«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال چهارم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۵۹ الی ۶۸

علمی – تخصصی

بررسی نقش ساختارهای زمین در بروز مشکلات حفاری به‌منظور استفاده از راهکارهای عملیاتی آن در پروژه‌های مشابه، مطالعه موردی

مهدی باجولوند[1*]، حسین سعادتی

[1] دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

[1] دکترای تخصصی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱)

چکیده

عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز یکی از مهم‌ترین عملیات در دستیابی به مخازن هیدروکربوری است که به‌طور مستقیم بر هزینه‌های تولید تأثیرگذار است. موفقیت در این عملیات تا حد زیادی وابسته به شناخت ساختارهای زیرسطحی مسیر حفاری است. داده‌های لرزه‌ای یکی از مهم‌ترین منابع اطلاعاتی برای شناخت ساختارهای زیرسطحی هستند که گاهی کیفیت آن تحت تأثیر عواملی کاهش می‌یابد. این کاهش کیفیت منجر به عدم قطعیت قابل توجهی در تفسیر افق‌ها و عمق قرارگیری ساختارهایی همچون گسل می‌شود که می‌تواند بروز مشکلات حفاری را در پی داشته باشد. این پژوهش با هدف بررسی نقش ساختارهای زمین در بروز مشکلات حفاری انجام شده است. به این منظور داده‌های مربوط به یک حلقه چاه واقع در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران گردآوری شده است. بررسی گزارش‌های روزانه حفاری و زمین‌شناسی و مطابقت آن با تفسیرهای ساختاری نشان داد که نقش عدم قطعیت‌های ساختاری در بروز مشکلات حفاری کاملا قابل توجه بوده است. بر این اساس در چاه مورد مطالعه مدت‌زمان و حجم قابل توجهی مواد جلوگیری هرزروی صرف رفع مشکل هرزروی گل، تنگی چاه و افزایش فشار چاه (حجم گل) شده است. علت اصلی بروز این مشکل عدم قطعیت تفسیرها در نواحی گسلیده بوده است. با توجه به مشابه بودن این الگوی ساختاری مخزن با شرایط اغلب میادین نفتی فروافتادگی دزفول، راهکارهای عملیاتی این مشکل به‌صورت مسئله محور، نتیجه محور، زمین‌شناسی محور و ساختار محور برای به‌کارگیری در شرایط مشابه سایر پروژه‌ها ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: ساختارهای زمین، عملیات حفاری، عدم قطعیت، گسل، راهکار عملیاتی

۱. مقدمه

حوزه زاگرس چین خورده از جنبه‌های مختلف بسیار قابل اهمیت است. یکی از جنبه‌های اهمیت این زون، وجود میادین هیدروکربوری است که حدود ۸۵ درصد ذخایر نفتی کشور را در بر می‌گیرد. این مقدار تقریباً ۱۲ درصد از ذخایر نفتی جهان را شامل می‌شود. از این مقدار ۷ درصد در فروافتادگی دزفول قرار دارد [۱].

به علت وجود مخازن نفتی بسیار مهم در رشته کوه‌های زاگرس، زمین‌شناسی این منطقه از دیرباز مورد کاوش و بررسی متخصصان مختلف و زمین‌شناسان نفتی جهان قرار گرفته است و سابقه این بررسی‌ها به دو دهه آخر قرن نوزدهم باز می‌گردد. از آن زمان تا به امروز اطلاعات زمین‌شناسی این منطقه از ایران شامل انبوهی از گزارش‌های زمین‌شناسی است که اکثرآن‌ها به‌صورت انتشار داخلی در صنعت نفت باقی مانده است. حوزه زاگرس چین‌خورده پهنه‌های مختلفی دارد که تنوع ساختاری زیادی دارند. زیرپهنه‌های زاگرس چین‌خورده شامل لرستان، ایذه، دشت آبادان، فارس، پس‌خشکی بندرعباس و فروافتادگی دزفول است.

زیرپهنه لرستان بخشی از زاگرس چین‌خورده است که روند کلی آن هم راستا با زون راندگی‌ها است و به‌صورت شمال غربی-

جنوب شرقی است. این زون ساختاری متشکل از تناوب تاقدیس‌های بزرگ (مانند کبیر کوه) و کوچک می‌باشد. در برداشتن تاقدیس‌هایی متشکل از گروه بنگستان در جنوب و سازند فلیشی امیران و گرو در شمال از دیگر ویژگی‌های آن است. در این زیرپهنه گسل‌های فرعی با جابجایی کم، چین تاقدیسی کوچک سطحی، عمیق، چین گوش خرگوشی، ساختار دم ماهی بسیار شاخص هستند [۲].

زیرپهنه فارس گستره واقع در میان دو گسل کازرون در غرب و گسل میناب درشرق است. از مهم‌ترین شاخص‌های ساختاری این زیرپهنه می‌توان به گسل‌های راندگی مدفون، چین انتشار گسلی و چین جدایش گسلی و چین ناودیس شکنجی اشاره کرد. بدون شک گنبد نمکی هرمز را می‌توان به‌عنوان شاخص‌ترین عامل ساختاری متمایزکننده زیرپهنه فارس نسبت به سایر زیرپهنه‌های زاگرس چین‌خورده معرفی کرد [۳].

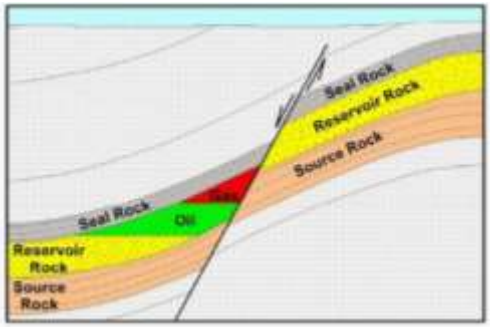
پس خشکی بندر عباس محدوده‌ای از پایانه جنوب خاوری زاگرس است که مرز خاوری آن گسل میناب و مرز جنوبی آن جبهه چین‌های زاگرس است که از درون خلیج فارس می‌گذرد. مرز شمالی آن منطبق بر گسل رازک و یا خطواره نخیلو- فینو است. مهم‌ترین خصوصیات ساختاری در این زیرپهنه شامل گسل‌های امتدادلغز، چین‌های تاقدیسی، چین‌های پشت نهنگی و چین‌های انتشار گسلی است [۴].

زیرپهنه ایذه بخشی از زاگرس چین‌خورده است که از شمال به مرز جنوبی زون راندگی‌ها و از جنوب با مرز شمال فروافتادگی دزفول و از شرق با گسل کازرون و از غرب به امتداد فرضی گسل عامل خمش بالا رود محدود می شود. داشتن میدان‌های نفتی و گازی از ویژگی‌های بارز بخش جنوب شرقی ایذه است. از مهم‌ترین ساختارهای زمین در این بخش می‌توان به گسل‌های معکوس، چین‌های تاقدیسی و چین‌های گوش خرگوشی اشاره کرد [۵].

