

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی نفت گرایش حفاری و بهره‌برداری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

## بررسی ژئومکانیکی یکی از میادین مناطق نفت خیز جنوب جهت تعیین چاه‌های کандید انجام شکاف هیدرولیکی در سازندهای گروه بنگستان

نگارنده: حامد امیری

استاد راهنما

دکتر احمد رمضان‌زاده

استاد مشاور صنعتی

مهندس محمدرضا پرهیزگار

شهریور ۱۳۹۵

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌اش از کلمه ایثار  
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین  
روزگاران بهترین پشتیبان است  
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در  
پناهشان به شجاعت می‌گراید  
و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند  
این تحقیق را به مادر عزیزتر از جانم و پدر مهربانم تقدیم می‌کنم.

## تشکر و قدردانی

حال که نگارش این پایان نامه به اتمام رسیده بر خود لازم می دانم که از زحمات جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده به عنوان استاد راهنما که در طول مراحل اجرای پایان نامه همواره با راهنمایی های مؤثر خود روشنگر مسیر بودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از جناب آقای مهندس محمدرضا پرهیزگار کارشناس شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب که به عنوان مشاور صنعتی نقش بسیار پر رنگی در اخذ داده های مورد نیاز جهت اجرای پایان نامه داشته اند نیز تقدیر و تشکر به عمل آورم.

این تحقیق با همکاری شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب انجام شده است. ضروری است تا از مدیریت محترم واحد پژوهش و فناوری این شرکت و نیز کارگروه ژئومکانیک به دلیل هماهنگی های به عمل آمده در تعریف پروژه و در اختیار قرار دادن داده های مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی به عمل آید.



## تعهدنامه

اینجانب حامد امیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت- حفاری و بهره‌برداری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی ژئومکانیکی یکی از میادین مناطق نفت‌خیز جنوب جهت تعیین چاه‌های کاندید انجام شکاف هیدرولیکی در سازندهای گروه بنگستان تحت راهنمایی جناب آقای دکتر رمضانزاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته و یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

اصطلاح شکاف هیدرولیکی بیانگر فرآیند شروع و گسترش شکستگی در سنگ، ناشی از فشار هیدرولیکی اعمال شده توسط سیال است. انرژی مخازن متعارف هیدروکربوری دیر یا زود به اتمام می‌رسد و این درحالی است که تنها در حدود ۳۰ درصد نفت برجا در مرحله اولیه برداشت می‌شود. ازدیاد برداشت و بهبود ضریب بازیافت از مخازن با استفاده از شکاف هیدرولیکی یکی از مؤثرترین راه‌ها برای تولید بهینه است.

انتخاب چاه و لایه کاندید نقش بسزایی در اثربخشی عملیات شکاف هیدرولیکی دارد. به طور کلی هدف از انتخاب کاندید، انتخاب یک یا گروهی از چاه‌ها و یا زون‌ها برای عملیات است که بیشترین احتمال موفقیت را دارند. تحقیقات نشان داده که اگر انتخاب چاه و لایه کاندید به خوبی انجام شود، افزایش تولید، مخصوصاً در چاه‌هایی که ضریب پوسته بالا و تراوایی کمی دارند می‌تواند چشم‌گیر باشد. بیشتر مخازن کربناته دارای تراوایی کم هستند، بنابراین تنها در صورتی که به طور هیدرولیکی شکاف‌زنی شوند قادرند به صورت اقتصادی تولید کنند.

در این تحقیق مخزن بنگستان در سه چاه از میدان نفتی اهواز مورد مطالعه قرار گرفتند تا لایه و چاه کاندید برای عملیات شکاف‌زنی در سازندهای ایلام و سروک در این میدان انتخاب شود. بدین منظور ابتدا با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی، آزمون‌های درون‌چاهی و نگارهای تصویری مدل ژئومکانیکی یک بعدی در این چاه‌ها ساخته شد.

مشکل اصلی در ساخت مدل ژئومکانیکی در این چاه‌ها این بود که موج برشی تنها در یکی از چاه‌ها موجود بود. برای تخمین این پارامتر در چاه‌های دیگر از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد. محققان بسیاری از این روش برای تخمین موج برشی استفاده کرده‌اند و نتایج به دست آمده حاکی از دقت قابل قبول این روش در تخمین موج برشی است. از مزایای این روش نسبت به رگرسیون ساده، دقت بیشتر و خلاصه کردن حجم بیشتری از اطلاعات است. علاوه بر این رگرسیون چند متغیره امکان بررسی اثر هر یک از پارامترهای ورودی را بر روی موج برشی را فراهم می‌کند.

پس از ساخت مدل ژئومکانیکی در چاه‌های مورد نظر با بررسی نتایج به دست آمده و همچنین با مطالعه تحقیقات قبلی صورت گرفته در رابطه با انتخاب چاه و لایه کاندید در مخازن کربناته ایران، معیارهایی برای ارزیابی لایه‌های موجود در سازندهای ایلام و سروک معرفی شد. این معیارها برای سازند سروک عبارتند

از شاخص شکاف‌پذیری کل، محدودسازی شکاف در لایه، ضخامت لایه و شاخص شکاف‌های طبیعی. در سازند ایلام به دلیل نبود نگار تصویری، شاخص شکاف‌های طبیعی جزء معیارهای ارزیابی نبود. شاخص شکاف‌پذیری نشان می‌دهد که شکاف‌زنی هیدرولیکی در یک لایه خاص چقدر می‌تواند مؤثر باشد. در این تحقیق با توجه به داده‌های موجود و همچنین مطالعات قبلی انجام شده در مخازن کربناته ایران، رابطه‌ای برای ارزیابی شاخص شکاف‌پذیری در مخزن بنگستان میدان اهواز ارائه شده است. این شاخص تابعی از تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی، مدول یانگ، شکنندگی و زاویه اصطکاک داخلی است و می‌توان از آن در سایر مخازن کربناته ایران نیز استفاده کرد.

در نهایت معیارهای گفته شده با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در سازندهای ایلام و سروک مورد ارزیابی قرار گرفت و لایه‌ها و چاه‌های کاندید برای انجام عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی انتخاب شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در سازند ایلام به ترتیب لایه C1 در چاه ۳۹۷، لایه C1 در چاه ۳۶۸ و لایه C2 در چاه ۳۹۷ و در سازند سروک لایه‌های E2 و E1 در چاه ۳۹۷ مناسب‌ترین کاندیدها برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی هستند.

#### واژه‌های کلیدی:

شکاف هیدرولیکی، مدل‌سازی ژئومکانیکی، انتخاب چاه و لایه کاندید، شاخص شکاف‌پذیری.

## فهرست عناوین

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ اهداف تحقیق.....	۲
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۴-۱ روش تحقیق.....	۳
۵-۱ ساختار پایان نامه.....	۴
فصل دوم: عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش ترک در فرآیند شکاف هیدرولیکی.....	۵
۱-۲ مقدمه.....	۶
۲-۲ سابقه شکاف هیدرولیکی.....	۶
۳-۲ نحوه انجام شکاف هیدرولیکی.....	۷
۴-۲ مکانیزم شکاف هیدرولیکی.....	۹
۱-۴-۲ شرایط برای شکست کششی.....	۱۰
۲-۴-۲ ایجاد شکاف و شکست سازند.....	۱۰
۵-۲ جهت گیری، رشد و محدودسازی شکاف.....	۱۳
۶-۲ تعیین تنش برجا.....	۱۷
۱-۶-۲ تست پمپاژ/ بستن.....	۱۹
۲-۶-۲ تست پمپاژ/ برگشت جریان.....	۲۰
۳-۶-۲ تست تزریق مرحله‌ای (SRT).....	۲۳

۲۵.....	۴-۶-۲ تست‌های ریزشکاف.....
۲۸.....	۷-۲ مدل‌های هندسی شکاف هیدرولیکی.....
۲۸.....	۱-۷-۲ مدل PKN.....
۳۱.....	۲-۷-۲ مدل KGD.....
۳۲.....	۳-۷-۲ مدل‌های شبه سه بعدی (P3D).....
۳۳.....	۴-۷-۲ مدل‌های سه‌بعدی کامل.....
۳۴.....	۸-۲ طول شکاف بهینه.....
۳۷.....	۹-۲ روش‌های نگاشت مستقیم شکاف هیدرولیکی.....
۳۸.....	۱-۹-۲ شیب‌سنج‌ها.....
۴۰.....	۲-۹-۲ نگاشت میکرولرزه‌ای.....
۴۱.....	۱۰-۲ جمع‌بندی.....
۴۳.....	فصل سوم: مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه‌ها در میدان اهواز.....
۴۴.....	۱-۳ مقدمه.....
۴۴.....	۲-۳ میدان نفتی اهواز.....
۴۸.....	۳-۳ تخمین موج برشی.....
۵۰.....	۱-۳-۳ نگاشت خودسازمان‌ده (SOM).....
۵۳.....	۲-۳-۳ رگرسیون چندگانه.....
۵۵.....	۳-۳-۳ بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO).....
۵۷.....	۴-۳-۳ تخمین موج برشی در چاه‌ها.....
۷۶.....	۴-۳ ساخت مدل ژئومکانیکی.....
۷۶.....	۱-۴-۳ پارامترهای الاستیک سنگ.....
۷۷.....	۲-۴-۳ تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی.....
۷۹.....	۳-۴-۳ پارامترهای مقاومتی سنگ.....

۹۵	۳-۴-۴ فشار منفذی.....
۹۶	۳-۴-۵ تنش‌های برجا.....
۱۰۱	۳-۴-۶ معیار شکست.....
۱۰۴	۳-۴-۷ تنش‌های برجا در چاه‌های مورد مطالعه.....
۱۱۹	۳-۵ جمع‌بندی.....
۱۲۱	فصل چهارم: انتخاب چاه و لایهٔ کاندید برای عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی.....
۱۲۲	۴-۱ مقدمه.....
۱۲۳	۴-۲ اهمیت انتخاب چاه و لایهٔ کاندید.....
۱۲۴	۴-۳ پیشینه مطالعات.....
۱۲۵	۴-۳-۱ مطالعات انجام شده در دنیا.....
۱۲۷	۴-۳-۲ مطالعات انجام شده در میادین کشور.....
۱۲۸	۴-۳-۳ شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی.....
۱۳۲	۴-۴ انتخاب چاه و لایهٔ کاندید در میدان نفتی اهواز.....
۱۳۳	۴-۴-۱ معیارهای انتخاب کاندید.....
۱۳۴	۴-۴-۲ شاخص شکاف‌پذیری کل.....
۱۳۶	۴-۴-۳ تحلیل سلسله مراتبی (AHP).....
۱۳۸	۴-۴-۴ انتخاب چاه و لایهٔ کاندید در سازند ایلام.....
۱۴۴	۴-۴-۵ انتخاب چاه و لایه کاندید در سازند سروک.....
۱۶۰	۴-۵ جمع‌بندی.....
۱۶۱	فصل پنجم: جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها.....
۱۶۲	۵-۱ جمع‌بندی مطالب پایان‌نامه.....
۱۶۵	۵-۲ پیشنهادها.....
۱۶۷	مراجع.....

## فهرست شکل‌ها

### صفحه

- شکل ۱-۲ شکاف عمودی در اطراف یک چاه قائم ..... ۹
- شکل ۲-۲ فشار در یک چاه قائم در حین عملیات شکاف هیدرولیکی ..... ۱۲
- شکل ۳-۲ فشار واقعی در یک چاه قائم در حین عملیات شکاف هیدرولیکی ..... ۱۲
- شکل ۴-۲ جهت‌گیری‌های مختلف شکاف، شکاف موازی با چاه و شکاف عمود بر چاه ..... ۱۴
- شکل ۵-۲ محدودسازی یک شکاف در بین لایه‌هایی با تنش بیشتر ..... ۱۵
- شکل ۶-۲ نمودار لگاریتمی فشار خالص شکاف‌زنی در برابر زمان ..... ۱۷
- شکل ۷-۲ تعیین فشار آبی و فشار بندش با استفاده از نمودارهای فشار- زمان ..... ۲۰
- شکل ۸-۲ اثر دبی جریان برگشتی بر فشار ..... ۲۲
- شکل ۹-۲ نمودار پیشنهادی جهت تخمین فشار بندش ..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲ تست تزریق مرحله‌ای ..... ۲۳
- شکل ۱۱-۲ آنالیز فشار در برابر دبی در تست تزریق مرحله‌ای ..... ۲۴
- شکل ۱۲-۲ نمودار فشار در مقابل حجم (یا زمان) در تست XLOT ..... ۲۶
- شکل ۱۳-۲ یک تست XLOT معمول که در آن سه چرخه ایجاد فشار انجام شده ..... ۲۷
- شکل ۱۴-۲ مدل PKN ..... ۳۰
- شکل ۱۵-۲ مدل KGD ..... ۳۱
- شکل ۱۶-۲ رشد ارتفاع شکاف همراه با کاهش عرض به دلیل وجود میان‌لایه‌ای با سختی زیاد ..... ۳۳
- شکل ۱۷-۲ حجم تجمعی گاز تولید شده با گذشت زمان برای نیم‌طول‌های مختلف ..... ۳۵
- شکل ۱۸-۲ کاهش تولید گاز با گذشت زمان برای نیم‌طول‌های مختلف ..... ۳۶
- شکل ۱۹-۲ رابطه طول شکاف و تولید تجمعی ..... ۳۶
- شکل ۲۰-۲ تغییرات درآمد و هزینه نسبت به طول بهینه شکاف ..... ۳۷
- شکل ۲۱-۲ روش‌های تشخیص شکاف ..... ۳۸
- شکل ۲۲-۲ اصول اندازه‌گیری شیب سنج‌ها ..... ۳۹
- شکل ۲۳-۲ ابعاد واقعی و ابعاد تخمین زده شده با استفاده از شیب‌سنج درون‌چاهی ..... ۴۰
- شکل ۲۴-۲ نگاشت شکاف هیدرولیکی با استفاده از میکرو لرزه ..... ۴۱
- شکل ۱-۳ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی اهواز ..... ۴۵
- شکل ۲-۳ میزان تولید روزانه در چاه‌هایی که بیشتر از ۲۱۰۰ بشکه در روز در مخزن بنگستان میدان اهواز تولید دارند ..... ۴۶
- شکل ۳-۳ نقشه هرزروی گل در زون E مخزن بنگستان در میدان اهواز ..... ۴۷
- شکل ۴-۳ نقشه پهنه‌بندی میدان اهواز به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی ..... ۴۸
- شکل ۵-۳ مدلی از یک نگاشت خودسازمانده ..... ۵۱

- شکل ۳-۶ همسایگی مربعی و شش ضلعی ..... ۵۲
- شکل ۳-۷ زمان گذر موج برشی در مقابل زمان گذر موج فشاری در چاه ۴۸۸ ..... ۵۴
- شکل ۳-۸ زمان گذر موج برشی در مقابل نگار تخلخل نوترونی در چاه ۴۸۸ ..... ۵۴
- شکل ۳-۹ زمان گذر موج برشی در مقابل چگالی در چاه ۴۸۸ ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۰ به روز رسانی موقعیت یک ذره در بهینه سازی ازدحام ذرات ..... ۵۷
- شکل ۳-۱۱ موقعیت چاه ۴۸۸ در میدان اهواز ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۲ خوشه بندی داده ها در صفحه DTC-NPHI در قسمت های دارای موج برشی ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۳ خوشه بندی داده ها در صفحه DTC-NPHI چاه ۴۸۸، در قسمت های بدون موج برشی ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۴ خوشه A در چاه ۴۸۸ : الف) در قسمت های دارای موج برشی ب) در قسمت های بدون موج برشی ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۵ خوشه B در چاه ۴۸۸ : الف) در قسمت های دارای موج برشی ب) در قسمت های بدون موج برشی ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۶ خوشه C در چاه ۴۸۸ : الف) در قسمت های دارای موج برشی ب) در قسمت های بدون موج برشی ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۷ زمان گذر موج برشی اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شده به وسیله رگرسیون تک متغیره در چاه ۴۸۸ ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۸ زمان گذر موج برشی اندازه گیری شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده به وسیله رگرسیون چند گانه بدون انجام خوشه بندی در چاه ۴۸۸ ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۹ زمان گذر موج برشی اندازه گیری شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده به وسیله رگرسیون چند گانه و با انجام خوشه بندی در چاه ۴۸۸ ..... ۶۴
- شکل ۳-۲۰ مقایسه بین مقدار موج برشی اندازه گیری شده و پیش بینی شده به وسیله مدل رگرسیون چند گانه با انجام خوشه بندی ..... ۶۴
- شکل ۳-۲۱ الف) توزیع خطای مدل رگرسیون چند گانه ب) خطای نسبی مدل رگرسیون چند گانه ..... ۶۵
- شکل ۳-۲۲ نگارهای پتروفیزیکی و موج برشی تخمین زده شده در چاه ۴۸۸، سازند ایلام ..... ۶۷
- شکل ۳-۲۳ نگارهای پتروفیزیکی و موج برشی تخمین زده شده در چاه ۴۸۸، سازند سروک ..... ۶۸
- شکل ۳-۲۴ موقعیت چاه ۳۶۸ در میدان اهواز ..... ۶۹
- شکل ۳-۲۵ خوشه A در صفحه DTC-NPHI : الف) چاه ۴۸۸ ب) چاه ۳۶۸ ..... ۶۹
- شکل ۳-۲۶ نگارهای صوتی، تخلخل و چگالی در چاه ۳۶۸، سازند ایلام ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۷ نگارهای صوتی، تخلخل و چگالی در چاه ۳۶۸، سازند سروک ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۸ موقعیت چاه ۳۹۷ در میدان اهواز ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۹ خوشه A در صفحه DTC-NPHI : الف) چاه ۴۵۰ ب) چاه ۳۹۷ ..... ۷۳
- شکل ۳-۳۰ موج برشی پیش بینی شده به وسیله رگرسیون تک متغیره در مقابل موج برشی اندازه گیری شده در چاه ۴۵۰ ..... ۷۳
- شکل ۳-۳۱ موج برشی پیش بینی شده با استفاده رگرسیون چند متغیره در خوشه A در مقابل موج برشی اندازه گیری شده در این خوشه در چاه ۴۵۰ ..... ۷۴



- شکل ۳-۳۲ مقایسه نتایج بین مقادیر موج برشی پیش‌بینی شده به وسیله مدل رگرسیون چندگانه و خوشه‌بندی و مقادیر اندازه‌گیری شده..... ۷۴
- شکل ۳-۳۳ نگارهای پتروفیزیکی در چاه ۳۹۷، سازندهای ایلام و سروک..... ۷۵
- شکل ۳-۳۴ ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب..... ۸۱
- شکل ۳-۳۵ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۶۸، سازند ایلام..... ۸۳
- شکل ۳-۳۶ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۶۸، سازند سروک..... ۸۴
- شکل ۳-۳۷ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۹۷، سازند ایلام..... ۸۵
- شکل ۳-۳۸ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۹۷، سازند سروک..... ۸۶
- شکل ۳-۳۹ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۴۸۸، سازند ایلام..... ۸۷
- شکل ۳-۴۰ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۴۸۸، سازند سروک..... ۸۸
- شکل ۳-۴۱ پارامترهای مقاومتی سازند ایلام در چاه ۳۶۸..... ۸۹
- شکل ۳-۴۲ پارامترهای مقاومتی سازند سروک در چاه ۳۶۸..... ۹۰
- شکل ۳-۴۳ پارامترهای مقاومتی سازند ایلام در چاه ۳۹۷..... ۹۱
- شکل ۳-۴۴ پارامترهای مقاومتی سازند سروک در چاه ۳۹۷..... ۹۲
- شکل ۳-۴۵ پارامترهای مقاومتی سازند ایلام در چاه ۴۸۸..... ۹۳
- شکل ۳-۴۶ پارامترهای مقاومتی سازند سروک در چاه ۴۸۸..... ۹۴
- شکل ۳-۴۷ برون‌یابی چگالی تا سطح زمین..... ۹۷
- شکل ۳-۴۸ تنش‌های اصلی اطراف یک چاه قائم تحت شرایط تنش دومی محوره بر اساس معادلات کرش..... ۹۹
- شکل ۳-۴۹ تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای..... ۱۰۰
- شکل ۳-۵۰ شکستگی‌های برشی و کششی در دیواره چاه..... ۱۰۲
- شکل ۳-۵۱ نمودار فشار کل - زمان تزریق سیال ورودی به سازند در محل پاشنه آستری ۷ اینچ در چاه ۴۸۸..... ۱۰۶
- شکل ۳-۵۲ تعیین مقدار ISIP با ترسیم فشار سطحی به صورت تابعی از زمان و بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار..... ۱۰۷
- شکل ۳-۵۳ تعیین مقدار FCP با ترسیم فشار سطحی به صورت تابعی از ریشه دوم زمان بعد از خاموش کردن پمپ و بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار..... ۱۰۸
- شکل ۳-۵۴ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند ایلام چاه ۴۸۸ به همراه نتایج آزمایش XLOT..... ۱۰۹
- شکل ۳-۵۵ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند سروک چاه ۴۸۸، به همراه مقادیر فشار منفذی حاصل از آزمایش RFT..... ۱۱۰
- شکل ۳-۵۶ شیب، آزمون شیب و امتداد شکستگی‌های القایی مشاهده شده در چاه ۴۸۸..... ۱۱۱
- شکل ۳-۵۷ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند ایلام چاه ۳۶۸..... ۱۱۳
- شکل ۳-۵۸ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند سروک چاه ۳۶۸..... ۱۱۴
- شکل ۳-۵۹ اطلاعات مربوط به شکستگی‌های برشی در چاه ۳۶۸. الف) آزمون شکستگی‌های برشی بر روی دایره اشمیت  
ب) امتداد شکستگی‌های برشی بر روی نمودار رزی..... ۱۱۵

