرمال تراکمی آن می‌باشد. مقایسه روندهای نرمال تراکمی نگاره صوتی حاصل از توابع مختلف نشان می‌دهد که محدوده تغییرات نگاره صوتی در محدوده ۴۸ تا ۸۰ یو-اس بر فوت^۸ (US/ft) است که عمده داده‌های آن در محدوده ۵۶ تا ۶۰ US/ft می‌باشد.

گرادیان و عمق چاه که از این پارامترها فشار هیدرواستاتیک تعیین می‌گردد؛ نگاره صوتی برای شیل (DT_{shale})، نگاره صوتی، که روند نرمال تراکمی نگاره صوتی تعیین می‌گردد؛ مقدار سرعت برای ناحیه شیل، سرعت در عمق صفر که توسط آن روند نرمال تراکمی نگاره سرعت برآورد می‌گردد؛ نگاره دانسیته و ضریب‌های معادله روند نرمال تراکمی که خروجی آن روند نرمال تراکمی نگاره دانسیته می‌باشد؛ به‌وسیله جای‌گذاری دمای ته چاه و نگاره مقاومت، روند نرمال تراکمی نگاره مقاومت برآورد می‌گردد، به‌واسطه قرار دادن میزان گاماری در شیل، نگاره نوترون، نگاره گاما میزان حجم شیل تعیین می‌گردد، ذکر این نکته که گرادیان فشار دریا، گرادیان فشار هیدرواستاتیک جزو مقادیر ثابت برای تصحیح فشار هیدرواستاتیک و فشار شکست است حائز اهمیت است؛ همچنین از مقدار حدودی دانسیته^۱ برای تصحیح فشار روباره استفاده شده است، به‌وسیله دانسیته فشار سیال و روندهای نرمال تراکمی نگاره‌ها (صوتی، سرعت، دانسیته و مقاومت) که قبلاً برآورد شده بوند، فشار منفذی تخمین می‌گردد؛ برآورد فشار شکست که از روندهای نرمال تراکمی نگاره‌ها استفاده می‌گردد، دانسیته سیال، تخلخل شیل، دانسیته شیل خشک و نگاره دانسیته، حجم شیل که توسط آن تخلخل تعیین می‌شود؛ به‌واسطه جای‌گذاری کرنش حداکثر، کرنش حداقل، زاویه انحراف، فشار روباره، فشار منفذی، مدول یانگ استاتیک، نسبت پواسون، ضریب بایوت که خروجی محاسبات انجام شده تنش افقی حداکثر، تنش افقی حداقل، جهت تنش افقی حداکثر و مقاومت فشاری تک محوری نیز توسط نگاره صوتی هستند. خروجی پنجره گل شامل وزن معادل گل از فشار منفذی، فشار معادل فشار منفذی، وزن گل معادل از تنش‌های برجای اولیه، وزن گل معادل برای شکست برشی و فشار مورد نیاز برای ایجاد شکست کششی است. همچنین، پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی

1. Density Log (RHOB)

2. Clay Bond

3. Kcl Polymer Glycol

4. Sidetrack

5. Twist off

6. Washout

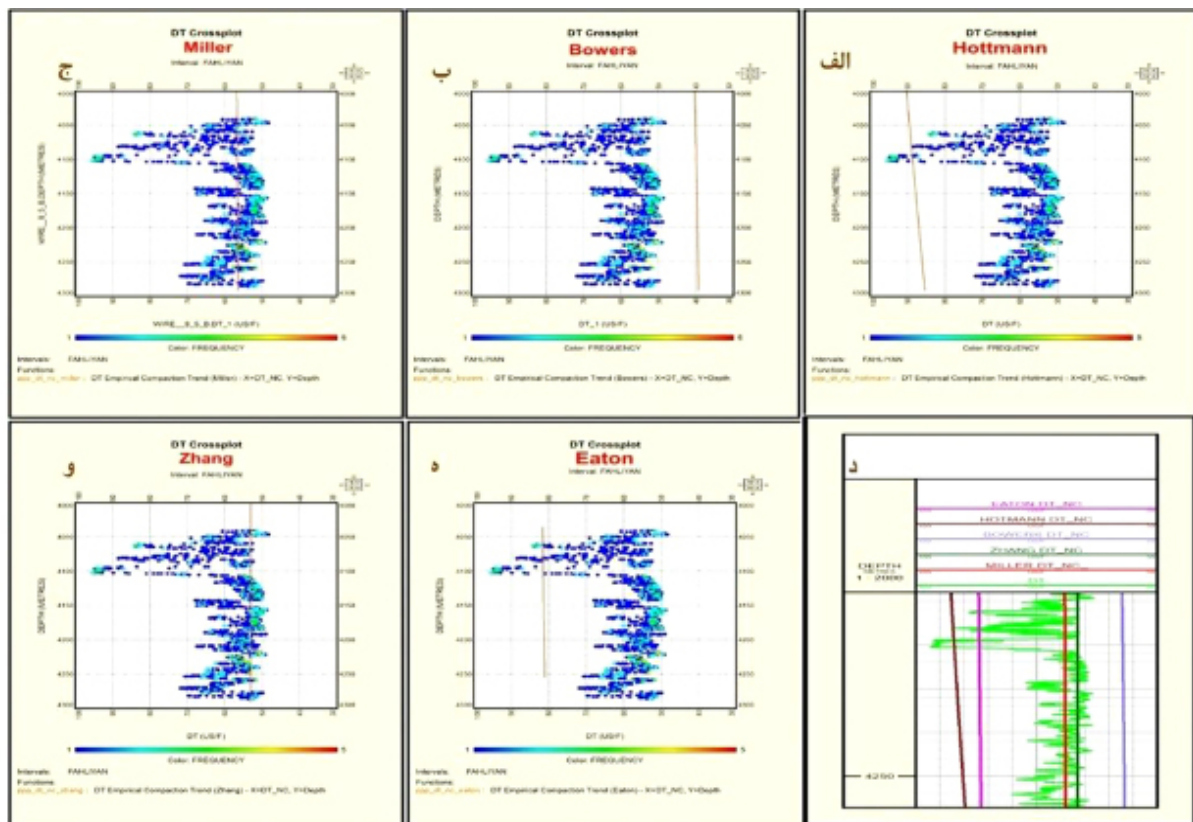
7. Sonic Log

8. U.S. feet (US/FT, is a Unit of Measurement Used in the United States Customary System to Measure Length)

جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی عددی [۲۸]

واحد	مقدار	پارامتر
us/ft	۶۲/۱۳	مقدار نگاره صوتی در عمق صفر
us/ft	۵۲/۹۸۲۹	مقدار نگاره صوتی در ماترکس شیل
ft/s	۱۳۹۹۳/۱۸	مقدار نگاره سرعت در عمق صفر ^۱
ft/s	۱۸۸۵۳/۴۸	مقدار نگاره سرعت در ماترکس شیل ^۲
°F	۲۶۶/۸	دمای داخلی انتهای نگاره مقاومت ^۳
inch	۹	مقدار مورد انتظار قطر برای نگاره قطر سنج ^۴
API	۲۰/۶۲۶	ماتریکس گاماری تمیز ^۵
API	۷۵/۶۱۱	مقدار گامای شیل ^۶
rpm	۱۵۰	دور بر دقیقه مته ^۷
m/h	۶۰	نرخ نفوذ ^۸
klbf ^۹	۱۷	وزن روی مته ^{۱۰}
psi/ft	۰/۴۴۱	گرادیان فشار آب دریا ^{۱۱}
psi/ft	۰/۴۶۵	گرادیان فشار هیدرواستاتیک ^{۱۲}
	۱/۱۱۶	توان در معادله ایتون برای نگاره صوتی ^{۱۳}
	۱/۰۰۶	توان در معادله ایتون برای نگاره سرعت ^{۱۴}
	۲/۵۷۲	توان در معادله ایتون برای نگاره دانسیته ^{۱۵}
	۰/۰۵۵	توان در معادله ایتون برای نگاره مقاومت ^{۱۶}
ppg ^{۱۷}	۱۱/۲۹۶	دانسیته سیال حفاری استفاده شده
°	۳۵	جهت تنش افقی حداکثر
	۰/۱۰۷	کرنش کمینه
	۰/۳۲۲	کرنش بیشینه
	۰/۹۲۹۸	ضریب بایوت
°	۰	میزان انحراف دیواره چاه (چاه عمودی)
°	۰	میزان آزیموت دیواره چاه (چاه عمودی)

1. Velocity at Mudline =0
2. Velocity for shale Matrix
3. Bottom Log Interval Temperature
4. DCAL Cutoff Value (Caliper - Bit Size)
5. Gamma-Ray Matrix (clean)
6. Gamma ray Shale
7. Bit round Per Minute (RPM)
8. Rate Of Penetration (ROP)
9. Killo Pound Force
10. Weight On Bit
11. Sea water Pressure Gradient
12. Hydrostatic Pressure Gradient
13. Eaton Exponent for Sonic
14. Eaton Exponent for Velocity
15. Eaton Exponent for Density
16. Eaton Exponent for Resistivity
17. Pound Per Gallon



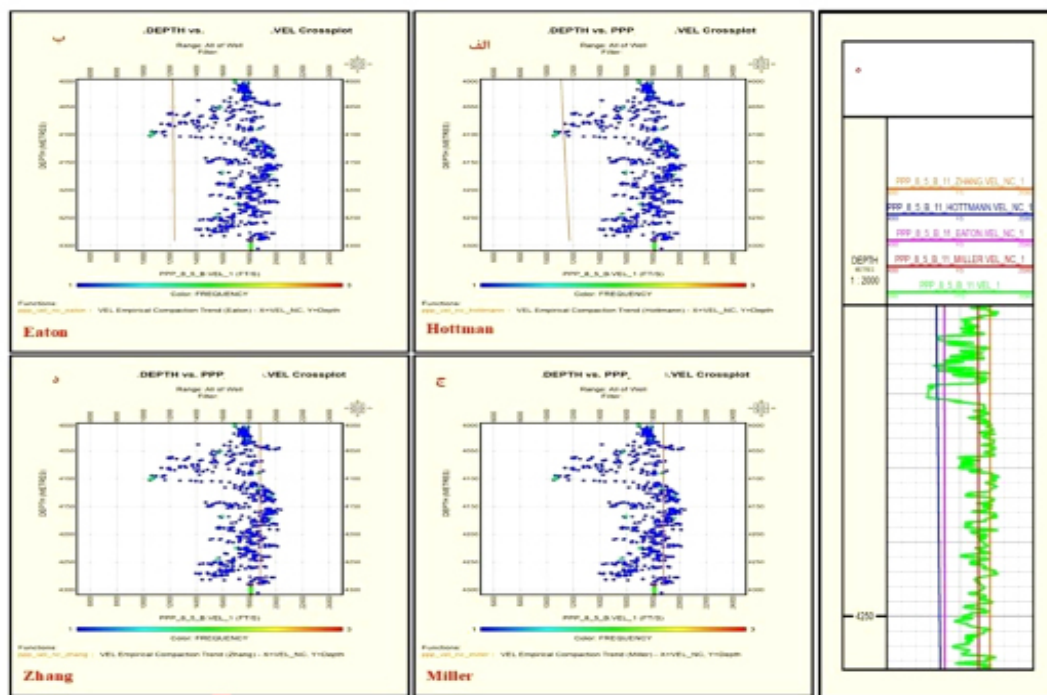
شکل ۱ تعیین روند نرمال تراکمی نگاره صوتی براساس توابع مختلف؛ الف) روش هاتمن ب) روش باورز ج) روش میلر د) نگاره صوتی چاه (جهت مقایسه) ه) روش ایتون و) روش ژانگ