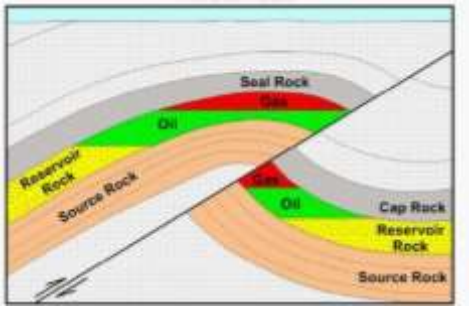
بررسی ساختارهای زمین در دشت آبادان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرپهنه‌های زاگرس چین‌خورده مورد مطالعه محققان متعددی بوده است. از مهم‌ترین میادین نفتی این زیرپهنه می‌توان به میدان نفتی آزادگان، یاران، یادآوران، دارخوین و جفیر اشاره کرد. به‌طورکلی در دشت آبادان، رژیم زمین‌ساختی با کنترل نوع و ضخامت سنگ‌های رسوبی (اعم از تبخیری و غیر تبخیری)، موجب شده که اکثر ساختارهای موجود در این ناحیه از ویژگی‌های ساختمانی و بعضا مخزنی میدان‌های نفتی صفحه عربی تبعیت کنند. به عبارتی دیگر از نقطه نظر زمین‌شناسی ساختمانی، دشت آبادان قسمتی از حوضه رسوبی بین النهرین در خاک ایران است. چین‌های ملایم نامتقارن، نفتگیرهای چینه‌ای ساختمانی ترکیبی و حضور نمک در بخش جنوب شرق را می‌توان از مهم‌ترین ساختارهای زمین در این بخش معرفی کرد [۶، ۷].

فروافتادگی دزفول بخش مهمی از کمربند ساده چین‌خورده زاگرس است که در بخش شمال غربی به رشته‌کوه‌های لرستان، از جنوب شرقی به رشته کوه‌های فارس و از جنوب غربی به رشته کوه‌های خوزستان محدود شده است. وجود ساختارهای زمین با خصوصیات متنوع باعث پیچیدگی‌هایی در فروافتادگی دزفول شده است به نحوی‌که از بخش شمالی تا جنوبی آن الگوهای متفاوتی از لایه‌بندی، چین‌خوردگی و گسلش قابل مشاهده است. [۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. بخش شمال غربی فروافتادگی دزفول شامل میادین لالی، زیلویی، کارون، مسجد سلیمان، پلنگان، لبه سفید، اندیکا و پاپیله است [۱۳، ۱۴، ۱۵]. در بخش مرکزی میادین اهواز، آب تیمور، مارون، کوپال، آغاجاری، پازنان، کرنج، پرنج، پارسی، شادگان، رگ سفید، رامشیر و منصور آباد قرار دارند. همچنین میادین گچساران، بی بی حکیمه، چیلینگر، گرنگان، سولابدر، چاهربیشه، رودک، میلاتون، نرگسی، گلخاری، شاپور، سیاه مکان، خیر آباد، بینک، سربری، کیلور کریم، دارا و بالارود از مهم‌ترین میادین بخش جنوب شرقی این ناحیه هستند.

اغلب میادین نفتی ایران از نوع تله ساختاری هستند. تله ساختاری نوع گسل یکی از رایج ترین این نوع نفتگیرهاست. در شکل (۱)، نمونه‌هایی از تله‌های نفتی مرتبط با گسل نشان داده شده است. این نوع نفتگیرها متناسب با شرایط می‌توانند پیچیدگی‌های مختلفی را برای دستیابی به ذخایر ایجاد کنند.



(الف)



(ب)

شکل (۱). نمونه‌ای از نفت‌گیر ساختاری مرتبط با الف) گسل نرمال؛ ب) رانده [۱۶]

عمده تأثیر گسل جابجایی و تکرار لایه‌ها، تغییر ضخامت لایه‌ها، پیچیدگی در تعیین مرز سازندها و مهاجرت گاز است. با حضور گسل در مسیر حفاری احتمال برخورد با زون‌های هرزروی شدید و حاوی گاز افزایش می‌یابد. نکته بسیار مهم در این نواحی لزوم پیش‌بینی دقیق عمق ورود به پوش‌سنگ و مخزن است. همچنین در نواحی با فشردگی ناحیه‌ای زیاد و بروز چین‌های مرتبط با گسل، فشار ناشی از حرکت گسل ممکن است در مواردی منجر به جابجایی نمک و ایجاد جوش‌های نمکی در طبقات فوقانی را به همراه داشته باشد [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰].

بروز هریک از این مشکلات می‌تواند عملیات حفاری را با مشکلات جدی مواجه کند. بنابراین داشتن شناخت کامل از ساختارهای زمین در مسیر حفاری می‌تواند نقش مهمی در کاهش مخاطرات بالقوه داشته باشد. یکی از داده‌های مورد استفاده برای تفسیر ساختارها، داده لرزه‌ای است. کیفیت داده‌های لرزه‌ای نقش قابل توجهی در عدم قطعیت تفسیرهای ساختاری انجام شده دارد [۲۱]. با توجه به اینکه این کیفیت همواره تحت تأثیر عوامل محیطی ممکن است کاهش یابد، بر این اساس همواره باید سهمی برای عدم قطعیت در تفسیرها متصور بود. بر اساس مطالعات گذشته، نگاهی به تنوع ساختارهای زمین در میادین مختلف اهمیت شناخت آن برای انجام عملیات با کم‌ترین میزان مخاطره را نشان می‌دهد. از سویی دیگر، بررسی تجربیات حفاری در مواجهه با هریک از این ساختارها می‌تواند راهنمای مناسبی برای استفاده در پروژه‌های آینده باشد. بررسی سوابق تحقیق نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای با هدف بررسی نقش چالش‌های ساختاری در بروز مشکلات حفاری انجام نشده است.