- شکل ۳- ۶۰ بخشی از نگار تصویری UBI در زون D سازند سروک در چاه ۳۶۸..... ۱۱۵
- شکل ۳- ۶۱ امتداد شکستگی برشی رخ داده در چاه ۳۹۷. امتداد این شکستگی N37W است که با امتداد کلی چین- خوردگی‌های زاگرس مطابقت دارد..... ۱۱۶
- شکل ۳- ۶۲ مقادیر تنش، فشار منفذی و نتایج معیارهای شکست در سازند ایلام در چاه ۳۹۷..... ۱۱۷
- شکل ۳- ۶۳ مقادیر تنش، فشار منفذی و نتایج معیارهای شکست در سازند سروک در چاه ۳۹۷..... ۱۱۸
- شکل ۴- ۱ مثلث موفقیت در عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی ..... ۱۲۴
- شکل ۴- ۲ پیچیدگی شکاف هیدرولیکی ایجاد شده در چاه در اثر برخورد با صفحات ضعف ..... ۱۳۲
- شکل ۴- ۳ درخت سلسله مراتبی ساخته شده برای مسأله انتخاب لایه‌های کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی ..... ۱۳۷
- شکل ۴- ۴ شاخص شکاف‌پذیری کل و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۳۶۸، سازند ایلام ..... ۱۴۱
- شکل ۴- ۵ شاخص شکاف‌پذیری کل و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۳۹۷، سازند ایلام ..... ۱۴۲
- شکل ۴- ۶ شاخص شکاف‌پذیری کل و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۴۸۸، سازند ایلام ..... ۱۴۳
- شکل ۴- ۷ تحلیل حساسیت عملکرد لایه‌های کاندید نسبت به معیارها ..... ۱۴۴
- شکل ۴- ۸ برخورد شکاف هیدرولیکی با شکاف طبیعی ..... ۱۴۶
- شکل ۴- ۹ نتایج آزمایشگاهی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیک و شکاف طبیعی ..... ۱۴۶
- شکل ۴- ۱۰ نتایج مدلسازی عددی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیک و شکاف طبیعی ..... ۱۴۸
- شکل ۴- ۱۱ وضعیت شکاف‌های طبیعی در چاه ۳۹۷، سازند سروک..... ۱۴۹
- شکل ۴- ۱۲ وضعیت شکاف‌های رسانا در چاه ۴۸۸..... ۱۵۰
- شکل ۴- ۱۳ شیب، جهت و امتداد شکاف‌های طبیعی مشاهده شده در چاه ۳۶۸، سازند سروک..... ۱۵۱
- شکل ۴- ۱۴ بخشی از نگار تصویری UBI در زون E1 در چاه ۳۶۸..... ۱۵۲
- شکل ۴- ۱۵ بخشی از نگار تصویری UBI در زون F1 در چاه ۳۶۸..... ۱۵۲
- شکل ۴- ۱۶ شاخص شکاف‌پذیری و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۳۶۸، سازند سروک، زون‌های D و E1..... ۱۵۴
- شکل ۴- ۱۷ شاخص شکاف‌پذیری و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۳۶۸، سازند سروک، زون‌های F و G و H..... ۱۵۵
- شکل ۴- ۱۸ شاخص شکاف‌پذیری و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۳۹۷، سازند سروک، زون‌های E1 و E2..... ۱۵۶
- شکل ۴- ۱۹ شاخص شکاف‌پذیری و واحدبندی ژئومکانیکی در چاه ۴۸۸، سازند سروک، زون‌های D و E..... ۱۵۷
- شکل ۴- ۲۰ تحلیل حساسیت لایه‌ها نسبت به معیارها در سازند سروک ..... ۱۵۹

## فهرست جداول

### صفحه

جدول ۱-۳	ویژگی‌های ساختاری- تولیدی بخش‌های اصلی میدان اهواز.....	۴۷
جدول ۲-۳	روابط تجربی برای تخمین موج برشی.....	۴۹
جدول ۳-۳	همبستگی پارامترهای پتروفیزیکی با DTS در چاه ۴۸۸.....	۵۳
جدول ۴-۳	روابط به دست آمده برای تخمین موج برشی در چاه ۴۸۸.....	۶۱
جدول ۵-۳	مقایسه روش‌های مختلف در تخمین موج برشی در چاه ۴۸۸.....	۶۵
جدول ۶-۳	روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی.....	۷۸
جدول ۷-۳	روابط تجربی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوره.....	۸۰
جدول ۸-۳	مقادیر عمق و فشار مبنا در میدان نفتی اهواز.....	۹۶
جدول ۹-۳	حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب.....	۱۰۳
جدول ۱۰-۳	حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موگی کلمب.....	۱۰۴
جدول ۱-۴	آنالیز همبستگی بین پارامترهای الاستیک و مقاومتی در چاه ۳۶۸.....	۱۳۵
جدول ۲-۴	مقیاس استاندارد برای مقایسه اهمیت زوجی معیارها.....	۱۳۸
جدول ۳-۴	مقادیر مدول یانگ در هریک از واحدهای ژئومکانیکی در چاه‌های مورد مطالعه.....	۱۳۹
جدول ۴-۴	نحوه ارزیابی کیفی معیارهای اصلی برای انتخاب کاندید در سازند ایلام.....	۱۴۰
جدول ۵-۴	ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی لایه‌های کاندید در سازند ایلام.....	۱۴۰
جدول ۶-۴	نحوه ارزیابی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف طبیعی در سازند سروک.....	۱۵۳
جدول ۷-۴	ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی لایه‌های کاندید در سازند سروک.....	۱۵۸
جدول ۸-۴	نحوه ارزیابی کیفی معیارهای اصلی در انتخاب کاندید در سازند سروک.....	۱۵۹



فصل اول

کلیات

## ۱-۱ مقدمه

کلیه نیازها برای ادامه حیات و پیشرفت بشر در محیط پیرامون او قرار دارد. انسان در طول زمان علاوه بر این که نحوه دستیابی به منابع طبیعی را شناسایی کرده، این ضرورت را نیز درک نموده است که باید علم و شناخت بیشتری نسبت به طبیعت پیرامونش داشته باشد تا به بهره‌وری بیشتری نیز برسد. با توجه به نیاز روزافزون به منابع نفتی، افزایش تولید چاه‌های نفت امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی تولید نفت با گذشت زمان، به دلیل کاهش فشار مخزن و بسته شدن ترک‌ها و منافذ میکروسکوپی موجود در سنگ مخزن، کاهش می‌یابد. لذا برای دستیابی به تولید بیشتر باید چاه‌های جدید در مخزن حفر شود که با در نظر گرفتن هزینه‌های زیاد حفاری، حفر چاه‌های عمیق برای افزایش تولید از مخازن مقرون به صرفه نیست و عملیات تحریک مخزن به منظور افزایش تراوایی و بالا بردن تولید چاه، در مقایسه با حفر چاه‌های عمیق جدید اقتصادی است.

شکاف هیدرولیکی از جمله تجاربی است که هرچند در ابتدا برای دسترسی بیشتر به مواد هیدروکربوری از آن استفاده گردید ولی در طول زمان برای شناخت تنش‌های برجای زمین و همچنین دستیابی به انرژی‌های نوین نهفته در زمین مورد استفاده قرار گرفت. این عملیات یکی از متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های افزایش تولید نفت و گاز در مخازن با تراوایی کم است. از شکاف هیدرولیکی می‌توان برای برطرف کردن آسیب سازند در چاه که بر اثر حفاری یا عملیات تکمیل چاه اتفاق افتاده است، افزایش تزریق‌پذیری در چاه‌های تزریقی و همچنین به حداقل رساندن تولید ماسه استفاده کرد.

## ۱-۲ اهداف تحقیق

میدان نفتی اهواز یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی ایران است که در جنوب تا جنوب غربی فروافتادگی دزفول شمالی واقع شده است. این میدان یک نفت‌گیر عظیم ساختاری و از آخرین چین‌های زاگرس است. مخازن اصلی این میدان شامل سازند آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی است. مخزن بنگستان در عمق حدود ۳۰۰۰ متری قرار گرفته و شامل سازندهای ایلام و سروک است.

در این مطالعه ۳ چاه در مخزن بنگستان مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی از این تحقیق ساخت مدل ژئومکانیکی در چاه‌ها و انتخاب چاه ولایه کاندید از نقطه‌نظر ژئومکانیکی برای انجام شکاف هیدرولیکی است. بدین منظور سعی شده تا روشی برای انتخاب کاندید ارائه شود که بتوان از آن در سایر میادین نفتی و مخازن کربناته ایران نیز استفاده کرد.

### ۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

عملیات شکاف هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های افزایش تولید نفت و گاز در مخازن با تراوایی کم است. اگرچه شکاف هیدرولیکی بیش از ۶۰ سال است که در صنعت نفت دنیا با موفقیت اجرا می‌شود، اما در ایران انجام این عملیات با موفقیت‌های چشم‌گیری همراه نبوده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نبود اطلاعات کافی از خواص مکانیکی سنگ، عدم شناخت تنش‌های برجای منطقه، شکاف‌دار بودن مخازن، دبی بالای چاه و نبود مطالعه مناسب ژئومکانیکی از دلایل اصلی عدم موفقیت‌های گسترده این عملیات بوده است.

سازندهای مخزنی در گروه بنگستان، سازندهای ایلام و سروک هستند که معمولاً از آهک‌های رسی تشکیل شده‌اند و مشخصه بارز آن‌ها ناهمگن بودن آن‌هاست. با توجه به تراوایی و تخلخل کم این مخازن، انجام شکاف هیدرولیکی در این مخازن جهت تولید بهینه از آن‌ها ضروری است. بدین منظور تعیین پارامترهای مکانیکی سازندها و تنش‌های برجا در چاه‌ها و انجام مدلسازی‌های ژئومکانیکی برای انتخاب چاه و لایه مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی از اهمیت خاصی برخوردار است. انجام مطالعات ژئومکانیکی و انتخاب درست چاه‌های کاندید، زمینه‌ساز موفقیت نهائی عملیات بوده و احتمال بروز مشکلات مختلف و شکست عملیات را بسیار کاهش می‌دهد.

### ۱-۴ روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا مطالعاتی در زمینه ساخت مدل ژئومکانیکی و نحوه انتخاب چاه و لایه کاندید صورت گرفت. در زمینه انتخاب کاندید سعی شد تا از نتایج مطالعات انجام شده در داخل کشور استفاده شود. سپس مدل ژئومکانیکی در چاه‌های مورد مطالعه ساخته شد و پارامترهای ژئومکانیکی از جمله مدول-های الاستیک، پارامترهای مقاومتی و تنش‌ها محاسبه شدند.

یکی از مهم‌ترین داده‌ها برای ساخت مدل ژئومکانیکی موج برشی است که تنها در یکی از چاه‌های مورد مطالعه موجود بود و در دو چاه دیگر با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره تخمین زده شد. پس از ساخت مدل ژئومکانیکی با توجه به شرایط مخزن و داده‌های موجود و همچنین با بررسی مطالعات قبلی انجام شده معیارهایی برای انتخاب چاه و لایه کاندید در این مخزن معرفی شدند. در نهایت با استفاده از این

معیارها و ارزیابی آنها، چاه‌ها و لایه‌های کاندید با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> (AHP) انتخاب شدند.

## ۱-۵ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش رو در پنج فصل تهیه شده است. فصل اول مقدمه پایان‌نامه است که در آن به بررسی مسأله، اهداف تحقیق و روش انجام کار و به طور کلی به کلیات کار پرداخته شده است.

در فصل دوم در رابطه با سابقه شکاف هیدرولیکی و نحوه انجام این عملیات مطالبی ارائه شده است. در این فصل همچنین به مبانی نظری شکاف هیدرولیکی، مکانیزم ایجاد آن، هندسه شکاف و همچنین مدل‌های هندسی مختلف آن پرداخته شده است.

در فصل سوم ابتدا توضیحاتی در رابطه با میدان نفتی مورد مطالعه، موقعیت جغرافیایی آن، شرایط ساختمانی و همچنین سازندها و زون‌های موجود در این سازندها توضیحاتی داده شده است. سپس نحوه تخمین موج برشی در چاه‌ها توضیح داده شده و نتایج آن ارائه شده است. در ادامه نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی شامل محاسبه و تخمین پارامترهای الاستیک و مقاومتی، تخمین تنش‌های برجا و فشار منفذی و همچنین نحوه کالیبره کردن آنها شرح داده شده است.

در فصل چهارم به نحوه انتخاب چاه و لایه کاندید در چاه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است. در ابتدا مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه در کشور و در دنیا بررسی شده است. سپس با توجه به این مطالعات، شرایط مخزن و داده‌های موجود شاخصی با نام شاخص شکاف‌پذیری کل<sup>۲</sup> (TFI) برای شناسایی لایه‌های مستعد جهت انجام عملیات شکاف هیدرولیکی ارائه شده است. پس از آن با توجه به کربناته بودن و شکاف‌دار بودن مخزن مورد مطالعه معیارهایی برای انتخاب چاه و لایه کاندید ارائه شده است. در نهایت نیز معیارها با استفاده از روش AHP در لایه‌های مختلف چاه‌ها در سازند ایلام و سروک مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت لایه‌ها و چاه‌های کاندید انتخاب شده‌اند.

در فصل پنجم نیز که فصل آخر پایان‌نامه است به جمع‌بندی مطالب فصل‌های قبلی پرداخته شده و در انتها پیشنهاداتی ارائه شده است.

---

<sup>۱</sup> Analytic Hierarchy Process

<sup>۲</sup> Total Fractability Index



## فصل دوم

عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش ترک در فرآیند شکاف هیدرولیکی

## ۲-۱ مقدمه

مخازن کربناته خاورمیانه حاوی حدود ۶۹ درصد از ذخایر نفت و گاز جهان هستند. به منظور تأمین تقاضای نفت و گاز در جهان، تحریک مؤثر مخازن کربناته در این منطقه بسیار مهم است.

طی سالیان بسیار، تیم‌های مهندسی مخزن به دنبال راه‌هایی بوده‌اند تا از بستن چاه‌های نفت و گاز در سال‌های اولیه تولید که در نتیجه آسیب سازند و تراوایی طبیعی کم رخ می‌دهد، جلوگیری کنند. بستن چاه‌ها باعث از دست رفتن درآمد هنگفت ناشی از هیدروکربن‌های باقی‌مانده می‌شود. عملیات بازیابی اغلب می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های تحریک چاه برای از بین بردن آسیب سازند در منطقه نزدیک به چاه و یا تا حدی افزایش نفوذپذیری طبیعی سازند، یا در بسیاری از موارد بهبود هر دو همراه باشد. شناخت علل آسیب سازند و جلوگیری از وقوع آن موضوع تحقیقات زیادی بوده است. با این حال عملیات چاه به عنوان مهم‌ترین علت آسیب سازند در منطقه نزدیک به چاه است (Alkaabi, 2003).

هدف اصلی در تحریک مخازن کربناته ایجاد یک مسیر جریان رسانای سیال و حذف آسیب سازند است. شکاف هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های تحریک چاه و افزایش تولید نفت و گاز در مخازن با تراوایی کم است. استفاده از این روش باعث غلبه بر مشکلات حفاری و صدمات ناشی از بهره‌برداری در حوالی محور چاه شده و می‌تواند سطح تولید از چاه‌ها را افزایش دهد.

## ۲-۲ سابقه شکاف هیدرولیکی

انجام شکست مخزن به سال ۱۸۶۰ برمی‌گردد، زمانی که نیتروگلیسیرین مایع برای تحریک چاه‌های کم‌عمق در پنسیلوانیا، نیویورک، کنتاکی و ویرجینیای غربی استفاده شد. با وجود این که این نوع شکست در اکثر موارد غیرقانونی و با خطرات زیادی همراه بود، اما این کار برای چاه نفت با موفقیت چشم‌گیری همراه بود. هدف از این کار افزایش تولید اولیه و کارآمدی بهینه چاه‌های نفتی بود. در سال ۱۹۳۰ نظریه استفاده از ماده غیرمنفجره مانند اسید برای تحریک چاه ارائه شد. اسید سنگ را شکسته و سطح شکسته شده را ناصاف می‌کرد و این عاملی برای ایجاد کانال‌هایی برای افزایش تولید می‌شد. این پدیده در زمان حفاری چاه با استفاده از آب نیز اتفاق می‌افتاد تا این که فلوید فاریس<sup>۱</sup> از آموکو<sup>۲</sup> مطالعه‌ای

---

<sup>۱</sup> Floyd Farris

<sup>۲</sup> Amoco (Stanolind Oil)

گسترده در رابطه با اثر فشار شکاف هیدرولیکی و کارآمدی چاه با استفاده از اسید و آب انجام داد و دریافت که شکاف هیدرولیکی می‌تواند موجب افزایش تولید شود.

اولین شکاف هیدرولیکی موفق در سال ۱۹۴۹ توسط شرکت هالبرتون<sup>۱</sup> انجام گردید. این شرکت دو شکاف هیدرولیکی با هزینه ۹۰۰ و ۱۰۰۰ دلار آمریکا در ۱۷ مارس ۱۹۴۹ انجام داد. در سال اول ۳۳۲ چاه با متوسط افزایش تولید ۷۵ درصدی شکسته شدند.

استفاده از این فناوری به سرعت در ایالات متحده آمریکا گسترش پیدا کرد. انجام این عملیات در اواسط سال ۱۹۵۰ به ۳۰۰۰ چاه در ماه رسید. اولین شکاف هیدرولیکی با هزینه نیم میلیون پوندی در اکتبر ۱۹۶۸ توسط شرکت نفتی پن آمریکن<sup>۲</sup> انجام شد. در سال ۲۰۰۸ بیش از ۵۰ هزار شکست در سراسر جهان با هزینه ای بین ۱۰ هزار دلار تا ۶ میلیون دلار آمریکا برای هر شکست انجام گردید. پس از معرفی فناوری شکاف هیدرولیکی در سال ۱۹۴۹، تا کنون ۲/۵ میلیون شکست چاه در سراسر دنیا انجام شده است (Montgomery and smith, 2010).

در ایران عملیات شکست هیدرولیکی به تعداد بسیار محدود در چاه‌های نفت و گاز ایران انجام شده است. بر مبنای آوشیو گزارشات شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، تاریخچه این نوع عملیات در ایران از سال ۱۳۹۵ با انجام عملیات بر روی چاه شماره ۶۶ میدان اهواز آغاز گردید. پس از آن در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۷۴ و ۱۳۷۸ این عملیات به ترتیب بر روی چاه‌های شماره ۲۱۱، ۲۲۹ و ۲۳۶ میدان اهواز انجام شد که در آخرین مورد به دلیل افزایش فشار سرچاهی تا ۱۰۰۰۰ پام و فشار بسیار بالای مورد نیاز جهت ادامه عملیات، برنامه متوقف و عملیات ناموفق گردید. اینگونه به نظر می‌رسد که پس از آخرین عملیات ناموفق انجام شده، چاه شماره ۲۳۶ میدان اهواز، پروژه فوق به دلیل ارزیابی کارشناسان مبنی بر عدم امکان تأمین فشار و تسهیلات مورد نیاز جهت ایجاد شکست هیدرولیکی در مخازن هیدروکربوری ایران از دستور کار برنامه انگیزش چاه‌ها خارج شده و متوقف گردیده است.

## ۲-۳ نحوه انجام شکاف هیدرولیکی

به منظور انجام عملیات شکاف هیدرولیکی، سیال باید با فشار بالا در لوله جداری تولیدی<sup>۳</sup> پمپ شده و از طریق مشبک‌ها<sup>۴</sup> وارد سازند مورد نظر شود. لازم است لوله جداری تولید نصب شده و سیمان

<sup>۱</sup> Haliburton

<sup>۲</sup> Pan American Petroleum

<sup>۳</sup> Production Casing

<sup>۴</sup> Perforations

شود که باعث می‌شود لوله جداری قادر به تحمل فشاری که در جریان عملیات شکاف هیدرولیکی به آن وارد می‌شود باشد. در برخی از موارد، لوله جداری تولیدی به جز در حین عملیات شکاف هیدرولیکی هرگز تحت فشار بالا قرار نمی‌گیرد. در این موارد که فشار بالاست می‌توان از "رشته شکست"<sup>۱</sup> به منظور پمپاژ سیال به درون چاه و برای محافظت از لوله جداری تولیدی در برابر فشار بالای عملیات استفاده کرد. هنگامی که عملیات شکاف هیدرولیکی به اتمام برسد، رشته شکست برداشته می‌شود.

به طور کلی عملیات شکاف هیدرولیکی شامل مراحل زیر است:

#### (۱) پد<sup>۲</sup>

پد اولین مرحله عملیات است که هدف آن شکست سازند مورد نظر است. از این نقطه به بعد، شکستگی در سازند گسترش پیدا می‌کند. به طور معمول هیچ پروپانتی<sup>۳</sup> در این مرحله پمپ نمی‌شود. با این حال در برخی موارد مقدار بسیار کمی از ماسه ممکن است در زمان‌های کوتاه به منظور پاک کردن یا باز کردن کامل مشبک‌ها اضافه شود. بیشترین زمان پمپاژ نیز در همین مرحله صرف می‌شود.

#### (۲) پروپانت

پروپانت پس از پد پمپ می‌شود، در مراحل بعدی سیال می‌تواند شامل غلظت‌های متفاوتی از پروپانت باشد. متداول‌ترین پروپانت ماسه معمولی است که تا یک اندازه خاص غربال شده است. پروپانت‌های مخصوص دیگری نیز وجود دارند، از جمله بوکسیت<sup>۴</sup> متخلخل که مقاومت بسیار بالایی در برابر خردایش دارد و همچنین پروپانت سرامیکی که دارای مقاومت متوسط است.