روش‌های ارزیابی روند نرمال تراکمی نشان داد که همانند روند نرمال تراکمی نگاره صوتی، روش‌های ژانگ بخش ۲-د و میلر بخش ۲-ج نسبت به دیگر توابع انطباق بهتری با نگاره سرعت دارد (شکل ۲-ه). همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است محدوده تغییرات نگاره سرعت برای همه توابع بین ۱۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ ft/s است. عمده داده‌های مربوط به نگاره سرعت در محدوده ۱۶۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ ft/s قرار دارند. توابع نرمال ژانگ و میلر انطباق بهتری با نگاره صوتی شکل ۲-ه دارد و در حدود ۱۹۰۰۰ ft/s (شکل‌های ۲-د و ۲-ج) قرار دارند، درحالی‌که توابع نرمال هاتمن و ایتون در حدود ۱۲۵۰۰ ft/s (شکل‌های ۲-ب و ۲-الف) و خارج از محدوده مذکور می‌باشند.

محدوده تغییرات نگاره صوتی ژانگ شکل ۱-و و توابع میلر شکل ۱-ج حدود ۵۸ US/ft است و نسبت به دیگر توابع که خارج از این محدوده هستند (شکل‌های ۱-الف، ۱-ج و ۱-ه)، انطباق بهتری با نگاره صوتی شکل ۱-د نشان می‌دهند. دقت تخمین روند نرمال تراکمی نگاره صوتی نشان داد که می‌توان با انتخاب پارامترهای بهینه، میزان خطا را کاهش داده تا این روند از عمده داده‌ها عبور نماید.

روند نرمال تراکمی نگاره سرعت^۱

نتایج فشار منفذی حاصل از روند نرمال تراکمی نگاره سرعت به ترتیب با توابع ایتون، هاتمن، ژانگ و میلر در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲، نقاط و خطوط آبی رنگ نشان‌دهنده نگاره سرعت و خط نارنجی نشان‌دهنده روند نرمال تراکمی آن می‌باشد. بررسی انجام شده بین



شکل ۲ تعیین روند نرمال تراکمی نگاره سرعت براساس توابع مختلف؛ الف) روش هاتمن ب) روش ایتون ج) روش میلر د) روش ژانگ و مقایسه با ه) نگاره سرعت چاه

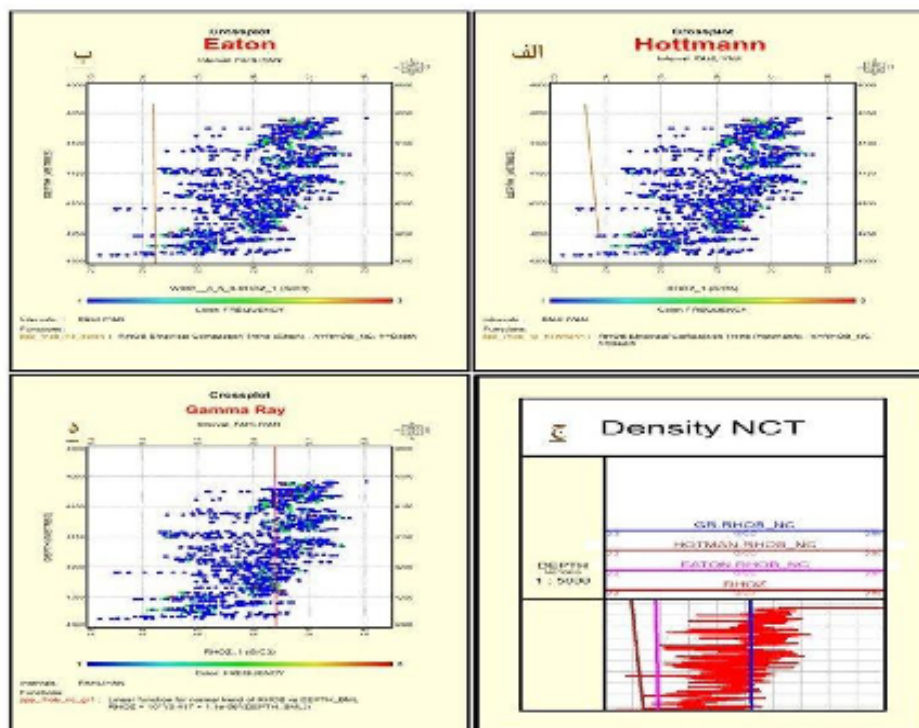
روند نرمال تراکمی نگاره دانسیته^۱

نتایج حاصل از تخمین فشار منفذی با روند نرمال تراکمی نگاره دانسیته در شکل ۳ نشان داده شده است. بخش‌های الف، ب و د به ترتیب مربوط به نگاره دانسیته حاصل از توابع هاتمن، ایتون و کات-آف می‌باشند. در شکل ۳، نقاط آبی و خطوط قرمز رنگ نشان‌دهنده نگاره دانسیته و خط نارنجی رنگ نمایانگر روند نرمال تراکمی آن می‌باشد. از مقایسه روش‌های تعیین روند نرمال تراکمی نتیجه می‌شود که تابع کات-آف شکل ۳-د انطباق بهتری با نگاره دانسیته شکل ۳-ج دارد. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است تغییرات نگاره دانسیته در محدوده $2/2$ تا $2/75 \text{ g/cm}^3$ است که بیشتر داده‌های آن در محدوده $2/5$ تا $2/7 \text{ g/cm}^3$ قرار دارد. مقدار نگاره دانسیته حاصل از تابع نرمال گاما حدود $2/64 \text{ g/cm}^3$ بوده و در محدوده مذکور قرار دارد درحالی‌که مقدار نگاره صوتی حاصل از توابع نرمال هاتمن و ایتون در حدود $2/41 \text{ g/cm}^3$ الف و ۳-ب و خارج از این محدوده قرار دارند.

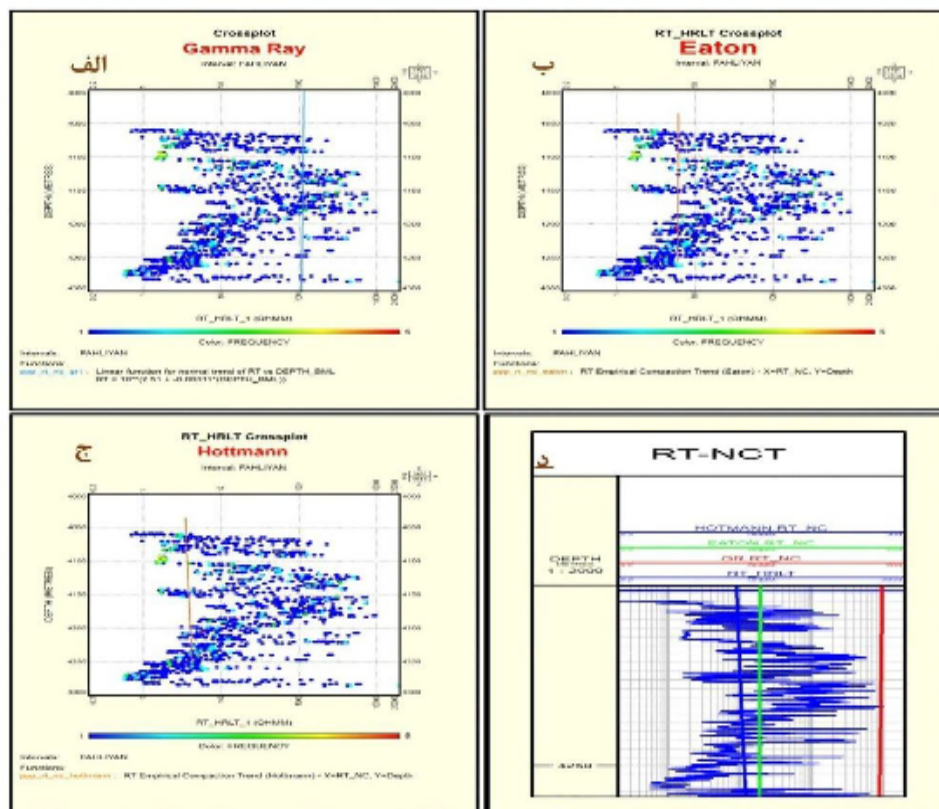
روند نرمال تراکمی نگاره مقاومت^۲

روند نرمال تراکمی نگاره مقاومت در بخش ۴-ب مربوط به تابع کات-آف، بخش ۴-الف تابع ایتون و بخش ۴-د تابع هاتمن است و در شکل ۴ نشان داده شده است. از بررسی روش‌های برآورد روند نرمال تراکمی نگاره مقاومت این نتیجه حاصل گردیده که همانند نگاره دانسیته، تابع آف شکل ۴-ج در انطباق بیشتری با نگاره مقاومت شکل ۴-ج دارد. در شکل ۴، خطوط نارنجی کم رنگ و نقاط آبی رنگ نشان‌دهنده نگاره مقاومت و خط نارنجی پر رنگ و خط آبی رنگ نشان‌دهنده روند نرمال تراکمی آن می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، محدوده تغییرات نگاره مقاومت $8-1000 \Omega$ است که بیشتر داده‌های آن در بازه $1-150 \Omega$ قرار دارند. از این‌رو تابع گاما حدود 110Ω و توابع ایتون و هاتمن ۴-الف و ۴-د نیز در حدود 8Ω بوده که هر مقدار نگاره مقاومت حاصل از هر سه توابع در محدوده مذکور قرار گرفته است.