در این تحقیق عملیات حفاری یک حلقه چاه توسعه‌ای حفاری شده به صورت قائم برای دستیابی به مخزن آسماری در ناحیه گسلیده مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شرایط ساختاری پیچیده مسیر حفاری چاه مورد مطالعه، استفاده از تجربیات آن می‌تواند برای شرایط مشابه پروژه‌های آتی بسیار کاربردی باشد.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از رویکرد تحلیل پس از عملیات (Post analysis)، با بررسی داده‌های مربوط به یک حلقه چاه قائم واقع در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران و مطالعات تطبیقی بین منابع مختلف، ابتدا مشکلات حفاری رخ داده در این چاه در سازندهای آغاجاری، گچساران، پوش‌سنگ و مخزن آسماری مشخص شده و در ادامه ارتباط آن با عدم قطعیت‌های ساختاری تعیین شده است. در نهایت نیز برای استفاده از راهکارهای بکار گرفته شده در مقابله با این مشکلات، راهکارهای عملیاتی مسئله محور، نتیجه محور، زمین‌شناسی محور و ساختار محور ارائه شده است. مراحل اصلی این تحقیق مطابق شکل (۲) عبارتند از:

- **مرحله اول:** مطالعات کتابخانه‌ای با هدف بررسی موارد مشابه ساختاری در سایر میادین فروافتادگی دزفول،
- **مرحله دوم:** گردآوری و ساماندهی داده‌های مربوط به یک حلقه چاه شامل داده‌های گل نگاری روزانه (DMLR)، گزارش‌های روزانه حفاری (DDR)، روزانه زمین‌شناسی (DGR)، گزارش نهایی چاه (EWR) و تفسیر ساختاری داده‌های لرزه‌ای،
- **مرحله سوم:** پردازش داده‌ها و تشکیل بانک داده،
- **مرحله چهارم:** تحلیل و بررسی تطبیقی منابع مختلف داده به‌منظور طبقه‌بندی مشکلات حفاری،
- **مرحله پنجم:** تعیین ارتباط مشکلات با عمق لایه‌ها و ناحیه تأثیر گسل،
- **مرحله ششم:** ارزیابی نتایج به‌کارگیری راهکارهای استفاده شده و ارائه راهکارهای عملیاتی طبقه‌بندی شده برای به‌کارگیری در شرایط مشابه پروژه‌های آتی.

شکل (۲). روندنمای مراحل انجام تحقیق

۳. نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به بررسی‌های تطبیقی و تحلیل داده‌های حفاری و زمین‌شناسی چاه مورد مطالعه و

همچنین راهکارهای عملیاتی کاربردی برای مقابله با مشکلات حفاری ناشی از ساختارهای زمین پرداخته شده است.

۳-۱. تفسیر ساختاری و سازندهای مسیر حفاری

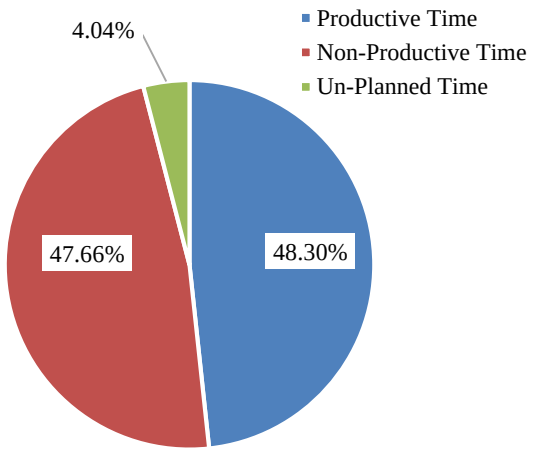
تفسیر ساختاری مبتنی بر داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی نشان داد که پیچیدگی‌های ساختاری از جمله گسل معکوس و در نتیجه تکرار لایه‌ها در مسیر حفاری این چاه وجود دارد [۱۳]. علاوه بر این به دلیل پیچیدگی‌های موجود و کیفیت داده‌های لرزه‌ای، عمق رسیدن به پوش‌سنگ و سرسازند آسماری همراه با عدم قطعیت برآورد شده است [۱۳]. در ادامه محدوده عمقی و خصوصیات سنگ‌شناسی واقعی مربوط به هریک از سازندهای مسیر حفاری ارائه شده است؛

- سازند آغاجاری: از سطح تا ۶۸۰ (با ضخامت ۶۸۰ متر)، متشکل از توالی‌هایی از ماسه‌های قهوه‌ای و خاکستری، چرت و مارل‌های قرمز با رگه‌های گچی است.
- سازند میشان: از ۶۸۰ تا ۱۰۳۰ (با ضخامت ۳۵۰ متر)، متشکل از توالی‌هایی از ماسه‌های قهوه‌ای و خاکستری، چرت و مارل‌های قرمز با رگه‌های گچی است.
- سازند گچساران (بخش‌های ۷ تا ۲): از ۱۰۳۰ تا ۱۳۷۷ (با ضخامت حدود ۳۴۷ متر)، این سازند قابل تفکیک نیست و تفسیر آن دوره‌ای است. شروع دوره با رسوبگذاری کربنات‌های آب‌های سطحی و سپس با یک فاز تبخیری پوشانده شده است. این رسوبات تبخیری سپس با مارل‌های قرمز و متنوع پوشیده شده است که پایان دوره بوده است.
- پوش سنگ: از ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۴ (با ضخامت حدود ۲۷ متر)، ۲۷ متر انیدرید و حدود ۱ متر آهک رسی است.
- سازند آسماری: از ۱۴۰۱ تا ۲۱۵۶ (با ضخامت ۷۶۱ متر)، این سازند در این میدان عمدتاً از سنگ آهک تشکیل شده است. اگرچه در قسمت‌هایی رس، تا حدودی دولومیتی با لکه‌های کم انیدریت می‌شود. به سمت قسمت‌های میانی که بخش کلهر وجود دارد، شیل، انیدریت همراه با سنگ آهک دولومیتی غالب است. قسمت زیرین سازند مذکور، سنگ آهک و سنگ آهک رسی به سنگ‌شناسی برجسته تبدیل می‌شود. زون شماره ۷ آسماری در این بخش دارای ۱۳۶ متر نمک و ۴ متر انیدرید است.
- سازند پابده: از ۲۱۵۶ تا ۲۱۸۰ (با ضخامت ۱۵ متر)، عمدتا از آهک‌های رسی و رس‌های خاکستری تشکیل شده است.

۳-۲. تفکیک زمانی عملیات حفاری

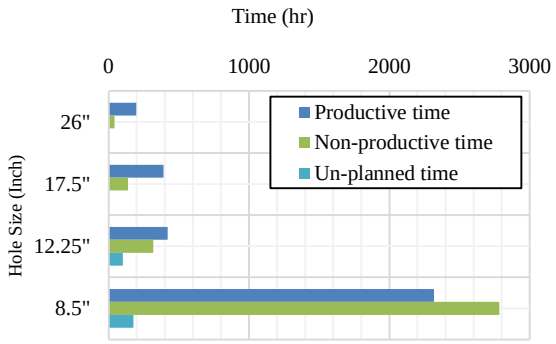
چاه مورد مطالعه به‌صورت تقریبا قائم از سطح تا عمق ۲۱۸۰ متر با هدف دستیابی به مخزن آسماری حفاری شده است.