#### (۳) جابه‌جایی<sup>۵</sup>

هدف از جابه‌جایی شستن شن و ماسه مرحله حاوی پروپانت در بالای مشبک‌هاست. این مرحله به جهت تمیز کردن لوله جداری و شکستگی انجام می‌شود. این مرحله شستشو<sup>۶</sup> نیز نامید می‌شود که در آن آخرین سیال به درون چاه پمپ می‌شود. این سیال می‌تواند آب معمولی و بدون مواد افزودنی باشد، یا ممکن

---

<sup>۱</sup> Frac String

<sup>۲</sup> Pad

<sup>۳</sup> Proppant

<sup>۴</sup> Bauxite

<sup>۵</sup> Displacement

<sup>۶</sup> Flush

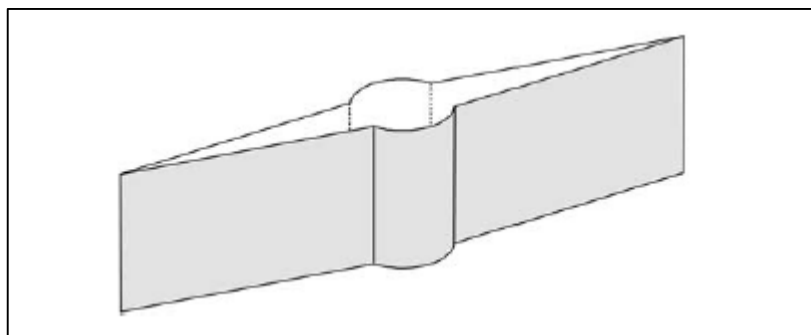
است همان سیالی باشد که قبلاً به درون چاه پمپ می‌شد. ویسکوزیته سیال باید پس از اتمام عملیات شکست کاهش یابد تا قرار دادن پروپانت و بازگشت سیال از طریق شکستگی امکان‌پذیر باشد (API, 2009).

## ۴-۲ مکانیسم شکاف هیدرولیکی

پیش از مدل‌سازی و طراحی شکاف هیدرولیکی و همچنین انتخاب چاه و لایه کاندید برای این عملیات لازم است تا ابتدا مکانیسم ایجاد و گسترش شکاف هیدرولیکی در سنگ و همچنین هندسه شکاف ایجاد شده و عوامل مؤثر بر آن‌ها به خوبی درک شود. عواملی مانند فشار ایجاد شکاف و همچنین هندسه شکاف ایجاد شده از جمله فاکتورهای مهم در عملیات شکاف هیدرولیکی هستند که پیش‌بینی آن‌ها می‌تواند نقش مهمی در موفقیت عملیات داشته باشد.

شکاف هیدرولیکی در سنگ هنگامی ایجاد می‌شود که فشار سیال درون سنگ از تنش اصلی حداقل به اضافه مقاومت کششی سنگ بیشتر شود که منجر به شکست کششی سنگ می‌شود. شکاف هیدرولیکی همچنین ممکن است به طور طبیعی در اثر فرآیندهای تکتونیک که در نتیجه آن‌ها فشار سیال افزایش یا تنش اصلی حداقل کاهش می‌یابد نیز ایجاد شوند. شکاف هیدرولیکی مصنوعی به طور معمول با افزایش سیال در چاه تا نقطه‌ای که تنش اصلی حداقل کششی شود، ایجاد می‌شود. با ادامه پمپاژ و افزایش فشار، سازند شکافته شده و شکاف در جهت حداقل مقاومت رشد می‌کند. با این حال در یک سازند خاص پس از کمی فاصله گرفتن از چاه، شکاف همیشه در جهت عمود بر تنش اصلی حداقل گسترش می‌یابد.

از آن جا که تنش اصلی حداقل اغلب افقی است، شکاف ایجاد شده قائم خواهد بود. اگر یک چاه قائم را در نظر بگیریم، همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است یک شکاف دوباله متقارن در جهت عمود بر تنش اصلی حداقل ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۲ شکاف عمودی در اطراف یک چاه قائم (Fjaer, et al., 2008)

## ۲-۴-۱ شرایط برای شکست کششی

شکست کششی زمانی رخ می‌دهد که کشش وارد بر سازند از مقاومت کششی آن بیشتر شود. از آن جا که طبق قرارداد تنش‌های فشاری مثبت در نظر گرفته می‌شوند. شرایط لازم برای وقوع شکست کششی در مواد متخلخل به صورت زیر است (ضریب تنش مؤثر برابر با ۱ در نظر گرفته شده):

$$\sigma - P_f < -T_0 \quad (1-2)$$

که در آن  $P_f$  فشار در منافذ و  $T_0$  مقاومت کششی سنگ است.

این رابطه در واقع معیاری برای شکست کششی سنگ است. زمانی که شکاف‌هایی از قبل در سنگ وجود دارد، معیار باز کردن مجدد شکاف به صورت زیر خواهد بود (مقاومت کششی در این حالت صفر است):

$$\sigma - P_f < 0$$

## ۲-۴-۲ ایجاد شکاف و شکست سازند<sup>۱</sup>

برای یک چاه که در جهت تنش اصلی قائم حفر شده است، تنش‌ها در دیواره چاه در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت زیر خواهند بود:

$$\sigma_r = P_w \quad (3-2)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - P_w \quad (4-2)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta \quad (5-2)$$

در این روابط  $\sigma_r$  تنش شعاعی،  $\sigma_\theta$  تنش مماسی،  $\sigma_z$  تنش قائم،  $\sigma_H$  و  $\sigma_h$  به ترتیب تنش افقی حداکثر و حداقل،  $\nu$  ضریب پواسون و  $\theta$  زاویه نسبت به جهت تنش افقی حداکثر است. رابطه ۲-۴ نشان می‌دهد که تنش مماسی در دیواره چاه بین یک مقدار حداکثر و یک مقدار حداقل تغییر می‌کند که این دو مقدار عبارتند از:

<sup>۱</sup> Formation Breakdown

$$\sigma_{\theta, max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \quad (6-2)$$

$$\sigma_{\theta, min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \quad (7-2)$$

حداکثر مقدار در جهت  $\sigma_h$  ( به ازای  $\theta=90^\circ$  ) و حداقل مقدار در جهت  $\sigma_H$  ( به ازای  $\theta=0^\circ$  ) اتفاق می افتد و در نتیجه فشار ایجاد شکاف در یک چاه قائم برابر خواهد بود با:

$$P_w^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_f + T_o \quad (8-2)$$

چون طبق تعریف  $\sigma_H$  بزرگتر از  $\sigma_h$  است، در نتیجه زمانی که تنش های افقی نابرابرند، فشار ایجاد شکاف کمتر از حالتی است که تنش های افقی برابرند.

شکل ۲-۲ تغییرات فشار در چاه را در حین عملیات شکاف هیدرولیکی در یک چاه قائم نشان می دهد. بخش خطی ابتدای نمودار نشان دهنده تغییر شکل الاستیک سیستم در چاه و اطراف آن است. پیک نمودار شرایط ایجاد شکاف را نشان می دهد. فشار در این نقطه بلافاصله سقوط می کند که این افت ناگهانی وضعیتی را نشان می دهد که در آن شکاف به صورت ناپایدار رشد می کند. دلیل این افت ناگهانی این است که نرخ رشد شکاف از نرخ تزریق سیال بیشتر است. پمپاژ مستمر سرانجام منجر به رشد پایدار شکاف می شود که قسمت فشار ثابت نمودار است. در این مورد ایده آل نقطه ایجاد شکاف و شکست سازند با هم برابرند.

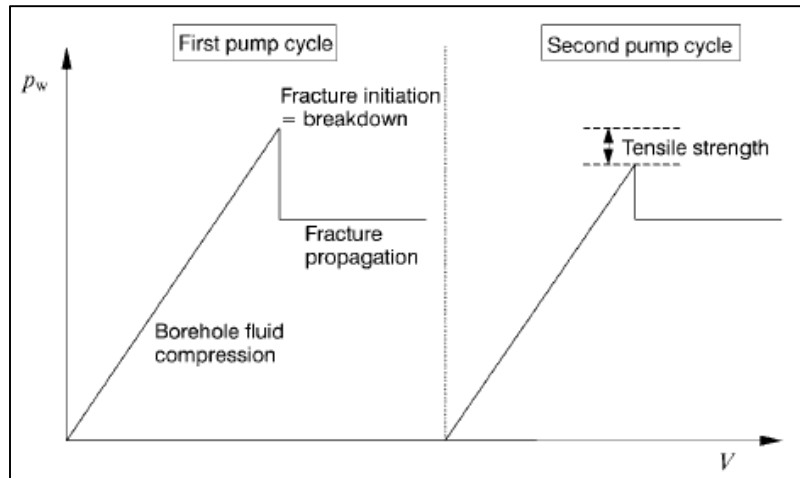
نمودار دوم در این شکل مربوط به زمانی است که چرخه دوم فشار نیز انجام شود. در این حالت تنها مقاومتی که در مقابل ایجاد شکاف و شکست سازند وجود دارد تمرکز تنش های اطراف چاه است و چون شکاف از قبل وجود داشته است، مقاومت کششی صفر است. بنابراین اختلاف بین پیک نمودار اولی و نمودار دوم را می توان برابر با مقاومت کششی سازند در نظر گرفت.

در شرایط واقعی ممکن است نمودارهای فشار-زمان با آن چه که در شکل ۲-۲ نشان داده شد متفاوت باشد. شکل ۳-۲ نمودارهای متداول تر را نشان می دهد. نمودار سمت چپ این شکل فشار ایجاد شکاف (یا فشار شکست) مشخصی دارد، در حالی که نمودار سمت راست این گونه نیست. گاهی یک نقطه نش<sup>۱</sup> قبل از شکست سازند کاملاً مشخص است در حالی که در برخی موارد این نقطه به راحتی قابل تشخیص نیست. علت دقیق این مسأله معلوم نیست اما دلایل احتمالی عبارتند از: کارایی کیک صافی<sup>۲</sup>،

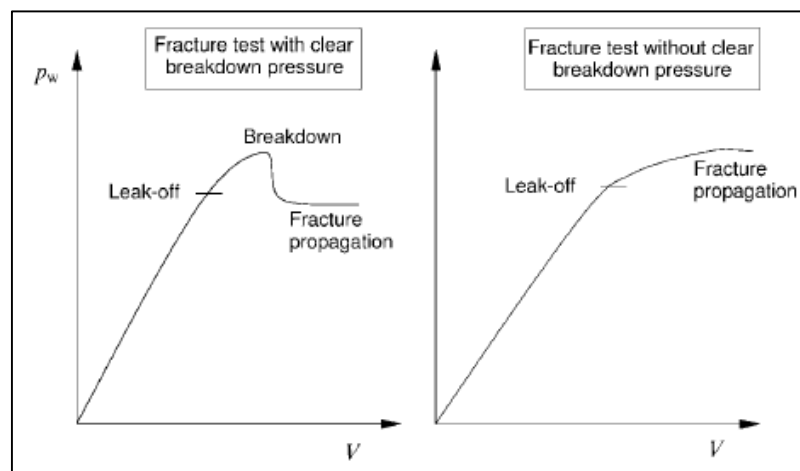
<sup>۱</sup> Leak-off Point

<sup>۲</sup> Filter cake efficiency

پلاستیسیته، خواص الاستیک وابسته به تنش، اثرات دما و نشت سیال پشت پاشنه جداری<sup>۱</sup>. باید توجه شود که نقطه نشت معمولاً نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن نمودار از خط راست منحرف می‌شود. بنابراین ارائه یک معنای فیزیکی مشخص برای آن مشکل است، چرا که می‌تواند تحت تأثیر هریک از عواملی که در بالا ذکر شد قرار بگیرد (Fjaer, et al., 2008).



شکل ۲-۲ فشار در یک چاه قائم در حین عملیات شکاف هیدرولیکی (Fjaer, et al., 2008)



شکل ۲-۳ فشار واقعی در یک چاه قائم در حین عملیات شکاف هیدرولیکی (Fjaer, et al., 2008)

<sup>۱</sup> Casing Shoe



## ۵-۲ جهت گیری، رشد و محدودسازی<sup>۱</sup> شکاف

در مورد چاه‌های قائم و هنگامی که رژیم تنش منطقه نرمال است ( $\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$ )، شکاف همیشه قائم و در جهت عمود بر تنش افقی حداقل خواهد بود. اما برای چاه‌های افقی و انحرافی<sup>۲</sup> شرایط بسیار پیچیده‌تر است.

در مورد یک چاه افقی در یک رژیم تنش نرمال فشار ایجاد شکاف بستگی به آزمون چاه دارد. در حالتی که چاه موازی با جهت  $\sigma_H$  است فشار ایجاد شکاف برابر است با:

$$P_w = 3\sigma_h - \sigma_V - P_f + T. \quad (9-2)$$

و در مورد چاهی موازی با  $\sigma_h$ :

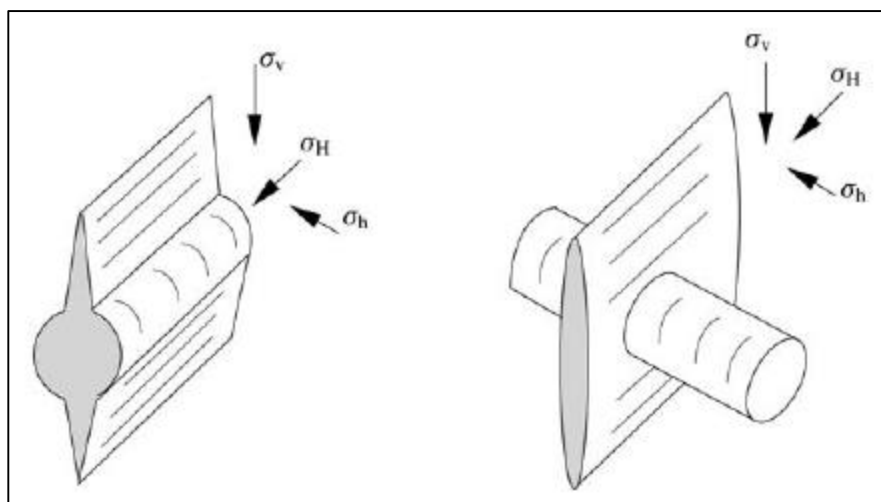
$$P_w = 3\sigma_H - \sigma_V - P_f + T. \quad (10-2)$$

واضح است که فشار ایجاد شکاف در مورد دوم (چاه در جهت  $\sigma_h$ ) بیشتر از مورد اول است. همچنین جهت شکاف نسبت به چاه در دو مورد متفاوت خواهد بود. همانطور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده، در مورد اول تنش حداقل عمود بر چاه است و شکاف در این حالت موازی با چاه خواهد بود (شکل سمت چپ). در مورد دوم که چاه موازی با جهت  $\sigma_h$  است، شکاف عمود بر محور چاه خواهد بود (شکل سمت راست).

---

<sup>۱</sup> Confinement

<sup>۲</sup> Deviated well



شکل ۲-۴ جهت‌گیری‌های مختلف شکاف، شکاف موازی با چاه ( شکل سمت چپ) و شکاف عمود بر چاه (شکل سمت راست) (Fjaer, et al.,2008)

در مواردی که چاه در جهت هیچ‌کدام از تنش‌های اصلی نیست، مثلاً در مورد چاه‌های انحرافی، وضعیت با پیچیدگی‌های بیشتری همراه خواهد شد. در این شرایط شکاف غیرمسطح<sup>۱</sup> بوده و در جهت حداقل مقاومت ( که ممکن است منطبق بر جهت تنش اصلی حداقل نباشد) شروع به رشد کرده و سپس جهت آن به سمت عمود بر تنش اصلی حداقل تغییر خواهد کرد.

با این که تنش روباره معمولاً به طور یکنواخت با افزایش عمق افزایش پیدا می‌کند، تغییرات تنش‌های افقی ممکن است به لیتولوژی و یا نوع سازند بستگی داشته باشد. وارپینسکی<sup>۲</sup> و توفل<sup>۳</sup> (۱۹۸۵) در تحقیقی نشان دادند که در لایه‌های شیلی تنش‌های افقی می‌توانند به شرایط تنش لیتواستاتیک<sup>۴</sup> برسند، در حالی که مقدار این تنش‌ها در مورد ماسه‌سنگ‌ها بسیار کمتر است. اختلاف در تنش‌های افقی زمانی اهمیت می‌یابد که بحث محدودسازی شکاف در سازندهای لایه‌ای مطرح شود. اختلاف در خواص الاستیک و مقاومتی نیز ممکن است بر انتشار شکاف از یک لایه به لایه دیگر اثر بگذارد، اما اختلاف در تنش‌های برجا فاکتور مؤثرتری است.

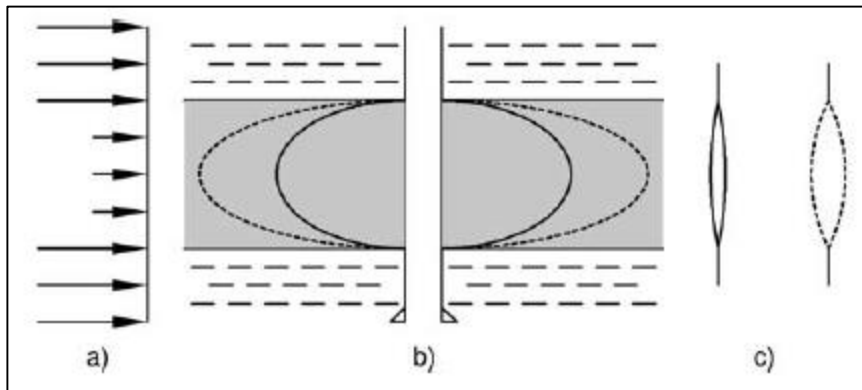
<sup>۱</sup> Non-planar

<sup>۲</sup> Warpinski

<sup>۳</sup> Teufel

<sup>۴</sup> Lithostatic

شکل ۵-۲ شکاف زنی یک لایه‌ی ماسه‌سنگی را نشان می‌دهد که سازندهای بالایی و پایینی آن شیلی هستند. در قسمت a شکل، اختلاف در تنش اصلی حداقل نشان داده شده است. اگر این اختلاف تنش به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌تواند از گسترش شکاف به داخل لایه‌های شیلی جلوگیری کند. این مسأله باعث می‌شود که یک شکاف با بال‌های بیضی‌شکل ایجاد شود (قسمت b شکل ۵-۲). به منظور گسترش چنین شکافی، نیروهای وارد بر دیواره‌های شکاف باید به سمت بیرون شکاف باشند، که این امر باعث افزایش عرض شکاف می‌شود (قسمت c از شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲ محدودسازی یک شکاف در بین لایه‌هایی با تنش بیشتر (Fjaer, et al., 2008)

ویژگی بارز این نوع شکاف‌ها این است که با افزایش طول شکاف، فشار گسترش شکاف افزایش خواهد یافت. فشار مورد نیاز جهت توسعه چنین شکاف‌هایی را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد:

(۱) فشار لازم جهت باز نگه داشتن شکاف به طرف تنش حداقل

(۲) فشار لازم برای جریان دادن سیال درون شکاف

(۳) فشار مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت در نوک شکاف<sup>۱</sup> و ایجاد حجم جدیدی از شکاف یا:

$$P_e = P(\sigma_h) + P(flow) + P(tip) \quad (۱۱-۲)$$

عبارت اول در این رابطه نشان دهنده تنش بر جای حداقل و فشار اضافی مورد نیاز جهت حفظ باز شدگی<sup>۲</sup> شکاف است. در مورد شکاف‌های کوچک و باریک و یک سیال با گرانش کم، فشار توسعه شکاف تا حد معقولی ثابت خواهد ماند. با این حال در مورد شکاف‌های بزرگ‌تر با استفاده از سیالات گرانش (یا سیال همراه با پروپانت)، مقاومت سیال افزایش یافته و در نتیجه فشار مورد نیاز جهت گسترش شکاف نیز

<sup>۱</sup> Fracture Tip

<sup>۲</sup> Aperture

بیشتر می‌گردد. هنگامی که شکاف هیدرولیکی در مخازن شکاف دار طبیعی ایجاد می‌شود، هندسه شکاف پیچیده‌تر خواهد شد. شکاف‌زنی در این مخازن باعث باز شدن شکاف‌های طبیعی سنگ شده و این شکاف‌ها به شکاف القایی هیدرولیکی متصل می‌شوند، به طوری که پیش‌بینی الگوی شکافی که در نهایت حاصل می‌شود بسیار دشوار خواهد بود (Warpinski and Teufel, 1987).

شکل ۶-۲ نمودار فشار خالص شکاف‌زنی<sup>۱</sup> را در برابر زمان نشان می‌دهد. در مورد شکاف‌های محدود شده می‌توان نشان داد زمانی که نرخ تزریق ثابت است رابطه‌ای نمایی بین فشار خالص شکاف‌زنی و زمان وجود دارد. با این حال توان‌ها کوچک بوده و بین مقادیر ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ هستند. در نمودارهای لگاریتمی فشار خالص در برابر زمان، توسعه چنین شکاف‌هایی به صورت خط راست خواهد بود (بخش نخست نمودار سمت چپ). بخش دوم نمودار متناظر با شکافی است که در تمام جهات از جمله ارتفاع رشد می‌کند. این نوع رفتار همچنین می‌تواند به علت هرزروی سیال در سازند باشد. بخش سوم نمودار نیز نمایانگر توسعه شکاف در یک ناحیه کم‌تنش است که منجر به نوعی به اصطلاح فرار<sup>۲</sup> شکاف می‌شود.