1. Density Log
2. Resistivity Log



شکل ۳ تعیین روند نرمال تراکمی نگاره دانسیته براساس توابع مختلف؛ الف) روش هاتمن، ب) روش ایتون، ج) نگاره دانسیته چاه (جهت مقایسه) و د) روش کات-آف



شکل ۴ تعیین روند نرمال تراکمی نگاره مقاومت براساس توابع مختلف؛ الف) روش ایتون، ب) روش کات-آف، ج) نگاره دانسیته چاه (جهت مقایسه) و د) روش هاتمن

تخمین فشار منفذی با روش ایتون

به منظور پیش‌بینی فشار منفذی ابتدا روند نرمال تراکمی برای نگاره‌های صوتی، سرعت، دانسیته و مقاومت تخمین زده شده است. سپس فشار روباره و فشار هیدرواستاتیک اندازه‌گیری و نتایج آن در رابطه ایتون جای‌گذاری شده است. نتایج حاصل از تخمین فشار منفذی با روش ایتون در سازند فهلیان (عمق ۴۰۰۰ تا ۴۳۰۰ m) براساس نگاره‌های مختلف در **جدول ۳** و **شکل ۵** با نتایج آزمایش MDT در نقاط اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. همان‌طور که در **جدول ۳** و **شکل ۵** نشان داده شده است، فشار تخمین زده شده از هر سه نگاره (صوتی، سرعت و دانسیته) از دقت خوبی برخوردار هستند. مقادیر فشار منفذی برآورد شده از نگاره صوتی و سرعت در عمق‌های ۴۱۴۹ و ۴۱۵۰ m نسبت به مقادیر قبلی دچار افزایش شده که علت آن می‌تواند ناشی از وجود لایه‌های کم تخلخل در این عمق‌ها باشد که باعث می‌شود مقادیر نگاره صوتی و سرعت تابع تغییرات پتروفیزیکی

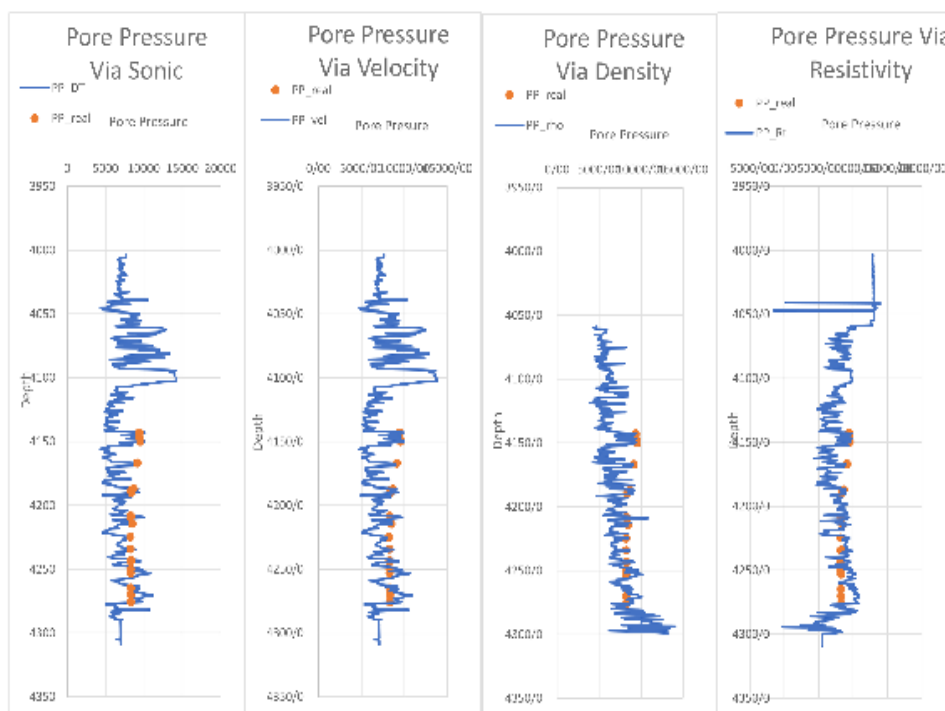
(مانند سیمان کاری و دیاژنیز) تغییر نماید (**جدول ۳**). همچنین، به نظر می‌رسد اختلاف بیش از ۱۰٪ برای عمق‌های ۴۱۹۰ m (نگاره صوتی)، ۴۲۱۴/۵ m (نگاره مقاومت)، ۴۲۲۵ m (نگاره مقاومت) و عمق ۴۲۶۴/۵ m (نگاره مقاومت) ناشی از مقاومت ضعیف سازند و وجود شکستگی در این عمق‌هاست. در این عمق‌ها، مقادیر تعیین شده فشار منفذی توسط نگاره دانسیته به مقادیر حاصل شده از آزمایش MDT تطابق بیشتری دارد. ضریب‌های بهینه ایتون در چاه شماره ۱۲۳ برای نگاره‌های صوتی، سرعت، دانسیته و مقاومت به ترتیب برابر ۱/۱۱۶، ۱/۰۰۶، ۲/۵۷۲ و ۰/۰۰۵ می‌باشند.

تخمین فشار شکست

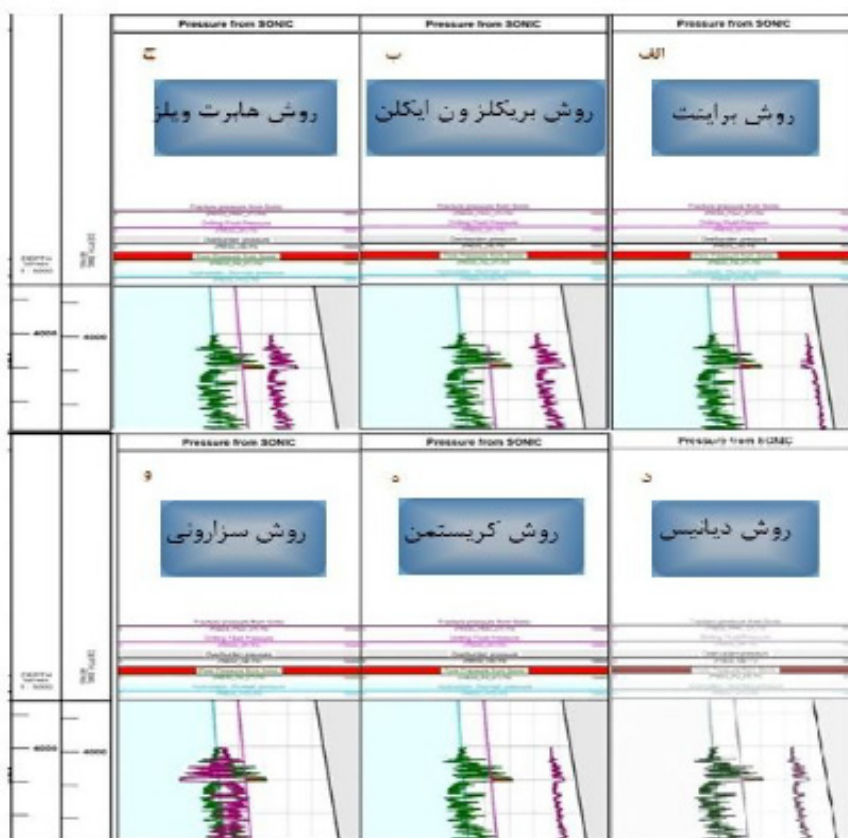
تخمین فشار شکست سازند به ترتیب از روش‌های هابرت ویلز، بریکلز ون ایکلن، برایننت، سزارونی، کریستمن و دیانیس انجام شده که مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها در **شکل ۶** نشان داده شده است. با استفاده از گزارش حفاری^۱ عمق‌های ۱۸۳۶ تا ۳۵۰۲ و ۴۰۰۰ تا ۴۳۰۰ m وضعیت فشار شکست با شرایط چاه بررسی شده است.

جدول ۳ مقایسه مقادیر عددی فشار منفذی تعیین شده توسط نگاره‌ها صوتی، سرعت، دانسیته و مقاومت با نتایج فشار منفذی حاصل از آزمایش MDT

نگاره صوتی			نگاره سرعت			نگاره دانسیته			نگاره مقاومت			آزمایش MDT
عمق (m)	مقدار (psi)	درصد خطا	عمق (m)	مقدار (psi)	درصد خطا	عمق (m)	مقدار (psi)	درصد خطا	عمق (m)	مقدار (psi)	درصد خطا	مقدار (psi)
۴۱۴۳	۱۰۱۶۴/۵	۸/۱۵	۴۱۴۳	۹۹۵۸/۲۳	۵/۹۵	۴۱۴۳	۹۳۳۵/۹۱	۰/۶	۴۱۴۳	۹۸۶۱/۲۲	۴/۹۲	۹۳۹۸/۲۷
۴۱۴۷	۹۶۷۸/۵	۲/۷۸	۴۱۴۷	۹۵۱۴/۷۲	۱/۰۴	۴۱۴۷	۹۴۰۷/۸۸	۰/۰۹	۴۱۴۷	۹۸۸۰/۱۴	۴/۹۲	۹۴۱۶/۴۶
۴۱۴۹	۱۰۰۱۴/۹	۵/۰۳	۴۱۴۹	۹۸۲۲/۱۷	۳/۰۱	۴۱۴۹	۹۳۵۷/۷۷	۱/۸۵	۴۱۴۹	۹۵۶۷/۶۷	۰/۳۴	۹۵۳۴/۶۶
۴۱۵۰	۱۰۰۹۷/۴	۵/۹۸	۴۱۵۰	۹۸۹۷/۷۱	۳/۸۸	۴۱۵۰	۹۳۶۲/۸۳	۱/۷۳	۴۱۵۰	۹۶۸۲/۸۵	۱/۶۲	۹۵۲۷/۸۰
۴۱۶۷	۸۹۴۹/۲۶	۱/۸۹	۴۱۶۷	۸۸۵۴/۲۷	۲/۹۳	۴۱۶۷	۹۰۸۶/۸۲	۰/۳	۴۱۶۷	۸۵۶۳/۸۸	۶/۱۲	۹۱۲۱/۸۸
۴۱۸۷	۹۲۷۳/۵	۶/۹۵	۴۱۸۷	۹۱۹۵/۶۳	۶/۰۵	۴۱۸۷	۹۲۵۷/۱۶	۶/۷۶	۴۱۸۷	۸۹۹۷/۸۸	۳/۷۷	۸۶۷۰/۷۱
۴۱۸۸/۵	۸۹۱۳/۳۱	۶/۶	۴۱۸۸/۵	۸۸۲۴/۸۳	۵/۵۴	۴۱۸۸/۵	۸۴۳۹/۶۷	۰/۹۴	۴۱۸۸/۵	۸۲۲۵/۲۸	۱/۶۲	۸۳۶۰/۸۴
۴۱۹۰	۹۲۷۴/۸۶	>۱۰	۴۱۹۰	۹۱۵۳/۲۹	۹/۲	۴۱۹۰	۸۷۲۸/۶۹	۴/۱۴	۴۱۹۰	۸۹۳۶/۴۸	۶/۶۲	۸۳۷۱/۷۰
۴۲۱۴/۵	۸۶۲۲/۰۲	۱/۶	۴۱۴۲/۵	۸۵۶۴/۸۷	۰/۹۲	۴۱۴۲/۵	۸۴۸۹/۱۳	۰/۰۳	۴۱۴۲/۵	۹۵۴۹/۰۹	>۱۰	۸۴۸۶/۰۴
۴۲۲۵	۷۹۸۴/۷۵	۳/۲۳	۴۲۲۵	۷۹۹۱/۰۷	۳/۰۶	۴۲۲۵	۷۹۹۸/۵۸	۲/۶۷	۴۲۲۵	۹۵۰۱/۹۸	>۱۰	۸۲۱۷/۷۸
۴۲۳۴	۷۷۵۵/۳۷	۵/۹	۴۲۳۴	۷۷۸۵/۹۵	۵/۵۳	۴۲۳۴	۸۶۵۹/۹۳	۵/۰۷	۴۲۳۴	۸۹۳۳/۳۸	۸/۳۹	۸۲۴۱/۷۸
۴۲۶۴/۵	۸۵۵۱/۲۸	۳/۳۴	۴۲۶۴/۵	۸۵۰۸/۴۵	۲/۸۲	۴۲۶۴/۵	۹۰۶۴/۱۸	۹/۵۳	۴۲۶۴/۵	۹۹۸۶/۵۳		۸۲۷۴/۸۸



