



مقاله پژوهشی

تحلیل وضعیت تنش حال حاضر در یکی از میادین نفتی دشت آبادان: مدل سازی ژئومکانیکی و پیشنهادات برای بهینه سازی حفاری و مدیریت مخزن

محسن عزتی^{۱*}؛ محمدرضا عبادی^۲؛ مهدی هزبنه^۲؛ حسام الدین کاظمینی^۲؛ فهیمه شکرانه^۲؛ فروغ فرخ نیا^۲؛ حامد امیری^۲

۱- مهندس ژئومکانیک، شرکت اکتشاف توسعه و تولید پاسارگاد

۲- پتروفیزیک، شرکت مهندسی و توسعه نفت

۳- مدیر علوم زمین، شرکت اکتشاف توسعه و تولید پاسارگاد

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.525785.1254

چکیده

واژگان کلیدی

این پژوهش به تحلیل وضعیت تنش حال حاضر در یکی از میادین نفتی دشت آبادان در جنوب غرب ایران با هدف بهبود طراحی حفاری و پشتیبانی از تصمیم گیری های مدیریت مخزن می پردازد. با توجه به محدود بودن اطلاعات موجود در نقشه تنش جهانی (WSM) در این ناحیه به تعیین جهت تنش های افقی و نبود داده های قابل اتکا از بزرگای تنش ها و رژیم تنش، یک مدل ژئومکانیکی جامع بر پایه تلفیق داده های پتروفیزیکی، لاگ های صوتی دوقطبی، گزارش های حفاری، داده های زمین شناسی و نتایج آزمون های نشت (LOT) توسعه داده شد. تحلیل شواهد تنش استخراج شده از لاگ های تصویری نشان می دهد که جهت تنش افقی بیشینه (Sh_{max}) عمدتاً در راستای شمال شرق-جنوب غرب و منطبق بر روند تنش بیشینه در منطقه زاگرس است. برآورد بزرگای تنش ها نیز بیانگر آن است که در سازندهای مورد مطالعه، Sh_{max} بزرگ تر از تنش قائم (S_V) و تنش افقی کمینه (Sh_{min}) کوچک تر از S_V است ($Sh_{max} > S_V > Sh_{min}$) که حاکی از حاکمیت رژیم تنش امتداد لغز در میدان مورد مطالعه می باشد. نتایج این تحقیق ضمن سازگاری با روندهای ساختاری منطقه و داده های WSM ، چارچوبی کاربردی برای ارزیابی پایداری دیواره چاه، تعیین پنجره ایمن وزن گل، بهینه سازی مسیر حفاری و بهبود راهبردهای مدیریت مخزن در میادین نفتی دشت آبادان ارائه می دهد.

۱. پیش گفتار

گل، شکستگی های ناخواسته، افزایش هزینه های حفاری و حتی مخاطرات زیست محیطی شود. در دهه های اخیر، مدل سازی ژئومکانیکی به عنوان چارچوب اصلی برای تحلیل تنش های برجا و پاسخ سنگ به عملیات حفاری و تولید مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات متعددی نشان داده اند که میدان تنش کنونی نتیجه برهم کنش پیچیده ای از بارگذاری تکتونیکی، وزن سربار، فشار منفذی و تاریخچه تنش- کرنش سازندها است [۲، ۴]. در این میان، تعیین همزمان جهت، بزرگا و رژیم تنش، شرط لازم برای تحلیل پایداری چاه و پیش بینی رفتار شکستگی ها در مقیاس مخزن محسوب می شود.

وضعیت تنش برجا یکی از مؤلفه های بنیادین در تحلیل رفتار سنگ در حین حفاری و توسعه میادین نفتی محسوب می شود و بر طیف گسترده ای از تصمیمات مهندسی اثر مستقیم دارد. انتخاب نوع و مشخصات مته حفاری، بهینه سازی مسیر چاه (به ویژه در چاه های انحرافی و افقی)، طراحی لوله های جداری، تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری، شناسایی زون های مناسب برای شکست هیدرولیکی و همچنین ارزیابی خطر فعال سازی مجدد گسل ها، همگی به درک دقیق جهت و بزرگای تنش های اصلی وابسته اند [۱-۸]. عدم شناخت صحیح وضعیت تنش می تواند منجر به ناپایداری دیواره چاه، هرزروی

تحلیل وضعیت تنش حال حاضر در یکی از میداین نفتی دشت آبادان: مدل‌سازی ژئومکانیکی و پیشنهادات برای بهینه‌سازی حفاری و ...

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

در منطقه جنوب غرب ایران و به‌ویژه دشت آبادان، مطالعات انجام‌شده عمدتاً بر جنبه‌های زمین‌ساختی و الگوی شکستگی‌های طبیعی متمرکز بوده‌اند. عبدالهی فرد و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی تعامل کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس و ساختارهای عمیق عربی، دو نوع اصلی تله‌های ساختمانی را در دشت آبادان شناسایی کردند و نشان دادند که بسیاری از چین‌خورده‌های این ناحیه حاصل بازفعال‌سازی گسل‌های عمیق پیشین هستند [۹]. این چارچوب زمین‌ساختی نقش مهمی در کنترل الگوی تنش و شکستگی در مخازن کربناته منطقه ایفا می‌کند.

در ادامه، رجیبی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از لاگ‌های تصویری *FMI*، رابطه بین جهت تنش‌های افقی کنونی و توزیع شکستگی‌های طبیعی را در سازند ایلام بررسی کردند و نشان دادند که شکستگی‌ها به‌طور معناداری تحت کنترل جهت تنش افقی پیشینه قرار دارند [۱۰]. عزتی و همکاران (۲۰۱۸) نیز با تمرکز بر میکروشکستگی‌ها در سازند سروک، ارتباط روشنی بین نواحی دارای تراکم میکروشکستگی و ناهنجاری‌های تخلخل-تراوایی گزارش کردند که اهمیت تنش برجا را در کیفیت مخزنی این سازند برجسته می‌سازد [۱۱]. در کنار این مطالعات ساختاری، استفاده از داده‌های لاگ تصویری و صوتی به‌عنوان ابزارهای کلیدی در تحلیل تنش گسترش یافته است. عزتی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که ریزش‌های متقارن دیواره چاه و شکستگی‌های القایی ناشی از حفاری می‌توانند شاخص‌های قابل اعتمادی برای تعیین جهت تنش افقی پیشینه در مخازن کربناته جنوب غرب ایران باشند [۱]. همچنین عزتی و همکاران (۲۰۱۹) کاربرد لاگ‌های صوتی دوقطبی (*DSI*) را در بهبود برآورد خواص الاستیک سنگ و توسعه مدل‌های ژئومکانیکی مؤثر گزارش کردند [۳]. با وجود این مطالعات ارزشمند، تمرکز عمده پژوهش‌های انجام‌شده در دشت آبادان بر تعیین جهت تنش‌های افقی بوده و اطلاعات محدودی در خصوص بزرگای تنش‌های اصلی (*SH*، *SHmax* و *Shmin*) و رژیم تنش کنونی ارائه شده است. نقشه تنش جهانی (*WSM*) اگرچه جهت تنش افقی پیشینه را در این ناحیه مشخص کرده است، اما فاقد داده‌های قابل اتکا در مورد بزرگای تنش‌ها و تغییرات عمقی آن‌ها می‌باشد [۱۲]. این کمبود داده موجب افزایش عدم قطعیت در تحلیل پایداری چاه، طراحی پنجره وزن گل و ارزیابی خطر فعال‌سازی مجدد

