



مقاله پژوهشی

تخمین پارامترهای ژئومکانیکی، تجزیه و تحلیل تنش‌های برجا و تعیین پنجره وزن بهینه گل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین

حمید قالیباف محمدآبادی<sup>۱</sup>؛ ناصر حافظی مقدس<sup>۲\*</sup>؛ غلامرضا لشگری پور<sup>۳</sup>؛ رئوف غلامی<sup>۴</sup>؛ حسین طالبی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای تخصصی؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادا؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادا؛ دپارتمان منابع انرژی، دانشگاه استاوانگر، استاوانگر، نروژ

۴- استادا؛ دپارتمان ژئومکانیک و مکانیک سنگ، شرکت مناطق نفت جنوب

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.345905.1168

چکیده

واژگان کلیدی

نگاره‌های مربوط به چاه‌های نفتی تفسیر/پردازش می‌شوند تا خصوصیات پتروفیزیکی، مکانیکی و ژئومکانیکی درجا را برای سنگ‌های پیرامون چاه‌های نفتی تشخیص دهند. اما همه نگاره‌ها به دلیل هزینه بالا و مشکلات زمین‌شناسی امکان برداشت امکان‌پذیر نمی‌باشد. به‌طور مثال نگاره‌های مربوط به‌کندی موج‌های صوتی حاوی اطلاعات ژئوفیزیکی و ژئومکانیکی حیاتی برای تعیین مدل‌های الاستیسیته دینامیکی، مدل یانگ، مدل بالک، مقاومت/امپدانس صوتی، مدل برشی و نسبت پواسون سنگ‌های پیرامون در اطراف دیواره چاه هستند بنابراین در این تحقیق ابتدا دو چاه تصادفی از یکی از میدان‌های نفتی جنوب ایران برگزیده شد که یکی به‌عنوان چاه آموزشی جهت تعیین مدل مناسب و دیگری جهت پیش‌بینی زمان موج‌های صوتی انتخاب شد این داده‌ها با استفاده از طیف وسیعی از روش‌های یادگیری ماشین و تنظیم فراپارمترها (Hyperparameter Tuning) روی الگوریتم‌ها، بهترین مدل‌ها جهت پیش‌بینی/تخمین لاگ‌های صوتی ارائه شد. در این فرایند، از بین روش‌های رگرسیون، روش  $k$ - نزدیک‌ترین همسایه (KNN) و از بین روش‌های ترکیبی الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest Regression) و الگوریتم درختان اضافی (Extra Tree Regression) بالاترین ضریب همبستگی را نشان داده‌اند. در نتیجه الگوریتم درختان اضافی جهت مدل‌سازی بر روی داده‌های آموزشی و آزمایشی چاه انجام گرفت. سپس این مدل جهت پیش‌بینی/سنجش زمان موج‌های صوتی طولی و برشی چاه هدف بکار گرفته شد. سپس با مقایسه داده‌های واقعی چاه هدف، مقدار خطای جذر میانگین مربعات و مجذور  $R$  به دست آمد. در ادامه با استفاده از روابط پورالاستیک تنش‌های برجا میدان تعیین شدند و معلوم گردید مخزن سروک و ایلام در رژیم تنش معکوس و مخزن آسماری در رژیم تنش نرمال تا امتداد لغز قرار دارند. در پایان با استفاده از معیارهای مکانیک سنگ بهترین وزن بهینه گل حفاری در چاه مورد مطالعه ارائه شد.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین، Hyperparameter Tuning، روش  $k$ - نزدیک‌ترین همسایه (KNN)، روش‌های ترکیبی، Random Forest Extra Tree Regression، تخمین پارامترهای ژئومکانیکی

گچی، انیدریتی، مارنی، آهک‌های نازک لایه و زون‌های مخزنی به دلیل تخلخل و فشار بالا مشکلاتی از جمله پدیده کیک، تغییر مسیر چاه، لگدزدن، فرایند فیشینگ (Fishing) و تلفات گل و لای بیش از حد باعث می‌شود. با توجه به اینکه

۱. پیش گفتار

بیشترین مشکلات حفاری ناشی از مشکلات پایداری دیواره چاه است که باعث از دست رفتن زمان و هزینه بیش از حد می‌شود. در سازندهای غیر مخزنی مسئله‌دار شامل لایه‌های

\*مشهد؛ دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ شماره تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۰۰؛ رایانامه:

است [۸]. این عمدتاً به علت تبدیل گچ ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) به انیدریت ( $CaSO_4$ ) می‌باشد. در اثر این واکنش در یک مخزن بسته/حوضه بسته آب آزاد شده در اثر انتقال به سنگ آهک‌های میان لایه‌ای در سازندهای تبخیری یا مخزنی پرفشار در طول زمان زمین‌شناسی بیش از حد تحت فشار منفذی قرار می‌گیرند. بنابراین، زمانی که وزن گل به درستی انتخاب و تنظیم نشده باشد، لگدزدن ممکن است رخ دهد. در نتیجه، هرزروی گل حفاری<sup>۲</sup> مشکل عمده‌ای است که در فرآیند حفاری با آن مواجه می‌شود و از آن به‌عنوان از بین رفتن ناخواسته کل یا بخشی از گل حفاری در این سازندها تعریف می‌شود. این به این دلیل است که فشار اعمال شده توسط ستون سیال حفاری به اندازه کافی برای غلبه بر فشار اعمال شده توسط سیالات در سازند حفاری زیاد نمی‌باشد. اگر اقدام فوری برای کنترل ضربه انجام نشود، چاه کشته می‌شود، یا فوران رخ می‌دهد. در نتیجه فرایند فیشینگ<sup>۳</sup> (روش بازیابی تجهیزات گم شده یا گیر کرده در چاه) و ناپایداری چاه که منجر به افزایش زمان و هزینه عملیات می‌شود رخ می‌دهد. هنگامی که یک چاه در حال حفاری است، وضعیت تنش درجا تغییر/عوض و بسته به میدان به‌طور بالقوه باعث مشکلات پایداری چاه (مانند جریان ضربه، تنگی چاه در نتیجه گیر افتادن تجهیزات حفاری، گیر کردن لوله‌ها، شکستگی‌ها و هرزروی گل) که منجر به تأخیر در فعالیت حفاری ( $NPT$ ) می‌شود.

یکی از روش‌های تحلیل پایداری چاه‌ها استفاده از نگاره‌های چاه‌های نفتی می‌باشد. نگاره‌های مربوط به چاه‌های نفتی تفسیر/پردازش می‌شوند تا خواص پتروفیزیکی، مکانیکی، و ژئومکانیکی درجا را تخمین بزنند که برای شناسایی لایه‌های زیرسطحی ضروری است. انواع مختلفی از نگاره‌ها وجود دارد که هر یک اطلاعات متمایز در مورد ویژگی‌های زیرسطحی ارائه می‌دهد. نگاره‌های مانند اشعه گاما ( $GR$ )، مقاومت، چگالی و نگاره‌های مربوط به نوترون به‌عنوان نگاره‌های معمول چاه (قابل دسترس) در نظر گرفته می‌شوند که در اکثر چاه‌ها اجرا می‌شوند. نگاره‌های دیگر چاه مانند طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته ( $NMR$ )، پراکندگی دی‌الکتریک، طیف‌سنجی عنصری و گاهی لاگ‌های صوتی تنها در تعداد

ناپایداری چاه یکی از بحرانی‌ترین چالش‌ها است نه تنها در مرحله ساخت چاه بلکه بر کل چرخه زندگی یک چاه تاثیرگذار است، با ایجاد مسائلی همچون ریزش دیواره چاه، هرزروی گل، گیرافتادن لوله، تولید ماسه و هر عاملی که منجر به ناپایداری دیواره چاه می‌شود. کل زمان مورد نیاز برای حل مشکل تا از سرگیری مجدد عملیات از نقطه یا عمقی که این رویداد رخ می‌دهد زمان غیر مولد<sup>۱</sup> ( $NPT$ ) نام دارد.  $NPT$  معمولاً تا ۳۲ درصد از حفاری‌ها را تشکیل می‌دهد. از جمله هزینه‌های عملیات برای چاه‌های آب‌های عمیق [۱]، به‌طور کلی نتایج در این زون‌ها ناپایدار نشان می‌دهد که گرادیان فشار منفذی، گرادیان شکست برشی و گرادیان شکست کششی بشدت متغیر است. همچنین پنجره وزن بهینه گل در این زون‌ها بشدت باریک می‌باشد. علاوه بر این مشکلات ژئومکانیکی نیز با آنها همراه است. ۴۰ درصد  $NPT$  مربوط به حفاری در آب‌های عمیق، و محیط‌های چالش‌برانگیز و غیره است [۲]. کل هزینه مسائل مربوط به ژئومکانیک چندین میلیارد دلار است [۳]. ۵۰ درصد از  $NPT$  مرتبط است با مسائل مربوط به ژئومکانیک (پایداری، هرزروی گل حفاری، گیرافتادن لوله حفاری و غیره) که تقریباً ۱۱ درصد از بودجه حفاری را تشکیل می‌دهد [۴]. به‌طور خلاصه، رویدادهای بی‌ثبات کننده غیرمنتظره افزایش می‌یابد. از جمله: خطرات حفاری، کاهش ایمنی، آسیب احتمالی کارکنان و افزایش زمان غیرتولیدی رخ خواهد داد. علاوه بر این، این عوامل بسیار گران هستند و به راحتی می‌توانند اگر به‌طور مکرر اتفاق بیفتد منجر به افزایش هزینه شود. دانشمندان بسیاری از جمله اصلان نژاد تحقیق بر روی کرنات‌ها [۵]، یا بررسی پایداری چاه بر روی ماسه‌سنگ‌ها [۶]، همچنین در سال‌های اخیر پایداری دیواره چاه بر روی شیل‌ها صورت پذیرفته است [۷]. در سازندهای تبخیری تلفات بیش از حد گل به‌طور متناوب رخ می‌دهد و همین‌طور در لایه‌های آهکی نازک لایه به دلیل شکستگی و گسترش درز و شکاف هرز روی گل رخ می‌دهد. این آهک‌های نازک لایه به‌صورت میان لایه‌های در سازندهای تبخیری مسئله‌دار گچساران و سازندهای مخزنی قرار گرفته است. فشار منفذی در سازندهای غیرمخزنی پرفشار جهت تحلیل پایداری چاه بیش از حد غیرطبیعی و نزدیک به  $I. Ipsi/ft$  (یا بیشتر)

<sup>1</sup> Non-productive -time (NPT)<sup>2</sup> Lost Circulation<sup>3</sup> Fishing

پشتیبان غیرخطی طبقه‌بندی کرده‌اند [۱۹]. بسیاری از مدل‌های دیگر مبتنی بر نگاره‌های پتروفیزیک سنگ با توجه به خصوصیات غیرمتعارف و متعارف مخزن‌ها برای پیش‌بینی مناسب لاگ‌ها ارائه شده است. به‌طور کلی پیش‌بینی همه این نگاره‌ها مبتنی بر فاصله به فاصله واحدهای ژئومکانیکی/واحد سنگی و نیاز به زمان کافی، تخصص انسانی و کالیبراسیون آن‌ها دارد.

در این مطالعه، یک رویکرد جدید برای پیش‌بینی دقیق‌تر لاگ‌های صوتی برشی با استفاده از طیف وسیعی از الگوریتم‌های شباهت، مبتنی بر یادگیری ماشین (*ML*)، جهت پیش‌بینی داده‌های ازدست‌رفته پیشنهاد شده است. استفاده از الگوهای تشابه چاه‌های مختلف با خواص ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و ژئومکانیکی مشابه جهت تهیه یک مدل دقیق که در تصمیم‌گیری حائز اهمیت است ارائه شده است. در مرحله بعد واحدهای ژئومکانیکی به‌وسیله الگوریتم‌های بدون نظارت یادگیری ماشین تعیین شد. سپس تنش‌های برجا و دیواره چاه با روابط پورالاستیک به دست آمد و وضعیت رژیم تنش در میدان مورد مطالعه که یکی از میدان‌های واقع در جنوب ایران می‌باشد مشخص گردید. در ادامه تحقیق، با استفاده از معیار مور- کلمب و موگی - کلمب وزن بهینه گل جهت پایداری چاه تعیین شد.

## ۲. روش تحقیق

لاگ‌های زمان موج فشاری (*DTCO*) و زمان موج برشی (*DTSM*) در همه چاه‌های حفار شده در یک میدان به دلیل محدودیت‌های مالی یا عملیاتی به دست نمی‌آیند. در چنین شرایطی تکنیک‌های یادگیری ماشین را می‌توان برای پیش‌بینی نگاره‌های صوتی *DTCO* و *DTSM* برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی، ارزیابی تنش‌های برجا و تعیین پنجره وزن بهینه گل استفاده کرد. هدف اولیه این تحقیق تحلیل داده‌های مبتنی بر داده‌های پتروفیزیکی، توسعه مدل‌های مبتنی بر داده با پردازش لاگ‌های معمولی (دستیابی آسان) از چاه‌های دارای داده لاگ صوتی و استفاده از مدل‌های مبتنی بر داده برای استخراج زمان موج فشارشی و موج برشی چاه‌های فاقد لاگ صوتی می‌باشد. در این تحقیق جهت سنتز لاگ‌های صوتی از داده‌های

محدودی از چاه‌ها اجرا می‌شوند. نگاره‌های مربوط به‌کندی موج صوتی حاوی اطلاعات ژئومکانیکی/ژئوفیزیکی حیاتی برای تعیین مشخصات زیرسطحی در اطراف چاه هستند. اغلب لاگ‌های صوتی برای تکمیل فرایند مطالعات لرزه‌ای یا تعیین/پیش‌بینی خواص ژئومکانیکی مورد نیاز است. هنگامی که لاگ‌های صوتی در یک چاه یا در یک فاصله زمانی وجود ندارند، یک روش معمول سنتز آن‌ها بر اساس چاه‌های مجاور آن‌ها است که دارای نگاره‌های صوتی هستند. این به‌عنوان سنتز لاگ صوتی یا تولید لاگ شبه‌صوتی نامیده می‌شود [۹].

در سال‌های اخیر استفاده از لاگ‌های چاه‌نگاری جهت شناسایی لایه‌های زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین تحقیقات قابل توجهی را به خود دیده است [۱۰،۱۱]. تکنیک‌های محاسباتی معاصر در تخمین پارامترهای ناشناخته مانند رخساره‌ها کاملاً سودمند هستند [۱۰،۱۲]. گسل و شکستگی‌ها [۱۳]، لاگ‌های مربوط به پتروفیزیک با استفاده از مدل‌های فیزیک سنگ [۱۴]، همین‌طور می‌توان با دسترسی به لاگ‌های تصویری<sup>۴</sup> و اطلاعات آزمایشگاهی از هر سازند با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های نظارت‌شده و بدون نظارت در شناسایی و پیش‌بینی رخساره‌های مختلف بکار گرفته شود [۱۵]. محمدعلی و همکاران با استفاده از این الگوریتم‌ها برای عمق‌هایی که لاگ‌های صوتی برشی وجود ندارند ارائه داده‌اند [۱۶]. تیاگو و همکاران با بررسی روش‌های *Classification* در یادگیری ماشین بهترین روش جهت شناخت لایه‌های سنگ‌شناسی را روش جنگل تصادفی<sup>۵</sup> پیشنهاد داده‌اند [۱۷]. پیش‌بینی سرعت موج برشی با استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی با استفاده یادگیری عمیق به دلیل توانایی بالا در پیش‌بینی سرعت موج برشی انجام گرفته است [۱۸]. به‌طور کلی اندازه‌گیری دقیق سرعت موج برشی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا آن نقش اساسی در تعیین خواص ژئومکانیکی در تشخیص لایه‌های زمین‌شناسی ایفا می‌کند. به‌طور کلی، شباهت همبستگی بین نگاره‌ها نقش اصلی را در پیش‌بینی لاگ‌های صوتی برشی - طولی ایفا می‌کند. ال‌آناری و گیتس توزیع نفوذپذیری و رخساره‌های الکتریکی در مخازن ماسه‌سنگی بسیار ناهمگن را با استفاده از تکنیک ماشین بردار

<sup>5</sup>Random forest method

<sup>4</sup> Image log

چاه‌های که دارای تمام پارامترها مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱. داده‌های استفاده شده جهت سنتز نگاره‌های صوتی

چاه پیش‌بینی	چاه مدل	واحد	نام نگاره
بله	بله	V/V	Neutron (NPHI)
بله	بله	API	Gamma Ray (SGR)
بله	بله	API	Gamma Ray (GR)
بله	بله	Gram/cm <sup>3</sup>	Density (RHOB)
؟	بله	μs/foot	Compressional travel time (DTCO)
؟	بله	μs/foot	Shear travel time (DTSM)

طیف گسترده‌ای از مدل‌ها جهت آزمایش توانایی مدل‌ها برای مدیریت تغییرات در داده‌ها، تشخیص الگوها و بهینه‌سازی سوگیری/اوریانس انتخاب شد. از بین این روش‌ها مدل‌های KNN، جنگل تصادفی و درختان اضافی بهتر عمل کردند. مدل‌های درختان طبقه‌بندی و رگرسیون<sup>۶</sup> (CART) از نظر محاسباتی کم هزینه‌تر، شفاف‌تر، و فراپارامترها به راحتی در آن‌ها قابل تنظیم هستند. بعد از انتخاب این مدل‌ها برای تنظیم فراپارامترها، ابتدا داده‌ها استانداردسازی شد و مدل‌های KNN، جنگل تصادفی و درختان اضافی بهترین عملکرد را نشان داده‌اند. پس از تنظیم فراپارامترها، مدل درختان اضافی بهترین عملکرد را نشان داده‌اند. سپس این مدل بر روی داده‌های آموزشی (training sets) و آزمایشی (testing sets) چاه مدل بکار گرفته شد و نتایج جهت پیش‌بینی در چاه‌های هدف (فاقد نگاره‌های صوتی) بکار گرفته شد.