بررسی داده‌های روزانه حفاری مربوط به ۲۸۷ روز عملیات نشان داد که در این پروژه تنها حدود ۴۸ درصد زمان‌ها مولد بوده است و مابقی زمان‌های عملیات صرف رفع مشکلات و زمان‌های انتظار دکل شده است. در شکل (۳) تفکیک زمان‌های عملیات حفاری شامل مولد (PT)، غیر مولد (NPT) و زمان‌های غیربرنامه‌ای شده است.



شکل (۳). تفکیک زمانی کلی عملیات حفاری

این درحالی است که بررسی زمان‌های مولد و غیرمولد عملیات حفاری در حفره‌های مختلف نشان داد که بخش قابل توجهی از زمان‌های غیرمولد در حفاری حفره ۸/۵ اینچی و در بخش مخزنی رخ داده است. در شکل (۴) تفکیک زمان‌های حفاری در حفره‌های مختلف چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. در ادامه با بررسی مشکلات حفاری، منشأ به وجود آمدن این زمان‌های غیرمولد تبیین شده است.



شکل (۴). تفکیک زمانی عملیات حفاری در حفره‌های مختلف

۳-۲. طبقه‌بندی مشکلات حفاری

یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی عملیات حفاری، بررسی مخاطرات محتمل بر اساس تجربیات حفاری در چاه‌های مجاور آن است. مطابق جدول (۱) مهم‌ترین مخاطرات حفاری در حفره‌ها و سازندهای مختلف بر اساس اطلاعات چاه‌های مجاور ارائه شده است. بر این اساس برنامه عملیات حفاری به‌نحوی طراحی شد که با توجه به حضور زون‌های نمکی بخش کلهر و زون ۷ سازند آسماری، این عملیات از سطح تا عمق ۱۰۹۰ با آب، از عمق ۱۰۹۰ تا عمق ۱۵۷۷ با گل حفاری اشباع از نمک و از عمق ۱۵۷۷ تا عمق نهایی با گل تکمیلی انجام شود.

جدول (۱). مشکلات چاه‌های مجاور چاه مورد مطالعه

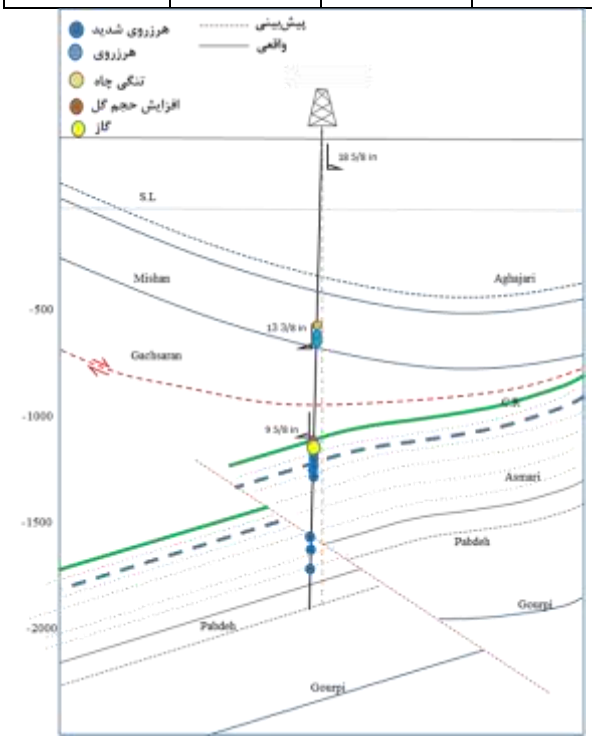
حفره	سازند	مشکلات عمده چاه‌های مجاور
۲۶	آغاجاری	هرزروی گل
۱۷/۵	آغاجاری	هرزروی گل، تنگی چاه
	میشان	هرزروی گل
۱۲/۲۵	گچساران	تنگی چاه به دلیل حضور نمک
	پوش‌سنگ	هرزروی گل
۸/۵	آسماری	هرزروی گل، حضور گاز

بررسی گزارش‌های روزانه عملیات حفاری نشان داد که می‌توان عوامل افزایش زمان‌های غیرمولد حفاری در چاه مورد مطالعه را در دو گروه عوامل مرتبط با ساختارهای زمین و عوامل مرتبط با تجهیزات دکل و شرکت حفاری تقسیم‌بندی کرد.

بخش اول مشکلات مربوط به ساختارهای زمین شامل مواجهه با زون‌های شکستگی با پتانسیل هرزروی کم تا زیاد در سازندهای آغاجاری، گچساران و آسماری بوده است. بخش دوم مشکلات شامل برخورد با زون‌های پرمخاطره در فاصله عمقی ۱۴۰۴ تا ۱۵۹۰ متری بوده که در واقع به اختلاف بین عمق پیش‌بینی‌شده و واقعی سرسازند آسماری مرتبط می‌شود. این زون علاوه بر شدت هرزروی بالا، به دلیل پیچیدگی ساختاری حاوی گاز نیز بوده است. در عمق ۱۴۴۹ متر، پس از پیاده‌سازی اقدامات متعدد و کنترل فشار چاه، به دلیل شدت بالای هرزروی، سیمانکاری انجام شده است که در مجموع ۱۳۰ ساعت (کنترل چاه، گردش گل، سیمانکاری، راندن و بالاکشیدن‌های تجهیزات مرتبط، بازحفاری سیمان، انتظار برای سخت شدن سیمان) به طول انجامیده است. در ادامه شدت بالای هرزروی محدوده ۱۵۰۰ متری، پس از ۷ مرحله اجرای اقدامات (شامل تزریق بیش از ۵۰۰ بشکه مواد جلوگیری هرزروی متنوع) کنترل شد که ۷ ساعت برای آن صرف شده است. نکته قابل توجه در حفاری این چاه، علاوه بر عملکرد گسل، بالا آمدن نمک در زون ۷ آسماری بوده است. با این وجود نوع و وزن گل استفاده شده در حفاری متراژ ۲۰۲۰ تا ۲۱۶۰ مناسب بوده و مشکلات شسته شدگی حفره رخ نداده است. بنابراین می‌توان خصوصیات گل مورد استفاده در این چاه را برای زون ۷ آسماری که حاوی نمک باشد پیشنهاد داد. به‌طور کلی در این چاه ۲۳۰ ساعت صرف رفع مشکلات مرتبط با ساختارهای زمین شده است. در جدول (۲) ارتباط بین مشکلات حفاری با عدم قطعیت مربوط به تفسیرهای ساختاری ارائه شده است. بر این اساس، سهم قابل توجهی از مشکلات حفاری در مخزن آسماری رخ داده است. در شکل (۵) نقشه عمقی مشکلات حفاری مرتبط با ساختارهای زمین در مسیر حفاری ارائه شده است.