گسل‌ها می‌شود.

در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای غلبه بر محدودیت داده‌های مستقیم تنش صورت گرفته است. رادون و سن (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل مسیر تنش و مدل‌سازی ژئومکانیکی، اثر افت فشار مخزن بر تغییرات بزرگای تنش‌ها را بررسی کردند و نشان دادند که کاهش فشار منفذی می‌تواند به تغییر رژیم تنش منجر شود [۴]. سعادت‌نیا و همکاران (۲۰۲۲، ۲۰۲۴) نیز با بهره‌گیری از مدل‌سازی ژئومکانیکی و شبیه‌سازی‌های کوپل‌شده هیدرومکانیکی، نقش تنش برجا را در یکپارچگی سنگ‌پوش و رفتار مخزن در میداین عظیم جنوب غرب ایران برجسته کردند [۵، ۷]. رجیبی و همکاران (۲۰۲۴) رویکردی نوین برای برآورد وضعیت تنش در شرایط فقدان داده‌های مستقیم بزرگای تنش ارائه دادند که اهمیت تلفیق داده‌های غیرمستقیم را نشان می‌دهد [۸]. با وجود این مطالعات، در حال حاضر اطلاعات کافی در مورد وضعیت تنش کنونی در منطقه موجود نیست. نقشه تنش جهانی [۱۲] نشان می‌دهد که جهت تنش‌های افقی در این منطقه تعیین شده، اما بزرگای تنش عمودی و افقی مشخص نیست. این کمبود اطلاعات مانع از ارزیابی دقیق پایداری چاه، اکتشاف منابع یا فعالیت‌های زلزله‌ای می‌شود. این مطالعه می‌تواند با استفاده از داده‌ها و روش‌های ترکیبی، مانند اندازه‌گیری تنش در محل و مدل‌سازی ژئومکانیکی، به درک بهتر وضعیت تنش در این منطقه کمک کند.

۲. خاستگاه زمین‌شناسی

میدان نفتی مورد مطالعه یک تاق‌دیس با روند شمالی-جنوبی است (شکل ۱)، [۱۱] که در دشت آبادان، جنوب غرب ایران واقع شده است. دشت آبادان دارای سه روند ساختاری اصلی *NW-SE* و *N-S*، *NE-SW* است که در ارتباط با فعالیت‌های گسل‌های عمیق می‌باشد [۹]. بسیاری از ساختارهای مرتبط با این روندها در دشت آبادان به بازفعال‌سازی گسل‌های نرمال مربوط می‌شوند که باعث ایجاد چین‌خورده‌های از نوع چین‌خورده اجباری (*forced-folding*) در رسوبات بالایی شده‌اند [۱۳].

تحلیل وضعیت تنش حال حاضر در یکی از میداين نفتی دشت آبادان: مدل سازی ژئومکانیکی و پیشنهادات برای بهینه سازی حفاری و ...

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

۳. داده‌ها و روش‌ها

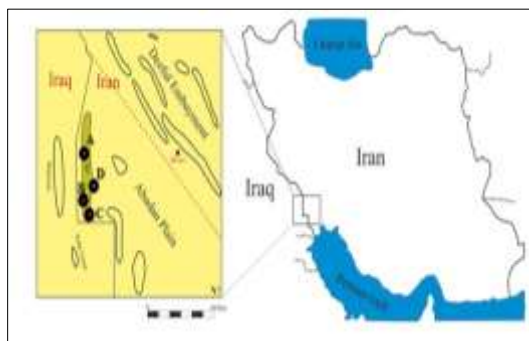
داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل لاگ‌های پتروفیزیکی، لاگ‌های تصویر چاه، داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، داده‌های فشار مخزن و داده‌های ژئومکانیکی می‌باشد.

انتخاب چاه‌های مورد مطالعه در این تحقیق بر اساس دو معیار اصلی انجام شده است. نخست، پراکندگی مکانی مناسب چاه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شد که پوشش قابل قبولی از کل میدان فراهم شود و امکان ارزیابی تغییرات مکانی وضعیت تنش در سراسر میدان وجود داشته باشد. دوم، چاه‌هایی انتخاب شدند که از نظر کیفیت و تنوع داده‌ها، کامل‌تر بوده و مجموعه‌ای قابل اتکا از لاگ‌های پتروفیزیکی، لاگ‌های تصویری، داده‌های فشار و گزارش‌های حفاری را در بر داشته باشند.

داده‌های ژئومکانیکی شامل آزمایش‌های نشت (*LOT*) برای تعیین مقدار حداقل تنش اصلی، آزمایش‌های مقاومت فشارشی تک محوره (*UCS*)، مقاومت کششی، نسبت پواسون و مدول یانگ می‌باشد. این داده‌ها برای ساخت مدلی از وضعیت تنش در ناحیه مورد مطالعه یکپارچه‌سازی شدند.

ریزش‌های متقارن و شکستگی‌های القایی در دیواره چاه داده‌هایی را برای تعیین جهت تنش‌های افقی و برآورد مقدار آن‌ها ارائه می‌دهند. هنگام حفاری، مواد از چاه خارج می‌شوند و سنگ‌های اطراف چاه حمایت خود را از دست می‌دهند و در نزدیکی دیواره چاه تجمع تنش اتفاق می‌افتد. ریزش‌های متقارن زمانی رخ می‌دهند که تنش‌های اطراف دیواره چاه از مقاومت فشارشی سازند فراتر برود و متعاقباً ریزش‌های متقارن در امتداد Sh_{min} (شکل ۳) تشکیل می‌شوند. از طرف دیگر، شکستگی‌های القایی (*DIFs*) زمانی رخ می‌دهند که تنش اطراف چاه از مقاومت کششی سنگ در دیواره چاه فراتر رود و شکستگی‌های باریک و مشخصی که به‌طور موازی یا کمی مایل به محور چاه هستند، تشکیل می‌شوند (شکل ۳).