## ۱.۲ ارزیابی داده‌ها

ویژگی‌های داده‌ها در برابر کندی موج فشاری متغیر پیش‌بینی (DTCO) نشان داده می‌شود (شکل ۱). تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که دو متغیر هدف، زمان موج فشاری (DTCO) و زمان موج برشی (DTSM) دارای ضریب همبستگی پیرسون قوی ۰/۹۸ هستند. یک نقشه حرارتی از ضرایب همبستگی پیرسون برای داده‌ها در شکل ۲ نشان داده می‌شود. برای بازرسی اولیه، مقایسه متغیرهای مستقل با هر

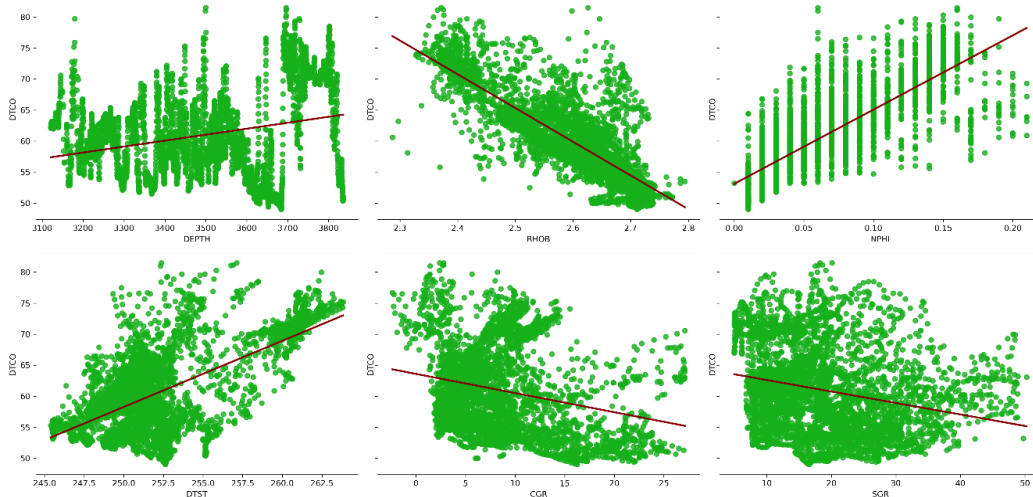
مراحل این مطالعه در قالب ارزیابی یادگیری ماشین نظارت‌شده شامل ورود داده‌ها، بازرسی داده‌ها، تعیین ویژگی‌های رتبه‌بندی، بررسی الگوریتم‌ها، داده‌های پردازش شده، و فراپارامترها تنظیم شده است. در این تحقیق مدل یادگیری ماشین بهینه شده است. برای این منظور مجموعه داده در چاه‌های مدل‌سازی آموزش داده شده و در چاه هدف مستقر شده است. جدول ۲ خلاصه‌ای از مدل‌های انتخاب شده را ارائه می‌دهد.

## جدول ۲. مدل‌های بکار گرفته شده یادگیری ماشین در این تحقیق

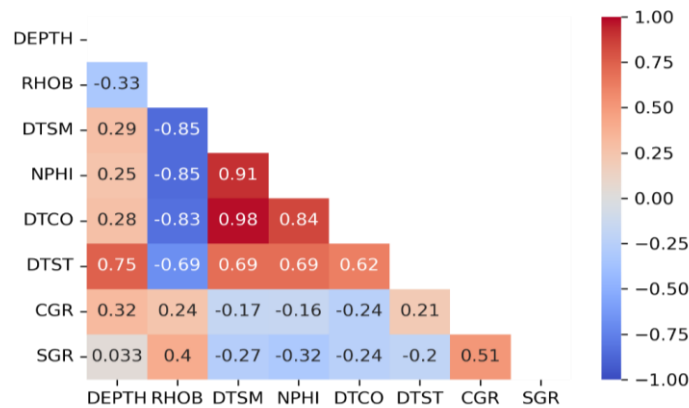
شرح	اختصار	نام مدل
Baseline	LinReg	Linear Regression
Regularization	Ridge	Ridge Regression
Regularization	Lasso	Lasso Regression
Baseline	KNN	KNearest Neighbors
Baseline	DecTree	Decision Tree
Baseline	SVR	Support Vector
Neural Net	MLP	Multi-Layer Perceptron
Ensemble	AB	AdaBoost Regressor
Ensemble	GBM	Gradient Boosting
Ensemble	RF	Random Forest
Ensemble	ET	Extra Trees Regressor

<sup>6</sup> Classification and regression trees (CART)

دو متغیر هدف (وابسته) ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله پیش‌بینی مدل نهایی شامل هر دو متغیر ( $DTCO-DTSM$ ) هدف می‌باشد.



شکل ۱. ویژگی‌های متغیرهای مستقل در برابر زمان موج فشارشی یا متغیر هدف ( $DTCO$ ) در چاه مدل



شکل ۲. نقشه حرارتی از ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته یا هدف ( $DTCO, DTSM$ ) در چاه مدل

برای این منظور نیاز است با استفاده از تابع‌های احتمالاتی گوناگون شامل: تابع جرم احتمال مشترک ( $PMF$ )<sup>۷</sup>؛ تابع چگالی احتمال ( $PDF$ )<sup>۸</sup>؛ و نمودارهای پراکندگی<sup>۹</sup> در مقابل متغیر هدف ( $DTSM, DTCO$ ) این داده‌های پرت مشخص

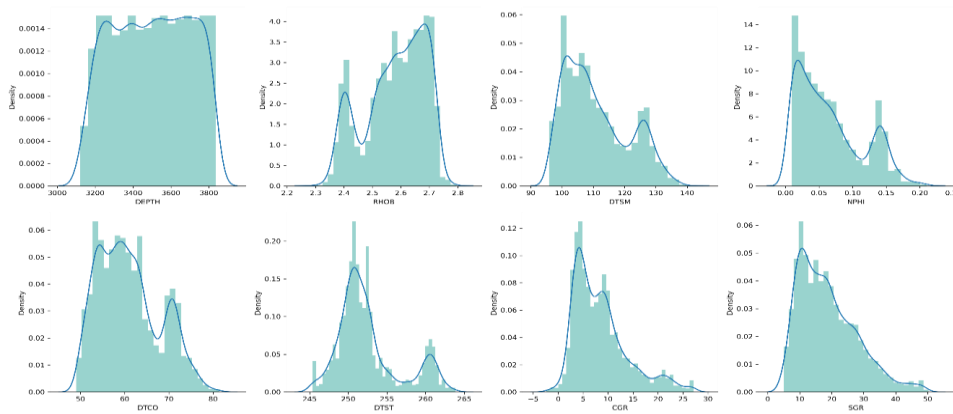
در بازرسی اولیه، تعداد داده‌های پرت آماری که دقت مدل را نسبتاً پایین می‌آورند لازم است، تحت یک فیلتر z-score قرار گیرند تا همه متغیرهایی که بیش از سه انحراف استاندارد از میانگین دارند حذف شوند. این در حالی است داده‌ها در مناطق اصلی متمرکز هستند، شکل داده‌ها را حفظ می‌کند.

<sup>۹</sup> Scatter plot

<sup>۷</sup> Probability mass function (PMF)

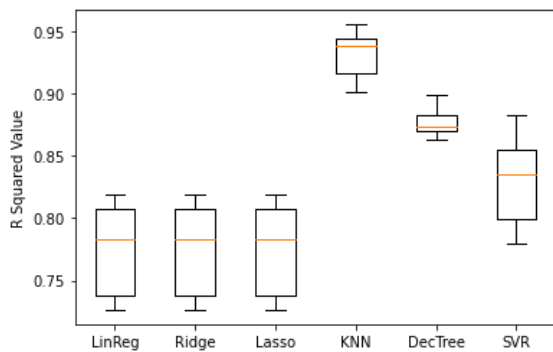
<sup>۸</sup> Probability density function (PDF)

می‌گردند. شکل ۳ تابع چگالی احتمال متغیرهای مستقل و وابسته در چاه مدل نشان داده می‌شود.



شکل ۳. تابع چگالی احتمال متغیرهای مستقل و وابسته در چاه مدل

در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است عملکرد الگوریتم  $k$  - نزدیک‌ترین همسایه، درخت تصمیم و رگرسیون بردار پشتیبان بعد از استانداردسازی بهتر از بقیه عمل کرده است.



شکل ۴. عملکرد پایه الگوریتم یادگیری ماشین

### ۳.۲ تنظیم فرآیند پارامترها در روش KNN

به‌طور پیش‌فرض  $k$  نزدیک‌ترین همسایه از کتابخانه *Scikit Learn* (*sklearn*) از منطق رأی‌گیری با پنج همسایه نزدیک استفاده می‌کند و وزن‌های همسایه یکنواخت هستند. سه الگوریتم مختلف برای انتخاب در دسترس هستند که

### ۲.۲ عملکرد الگوریتم‌ها بر روی داده‌های استاندارد شده

شش مدل برای آزمایش اولیه انتخاب شده است که شامل رگرسیون خطی<sup>۱۰</sup>، رگرسیون ستیغی<sup>۱۱</sup>، رگرسیون لاسو<sup>۱۲</sup>،  $k$  - نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۱۳</sup>، درخت تصمیم<sup>۱۴</sup> و رگرسیون بردار پشتیبان<sup>۱۵</sup> هستند. همه این روش‌ها در فرآیند مدل‌سازی انتخاب نمی‌شوند. درخت تصمیم نشان‌دهنده عملکرد جنگل تصادفی و درختان اضافی هستند، درحالی‌که رگرسیون بعد از نرمال‌سازی نشانه‌ای از افزایش عملکرد را نشان می‌دهد. نتایج با اجرای هر مدل بر روی همان مجموعه داده با اعتبارسنجی متقاطع  $k$ -folds برابر با ۱۰ اجرا شده است. نمودارهای *Box and whisker* برای نشان دادن نتایج ده الگوریتم اجرا شده نشان داده شده است.

مدل‌هایی مانند  $k$  - نزدیک‌ترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان هنگام کار بر روی یک مجموعه داده استاندارد، بهبود قابل‌توجهی در مدل دارند. این شامل تبدیل همه بردارهای ویژگی‌ها است تا میانگین آن‌ها در مرکز صفر و انحراف استاندارد آن در ۱ قرار گیرد. نتایج عملکرد پایه مدل در مجموعه داده‌های استاندارد شده به‌وسیله نمودار *Box &*

<sup>13</sup> *K-nearest neighbors*

<sup>14</sup> *Decision tree*

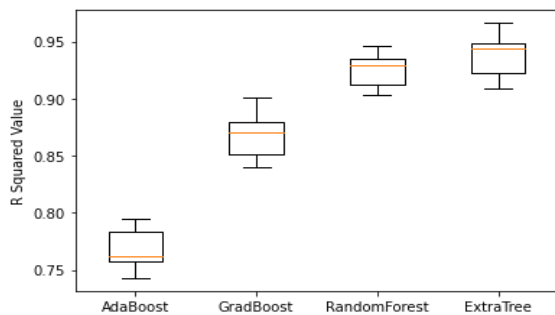
<sup>15</sup> *Support vector regression*

<sup>10</sup> *linear regression*

<sup>11</sup> *Ridge regression*

<sup>12</sup> *Lasso regression*

برای ساخت مدل *Regression* و *Extra Tree Regression* ترکیبی انتخاب شده‌اند. جنگل تصادفی و درختان اضافی بر اساس عملکرد ماهرانه مدل و درخت تصمیم از مراحل قبلی انتخاب می‌شوند. الگوریتم گرادیان تقویتی (*Gradient Boosting*) برای مقایسه و ارزیابی مدل‌ها انتخاب شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل‌های مختلف بدون تنظیم فرآپارامترها چگونه عمل می‌کنند. آن‌ها با استفاده از ۱۰ تقسیم از اعتبار سنجی متقاطع *k - folds* تولید شده‌اند. هر ویژگی متغیر مستقل برای داشتن میانگین صفر و انحراف استاندارد، یک به یک استاندارد شده است.

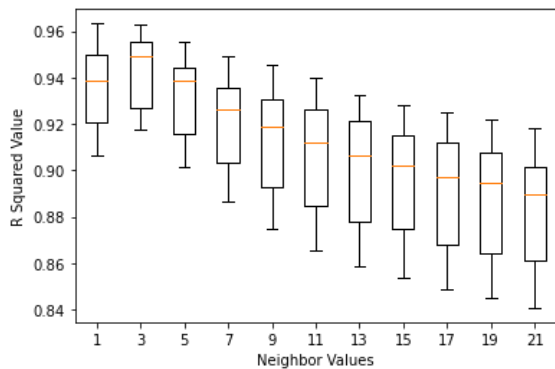


شکل ۶. عملکرد چهار مدل ترکیبی یادگیری ماشین برای ساخت بهترین مدل

#### ۵.۲ تنظیم فرآپارامتر در الگوریتم‌های منتخب

فرآپارامترها با بیشترین تأثیر بر روی مدل‌های مبتنی بر درخت، تعداد درختان تولیدشده است. با افزایش تعداد درختان، عملکرد مدل نیز افزایش می‌یابد. این همچنین به قدرت محاسباتی بیشتری برای پردازش مدل‌های درختان اضافی نیاز دارد. تعداد درختان از پنج تا ۳۰۰ متغیر بود. زمان محاسبه برای بررسی اینکه آیا مدل ارزیابی دقت برای سرعت ضروری است یا خیر، ردیابی شد. نتایج حاصل از تنظیم هایپرپارامتر بر روی جنگل تصادفی در شکل ۷ و درختان اضافی در شکل ۸ نشان داده می‌شود.

عبارتنداز الگوریتم‌های درختی شامل *kd tree*، *ball tree* و *brute* [۲۰]. شکل ۵ نشان می‌دهد که چگونه مقدار مربع *R* با مقادیر متغیر همسایه از یک تا بیستویک تغییر می‌کند. مقدار افزایش *K* به عنوان اعداد فرد بکار گرفته می‌شود تا از ایجاد تساوی در طول فرآیند رأی‌گیری جلوگیری شود.



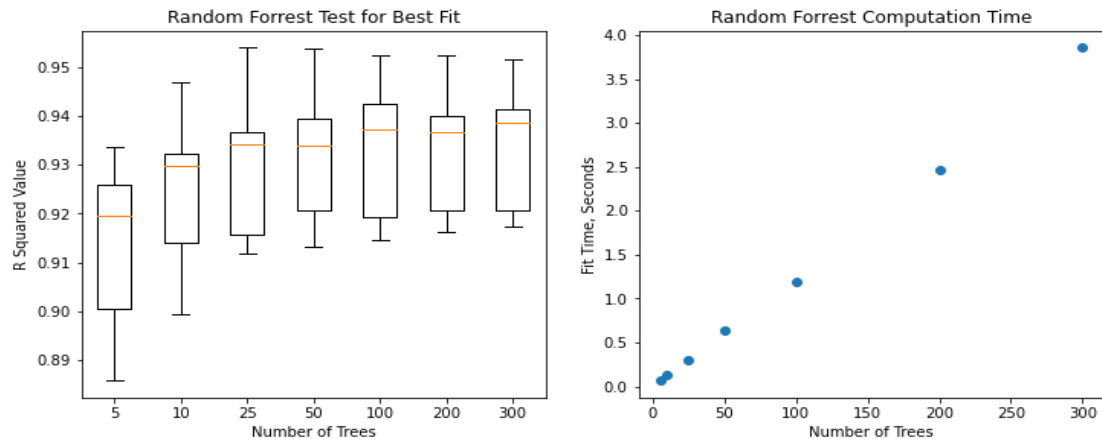
شکل ۵. عملکرد *KNN* با تنظیم مقدار *K* که حالت بهینه ۳ می‌باشد.

در شکل ۵ مشخص است که مقدار *K* مساوی ۳ بهترین تناسب را ارائه می‌دهد. *Scikit Learn* (*Sklearn*) به وسیله تابع *Grid Search CV* برای انتخاب بهترین فرآپارامترها استفاده شده است [۲۰] که درخت توپ را برای الگوریتم و فاصله را برای وزن‌ها انتخاب می‌شوند. الگوریتم درخت توپ و *KD Tree* الگوریتم‌های درختی هستند که برای تقسیم فضایی نقاط داده و تخصیص آن‌ها به مناطق خاص استفاده می‌شوند. به عبارت دیگر، آن‌ها برای ساختار داده‌ها در یک فضای چندبعدی استفاده می‌شوند. برای بهینه‌سازی فرآپارامترهای *KNN*، الگوریتم مساوی درخت توپ، *K* تعداد همسایگان مساوی ۳ و وزن‌ها مساوی فاصله‌ها می‌باشند. در نتیجه، مقدار مجذور *R* به ۰/۹۴۲۸ افزایش یافته است.