شکل ۵ مقایسه نتایج فشار منفذی حاصل از نگاره‌های مختلف با داده‌های واقعی؛ خطوط آبی رنگ نشان‌دهنده نگاره‌های تعیین شده از نگاره‌ها و نقاط قرمز رنگ نشان‌دهنده مقادیر فشار برآورد شده توسط آزمایش MDT، نگاره‌های فشار منفذی تعیین شده از نگاره‌های صوتی (PP DT)، سرعت (PP Vel)، دانسیته (PP rho) و مقاومت (PP Rt) است



شکل ۶ مقایسه فشار شکست تخمین زده شده با روش‌های مختلف؛ (الف) روش براینت (ب) روش بریکلز ون ایکلن (ج) روش هابرت-ویلز (د) روش دیانیس (و) روش سزارونی (ه) روش کریستمن (خط آبی رنگ: فشار هیدرواستاتیک، خط سبز رنگ: فشار منفذی، خط قرمز رنگ: فشار شکست، خط صورتی رنگ: فشار سیال)

تفسیر مدل فشار منفذی و فشار شکست پیش‌بینی شد^۵

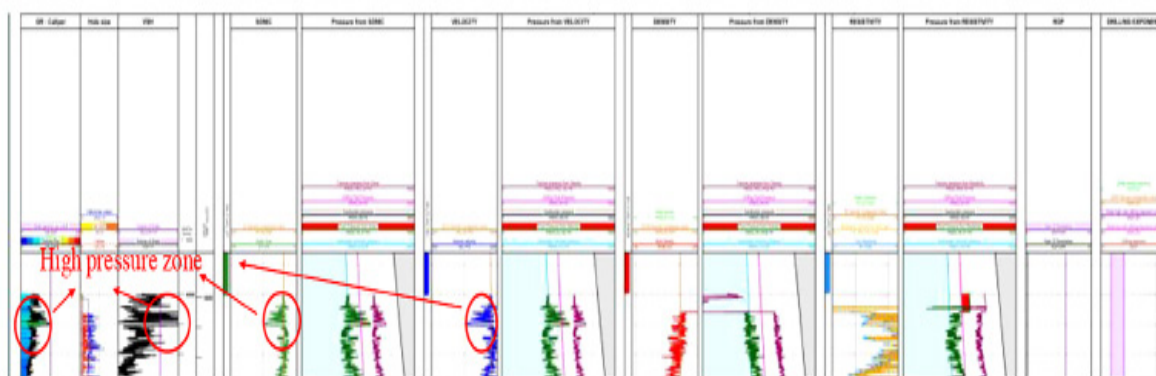
فشار منفذی از تابع ایتون و فشار شکست از تابع هابرت-ویلز تخمین زده شده‌اند. برای تحلیل و بررسی مقادیر فشار منفذی و فشار شکست برآورد شده، ابتدا نواحی پرفشار تعیین و سپس فشار منفذی و شکست دیواره چاه بررسی شد. همان‌طور که در **شکل ۷** مشخص شده است، در عمق ۴۱۰۰ m نگره‌های سرعت و دانسیته شروع به کاهش نموده و نگره گاما و حجم شیل افزایش یافته است که این موضوع نشان‌دهنده وجود ناحیه پرفشار در آن عمق می‌باشد. ناحیه پرفشار در **شکل ۷** با دایره قرمز رنگ نشان داده شده است. دانسیته گل مورد استفاده در این چاه ۱۱/۳ تا ۱۴ پوند بر گالن (ppg) می‌باشد. همان‌طور که در **شکل ۷** نشان داده شده است، فشار منفذی از فشار هیدرواستاتیک بیشتر بوده که این موضوع سبب بهره‌دهی بهتر از چاه می‌شود. همچنین در عمق ۴۱۰۰ m (دایره قرمز رنگ) احتمال ورود جریان سیال از سازند به داخل چاه وجود داشته که می‌تواند ناشی از افزایش فشار منفذی سازند نسبت به وزن گل حفاری (۱۴-۱۱/۳ lb/gal) باشد (**شکل ۷**). بنابراین طبق وزن گل معادل، برای تأمین پایداری دیواره چاه باید وزن گل حدوداً ۱۳/۰۱ lb/gal (فشار ۹۱۶۴ پوند بر گالن (ppg) در عمق ۴۱۰۰ m) باشد. با توجه به آنکه در بخش مربوط به نگره اندازه چاه **شکل ۷**، نگره قطر سنج^۶ در جلوی سائز مته قرار گرفته، احتمال شستشوی دیواره چاه وجود دارد.

طبق گزارش حفاری، از عمق ۱۸۳۶ تا ۲۹۸۸ m؛ با پاره شدن^۱ لوله حفاری، پدیده شستشوی دیواره چاه^۲ اتفاق افتاده که دلیل آن استفاده از فشار گل بیش از حد نرمال و وجود سازندهای ضعیف و غیریکنواخت بوده است. جنس لایه‌های آن عمق عمدتاً شامل آرژیلیت، انیدریت و سنگ آهک است که جزء سنگ‌های ضعیف تا متوسط و متوسط تا سخت به حساب می‌آیند و وزن گل در آن عمق بیش از فشار شکست بوده و هرزروی (مقداری بین ۴۰ تا ۲۷۰ bbl) در آن لایه‌ها اتفاق افتاده است. همچنین در عمق ۳۵۰۲ m، گیرکردن^۳ لوله اتفاق افتاده و عملیات کنار گذر^۴ برای رفع این مشکل انجام شده است. این رخداد نشان‌دهنده آن است که فشار ناشی از گل حفاری بیشتر از فشار شکست دیواره چاه بوده و باعث هرزروی و تشکیل فیلتره گل^۵ در دیواره چاه شده و در نتیجه گیر کردن لوله حفاری اتفاق افتاده است. بررسی روش‌های تخمین فشار شکست دیواره چاه نشان داد که روش برکلز و ونیکلن (مدل سواحل جنوبی آمریکا) **شکل ۶-ب** و روش هابرت-ویلز **شکل ۶-ج** نسبت به سایر روش‌ها از انطباق بهتری در مقایسه با گزارش حفاری برخوردار هستند (سازند جهرم و کژدمی). اما گزارش حفاری در سازند فهلیان فقط پدیده شستشوی دیواره چاه را و میزان هرزروی را به‌میزان ۳ تا ۵ bbl نشان می‌دهد (**۳۷**). مطابق **جدول ۴**، نتایج آزمایش LOT و FIT در سازند فهلیان نشان داد که روش هابرت-ویلز **شکل ۶-ج** تشابه بیشتری با آزمایش‌ها (خطا کمتر از ۱٪) دارد.

جدول ۴ مقایسه نتایج آزمایش LOT و FIT با فشار شکست سازند در سازند فهلیان (عمق ۴۰۰۰ تا ۴۳۰۰ m) (**۲۸**)

عمق (m)	مقادیر حاصل از نگره صوتی (psi)	مقادیر LOT و FIT
۴۰۶۰	روش هابرت-ویلز: ۹۹۰۸/۸۶۹	FIT حفره ۸ ۱/۲ اینچ در عمق ۴۰۶۰ m: ۱۰۷/۴ PCF (۹۹۳۲/۱۱ psi)

1. Twist Off
2. Washout
3. Pipe stuck
4. Side Track
5. Mud Cake
6. Caliper
7. HUBBERT_WILLIS



شکل ۷ بررسی وضعیت نگاره گاما، حجم شیل، ناحیه پرفشار مشخص شده، در شکل خط سبز لجنی نشان دهنده فشار منفذی و خط صورتی نشان دهنده فشار شکست می باشد

دارای ناخالصی‌هایی مانند کلسیت و شیل می باشد. مقاومت سنگ محصور نشده^۱ در حدود ۱۱۰ MPa (۱۵۹۵۴ psi) و در محدوده متوسط سخت تا سخت قرار دارد که منطبق با اطلاعات زمین شناسی کسب شده است [۳۷]. براساس خروجی مدل ژئو شکل ۹، مقاومت سنگ محصور نشده (UCS) در محدوده ۳۵۰۲ تا ۲۹۸۸۱ psi تخمین زده شده و نتایج آزمایشگاهی حاصل از مغزه در یک عمق خاص در بازه ۳۷۴۳/۸۶ تا ۴۳۵۱/۱۳ psi تعیین شدند که مقادیر حاصل شده از مغزه در بازه تخمین زده شده قرار دارند و با جدول ۵ بیشترین مقادیر تنش منطبق هستند (مقدار ۳۵۰۲ psi واقع در عمق ۴۱۰۲ m مربوط به قسمت فوقانی سازند فهلیان است که جنس سنگ آن عمدتاً سنگ آهک متوسط سخت است. همچنین در نگاره تصویری این ناحیه در شکست باز (شکستگی طبیعی) قرار دارد شکل ۱۰-ب و مقدار ۲۹۸۸۱ psi در عمق ۴۰۴۶ مقدار نگاره صوتی بالاست و جنس سنگ آهک-آرجلیت است، طبق گزارش ارزیابی نگاره تصویری در چاه مجاور، مقدار تخلخل و تراوایی در این عمق پایین است و در این نگاره به قسمتی که به صورت مثلث زرد نشان داده شده است (Dense streak) حاکی از ضخامت بالای سنگ در عمق ذکر شده است (شکل ۱۰-الف).