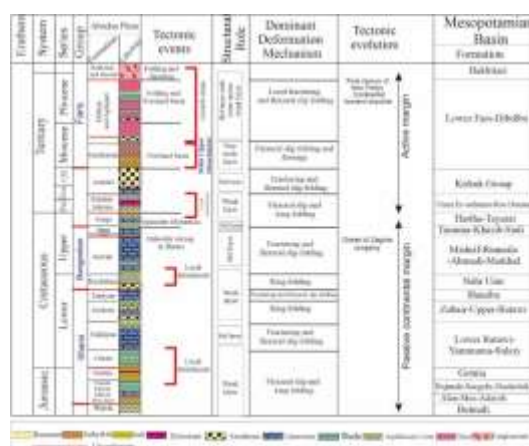
استفاده از چندضلعی تنش به همراه ریزش‌های متقارن و شکستگی‌های القایی (شناسایی شده از لاگ‌های تصویری) یکی از روش‌های اصلی برای برآورد مقدار تنش‌های افقی است. مفهوم چندضلعی تنش، که توسط زوبک و همکاران در سال ۱۹۸۶ توسعه داده شد، ابزاری بصری برای درک تعامل بین تنش‌های قائم و تنش‌های افقی (هم حداکثر و هم حداقل) در



شکل ۱. موقعیت میدان مورد مطالعه [۱۱].

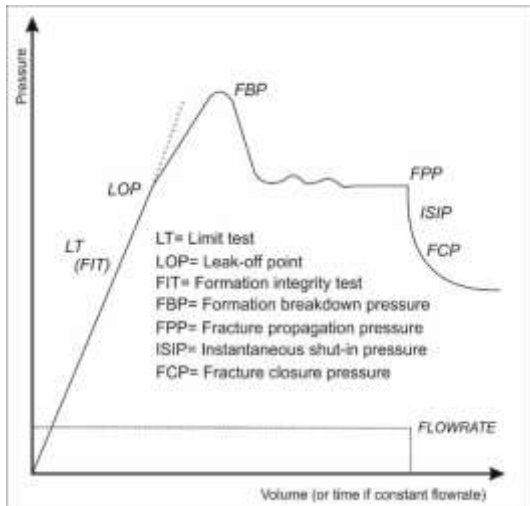
داده‌های لرزه‌ای و چاه‌ها در میدان مورد مطالعه نشان‌دهنده سطوح فرسایشی مرتبط با بالا آمدن هورست‌ها هستند. چهار مخزن تولیدی در میدان مورد مطالعه شامل سازندهای سروک، کژدمی، گدوان و فهلیان است. بر خلاف سایر میدان‌های با روند شمال غربی - جنوب شرقی در فروافتادگی دزفول، میدان مورد مطالعه متعلق به گروه روند شمالی - جنوبی است که به روند عربی معروف است [۹].

عمیق‌ترین چاه منطقه دشت آبادان در میدان مورد مطالعه حفر شده است. این چاه از سطح تا سازند گوتنیا حفر شده و به عنوان چاه کلیدی در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌رود. در شکل ۲، سنگ شناسی غالب توالی حفاری شده از سازندهای نی ریز تا آغاچاری به اختصار شرح داده شده است. به طور کلی دشت آبادان از نظر چینه شناسی و چارچوب زمین ساختی شبیه به حوضه بین‌النهرین است [۱۴، ۱۵].



شکل ۲. ستون چینه شناسی میدان مورد مطالعه [۱۴].

شده است و همچنین از مفاهیم علمی برای درک و تحلیل تنش های برجا استفاده شده است (شکل ۴).



شکل ۴. نمودار تست نشت سازند و مراحل مختلف آن [۱۶].

لاگ های پتروفیزیکی شامل چگالی، صوتی، نوترونی و مقاومت ویژه به صورت پیوسته در تمامی چاه های مورد بررسی و در بازه های عمقی متنظر با سازندهای گورپی، گدوان و فهلپان در دسترس بوده و برای تعیین سنگ شناسی، محاسبه تنش قائم (S_v)، برآورد خواص الاستیک و تحلیل فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفته اند.

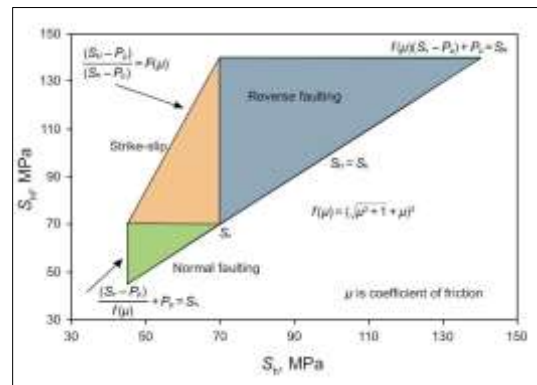
لاگ های تصویری چاه (FMI/UBI) در چاه های A و D در بازه های هدف مخزنی و غیرمخزنی (سازندهای فهلپان تا آسماری) ثبت شده اند و مبنای شناسایی ریزش های دیواره چاه ($Breakouts$) و شکستگی های القایی ناشی از حفاری ($Drilling-Induced Fractures$) قرار گرفته اند.

پارامترهای ژئومکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مقاومت کششی، مدول یانگ و نسبت پواسون از داده های آزمایشگاهی به دست آمده اند. این پارامترها به صورت وابسته به عمق و متناسب با واحدهای چینهای تعریف شده و در تحلیل پایداری دیواره چاه و ساخت چندضلعی تنش مورد استفاده قرار گرفته اند.

فرآیند ساخت مدل ژئومکانیکی در این پژوهش به صورت مرحله ای و با تلفیق سیستماتیک داده های زمین شناسی، پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و حفاری انجام شده است. در گام نخست، داده های پایه شامل لاگ های پتروفیزیکی (چگالی،

عمق مشخص است. این چندضلعی ها محدوده ای از مقادیر قابل قبول تنش ها را در آن عمق نشان می دهند و همچنین می توانند پایداری یک گسل را در محیط تنش فعلی نشان دهند.

تنش های افقی در مناطق مثلثی این چندضلعی (شکل ۳) مطابق با رژیم های تنشی مختلف، مانند گسلش نرمال، امتداد لغز و معکوس قرار می گیرند. هنگامی که تنش های افقی در لبه چندضلعی قرار می گیرند، نشان دهنده این است که دایره مور در تماس با خط شکست قرار دارد که این وضعیت می تواند نشان دهنده پایداری بحرانی گسل باشد [۱۶].