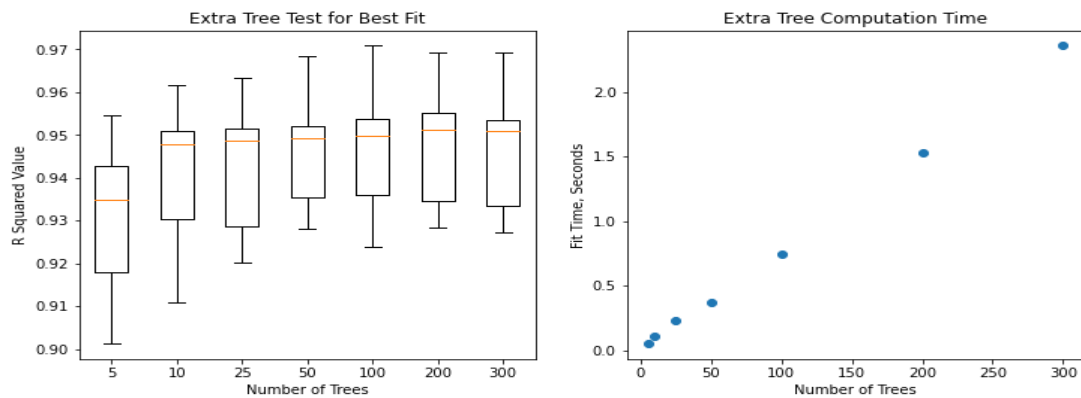
#### ۴.۲ ارزیابی مدل‌های ترکیبی<sup>۱۶</sup>

چهار مجموعه مدل شامل: *Ada Boost Regression*، *Gradient Boosting Regression*، *Random Forest*،

<sup>16</sup> Ensemble Model Evaluation



شکل ۷. تنظیم فرا پارامترها بر روی مدل جنگل تصادفی که در این تحقیق عدد ۱۰۰ انتخاب شد.



شکل ۸. تنظیم فرا پارامترها بر روی مدل درختان اضافی که در این تحقیق عدد ۱۰۰ انتخاب شد.

## ۶.۲ آموزش و استقرار نهایی

مدل درختان اضافی در تمام مشاهدات از مجموعه داده استاندارد آموزش داده شده است. اعتبار سنجی متقاطع  $k$ - $Fold Cross-Validation$  با ۱۰ تقسیم‌بندی انجام شد که منجر به مقدار مجذور  $R$  مساوی  $0.95$  و ریشه میانگین مربعات خطای  $1/8$  تعیین شده است. برای تجسم عملکرد مدل، یک تقسیم آموزشی/آزمایشی ( $20/80$ ) انتخاب شد. شکل ۹ پیش‌بینی‌های مدل را برای مدل‌سازی آموزشی برای  $DTCO$  و  $DTSM$  نشان می‌دهد. شکل ۱۰ جهت تست مدل آموزشی با هشتاد درصد داده با بیست درصد باقیمانده تحت عنوان داده آزمایشی انجام گرفته است. همان‌طور که مشخص است مقدار مجذور  $R$  هم برای مدل آزمایشی و آموزشی به هم نزدیک می‌باشد. بنابراین مسئله بیش برآزش یا کم برآزش رخ نداده است. البته علت نزدیکی مقدار مجذور  $R$  برای هر دو

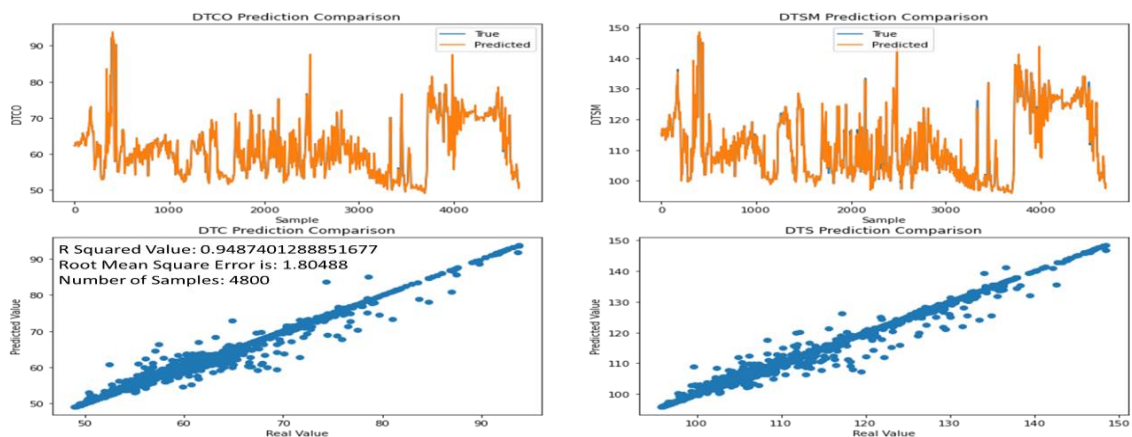
به‌طور کلی عملکرد مدل با افزایش درختان بهبود می‌یابد، درحالی‌که زمان محاسبه روند صعودی خطی را حفظ می‌کند. در این تحقیق ۱۰۰ درخت انتخاب شده است. زیرا تعادل خوبی بین دقت و کارایی مدل برای ساخت مدل در سراسر مدل ایجاد می‌کنند. با ۱۰۰ درخت در مدل درختان اضافی مقدار مجذور  $R$  متوسط  $0.9487$ ، در مدل جنگل تصادفی مقدار مجذور  $R$  متوسط  $0.94$  و در مدل  $KNN$  مقدار مجذور  $R$  متوسط  $0.9424$  از مرحله قبل به‌دست‌آمده است. مدل درختان اضافی تا حدی بهتر از مدل جنگل تصادفی و مدل  $KNN$  عملکرده است. با پایه خوبی از ارزیابی مدل‌ها و تنظیم فراپارامترهای فوق، مدل درختان اضافی را می‌توان در کل مجموعه داده در چاه‌های مدل با داده‌های آموزشی و آزمایشی انجام داد و سپس در چاه‌های هدف جهت پیش‌بینی متغیرهای وابسته ( $DTCO$ ,  $DTSM$ ) بکار گرفت.



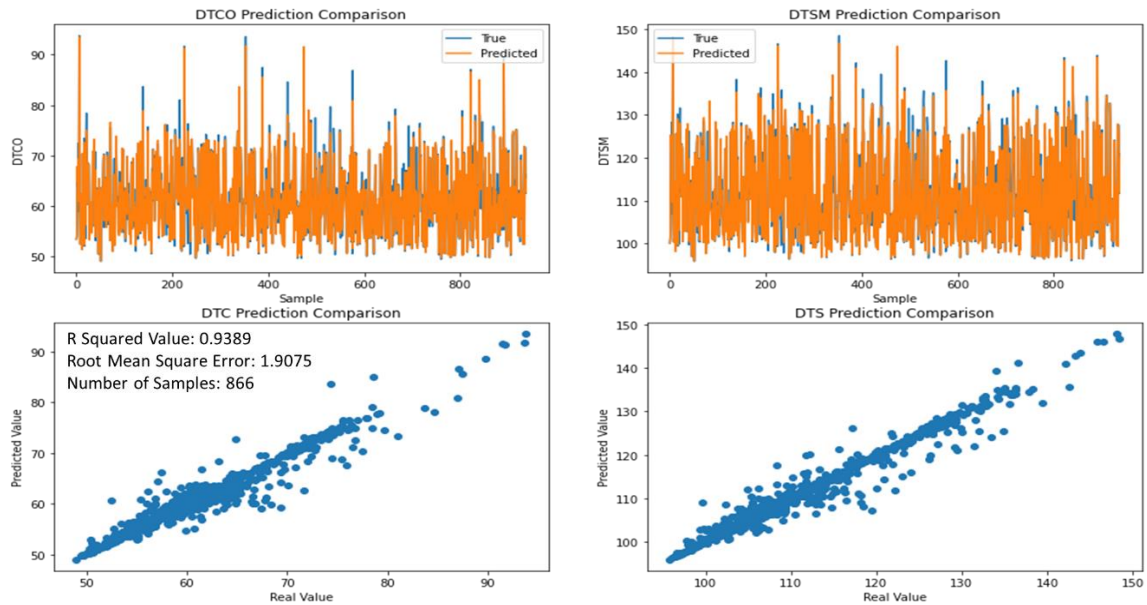
در شکل ۱۱ مشاهده کرد. نتایج این پیش‌بینی نیز با پارامترهای واقعی مدل مقایسه شده است که مقدار مجذور  $R$  در حدود ۰/۹۲ است. خاطرنشان می‌شود با نزدیک بودن چاه مدل به چاه هدف و همین‌طور تعداد بیشتر نگاره‌های چاه‌های نفتی / متغیرهای مستقل جهت پیش‌بینی، مقدار  $R$  افزایش می‌یابد، همین‌طور استفاده یکی از لاگ‌های صوتی به‌عنوان متغیر مستقل جهت پیش‌بینی لاگ دیگر مقدار  $R$  به یک نزدیک می‌گردد. البته با توجه به تصادفی بودن انتخاب چاه هدف، نزدیک نبودن با چاه مدل و کم بودن متغیرهای مستقل یا نگاره‌ها در مدل پیش‌بینی مقدار مجذور  $R$  به همین ترتیب کم می‌گردد.

در مجموع ۱۰ مدل یادگیری ماشین بر روی توانایی آن‌ها جهت پیش‌بینی زمان موج فشاری و زمان موج برشی مورد بررسی قرار گرفت.  $KNN$  با مجموعه داده استاندارد شده از بین مدل‌های پایه بهترین مدل را ارائه داده است. همچنین از بین مدل‌های گروه ترکیبی، جنگل تصادفی و درختان اضافی بهترین عملکرد را نشان داده است. برای هر سه مدل  $KNN$ ،  $Random forest$  و  $Extra Trees$  با تغییرات بر روی فرآیندها، مدل بهبود یافت که منجر به مقادیر مربع  $R$  به ترتیب ۰/۹۴۲۸، ۰/۹۴ و ۰/۹۵ شد. مدل درختان اضافی در نهایت انتخاب شد، در کل مجموعه داده‌ها در چاه مدل آموزش داده شد و برای پیش‌بینی مقادیر چاه هدف به کار گرفته شد.

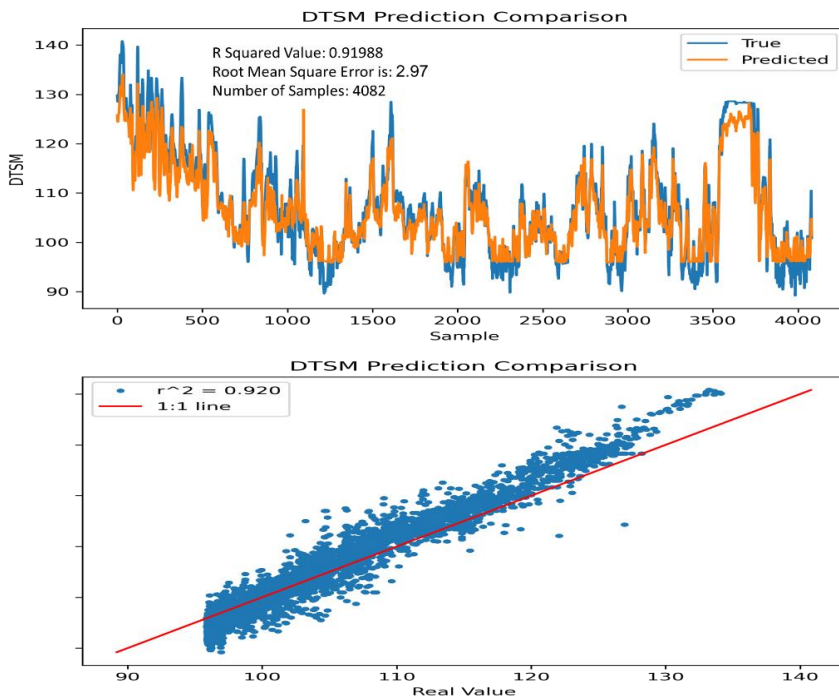
داده آموزشی و آزمایشی استفاده از روش‌های جدیدتر اعتبار سنجی متقاطع ( $k$ -Fold) بکار گرفته شده است. اگر مجموعه داده‌های آموزشی را به‌طور تصادفی به  $k$  زیرنمونه یا لایه ( $Fold$ ) با حجم یکسان تفکیک کنیم، می‌توان در هر مرحله از فرآیند  $CV$ ، تعداد  $k-1$  از این لایه‌ها را به‌عنوان مجموعه داده آموزشی و یکی را به‌عنوان مجموعه داده اعتبارسنجی در نظر گرفت. در این روش خود داده‌های آموزشی در مدل به ۱۰ قسمت تبدیل شده است و در هر بار پردازش داده به ترتیب قسمتی از داده نقش اعتبار سنجی مدل را ایفا می‌کند. البته خاطرنشان می‌شود، می‌توان در اعتبار سنجی داده‌های آموزشی از روش اعتبارسنجی مونت کارلو ( $Monte Carlo$ ) ( $Cross Validation$ ) استفاده کرد. اما ایرادی که این روش با توجه به انتخاب تصادفی داده‌ها دارد، نسبت حجم داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی به تعداد تکرارها وابسته نخواهد بود و برخلاف روش  $k$ -Fold می‌توان با هر تعداد، فرآیند  $CV$  را انجام داد. ولی در عوض به دلیل انتخاب تصادفی زیرنمونه‌ها، ممکن است بعضی از مشاهدات هرگز در بخش اعتبارسنجی به کار گرفته نشده و بعضی دیگر بیش از یک‌بار در محاسبات برآورد خطای مدل به کار روند. از شکل ۹ و ۱۰ مشخص است که مدل درختان اضافی در پیش‌بینی مقادیر  $DTCO$  و  $DTS$  از ستون‌های ویژگی ورودی به‌خوبی کار می‌کند. بعد از این مرحله داده‌های چاه هدف وارد مدل شده و نتایج پیش‌بینی‌های متغیر وابسته استخراج می‌شوند. این پیش‌بینی‌ها را می‌توان



شکل ۹. انتخاب مدل درختان اضافی به‌عنوان بهترین حالت پیش‌بینی لاگ‌های صوتی بر روی داده‌های آموزشی، همان‌طور که قابل انتظار است مدل بر روی داده‌های آموزشی خوب عمل کرده است.



شکل ۱۰. انتخاب مدل درختان اضافی به‌عنوان بهترین حالت پیش‌بینی لاگ‌های صوتی بر روی داده‌های آزمایشی، با توجه به بالا بودن مقدار R مدل، بر روی داده‌های آموزشی و آزمایشی مدل در حالت تعادل می‌باشد. بنابراین، حالت بیش‌برازش (*Over fitting*) و کم‌برازش (*Under fitting*) اتفاق نیفتاده است



شکل ۱۱. مقایسه پیش‌بینی نگاره‌های کندی موج برشی به‌وسیله الگوریتم درختان اضافی با نگاره واقعی چاه هدف

### ۳. تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ، توزیع تنش و ارزیابی پایداری چاهها

تعیین خواص مکانیکی سنگها از قبیل الاستیک، مقاومت برشی، مقاومت فشاری تکمحوره و فشار منفذی در بسیاری از مسائل مرتبط با مخازن هیدروکربنی از قبیل شکست هیدرولیکی<sup>۱۷</sup> تخمین میزان ذخیره، مشکلات فرونشست<sup>۱۸</sup>، ارزیابی ماسه دهی<sup>۱۹</sup> چاههای نفتی ضروری [۲۲، ۲۳]. تخمین خصوصیات مکانیکی سازندهای زیرسطحی عموماً می‌تواند از طریق اطلاعات حاصل از مغزه‌های حفاری و یا استفاده از داده‌های چاه‌نگاری انجام شود. تعیین خواص مکانیکی سازندها از طریق نمونه‌های مغزه پرهزینه بوده و به دلیل تعداد کم، قابلیت تعمیم به سرتاسر لایه مخزن را دارا نمی‌باشد. این در حالی است که تعیین این پارامترها از طریق اندازه‌گیری نگاره‌های چاه به‌وسیله پیوسته بودن داده‌ها سریع‌تر بوده و از قابلیت تعمیم بیشتری برخوردار است [۲۴، ۲۵]. به همین دلیل، عموماً از این نگاره‌ها جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و تحلیل مسائل مربوط به پایداری دیواره چاه‌ها، تعیین مقدار و جهت تنش توزیع‌شده و روی دیواره چاه‌ها استفاده می‌شود. در این بخش از تحقیق با استفاده از روابط، پارامترهای ژئومکانیکی در مسائل مربوط به پایداری چاه‌ها تعیین گردید. سپس با استفاده از روابط موجود تنش‌های برجا میدان و دیواره چاه تعیین گردید و درنهایت با استفاده از معیارهای مکانیک سنگ وزن بهینه گل حفاری تعیین شد.