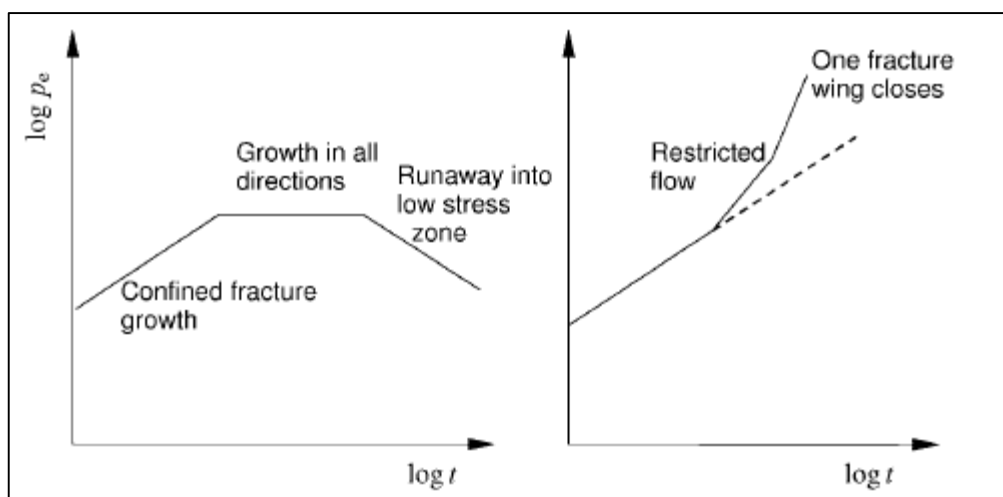
نمودار سمت راست شکل ۶-۲ نشان می‌دهد که فشار افزایش پیدا کرده و بیشتر از فشار معمول توسعه شکاف شده است. این رفتار اغلب در عملیات‌های واقعی شکاف‌زنی که در آن پروپانت‌ها به داخل شکاف پمپ می‌شوند مشاهده می‌شود. افزایش فشار با شیب تقریباً ۱ مشخصه جریان محدود<sup>۳</sup> به داخل بال‌های شکاف به دلیل پل‌زنی شکاف است. این رفتار همچنین می‌تواند به علت گرانیروی بیش از حد سیال باشد. اگر یکی از بال‌ها متعاقباً بسته شود، شیب نمودار لگاریتمی دو برابر خواهد شد (Fjaer, et al., 2008).

---

<sup>۱</sup> Net Fracturing Pressure

<sup>۲</sup> Runaway

<sup>۳</sup> Restricted Flow



شکل ۶-۲ نمودار لگاریتمی فشار خالص شکاف‌زنی در برابر زمان (Fjaer, et al., 2008)

## ۶-۲ تعیین تنش برجا

در طراحی شکاف هیدرولیکی، اکثر روش‌ها و فرآیندها جهت بهینه‌سازی بهره‌دهی<sup>۱</sup> چاه با اندازه شکاف آغاز می‌شود. به هنگام شکاف‌زنی مخازن نامتعارف، چالش‌هایی در رابطه با هندسه شکاف وجود دارد که عبارتند از: آزمون و شیب شکاف، ایجاد نشدن طول مورد انتظار، سنگ‌های شکننده<sup>۲</sup> و شکل‌پذیر<sup>۳</sup> و جهت محور چاه. با این حال در تمام موارد آگاهی از تنسور تنش‌های برجا جهت توسعه مدل گسترش شکاف و رسیدن به شکاف هیدرولیکی مطلوب ضروری است (Kennedy, et al., 2012).

پس از مقاله هابرت و ویلیس<sup>۴</sup> (۱۹۵۷) در مورد مکانیک شکاف هیدرولیکی، به طور تئوری و تجربی ثابت شده است که شکاف هیدرولیکی در یک صفحه عمود بر تنش اصلی حداقل گسترش می‌یابد (Zoback and Haimson, 1981). در سازندهای عمیق (عمق بیشتر از ۳۰۰ متر) به خاطر بالا بودن تنش روبراه، تنش اصلی حداقل معمولاً تنش افقی است. از لحاظ زمین‌شناسی این مطلب در رژیم‌های گسلش نرمال و امتداد لغز<sup>۵</sup> حقیقت دارد اما در محیط‌هایی با رژیم گسلش معکوس<sup>۶</sup>، تنش اصلی حداقل تنش قائم است. مقدار این تنش افقی حداقل را می‌توان از فشار درون شکاف بلافاصله بعد از این که پمپاژ متوقف می‌شود به دست

<sup>۱</sup> Productivity

<sup>۲</sup> Brittle

<sup>۳</sup> Ductile

<sup>۴</sup> Hubert and Willis

<sup>۵</sup> Strike-slip Faulting Regime

<sup>۶</sup> Reverse Faulting Regime

آورد که این فشار، فشار آنی بستن<sup>۱</sup> (ISIP) نامیده می‌شود. تنش افقی حداکثر در تحلیل پایداری چاه جهت تعیین وزن گل بهینه، محل نشان دادن لوله جداری و تعیین احتمال شکست برشی در گسل‌های موجود مفید است. با وجود اهمیت این تنش در ژئومکانیک، تعیین دقیق آن بسیار دشوار است (Zoback, 2007).

همان‌طور که گفته شد، مهم‌ترین پارامتری که باید قبل از عملیات شکاف‌زنی تعیین شود تنش افقی حداقل است که برای سادگی به عنوان فشار بندش در نظر گرفته می‌شود. فشار بندش فشار سیال موردنیاز برای بازکردن یک شکاف تعریف می‌شود. این فشار جهت پیش‌بینی هندسه شکاف هیدرولیکی برای یک فشار خالص و همچنین جهت ارزیابی مقاومت پروپانت مورد نیاز بسیار مهم است (Jones and Britt, 2009).

اندازه‌گیری میدانی تنش‌های برجا به سادگی امکان‌پذیر نیست. متغیرهای بسیاری بر این اندازه‌گیری‌ها اثر می‌گذارند، متغیرهایی مانند: اثر مشبک‌ها و نحوه‌ی انتشارشکاف در زون موردنظر. با این حال با بررسی فشار عملیاتی ته چاه<sup>۲</sup> (BHTP) و انجام تست‌های تزریق/افت<sup>۳</sup> و تزریق/برگشت جریان<sup>۴</sup> می‌توان مقادیر دقیق تنش برجا را اندازه‌گیری کرد (Holditch, et al., 1987).

اشکال روش‌هایی مانند آنالیز مغزه و نگارها این است که باید با استفاده از شکاف‌زنی سنگ کالیبره شوند. بنابراین هنگامی که نیاز است تنش‌ها به طور دقیق اندازه‌گیری شوند، استفاده از تست‌های تزریق مناسب‌تر است. به طور کلی چهار روش اصلی جهت اندازه‌گیری تنش‌ها وجود دارد که عبارتند از (Jones and Britt, 2009):

(۱) تست‌های پمپاژ/بستن<sup>۵</sup> (یا تست‌های تزریق/افت)

(۲) تست‌های پمپاژ/برگشت جریان

(۳) تست‌های تزریق مرحله‌ای<sup>۶</sup> (SRT)

(۴) تست‌های ریزشکاف<sup>۷</sup>

---

<sup>۱</sup> Instantaneous Shut-in Pressure

<sup>۲</sup> Bottom Hole Treating Pressure

<sup>۳</sup> Injection/Fall-off

<sup>۴</sup> Injection/flowback

<sup>۵</sup> Pump-in/Shut-in

<sup>۶</sup> Step-rate Injection Test

<sup>۷</sup> Mini-fracture Test

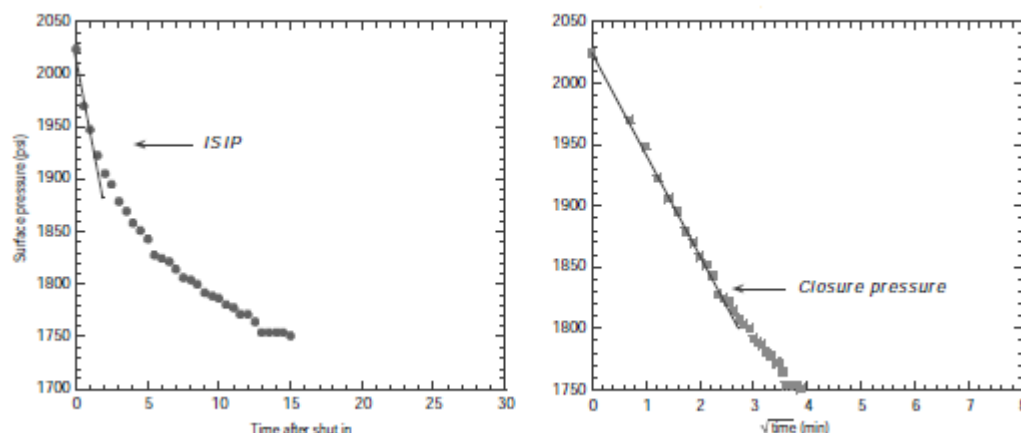
ارزیابی ایده آل سازند، آنی است که در آن تنش‌های برجای به دست آمده از تست‌های تزریق و مقادیری که از آنالیز مغزه و نگارها به دست می‌آیند با هم همخوانی داشته باشند (Holditch et al., 1987).

به طور تئوری تست پمپاژ/ بستن را می‌توان حالت خاصی از پمپاژ/ برگشت جریان در نظر گرفت که در آن دبی جریان برگشتی صفر است (Hsiao and Tsay, 1990). تست پمپاژ/ برگشت جریان را می‌توان به صورت جداگانه یا هم‌زمان با تست پمپاژ/ بستن انجام داد. انجام این تست از لحاظ عملیاتی دشوارتر است چرا که در این تست به هنگام کاهش فشار، دبی برگشت جریان باید ثابت نگه داشته شود. با این حال چنانچه این تست به درستی انجام شود، می‌توان نتایج آن را با تست پمپاژ/ بستن مقایسه کرد (Middlebrook, et al., 1997). به طور کلی تست پمپاژ/ بستن برای به دست آوردن هرزروی سیال در سازند و هندسه شکاف مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که تست پمپاژ/ برگشت جریان برای به دست آوردن تنش بندش به کار می‌رود (Hsiao and Tsay, 1990).

## ۲-۶-۱ تست پمپاژ/ بستن

در این تست سیال با دبی مناسب به منظور ایجاد شکاف به داخل چاه پمپ می‌شود، سپس چاه بسته شده تا فشار کاهش یابد. فشار آنی (ISIP) فشاری است که بلافاصله بعد از توقف پمپاژ و بستن چاه به دست می‌آید و فشاری است که در آن انتشار شکاف متوقف شده و شکاف بسته می‌شود. این فشار همیشه بیشتر از فشار بندش است، چرا که شکاف نمی‌تواند به محض این که پمپاژ متوقف شد شروع به بسته شدن کند.

در این تست ISIP را می‌توان با استفاده از نمودارهای فشار- زمان معمولی، لگاریتمی و نیمه‌لگاریتمی به دست آورد. مزیتی که نمودار فشار- زمان معمولی دارد این است که چون در این نمودار مقادیر حقیقی زمان رسم می‌شود، زمان دقیق بستن را می‌توان تعیین کرد (Jones and Britt, 2009). در این نمودار مقدار ISIP نقطه‌ای است که در آن نمودار از خط راست منحرف می‌شود. فشار بندش نیز با رسم فشار در مقابل ریشه دوم زمان به دست می‌آید. در این حالت نیز فشار بندش فشاری است که در آن شیب نمودار تغییر می‌کند (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷ تعیین فشار آبی و فشار بندش با استفاده از نمودارهای فشار- زمان (Zoback, 2007)

نمودارهای دیگری مانند نمودارهای لگاریتمی و نمودارهای آنالیز مشتق چندبعدی<sup>۱</sup> نیز برای تعیین فشار بندش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این وجود ممکن است در هریک از این نمودارها تغییر محسوسی در شیب نمودار دیده نشود یا این که چندین تغییر شیب در نمودار حاصل شود. به طور کلی تغییر شیب ممکن است در اثر هریک از رویدادهای زیر رخ دهد:

- کاهش ارتفاع شکاف به دلیل لایه های محدودکننده
- گذار از حالت توسعه شکاف به حالت توقف شکاف
- بندش شکاف
- بی‌نظمی‌های موجود در سطح شکاف
- وجود جریان خطی و یا شعاعی در مخزن

در نتیجه این تست به طور معمول فشار بندش دقیق را نمی‌دهد و نباید از آن به عنوان فرآیند اصلی در به دست آوردن فشار بندش استفاده کرد (Economides and Martin, 2007).

## ۲-۶-۲ تست پمپاژ/ برگشت جریان

<sup>۱</sup> Multidimensional Derivative Analysis



در این تست پس از تزریق سیال، جریان در یک نرخ ثابت (معمولاً بین ۰/۱۷ تا ۰/۲۵ نرخ تزریق) از شکاف خارج شده و از طریق لوله‌های چندراهه<sup>۱</sup> برمی‌گردد. دبی بازگشت جریان با استفاده از شیرهای چوک قابل تنظیم<sup>۲</sup> و یک جریان‌سنج<sup>۳</sup> ثابت نگه داشته می‌شود. هدف اصلی برگشت جریان به دست آوردن دبی جریانی است که تقریباً برابر با دبی نشت جریان به درون سازند است. در این دبی، همان‌طور که در شکل ۲-۸ دیده می‌شود، یک انحنای معکوس در نمودار کاهش فشار در نقطه فشار بندش اتفاق می‌افتد. برای به دست آوردن دبی جریان ایده‌آل یک فرآیند سعی و خطا انجام می‌شود. این فرآیند با دبی برگشت ۱ تا ۲ بشکه بر دقیقه آغاز می‌شود و تا زمانی که یک نمودار کاهش فشار s-شکل به دست آید تغییر داده می‌شود (Jones and Britt, 2009).

در ابتدا فرض شد که بندش شکاف در نقطه عطف نمودار، واقع در بالای نقطه تقاطع نشان داده شده در شکل ۲-۹، رخ می‌دهد. سپس عنوان شد که بندش در شروع قسمت خطی نمودار در زیر نقطه تقاطع اتفاق می‌افتد. مبنای نظریه آن‌ها این بود که قسمت خطی نمودار فقط مربوط به گنجایش و ظرفیت چاه است (یعنی زمانی که شکاف بسته شده است) (Economides and Martin, 2007). پلاهن<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۷) با استفاده از یک مدلسازی توأمان چاه، رشد شکاف و مخزن به مطالعه این تست پرداخته و پیشنهاد کردند که محل تقاطع مماس‌های وارد بر نمودار (در شکل ۲-۹ نشان داده شده است) به عنوان تخمینی از فشار بندش در نظر گرفته شود.

این تست ویژگی دیگری نیز دارد و آن واجهش فشار<sup>۵</sup> است. این واجهش زمانی مشاهده می‌شود که چاه در پایان زمان برگشت جریان بسته شود. در طی فرآیند واجهش، همان‌طور که در شکل ۲-۹ می‌توان ملاحظه کرد، زمانی که فشار چاه با فشار درون شکاف برابر شود، سیال داخل شکاف به داخل چاه جریان می‌یابد. نوتل<sup>۶</sup> (۱۹۸۲) پیشنهاد کرد که حداکثر مقدار واجهش به عنوان کران پایینی برای فشار بندش در نظر گرفته شود. در مواردی که نشت سیال به داخل سازند زیاد است فشار واجهش معمولاً کمتر از فشار بندش است، با این حال در مورد سازندهای کم‌تراوا فشار واجهش به سمت فشار بندش میل می‌کند (Economides and Martin, 2007).

---

<sup>۱</sup> Manifold

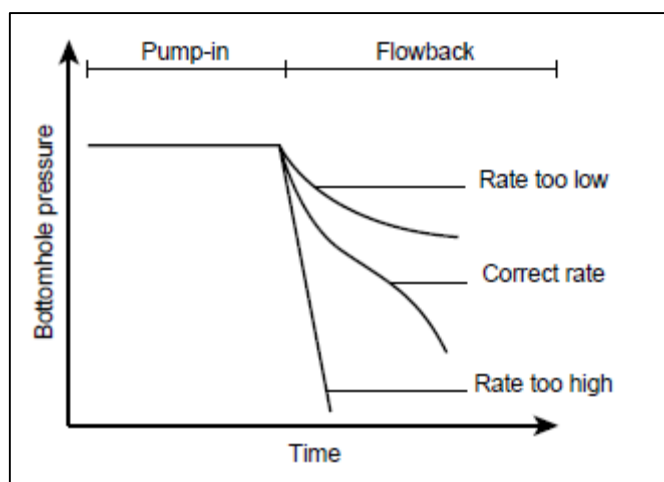
<sup>۲</sup> Adjustable Choke

<sup>۳</sup> Flowmeter

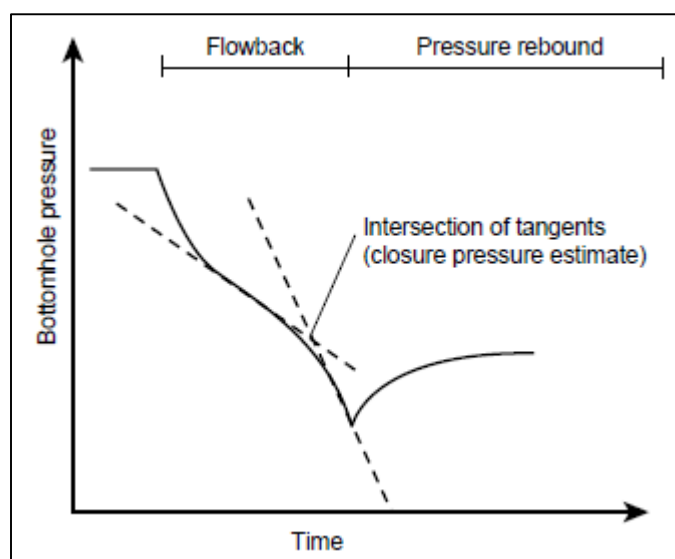
<sup>۴</sup> Plahn

<sup>۵</sup> Pressure Rebound

<sup>۶</sup> Notle



شکل ۲-۸ اثر دبی جریان برگشتی بر فشار (Econimides and Martin, 2007)

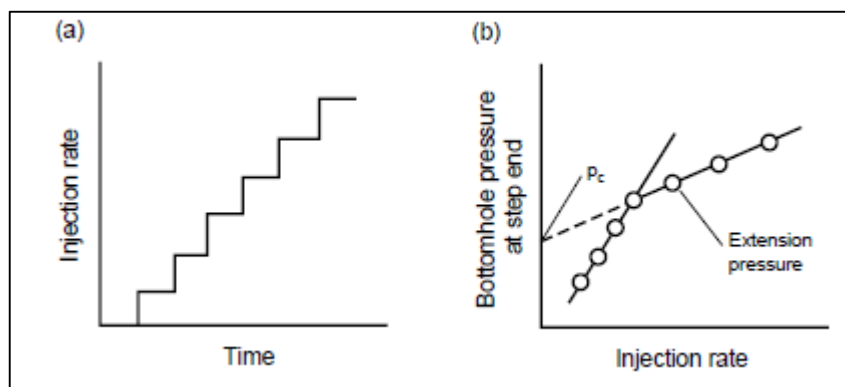


شکل ۲-۹ نمودار پیشنهادی جهت تخمین فشار بندش (Plahn, et al., 1997)

مزیت مهم دیگری که تست پمپاژ/ برگشت جریان دارد این است که در سازندهای شیلی، به دلیل تراوایی کمی که دارند و یا به دلیل خواص هرزروی گل حفاری، شکاف ایجاد شده ممکن است با گذشت زمان بسته نشود. در این گونه مواقع با استفاده از تست برگشت جریان می توان به طور کنترل شده ای فشار را کاهش داد (Lee, et al., 2004).

## ۳-۶-۲ تست تزریق مرحله‌ای (SRT)

تست تزریق مرحله‌ای تنها برای تعیین فشار بندش در مخازن کم‌تراوا به کار می‌رود. این تست معمولاً با استفاده از سیالات تکمیل<sup>۱</sup> چاه انجام می‌شود که البته در مخازن تراوا برای کنترل هرزروی سیال و اطمینان از ایجاد شکاف در دبی‌های کم تزریق، باید از سیالات پلیمری استفاده کرد. در این تست، تزریق در دبی‌های ثابتی که به صورت پله‌ای افزایش پیدا می‌کنند، صورت می‌گیرد و فشار تزریق نهایی برای هر مرحله به صورت جداگانه در برابر دبی پمپاژ رسم می‌شود. مدت زمان هریک از مراحل تزریق باید برابر و کوتاه باشد (معمولاً ۱ تا ۲ دقیقه، مدت زمان موردنیاز برای این که پمپ‌ها دبی را تغییر داده و در یک مقدار ثابت نگه دارند و فشار نیز ثبت شود). میزان افزایش دبی تزریق در هر مرحله نیز تقریباً باید یکسان باشد (شکل ۲a-۱۰). هنگامی که تست تزریق مرحله‌ای به عنوان بخشی از تست کاهش یا برگشت جریان انجام می‌شود، گام آخر برای مدت زمان طولانی‌تری (معمولاً ۵ تا ۱۰ دقیقه) انجام می‌شود تا از ایجاد شکافی با سایز مناسب اطمینان حاصل شود. دبی‌های تزریق معمولاً از ۱ تا ۱۰ بشکه بر دقیقه برای سازندهای با تراوایی متوسط تغییر می‌کند که این مقادیر در سازندهای کم‌تراوا تقریباً نصف می‌شود. به طور ایده‌آل دبی تزریق برای سه مرحله اول باید کم‌تر از فشار توسعه<sup>۲</sup> شکاف باشد که بیانگر تزریق در ماتریس سنگ قبل از شکاف‌زنی است.

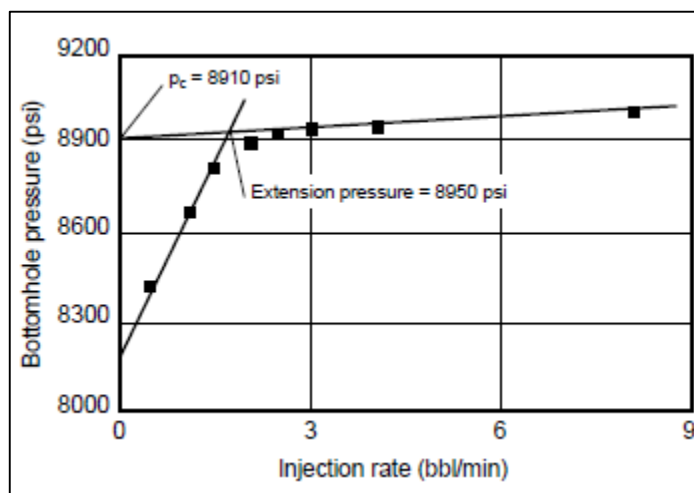


شکل ۲-۱۰ (a) تست تزریق مرحله‌ای (b) نمودار فشار ته‌چاهی در برابر دبی تزریق (Economides and Martin, 2007).