شکل ۳. نمودار چندضلعی تنش [۱۶].

در این مطالعه، دو داده از عملیات آزمایش نشت LOT برای تعیین مقدار حداقل تنش افقی استفاده شد. در یک نمودار فشار-زمان برای یک آزمایش $XLOT$ ، وقتی که نرخ پمپاژ ثابت نگه داشته می شود، فشار در چاه به طور خطی افزایش می یابد. با این حال، زمانی که انحراف قابل توجهی از این افزایش خطی مشاهده شود، نشان دهنده تشکیل اولیه شکست هیدرولیکی است. نقطه نشت (LOP) تقریباً برابر با حداقل تنش اصلی است (البته مقاومت کششی سنگ باید از آن کاسته شود که به بزرگای تنش کمینه نزدیکتر شویم).

در صورتی که LOP به دست نیاید، یک آزمایش یکپارچگی سازند (FIT) انجام می شود که نشان دهنده این است که حداکثر فشار از حداقل تنش اصلی فراتر رفته است. فشار اوج در حین یک کوچک-شکستگی ($Mini-frac$) به عنوان فشار شکست سازند (FBP) شناخته می شود که نشان دهنده شروع گسترش شکستگی است [۱۶، ۱۷]. در این مطالعه با استفاده از داده های مختلف، مدلی از وضعیت تنش در ناحیه ایجاد

تحلیل وضعیت تنش حال حاضر در یکی از میادین نفتی دشت آبادان: مدل‌سازی ژئومکانیکی و پیشنهادات برای بهینه‌سازی حفاری و ...

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

صوتی فشارشی و برشی، تخلخل)، اطلاعات زمین‌شناسی (چینه‌شناسی و لیتولوژی)، و گزارش‌های حفاری برای هر چاه کنترل کیفی و هم‌عمق‌سازی شدند.

در گام دوم، تنش قائم (S_V) از انتگرال‌گیری پیوسته چگالی سنگ در امتداد عمق محاسبه شد. هم‌زمان، پارامترهای مکانیک سنگ شامل مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی از داده‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی مبتنی بر لاگ‌های صوتی استخراج و کالیبره شدند. این پارامترها به‌عنوان ورودی‌های اصلی در تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین حدود شکست فشاری و کششی مورد استفاده قرار گرفتند.

در گام سوم، حداقل تنش افقی (S_{hmin}) با استفاده از نتایج آزمون‌های نشت (LOT) تعیین و برای سازندهای مختلف کالیبره شد. جهت تنش‌های افقی نیز بر اساس تحلیل ریزش‌های متقارن و شکستگی‌های القایی شناسایی شده از لاگ‌های تصویری استخراج گردید. این داده‌ها نقش کلیدی در محدودسازی دامنه تنش‌ها و کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های غیرمستقیم ایفا کردند.

در گام چهارم، با تلفیق تنش قائم، حداقل تنش افقی، فشار منفذی و پارامترهای مقاومت سنگ، روش چندضلعی تنش برای هر عمق اجرا شد تا دامنه مجاز تنش افقی بیشینه (S_{Hmax}) تحت رژیم‌های تنشی مختلف مشخص گردد.

۴. بحث و بررسی

تحلیل انجام شده با استفاده از چندین منبع داده برای تعیین وضعیت تنش درجا استفاده شد. لاگ‌های تصویری چاه اطلاعات کلیدی را برای شناسایی گسیخت‌های چاه که نشانگرهای حساسی از میدان تنش هستند، فراهم کردند. شکست‌های چاه به همراه داده‌های LOT برای تعیین محدوده‌های تنش حداکثر افقی استفاده شدند.

دو آزمون نشت (LOT) در این مطالعه به‌منظور کالیبراسیون حداقل تنش افقی انجام شده است. آزمون نخست در چاه B و در بالای سازند گورپی، در محل کف لوله جداری اجرا شده که لیتولوژی غالب آن آهک آرژیلی ($Argillaceous$) $Limestone$ می‌باشد. آزمون دوم در چاه C و در سازند گدوان انجام شده که لیتولوژی آن عمدتاً آهکی است؛ نتایج این آزمون نیز برای تعیین مقدار S_{hmin} و ساخت چندضلعی

تنش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دو آزمون LOT ، نقاط کالیبراسیون مستقلی برای اعتبارسنجی مدل ژئومکانیکی و تأیید رژیم تنش امتدادلغز در منطقه فراهم می‌کنند.

نمونه‌ای از ریزش‌های متقارن دیواره چاه در یکی از چاه‌های مورد مطالعه در شکل ۵ نمایش داده شده است. وضوح و جزئیات این ریزش‌ها در لاگ تصویری اولتراسونیک چاه (به دلیل پوشش ۱۰٪ دیواره چاه) نمایان‌تر می‌باشد. همچنین برای بهبود دقت شناسایی ریزش‌های متقارن، داده‌های اضافی از ابزار کالیپر در کنار لاگ‌های تصویری استفاده شد (شکل ۵). تحلیل جهت S_{Hmax} نشان می‌دهد که با جهت S_{Hmax}

زاگرس هم‌راستا است، بنابراین جهت تنش اصلی در دشت آبادان مشابه زاگرس است و در جهت $NE-SW$ قرار دارد (شکل ۵). این نتیجه‌گیری بر اساس تحلیل مستقیم شاخص‌های ژئومکانیکی استخراج‌شده از لاگ‌های تصویری چاه حاصل شده است. جهت‌گیری شکست‌های القایی ناشی از حفاری ($Drilling-Induced Fractures$) که به‌طور سیستماتیک موازی با راستای تنش افقی بیشینه (S_{Hmax}) تشکیل می‌شوند، در تمامی چاه‌های مورد مطالعه روند غالب شمال شرق-جنوب غرب ($NE-SW$) را نشان می‌دهد.

همچنین امتداد ریزش‌های متقارن دیواره چاه ($Breakouts$)، که به‌طور عمود بر S_{Hmax} توسعه می‌یابند، با این جهت‌گیری سازگار است. تطابق این الگوی جهت‌دار تنش افقی بیشینه با داده‌های منتشرشده در نقشه تنش جهانی (WSM) و روند ساختاری کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس، مبنای این تفسیر است که میدان تنش کنونی دشت آبادان به‌طور مستقیم تحت کنترل رژیم تکتونیکی زاگرس بوده و S_{Hmax} در راستای $NE-SW$ قرار دارد.