#### ۱.۳ مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی (MEM)

این فرآیند شامل تخمین مدول‌های الاستیک سنگ، خواص مقاومتی، همچنین فشار منفذی، و تنش‌های برجا می‌باشد. برای چنین تشکیلات غیر مخزنی مسئله‌دار دارای سنگ‌شناسی پیچیده (شامل انیدریت، گچ، مارن و سنگ‌آهک)، لایه‌های مخزنی پرفشار، و آهک‌های نازک لایه دارای درز و شکاف با فشار غیرطبیعی به دلیل قرارگیری در سازندهای غیر مخزنی مسئله‌دار ضروری است. بنابراین، یافتن این معادلات با بهترین تطابق با داده‌های اصلی، مشاهدات میدانی، و آزمایشگاهی در بخش‌های فرعی زیر مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت چنین مدلی از داده‌های ورودی واقعی

چاه هدف در نمودار شکل ۱۲ استفاده شده است. در این چاه جهت حفظ بیشتر داده‌ها و شناخت بیشتر میان لایه‌ها یا لایه‌های پنهان از نرمال سازی صدک‌های داده استفاده نشده است. در این نمودار هیستوگرام از عمق ۳۱۰۰ تا ۳۹۰۰ داده‌ها نشان داده می‌شود که تمام سازند بنگستان را شامل می‌شود، همان‌طور که مشخص است مقدار گاما کم می‌باشد و افزایش زمان موج‌های صوتی بیشتر به علت تخلخل شکافی، حفره‌ای و غالی می‌باشد. ارتباط این داده‌ها به‌وسیله نقشه حرارتی از ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و متغیرهای هدف در شکل ۱۳ نشان داده می‌شود. ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی به‌وسیله نقشه حرارتی ضرایب همبستگی پیرسون، جهت تعیین زون‌های ژئومکانیکی از چهار روش یادگیری ماشین بدون نظارت شامل مدل  $k$ - میانگین ( $K$ -Means Clustering)، الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی ( $HAC$ )، الگوریتم خوشه‌بندی  $DBSCAN$  مبتنی بر غلظت، و مدل آمیخته گوسی ( $Gaussian Mixture Modelling$ ) جهت تعیین واحدهای ژئومکانیکی مخزنی پرفشار، آهک‌های نازک‌لایه و غیرمخزنی مسئله‌دار استفاده شد. از بین روش‌های مورد مطالعه روش  $GMM$  به‌جای اینکه بر اساس فاصله باشد، مبتنی بر توزیع است و از مرزهای خوشه/تصمیم بیضی استفاده می‌کند. بنابراین منجر به طبقه‌بندی نرم‌تری می‌شود. همان‌طور که در این ماتریس مشخص است روش  $GMM$  با تخلخل و کندی موج‌های صوتی ارتباط مثبت و با چگالی که قابل انتظار است ارتباط منفی برقرار کرده است. بنابراین واحدهای ژئومکانیکی با دقت بالا انتخاب گردیده [۲۶]. بعد از این مرحله که واحدهای ژئومکانیکی و داده‌های پتروفیزیکی/ژئومکانیکی به‌دست‌آمده جهت شناخت بهتر متغیر ویژگی‌ها به‌صورت نگاره عمقی در شکل ۱۴ نشان داده می‌شود. در این شکل داده‌های ورودی جهت ساخت مدل ژئومکانیک ( $MEM$ ) همان‌طور که مشخص است در محدوده مخزن ایلام و سروک خط ( $NCT$ ) انحراف دارد و زمان موج طولی و برشی افزایش یافته است. این محدوده نشانه مخزن/ فشار بیش از حد ( $Over pore pressure$ ) می‌باشد. یکی از روش‌های شناسایی زون‌های مخزنی مقایسه زون‌ها با درجه اشباع آب است که در این

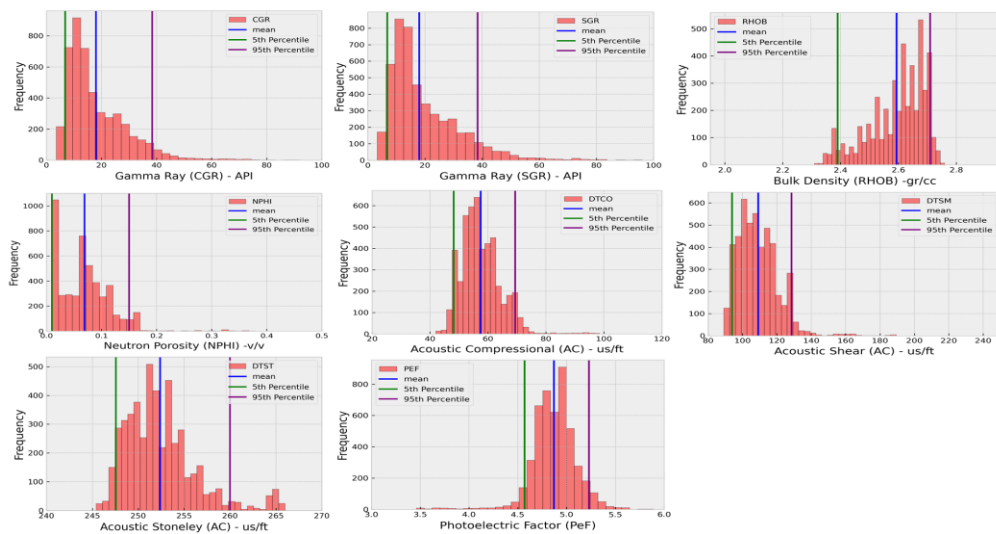
<sup>19</sup> Sand production evaluation

<sup>17</sup> Hydraulic fracturing

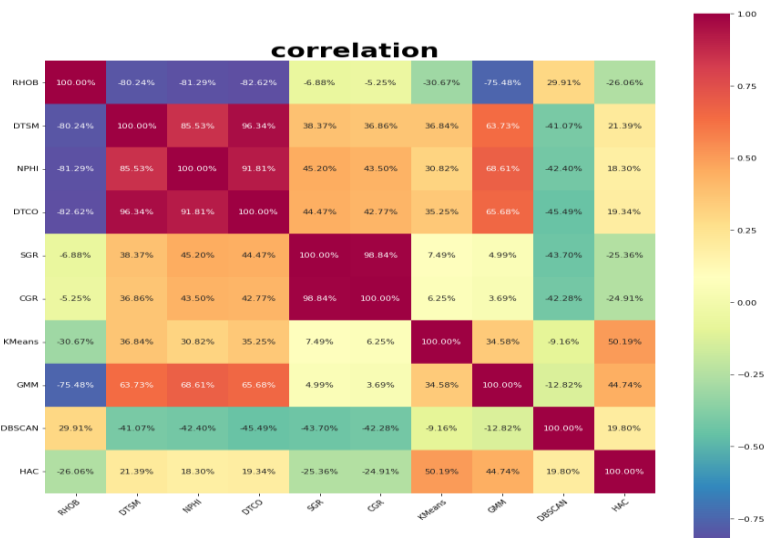
<sup>18</sup> Subsidence problems

سازند مخزنی آسماری با میان لایه‌های آهک نازک لایه قرار دارد که در نمودار کالیپر مشکلات ریزش دیواره این سازند دیده می‌شود. در تقسیم‌بندی دیگری به‌وسیله میانگین‌گیری نگاره چگالی، به بیست واحد طبقه شده است که واحد ۱۸ به‌عنوان زون نفت‌خیز سروک شناخته می‌شود.

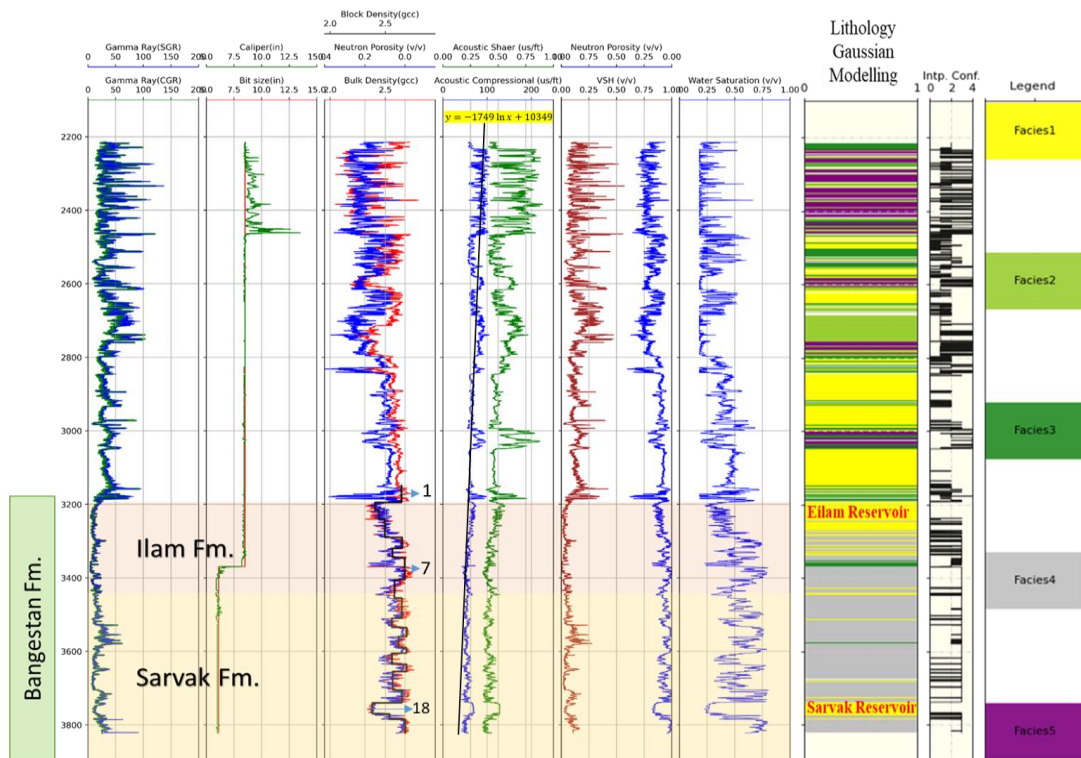
زون‌ها معلوم گردید درجه اشباع آب کم شده است. در نتیجه درجه اشباع هیدروکربن افزایش یافته است. علت این امر به دلیل افزایش اندازه و بازشدگی درزه‌ها و شکاف‌ها می‌باشد، در نتیجه باعث افزایش تخلخل شده است. با توجه به افزایش اندازه حفرات در این زون، نیروی ارشمیدسی در مقابل نیروی مویین افزایش می‌یابد در نتیجه باعث راندن آب و جایگزینی نفت بجای آب می‌گردد. همچنین از عمق ۲۲۰۰ تا ۲۴۷۰ نیز



شکل ۱۲. نمودار هیستوگرام مربوط به داده‌های حاصل از چاه هدف، جهت شناخت بیشتر این داده‌ها از عمق ۳۱۰۰ الی ۳۹۰۰ مربوط به سازند بنگستان جدا شده است.



شکل ۱۳. ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی به‌وسیله نقشه حرارتی ضرایب همبستگی پیرسون، جهت تعیین زون‌های ژئومکانیکی از چهار روش یادگیری ماشین بدون نظارت شامل مدل  $k$ - میانگین ( $K$ -Means Clustering)، الگوریتم خوشه بندی سلسله مراتبی ( $HAC$ )، الگوریتم خوشه‌بندی  $DBSCAN$  مبتنی بر غلظت، و مدل آمیخته گوسی ( $Gaussian Mixture Modelling$ )



شکل ۱۴. داده‌های ورودی جهت ساخت مدل ژئومکانیک (MEM) همان‌طور که مشخص است در محدوده مخزن ایلام و سروک خط (NCT) انحراف دارد و زمان موج طولی و برشی افزایش یافته است. این محدوده نشانه مخزن / فشار بیش از حد (Over pore pressure) می‌باشد.

صوتی/تراسونیک). کرنش و دامنه‌های تنش مشخص ساخته شده است [۲۸،۲۹]. درحالی‌که مدول‌های استاتیک نشان‌دهنده رفتار در باند فرکانس بسیار پایین (0.01 I/s) یا دامنه‌های پایین‌تر و بزرگ‌تراست [۲۹]. در این مقاله برای تطبیق بهتر مدول استاتیکی با نتایج آزمایشگاهی اصلی، مدول یانگ دینامیکی ( $E_d$ ) با استفاده از معادله ۵ به مدول استاتیک ( $E_s$ ) تبدیل شد [۳۰].

$$E_s (GPa) = 0.414E_d - 1.059 \quad (5)$$

این مدول با تست‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه به‌دست‌آمده از سازند متناسب است. در مرحله بعد نسبت پواسون با استفاده از کندی موج برشی و فشاری مطابق فرمول ۶ زیر به دست آمد [۲۷]:

$$v_d = \frac{(\Delta t_s / \Delta t_p)^2 - 2}{2[(\Delta t_s / \Delta t_p)^2 - 1]} \quad (6)$$

### ۲.۳ تعیین مدول الاستیسته سنگ و مقاومت فشاری سنگ

مدول دینامیک یانگ ( $E_d$ )، مدول برشی ( $G_{dyn}$ )، مدول لامه ( $\lambda_{dyn}$ )، و مدول بالک ( $k_{dyn}$ ) با استفاده از روابط ۱ تا ۴ تخمین زده شده است [۲۷]: که در آن  $\rho_b$  (چگالی ظاهری است؛  $\Delta t_p$  کندی موج فشاری است؛  $\Delta t_s$  کندی موج برشی است؛

$$E_d (psi) = 1.34 \times 10^{10} \times \frac{\rho_b (3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2 (\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \quad (1)$$

$$G_{dyn} = \rho V_S^2 \quad (2)$$

$$\lambda_{dyn} = \rho V_S^2 - 2\rho V_P^2 \quad (3)$$

$$k_{dyn} = \rho V_P^2 - \frac{4}{3}\rho V_S^2 \quad (4)$$

مقادیر مدول‌های استاتیک با پویا متفاوت است. زیرا اندازه‌گیری‌های دینامیکی در یک بانک فرکانسی (لرزه‌ای/

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (12)$$

بر اساس برآورد برای سازند بنگستان، آسماری و گچساران، در این کار، زاویه  $\phi$  از ۲۱ تا ۴۳ درجه متغیر است و متوسط آن برای سازند گچساران ۲۳ درجه است. حد متوسط برای سازندهای مخزنی ایلام و سروک (بنگستان) ۴۰ درجه می‌باشد. این مقدار جهت تعیین محدوده مدول سنگ و مقاومت استفاده شده است.

### ۳.۳ اندازه‌گیری فشار منفذی

اندازه‌گیری فشار منفذی معمولاً با استفاده تست تکرار سازند<sup>۲۰</sup>، آزمایش دینامیک ماژولار<sup>۲۱</sup>، آنالیزهای تست چاه، و استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری فشار در حین حفاری انجام می‌پذیرد اما از آنجایی که فشار منفذی سازند مخزنی پرفشار و غیر مخزنی مسئله‌دار (گچساران) بیش‌ازحد غیرعادی است و نفوذپذیری آن به علت میان لایه‌های آهک نازک لایه دارای شکستگی، بسیار زیاد است. در فواصل زمانی کم (با درصد انیدریت بالا، گچ یا نمک) اندازه‌گیری مستقیم عملاً انجام نشد. جهت تعیین فشار منفذی با استفاده از اندازه‌گیری‌های مستقیم در طی پدیده فوران گل در زون‌های تبخیری انجام گرفته است [۸]. در این تحقیق اندازه‌گیری فشار منفذی در واحدهای مخزنی سروک با استفاده از تست تکرار سازند (RFT) به‌دست‌آمده است. در نتیجه با این تست نگاره فشار منفذی در زون‌های مخزنی کالیبره گردیده است. به‌طور کلی، برخی از همبستگی فشار منفذی شامل توان حفاری، داده‌های لرزه‌ای [۳۶]، ثبت صوتی با استفاده از روش ایتون یا باورز یا ثبت مقاومتی جهت تعیین فشار منفذی تا به حال ارائه شده است [۳۷، ۳۸].

ایتون رابطه تجربی را برای پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی از طریق زمان عبور موج فشاری ارائه داد. بعد از کالیبره کردن روش ایتون با داده‌های تست تکرار سازند در چاه‌های مختلف ضریب  $n$  بین  $(0.5 \leq n \leq 1.5)$  تعیین شده است. این مقدار حد واسط برای عمق‌های مختلف مخزن و با مقایسه تست‌های تعیین فشار منفذی، عدد مناسب انتخاب شده است. که در رابطه ۱۳ زیر ارائه شده است.

با فرض یک محیط الاستیک، ضرایب تغییر شکل برشی غیر الاستیک در نظر گرفته نمی‌شوند [۳۱]. بنابراین، نسبت پواسون پویا و استاتیک برابر هستند ( $V_s = V_d$ ). همبستگی‌های مختلف مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) شامل: بردفورد برای انواع سنگ‌ها [۳۲]؛ زویک برای نمونه سنگ‌های مخازن آهکی - دولومیتی [۲۳]؛ و چانگ بروی مخازن آهک - دولومیت خاورمیانه دارای شکستگی‌های بریکوت انجام گرفته است [۳۳] که هر چهار رابطه ۷ تا ۱۰ با مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری آزمایشگاهی میدان ارتباط خوبی دارند.

$$UCS(MPa) = 2.28 + 4.1089E_S \quad (7)$$

$$UCS(MPa) = 13.8E_S^{0.51} \quad (8)$$

$$UCS(MPa) = 135.9e^{-4.8E_S} \quad (9)$$

$$UCS(MPa) = 143.8e^{-6.98\phi} \quad (10)$$

در این مطالعه مقاومت کششی سنگ یک‌دهم مقاومت فشاری در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد زاویه اصطکاک داخلی جهت تعیین فشار شکست برشی / وزن گل معادل مورد نیاز است که از رابطه همبستگی ۱۱ (Plumb, 1994) استفاده شده است [۳۴].