جدول (۲). مشکلات حفاری مرتبط با عدم قطعیت ساختارهای زمین

ساختار	پوش سنگ	مخزن آسماری	زون ۷ آسماری
اختلاف نسبت به پیش بینی	۱۸۳ متر بالاتر ۳ متر نازک‌تر	۱۸۳ متر بالاتر ۵۴ متر نازک‌تر	۲۴۰ متر بالاتر
مشکل حفاری مرتبط	بدون مشکل	هرزروی شدید، وجود گاز و افزایش حجم گل	هرزروی و افزایش حجم گل



شکل (۵). نقشه مشکلات مرتبط با ساختارهای زمین در چاه مورد مطالعه

در موارد برخورد با زون‌های با پتانسیل هرزروی شدید، علاوه بر مدت زمان لازم برای کنترل هرزروی، چالش‌های دیگری نیز عملیات حفاری را دچار خسارت می‌کند. در ادامه به مهم‌ترین این موارد اشاره شده است؛

- افزایش احتمال خرابی پمپ‌های تزریق،
- نیاز به مواد جلوگیری هرزروی (LCM)،
- نیاز به گل و سایر افزایه‌ها (مانند کلسیم کلرید)،
- احتمال گیر رشته و از دست رفتن تجهیزات،

از اینرو می‌توان افزایش زمان‌های غیرمولد حفاری را نیز تا حدی ناشی از مشکلات ساختاری دانست.

نگاهی به جزئیات عملیات حفاری نشان داد که بخش عمده علل وقوع زمان‌های غیرمولد ایجاد شده در این چاه در نتیجه برخورد با زون‌های هرزروی حاصل شده است. به بیان دیگر، تأثیر ساختارهای زمین در بروز مشکلات حفاری را می‌توان هم به صورت مستقیم و هم به‌صورت غیرمستقیم در نظر گرفت.

بنابراین با توجه به میزان اثرگذاری ساختارهای زمین در افزایش زمان و هزینه‌های عملیات حفاری، اتخاذ تدابیری برای جلوگیری از بروز این چالش‌ها (لزوم آمادگی از نظر حجم مواد و تجهیزات اضافی احتمالی) و استفاده از تجربیات مقابله با این مشکلات بسیار حائز اهمیت است. از اینرو در ادامه راهکارهای عملیاتی تجربه شده در مقابل هریک از این مشکلات برای فراهم کردن استفاده در شرایط مشابه پروژه‌های آتی ارائه شده است.

۳-۳. طبقه‌بندی راهکارهای عملیاتی

به‌طورکلی استفاده از راهکارهای اجرا شده برای مجموعه متنوعی از چالش‌ها با منشأ اثرها و تأثیرگذاری‌های مختلف، نیازمند طبقه‌بندی منسجم و جامع است که علاوه بر کمک به درک هر چه بهتر تنوع موجود، استفاده از هریک از دسته راهکارها را تسهیل نماید. بر اساس آنچه که در بیان مشکلات و راهکارهای پیاده سازی شده چاه مورد مطالعه اشاره شد، مجموع این راهکارها مطابق آنچه در شکل (۶) نشان داده شده است، در قالب ۴ دسته راهکارهای مکمل ارائه شده است. در ادامه به تشریح هریک از این راهکارها پرداخته شده است.

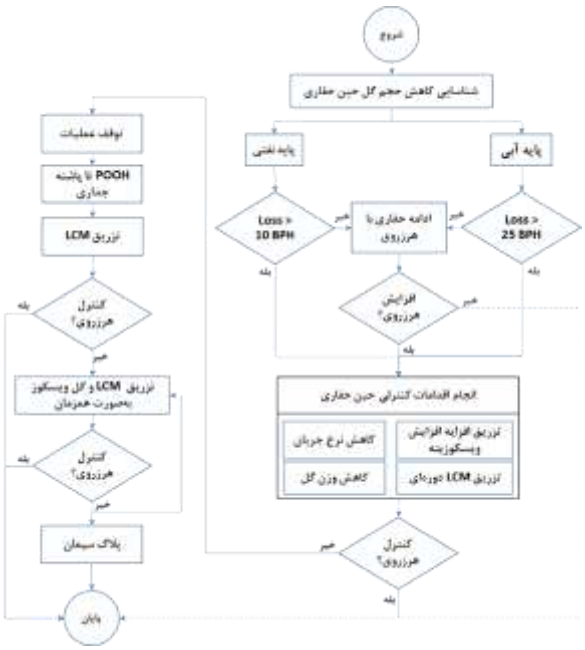
شکل (۶). مجموعه راهکارهای ارائه شده در این تحقیق

۳-۳-۱. راهکارهای مسئله محور

در چاه مورد مطالعه، مجموعه اقداماتی به محض برخورد با مشکلات هرزروی، تنگی چاه و افزایش فشار چاه (افزایش حجم گل) به‌صورت مرحله به مرحله اجرا شده و با موفقیت منجر به رفع مشکل شده است. بنابراین در مجموعه راهکارهای عملیاتی "مسئله محور" مراحل و فرایند اقدامات در مواجهه با هریک از این مشکلات ارائه شده است.

برای کنترل هرزروی در شرایط وجود شکستگی‌های طبیعی و شکست سازند تحت فشار گل روند مطابق شکل (۷) با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است؛

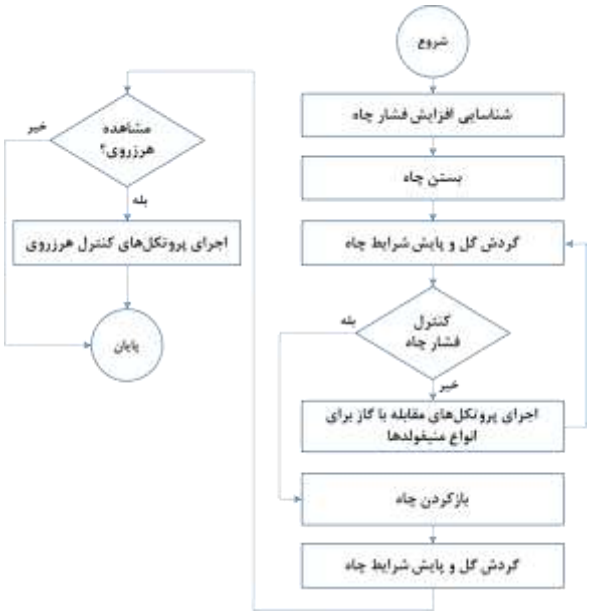
- مرحله ۱: حفاری با هرزروی در زون‌های دارای شدت هرزروی کمتر از ۵ بشکه در ساعت،
- مرحله ۲: کاهش نرخ جریان گل حین حفاری و گردش گل با ویسکوزیته بالا،
- مرحله ۳: کاهش وزن گل حین حفاری تا درصورت عبور از فشار شکست دیواره، هرزروی کنترل شود،
- مرحله ۴: تزریق افزایه‌های افزایش ویسکوزیته،
- مرحله ۵: تزریق LCM حین حفاری به‌صورت دوره‌ای در زون‌های دارای شدت هرزروی بیشتر از ۱۰ بشکه در ساعت،
- مرحله ۶: توقف عملیات، بالاکشیدن (POOH) رشته حفاری تا پاشنه جداری و تزریق LCM در زون‌های دارای شدت هرزروی بیش از ۲۰ بشکه تا هرزروی کامل،
- مرحله ۷: تزریق همزمان LCM و گل با ویسکوزیته بالا در صورت عدم کنترل هرزروی شدید،
- مرحله ۸: سیمانکاری در صورت عدم توفیق در کنترل زون هرزروی با LCM و گل با ویسکوزیته بالا.