<sup>۱</sup> Completion Fluids

<sup>۲</sup> Extension Pressure

فشار ته‌چاهی در پایان هریک از مراحل تزریق در برابر دبی تزریق رسم می‌شود که از این نمودار می‌توان فشار توسعه و فشار بندش شکاف را به دست آورد (شکل ۲b-۱۰). نمودار شامل دو خط راست است که خط با شیب بیشتر نشان‌دهنده تزریق در ماتریس سنگ بوده و خط با شیب کمتر مربوط به توسعه شکاف است. محل تقاطع این دو خط تخمینی از فشار توسعه شکاف بوده که کران بالایی برای فشار بندش است. به طور معمول فشار توسعه شکاف ۲۰۰-۵۰۰ psi بزرگ‌تر از فشار بندش است (شکل ۲-۱۱) که این مقدار نشان‌دهنده فشار اصطکاکی سیال درون شکاف و مقاومت در برابر توسعه شکاف است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تقاطع خط کم شیب‌تر با محور  $y$  را می‌توان، حتی در غیاب خط نمایانگر تزریق در ماتریس، به عنوان یک تقریب اولیه از فشار بندش در نظر گرفت (Economides and Martin, 2007).



شکل ۲-۱۱ آنالیز فشار در برابر دبی در تست تزریق مرحله‌ای (Economides and Martin, 2007).

یکی از نشانه‌های معتبر بودن تست SRT این است که فشار برونمایی شده‌ی خط نمایانگر تزریق ماتریس در دبی صفر، باید به طور تقریبی برابر با فشار ته‌چاهی قبل از انجام تست باشد. اگر مقدار قابل ملاحظه‌ای سیال از قبل تزریق نشده باشد، فشار متناظر با دبی صفر برابر با فشار مخزن خواهد بود. این کنترل کیفیت را می‌توان به هنگام انجام تست و زمانی که هنوز تغییر شیبی در نمودار فشار-دبی تزریق رخ نداده انجام داد (Economides and Martin, 2007).

## ۲-۶-۴ تست‌های ریزشکاف<sup>۱</sup>

این تست‌ها با استفاده از سیال شکاف‌زنی و در نرخ پمپ‌های از قبل برنامه‌ریزی شده اما با حجم سیال کمتری انجام می‌شوند. با طراحی و انجام درست این تست‌ها می‌توان اطلاعات مهمی درباره هندسه شکاف، اختلاف تنش‌های برجا و ضریب هرزروی سیال<sup>۲</sup> به دست آورد (Jones and Britt, 2009). در ادامه توضیحات مختصری در مورد این تست‌ها آمده است.

## ۲-۶-۴-۱ تست نشت استاندارد<sup>۳</sup>

به طور کلی دو نوع تست نشت (LOT) وجود دارد: تست یکپارچگی فشار<sup>۴</sup> (PIT) و تست یکپارچگی سازند<sup>۵</sup> (FIT). در PIT تا زمانی شیب افزایش فشار کاهش یابد، فشار در چاه افزایش می‌یابد که این کاهش نرخ فشار نشان می‌دهد که نشت اتفاق افتاده است. در FIT فشار تا یک مقدار از قبل تعیین شده افزایش می‌یابد و نشتی رخ نمی‌دهد. FIT صرفاً نشان می‌دهد که حداکثر فشار چاه از تنش اصلی حداقل تجاوز نکرده و شکافی در دیواره یک چاه باز ایجاد نمی‌شود (Zoback, 2007).

تست‌های نشت در زیر لوله‌گذاری سیمان شده، به منظور بررسی یکپارچگی سیمان و تعیین دانسیته سیال حفاری برای ادامه عملیات حفاری انجام می‌شوند. در این تست‌ها چاه در ابتدای آزمایش بسته شده و سیال جهت افزایش تدریجی فشار به داخل چاه پمپ می‌شود. این تست معمولاً کمی بعد از رسیدن به نقطه نشت (LOP) متوقف می‌شود.

اشکال اصلی LOT این است که در آن چرخه دوم یا سوم ایجاد فشار انجام نمی‌شود و ISIP، که می‌توان آن را به عنوان تخمینی از تنش افقی حداقل در نظر گرفت، در چرخه دوم یا سوم به دست می‌آید و نه در چرخه اول. با این حال با توجه به این که این تست‌ها ارزان، ساده و شبیه به تست‌های شکاف

---

<sup>۱</sup> Mini-fracture tests

<sup>۲</sup> Fluid Loss Coefficient

<sup>۳</sup> Standard Leakoff Test

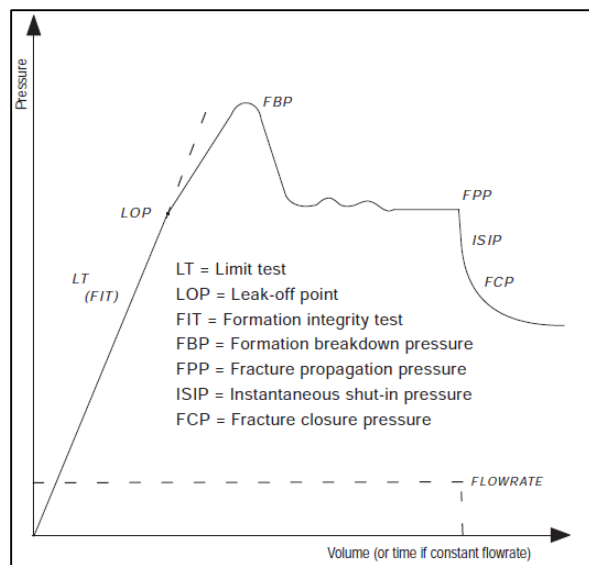
<sup>۴</sup> Pressure Integrity Test

<sup>۵</sup> Formation Integrity Test

هیدرولیکی هستند، به مدت بیش از ۴۰ سال جهت تعیین تنش برای حفاری، طراحی وزن گل، پایداری چاه و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Gang, et al., 2009).

## ۲-۴-۶-۲ تست نشت گسترده<sup>۱</sup> (XLOT)

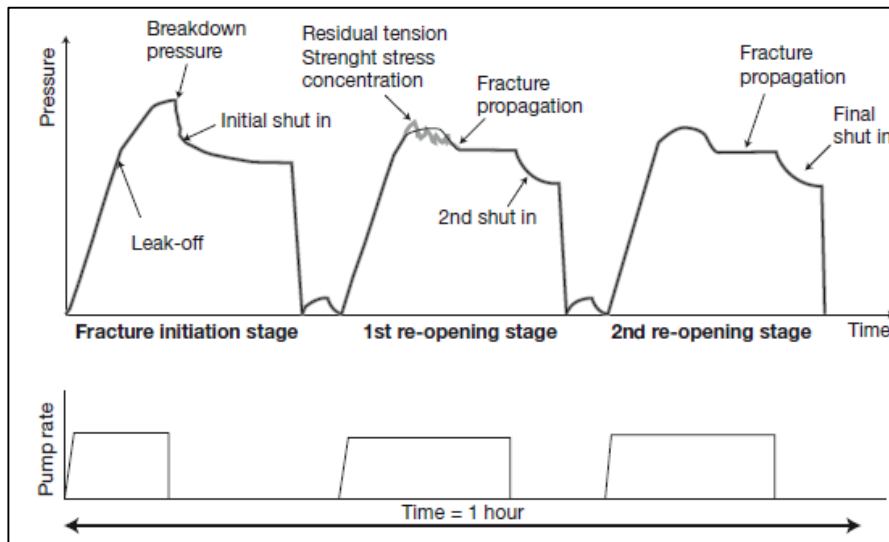
هر دو تست پمپاژ/بستن و پمپاژ/برگشت جریان در واقع نوعی XLOT هستند. با این تفاوت که در آن‌ها از سیال شکاف‌زنی برای تزریق استفاده نمی‌شود. شکل ۲-۱۲ نمودار فشار-زمان را در یک تست ریزشکاف یا XLOT نشان می‌دهد. نرخ پمپاژ به داخل چاه ثابت است، بنابراین زمانی که حجم چاه ثابت است فشار باید به صورت خطی افزایش پیدا کند. نقطه‌ای که در آن نمودار از حالت خطی خارج می‌شود به عنوان نقطه نشت (LOP) شناخته می‌شود که نقطه‌ای است که در آن شکاف هیدرولیکی ایجاد شده است. چرا که در یک نرخ پمپاژ ثابت، فشار چاه کاهش نخواهد یافت مگر این که حجم سیستم افزایش پیدا کرده باشد. بنابراین با فرض چشم‌پوشی از مقاومت چاه (به دلیل دبی بالای جریان و بالا بودن گرانیوی سیال) و اثرات پیچش<sup>۲</sup> بین شکاف ایجاد شده و چاه، می‌توان گفت که LOP تقریباً برابر با تنش اصلی حداقل است (Zoback, 2007). اجرای تست XLOT شبیه به LOT است، با این تفاوت که در XLOT دو یا چند چرخه ایجاد فشار انجام می‌شود (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۲ نمودار فشار در مقابل حجم (یا زمان) در تست XLOT (Zoback, 2007).

<sup>۱</sup> Extended Leak off Test

<sup>۲</sup> Tortuosity



شکل ۲-۱۳ یک تست XLOT معمول که در آن سه چرخه ایجاد فشار انجام شده (Nauroy, 2011)

## ۲-۶-۳ مقایسه LOT، XLOT و شکاف‌زنی هیدرولیکی

مقالات متعددی در رابطه با مقایسه LOT و XLOT نوشته شده است که به بیان اختلاف‌ها و مقایسه عملکرد آن‌ها پرداخته‌اند. در رابطه با مقایسه LOT، XLOT و شکاف‌زنی هیدرولیکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Gang, et al., 2009):

(۱) انجام LOT و XLOT بدون پکر صورت می‌گیرد. در حالی که در شکاف‌زنی هیدرولیکی به منظور اطمینان از آب‌بندی<sup>۱</sup> زون مورد نظر استفاده از پکر ضروری است.

(۲) تراکم‌پذیری گل حفاری، انبساط لوله‌جداری و نشت سیمان می‌تواند بر فشارهای اندازه‌گیری شده در LOT اثر بگذارد و باعث کاهش دقت آن در پیش‌بینی تنش شود.

(۳) اگر طول قسمت باز چاه بیشتر از چند متر باشد، به دلیل اثرات ترک‌های موجود در سازند<sup>۲</sup>، با استفاده از داده‌های LOT نمی‌توان تنش را به خوبی تخمین زد. در این حالت تست به جای ایجاد یک شکاف جدید، بیشتر شبیه باز کردن مجدد شکاف‌های موجود در چاه است.

<sup>۱</sup> Seal-off

<sup>۲</sup> Pre-existing Cracks

(۴) در XLOT در اثر پمپاژ سریع حجم قابل ملاحظه‌ای از آب، ممکن است چرخش<sup>۱</sup> شکاف رخ دهد.

(۵) عدم امکان تشخیص نحوه جهت‌یابی شکاف کماکان یکی از اشکالات XLOT است که باعث شده این تست نسبت به تست شکاف‌زنی هیدرولیکی از اعتبار کمتری برخوردار باشد.

به طور کلی حجم سیال پمپ شده در تست‌های نشت، بسیار کمتر از شکاف‌زنی هیدرولیکی است، به طوری که گسترش افقی و عمودی شکاف در این تست‌ها محدود به شعاعی برابر با چندبرابر شعاع چاه می‌شود. با توجه به این حجم کم سیال، شکاف ایجاد شده برای اندازه‌گیری تنش‌های دوردست مناسب نیست. با این حال این تست‌ها هنوز هم در صنعت به طور گسترده‌ای به کار می‌روند. معمولاً شکاف هیدرولیکی در سنگ‌های با تراوایی بالا و تست‌های LOT و XLOT در شیل‌ها که تراوایی بسیار کم‌تری دارند انجام می‌شود (Lee, et al., 2004).

## ۷-۲ مدل‌های هندسی شکاف هیدرولیکی

در گذشته اکثر روش‌های طراحی شکاف هیدرولیکی به استثنای شبیه‌سازی‌های عددی، بر اساس مدل PK<sup>۲</sup> و KZ<sup>۳</sup> انجام می‌شد. در این دو مدل طول و عرض شکستگی توابعی از معادلات جریان سیال، الاستیسیته و معادلات پیوستگی<sup>۴</sup> هستند. هر دو مدل فرض می‌کنند که ارتفاع شکاف ثابت است. تفاوت دو مدل در فرضیات آن‌هاست، به طوری که مدل PK شرایط کرنش صفحه‌ای<sup>۵</sup> را در صفحه قائم و مدل KZ کرنش صفحه‌ای را در صفحه افقی در نظر می‌گیرد. روش PK برای شکاف‌های طویل ( $\frac{x_f}{h_f} \geq 1$ ) مناسب است، در حالی که مدل KZ برای شکاف‌های کوتاه ( $\frac{x_f}{h_f} \leq 1$ ) مناسب‌تر است (Van Eekelen, 1982). در ادامه مدل‌های هندسی شکاف هیدرولیکی توضیح داده شده‌اند.

### ۱-۷-۲ مدل PKN

<sup>۱</sup> Rotation

<sup>۲</sup> Perkins and Kern

<sup>۳</sup> Khristianovich and Zheltov

<sup>۴</sup> Continuity Equations

<sup>۵</sup> Plane Strain



مدل دوبعدی‌ای که پرکینز و کرن<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی شکاف هیدرولیکی توسعه دادند، بعدها توسط نرگدن<sup>۱</sup> اصلاح و به مدل PKN تبدیل شد. کرنش صفحه‌ای قائم در طول یک شکاف که طول آن بزرگتر از ارتفاع آن است ( $\frac{x_f}{h_f} \geq 1$ )، به صفحات قائم این امکان را می‌دهد که در مقابل یکدیگر بلغزند (شکل ۲-۱۴). بنابراین در مدل PKN سختی سازند<sup>۲</sup> در صفحات قائم عمود بر جهت انتشار شکاف متمرکز شده است (Van Eekelen, 1982). سطح مقطع شکاف در این صفحات قائم بیضی‌شکل فرض شده، ارتفاع شکاف ثابت و ازسختی سازند در صفحه افقی صرف نظر می‌شود.

در این مدل حداکثر عرض شکاف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w_{max} = 3.57 \left( \frac{\mu x_f}{E} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2-12)$$

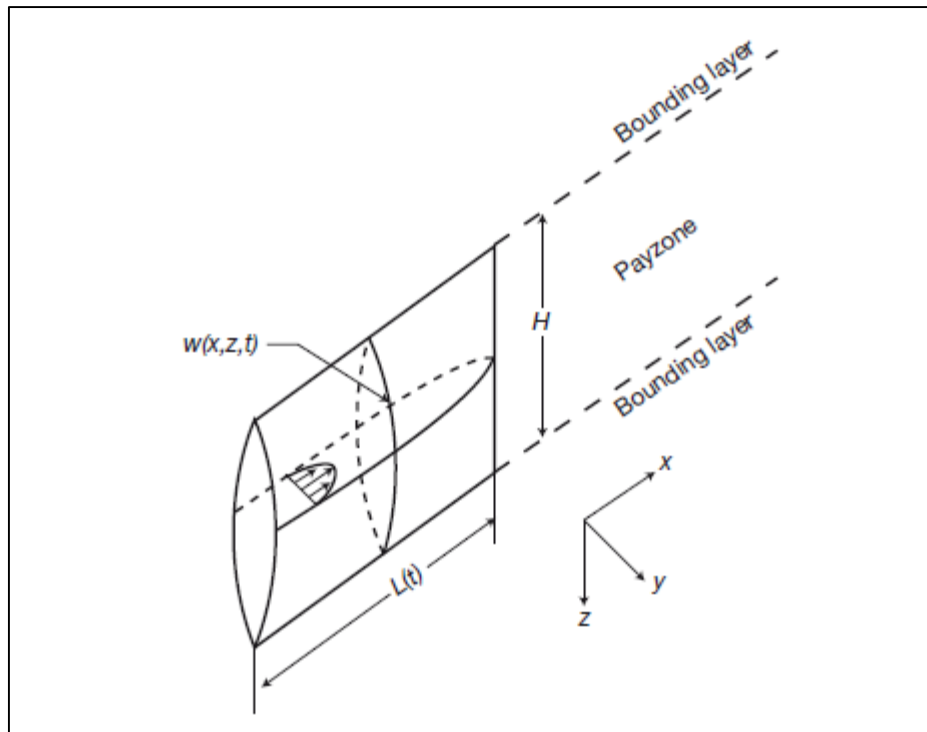
که در آن  $\mu$  ویسکوزیته سیال تزریق شده،  $x_f$  طول شکاف،  $i$  دبی تزریق و  $E$  مدول الاستیسیته یا مدول یانگ<sup>۳</sup> است.

---

<sup>۱</sup> Norgden

<sup>۲</sup> Formation Stiffness

<sup>۳</sup> Young's Modulus



شکل ۲-۱۴ مدل PKN (Nauroy, 2011)

با در نظر گرفتن ضریب شکل<sup>۱</sup> عرض میانگین شکاف برابر است با:

$$w_{avg} = 2.24 \left( \frac{\mu i x_f}{E} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (۱۳-۲)$$

چنانچه معادله عرض PKN با موازنه مواد توأم شود، با در نظر گرفتن دبی تزریق ثابت و با این فرض این که نشتی رخ نمی‌دهد، فشار خالص<sup>۲</sup> در چاه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{net} = 1.52 t^{\frac{1}{5}} \left( \frac{E^4 \mu i^2}{h_f^6} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (۱۴-۲)$$

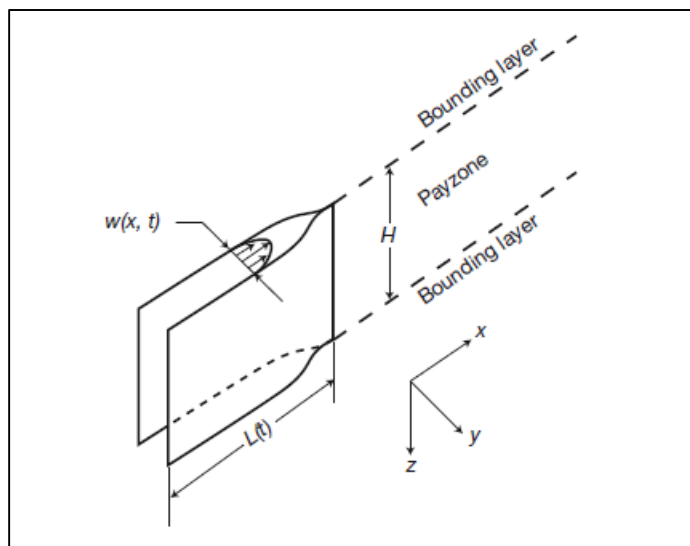
که در آن  $P_{net}$  فشار خالص در چاه،  $t$  زمان و  $h_f$  ارتفاع شکاف است (Valko and ekonomides, 1995).

<sup>۱</sup> Shape Factor

<sup>۲</sup> Net Pressure

## ۲-۷-۲ مدل KGD

مدل KZ نیز توسط گیرتسما<sup>۱</sup> و دکلرک<sup>۲</sup> توسعه داده شد و مدل KGD نام گرفت. در این مدل سختی سازند در صفحه افقی متمرکز شده و به دلیل شرایط کرنش صفحه‌ای افقی، سطح مقطع شکاف مستطیلی شکل است (شکل ۲-۱۵). در این مدل از سختی سازند در صفحه قائم صرف نظر می‌شود.



شکل ۲-۱۵ مدل KGD (Nauroy, 2011)

در این مدل حداکثر عرض شکاف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w_{max} = 3.22 \left( \frac{\mu x_f^2}{E h_f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (۱۵-۲)$$

با در نظر گرفتن ضریب شکل چاه، عرض میانگین شکاف برابر است با:

$$w_{avg} = 2.53 \left( \frac{\mu x_f}{E h_f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (۱۶-۲)$$

همچنین رابطه فشار خالص، با در نظر گرفتن دبی تزریق ثابت و نبود نشت به صورت زیر است:

$$P_{net} = 1.09 t^{\frac{1}{3}} (E^2 \mu)^{\frac{1}{3}} \quad (۱۷-۲)$$

<sup>۱</sup> Geertsma

<sup>۲</sup> Deklerk

با مقایسه عرض میانگین در دو مدل  $KGD$  و  $PKN$  مشخص می‌شود که نسبت عرض میانگین  $KGD$  به  $PKN$  برابر با  $0.95 \left( \frac{2x_f}{h_f} \right)^{\frac{1}{4}}$  است (Valko and Economides, 1995).

مدل‌های ساده‌شده  $PKN$  و  $KGD$  در مورد سازندهای چندلایه مناسب نیستند. دلیل آن این است که خواصی مانند الاستیسیته، چقرمگی<sup>۱</sup> شکاف، شکل‌پذیری<sup>۲</sup>، تراوایی و چسبندگی سطح مشترک<sup>۳</sup> در لایه-های مختلف متفاوت است و بنابراین انتظار می‌رود که عرض شکاف در لایه‌های مختلف متفاوت باشد. علاوه بر این مدل‌های  $PKN$  و  $KGD$  فرض می‌کنند که ارتفاع شکاف ثابت بوده و بر اساس اثر لایه‌های بالایی و پایینی زون موردنظر تخمین زده می‌شود. این ارتفاع تخمینی بر محاسبات طول و عرض و انتقال پروپانت اثر می‌گذارد.

ممانعت پروپانت<sup>۴</sup> به معنای جلوگیری از انتقال پروپانت به داخل سازند هدف است و همان‌طور که در شکل ۲-۱۶ می‌توان دید، زمانی اتفاق می‌افتد که میان لایه‌هایی با سختی بالاتر در بین لایه‌های سازند هدف وجود داشته باشد (Van Eekelen, 1982). مدل‌های شبه‌سه‌بعدی<sup>۵</sup> به منظور وارد کردن اثرات سختی سازندهای لایه‌ای و طراحی ارتفاع شکاف در این شرایط توسعه یافته‌اند.