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (11)$$

در این رابطه  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $NPHI$  مقدار تخلخل خوانده‌شده از نمودار نوترون و  $V_{shale}$  حجم شیل به‌دست‌آمده از نمودار پرتو گاما می‌باشند. از آنجایی که زاویه اصطکاک داخلی سنگ میزان ارتباط و همبستگی بین دانه‌ها در سنگ را نشان می‌دهد. با زیاد شدن شیل در نمودار، مقدار زاویه اصطکاک داخلی سنگ کمتر شده و با کم شدن مقدار شیل، زاویه اصطکاک داخلی سنگ نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که  $NPHI$  در دسترس نباشد، می‌تواند آن را با استفاده از همبستگی با  $UCS$  و با در نظر گرفتن لیتولوژی به دست آورد [۳۳]. با توجه به اینکه تخلخل نوترونی موجود است برای محاسبه حجم شیل از فرمول ۱۲ محاسبه گردیده است [۳۵].

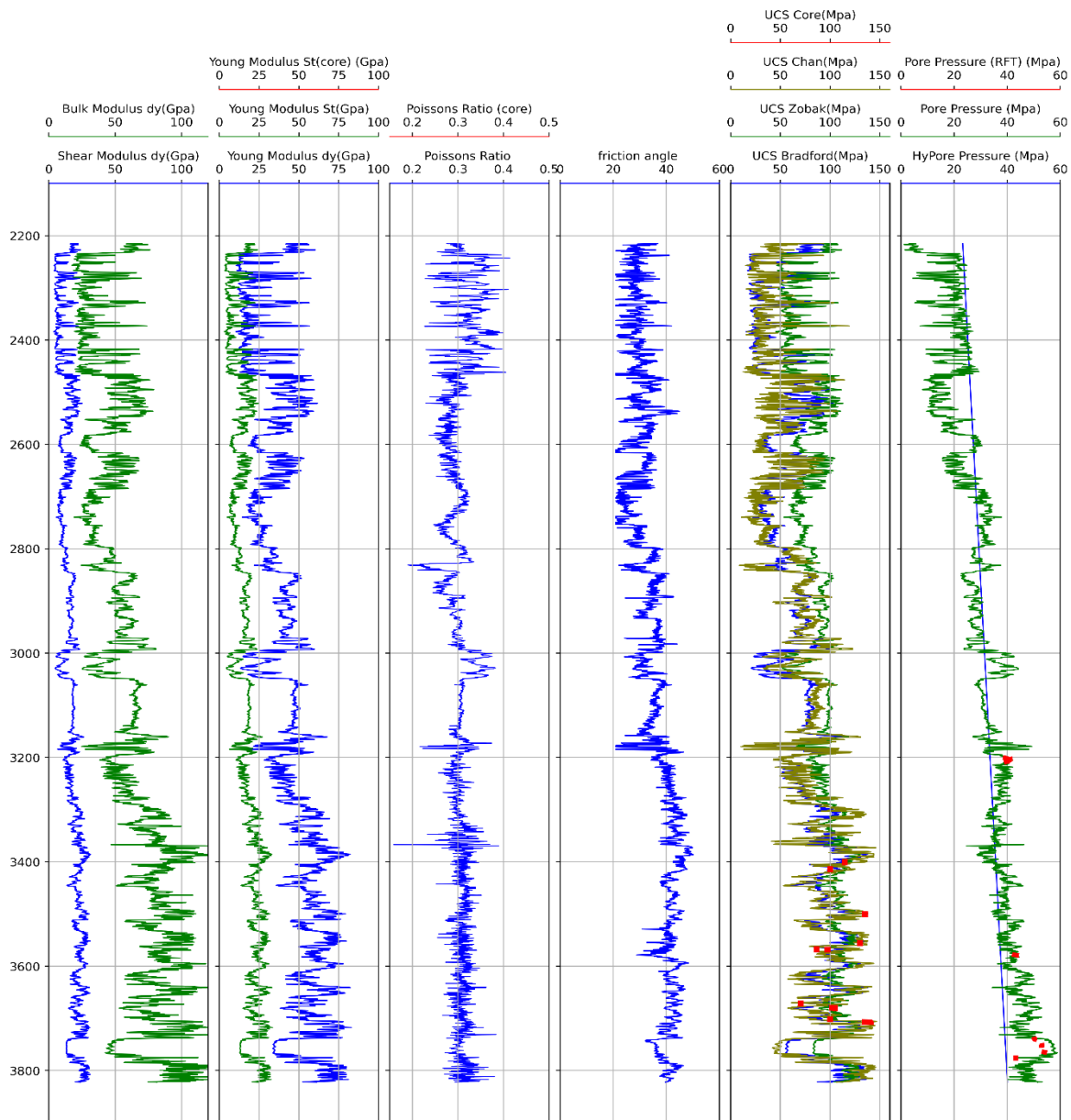
<sup>21</sup> Modular dynamics testing (MDT)

<sup>20</sup> Repeat formation tester (RFT)

شکل ۱۵ پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از روابط کالیبره با داده‌ها تعیین شده است.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^{0.5 \leq n \leq 1.5} \quad (13)$$

در رابطه بالا  $\Delta t_n$  زمان عبور موج یا کند شدگی در فشار نرمال،  $\Delta t$  زمان عبور موج به دست آمده از نگار صوتی چاه می‌باشد. در



شکل ۱۵. تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از روابط متناسب با داده‌های تست‌های آزمایشگاهی نشان داده می‌شود.

#### ۴. تنش‌های برجا

نحوه تعیین تنش‌های برجا و جزئیات بیشتر در مورد تنش‌های برجا روش‌های مختلف ارائه شده است [۲۲، ۲۳].

در روابط کلی جهت تعیین مقدار تنش‌ها معمولاً یکی از تنش‌ها به صورت قائم و دو تنش دیگر به صورت افقی می‌باشد.

## ۱.۴ تعیین تنش‌های عمودی، افقی حداکثر و حداقل

برای تعیین تنش روباره مقدار چگالی مورد نیاز است. ابزار چاه‌نگاری برای تعیین چگالی سازند، از ابزار اشعه گاما فعال برخوردار است و با استفاده از اثر پراکندگی کامپتون<sup>۲۲</sup> چگالی سازند را تعیین می‌کنند که در اکثر موارد با چگالی توده سنگ برابر است. چگالی برای تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها از دو جانب مفید است. اول آنکه چگالی جهت تعیین مدلهای الاستیکی دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوم آنکه چگالی به‌دست‌آمده تخمین مناسبی از تنش قائم برای نواحی که از نظر تکتونیکی کمتر فعال بودند در اختیار می‌گذارد. در این نواحی تنش قائم به‌عنوان یک تنش اصلی مطرح می‌شود و برابر با تنش روباره خواهد بود. اما از آنجاکه نگار چگالی هر چاه تنها بری چند صد متر در دسترس است، برای تعیین تنش قائم لازم است تا چگالی برای اعماق مدنظر برون‌یابی شود. با در نظر گرفتن این شرایط، مقدار تنش روباره یا تنش عمودی ( $\sigma_v$ ) توسط انتگرال‌گیری چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق موردنظر از رابطه ۱۴ زیر به دست می‌آید [۲۳].

$$\sigma_v = \int_0^Z \rho(z)gz \cong \bar{\rho}gz \quad (14)$$

در رابطه بالا  $\rho(z)$  چگالی سنگ در عمق  $Z$  و  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط لایه‌های سنگی می‌باشد. بنابراین، انداز تنش قائم ( $\sigma_v$ ) در واقع برابر است با انتگرال چگالی سنگ از سطح تا عمق مورد نظر می‌باشد. از آنجا که نگار چگالی از سطح تا عمق مدنظر در دسترس نمی‌باشد با استفاده از برون‌یابی نگار دانسیته یا از طریق نگاره‌های دیگر می‌توان مقدار چگالی را تعیین کرد. چگالی ظاهری برای بخش‌های این مخزن توسط لاگ‌های مربوط به چاه ارزیابی شده است. باین‌حال برای بخش‌هایی که چگالی ندارند، برای تخمین فشار روباره می‌توان از سرعت لرزه‌ای  $v_p$  استفاده کرد [۳۹]. برای گرادیان فشار روباره در خاورمیانه  $1.13-1.15 \text{psi/ft}$  به‌دست‌آمده است.

حداقل تنش افقی از طریق داده‌های لیک آف تست، شکست هیدرولیکی<sup>۲۳</sup>، مینی فراکچر<sup>۲۴</sup> و داده‌های هرز روی گل<sup>۲۵</sup> برای نقاط خاصی از چاه و به‌صورت گسسته به دست می‌آید.

در صورتی که داده‌های حاصل از این آزمایشات محدود باشند، جهت تعیین پیوسته این تنش از روابط تجربی استفاده می‌گردد بریکلز و وان ایکلن [۴۰] برای تخمین تنش افقی حداقل رابطه تجربی بر مبنای اطلاعات شکست هیدرولیکی که بر اساس اطلاعات چندین منطقه مختلف به‌دست‌آمده با استفاده از روابط ۱۵ تا ۱۶ ارائه داده‌اند.

$$\sigma_h = 0.0053D^{1.145} + 0.46(P_f - P_{fn}) \quad D < 3500 \text{ m} \quad (15)$$

$$\sigma_h = 0.0264D - 31.7 + 0.46(P_f - P_{fn}) \quad D > 3500 \text{ m} \quad (16)$$

در روابط بالا،  $D$  عمق برحسب متر،  $P_f$  فشار منفذی، و  $\sigma_h$  مقدار تنش افقی حداقل برحسب مگاپاسکال هستند. از آنجایی که سنگ‌های رسوبی متخلخل و حاوی سیال می‌باشند، فشار منفذی در عمق  $H$  برابر وزن ستون سیال بالایی در همان عمق خواهد بود. بنابراین، فشار منفذی نرمال ( $P_{pn}$ ) از طریق رابطه ۱۷ زیر تعیین می‌گردد.

$$P_{pn} = \int_0^H \rho_f(z)gz \cong \bar{\rho}gz \quad (17)$$

چگالی سیال منفذی برای آب‌شور در بازه  $1.03-1.07 \text{g/cm}^3$  متغیر می‌باشد. بنابراین گرادیان فشار منفذی با هر کیلومتر عمق تقریباً  $10 \text{MPa}$  تغییر خواهد کرد. در بیشتر موارد، فشار منفذی از مقدار نرمال ( $p_{pn}$ ) منحرف می‌شود که به آن فشار منفذی غیر نرمال<sup>۲۶</sup> گفته می‌شود. بریکلز و وان ایکلن به این نکته اشاره کردند که رابطه بالا با درجه اعتماد نسبتاً مناسبی در نواحی با خصوصیات زمین‌شناسی مختلف به کار گرفته شود. این روابط برای مناطقی که عمق نفوذ آب کم و یا صفر باشد کاربرد دارد. تمامی این روابط تجربی ارائه شده برای تعیین تنش حداقل افقی تخمین خاصی را ارائه می‌کنند که باید از طریق داده‌های آزمایشات برجا بررسی و کالیبره گردند. در یک حوضه تکتونیکی فعال، روش عملی برای تخمین تنش افقی حداقل ( $\sigma_h$ ) و تنش افقی حداکثر ( $\sigma_H$ ) با توجه به شرایط تنش زمین‌ساختی از روابط پورالاستیک معمولاً برای تخمین تنش‌های افقی استفاده می‌شود [۴۱]. بنابراین در این پژوهش

<sup>25</sup> Mud loss

<sup>26</sup> Abnormal

<sup>22</sup> Compton scattering

<sup>23</sup> Hydraulic Fracturing

<sup>24</sup> Mini- Fracture Test



آورد. خاطرنشان می‌شود روش دیگری جهت همبستگی بین تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر ارائه شده است. در این روش با استفاده از مدول برشی عمودی و افقی در سازندهای ناهمسانگرد به دست آمده است [۴۴،۴۵]. در نهایت، پس کالیبره کردن نتایج مدول سنگ، مقاومت، فشار منفذی و محدوده تنش‌های برجا در محدوده سازندهای آسماری، ایلام و سروک نشان داده می‌شود. با مقایسه بزرگای از تنش‌ها مشخص است رژیم تنش در محدوده سازندهای گچساران و آسماری رژیم تنش نرمال تا امتداد لغز  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  تا  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$  و در محدوده سازند ایلام و سروک معکوس  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$  می‌باشد. قابل ذکر است با بررسی لاگ‌های تصویری و شکستگی‌های برشی در این چاه جهت تنش حداقل در امتداد زاگرس و با آزمایش ۳۲۰ می‌باشد. در شکل ۱۶ تغییرات تنش‌های برجا میدان، تنش‌های اصلی و فرعی دیواره چاه و آزمایش تست یکپارچگی سازند (*Formation integrity test*) که این تست معمولاً ۵ تا ۱۰ مگا پاسکال قبل از نقطه (*LOT*) به خاطر عدم شکست دیواره چاه متوقف می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش افقی حداقل (*Leak of test*) دقیقاً کمی جلوتر از این نقطه قرار گرفته است. بنابراین نتایج کاملاً درست می‌باشد.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_v \times v}{E_s} \times [(1/1 - v) - 1] \quad (22)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_v \times v}{E_s} \times [1 - (v^2/1 - v)] \quad (23)$$

لازم به ذکر است، تنش‌های محلی در چاه‌های مایل از روابط ۲۴ تا ۲۹ زیر به دست می‌آید این روابط در تعیین تنش‌های دیواره چاه در این میدان بکار گرفته شد که به خاطر تقریباً عمودی بودن این چاه تنش‌های فرعی تقریباً صفر می‌باشد.

$$\sigma_x = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \cos^2 \varphi + \sigma_v \sin^2 \varphi \quad (24)$$

$$\sigma_y = (\sigma_H \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha) \quad (25)$$

$$\sigma_z = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \sin^2 \varphi + \sigma_v \cos^2 \varphi \quad (26)$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{2} (\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \sin \varphi \quad (27)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{2} (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha - \sigma_v) \sin 2\varphi \quad (28)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \cos \varphi \quad (29)$$

با توجه به قرارگیری مخزن در جنوب ایران از روابط ۱۸ تا ۱۹ پورالاستیک جهت تعیین تنش‌های افقی استفاده شده است.

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_{tecth} \quad (18)$$

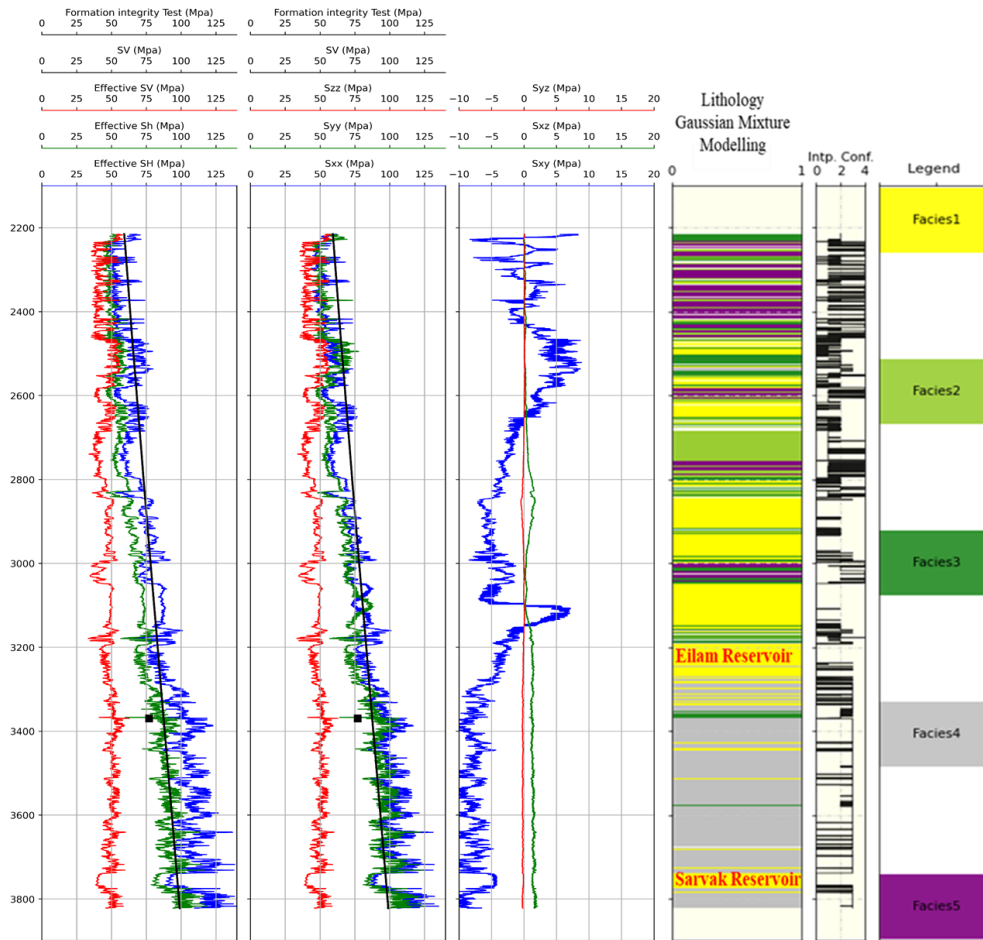
$$\sigma_H = \frac{v}{1-v} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_{tectH} \quad (19)$$