شکل (۷). روندنمای راهکار عملیاتی هرزروی گل

افزایش فشار چاه در نواحی گسلیده و جابجا شده به دلیل افزایش احتمال مهاجرت گاز و برخورد با گازهای محبوس (Gas Cap) یکی از چالش‌های اساسی در عملیات حفاری است. دلیل اصلی افزایش فشار در چاه مورد مطالعه، به نحوی مرتبط با وجود شکستگی‌های طبیعی و هرزروی‌های شدید بوده است به‌نحوی‌که در محدوده هرزروی‌های شدید ابتدای مخزن، مدیرعملیات بدون مشورت با واحد فنی و مهندسی به‌منظور مقابله با آن اقدام به کاهش وزن گل به مقدار ۳ الی ۴ (pcf) کرده است. این اقدام منجر به هجوم سیال حفاری به درون چاه شده است. در ادامه با توجه به عدم امکان کنترل هرزروی در این محدوده، گذرگاه انحرافی (Shear rams) حفر شده که منجر به از دست رفتن کل لوله‌های حفاری به همراه مته و تجهیزات درون‌چاهی (BHA) شده است. در ادامه عملیات مانده‌یابی (Fish) و فرز کردن (Milling) منجر به افزایش زمان حفاری این چاه شده است. در شکل (۸)، فرایند پیشنهادی برای مواجهه با شرایط افزایش فشار چاه (مشاهده گاز) و حجم گل ارائه شده است. به‌طورکلی مراحل زیر در چاه مورد مطالعه برای مقابله با افزایش حجم گل و فشار چاه انجام شده است؛

- مرحله ۱: بستن چاه و گردش گل به‌منظور پایش شرایط چاه (Well control)،
- مرحله ۲: اجرای پروتکل‌های مقابله با گاز و افزایش فشار چاه و پایش شرایط چاه،
- مرحله ۳: کنترل فشار چاه،
- مرحله ۴: بازکردن چاه و گردش گل به منظور بررسی وضعیت چاه،
- مرحله ۵: تزریق گل با افزایه‌های افزایش ویسکوزیته،
- مرحله ۶: تزریق LCM مناسب در دو تا سه مرحله،
- مرحله ۷: سیمانکاری در صورت عدم توفیق در کنترل زون هرزروی.



شکل (۸). روندنمای راهکار عملیاتی افزایش فشار چاه

مشکل تنگی چاه به دلیل حضور میان‌لایه‌های نمکی یکی دیگر از چالش‌های عملیات حفاری در چاه مورد مطالعه بوده است. باتوجه به اینکه سازند گچساران یکی از مهم‌ترین ساختارهای فروافتادگی دزفول است و در غالب میادین این حوزه وجود دارد، استفاده از این راهکار می‌تواند در سایر میادین نیز کاربردی باشد. در شکل (۹) روند راهکار عملیاتی تنگی چاه نشان داده شده است. به‌طورکلی مراحل زیر به ترتیب اجرا شده است؛

- مرحله ۱: گردش گل برای هموارسازی مقطع،
- مرحله ۲: افزایش وزن و گردش گل برای جلوگیری از همگرایی،
- مرحله ۳: استفاده از تراش و تراش معکوش با شستشو با نیروی چرخشی ملایم (تراش نرم)،
- مرحله ۴: استفاده از تراش و تراش معکوش با شستشو با نیروی چرخشی زیاد (تراش سخت)،

شکل (۹). روندنمای راهکار عملیاتی تنگی چاه

۳-۳-۲. راهکارهای نتیجه محور

این دسته از راهکارها شامل ارائه مقادیری از خصوصیات گل و مواد جلوگیری از هرزروی با بهترین تجربه عملیاتی است. در جدول (۳) خصوصیات گل حفاری برای حفره‌ها و سازندهای مختلف ارائه شده است.

جدول (۳). خصوصیات گل پیشنهادی بر اساس بهترین تجربیات حفاری در سازندهای مختلف

	واحد	آغاجاری		گچساران و پوش‌سنگ	آسماری
حفره	Inch	۲۶	۱۷/۵	۱۲/۲۵	۸/۵
نوع گل	-	PB	PB/SP	SP	SP
وزن گل	PCF	۶۷	۶۸	۱۰۰-۱۰۳	۸۶
PH	-	۹/۹	۱۰	۹/۳	۱۰/۶
VIS	S	۳۹	۳۸	۴۰	۴۰
Ca++	g/l	۱/۱	۱	۱۸۸	۱۸۸
Cl-	g/l	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۱	۰/۸۸

همچنین یکی دیگر از موارد قابل استخراج از عملیات حفاری، خصوصیات مواد جلوگیری هرزروی به‌کار رفته است. در این خصوص دو نکته حائز اهمیت وجود دارد. نخست شدت هرزوری و دومین نکته ترکیب مواد است.

در جدول (۴) بهترین ترکیب خصوصیات مواد جلوگیری هرزروی بر اساس چهار شدت مختلف هرزروی از کم تا هرزروی کامل برای مخزن آسماری ارائه شده است.