## ۲-۷-۳ مدل‌های شبه‌سه‌بعدی (P3D)

استفاده از مدل‌های دوبعدی در دهه‌های گذشته با موفقیت همراه بوده است، اما این مدل‌ها نمی‌توانند انتشار قائم و جانبی شکاف را به طور همزمان شبیه‌سازی کنند. مدل شبه‌سه‌بعدی (P3D) توسعه یافته مدل  $PKN$  است با این تفاوت که سطح مقطع آن بیضی‌شکل نیست و ارتفاع شکاف در آن تابع فاصله از چاه و زمان است. این مدل‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: الف) مدل‌هایی که طول شکاف را به سلول‌هایی تقسیم می‌کنند که هندسه آن‌ها به فشار سیال بستگی دارد و ب) مدل‌هایی که از نمایش هندسه کل شکاف استفاده می‌کنند (Nauroy, 2011).

---

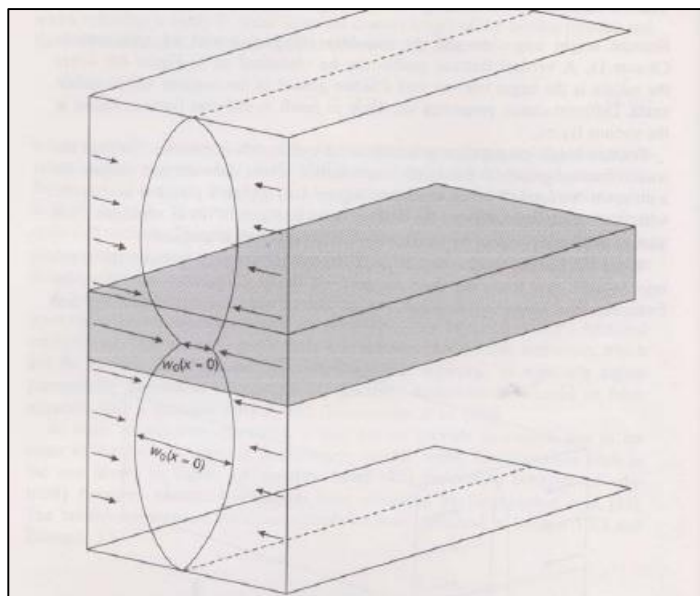
<sup>۱</sup> Toughness

<sup>۲</sup> Ductility

<sup>۳</sup> Interface Bonding

<sup>۴</sup> Proppant Screenout

<sup>۵</sup> Pseudo-3D



شکل ۲-۱۶ رشد ارتفاع شکاف همراه با کاهش عرض به دلیل وجود میان لایه‌ای با سختی زیاد (Valko and Economides, 1995).

مدل‌های شبه‌سه بعدی شکل شکاف را بر اساس مشخصات سنگ تعیین می‌کنند اما مسئله جریان سیال را به طور کامل حل نمی‌کنند، این مسئله در مدل‌های سه بعدی کامل<sup>۱</sup> مد نظر قرار می‌گیرد (Holditch, et al., 1987).

در این روش معادلات بر اساس هندسه‌های ساده (دایره و بیضی) پایه‌ریزی شده، عرض شکاف تابعی از محل آن و فشار بوده و شکاف در طول و ارتفاع گسترش می‌یابد. این روش نیاز به داده‌های بسیار و با دقت کافی برای انجام محاسبات فشرده دارد (Rahman, et al., 2010).

## ۲-۷-۴ مدل‌های سه‌بعدی کامل

مدل‌های شبه‌سه‌بعدی امکان مدل‌سازی شکاف‌هایی با جهت‌گیری و شکل متفاوت (مانند شکاف‌هایی که در چاه‌های انحرافی شکل می‌گیرند) را ندارند. مدل‌های سه‌بعدی کامل، توانایی توصیف دقیق‌تر هندسه شکاف را دارند اما اجرای این مدل‌ها پیچیده‌تر است. مدل‌های سه‌بعدی کامل توسط ستاری<sup>۲</sup> و کلیری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> Fully 3D Models

<sup>۲</sup> Settari

<sup>۳</sup> Cleary

(۱۹۸۴) توسعه یافته‌اند. در این مدل یک سری معادله با در نظر گرفتن موارد زیر فرمول‌بندی شده‌اند (Settari and Cleary, 1984):

(۱) جریان دوفازی و سه‌بعدی در مخزن

(۲) جریان دوفازی غیرنیوتونی در شکاف و انتقال حرارت، با در نظر گرفتن هرزروی‌های سیال به علت تنش روباره

(۳) انتشار عمودی و جانبی شکاف

(۴) انتقال پروپانت، هیدرولیک چاه، روابط PVT و خصوصیات رئولوژی سیال مخزن و شکاف.

یکی از مشکلات مدل‌های سه بعدی نیاز به تعداد زیاد پارامترهای ورودی، حساسیت مدل نسبت به این پارامترها و در نتیجه دشواری در تعیین تمام داده‌های مورد نیاز برای مدلسازی است.

## ۲-۸ طول شکاف بهینه

با توجه به این که هدف اصلی طراحی شکاف هیدرولیکی بیشینه کردن عملکرد مخزن و سود حاصل از عملیات با کمترین هزینه است، لذا طول شکاف در صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. عرض و تراوایی شکاف، نیم‌طول<sup>۱</sup> مفروض شکاف و تراوایی مخزن پارامترهایی هستند که جهت تخمین عملکرد پس از عملیات<sup>۲</sup> به کار می‌روند. جهت تخمین هزینه‌های عملیات، ارزیابی حجم سیال مورد نیاز جهت شکاف‌زنی، مقدار پروپانت، دبی تزریق و غیره می‌بایست تعیین شوند. این هزینه‌ها از ارزش فعلی کم شده تا ارزش خالص فعلی<sup>۳</sup> (NPV) برای یک نیم‌طول معین به دست آید (Valko and Economides, 1995).

نیم‌طول شکاف را نمی‌توان زیاد در نظر گرفت، چرا که طول بیشتر نیاز به هزینه‌های بالاتری نیز دارد. علاوه بر این طول بیشتر همیشه باعث افزایش NPV نمی‌شود. در شکل ۲-۱۷ گاز تولیدی از شکاف‌هایی با نیم‌طول‌های متفاوت با هم مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر درآمد<sup>۴</sup> با افزایش مدت تولید زیاد نمی‌شود بلکه بهترین دوره تولید بر اساس NPV تعیین می‌شود که تابعی از طول شکاف است (Hareland and Rampersad, 1994).

---

<sup>۱</sup> Half-length

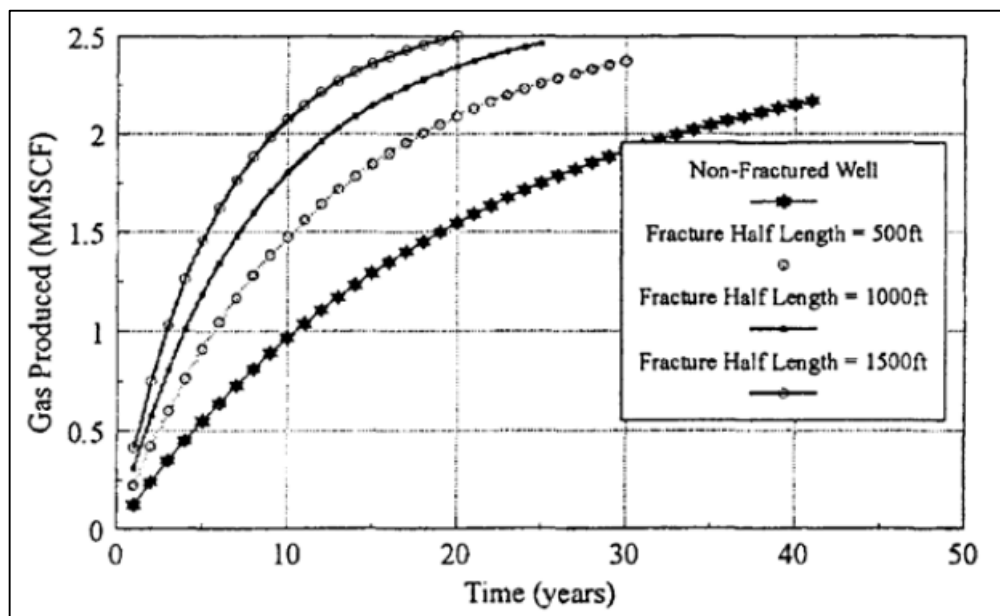
<sup>۲</sup> Post Treatment Performance

<sup>۳</sup> Net Present Value

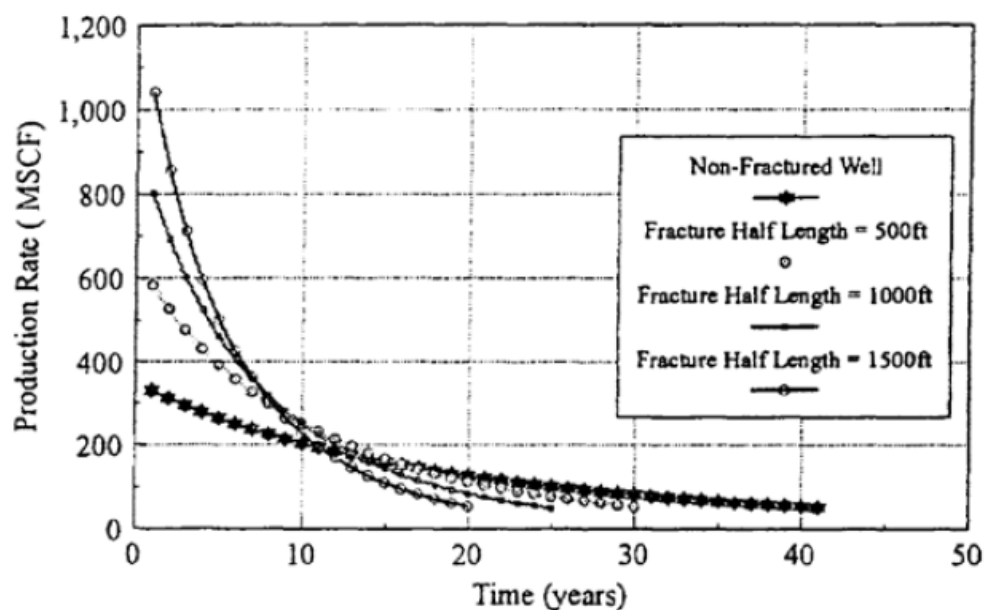
<sup>۴</sup> Revenue

همان‌طور که در شکل ۲-۱۸ ملاحظه می‌شود، در مخازن کم‌تراوا مانند شیل‌های گازی، ممکن است طول شکاف بیشتر در ابتدا باعث افزایش دبی تولید گردد، اما این دبی بالای تولید، پس از دوره کوتاهی کاهش می‌یابد. بنابراین برای هر مورد خاص، با توجه به مشخصات مخزن، یک نیم‌طول شکاف منحصربه‌فرد باید تعیین شود (Hareland and Rampersad, 1994).

به طور معمول نیم‌طول شکاف از مقادیر کمتر از ۱۰۰ متر برای سازندهای تراوا تا مقادیر بیش از ۵۰۰ متر برای مخازن کم‌تراوا تغییر می‌کند (Valko and Economides, 1995).

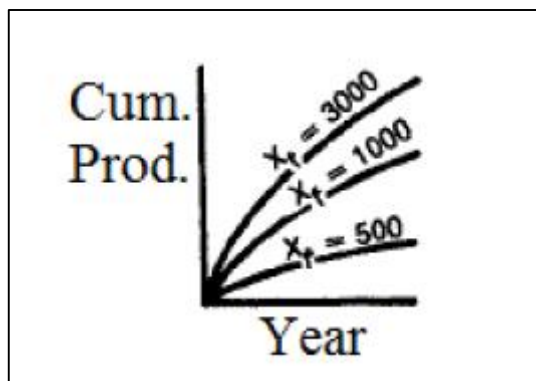


شکل ۲-۱۷ حجم تجمعی گاز تولید شده با گذشت زمان برای نیم‌طول‌های مختلف (Hareland and Rampersad, 1994)



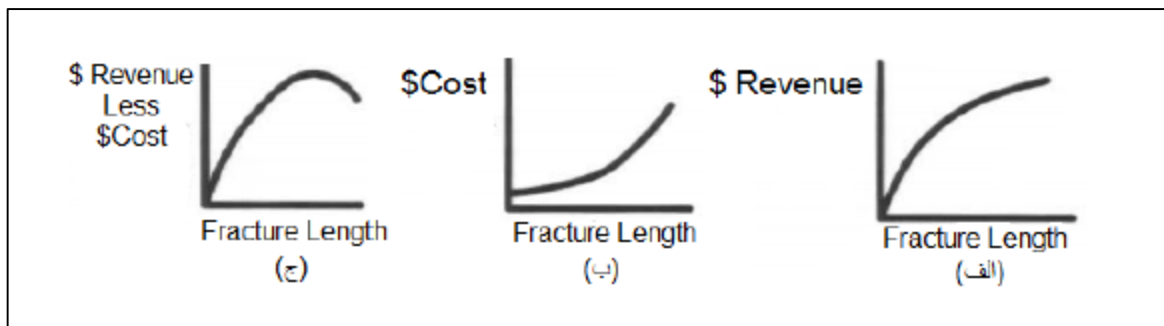
شکل ۲-۱۸ کاهش تولید گاز با گذشت زمان برای نیم‌طول‌های مختلف (Hareland and Rampersad, 1994)

با توجه به شکل ۲-۱۹ نیز می‌توان نتیجه گرفت که با بیشتر شدن طول شکاف، تولید تجمعی و منافع حاصل از افزایش تولید مواد هیدروکربوری بیشتر می‌شود. اما شکل ۲-۲۰ (الف) و (ب) نشان می‌دهد که با بیشتر شدن طول شکاف، شدت درآمد (شیب نمودار درآمد) کاهش و شدت هزینه افزایش می‌یابد. لذا اگر نمودار تفاضل درآمد از هزینه مطابق با شکل ۲-۲۰ (ج) رسم شود، طول بهینه شکاف هیدرولیکی مشخص خواهد شد (Veatch, 1983).



شکل ۲-۱۹ رابطه طول شکاف و تولید تجمعی (Veatch, 1983)





شکل ۲-۲۰ الف و ب) تغییرات درآمد و هزینه نسبت به طول و ج) طول بهینه متناسب با تفاضل درآمد از هزینه (Veatch, 1983)

## ۲-۹ روش‌های نگاشت مستقیم<sup>۱</sup> شکاف هیدرولیکی

دو فناوری اصلی جهت نگاشت مستقیم شکاف‌های هیدرولیکی در صنعت نفت وجود دارد که هر کدام از آن‌ها ویژگی‌های مختلفی از شکاف را اندازه‌گیری می‌کنند. این دو روش عبارتند از نگاشت میکرو لرزه‌ای<sup>۲</sup> و استفاده از شیب‌سنج‌ها<sup>۳</sup> (Due, 2008). یکی از کاستی‌های این روش‌ها این است که رشد کلی شکاف را نشان می‌دهند اما اطلاعاتی در مورد جزئیات بیشتر مانند طول مؤثر شکاف یا گذردهی شکاف<sup>۴</sup> ارائه نمی‌دهند. قابلیت تفکیک<sup>۵</sup> این روش‌ها با فاصله خارج از مرکز<sup>۶</sup> آن‌ها از شکاف هیدرولیکی نسبت عکس دارد. در هر دو روش ابزارهای اندازه‌گیری در چاه مجاور<sup>۷</sup> که در فاصله‌ای از چاه اصلی حفر شده است، قرار می‌گیرند. محل قرارگیری این ابزار در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است (Cipolla and Wright, 2002).

<sup>۱</sup> Direct Mapping Technique

<sup>۲</sup> Microseismic Mapping

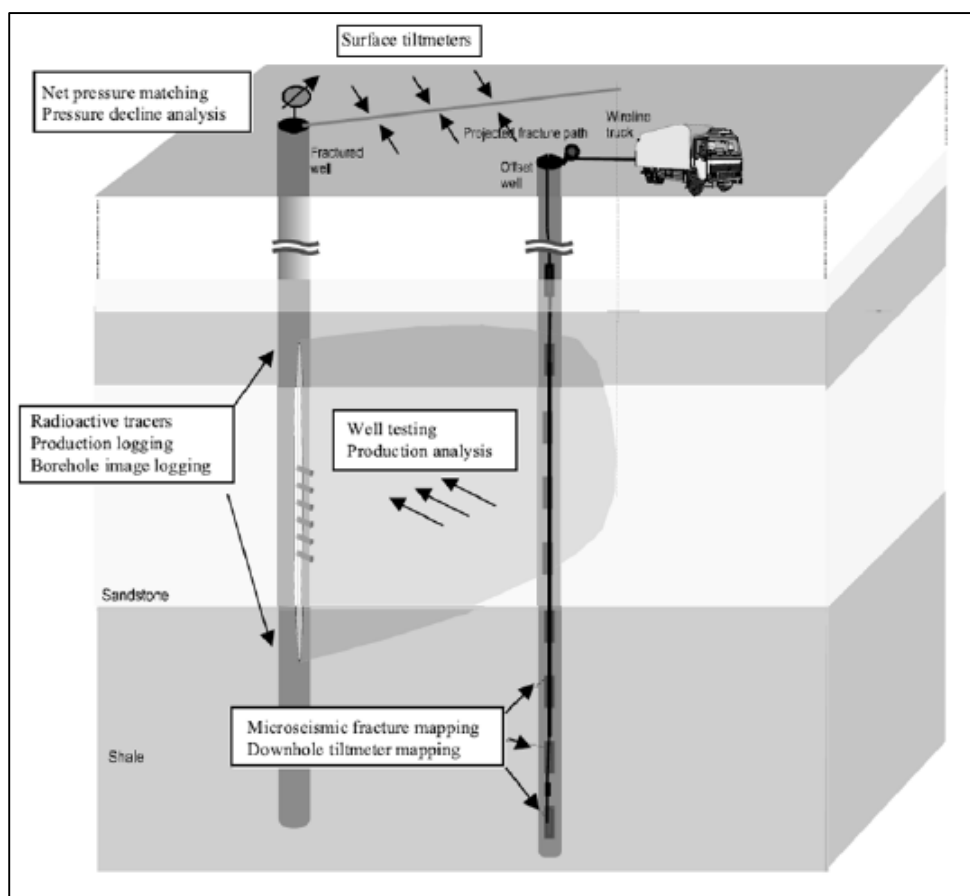
<sup>۳</sup> Tiltmeter

<sup>۴</sup> Fracture Conductivity

<sup>۵</sup> Resolution

<sup>۶</sup> Offset Distance

<sup>۷</sup> Offset Well



شکل ۲- ۲۱ روش‌های تشخیص شکاف (Cipolla and Wright, 2002)

## ۲-۹-۱ شیب‌سنج‌ها

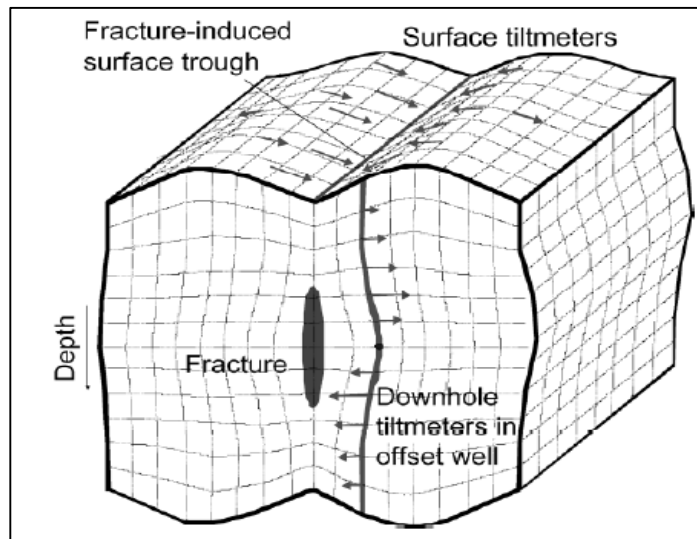
اصول کار شیب‌سنج‌ها بسیار ساده است. ایجاد شکاف هیدرولیکی باعث تغییرشکل<sup>۱</sup> زمین اطراف آن می‌شود. این تغییرشکل (با فرض الاستیک بودن آن) را می‌توان با استفاده از شیب‌سنج‌های درون‌چاهی<sup>۲</sup> که در چاه‌های مرزی قرار داده شده‌اند و یا به وسیله شیب‌سنج‌های سطحی<sup>۳</sup> قرار گرفته بر سطح زمین اندازه‌گیری کرد (شکل ۲-۲۲). شیب‌سنج‌های سطحی جهت‌گیری شکاف را اندازه‌گیری می‌کنند، درحالی

<sup>۱</sup> Deformation

<sup>۲</sup> Downhole Tiltmeter

<sup>۳</sup> Surface Tiltmeter

که شیب‌سنج‌های درون‌چاهی برای به دست آوردن هندسه شکاف به کار می‌روند. در ادامه توضیحاتی در مورد این دو نوع شیب‌سنج آمده است.



شکل ۲-۲۲ اصول اندازه‌گیری شیب‌سنج‌ها (Cipolla and Wright, 2002)

## ۲-۹-۱-۱ شیب‌سنج‌های سطحی

یک شیب‌سنج به طور معمول از آرایه‌ای از ۱۲ تا ۱۶ دستگاه اندازه‌گیری تشکیل شده که در چاه‌هایی با عمق کم (۱۰ تا ۴۰ فوت) کار گذاشته شده‌اند. این چاه‌ها در فواصل شعاعی برابر، که بسته به عمق ناحیه عملیات و ابعاد پیش‌بینی‌شده شکاف، فاصله آن‌ها می‌تواند از چند صد فوت تا ۱ مایل (۱/۶ کیلومتر) تغییر کند، حفر شده‌اند. شیب‌سنج‌ها معمولاً در عمقی برابر با ۰/۴ کل عمق چاه قرار می‌گیرند (Cipolla and Wright, 2002).