تحلیل وضعیت تنش حال حاضر در یکی از میادین نفتی دشت آبادان: مدل سازی ژئومکانیکی و پیشنهادات برای بهینه سازی حفاری و ...

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

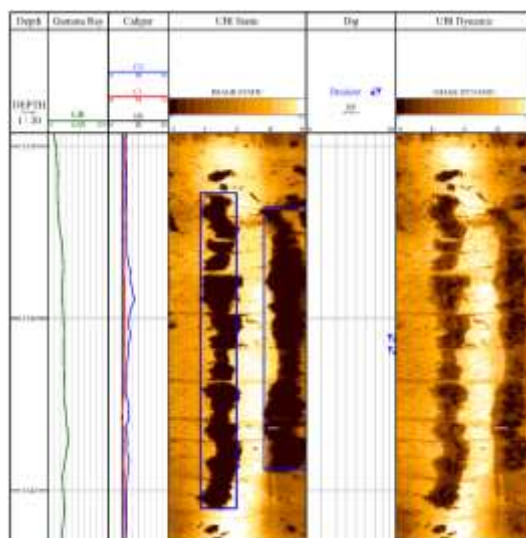
خروجی های مدل، فشار منفذی بالاتر از فشار هیدرواستاتیک است بوده و گرادیان تنش روباره تقریباً 1 psi/ft است که مقداری معمول برای بسیاری از حوضه های رسوبی است (شکل ۶).

تحلیل ها نشان می دهد که رژیم تنش در سازند گورپی S_{Hmax} بزرگتر از S_V و S_{hmin} کمتر از S_V است ($S_{Hmax} > S_V > S_{hmin}$). این ارتباط بزرگای تنش های اصلی به وضوح در شکل ۶ نشان دهنده رژیم تنش امتدادلغز است.

جهت تحلیل تنش زیرسطحی در چاه-C در سازند گدوان از داده های LOT برای تعیین محدوده های تنش های اصلی در روش چندضلعی تنش استفاده شد (شکل ۷). داده های LOT نشان دهنده ی تنش S_{hmin} برابر با $10,867 \text{ psi}$ می باشد و همچنین لاگ های تصویری چاه عرض شکست 60 درجه ای را نشان می دهند که یک نشانگر معتبر از محدوده ی S_{Hmax} است و بر این اساس دامنه مقادیر ممکن S_{Hmax} بین $13,475$ تا $16,943 \text{ psi}$ می باشد (شکل ۷).

شکل ۷ شرایط فشار و تنش در چاه-C سازند گدوان را نمایش می دهد. مدل نشان می دهد که فشار منفذی بالاتر از فشار هیدرواستاتیک و مشابه با چاه-B گرادیان S_V معادل 1 psi/ft می باشد. مانند چاه-B در سازند گورپی، سازند گدوان نیز S_{Hmax} بالاتر از S_V و S_{hmin} کمتر S_V است که نشان دهنده یک رژیم امتدادلغز در این سازند می باشد.

در لاگ FMI چاه-D همزمان هم ریزش های متقارن و هم شکست های القایی در یک بازه دیده می شوند (شکل ۸). حضور همزمان هر دو گسیخت در یک بازه، یک دیتای کلیدی ژئومکانیکی در زمینه تحلیل تنش است. شکل ۸ نشان می دهد که سازند فهلیان دارای فشار منفذی بالاتر از سایر سازندها است. بنابراین سازند فهلیان می بایست با وزن سیال حفاری بیشتری (معادل 10 pcf) حفاری شود، که به تبع آن احتمال ایجاد شکستگی های القایی در این سازند را افزایش می دهد.

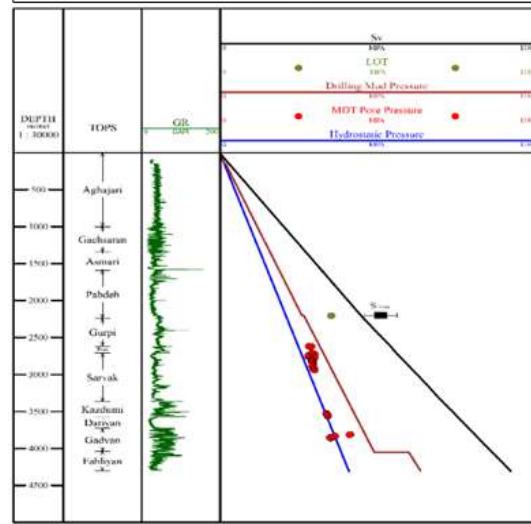
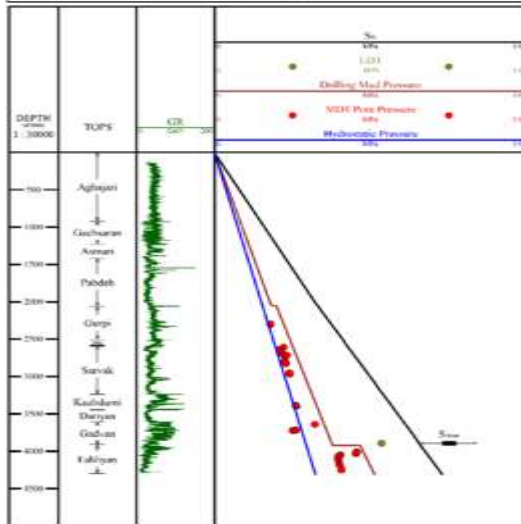
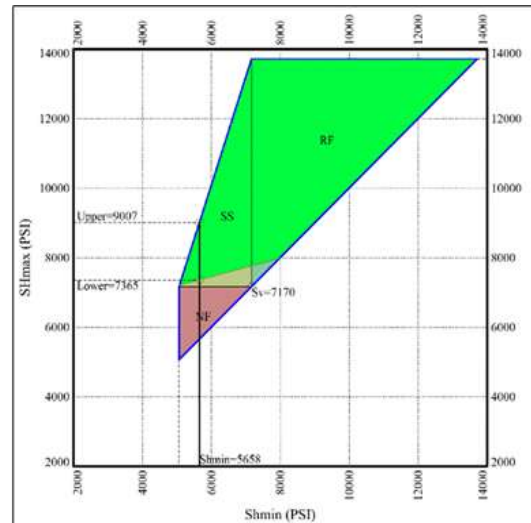
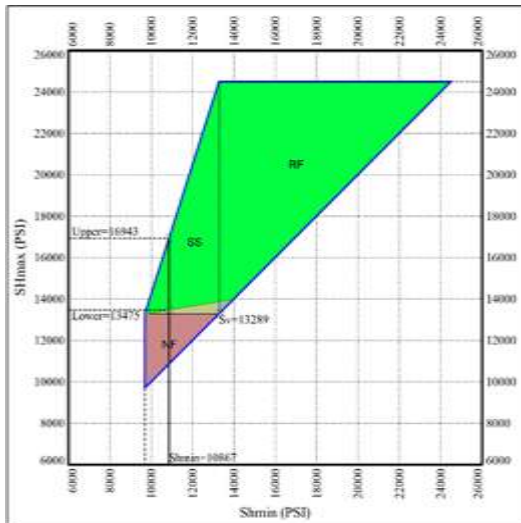