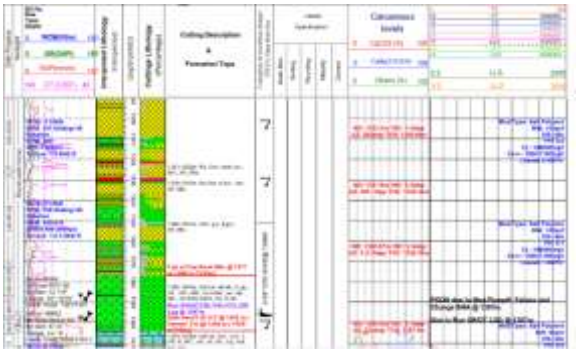
جدول (۴). ترکیب پیشنهادی برای مواد جلوگیری هرزروی برای سازند آسماری بر اساس شدت هرزروی

شدت هرزروی	ترکیب مواد جلوگیری هرزروی
۰ تا ۲۰ BPH	15 PPB Oyster Shell (10 #F, 5 #M)
	60 PPB Shell Fish (30 #M, 30 #F)
۲۰ تا ۱۰۰ BPH	20 PPB Oyster Shell (20 #F)
	50 PPB Shell Fish (20 #C, 15 #M, 15 #F)
بیشتر از ۱۰۰ BPH	100 PPB Oyster Shell (20 #F, 40 #M, 40 #C)
عدم بازگشت گل	70 PPB Oyster Shell (20 #C, 30 #M, 20 #F)

۳-۳-۳. راهکارهای زمین‌شناسی محور

راهکارهای عملیاتی زمین‌شناسی محور شامل شناسایی لایه‌ها حین عملیات حفاری بر اساس کنده‌های حفاری و نیز پارامترهای حفاری به‌خصوص گشتاور است. از آنجا که برطرف کردن کامل عدم قطعیت‌ها در مورد ساختارهای زمین ممکن نیست، بنابراین یکی از مهم‌ترین راهکارها برای جلوگیری از بروز مشکلات مرتبط با این مسأله، استفاده از نشانه‌هایی در حین عملیات حفاری است که معرف نزدیک شدن به ساختارهای خاصی مانند پوش‌سنگ باشد. به‌طورکلی توالی‌های شیل، انیدریت و نمک را می‌توان نشانه‌های قوی نزدیک بودن به پوش‌سنگ و مخزن در نظر گرفت. همچنین نکته مکمل این امر، افزایش گشتاور حفاری به صورت متناوب است که نشان از برخورد با توالی انیدریت و شیل و یا سایر لیتولوژی‌های ضعیف‌تر است. این راهکار به شیوه‌های مختلف برای میادین مختلف قابل سفارشی سازی است. بر این اساس توالی‌های غالب در نزدیکی پوش‌سنگ شناسایی شده و بر اساس مشاهده کنده‌های حفاری وسط زمین‌شناس سر دکل گزارش می‌شود تا برنامه عملیات مطابق تغییر عمق قرارگیری پوش‌سنگ و متعاقبا مخزن نسبت به پیش‌بینی‌ها و تمامی تدابیر مهم تعدیل فشار چاه برای ورود به مخزن در نظر گرفته شود.

این راهکار به‌خوبی می‌تواند از بروز مشکلات جدی و بعضا جبران ناپذیری شامل ایجاد مخاطره برای نیروی انسانی سر دکل ناشی از فوران چاه و همچنین از دست رفتن کامل چاه جلوگیری کند. در شکل (۱۰) توالی سنگ‌شناسی در بخش انتهایی سازند گچساران (حاوی نمک و توالی‌های انیدریت و شیل)، پوش‌سنگ و مخزن آسماری نشان داده شده است.



شکل (۱۰). پروفیل سنگ‌شناسی چاه مورد مطالعه در محدوده سازندهای گچساران، پوش‌سنگ و آسماری

۳-۲-۴. راهکارهای ساختار محور

رویکردی دیگر در ارائه راهکارهای عملیاتی چاه مورد مطالعه در این تحقیق، رویکرد مبتنی بر ساختارهای زمین است. اقدامات پشنهادی در دو سطح مدیریتی و فنی قبل از انجام عملیات حفاری هر چاه جدید به شرط شناخت از ساختار مسیر حفاری مطابق جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵). اقدامات پیشنهادی قبل از انجام عملیات حفاری چاه جدید بر اساس ساختار زمین مشابه چاه مورد مطالعه

ساختار	اقدامات مدیریتی	اقدامات فنی
گسل معکوس (راندگی) در مخزن کربناته آسماری	• آموزش نیروی انسانی • مرور پروتکل‌های افزایش فشار چاه • مرور پروتکل‌های کنترل گاز • تأمین پمپ‌های تزریق جایگزین • برنامه‌ریزی تهیه گل و افزایه اضافه • تأمین مواد جلوگیری هرزروی • سیمان و تجهیزات مهار هرزروی	بررسی میزان جابجایی لایه‌ها توسط گسل با استفاده از داده‌های لرزه‌ای

از سویی دیگر همان‌طور که اشاره شد ممکن است در حین عملیات حفاری، اختلافی بین عمق پیش‌بینی شده لایه‌ها با واقعیت مشاهده شود. بیشترین مخاطره در این خصوص مربوط به شرایطی است که پوش‌سنگ و مخزن کم عمق‌تر از عمق پیش‌بینی شده باشد. بر این اساس متناسب با هریک از شرایط زیر از پس از توقف عملیات، اقدامات پیشنهادی جدول (۵) در دستور کار قرار گرفته و از راهکارهای نتیجه‌محور استفاده شود.

- در شرایط لایه‌بندی نرمال: احتمال وجود زون‌های هرزروی شدید در پوش‌سنگ وجود دارد.
- در شرایط وجود گسل معکوس: احتمال وجود زون‌های هرزروی شدید در مخزن وجود دارد.
- در شرایط وجود گسل راندگی: احتمال وجود زون‌های هرزروی شدید در پوش‌سنگ و بخش ابتدایی مخزن وجود دارد.

۴. نتیجه گیری

تحقیق کنونی با هدف بررسی نقش ساختارهای زمین همچون گسل در بروز مشکلات حفاری تعریف شد تا راهکارهایی که در مقابله با هر مشکل استفاده شده است، برای پروژه‌های دیگر پیشنهاد شود. بررسی کیفیت داده‌های لرزه‌ای نشان داد که تفسیر داده‌های لرزه‌ای دوبعدی و سه‌بعدی با عدم قطعیت‌های قابل توجهی برای تعیین عمق سازندهای گچساران، پوش‌سنگ و آسماری همراه بوده است.