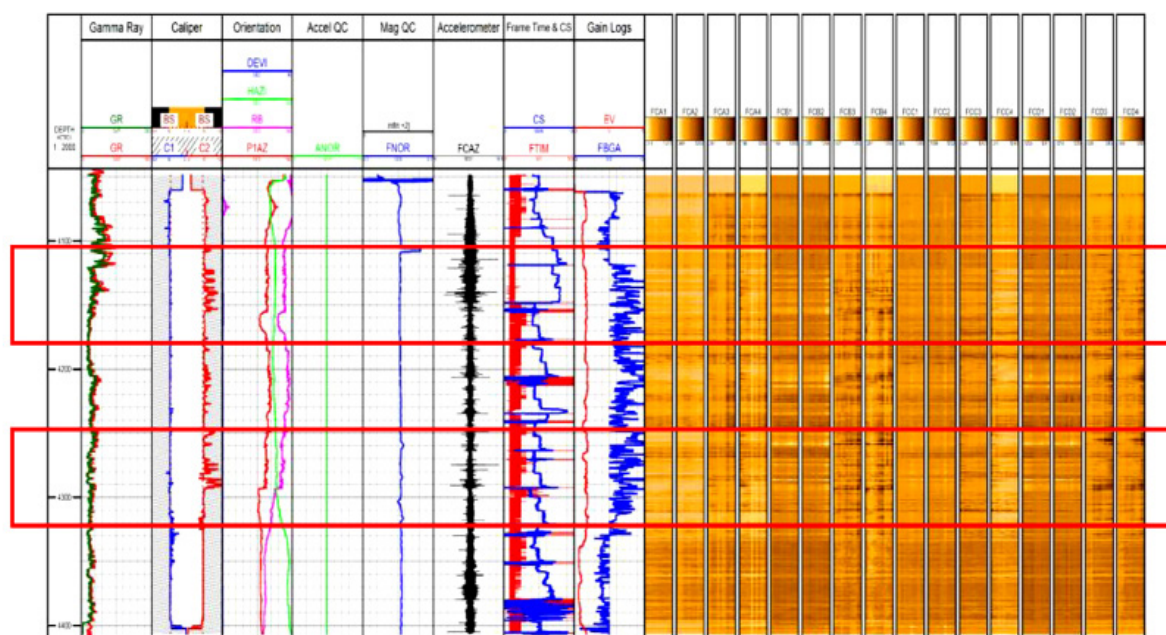
نگاره قطر سنج شکل ۸ در عمق‌های ۴۱۰۰ تا ۴۱۶۰ m و ۴۲۶۸ تا ۴۲۹۰ m افزایش یافته و فشار منفذی نیز افزایش یافته است.

پارامترهای ژئومکانیک

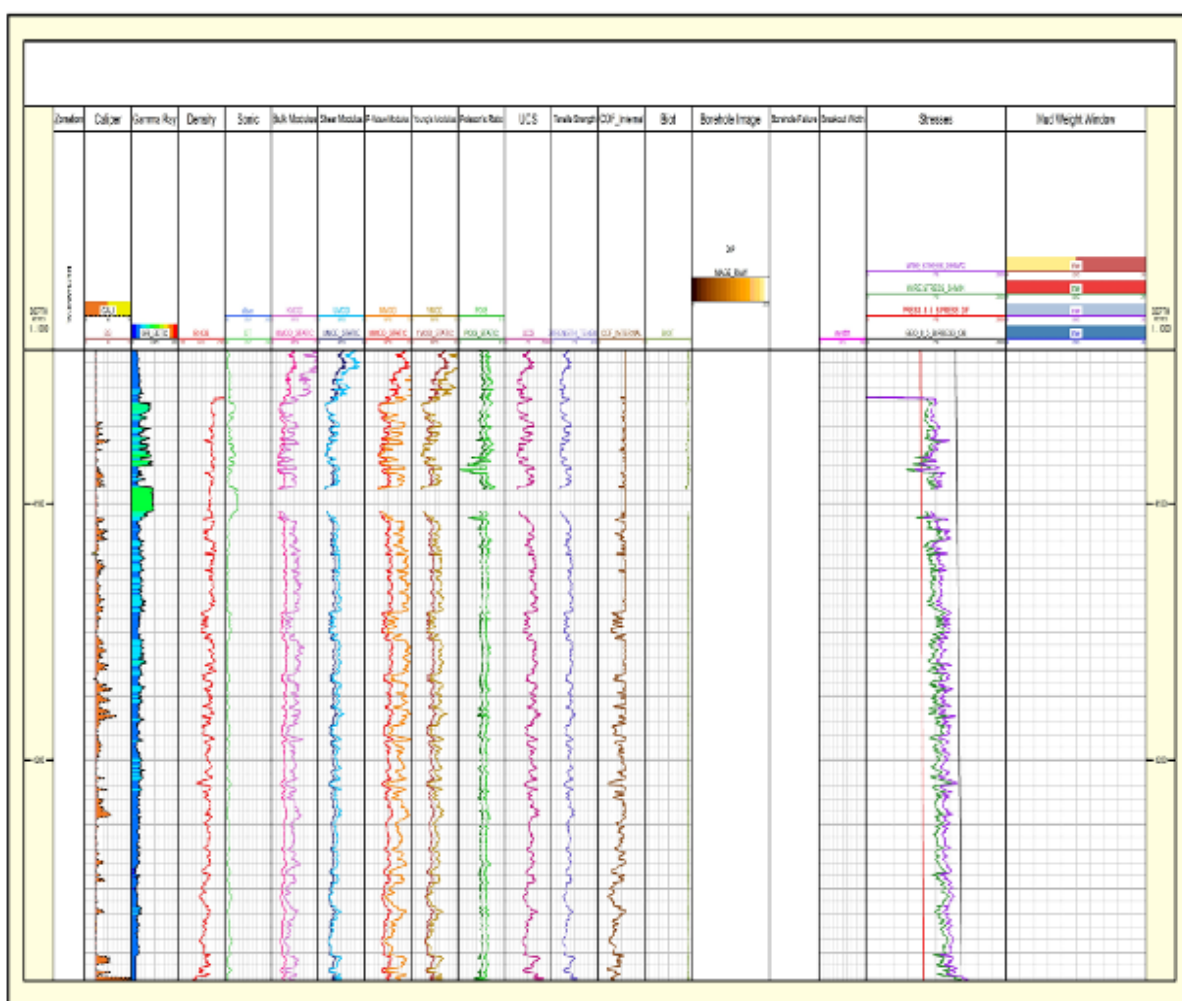
تعیین پارامترهای ژئومکانیک

مدل ساخته شده براساس داده‌های ژئو در شکل ۹ نشان شده است. در شکل ۹ و در بخش تنش، خط تیره رنگ نشان دهنده تنش عمودی، خط بنفش رنگ نشان دهنده تنش افقی حداکثر و خط سبز رنگ معرف تنش افقی حداقل است. بررسی این مدل نشان می دهد که رژیم گسلش این میدان از نوع نرمال ($S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$) می باشد. مقادیر تنش افقی حداکثر و حداقل به ترتیب برابر با ۱۱۳۳۳ psi و ۱۰۲۴۳ psi و مقدار تنش عمودی برابر با ۱۳۲۱۳ psi است. دلیل وجود نواحی سفید رنگ در این مدل، نبود اطلاعات نگاره صوتی است. براساس گزارش آنالیز سنگ مخزن و سیال در میدان جنوب غربی ایران، مقدار تنش‌هایی که براساس روابط تجربی برای سازند فهلیان تخمین زده شده با مقادیر حاصل از آزمایش مقاومت تک محوری کنترل شده و رژیم گسلش برآورد شده میدان، نرمال است (شکل ۹ و جدول ۵). همچنین مقدار نسبت پواسون برآورد شده با نسبت پواسون حاصل شده از آزمایش تک محوری در جدول ۵ مقایسه شده است. در میدان مورد مطالعه جنس سازند فهلیان از نوع سنگ آهک خالص نیست و

1. Unified Compressive Strength (UCS)



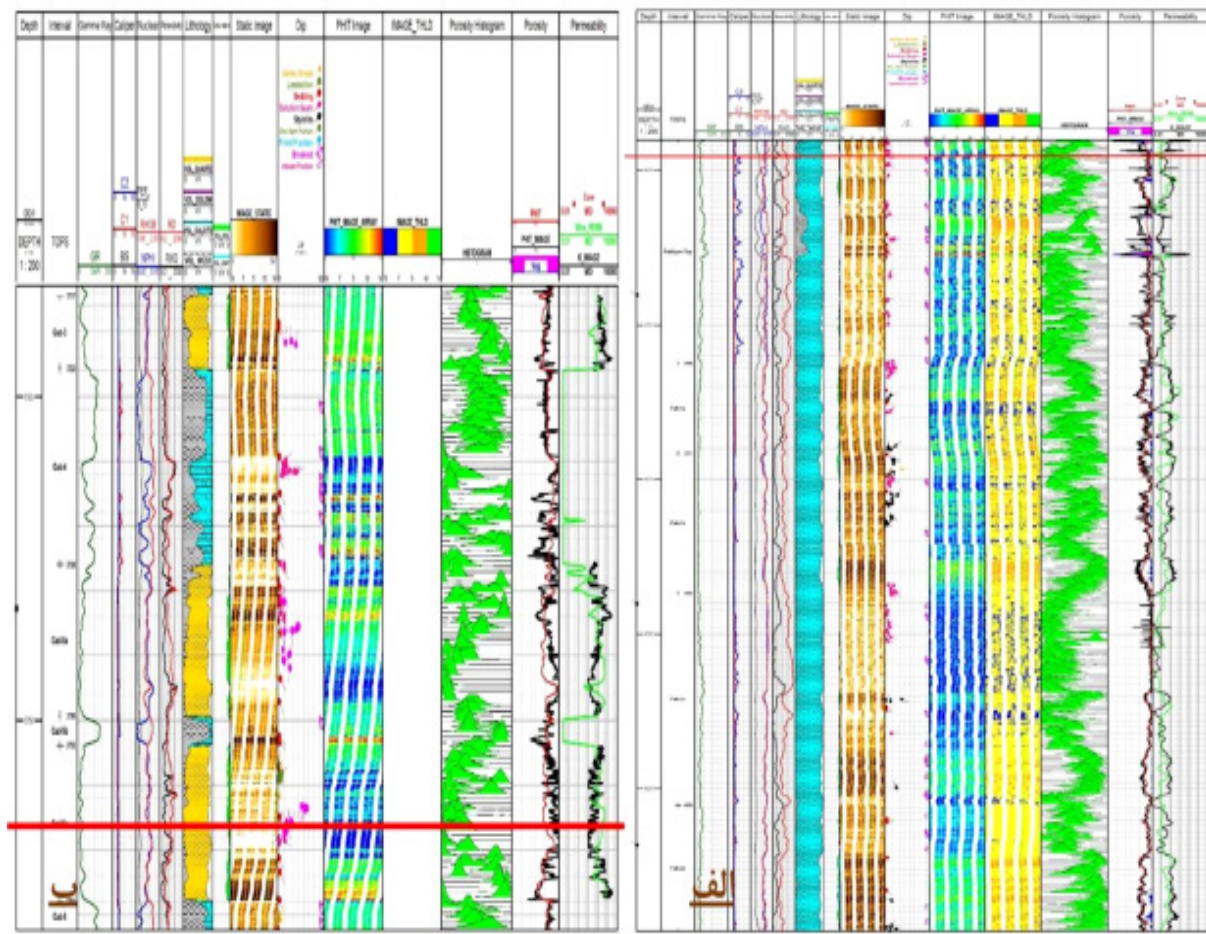
شکل ۸ نگاره تصویری FMI از چاه مورد مطالعه و انطباق نگاره قطر سنج و FCA (سازند فهلپیان) [۲۸]



شکل ۹ مدل ژئو میدان جنوب غربی ایران (شامل: مقاومت سنگ محصور نشده، تنش‌های برجا و ...)