شکل ۵. نمونه ای از ریزش های متقارن شناسایی شده با استفاده از لاگ تصویری UBI در چاه-A. یک جفت ریزش متقارن در تصویر استاتیک با پاکس های آبی نمایش داده شده است. علاوه بر لاگ تصویری، لاگ های کالیپر نیز وجود ریزش ها را در این بازه تأیید می کند.

علاوه بر جهت های تنش، بزرگای آن ها نیز با استفاده از یک مجموعه کامل از اطلاعات ژئومکانیکی، پتروفیزیکی، مخزنی و زمین شناسی محاسبه شد. چاه-B در بالای سازند گورپی دارای داده های LOT است که داده ی مهمی برای تحلیل وضعیت تنش زیرسطحی است. ارزیابی داده های LOT نشان می دهد که تنش افقی حداقل در سازند گورپی در چاه-B برابر با 5658 psi است، بنابراین این عدد به عنوان مبنای وضعیت تنش در نظر گرفته می شود (شکل ۶).

برای ساخت چندضلعی تنش، علاوه بر داده های LOT ، فشار منفذی، UCS و لاگ های تصویری مورد استفاده قرار گرفت. لاگ تصویری نشان دهنده ریزش متقارن با عرض 40 درجه است که برای تخمین محدوده ی حداکثر تنش افقی با استفاده از چندضلعی تنش مورد توجه قرار گرفت. بنابراین، محدوده ی تنش افقی حداکثر تخمین زده شد، بین 7365 psi و 9007 psi است (شکل ۶).

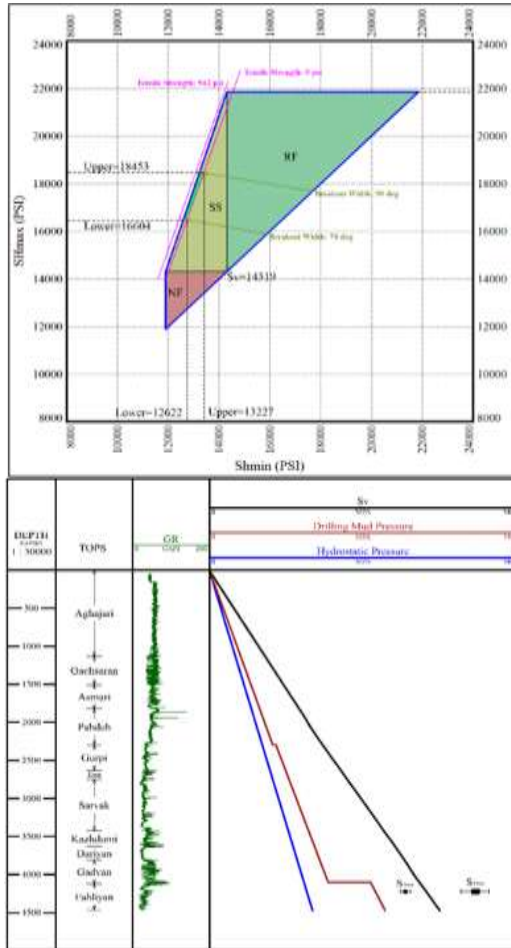
شکل ۶ شرایط فشار منفذی و بزرگای تنش های برجا در چاه-B سازند گورپی را نمایش می دهد. در این شکل همچنین فشار هیدرواستاتیک، نقاط فشار منفذی و همچنین فشار ستون سیال حفاری نشان داده شده است. با توجه به



شکل ۷. تنش چندضلعی برای چاه-C در پایه سازند گدوان، که شامل داده های LOT و اصلاح شده از طریق اندازه گیری های فشار حفره، مقادیر UCS و لاگ های تصویری است. تخمین های S_{Hmax} بین ۱۳,۴۷۵ تا ۱۶,۹۴۳ psi است که نشان دهنده رژیم امتدادلغز است. شرایط فشار و تنش در چاه-C سازند گدوان، که S_V را با گرادیان ۱ psi/ft نشان می دهد. رژیم تنش نشان دهنده رژیم امتدادلغز می باشد، با S_{Hmax} بالاتر از S_V و S_{Hmin} زیر S_V .

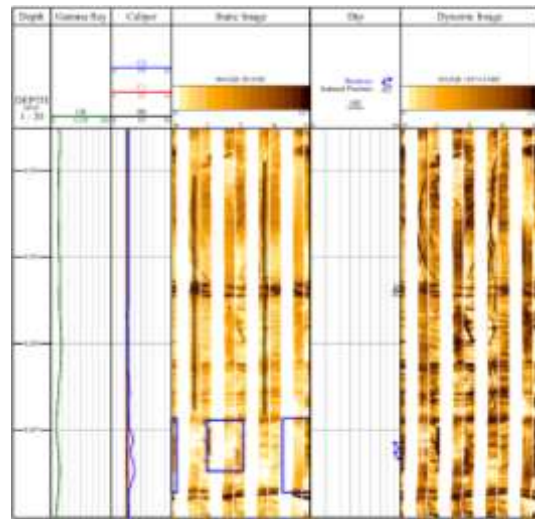
شکل ۶. چندضلعی تنش ساخته شده با استفاده از داده های LOT از چاه-B در سازند گورپی، که حداقل تنش افقی 5658 psi و بازه تخمینی تنش افقی حداکثر بین 7365 psi و 9007 psi را نشان می دهد (بالا). داده های فشار و تنش در چاه-B، نمودار نشان دهنده فشار هیدرواستاتیک، فشار منفذی، فشار سیال حفاری، داده های LOT، تنش عمودی (S_V) و تنش های افقی (S_{Hmax}) و (S_{Hmin}) است. رژیم تنش مشاهده شده ($S_{Hmax} > S_V > S_{Hmin}$) با یک رژیم امتدادلغز سازگار است (پایین).