در اینجا  $S_{tecth}$  و  $P_p, \alpha, \sigma_v, v$  به ترتیب نسبت پواسون، تنش روباره، ضریب بایوت و تنش زمین ساختی می‌باشد. ضریب بایوت از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین و مقدار آن از صفر (برای سنگ‌های سخت با تخلخل صفر) تا یک (برای سنگ‌های متخلخل در حوضه‌های رسوبی کم‌عمق) تغییر می‌کند. معمولاً در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز، به دلیل سخت بودن اجرای آزمون‌ها، از انجام آن‌ها صرف نظر می‌شود. در این تحقیق، با توجه به اینکه این میدان هم دارای مخزن ماسه‌سنگی و هم آهک - دولومیتی متخلخل می‌باشد، این نسبت در محدوده  $0.7 \leq \alpha \leq 1$  در نظر گرفته شد ضریب بایوت به توجه به جنس آهکی مخزن بنگستان  $0.7$  در نظر گرفته شد. در این چاه در شرایط تکتونیکی فعال، تغییرات تنش افقی حداقل با استفاده از مطابقت با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی (معمولاً داده‌های آزمایش نشت) انجام می‌پذیرد. این روش کرنش اصلاح شده نامیده می‌شود [۴۱]. جایگزینی معادلات معادل برای تنش‌های زمین ساختی در معادلات ۲۰ تا ۲۱ شامل ضرایب کرنش تکتونیکی در جهت حداقل تنش افقی،  $\varepsilon_x$  و در جهت تنش افقی حداکثر،  $\varepsilon_y$  می‌باشد [۴۱].

$$S_h = \frac{v}{1-v} (S_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_x + \frac{vE}{1-v^2} \varepsilon_y \quad (20)$$

$$S_H = \frac{v}{1-v} (S_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_y + \frac{vE}{1-v^2} \varepsilon_x \quad (21)$$

در رابطه بالا  $a$  ضریب بایوت،  $v$  نسبت پواسون،  $p_p$  فشار منفذی،  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  کرنش در جهت تنش افقی حداکثر و حداقل می‌باشند. که از رابطه ۲۲ تا ۲۳ محاسبه می‌گردد [۴۲]. این رابطه یک پیش‌بینی اولیه جهت تعیین این پارامترها را می‌دهد. برای اطمینان کامل باید با وزن بهینه گل حفاری اجرا شده در مخزن کالیبره گردد. با استفاده از آزمون لیک - آف - تست (*LOT*)، نتایج تست مینی - فرکچر تست یا نتایج فشار گل جایی که باعث (*Mud loss*) شده است. می‌توان مقادیر تنش افقی حداقل ( $\sigma_h$ ) را کالیبره کرد [۴۳]. در این تحقیق با استفاده از لیک آف تست و (*Mud Loss*) تنش افقی حداقل کالیبره گردیده است. می‌توان کرنش‌های تکتونیکی را با انطباق با تنش افقی حداقل که کالیبره گردیده به دست



شکل ۱۶. در این شکل محدوده تنش‌های برجا در محدوده سازندهای گچساران، آسماری، ایلام و سروک نشان داده می‌شود. با مقایسه بزرگی از تنش‌ها مشخص است رژیم تنش در محدوده سازندهای گچساران و آسماری رژیم تنش نرمال تا امتداد لغز  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$  تا  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$  و در محدوده سازند ایلام و سروک معکوس  $\sigma_h > \sigma_v > \sigma_H$  می‌باشد. نتایج تست یکپارچگی سازند (FIT) این نتایج را ثابت می‌کند.

می‌باشد [۴۸].

#### ۲.۴ تنش‌های ناشی از حفاری

یکی از پرکاربردترین معادلات ارائه‌شده برای تعیین تنش در دیواره و اطراف چاه معادلات کرچ می‌باشد [۴۶]. این مجموعه معادلات برای سازندهای ضخیم، همگن و ایزوتروپیک، الاستیک (که می‌توان فرض کرد سازند کمتر از نیمی از مقاومت فشاری خود است) شامل یک چاه استوانه‌ای است که در معرض تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر قرار دارد [۴۱]. که در چاه‌های قائم  $\sigma_v$  به‌عنوان تنش قائم، تنش‌های مؤثر در فاصله R در دستگاه مختصات استوانه‌ای به‌وسیله نلسون ۲۰۰۵ بر اساس معادلات کرچ  $30^{27}$  تا  $33$  به‌صورت زیر

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2} \quad (30)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4\frac{R^4}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2} \quad (31)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + 4\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (32)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - (\alpha P_p) \quad (33)$$

<sup>27</sup> Kirsch

یا موازی  $\sigma_H$  (جایی که بیشترین احتمال شکست کششی در دیواره چاه رخ می‌دهد) برابر با روابط ۳۷ تا ۳۹ خواهد بود:

$$\sigma_{\theta\theta}^{min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_W - (\alpha P_p) \quad (37)$$

$$\sigma_{rr} = P_W - (\alpha P_p) \quad (38)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) - (\alpha P_p) \quad (39)$$

محاسبه تنش مماسی حداکثر در دیواره چاه در  $\theta=90, 270$  یا عمود بر  $\sigma_h$  (جایی که بیشترین احتمال شکست برشی (Break out) در دیواره چاه رخ می‌دهد) و همین‌طور تفاضل این دو تنش برابر با روابط ۴۰ تا ۴۳ خواهد بود:

$$\sigma_{\theta\theta}^{max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_W - (\alpha P_p) \quad (40)$$

$$\sigma_{rr} = P_W - (\alpha P_p) \quad (41)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) - (\alpha P_p) \quad (42)$$

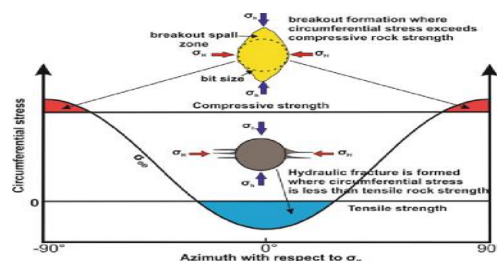
$$\sigma_{\theta\theta}^{max} - \sigma_{\theta\theta}^{min} = 4(\sigma_H - \sigma_h) \quad (43)$$

معادله بالا تغییرات سینوسی تنش مماسی در دیواره چاه را نشان می‌دهد. براساس رابطه کرچ، تمرکز تنش با فاصله از دیواره چاه تغییر می‌کند. تنش مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) در راستای تنش افقی حداقل دارای بالاترین مقدار خود است که این با افزایش فاصله از دیواره چاه کاهش می‌یابد، این تنش در راستای تنش افقی حداکثر روی دیواره چاه  $R=r$  دارای کمترین مقدار است. در شرایطی که فشار گل حفاری از تنش مماسی حداقل بیشتر باشد، احتمال ایجاد شکستگی کششی در دیواره وجود دارد. درحالی‌که اگر فشار گل کمتر از تنش مماسی حداکثر باشد شکستگی برشی در دیواره اتفاق خواهد افتاد. تنش‌ها در جهت حداقل تنش افقی (که برای تعیین شکست برشی بالقوه) و همچنین ترتیب تنش‌های القاشده در جهت حداکثر تنش افقی (که در تعیین فشار بالقوه شکست کششی در نظر گرفته می‌شود).

## ۵. معیارهای شکست

حفظ پایداری چاه طی حفاری و بهره‌برداری یکی از مهم‌ترین مسائلی است که همواره مورد توجه بوده است. طی حفاری دو مشکل اساسی که منجر به ناپایداری چاه می‌شوند. خردشدگی و شکستگی دیواره چاه می‌باشند منجر به گیرکردن رشته لوله‌های حفاری، هرز رفتن گل و مسدود شدن چاه شوند.

در روابط بالا  $\tau_{r\theta}$  تنش برشی شعاعی، نسبت پواسون،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $\Delta P$  اختلاف فشار گل و فشار منفذی،  $\theta$  زاویه آزمون با  $\sigma_H$  و شعاع چاه می‌باشد. بنابراین، سه تنش اصلی القایی در دیواره چاه به‌صورت زیر می‌باشند: تنش مؤثر ( $\sigma_{rr}$ ) عمود بر چاه عمل می‌کند؛ تنش محوری مؤثر ( $\sigma_{zz}$ ) موازی با محور چاه عمل می‌کند. تنش مماسی مؤثر ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) عمود بر صفحه  $\sigma_{zz}$  و  $\sigma_{rr}$  عمل می‌کند. معادلات کرچ عموماً برای محدوده دیواره چاه ساده‌سازی می‌شوند تا بیانگر تغییرات در دیواره باشند. از آنجاکه چاه‌های نفتی تحت فشار بالای گل حفاری می‌باشند و کیک گل در دیواره چاه تشکیل می‌شود، فرض نفوذناپذیری برای سنگ مخزن معتبر به نظر می‌رسد. در این شرایط، بزرگی مقدار تنش‌های مؤثر دیواره بستگی به بزرگی تنش‌های برجای مؤثر ( $\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$ )، شعاع چاه ( $R$ )، فاصله از مرکز چاه ( $r$ ) و فشار منفذی ( $P_p$ ) دارد. در شکل ۱۷ تنش مماسی در مقطع چاه برای زاویه  $\theta$  نشان داده می‌شود که در میدان مورد مطالعه تنش حداقل با توجه به شکستگی‌های برشی/بریکوت در امتداد زاگرس می‌باشد.



شکل ۱۷. مقطع و موقعیت تنش‌های اطراف چاه در میدان مورد مطالعه جهت تنش حداقل با توجه به شکستگی‌های (Break out) در امتداد زاگرس می‌باشد.

اگر تنش در دیواره چاه بررسی شوند ( $R=r$ ) معادلات کرچ (Kirsch) در روابط ۳۴ تا ۳۶ به‌صورت روابط زیر ساده می‌شوند.

$$\sigma_{\theta\theta} = (\sigma_H - \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \times \cos 2\theta - P_W - (\alpha P_p) \quad (34)$$

$$\sigma_{rr} = P_W - (\alpha P_p) \quad (35)$$

$$\sigma_{zz} = S\sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - (\alpha P_p) \quad (36)$$

در این روابط، تأثیر پارامترهای سنگ لحاظ نشده است و محیط الاستیک در نظر گرفته شده است روابط کرچ می‌تواند برای محاسبه تنش مماسی حداقل در دیواره چاه در  $\theta=180, 0$

$$\sigma_c = 2C \cos \varphi / 1 - \sin \varphi \quad (47)$$

$$\sigma_t = 2C \cos \varphi / 1 + \sin \varphi \quad (48)$$

$$C = \sigma_c (1 - \sin \varphi) / 2 \cos \varphi \quad \text{Or} \quad \frac{\sigma_c}{2(\tan(\pi/4 + \varphi/2))} \quad (49)$$

### ۲.۵ وزن بهینه گل بر اساس معیار موهر-کلمب

به طور کلی تنش‌های اطراف دیواره چاه عبارت‌اند از تنش‌های مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ )، تنش شعاعی ( $\sigma_{rr}$ )، و تنش محوری ( $\sigma_{zz}$ ) که این تنش‌ها با تغییر فشار گل ( $P_w$ ) کنترل می‌شود. اما این در مورد تنش محوری درست نمی‌باشد. بنابراین هرگونه تغییری در فشار گل فقط روی تنش مماسی و شعاعی تأثیرگذار خواهد بود. به طور کلی دو نوع ناپایداری عموماً در دیواره چاه رخ می‌دهد: حالت اول  $\sigma_{rr} < \sigma_{\theta\theta}$  که مرتبط با شکستگی‌های برشی است. که این شکستگی‌ها برشی با افزایش بیش اندازه تنش مماسی در دیواره چاه رخ می‌دهد؛ حالت دوم  $\sigma_{\theta\theta} < \sigma_{rr}$  که مرتبط با شکستگی‌های کششی است. در اثر افزایش بیش از حد تنش شعاعی در دیواره چاه شکستگی‌های کششی رخ می‌دهد. با افزایش فشار هیدرو استاتیک گل حفاری ( $P_w$ )، تنش شعاعی ( $\sigma_{rr}$ ) افزایش می‌یابد و مقدار تنش مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) به سمت مقاومت کششی سنگ کاهش پیدا می‌کند. مقادیر تنش مماسی و شعاعی و محوری در دیواره چاه به صورت روابط ۵۰ تا ۵۴ محاسبه می‌گردد. بنابراین حد بالای فشار گل ( $P_{WF}$ ) در ارتباط با شکستگی‌های کششی بوده که باید کمتر از مقدار تنش مماسی محاسبه گردد. با توجه به شرایط بیان‌شده سه حالت زیر برای تنش‌های اصلی ( $\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{rr}, \sigma_{zz}$ ) وجود دارد که حد بالای فشار گل را تعیین می‌کنند: حالت اول  $\sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr}$ ؛ حالت دوم  $\sigma_{rr} > \sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta}$ ؛ در راستایی  $\theta=0$  یا  $\theta=\pi$  مقدار تنش مماسی حداقل است و شکست در جهت  $\sigma_H$  گسترش می‌یابد و متناسب با آن سه تنش اصلی در دیواره چاه بصورت زیر خواهند بود [۴۹] (جدول ۳).

$$\sigma_{\theta\theta}^{min} = D - P_w - (\alpha P_p) \quad (50)$$

$$\sigma_{rr} = P_w - (\alpha P_p) \quad (51)$$

$$\sigma_{zz} = E - (\alpha P_p) \quad (52)$$

مشکلات مربوط به پایداری در خلال حفاری با انتخاب صحیح وزن گل حفاری از بین خواهد رفت. بنابراین وزن بهینه گلی که بتوان شرایط پایداری چاه را فراهم سازد، بسیار مهم و حائز اهمیت خواهد بود. این مشکل می‌تواند از طریق انتخاب معیار شکست مناسب که شرایط تنش‌های به‌دست آمده را به خوبی مدل‌سازی کند برطرف می‌گردد. در ادامه دو معیار شکست که عموماً در مسائل مربوط به پایداری چاه استفاده می‌شوند، مورد بحث خواهند گرفت.

### ۱.۵ معیار شکست موهر-کلمب ۲۸

معیار زیادی برای شکست سنگ ارائه شده‌اند که معیار موهر-کلمب یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها است. این معیار مدلی ساده اما مؤثر برای تعیین مقاومت برشی سنگ ارائه می‌دهد. بر طبق معیار موهر-کلمب، پارامترهای مانند تنش قائم، چسبندگی، و زاویه اصطکاک داخلی در مقاومت برشی سنگ مؤثر هستند. بر این اساس این معیار، گسیختگی در یک صفحه وقتی اتفاق می‌افتد که رابطه میان تنش برشی و قائم به صورت رابطه ۴۴ می‌باشد.

$$\tau = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (44)$$

در رابطه بالا، تنش نرمال بر صفحه شکست اعمال می‌شود،  $C$  چسبندگی مواد، و  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی است. این معیار با نادیده گرفتن تنش  $\sigma_2$  فرض می‌کند که تنش میانی تأثیری بر شکست سنگ ندارد. در آزمایش سه محوره  $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$  شکل خطی شده این معیار به صورت تابعی از تنش‌های اصلی و به صورت معادله ۴۵ زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_1 = \sigma_c + q\sigma_3 \quad (45)$$

در اینجا  $\sigma_1$  تنش اصلی حداکثر مؤثر در لحظه شکست،  $\sigma_3$  تنش اصلی حداقل مؤثر در لحظه شکست و  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوره یا ( $UCS$ ) می‌باشد. پارامتر  $q$ ، مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_c$ )، مقاومت کششی ( $\sigma_t$ )، و مقاومت چسبندگی ( $C$ ) نیز از رابطه‌های ۴۶ تا ۴۹ بدست می‌آید:

$$q = 1 + \sin \varphi / 1 - \sin \varphi \quad \text{Or} \quad \tan^2(\pi/4 + \varphi/2) \quad (46)$$

$$\sigma_{rr} = P_W - (\alpha P_p) \quad (56)$$

$$\sigma_{zz} = B - (\alpha P_p) \quad (57)$$

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h \quad (58)$$

$$B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (59)$$

جدول ۳. تعیین حد بالای فشار گل ( $P_{w,F}$ ) با استفاده از معیار موهر - کلمب

Modes	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$P_w \geq P_{w,F}$
1	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz}$	$P_{w,F1} = C + qE$
2	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{w,F2} = \frac{C - qD}{1 + q}$
3	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{w,F3} = (C - E)/q + D$

با جایگزینی معادلات بالا در معیار موهر - کلمب، حد پایین فشار گل در سه حالت ذکر شده در جدول ۴ به دست می‌آید.