جدول ۵ نتایج آزمایش تک محوری در اعماق مختلف و مقایسه نسبت پواسون حاصل از نگاره صوتی [۲۸]

نسبت پواسون حاصل از نگاره صوتی	نسبت پواسون	مقاومت فشاری (psi)	عمق (m)
۰/۳۴	۰/۳۸	۳۷۴۳/۸۶-۳۷۷۰/۹۸	۴۰۴۳/۹۰-۴۰۴۳/۹۹
۰/۲۶	۰/۲۳	۳۶۲۵/۹۴	۴۰۵۰/۶۵-۴۰۵۰/۷۵
۰/۲۸	۰/۲۰	۴۳۵۱/۱۳	۴۰۵۰/۸۳-۴۰۴۳/۹۴



شکل ۱۰ نمودار تراوایی-تخلخل از نگاره تصویری (شکل الف فلهیان و شکل ب مخزن گدوان) [۲۸]

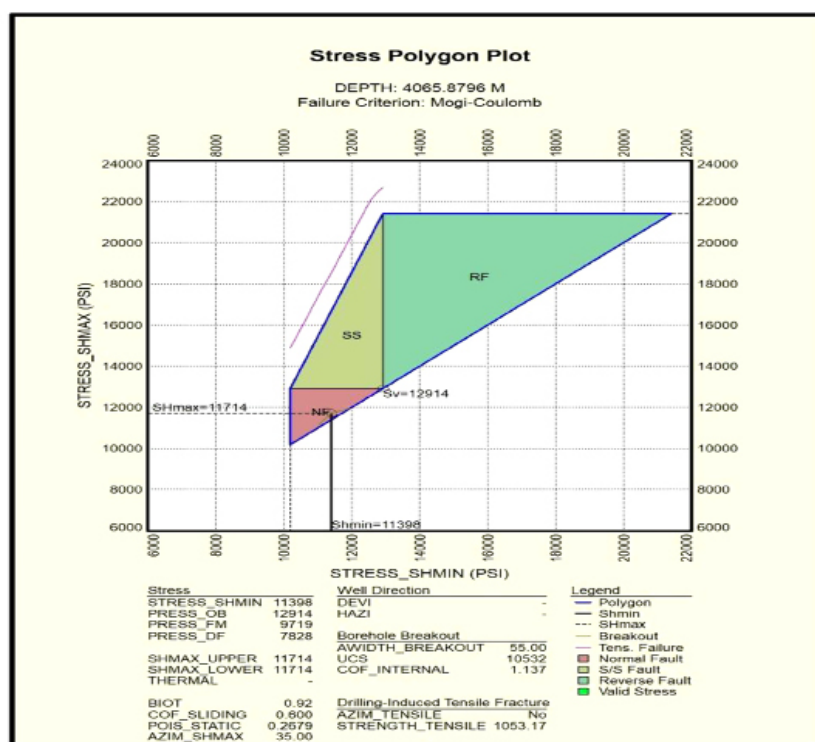
تنش اصلی، اندازه‌گیری تنش افقی حداکثر دشوار بوده و نمی‌توان آن را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کرد، از این رو با استفاده از مدل شکست چاه (Wellbore Failure) و چند ضلعی تنش مقدار آن تخمین زده شده است. معیار موگی-کلمب به‌دلیل آن که یکی از کامل‌ترین معیارهای شکست بوده و هر سه مقدار تنش را در میدان لحاظ می‌کند [۳۹]، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

همچنین در مدل زمین، مقدار مدول یانگ در حدود $6/3 \times 10^6$ psi، نسبت پواسون در حدود ۰/۳ و ضریب بایوت در حدود ۰/۹ برآورد شده است.

تعیین محدوده تنش برجا با استفاده از روش چند ضلعی تنش^۱

در شکل ۱۱ محدوده تنش برجا به‌منظور تعیین رژیم تنش میدان با استفاده از روش چند ضلعی تنش در عمق ۴۰۶۵/۸۸ متر با استفاده از معیار شکست موگی-کولمب ترسیم شده است. از میان سه

1. Stress Polygon



شکل ۱۱ تعیین محدوده تنش برجا با استفاده از روش چند ضلعی تنش با معیار شکست موگی-کولمب

تنش افقی حداکثر به اندازه خط گسیختگی کششی باشد. از این رو شکست کششی القایی^۲ مقدار حد پایین تنش حداقل را نشان می‌دهد. مقدار تنش افقی حداکثر باید در محدوده حد پایین قرار بگیرد، زیرا ممکن است شکستگی‌های کششی اتفاق بیافتد حتی اگر وزن گل از محدوده فراتر نرود [۴۰ و ۴۲].

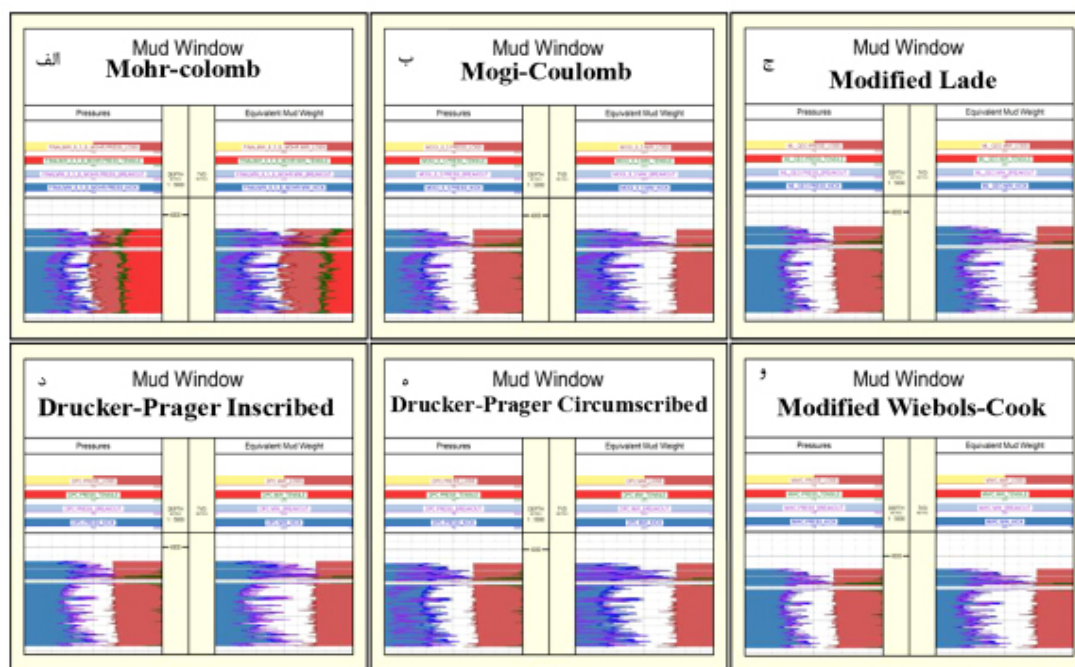
تعیین پنجره ایمن وزن گل با استفاده از معیارهای شکست

مطابق شکل ۱۲، پنجره ایمن وزن گل با استفاده از معیارهای شکست موهر-کولمب، موگی-کولمب، لید اصلاح شده، دراگر-پراگر محاطی، دراگر-پراگر محیطی و ویبلز-کوک اصلاح شده تعیین شدند. همه معیارهای شکست محدوده کیک را ۶/۱۶ تا ۱۰/۴۵ پوند بر گالن (ppg) برآورد نمودند. همچنین تمام معیارهای شکست، محدوده هرزروی را ۱۱/۹۹ تا ۱۴/۴۳ پوند بر گالن تخمین می‌زنند.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مقدار تنش افقی حداکثر حاصل از چند ضلعی تنش در حدود ۱۱۷۱۴ پوند بر اینچ مربع بوده که با توجه به مقادیر تنش افقی حداقل ۱۱۳۹۸ پوند بر اینچ مربع و تنش عمودی ۱۲۹۱۴ پوند بر اینچ مربع حاصل از مدل مکانیکی زمین، رژیم گسلش از نوع نرمال است. اختلاف کم مقادیر تنش افقی حداکثر برآورد شده از چند ضلعی تنش برای یک عمق خاص در مقایسه با مقادیر حاصل از مدل ژئومکانیکی نشان‌دهنده دقت و صحت نتایج است. (مقادیر حاصل شده از مدل ژئومکانیکی در عمق ۴۰۶۵/۸۸ m عبارت است از: تنش افقی حداکثر ۱۲۲۳۸، تنش افقی حداقل ۱۱۳۹۸ و تنش عمودی ۱۲۹۱۴ پوند بر اینچ مربع هستند.) همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، خط قرمز رنگ ارغوانی^۱ نشان‌دهنده گسیختگی کششی و خط سبز زیتونی رنگ نشان‌دهنده گسیختگی برشی می‌باشد. همچنین چون در این چاه گسیختگی کششی مشاهده شده است، به‌طور مشخص باید

1. Magenta (Purplish-Red Color)

2. Drilling-Induced Tensile Fractures



شکل ۱۲ تعیین پنجره ایمن وزن گل توسط معیارهای شکست: (الف) لید-اصلاح شده (ب) موگی-کولمب (ج) موهر-کولمب (د) ویبلز-کوک اصلاح شده (ه) دراگر-پراگر محیطی (و) دراگر-پراگر محاطی

مشکلی برای پایداری دیواره چاه حین حفاری به وجود نمی آید. نتایج حاصل از معیار شکست موهر-کولمب در مقایسه با سایر معیار شکست از دقت کمتری برخوردار بوده و در تعیین حد پایین گل حفاری (فشار ریزش چاه) کاربرد پایینی دارد که مطابق با اظهارات ژو ۱۹۹۴ [۳۳] و غلامی و همکاران [۳۴] می باشد، براساس شکل ۱۲ معیار شکست موهر-کولمب (۵/۷۸-۹/۵۴ پوند بر گالن) نسبت به معیار شکست موگی-کولمب (۴/۶-۸ پوند بر گالن) حد پایین پنجره گل را کمی بیشتر تعیین کرده است. طبق شکل ۱۲-ب به دلیل استفاده از وزن گل زیاد احتمال شکست کششی در دیواره چاه هست که نزدیک به نظر حسین پور و همکاران می باشد [۳۵]. طبق گزارش حفاری [۴۴]، در عمق های ۱۸۳۶ تا ۲۹۸۸ m و عمق ۳۵۰۲ m هرزروی اتفاق افتاده که معیار موگی-کولمب این موضوع را نشان می دهد (شکل ۱۲-ب).