این چاه نیز رژیم تنش امتدادلغز حاکم می باشد. همچنین این رژیم تنش امتدادلغز تنها به چاه-D محدود نمی شود، بلکه در سایر چاهها نیز دیده می شود، بنابراین این یک پدیده منطقه ای است.



شکل ۹. عدم وجود داده های LOT در چاه-D تخمین تنش را ضروری کرد. وضعیت تنش با استفاده از شکست های ۷۰-۹۰ درجه ای و شکست های ناشی از حفاری به همراه تحلیل تنش چندضلعی تخمین زده شد. چاه-D رژیم تنش امتدادلغز را نشان می دهد ($S_{Hmax} > S_V > S_{Hmin}$)، که با مشاهدات در سایر چاهها سازگار است. این موضوع رژیم امتدادلغز منطقه ای را تأیید می کند.

در این مطالعه، برآورد تنش های افقی و عمودی با استفاده از تلفیق داده های لاگ، آزمون های مکانیک سنگ، داده های LOT و روش چندضلعی تنش انجام شده است. با این حال، روش چندضلعی تنش به عنوان ابزاری برای محدودسازی



شکل ۸. وقوع همزمان شکست ها و شکست های ناشی از حفاری در چاه-D، سازند فهلیان. شکست ها با جعبه های آبی و شکست های ناشی از حفاری با خطوط سیاه مشخص شده اند. در چاه-D، شکست های ناشی از حفاری یک هم راستایی واضح با جهت S_{Hmax} نشان می دهند که در جهت شمال شرقی-جنوب غربی مشاهده می شود.

به دلیل عدم وجود داده های LOT در چاه-D، اندازه گیری مستقیم تنش افقی حداقل با استفاده از روش های متداول ممکن نیست. اما وجود همزمان ریزش متقارن و شکستگی القایی در یک بازه، داده های جایگزینی را برای تخمین وضعیت تنش فراهم کرده است. تقاطع عرض ریزش های متقارن و وجود شکستگی القایی بر روی تنش چندضلعی (شکل ۹)، ناحیه ای را مشخص می کند که مقادیر ممکن S_{Hmax} و S_{Hmin} در آن قرار می گیرد. عرض ریزش های متقارن مشاهده شده در چاه-D بین ۷۰ تا ۹۰ درجه می باشد. علاوه بر این، مقاومت کششی سنگ، که به میزان psi ۹۲۴ اندازه گیری شده است، در تحلیل تنش برای اصلاح تخمین های S_{Hmax} و S_{Hmin} لحاظ شده است. با استفاده از داده های تحلیل تنش چندضلعی (شکل ۹)، می توان مشاهده کرد که بازه S_{Hmin} بین ۱۲،۶۲۲ و psi ۱۳،۲۲۷ است، بازه S_{Hmax} بین ۱۶،۶۰۴ و psi ۱۸،۴۵۳ قرار می گیرد.

در چاه-D تحلیل وضعیت تنش نشان می دهد که تنش افقی حداقل در تمام بازه های ممکن کمتر از تنش عمودی است و تنش افقی حداکثر در تمام بازه های ممکن در این چاه بزرگتر از تنش عمودی است (شکل ۹). بنابراین در سازند فهلیان از

راستای شمال شرق-جنوب غرب می‌تواند در طراحی مسیر چاه، کنترل پایداری دیواره و تعریف پنجره ایمن حفاری مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل تنش در سازندهای گورپی، گدوان و فهلیان نشان داد که در تمامی چاه‌های مورد مطالعه، رژیم تنش از نوع امتدادلغز ($S_{Hmax} > S_V > S_{Hmin}$) با جهت غالب S_{Hmax} در راستای شمال شرق-جنوب غرب است. بر اساس این نتایج، مطالعه موردی حاضر پیشنهاد می‌کند که حفاری چاه‌های انحرافی و افقی توسعه‌ای به گونه‌ای طراحی شوند که آزمون چاه‌ها تا حد امکان عمود بر S_{Hmax} انتخاب گردد. این رویکرد، مطابق با مشاهدات ریزش‌های متقارن و شکستگی‌های القایی در لاگ‌های تصویری، منجر به کاهش تمرکز تنش در دیواره چاه، افزایش پایداری مکانیکی و کاهش نیاز به افزایش وزن گل حفاری، به‌ویژه در سازند فهلیان با فشار منفذی بالاتر، خواهد شد.

علاوه بر مزایای حفاری، این رویکرد پیامدهای مهمی برای مدیریت مخزن و برنامه‌ریزی شکست هیدرولیکی دارد. حفاری چاه‌های افقی در راستای S_{Hmin} باعث می‌شود که در صورت اجرای عملیات شکست هیدرولیکی، شکستگی‌های القایی به‌طور طبیعی در راستای S_{Hmax} و عمود بر محور چاه گسترش یابند. این هندسه شکستگی، سطح تماس مؤثر بیشتری بین چاه و مخزن ایجاد کرده و کارایی فرآیند تحریک مخزن را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

از دیدگاه مدیریت مخزن، نتایج این مطالعه موردی نشان می‌دهد که شناخت دقیق رژیم تنش امتدادلغز و بزرگای تنش‌های افقی نقش کلیدی در طراحی و ارزیابی عملیات شکست هیدرولیکی دارد. با توجه به اینکه شکستگی‌های القایی تمایل به گسترش در راستای S_{Hmax} دارند، چاه‌های افقی حفاری شده عمود بر S_{Hmax} می‌توانند بیشترین سطح تماس مؤثر با مخزن را ایجاد کنند. همچنین، آگاهی از پنجره ایمن تنش و فشار شکست سازند، خطر برقراری ارتباط ناخواسته بین لایه‌ها و فعال‌سازی مجدد گسل‌ها را کاهش داده و امکان مدیریت پایدار فشار مخزن در طول دوره تولید را فراهم می‌سازد.

۶. مراجع

[1] Ezati, M., Soleimani, B. and Moazeni, M.S., 2014. Fracture and horizontal stress analysis of Dalan

دامنه تنش افقی بیشینه (S_{Hmax})، ذاتاً با عدم قطعیت‌هایی همراه است که عمدتاً ناشی از خطاهای داده‌های ورودی، فرض یکنواختی میدان تنش و تفسیر هندسی مرزهای چندضلعی می‌باشد. علاوه بر این، عدم قطعیت موجود در نتایج آزمون‌های مکانیک سنگ، به‌ویژه آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، می‌تواند بر موقعیت مرزهای چندضلعی تنش و در نتیجه بر دامنه مجاز S_{Hmax} تأثیرگذار باشد. بر اساس مطالعات پیشین، ضریب تغییرات آزمون UCS برای نمونه‌های نسبتاً همگن معمولاً کمتر از ۲۵٪ بوده و خطای متعارف آن در بازه ۵ تا ۱۵٪ قرار می‌گیرد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن یک خطای میانگین ۱۰٪ برای UCS ، عدم قطعیت ناشی از آن در محاسبات تنش حدود ۳ تا ۴٪ برآورد می‌شود که در تفسیر نهایی نتایج لحاظ شده است [۱۸].