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H \quad (53)$$

$$E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (54)$$

با توجه به روابط بالا چنانچه فشار گل بیش از حد مجاز باشد ( $P_w \geq P_{w,F}$ )، شکستگی‌ها کششی در جاه رخ می‌دهد. وقتی که مقدار  $P_w$  کم شود، مقدار  $\sigma_{\theta\theta}$  به سمت مقاومت فشاری حداکثر افزایش می‌یابد. بنابراین حد پایین فشار مجاز گل ( $P_{w,B}$ ) در ارتباط با شکستگی برشی دیواره چاه می‌باشد. مانند حالت قبل به‌طور خلاصه سه حالت وجود دارد که باید برای تعیین حد پایین فشار گل دارد. حالت اول  $\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$ ، حالت دوم  $\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$ ، حالت سوم  $\sigma_{rr} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta}$ ؛ در این حالت برای ایجاد شکستگی برشی که در راستای  $\theta = \pm \pi/2$  ایجاد خواهد شد، مقادیر تنش مماسی و شعاعی و محوری در دیواره چاه به‌صورت ۵۵ تا ۵۹ محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_{\theta\theta}^{max} = A - P_W - (\alpha P_p) \quad (55)$$

جدول ۴. تعیین حد پایین فشار گل ( $P_{w,B}$ ) با استفاده از معیار موهر - کلمب [۴۹]

Modes	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$P_w \leq P_{w,B}$
1	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$	$P_{w,B1} = \frac{B - C}{q}$
2	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$	$P_{w,B2} = \frac{A - C}{1 + q}$
3	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{zz}$	$P_{w,B3} = A - C - qB$

بنابراین لزوم استفاده از معیارهای سه‌بعدی که تأثیر تنش اصلی میانی را در نظر بگیرد ضروری به نظر می‌رسد. یکی از معیارهای شکست سه‌محوره معیار دراگر - پراگر است که به دلیل ساده بودن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما تخمین‌های این معیار اغلب بیشتر از حد معقول است. بنابراین، استفاده از آن در پیش‌بینی وزن بهینه گل توصیه نمی‌شود. آل عجمی و زمیرین در سال ۲۰۰۵ معیار شکست سه‌بعدی را ارائه کردند که به معیار موگی - کلمب شهرت یافته است [۴۹]. معیار موگی کلمب تأثیر تنش اصلی میانی را بر روی مقاومت سنگ در نظر می‌گیرد و برخلاف معیار دراگر - پراگر نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهد. موگی با آزمایش سه‌محوره واقعی ۲۰ بر روی سنگ‌ها نشان داد که تنش اصلی میانی در واقع روی مقاومت

در جدول بالا نحوه مقادیر  $A, B, C, q$  از رابطه‌های اشاره‌شده به دست می‌آیند. اگر فشار گل کمتر از فشار  $P_{w,B}$  برسد ( $P_w \leq P_{w,B}$ ) شکستگی برشی در دیواره رخ خواهد داد. بنابراین، می‌توان گفت که خردشدگی دیواره با توجه به معیار موهر - کلمب زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از سه حالت فوق اتفاق بیفتد.

### ۵. معیار موگی - کلمب ۲۹

معیار موهر - کلمب که در قسمت قبل بیان شد اثر تنش اصلی میانی را بر مقاومت سنگ نادیده می‌گیرد. در نتیجه انتظار می‌رود محافظه‌کارانه عمل کند و فشار گل لازم برای پایداری دیواره چاه را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (66)$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \quad (67)$$

با استفاده از روابط ۶۸ تا ۷۰ معیار موگی - کلمب خواهیم داشت

$$\sqrt{I_1^2 + 3I_2^2} = a' + b'(I_1 - \sigma_2) \quad (68)$$

$$a' = 2c \cos\varphi \quad (69)$$

$$b' = \sin\varphi \quad (70)$$

تنشهای اصلی در دیواره چاه با توجه به معادلات کرچ تغییر خواهد کرد. در این معادلات نشان دهنده بیشترین تمرکز تنش در دیواره چاه می باشد. بنابراین به وسیله این معادلات متغیرهای استرس اول و دوم به صورت روابط ۷۱ تا ۷۲ به دست خواهد آمد.

$$I_1 = D + E \quad (71)$$

$$I_2 = DE + DP_W - P_W^2 \quad (72)$$

با توجه به نتایجی که آزمایشات سه محوره بر روی سنگهای مختلف به دست آوردند، نشان دادند که معیار موگی - کلمب می تواند با تغییر پارامترها به معیار موهر - کلمب تبدیل شود، بنابراین معیار خود را معیار موگی کلمب نامیدند. با توجه به اینکه معیار موگی - کلمب تأثیر تنش میانی را در نظر گرفته و یک معیار سه بعدی می باشد، برای تحلیل پایداری چاه مناسب به نظر می رسد. بنابراین، آل عجمی و زیمرمن با جایگذاری روابط معادلات ارائه شده در حد پایین و بالای فشار گل در معیار معیار - کلمب در رابطه ارائه شده آن، حد پایین فشار گل و بالا فشار گل را در سه حالت ذکر شده، مطابق با روابط ذکر شده در جدول ۵ و ۶ به دست می آیند. مشابه معیار موهر - کلمب، محدوده مجاز فشار گل برای موگی - کلمب برابر  $PW.B < PW < PW.F$  است. اگر  $PW$  بزرگتر از  $PW.F$  باشد شکست کششی و اگر  $PW$  کمتر از  $PW.B$  باشد شکستگی برشی در دیواره چاه رخ خواهد داد (جدول ۵ و ۶).

سنگ تأثیر داشته و شکست در راستای صفحه  $\sigma_2$  رخ می دهد. بر این اساس موگی معیار خود را به صورت رابطه ۶۰ بیان کرد.

$$\sigma_{oct} = f(\sigma_{m,2}) \quad (60)$$

در رابطه بالا که  $f$  یک رابطه غیرخطی توان دار می باشد،  $\sigma_{m,2}$  یک تنش اصلی موثر میانی و  $\tau_{oct}$  تنش برشی اکتاهدرال بوده و برابر با روابط ۶۱ تا ۶۲ است.

$$\sigma_{m,2} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (61)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (62)$$

پارامترهای تابع شکست را به راحتی نمی توان به پارامترهای مقاومت کلمب شامل  $C$  و  $\varphi$  ارتباط داد [۴۹]. بنابراین، آل عجمی و زیمرمن پیشنهاد کردند که تابع  $f$  یک تابع یکنواخت صعودی است، بر اساس معیار موگی شکست زمانی رخ می دهد که انرژی کرنش پیچشی<sup>۳۱</sup> به مقدار بحرانی برسد به طوری که مقدار  $\sigma_{m,2}$  را به صورت یکنواخت افزایش دهد. آن ها رابطه موگی را با اصلاحاتی به صورت رابطه ۶۳ تا ۶۵ ارائه دادند و آن را موگی - کلمب نامیدند.

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (63)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3}c \cos\varphi \quad (64)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3}\sin\varphi \quad (65)$$

از مقایسه این معیار با معیار موهر - کلمب می توان نتیجه گرفت که معیار موگی - کلمب منطبق بر معیار موهر - کلمب است. با انطباق این دو معیار مقادیر  $a$  و  $b$  برای معیار موگی - کلمب به صورت معادله بالا به دست می آیند. معادله (بالا) گسترشی از معیار کولمب خطی است. دامنه استرس موگی به عنوان معیار شکست موگی - کلمب شناخته می شود. اثر تقویتی تنش اصلی میانی می تواند با استفاده از قانون موگی - کلمب در نظر گرفته شود. متغیرهای تنش اول  $(I_1)$ ، و تنش دوم  $(I_2)$  به وسیله رابطه های ۶۶ تا ۶۷ زیر به دست می آیند.

<sup>31</sup> Distortional strain energy

جدول ۵. تعیین حداکثر فشار ( $P_{w,F}$ ) از معیار موگی - کلمب

Modes	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$P_w \geq P_{w,F}$
1	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz}$	$P_{w,F1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3D + 2b'N) + \sqrt{J + 12(N^2 + b'DN)} \right]$
2	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{w,F2} = \frac{1}{2}D - \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(D - 2P_0)]^2 - 3(D2B)^2}$
3	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{w,F3} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3D + 2b'M) + \sqrt{J + 12(M^2 - b'DM)} \right]$
$D = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad E = \sigma_v - 2v(\sigma_H - \sigma_h), \quad J = D^2(4b'^2 - 3) + (E^2 - DE)(4b'^2 - 12),$ $N = a' + b'(E - 2P_0), M = N + b'D, a' = 2c \cos\varphi, \quad b' = \sin\varphi$		

جدول ۶. تعیین حداقل فشار ( $P_{w,B}$ ) از معیار موگی - کلمب

Modes	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$P_w \leq P_{w,B}$
1	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$	$P_{w,B1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3A + 2b'K) + \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$
2	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$	$P_{w,B2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(A - 2P_0)]^2 - 3(A - 2B)^2}$
3	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{zz}$	$P_{w,B3} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3A + 2b'G) + \sqrt{H + 12(G^2 + b'AG)} \right]$
$A = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad B = \sigma_v + 2v(\sigma_H - \sigma_h), \quad H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12)$ $K = a' + b'(B - 2P_0), G = K + b'A, a' = 2c \cos\varphi, \quad b' = \sin\varphi$		

## ۶. پنجره ایمن وزن گل

ساخت پنجره بهینه وزن گل بخش مهمی از برنامه‌ریزی و عملیات چاه است. حفاری بیش‌ازحد متعادل، یا حفاری نامتعادل [۵۰]، این پنجره نتیجه نهایی ( $I-D$ ) یک مدل زمین مکانیکی که گرادیان معادل فشار منفذی، شکست برشی ( $Breakout$ )، و شکست کششی ( $Fracture$ ) مرز پایین و بالا این پنجره را تشکیل می‌دهد. در مرز پایینی توسط فشار منفذی یا مشخصات شکست برشی (هر کدام بزرگتر)، مرز بالایی توسط نمودار ازدست‌رفته گل یا شکست کششی تشکیل شده است.

### ۱.۶ گرادیان فشار شکست برشی

شکست برشی ناشی از حفاری یک شکست برشی فشاری در دیواره چاه است که در نتیجه صفحات شکست متقاطع در دیواره چاه رخ می‌دهد. و قطعات از دیواره چاه جدا می‌شود و دیواره به‌صورت بیضی می‌شود. در این مطالعه جهت وزن بهینه گل از دو معیار مور-کلمب، موگی-کلمب استفاده شده است. فشاری که باعث شکست برشی می‌شود به حالت شکست برشی وابسته است. که بر اساس ترتیب تنش‌های

القایی/نزدیک چاه تعیین می‌شود [۵۱]. در این چاه مورد مطالعه به ترتیب بر اساس ترتیب تنش‌های القاشده در جهت تنش افقی حداقل  $\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$  حالت این شکست شناخته می‌شود به‌عنوان یک حالت شکست گسترده شناخته می‌شود [۵۲]. کمترین فشار گل برای جلوگیری از شکستگی‌های برشی با استفاده از معیار مور-کلمب محاسبه شد. براساس تنش‌های اصلی به‌دست‌آمده و زاویه شکست در این معیار می‌توان دایره موهر را رسم نمود. با برازش منحنی بر دایره موهر به‌دست‌آمده می‌توان مدول و مقدار مقاومت برشی سنگ را تعیین نمود. این روش ساده‌ای برای تخمین مقاومت برشی سنگ تعیین می‌شود. با برازش منحنی بر دایره موهر، نقاط زیر سطح منحنی نقاط پایدار هستند و تحت آن‌ها شکست رخ نمی‌دهد. حال اگر نقطه محاسبه‌شده بر اساس تنش‌های اصلی روی منحنی بیفتد، سنگ در شرایط بحرانی تنش قرار می‌گیرد. اما اگر نقطه محاسبه‌شده در بالای منحنی برازش شده قرار گیرد، سنگ تحت تأثیر تنش شکسته خواهد شد. در حالت شکست برشی، با در نظر گرفتن اینکه  $\sigma_{\theta} = \sigma_1, \sigma_2 = \sigma_z, \sigma_3 = \sigma_r$  جایگزینی این مقادیر در معیار شکست ارائه‌شده پایین‌ترین محدودیت فشار گل به‌منظور

$$\frac{3\sigma_H - \sigma_h - UCS + \alpha P_p(q-1)}{(q+1)} \leq P_W \leq 3\sigma_h - \sigma_H - (\alpha P_p) - T_0 \quad (73)$$

$$\frac{(3\sigma_H - \sigma_h - UCS + \alpha P_p(q-1))/(q+1)}{(9.81 \times 1000 \times TVD)} \leq \frac{P_W}{(9.81 \times 1000 \times TVD)} \leq \frac{3\sigma_h - \sigma_H - (\alpha P_p) - T_0}{(9.81 \times 1000 \times TVD)} \quad (74)$$

جلوگیری از شکستگی ( $P_{W.B}$ ) خواهد بود. در حالت شکست کششی تنش مماسی در کمترین حد خود می‌باشد. طبق همین رویه، حداقل و حداکثر مجاز فشار گل برای جلوگیری از ایجاد برش و شکاف در اطراف دیواره چاه برای حالت شکستگی کششی عمودی به وسیله روابط ۷۳ تا ۷۴ ارائه شده است. در جدول ۷ شکست کششی برای حالت‌های مختلف شکست کششی نشان داده می‌شود [۵۳، ۵۴].

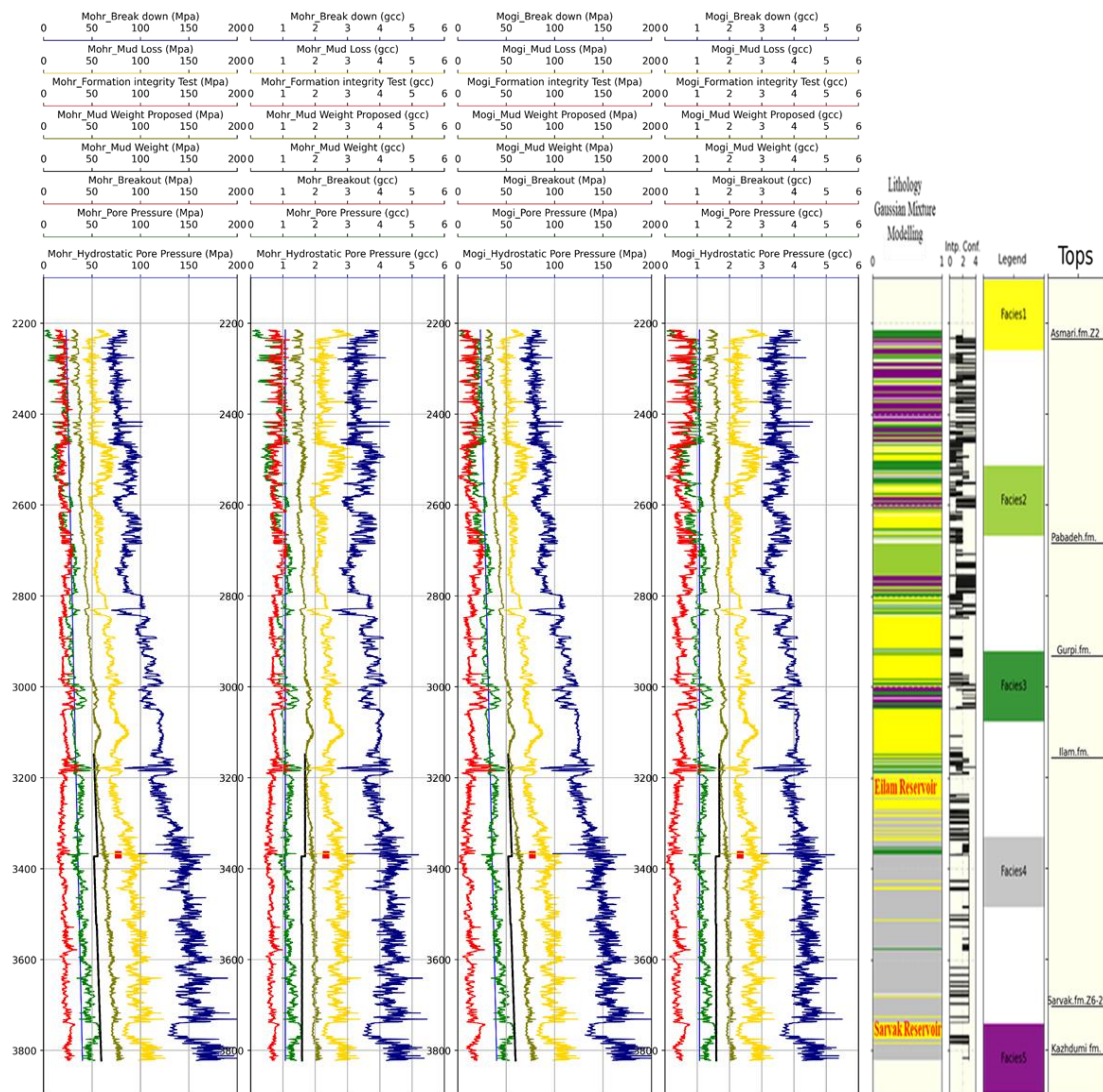
جدول ۷. شکست کششی برای حالت‌های مختلف شکست در دیواره چاه نشان داده می‌شود [۵۳، ۵۴]

Modes	Criteria	Tensile failure pressure ( $P_{W.F}$ )
Mode 1 (Vertical fracture): ( $\sigma_{rr} > \sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta}$ )	$\sigma_{\theta\theta} - T_0 \leq 0$	$P_{W.F} \leq 3\sigma_h - \sigma_H - (\sigma P_p) - T_0$
Mode 2 (Horizontal fracture): ( $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$ )	$\sigma_{zz} - T_0 \leq 0$	$P_{W.F} \leq 3\sigma_h - \sigma_H - \sigma_v + 2\nu\sigma_H - 2\nu\sigma_h$

نفت در طی فرایند تولید دو حالت متصور است یا فشار منفذی به دلیل کاهش هیدروکربن کم می‌شود (این فرایند باعث تغییر شکل / فشردگی مخزن رخ می‌دهد در نتیجه مقاومت سنگ و مدول‌های الاستیسیته کاهش می‌یابد و باعث کاهش مقاومت برشی دیواره چاه می‌گردد) یا در حالت دوم باعث جایگزینی آب در طی فرایند تولید به علت برداشت هیدروکربن می‌گردد (در این حالت نیز به دلیل افزایش فشار منفذی مقاومت برشی دیواره کاهش می‌یابد). بنابراین، با توجه به باریک شدن پنجره گل حفاری در این واحدها پیشنهاد می‌گردد که گرادیان وزن بهینه گل به سمت گرادیان شکست کششی حتی‌المقدور متمایل باشد تا از شکستگی‌های برشی یا بریکوت جلوگیری به عمل آید (شکل ۱۶).