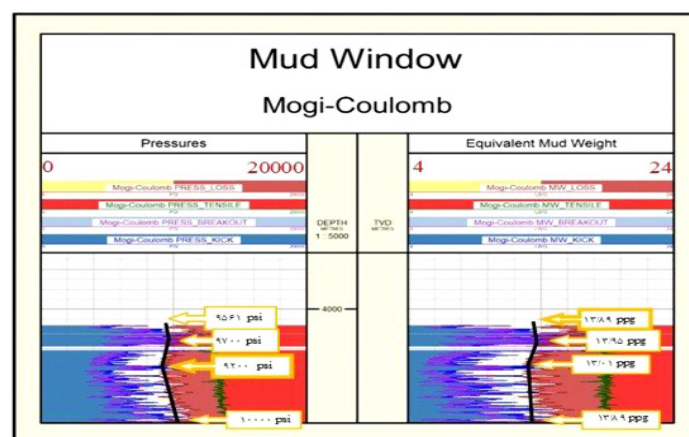
همان گونه که در شکل ۷ (فشار منفذی و فشار شکست پیش بینی شده) اشاره شد بود، همه معیارهای شکست نشان دادند که در عمق ۴۱۰۰ m اگر از وزن ۱۱/۳ پوند بر گالن (۸۴/۵ پوند بر فوت مکعب (pcf) استفاده شود، ورود جریان سیال از سازند به داخل چاه اتفاق می افتد. همچنین مدل پیش بینی پنجره گل محدوده پایداری چاه را بین ۱۳/۱ تخمین نموده است. با توجه به اینکه در این چاه وزن گل بین ۱۱/۳ تا ۱۴ پوند بر گالن بوده است. طبق همه ی معیارهای شکست در عمق ۴۳۰۰ m اگر از وزن گل ۱۱/۳ پوند بر گالن استفاده شود، ورود جریان سیال از سازند به داخل چاه به میزان ۸/۴ پوند بر گالن اتفاق می افتد. افزون بر این، در صورت استفاده از وزن ۱۴ پوند بر گالن (۱۰۴ پوند بر فوت مکعب) هرزروی اتفاق می افتد (حداقل ۳ بشکه^۱ و حداکثر ۵ بشکه بر ساعت^۲ که مجموعاً ۷۶/۲ بشکه هرزروی داشته است [۳۷]). کلیه ی معیارهای شکست نشان دادند که در صورت استفاده از وزن گل ۱۳/۵-۱۳/۹۵ پوند بر گالن،

1. BBL

2. Barrell Per Hour (Bph)

۱۳/۹۵ پوند بر گالن، مشکل مربوط به ناپایداری دیواره چاه مرتفع می‌گردد. اما باید توجه داشت که ناحیه پنجره باریک گل **شکل ۱۳** دارای محدوده باریکی بوده که عدم توجه به آن باعث ایجاد ناپایداری در دیواره چاه حین حفاری می‌گردد. فشار گل تخمین زده شده از معیار شکست موگی-کولمب نزدیکی خوبی با فشار گل حاصل شده از آزمایش RFT نشان می‌دهد (**جدول ۶**). بررسی نگاره تصویری در **شکل ۱۴** تعدادی شکست باز را در عمق ۴۲۶۸ تا ۴۲۶۹ m نشان می‌دهد که در این نواحی فشار در پنجره گل دچار افزایش شده است. همچنین همان‌طور که گفته شده بود تغییراتی در نگاره قطرسنج و نگاره FCA **شکل ۸ و ۱۴** در عمق‌های ۴۱۰۰ تا ۴۱۶۰ m و ۴۲۶۸ تا ۴۲۹۰ m دیده شده است که در این عمق‌ها فشار منفذی نیز افزایش یافته است.

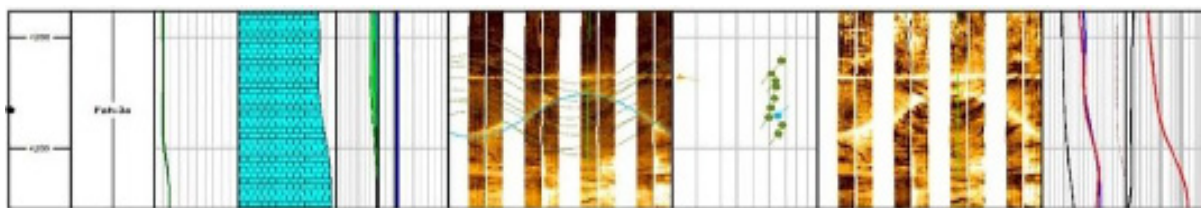
مطابق **شکل ۱۲**، ناحیه قرمز رنگ رنگ نشان‌دهنده هرزروی، خط سبز رنگ نشان‌دهنده شکست کششی، خط آبی رنگ نشان‌دهنده ورود جریان سیال و خط بنفش رنگ نشان‌دهنده ناحیه شکست برشی می‌باشد. مطابق گزارش حفاری [۲۸]، وزن گل مورد استفاده در این چاه ۱۱/۳ پوند بر گالن بوده که باعث ورود جریان سیال به داخل چاه شده است. طبق نتایج حاصل شده از معیار موگی-کولمب در **شکل ۱۲**، وزن گل ایمن و مناسب در محدوده ۱۳/۵ تا ۱۳/۹۵ پوند بر گالن می‌باشد (درحالی‌که وزن گل در ابتدای ناحیه ۱۳/۸۹ پوند بر گالن، در محدوده باریک گل ۱۳/۹۵ پوند بر گالن و در قسمت انتهایی ناحیه ۱۳/۶۸ پوند بر گالن است). محدوده حد پایین پنجره گل ۴/۶ تا ۸ (بعضی نقاطها تا ۱۶/۷۶) پوند بر گالن و حد بالای پنجره گل ۱۴/۲۲ تا ۱۹/۱۱ (بعضی نقاطها تا ۲۱/۱۰) پوند بر گالن است. با قرار گرفتن وزن گل در محدوده ۱۳/۵ تا



شکل ۱۳ پنجره گل مناسب برای حفاری ایمن با معیار موگی-کولمب

جدول ۶ نتایج آزمایش RFT سازند فهلین [۲۸]

عمق (m)	فشار گل (psi)	فشار سازند (psia)
۴۰۳۵/۲-۴۰۴۸/۸	۹۵۶۱/۸۵	۹۲۷۲/۰۳
۴۰۷۴/۴-۴۰۸۸	۹۶۵۴/۷۴	۸۲۰۶/۱۲
۴۱۳۹/۴-۴۱۵۳	۹۸۱۲/۸۳	۸۱۵۴/۹۵
۴۲۳۱/۹-۴۲۴۵/۵	۱۰۰۲۰/۹	۸۲۸۲/۸۴



شکل ۱۴ نمونه‌ای از شکستگی‌های باز در لایه فهلین [۲۸]

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- نتایج حاصل از مقایسه روندهای نرمال تراکمی نگاره‌های صوتی و سرعت نشان دادند که توابع میلر و ژانگ دقت بیشتری نسبت به دیگر توابع دارند، همچنین قیاس روندهای نرمال تراکمی نگاره دانسیته و مقاومت نشان داد که تابع کات-آف نسبت به دیگر توابع مناسب‌تر است.

۲- فشار منفذی حاصل از نگاره‌های صوتی، سرعت، دانسیته و مقاومت نشان دادند که فشار منفذی تخمین زده شده از هر سه نگاره از دقت خوبی برخوردار بوده درحالی‌که در نواحی شیلی، نگاره دانسیته از دقت بیشتری برخوردار است.

۳- ضریب بهینه ایتون برای پیش‌بینی فشار منفذی در میدان مورد نظر حاصل از نگاره صوتی ۱/۱۱۶، نگاره سرعت ۱/۰۰۶، نگاره دانسیته ۲/۵۷۲ و نگاره مقاومت ۰/۰۰۵ است.

۴- فشار شکست حاصل از هابرت-ویلز نسبت به سایر روش‌ها از دقت بیشتری برخوردار است.

مراجع

- [1]. Qiu, K., Felgueroso, J. G., Lalinde, G., Naas, A., Coste, B., & Fuller, J. (2008, March). Geomechanics enables the success of horizontal well drilling in Libya: A case study. In SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition (pp. SPE-111384). SPE. doi.org/10.2118/111384-MS.
- [2]. Zeynali, M. E. (2012). Mechanical and physico-chemical aspects of wellbore stability during drilling operations. Journal of Petroleum Science and Engineering, 82, 120-124..
- [3]. Abbas, A. K., Alameedy, U., Alsaba, M., & Rushdi, S. (2018, December). Wellbore trajectory optimization using rate of penetration and wellbore stability analysis. In SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition (p. D012S018R002). SPE. doi.org/10.2118/193755-MS.
- [4]. Wang, W., Wen, H., Jiang, P., Zhang, P., Zhang, L., Xian, C., Li, J., Zhao, C., Li, Q. & Xie, Q. (2019, March). Application of anisotropic wellbore stability model and unconventional fracture model for lateral landing and wellbore trajectory optimization: a case study of shale gas in Jingmen Area, China. In International petroleum technology conference (p. D031S056R005). IPTC. doi.org/10.2523/IPTC-19368-MS.

۵- براساس مدل ژئو زمین و نتایج آزمایش تک محوری و با توجه به مقادیر حاصل از تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، رژیم تنش حاکم در این میدان، نرمال است.

۶- نتایج حاصل از مقادیر تنش‌های برجای استخراج شده از چند ضلعی تنش براساس معیار موگی-کولمب نسبت به پارامترهای تعیین شده از روش‌های ژئو از دقت بیشتری برخوردار است.