علاوه بر عدم قطعیت‌های آزمایشگاهی، خطاهای مرتبط با داده‌های میدانی و مدل‌سازی نیز می‌توانند بر نتایج نهایی تأثیرگذار باشند. داده‌های LOT مورد استفاده در این مطالعه به‌عنوان مبنای تعیین حداقل تنش افقی (S_{Hmin}) نقش کلیدی دارند، اما عواملی نظیر دقت اندازه‌گیری فشار، ناهمگنی سنگ، و فرض محدود بودن ارتفاع شکست در محدوده چاه می‌توانند موجب افزایش عدم قطعیت شوند. برای کاهش اثر این محدودیت‌ها، از داده‌های مستقل شامل لاگ‌های تصویری چاه، شواهد شکست‌های القایی و ریزش‌های دیواره چاه به‌عنوان ابزارهای کنترلی متقابل استفاده شده است. همچنین، برآورد پیوسته تنش‌های افقی با استفاده از معادلات پوروالاستیک و تلفیق آن با نتایج LOT و تحلیل چندضلعی تنش، چارچوبی سازگار و قابل اتکا برای تحلیل وضعیت تنش فراهم کرده است. با این وجود، بدیهی است که در اختیار داشتن داده‌های تکمیلی مانند $XLOT$ یا $mini-frac$ و افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری تنش می‌تواند موجب کاهش بیشتر عدم قطعیت و بهبود دقت برآورد بزرگای تنش‌ها شود.

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه موردی بر پایه داده‌های لاگ تصویری، تست‌های نشت سازند (LOT)، لاگ‌های صوتی و شواهد ناپایداری دیواره چاه در سازندهای گورپی، گدوان و فهلیان استوار است و نشان می‌دهد که چگونه تعیین رژیم تنش امتدادلغز ($S_{Hmax} > S_V > S_{Hmin}$) و جهت تنش افقی بیشینه در

- [11] Ezati, M., Azizzadeh, M., Riahi, M.A., Fattahpour, V. and Honarmand, J., 2018. Characterization of microfractures in carbonate Sarvak reservoir, using petrophysical and geological data, SW Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, pp.675-695.
- [12] Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M. and Wsm Team, 2016. World stress map database release 2016. GFZ Data Services, 10, p.1.
- [13] Sattarzadeh, Y., Cosgrove, J.W. and Vita-Finzi, C., 2002. The geometry of structures in the Zagros cover rocks and its neotectonic implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 195(1), pp.205-217.
- [14] Assadi, A., Honarmand, J., Moallemi, S.A. and Abdollahie-Fard, I., 2023. Impacts of Depositional Facies and Diagenesis on Reservoir Quality: A Case Study from the Rudist-bearing Sarvak Formation, Abadan Plain, SW Iran. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 97(1), pp.190-206.
- [15] Mehrabi, H., Karami, F., Fakhar-Shahreza, N. and Honarmand, J., 2023. Pore-Type Characterization and Reservoir Zonation of the Sarvak Formation in the Abadan Plain, Zagros Basin, Iran. *Minerals*, 13(12), p.1464.
- [16] Zoback, M.D., 2010. Reservoir geomechanics. Cambridge university press.
- [17] Taghipour, M., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., Hafezi Moghaddas, N. and Molaghab, A., 2019. Estimation of the current stress field and fault reactivation analysis in the Asmari reservoir, SW Iran. *Petroleum Science*, 16, pp.513-526.
- [18] Bewick, R.P., Amann, F., Kaiser, P.K. and Martin, C.D., 2015, May. Interpretation of UCS test results for engineering design. In *ISRM Congress (pp. ISRM-13CONGRESS)*. ISRM.
- [19] Formation using FMI image log in one of southwestern Iranian oil wells. *Journal of Tethys*, 2(1), pp.1-8.
- [2] Bondur, V.G., Garagash, I.A., Gokhberg, M.B. and Rodkin, M.V., 2016. The evolution of the stress state in Southern California based on the geomechanical model and current seismicity. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 52, pp.117-128.
- [3] Ezati, M., Azizzadeh, M., Riahi, M.A., Fattahpour, V. and Honarmand, J., 2019. Application of DSI log in geomechanical and petrophysical evaluation of carbonate reservoirs: a case study in one of the SW Iranian oil fields. *J Petroleum Res*, 29, pp.37-50.
- [4] Radwan, A. and Sen, S., 2021. Stress path analysis for characterization of in situ stress state and effect of reservoir depletion on present-day stress magnitudes: reservoir geomechanical modeling in the Gulf of Suez Rift Basin, Egypt. *Natural Resources Research*, 30(1), pp.463-478.
- [5] Saadatnia, N., Sharghi, Y., Moghadasi, J. and Ezati, M., 2022. Geomechanical modelling and cap-rock integrity of one of the southwest Iranian giant carbonate oil field. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 5(3), pp.43-60.
- [6] Kumar, K.R., Honorio, H., Chandra, D., Lesueur, M. and Hajibeygi, H., 2023. Comprehensive review of geomechanics of underground hydrogen storage in depleted reservoirs and salt caverns. *Journal of Energy Storage*, 73, p.108912.
- [7] Saadatnia, N., Sharghi, Y., Moghadasi, J. and Ezati, M., 2024. Coupled hydro-mechanical simulation in the carbonate reservoir of a giant oil field in southwest Iran. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 14(1), pp.59-83.
- [8] Rajabi, M., Ziegler, M., Ranjbarkarami, R. and Tavoosiiraj, P., 2024. A novel approach for geomechanical modelling in the absence of stress magnitude data. *Australian Energy Producers Journal*, 64(2), pp.S275-S279.
- [9] Abdollahie Fard, I., Braathen, A., Mokhtari, M., & Alavi, S. A. 2006. Interaction of the Zagros Fold-Thrust Belt and the Arabian-type, deep-seated folds in the Abadan Plain and the Dezful Embayment, SW Iran. *Petroleum Geoscience*, 12(4), pp.347-362.
- [10] Rajabi, M., Sherkati, S., Bohlooli, B. and Tingay, M., 2010. Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonates (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran. *Tectonophysics*, 492(1-4), pp.192-200.