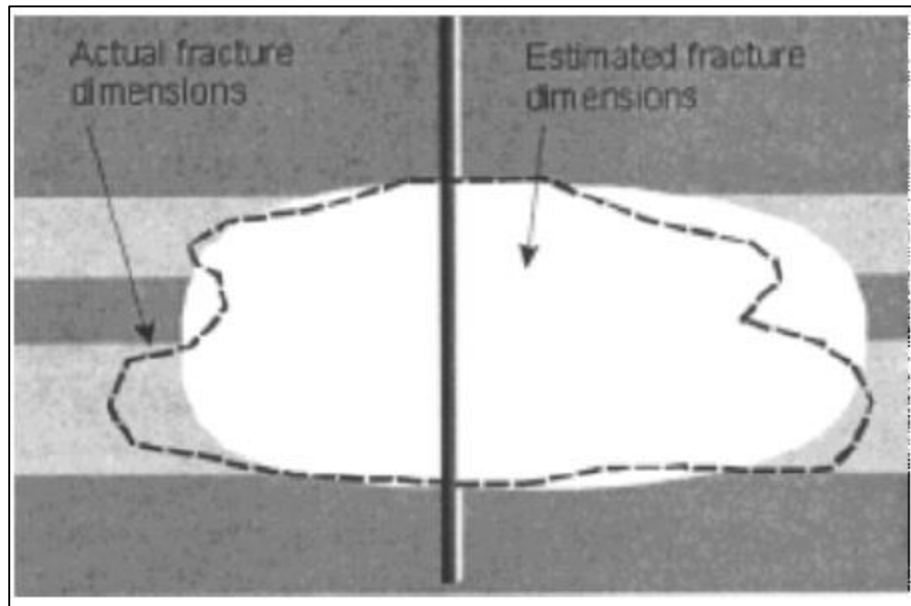
مقدار تغییر شکل القایی در سطح به دلیل فاصله از شکاف بسیار کوچک است، بنابراین نمی‌توان آن را به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد. در عوض شیب‌سنج‌ها گرادیان جابجایی<sup>۱</sup> را اندازه‌گیری می‌کنند که تابعی از آزمونوت، شیب، عمق تا مرکز شکاف و حجم شکاف است (Wright, et al., 1998).

## ۲-۹-۱-۲ شیب‌سنج‌های درون‌چاهی

اصول کار این شیب‌سنج‌ها شبیه به شیب‌سنج‌های سطحی است با این تفاوت که به جای قرار گرفتن در سطح، در یک یا چند چاه مرزی و در عمق شکاف قرار می‌گیرند. شیب‌سنج‌های درون‌چاهی نگاهی از

<sup>۱</sup> Displacement Gradient

تغییر شکل زمین اطراف شکاف را ارائه می‌دهند. بنابراین همان‌طور که در شکل ۲-۲۳ دیده می‌شود، آن‌چه که به دست می‌آید تخمینی از یک بیضی‌گون است که به خوبی ابعاد شکاف را تقریب می‌زند (Wright, et al., 1998).



شکل ۲-۲۳ ابعاد واقعی و ابعاد تخمین زده شده با استفاده از شیب‌سنج درون‌چاهی (Wright, et al., 1998)

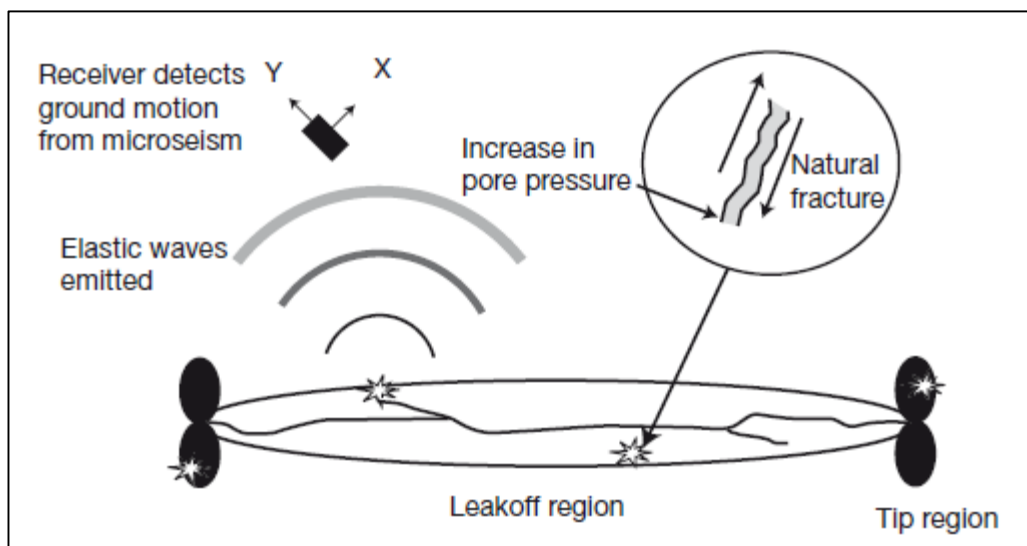
به طور معمول شیب‌سنج‌های درون‌چاهی نسبت به شیب‌سنج‌های سطحی در فاصله نزدیک‌تری نسبت به شکاف قرار دارند و بنابراین به ابعاد شکاف حساس‌ترند (Cipolla and Wright, 2002) و همچنین کیفیت داده‌های به دست آمده از آن‌ها جهت تعیین ارتفاع شکاف بهتر است (Jones and Britt, 2009).

## ۲-۹-۲ نداشت میکرو لرزه‌ای

تئوری و نداشت میکرو لرزه‌ای، بر اساس لرزه‌شناسی<sup>۱</sup> است. میکرو لرزه‌ها مشابه با زمین لرزه اما در فرکانس‌های بسیار بیشتر (۲۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز)، موج‌های فشاری (P) و برشی (S) الاستیک منتشر می‌کنند (Jones and Britt, 2009). در حین شکاف‌زنی هیدرولیکی تنش سازند نسبت به فشار خالص شکاف‌زنی و فشار منفذی به خاطر نشت سیال شکاف‌زنی افزایش می‌یابند. این افزایش فشار منفذی و افزایش تنش‌ها

<sup>۱</sup> Seismology

در نوک شکاف باعث وقوع لغزش برشی<sup>۱</sup> می‌شود (شکل ۲-۲۴). فناوری میکرولرزه‌ای از روش‌های لرزه-شناسی استفاده می‌کند تا وقوع لغزش‌های برشی القایی در حین شکاف‌زنی را، با استفاده از گیرنده‌هایی که در چاه‌های مرزی قرار داده شده‌اند، شناسایی و تعیین محل کند (Jones and Britt, 2009).



شکل ۲-۲۴ نگاشت شکاف هیدرولیکی با استفاده از میکرولرزه (Nauroy, 2011).

در این روش آرایه‌ای از ژئوفون<sup>۲</sup>‌های سه‌محوره یا شتاب‌سنج‌ها در چاه‌های مرزی و در عمق شکاف کار گذاشته می‌شوند. سپس ژئوفون‌ها در جهت معینی قرار داده شده و داده‌های لرزه‌ای ثبت می‌شوند. در نهایت بر این اساس میکرولرزه‌ها و محل آن‌ها تعیین می‌شود. تعیین محل وقایع زمین‌لرزه‌ای، نیاز به تعیین زمان ورود<sup>۳</sup> موج برشی و فشاری و تفسیر سرعت این موج‌ها دارد. سرعت موج‌های برشی و فشاری معمولاً با استفاده از نگار صوتی دوقطبی<sup>۴</sup> به دست می‌آید. در نهایت از داده‌های میکرولرزه‌ای به دست آمده جهت تعیین آزمون و هندسه شکاف استفاده می‌شود (Due, 2008).

## ۲-۱۰ جمع‌بندی

در این فصل مطالبی مقدماتی در رابطه با سابقه شکاف هیدرولیکی، نحوه انجام عملیات، مواد و تجهیزات لازم برای انجام عملیات و همچنین کاربردهای این عملیات ارائه شد.

<sup>۱</sup> Shear Slippage

<sup>۲</sup> Geophone

<sup>۳</sup> Arrival

<sup>۴</sup> Dipole Sonic

همان گونه که ذکر شد شکاف هیدرولیکی یکی از متداول ترین و اقتصادی ترین روش های تحریک چاه و افزایش تولید نفت و گاز در مخازن با تراوایی کم بوده و هدف اصلی از آن ایجاد یک مسیر جریان رسانای سیال و حذف آسیب سازند است.

اولین عملیات شکاف هیدرولیکی موفق در سال ۱۹۴۹ انجام شد و پس از آن استفاده از این عملیات به سرعت گسترش پیدا کرد، به طوری که تا کنون بیش از ۲/۵ میلیون شکست چاه در سراسر دنیا انجام شده است. به طور کلی انجام این عملیات شامل سه مرحله پد، پمپاژ پروپانت و جابه جایی است. هدف از مرحله پد شکست سازند است و بیشترین زمان پمپاژ نیز در همین مرحله صرف می شود. پس از این مرحله پروپانت به داخل سازند پمپ می شود تا از بسته شدن شکاف جلوگیری کند. مرحله آخر نیز مرحله جابه جایی است که هدف از آن شستن شن و ماسه و تمیز کردن لوله هاست.

در این فصل ابتدا توضیحاتی در مورد مکانیسم شکاف هیدرولیکی، فشار ایجاد و شکست سازند و روابط مربوط به آن ها ارائه شد. شکاف هیدرولیکی همواره در جهت حداقل مقاومت شروع به رشد می کند و سپس جهت آن به سمت جهت عمود بر تنش اصلی حداقل تغییر خواهد کرد.

در ادامه فصل روش های مختلف برای اندازه گیری میدانی تنش های برجا بررسی شد. توضیحاتی در رابطه با تست های پمپاژ/ بستن، پمپاژ/ برگشت جریان، تست های تزریق مرحله ای و تست های ریزشکاف ارائه شد و کاربردها و تفاوت های آن ها توضیح داده شد. به طور کلی تست پمپاژ/ بستن برای به دست آوردن هرزروی سیال در سازند و هندسه شکاف مورد استفاده قرار می گیرد. از تست پمپاژ/ برگشت جریان نیز می توان برای تخمین فشار بندش استفاده کرد. همچنین از تست های ریزشکاف مانند تست نشت استاندارد (LOT) و نشت گسترده (XLOT) می توان اطلاعات مهمی درباره هندسه شکاف، اختلاف تنش های برجا و ضریب هرزروی سیال به دست آورد.

در بخش بعدی این فصل توضیحاتی در مورد مدل های هندسی شکاف هیدرولیکی مانند مدل PKN، KGD، مدل شبه سه بعدی و مدل سه بعدی کامل ارائه شده است. در انتها نیز توضیحات مختصری در مورد روش های نگاشت مستقیم شکاف هیدرولیکی آمده است.

## فصل سوم

مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه‌ها در میدان اهواز

### ۳-۱ مقدمه

مدل ژئومکانیکی یک بعدی یک نمایش عددی از وضعیت تنش‌های برجا و خواص مکانیکی لایه‌های زمین در یک چاه است. کمتر فعالیتی در مراحل اکتشاف و تولید وجود دارد که مدل‌های ژئومکانیکی قادر به بررسی آن نباشند. مطالعه کامل میدان در مراحل اکتشافی، تعیین پنجره گل ایمن جهت حفاری، بررسی تغییرات تنش، فشار منفذی، نفوذپذیری، نشست سطح زمین و حرکت گسل‌ها در حین تولید از میادین و بررسی تأثیرات تزریق گاز و آب به میادین بر روی تولید و پایداری چاه‌ها و گسل‌ها تنها گوشه‌ای از کاربرد مدل‌سازی ژئومکانیکی در صنعت نفت و گاز است (Afsari et al, 2009). یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌سازی ژئومکانیکی استفاده از آن در طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی و انتخاب چاه و لایه کاندید برای این عملیات است.

اولین گام برای انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی ساخت مدل ژئومکانیکی است. پارامترهای الاستیک، مقاومتی و همچنین مقدار و جهت تنش‌ها نقش کلیدی در انتخاب چاه کاندید دارند. همانطور که در فصل قبل بحث شد، مهم‌ترین داده‌ها برای ساخت مدل ژئومکانیکی نگارهای پتروفیزیکی مانند نگارهای صوتی فشاری و برشی، نگار تخلخل و نگار چگالی هستند. با استفاده از آزمون‌های درون‌چاهی و آزمایش‌های مغزه می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی را به طور مستقیم اندازه‌گیری کرده و از نتایج آن برای کالیبره کردن مدل استفاده کرد.

در این فصل ابتدا توضیحاتی در رابطه با میدان نفتی اهواز، چاه‌ها و سازندهای مورد مطالعه در این میدان ارائه می‌شود. سپس روش به کار رفته برای تخمین موج برشی شرح داده می‌شود و در نهایت در ۳ چاه در این میدان مدل ژئومکانیکی شامل پارامترهای الاستیک، مقاومتی، فشار منفذی و مقدار و جهت تنش‌ها ساخته شده و نتایج ارائه خواهد شد.

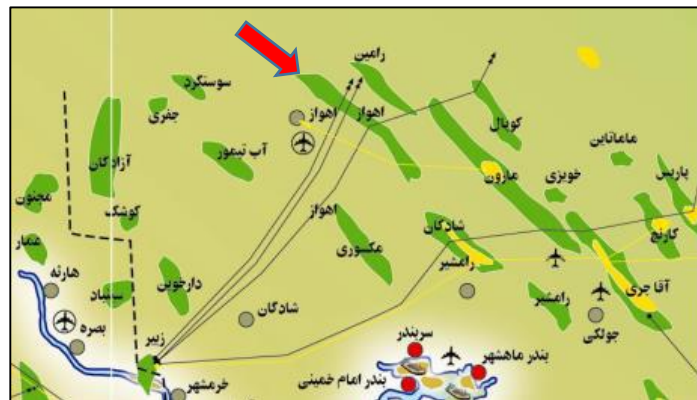
### ۳-۲ میدان نفتی اهواز

موقعیت جغرافیایی میدان اهواز در جنوب تا جنوب غربی فروافتادگی دزفول شمالی است. میادین اطراف شامل مارون و رامین در شرق، بندکرخه و سوسنگرد در غرب و در بخش‌های جنوب شرقی و جنوب غربی آن به ترتیب میادین شادگان و آب‌تیمور واقع شده‌اند و جزء میادین نفتی عظیم محسوب می‌شود (شکل ۳-۱) میدان اهواز یک نفتگیر عظیم ساختاری است که از آخرین چین‌های زاگرس است. این تاقدیس



بر روی یک بالآآمدگی<sup>۱</sup> در طبقات قدیمی تر اتفاق افتاده است. سازوکار چین خوردگی در این ناحیه را می توان ترکیبی از دو سازوکار چین خوردگی خمشی-لغزشی و چین خوردگی با سطح خنثی دانست و علاوه بر این وجود گسل های تراستی واقع در یال شمالی و جنوبی و احتمالاً بالآآمدگی های بلوک های پی سنگی، پیچیدگی های سازوکار چین خوردگی در این میدان را افزایش می دهد.

روند محوری این میدان شمال غرب-جنوب شرق به موازات رشته کوه زاگرس است و بین طول های جغرافیایی ۴۸ و ۴۹ درجه و عرض های جغرافیایی ۳۱ و ۳۲ درجه قرار دارد. مخازن اصلی این میدان شامل سازند آسماری و گروه های بنگستان و خامی بوده که مخزن آسماری در عمق ۲۵۰۰ متری و بنگستان در عمق حدود ۳۰۰۰ متری و خامی در عمق ۴۶۰۰ متری واقع شده است (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴).



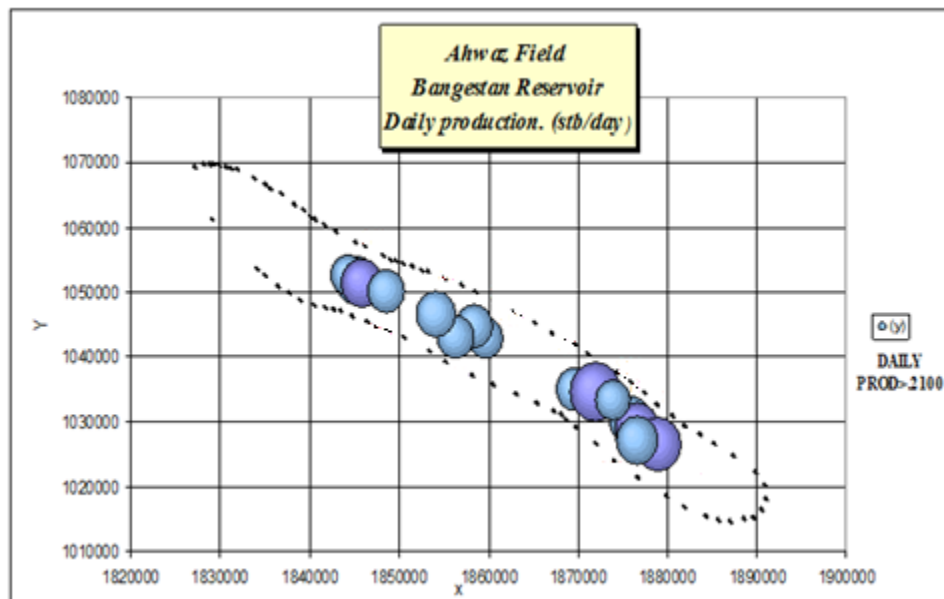
شکل ۳-۱ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی اهواز ( توانایی و همکاران، ۱۳۹۴)

تاقدیس اهواز در مخزن بنگستان دارای طول تقریبی ۷۷ کیلومتر و پهنای آن در نیمه غربی ۶/۷-۴ کیلومتر و در بخش های مرکزی ۷-۵/۷ کیلومتر است که در بخش شرقی به ۵/۵-۴ کیلومتر هم می رسد. بیشترین میزان تولید (بالای ۲۱۰۰۰ بشکه در روز) در میدان اهواز در نواحی شرق مخزن مشاهده شده است (شکل ۳-۲).

میزان تغییرات شیب ساختمانی این میدان را به سه بخش ساختمانی تقسیم می کند در بخش غربی متوسط شیب ۹-۱۱ درجه و در بخش های مرکزی با شیبی حدود ۱۵ درجه است. محدوده شرقی با شیب متوسط ۲۶-۳۱ درجه در یال شمالی دارای بیشترین شیب ساختمانی است که این مقدار شیب در یال جنوبی بین ۲۱-۱۴ درجه متغیر است. همچنین اطلاعات هرزروی گل در زون های مخزن بنگستان میدان

<sup>۱</sup> Hurst

اهواز در برخی از چاه‌ها (به طور مشخص در چاه‌هایی که دارای نمودار تصویری هستند) گردآوری شده است (شکل ۳-۳). استفاده از اطلاعات هرزروی گل به طور مستقیم در مدل‌سازی شکستگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

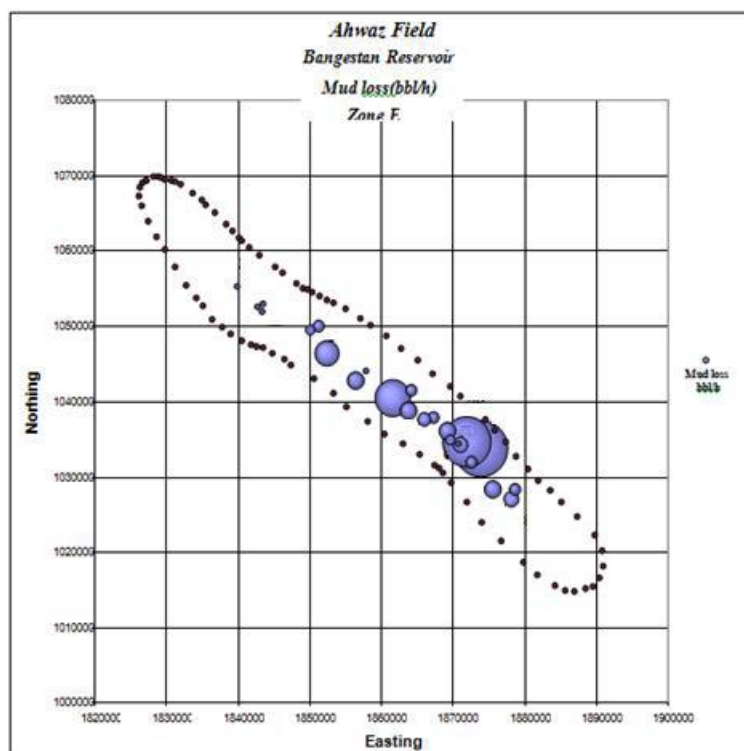


شکل ۳-۲ نقشه میزان تولید روزانه در چاه‌هایی که بیشتر از ۲۱۰۰ بشکه در روز در مخزن بنگستان میدان اهواز تولید دارند (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴)

جدول ۳-۱ نشان می‌دهد که ارتباط معناداری میان پارامترهای شیب و میزان تولید برقرار است. شیب زیاد در یک منطقه حاکی از فعال بودن تکنیک در آن منطقه است. فعالیت زمین‌ساختی عامل اصلی ایجاد شکستگی‌ها در هر منطقه است، لذا به طور مثال در بخش شرقی که ارتفاع تاقدیس و شیب بیشترین مقدار خود را دارد، تراکم شکستگی‌ها نیز بالا گزارش شده است. همچنین بالا بودن تراکم شکستگی مسبب هرزروی گل و تولید بیشتر چاه‌ها می‌شود.