برای بررسی نقش این عدم قطعیت‌ها در بروز مشکلات حفاری چاه مورد مطالعه، اطلاعات حفاری و زمین‌شناسی چاه به دقت بررسی شد. مجموع عملیات حفاری این چاه ۲۸۷ روز به طول انجامیده است. حدود ۴۹ درصد کل زمان‌های صرف شده در این پروژه مولد، ۴۷ درصد غیر مولد و ۴ درصد سهم زمان‌های غیربرنامه‌ای بوده است. به‌طور کلی در این چاه از مهم‌ترین مشکلات مربوط به ساختارهای زمین می‌توان به هرزروی گل، افزایش فشار چاه و تنگی چاه اشاره کرد که در مجموع مدت‌زمان ۲۳۰ ساعت صرف رفع آن شده است. از این میان ۷۵ درصد کل زمان‌های رفع مشکلات مرتبط با ساختارهای زمین و همچنین حجم قابل توجهی از مواد جلوگیری هرزروی (LCM) در محدوده عدم قطعیت عمق پوش‌سنگ و مخزن بوده است. دلیل اصلی افزایش فشار چاه نیز به نحوی مرتبط با وجود شکستگی‌های طبیعی و هرزروی‌های شدید بوده است. در این چاه در محدوده بروز هرزروی‌های شدید ابتدای زون مخزنی، مدیرعملیات بدون مشورت با واحد فنی و مهندسی به‌منظور مقابله با آن اقدام به کاهش وزن گل به مقدار ۳ الی ۴ پوند بر فوت مکعب (pcf) کرده است. این اقدام منجر به هجوم سیال حفاری به درون چاه شده است. در ادامه با توجه به عدم امکان کنترل هرزروی در این محدوده، گذرگاه انحرافی (Shear rams) حفر شده که منجر به از دست رفتن کل لوله‌های حفاری به همراه مته و تجهیزات درون‌چاهی (BHA) شده است. در ادامه عملیات مانده‌یابی (Fish) و فرز کردن (Milling) منجر به افزایش زمان حفاری این چاه شده است. با توجه به مشابه بودن این الگوی ساختاری مخزن با شرایط اغلب میادین نفتی فروافتادگی دزفول، راهکارهای عملیاتی این مشکل به‌صورت مسئله محور، نتیجه محور، زمین‌شناسی محور و ساختار محور برای به‌کارگیری در شرایط مشابه سایر پروژه‌ها ارائه شده است.

۵. مراجع

[1] S. Carruba, CR. Perotti, R. Buonaguro, R. Calabro, R Carpi, M. Naini, “Structural pattern of the Zagros foldand- thrust belt in the Dezful Embayment (SW Iran): Styles of continental contraction”, Geological Society of America Special Paper, 414: 11–32, 2006.

[2] A. Shamszadeh, A. Alavi, M. Valinejad, M. Tavakoli Baraki, "Folding style and structural complications in the central Lorestan sub-zone (a case study of one of the oil fields in the region)", Scientific and Promotional Monthly of Exploration and Oil and gas production, number 144, 2015.

[3] MA. Ganjovian, S. Shahriari, A. Yasaghi, "Kinetic analysis of folding in the sacred structures of Inner Fars region", Journal of Geosciences, No. 71, pp. 91-96, 2018.

[4] H. Matiei, "Geology of Zagros oil", Publications of the Geological Organization of the country, 1375, Volume 1, 589, 1996.

[5] H. Karimnejad, T. Sepehr, H. Talebi, AR. Mursel Nejad, "Structural complications and hydrocarbon potential of Izeh zone, Zagros thrust-folded belt", Exploration and Production Monthly, No. 93, 2013.

[6] A. Abdullahi Fard, S. Zabihi, A. Miri, H. Motamedi, "A new approach in oil exploration of Zagros pre-well basin (Abadan plain-southwest of Iran)", Journal of the Society of Geology and Structural Geology of Iran, 2014.

[7] A. Zainelzadeh, R. Harami, A. Mehboobi, "Investigation of the oil generation process of Khazdami source rock in the area of feeding area of Darkhoin field in Dasht Abadan", Oil Research, No. 99, pp. 46-58, 2017.

[8] E. Farahzadi, SA. Alavi, S. Sherkati, "Variation of subsidence in the Dezful Embayment, SW Iran: influence of reactivated basement structures". Arab J Geosci 12, 616. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4758-5, 2019.

[9] M. Vatandoust, A. Faghih, CM. Burberry, G. Shafiei, "Structural style and kinematic analysis of folding in the southern Dezful Embayment oilfields, SW Iran", Journal of Structural Geology, 134, 103989, 2020.

[10] Y. Jalili, A. Yassaghi, MM. Khatib, A. Golalzadeh, "Effect of transverse faults on fracture characteristics and borehole instability in the Asmari reservoir of Zagros folded belt zone, Iran", Journal of Petroleum Science and Engineering, doi: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106820, 2020.

[11] GH. Asgari1, F. Ghaemi, B. Soleimany, B. Rahimi, M. Maleki, "Determine folding mechanism of Lali structure, northern Dezful, Zagros, Iran", Iranian Journal of Earth Science, 11, 113-127, 2019.

[12] H. Talebi, SA. Alavi, S. Sherkati, MR. Ghassemi, A. Golalzadeh, "In-situ stress regime in the Asmari reservoir of the Zeloi and Lali oil fields, northwest of the Dezful embayment in Zagros fold-thrust belt, Iran", Geoscience, 27(106), 53-68, 2018.

[13] H. Talebi, H. Narimani, "Structural relationship of Ziloui, Lali and Karun anticlines". Technical report of the National Company of Southern Oil-bearing Regions, 2018.

[14] N. Kianizadeh, B. Zamani, A. Kodkhodaei, H. Talebi, "Structural modeling and estimation of tectonic stresses of Lali oil field in Dezful subsidence", Scientific-Research Journal of Petroleum Geology of Iran, 2016.

[15] E. Hosseini, J. Neshat Ghojogh, B. Habibnia, "Study of Faults in Asmari Formation by FMI Image Log, Case Study: Lali Oilfield", American Journal of Oil and Chemical Technologies, 3(5).125, 2015.

[16] C. Brandes, DC. Tanner, "Fault-related folding: A review of kinematic models and their application". Earth-Science Reviews, 138,
352-370, 2014.

[17] H. hosseininik, "Knowledge-Based in the Development of Oil, Gas and Petrochemical Industries". Construction science and technology, 1(3), 9-19. 2020.

[18] S. rostami, "Optimizing well placement via metaheuristic algorithms (case study: Shadegan fields)". Construction science and technology, 2(1), 55-69. 2021.

[19] V. Keshavarz, M. Nazari Sarem, "Drilling optimization in Maroon and Ramin oil fields using mathematical models". Construction science and technology, 2(2), 49-55, 2021.

[20] S. Majidzadeh, M. Khorsand, "The Investigation of Feasibility Study of Water/Gas-Based Enhanced Oil Recovery (EOR) Methods in one of the Bangestan Reservoirs of Oil Fields in the South of the Country'. Construction science and technology, 2(3), 61-76, 2021.

[21] A. Hafezy, M. Esmaeilzadeh, "Identification of alterations and geological structures related to hydrothermal deposits using various satellite image processing techniques (Case study: Northeast of Maku-Tabriz geological zone)". Construction science and technology, 3(3), 1-14, 2022.