با توجه به مطالب گفته شده در این تحقیق، با استفاده از پارامترهای چاه‌نگاری و از استفاده از روابط کالیبره شده پارامترهای ژئومکانیکی تعیین شد. سپس با استفاده از معیارهای مکانیک سنگ و مقایسه این معیارها بهترین وزن گل پیشنهاد گردید. همان‌طور که مشخص است گرادیان پنجره وزن بهینه گل حفاری در مخزن آسماری، ایلام و سروک بشدت باریک می‌باشد (شکل ۱۸). با مقایسه نتایج گرادیان واقعی گل حفاری با گرادیان بهینه حفاری به‌دست‌آمده از نتایج معیارهای مور-کلمب و موگی-کلمب معلوم گردید که پیش‌بینی وزن گل جهت جلوگیری از شکست به‌درستی تعیین شده است. حتی از وزن گل واقعی حفاری بهتر عمل کرده است چون در مخزن سروک وزن گل حفاری واقعی مماس بر فشار منفذی می‌باشد در حالیکه در وزن بهینه پیش‌بینی شده از انحراف آن به سمت گرایان شکست برشی جلوگیری کرده است. به‌طور کلی در چاه‌های





شکل ۱۸. تعیین وزن بهینه گل در زون‌های غیر مخزنی مسئله دار، آهک‌های میان لایه در سازندهای تبخیری گچساران، و لایه‌های مخزنی دارای فشار بالا (آسماری، ایلام و سروک) معلوم گردید که پنجره گل بشدت باریک می‌باشد.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا دو چاه تصادفی از یکی از میدان‌های جنوب ایران، که یکی به‌عنوان چاه آموزشی جهت تعیین مدل مناسب و دیگری جهت پیش‌بینی زمان موج‌های صوتی انتخاب شد. این داده‌ها با استفاده از طیف وسیعی از روش‌های یادگیری ماشین و تنظیم فرآپارمترها (Hyperparameter Tuning) روی الگوریتم‌ها، بهترین مدل‌ها جهت پیش‌بینی/تخمین لاگ‌های صوتی ارائه شد. در این فرایند، از بین روش‌های رگرسیون، روش  $k$ -نزدیک‌ترین همسایه (KNN) و

از بین روش‌های ترکیبی، الگوریتم درخت تصادفی (Random Forest Regression) و الگوریتم درخت اضافی (Extra Tree Regression) بالاترین ضریب همبستگی و کمترین خطای جذر میانگین مربعات را نشان داده‌اند. در نتیجه درختان اضافی جهت مدل‌سازی بر روی داده‌های آموزشی و آزمایشی چاه مدل انجام گرفت. سپس این مدل جهت پیش‌بینی/سنتر زمان موج‌های صوتی طولی و برشی چاه هدف بکار گرفته شد. بعد از این مرحله که این پارامترها به دست آمد با مقایسه با داده‌های واقعی چاه، مقدار خطای جذر میانگین مربعات و

[4] Mody FK (2013) Bridging the gap: challenges in deploying leading edge geomechanics technology to reducing well construction costs. In: SPE/IADC Indian drilling technology conference and exhibition. Mumbai, India, 16 October 2006. Society of Petroleum Engineers.

[5] Aslannezhad M, Khaksar manshad A, Jalalifar H (2016) Determination of a safe mud window and analysis of wellbore stability to minimize drilling challenges and non-productive time. J Pet Explor Prod Technol 6:493–503. <https://doi.org/10.1007/s13202-015-0198-2>

[6] Kolawole O, Federer-Kovács G, Szabó I (2018) susceptibility to wellbore instability and sand production in the Pannonian Basin, Hungary. American Rock Mechanics Association, Alexandria.

[7] Wang Y, Watson R, Rostami J et al (2014) Study of borehole stability of Marcellus shale wells in longwall mining areas. J Pet Explor Prod Technol 4:59–71. <https://doi.org/10.1007/s13202-013-0083-9>.

[8] Ashena, R., Elmgerbi, A., Rasouli, V., Ghalambor, Rabiei, M., Bahrami, A., (2020). Severe wellbore instability in a complex lithology formation necessitating casing while drilling and continuous circulation system, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology (2020) 10:1511–1532 <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00834-3>.

[9] Yu, Yanxiang, (2020). Synthetic Sonic Log Generation, SPWLA, viewed 20 April 2020.

[10] Hall, B., oct, (2016). Facies classification using machine learning. Lead. Edge 35 (10), 906–909. <https://doi.org/10.1190/tle35100906.1>.

[11] Bestagini, P., Lipari, V., Tubaro, S., aug, (2017). A machine learning approach to facies classification using well logs. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Society of Exploration Geophysicists, pp. 2137–2142. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17729805.1>.

[12] Ashraf, U., Zhu, P., Yasin, Q., Anees, A., Imraz, M., Mangi, H.N., Shakeel, S., (2019). Classification of reservoir facies using well log and 3D seismic attributes for prospect evaluation and field development: a case study of Sawan gas field, Pakistan. J. Petrol. Sci. Eng. 175, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.060>.

[13] Ashraf, U., Zhang, H., Anees, A., Mangi, H.N., Ali, M., Ullah, Z., Zhang, X., (2020a). Application of unconventional seismic attributes and unsupervised machine learning for the identification of fault and fracture network. Appl. Sci. <https://doi.org/10.3390/app10113864> Jiang, R., (2020). Building a rock physics model for the.

[14] Ali, M., Ma, H., Pan, H., Ashraf, U., formation

مجذور  $R$  به دست آمد.

تعیین واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از چهار روش بدون نظارت یادگیری ماشین انجام پذیرفت که مدل آمیخته گوسی (*Gaussian Mixture Modelling*) انتخاب گردید. روش *GMM* به جای اینکه بر اساس فاصله باشد، مبتنی بر توزیع است و از مرزهای خوشه/تصمیم بیضی استفاده می کند. بنابراین، منجر به طبقه بندی نرم تری می شود. علاوه بر این، به خاطر قرار دادن الگوهای احتمالاتی مختلف برای شناسایی واحدهای ژئومکانیکی، روشی بهتر جهت تعیین واحدهای مخزنی پرفشار ایلام، سروک و آهک های نازک لایه می باشد. در ادامه با استفاده از روابط پورالاستیک تنش های برجا میدان تعیین شدند و معلوم گردید مخزن سروک و ایلام در رژیم تنش معکوس و مخزن آسماری و گچساران در رژیم تنش نرمال - امتداد لغز قرار دارند. آزمون تست پیوستگی سازند (*FIT*) که کمی قبل تر از آزمون (*LOT*) متوقف می گردد، نتایج تعیین تنش ها و وزن بهینه گل پیش بینی شده را اثبات می کند. در این تحقیق، با استفاده از معیارهای مکانیک سنگ و مقایسه این معیارها بهترین وزن گل پیشنهاد گردید. همان طور که ارائه شد، پنجره گل در این سازندها مخزنی به دلیل تخلخل بالا و فشار منفذی متغیر بشدت باریک می باشد. با مقایسه نتایج گرادیان واقعی گل حفاری با گرادیان بهینه گل حفاری به دست آمده از نتایج معیارهای مور - کلمب و موگی - کلمب معلوم گردید که پیش بینی وزن بهینه گل جهت جلوگیری از شکست برشی به درستی تعیین شده است. حتی از وزن واقعی گل حفاری بهتر عمل کرده است چون در مخزن سروک وزن گل حفاری واقعی مماس بر فشار منفذی می باشد در حالیکه وزن بهینه گل پیش بینی شده از طریق معیارهای مکانیک سنگ از انحراف آن به سمت گرایان شکست برشی جلوگیری کرده است.

## ۸. مراجع

[1] Halliburton Geomechanics, "http://www.halliburton.com/en-US/ps/consulting/petroleum-geomechanics. Page? Node-id=hkv12s6j"

[2] Schlumberger (2016) Real-time drilling geomechanics. [http://www.slb.com/~media/Files/dcs/product\\_sheets/geomechanics/geomechanics\\_rt\\_ps.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/dcs/product_sheets/geomechanics/geomechanics_rt_ps.pdf). Checked on 18 Nov 2016.

[3] Aadnoy BS (2003) Introduction to special issue on borehole stability. J Pet Sci Eng 38(3–4):79–82.

- and Engineering A, 528, pp. 8226-8235.
- [26] Ghalibaf, H., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripoor, G.R., Raof G., Hossin T., (2022). Determination of geomechanical zones based on evaluation of Unsupervised Machine Learning algorithm methods "JOURNAL OF PETROLEUM GEOMECHANICS (JPG):. (DOI) 10.22107/jpg.2022.329417.1158.
- [27] Fjaer E., Holt R.M., Hordrud P., Raaen A.M. and R. Risnes. (2008). "Petroleum related rock Rock Mechanics", Developments in Petroleum Science, Elsevier.
- [28] Barton N (2006) Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor and Francis, Oxford
- [29] Holt RM (2013) Static and dynamic moduli—so equal, and yet so different. Presented at the 47th US rock mechanics symposium held in San Francisco, CA, USA, 23–26 June
- [30] Wang Z (2000) Dynamic vs. static properties of reservoir rocks. In: Wang Z, Nur A (eds) Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks, vol 3: recent developments. SEG, Tulsa.
- [31] Larsen I, Fjaer E, Renlie L (2000) Static and dynamic Poisson's ratio of weak sandstones. In: ARMA-2000-0077, 4th North American rock mechanics symposium, 31 July–3 August, Seattle, Washington.
- [32] Bradford I.D.R., Fuller J., Thompson P.J and Walsgrove T.R.: "Benefits of Assessing Solids Production Risk In A North Sea Reservoir Using Elastoplastic Modelling," SPE/ISRM 47360, SPE/ISRM Eurock '98 held in Trondheim, Norway, 8-10 July 1998.
- [33] Chang C, Zoback M, Khaksar A (2006) Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. J Pet Sci Eng 51(3–4):223–237
- [34] Plumb R (1994) Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks. In: SPE 28022-MS, Rock mechanics in petroleum engineering, 29–31 August, Delft, Netherlands
- [35] Schlumberger (2016) Real-time drilling geomechanics. [http://www.slb.com/~media/Files/dcs/product\\_sheets/geomechanics/geomechanics\\_rt\\_ps.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/dcs/product_sheets/geomechanics/geomechanics_rt_ps.pdf). Checked on 18 Nov 2016.
- [36] Dugan B, Flemings PB (1998) Pore pressure prediction from stacking velocities in the Eugene Island 330 Field (Offshore Louisiana). Gas Research Institute, Chicago, p 23
- [37] Zhang J (2011) Pore pressure prediction from well logs: methods, modifications, and new approaches. Earth Sci Rev 108(1–2):50–63.
- evaluation of the Lower Goru sand reservoir of the Southern Indus Basin in Pakistan. J. Petrol. Sci. Eng. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107461>
- [15] Marco, I., John, F., Fred, J., (2021). Improving facies prediction by combining supervised and unsupervised learning methods: Journal of Petroleum Science and Engineering 200 (2021) 108300
- [16] Muhammad Ali, A., Ren Jiang, B., Huolin Ma, A., Heping Pan, A., Khizar Abbas, C., Umar Ashraf, D., (2021). Machine learning - A novel approach of well logs similarity based on synchronization measures to predict shear sonic logs: Journal of Petroleum Science and Engineering 203 (2021) 108602.
- [17] Thiago Santi, B., Marcelo Kehl, D., Tiago, J., Girelli, F., Chemale, J., (2020). Evaluation of machine learning methods for lithology classification using geophysical data: Computers and Geosciences 139(2020)104475.
- [18] M. Anemangely, A. Ramezanzadeh, H. Amiri, S.A. Hoseinpour, (2019). Machine learning technique for the prediction of shear wave velocity using petrophysical logs J. Petrol. Sci. Eng., 174 (2019), pp. 306-32.
- [19] A.Al-Anazi, I.D.Gates, (2010). A support vector machine algorithm to classify lithofacies and model permeability in heterogeneous reservoirs. Engineering Geology. Volume 114, Issues 3–4, 10 August 2010, Pages 267-277.
- [20] Scikit Learn, (2020). K Nearest Neighbors Documentation, sklearn, viewed 20 April 2020, <<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neighbors.KNeighborsRegressor.html#sklearn.neighbors.KNeighborsRegressor>>
- [21] Scikit Learn, (2020), GridSearchCV Documentation, sklearn, viewed 20 April 2020, <[https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model\\_selection.GridSearchCV.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.GridSearchCV.html)>
- [22] Fjaer E, Holt RM, Raaen AM, Risnes R, Horsrud P (2008) Petroleum related rock mechanics, 2nd edn. Elsevier Science, Amsterdam.
- [23] Zoback, M.D., (2007) Reservoir Geomechanics. Cambridge, United Kingdom; Cambridge University Press
- [24] Singh R., Kainthola, A, and Singh T.N. (2012). "Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach", Applied Soft Computing, 12, pp. 40–45.
- [25] Roy S, Gebert J., Stasiuk G., Romana P., Weidenmann K. A., and Wanner, A. (2011). "Complete determination of elastic moduli of interpenetrating metal/ceramic composites using ultrasonic techniques and micromechanical modeling", Materials Science

- [51] Aadnoy BS, Looyeh R (2010) Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design. Gulf Professional Publishing, Elsevier, Amsterdam
- [52] Bowes C, Procter R (1997) Drillers stuck pipe handbook, guidelines and drillers handbook credits. Schlumberger, UK
- [53] Simangunsong RA, Villatoro JJ, Davis AKM (2006) Wellbore stability assessment for highly inclined wells using limited rockmechanics data. SPE-99644. Presented at the 2006 SPE annual technical conference and exhibition, San Antonio, Texas, USA, 24–27 September
- [54] Zhang J, Yu M, Al-Bazali TM, Ong S, Chenevert ME, Sharma MM, Clarc DE (2006) Maintaining the stability of deviated and horizontal wells: effects of mechanical, chemical, and thermal phenomena on well designs. SPE-100202, Presented at the 2006 SPE international oil and gas conference and exhibition, Beijing, China, 5–7 December.
- [38] Mouchet JP, Mitchell A (1989) Abnormal pressures while drilling: origins, prediction, detection, evaluation. Elf EP-Editions, Editions Technip, Paris.
- [39] Mavko G, Mukerji T, Godfrey N (1995) Predicting stress-induced velocity anisotropy in rocks. Geophysics 60:1081–1087. [https:// doi.org/10.1190/1.1443836](https://doi.org/10.1190/1.1443836).
- [40] Breckels, I. M. and Van Eekelen, H. A. M. (1981). “Relationship between horizontal stress and depth in sedimentary basins: Paper SPE10336, 56th Annual Fall Technical Conference.” Society of Petroleum Engineers of AIME, San Antonio, Texas, October 5–7.
- [41] Blanton TL, Olson JE (1997) Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature. SPE-38719-MS, Presented at SPE annual technical conference and exhibition, 5–8 October, San Antonio, Texas.
- [42] Kidambi, T., Kumar, G. S., “Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf”, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 141, pp. 38-51, 2016.
- [43] Zoback M (2010) Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge
- [44] Sinha BK, Vissapragada B, Renlie L, Skomedal E (2006) Horizontal stress magnitude estimation using the three shear moduli—a norwegian sea case study. Soc Petrol Eng. <https://doi.org/10.2118/103079-MS>
- [45] Sayers C, Nagy Z, Vasudev S, Tagbor K, Hooyman P (2009) Determination of in situ stress and rock strength using borehole acoustic data. SEG Technical Program
- [46] Kirsch G, (1898) Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Verlines Deutscher Ingenieure. 42:707.
- [47] Goodman RE (1989) Introduction to rock mechanics. Wiley, Hoboken.
- [48] Nelson, E.J., (2005). Transverse drilling-induced tensile fractures in the West Tuna area, Gippsland Basin, Australia: implications for the in situ stress regime. 42, pp. 361- 371.
- [49] Al-Ajmi, A.M., and Zimmerman, R.W. (2006). “Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43, pp. 1200- 1211.
- [50] Guo B, Ghalambor A (2002) Gas volume requirements for underbalanced drilling. Pennwell Corporation, Tulsa. ISBN 0-87814-802-7.