۷- پنجره ایمن وزن گل با معیارهای شکست موهر-کولمب، موگی-کولمب، لید اصلاح شده، دراگر-پراگر محاطی و محیطی و ویبلز-کوک اصلاح شده تعیین شدند و نشان دادند که در صورت استفاده از وزن گل در محدوده ۱۳/۵ تا ۱۳/۹۵ پوند بر گالن از عمق ۴۰۰۲ تا ۴۳۰۹ m پایداری چاه تامین می‌شود.

۸- معیار شکست موهر-کولمب (۵/۷۸-۹/۵۴) پوند بر گالن) نسبت به معیار شکست موگی-کولمب (۴/۶-۸) پوند بر گالن) حد پایین پنجره گل را کمی بیشتر تعیین کرده است.

۹- مشاهده تعدادی شکستگی باز در دیواره چاه می‌تواند دلیلی بر هرزروی گل حفاری در این سازند باشد.

- [۵]. صفرخانلو، ر.، دهقان، ع. ن. و شیخ ذکریایی، س. ج. (۱۴۰۲). مدل سازی عددی اثر شکاف طبیعی در گسترش شکاف هیدرولیکی بر پایه روش ناحیه چسبنده، پژوهش نفت، ۱۳۳، ۱۴۳-۱۵۷. doi: 10.22078/pr.2023.10.22078.5153.3283.
- [۶]. دهقان، ع. ن.، گشتاسبی، ک.، آهنگری، ک.، جین، ی. و میسکیمینس، ج. (۱۳۹۴). مکانیسم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکاف هیدرولیکی سه محوره بر روی نمونه هایی از بلوک های سیمانی، پژوهش نفت، شماره ۲-۸۵، ۸۵-۶۰۷. doi: 10.22078/pr.2016.607.
- [۷]. دهقان، ع. ن. و خدایی، م. (۱۳۹۶). مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکاف از پیش موجود بر گسترش شکاف هیدرولیکی تحت تنش های سه محوری واقعی، پژوهش نفت، ۹۵، ۷۱-۸۰. doi: 10.22078/pr.2017.10.22078.2239.
- [۸]. دهقان، ع. ن. (۱۳۹۸). مطالعه آزمایشگاهی اثر سیمان شدگی شکاف طبیعی بر گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن نفت و گاز نامتعارف پژوهش نفت، ۱۰۵، ۱۱۱-۱۰۰. doi: 10.22078/pr.2018.3353.2539.
- [9]. Smirnov, N. Y. (2004). Mechanical earth model and integrated geomechanics approach as new frontier for petroleum industry. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, 69(5), 501-508. doi.org/10.3720/japt.69.501.
- [10]. Goodman, H. E., & Connolly, P. (2007, August). Reconciling subsurface uncertainty with the appropriate well design using the mechanical Earth model (MEM) approach. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition* (pp. SPE-111913). SPE. doi.org/10.2118/111913-MS.
- [11]. Yi, X. (2008, December). Wellbore Stability Predictions Using Mechanical Earth Model-A Case Study for Okan Field, Offshore Nigeria. In *International Petroleum Technology Conference* (pp. IPTC-12134). IPTC. doi.org/10.2523/IPTC-12134-MS.
- [12]. Lee, D., Singh, V., & Berard, T. (2009, November). Construction of a Mechanical Earth Model and Wellbore Stability Analysis for a CO₂ Injection Well. In *SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization* (pp. SPE-126624). SPE. doi.org/10.2118/126624-MS.
- [13]. ShunChang, W., YiMing, J., ChunJiang, Z., BaiLin, W., XinQuan, Z., JiPing, T., JinHai, Y. & HongHai, F. (2010). Real-time downhole monitoring and logging reduced mud loss drastically for high-pressure gas wells in Tarim Basin, China. *SPE Drilling & Completion*, 25(02), 187-192. doi.org/10.2118/130377-PA.
- [14]. Martocchia, F., Peretto, R., & Saldungaray, P. (2014, November). Fracture Optimization Applying a Novel Traceable Proppant and a Refined Mechanical Earth Model in the Congo Onshore. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D021S037R004). SPE. doi.org/10.2118/171783-MS.
- [15]. Dehghan, A. N. (2020). An experimental investigation into the influence of pre-existing natural fracture on the behavior and length of propagating hydraulic fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 240, 107330.
- [16]. Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2015). Experimental investigation of hydraulic fracture propagation in fractured blocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 887-895.
- [17]. Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2015). The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 210-215.
- [18]. Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2016). Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(5), 560-585.
- [16]. Cuervo, S., Adachi, J., & Lombardo, E. (2018, June). Integration of 1D and 3D Mechanical Earth Models in oil shale plays. An example from the Vaca Muerta Formation (Argentina). In *ARMA US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2018). ARMA.
- [17]. Muhammad, J. U., Sugiarto, C., Hadj Moussa, A., Kadadha, A., & Iturrios, C. (2020, February). Fully Automated Managed Pressure Drilling Delivers Precise Control Through High Pressures In a Narrow Drilling Window. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D102S000R002). SPE. doi.org/10.2118/199557-MS.
- [18]. Lothe, A. E., Cerasi, P., & Aghito, M. (2020). Digitized uncertainty handling of pore pressure and mud-weight window ahead of bit: North Sea Example. *SPE Journal*, 25(02), 529-540. doi.org/10.2118/189665-PA.
- [19]. Bhardwaj, N., Gunasekaran, K., Kumar, A., & Dutta, J. (2019, April). Establishment of Appropriate Normal Compaction Trend NCT: A Critical Aspect for Reducing Uncertainty in 3D Pore Pressure Modelling. In *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition?* (p. D011S004R002). SPE. doi.org/10.2118/194662-MS.
- [20]. Shen, G., & Shen, X. (2016, May). Widened safe mud window for subsalt well sections: a workflow and case study. In *Offshore Technology Conference* (p. D021S017R002). OTC. doi.org/10.4043/26917-MS.
- [21]. Dehghan, A. N. (2020). An experimental investigation into the influence of pre-existing natural fracture on

- the behavior and length of propagating hydraulic fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 240, 107330.
- [22]. Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2015). Experimental investigation of hydraulic fracture propagation in fractured blocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 887-895.
- [23]. Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2015). The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 210-215. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.02.001.
- [24]. Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2016). Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(5), 560-585.
- [25]. Adegbamigbe, T., Olamigoke, O., & Lawal, K. (2020, August). Application of a 1-D mechanical earth model for wellbore stability analysis in a shallow-water field, Niger Delta. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition* (p. D013S017R002). SPE. doi.org/10.2118/203632-MS.
- [26]. Allawi, R. H., & Al-Jawad, M. S. (2021). Wellbore instability management using geomechanical modeling and wellbore stability analysis for Zubair shale formation in Southern Iraq. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(11), 4047-4062.
- [27]. Al-Ajmi, A. M., & 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), 1200-1211. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.04.001.
- [28]. Ewy, R. T. (1998, July). Wellbore stability predictions using a modified Lade criterion. In *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering* (pp. SPE-47251). SPE. doi.org/10.2118/47251-MS.
- [29]. Rahimi, R. (2014). The effect of using different rock failure criteria in wellbore stability analysis. *Missouri University of Science and Technology*.
- [30]. Bagheri, H., Tanha, A. 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(11), 3935-3961.
- [31]. Heydari Gholanlo, H., & Nikkhah, M. (2023). Active Fault Detection by an Automatic Breakout Geometry Characterization Algorithm from Ultrasonic Borehole Imager. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 26(03), 565-576. doi.org/10.2118/214673-PA.
- [32]. Abdulkarim, A., Kharitonov, A., El Gezeeri, T. M., Al Haddad, M., Halawah, Y. A., & Sabea, S. A. (2024). Integration of Seismic Poisson Impedance Data with Real-Time Geomechanics and Real-Time 3D Ultradeep Resistivity Inversion Enabled New Opportunities in Developed Field: Case Study from Kuwait. *SPE Journal*, 29(01), 175-187. doi.org/10.2118/212656-PA.
- [33]. Aliko, E., Casciaro, D., Conte, A., Busollo, C., Baronio, E., & Abdo, E. A. (2025). Optimizing Well Integrity with Accurate Forecasting of Casing and Tubing Resistance Reduction Trends Through Innovative Numerical Modeling Techniques. *SPE Journal*, 30(01), 127-143. doi: https://doi.org/10.2118/216538-PA.
- [34]. Carpenter, C. (2024). Real-time monitoring and control system enhances drilling-fluid management. *Journal of Petroleum Technology*, 76(11), 80-83. doi.org/10.2118/1124-0080-JPT.
- [35]. Khouissat, A., & Michael, A. (2024). Blowout Contingency Decision-Making Leveraging Reservoir/Wellbore Pressure Modeling: Cap-and-Restrain or Cap-and-Divert?. *SPE Journal*, 29(12), 6775-6792. doi: https://doi.org/10.2118/223626-PA.
- [36]. Hashemi, R., Saberi, F., Asoude, P., & Soleimani, B. (2024). Enhancing reservoir zonation through triple porosity system: a case study. *SPE Journal*, 29(06), 3043-3062. doi.org/10.2118/219491-PA.
- [۳۷]. گزارش‌های منتشر نشده شرکت ملی مناطق نفت خیر جنوب (بررسی سیال و سنگ مخزن در میدان جنوب غربی ایران آگوست سال ۲۰۱۸)، (گزارش تکمیل زمین شناسی چاه عمودی توصیفی یکی از میداین جنوب غربی ایران ۱۸ مارچ ۲۰۱۸) و (گزارش ارزیابی نگاره تصویری از دهانه چاه اکتوبر ۲۰۲۴).
- [38]. Houston (2019) Emerson announced the release of Geolog 19, the latest version of its formation evaluation software, and presented it at the 60th Annual Symposium of the Society for Petrophysics and Well Log Analysis (SPWLA), held June 15-19 in The Woodlands, Texas.
- [39]. Heger, A. (2010). Geomechanical aspects of drilling in the vienna basin. [Master's Thesis, Montanuniversitaet Leoben (000)].
- [40]. Brudy, M., Zoback, M. D., Fuchs, K., Rummel, F., & Baumgärtner, J. (1997). Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 18453-18475. doi.org/10.1029/96JB02942.
- [41]. Wiprut, D., Zoback, M., Hanssen, T. H., & Peska, P. (1997). Constraining the full stress tensor from observations of drilling-induced tensile fractures and leak-off tests: application to borehole stability and sand pro

duction on the Norwegian margin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 365-e1.

[42]. Zhou, S. (1994). A program to model the initial shape and extent of borehole breakout. *Computers & Geosciences*, 20(7-8), 1143-1160. [43]. Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., & Hanachi, J. (2014). Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1), 13-25. doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.11.002.

[44]. Hoseinpour, M., & Riahi, M. A. (2022). Determination of the mud weight window, optimum drilling trajectory, and wellbore stability using geomechanical parameters in one of the Iranian hydrocarbon reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(1), 63-82.