با توجه به اطلاعات ژئوفیزیک لرزه‌ای می‌توان میدان اهواز را به سه قسمت شرقی، مرکزی و غربی نسبتاً مجزا از نظر ساختاری پهنه‌بندی کرد. هر پهنه، از نظر اطلاعات ژئوفیزیک لرزه‌ای و هرزروی گل چاه‌ها همگن‌تر است. این موضوع تأثیر غیرمستقیم اما قابل توجهی بر میزان تولید چاه‌های هر منطقه گذاشته است. طبق مشاهدات پهنه شرقی که در آن شیب لایه‌ها و فراوانی شکستگی‌ها بیشینه است، بیشترین استعداد تولید نفت و هرزروی گل را دارد. از طرفی پهنه غربی کمترین استعداد تولید نفت را دارد که این

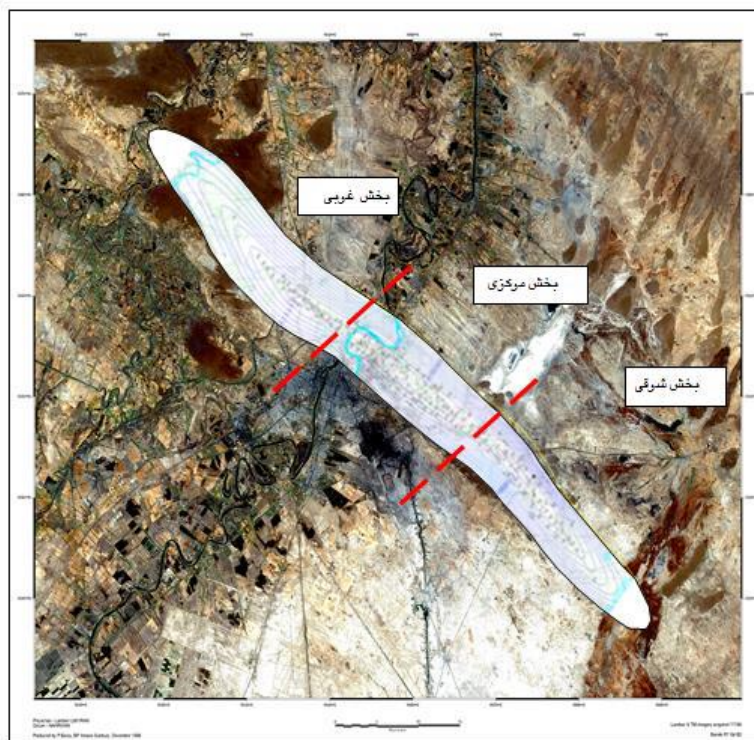
امر با هرزروی کمتر، تراکم شکستگی کمینه و حداقل شیب لایه‌ها نیز منطبق است. در شکل ۳-۴ می‌توان پهنه‌بندی میدان اهواز را مشاهده کرد (توانایی و همکاران ۱۳۹۴).



شکل ۳-۳ نقشه هرزروی گل (بشکه در ساعت) در زون E مخزن بنگستان در میدان اهواز (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴)

جدول ۳-۱ ویژگی‌های ساختاری- تولیدی بخش‌های اصلی میدان اهواز (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴)

بخش	تراکم شکستگی	میزان تولید	هرزروی گل	ارتفاع تاقدیس	شیب (درجه)
شرقی	بیشترین	بیشترین	بیشترین	بیشترین	بیشترین (۶۵)
مرکزی	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط (۱۵)
غربی	کمترین	کمترین	کمترین	کمترین	کمترین (۱۰)



شکل ۳-۴ نقشه پهنه‌بندی میدان اهواز به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴)

### ۳-۳ تخمین موج برشی

سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات ژئومکانیک محسوب می‌شود که متأسفانه به دلیل هزینه بالا، در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نشده است. به همین دلیل روش‌های متعددی برای برآورد این پارامتر از سایر نگارهای پتروفیزیکی (که در اکثر چاه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند) ارائه شده است. از آنجایی که سرعت موج برشی از پارامترهای مختلف سنگ (سرعت موج فشاری، سیال منفذی و غیره) تأثیر می‌پذیرد، می‌تواند بیانگر خصوصیات فیزیکی سنگ نیز باشد. از این رو، سرعت موج برشی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، سیال منفذی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند نظیر مدول الاستیسیته، مدول حجمی و غیره کاربرد دارد (Eskandari et al, 2004).

راندن ابزار نمودارگیری صوتی دوقطبی<sup>۱</sup> (DSI) و به دست آوردن زمان گذر موج برشی یکی دیگر از روش‌های تخمین سرعت موج برشی است. این روش اگرچه روش معتبری است، اما باید در تعداد زیادی از چاه‌ها انجام شود تا توزیع سرعت را در کل میدان ارائه دهد. به علاوه همانطور که گفته شد در بیشتر موارد،

<sup>۱</sup> Dipole Shear Sonic Imager

به دلیل هزینه بالای این عملیات، این ابزار در چاه‌ها رانده نشده است. به همین دلیل از روش‌های مختلفی از جمله اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، استفاده از روابط تجربی، تحلیل‌های رگرسیونی و همچنین استفاده از روش‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی برای تخمین موج برشی استفاده می‌شود (Rezaee et al, 2007).

در چند دهه گذشته روابط متعددی برای تخمین سرعت موج برشی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه موج فشاری و تخلخل، در لیتولوژی‌های مختلف ارائه شده است. ایراد اساسی روابط تجربی، وابستگی شدید آن‌ها به شرایط خاص لیتولوژی و کانی‌شناسی و حتی تکتونیکی هر منطقه است. لذا استفاده مستقیم از آن‌ها برای مناطق مختلف باید با احتیاط رسنجی لازم همراه باشد. با این حال با توجه به اهمیت وجود داده‌های سرعت موج برشی در محاسبه پارامترهای الاستیک، روابط مختلفی جهت تخمین این پارامتر ارائه شده است که در جدول ۳-۲ تعدادی از آن‌ها آمده است.

جدول ۳-۲ روابط تجربی برای تخمین موج برشی

شماره رابطه	رابطه	محل استفاده	مرجع
۱-۳	$V_s = 0.583V_p - 0.07776$	دولومیت	(Castanga, et al., 1993)
۲-۳	$V_s = -0.05509 V_p^2 + 1.0168V_p - 1.0305$	سنگ آهک	(Castanga, et al., 1993)
۳-۳	$V_s = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4$	$1/5 \leq V_p \leq 8/5$	(Brocher, 2005)
۴-۳	$DTS = 2.015DTC - 4.223$	مخازن کربناته جنوب ایران	(Razi, et al., 2010)
۵-۳	$DTS = 0.512DTC + 124NPHI + 50.68RHOB - 54.86$	مخازن کربناته جنوب ایران	(Razi, et al., 2010)
۶-۳	$V_s = -17.0885 + 0.4068V_p - 2.1907NPHI^2 - 1.1794NPHI - 3.2747RHOB^2 + 15.3587RHOB$	مخازن کربناته جنوب ایران	(Eskandari, et al., 2003)

در روابط این جدول  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه، DTC و DTS به ترتیب زمان گذر موج فشاری و برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت، NPHI تخلخل نوترونی و RHOB چگالی بر حسب gm/cc است.

در این تحقیق از روش رگرسیون چندگانه<sup>۱</sup> برای تخمین موج برشی استفاده شده است. روش کار بدین صورت بوده که ابتدا در چاه‌های دارای نگار موج برشی یک خوشه‌بندی<sup>۲</sup> سه بعدی با استفاده از نگاشت خودسازمان‌ده<sup>۳</sup> (SOM) بر حسب پارامترهای زمان گذر موج فشاری (DTC)، تخلخل نوترونی (NPHI) و چگالی (RHOB) انجام شده است. سپس سعی شده است تا الگوهای موجود بین این پارامترها شناسایی و تفکیک شوند. در ادامه برای هر کدام از این الگوها یک رابطه رگرسیونی بین موج برشی و سه پارامتر مذکور به دست آمده است. ضرایب این روابط با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۴</sup> (PSO) به طور بهینه تعیین شده‌اند. پس از به دست آوردن روابط رگرسیونی در هر الگو، قدم بعدی پیدا کردن الگوهای مشابه در چاه‌هایی است که در آن‌ها موج برشی موجود نیست. در نهایت از روابط به دست آمده در هر الگو برای تخمین موج برشی در الگوهای مشابه استفاده شده است.

در ادامه این بخش ابتدا توضیح مختصری در رابطه با روش خوشه‌بندی SOM، روش رگرسیون چندگانه و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه می‌شود. سپس نتایج به دست آمده با این روش در چاه‌های مورد مطالعه بحث می‌شود.

### ۳-۳-۱ نگاشت خودسازمان‌ده (SOM)

نقشه‌ها یا نگاشت‌های خودسازمان‌ده (SOM)، نوعی از شبکه عصبی مصنوعی بر پایه یادگیری نظارت‌نشده<sup>۵</sup> است که نمونه‌های تحت آموزش را در یک فضای کم بعد و تفکیک شده نمایش می‌دهد. این شبکه از یک تابع همسایگی استفاده می‌کند تا فضای توپولوژی فضای ورودی را حفظ کند. روال قرار دادن یک بردار در یک نقشه عبارت از یافتن گره با نزدیک‌ترین بردار وزن به بردار فضای داده است. این روش در زمینه‌های مختلفی از قبیل آنالیز تصاویر، حرکت بادها و تفسیر امواج لرزه‌ای به طور موفقیت آمیزی استفاده شده است.

شبکه SOM شامل نورون‌هایی است که در یک شبکه کم‌بعد منظم (دو یا سه بعدی) قرار گرفته‌اند. تعداد نورون‌ها ممکن است از چند نورون تا چند هزار تغییر کند. به هر نورون یک بردار  $d$  بعدی با وزن  $m$

<sup>۱</sup> Multiple Regression

<sup>۲</sup> Clustering

<sup>۳</sup> Self-organizing Map

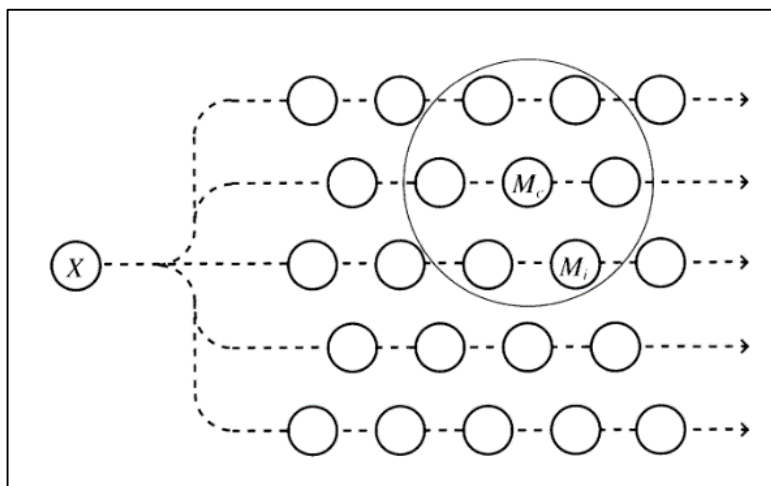
<sup>۴</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>۵</sup> Unsupervised Learning

اختصاص می‌یابد که  $d$  همان بعد بردارهای ورودی است. توپولوژی‌های متداول استفاده از شبکه‌های مربعی، شش ضلعی، مثلثی یا بی‌قاعده است.

الگوریتم آموزش SOM شبیه به الگوریتم کمی‌سازی بردار<sup>۱</sup> یا همان  $k$ -means است. با این تفاوت مهم که علاوه بر مناسب‌ترین بردار وزنی، همسایگی توپولوژیکی آن روی نقشه نیز به‌روزرسانی می‌شوند، به عبارت دیگر علاوه بر نورون برنده، نورون‌های موجود در همسایگی آن نیز تحریک می‌شوند.

شکل ۳-۵ مدلی از نگاشت خودسازمان‌ده را نشان می‌دهد. برای سادگی فرض می‌شود که نورون‌ها یک آرایه صفحه‌ای منظم را تشکیل بدهند و هر نورون معرف مجموعه‌ای از مقادیر عددی ( $M_i$ ) به نام مدل باشد. ورودی  $X$  که یک پیام عصبی و مجموعه‌ای از مقادیر سیگنال موازی است در مجموعه مدل‌های  $M_i$  منتشر می‌شود. در تئوری مغز انسان<sup>۲</sup> اصطلاح متداولی به نام رقابت بین نورون‌ها وجود دارد، بدین‌صورت که اگر نورون‌ها توسط یک ورودی مشترک تحریک شوند، نورونی که به این ورودی نزدیک‌تر است (بر اساس یک معیاری از فاصله) از همه بیشتر تحریک می‌شود. این نورون را نورون برنده<sup>۳</sup> می‌نامند. سپس نورون برنده ( $M_c$ ) که بیشترین شباهت را با  $X$  دارد باعث می‌شود تمام مدل‌هایی که در مجاورت آن قرار دارند نیز تشابه خود را با  $X$  اصلاح کنند و در واقع به آن نزدیک‌تر شوند.



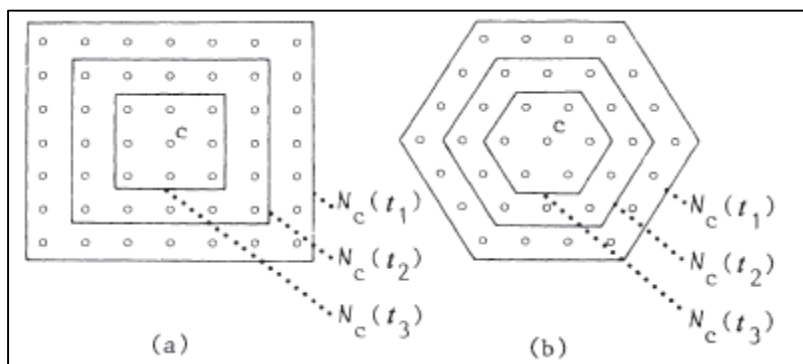
شکل ۳-۵ مدلی از یک نگاشت خودسازمان‌ده (Kohonen, 2001)

<sup>۱</sup> Vector Quantization

<sup>۲</sup> Brain Theory

<sup>۳</sup> Winner

همزمان که مدل‌های موجود در همسایگی نورون برنده شروع به نزدیک شدن به ورودی (سیگنال)  $X$  می‌کنند، هرچه بیشتر نیز سعی می‌کنند به یکدیگر نزدیک شوند. ورودی‌های مختلف در طول زمان قسمت‌های مختلفی از مجموعه مدل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در نتیجه مدل‌های  $M_i$  پس از مراحل متعدد آموزش رفته‌رفته با فضای ورودی انطباق<sup>۱</sup> پیدا می‌کند. این سه مرحله یعنی انتشار ورودی، انتخاب نورون برنده و انطباق مدل‌ها در همسایگی نورون برنده، اصول اساسی SOM را تشکیل می‌دهند. مرحله انطباق در واقع نوعی رگرسیون است، در رگرسیون نیز یک تابع ریاضی ساده به داده‌های ورودی برازش داده می‌شود. از این منظر می‌توان گفت SOM یک رگرسیون غیرپارامتری است (Kohonen, 2001). شکل ۳-۶ مفهوم همسایگی مربعی و شش ضلعی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ همسایگی مربعی و شش ضلعی (Kohonen, 2001)

به طور خلاصه، الگوریتم آموزشی شبکه‌های عصبی خودسازمان‌ده به صورت زیر است:

(۱) محاسبه فاصله بین الگو ( $X$ ) و تمام نورون‌ها:

$$d_{ij} = \|x - m_i\| \quad (۷-۳)$$

(۲) انتخاب نزدیکترین نورون به عنوان نورون برنده:

$$c = \operatorname{argmin}\{\|x - m_i\|\} \quad (۸-۳)$$

(۳) به‌روزرسانی (انطباق) هر نورون با توجه به تابع همسایگی<sup>۲</sup>:

$$m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)] \quad (۹-۳)$$

<sup>۱</sup> Adaptation

<sup>۲</sup> Neighborhood Function



۴) این روند تا زمانی ادامه پیدا می کند که یک معیار توقف (مثلاً تعداد مشخصی از تکرار) حاصل شود.

یکی از توابعی که معمولاً به عنوان تابع همسایگی در نظر گرفته می شود تابع گوسی<sup>۱</sup> است:

$$h_{ic}(t) = \alpha(t) \cdot \exp\left(-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\sigma^2(t)}\right) \quad (3-10)$$

در رابطه ۳-۱۰،  $\alpha$  ضریب نرخ یادگیری<sup>۲</sup> است. به منظور تثبیت همگرایی و ثبات نقشه، نرخ یادگیری در هر تکرار کاهش می یابد (Kohonen, 2001). در این تحقیق خوش بندی با روش SOM و با استفاده از جعبه ابزار نرم افزار MATLAB انجام شده است.

### ۳-۳-۲ رگرسیون چندگانه

رگرسیون های ساده خطی و آنالیز رگرسیون چندگانه از همبستگی بین پاسخ نگارهای مختلف و پارامتر مورد نظر استفاده می کنند. از مزایای این تکنیک نسبت به رگرسیون ساده، دقت بیشتر و خلاصه کردن حجم بیشتری از اطلاعات است. در استفاده از این تکنیک باید توجه داشت که پارامترهایی که برای رگرسیون چندگانه انتخاب می شوند، مستقل از هم باشند.

به منظور شناسایی داده های ورودی، ابتدا باید ضرایب همبستگی بین نگارهای مختلف با سرعت موج برشی تعیین شود. سپس پارامترهایی که بیشترین مقدار مطلق همبستگی را با سرعت موج برشی دارند به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شوند (Eskandari, et al. 2004). در جدول ۳-۳ همبستگی بین نگارهای پتروفیزیکی مختلف در چاه ۴۸۸ که یکی از چاه های مورد مطالعه در این تحقیق است نشان داده شده است.

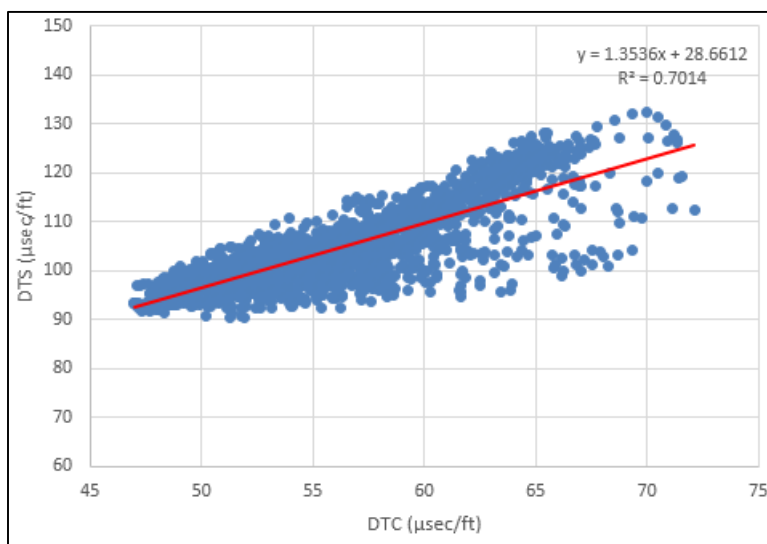
جدول ۳-۳ همبستگی پارامترهای پتروفیزیکی با DTS در چاه ۴۸۸

پارامتر	NPHI	RHOB	CGR	SGR	DTC	DTS
NPHI	1	-0.34	-0.05	-0.14	0.36	0.57
RHOB	-0.34	1	-0.03	0.05	-0.53	-0.48
CGR	-0.05	-0.03	1	0.73	-0.02	-0.09
SGR	-0.14	0.05	0.73	1	-0.13	-0.26
DTC	0.36	-0.53	-0.02	-0.13	1	0.84
DTS	0.57	-0.48	-0.09	-0.26	0.84	1

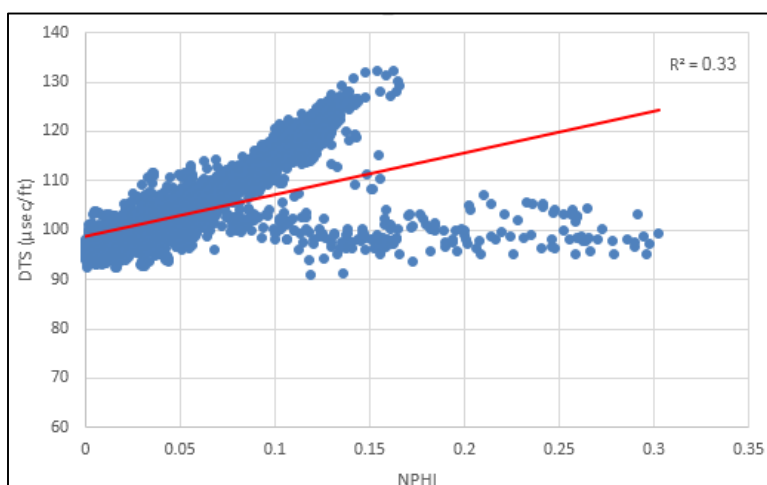
<sup>۱</sup> Gaussian Function

<sup>۲</sup> Learning-rate Factor

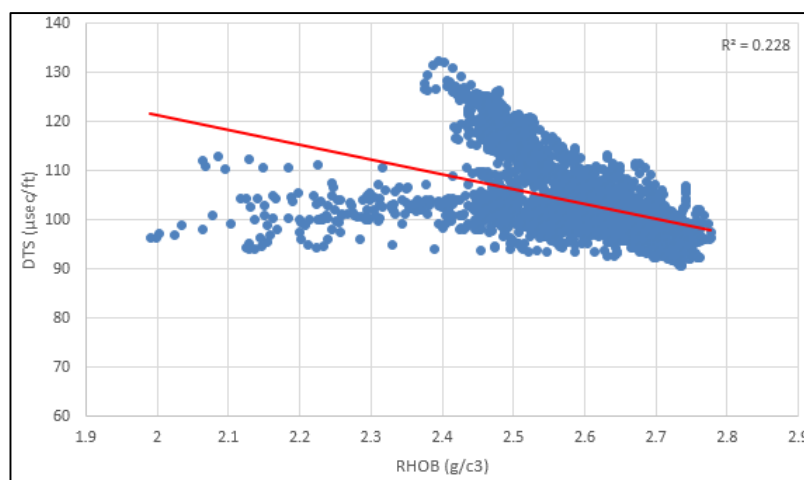
همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این چاه زمان گذر موج برشی (DTS) بیشترین همبستگی مطلق را با زمان گذر موج فشاری (DTC)، چگالی (RHOB) و تخلخل نوترونی (NPHI) دارد. به همین دلیل در ادامه از این سه پارامتر برای تخمین موج برشی استفاده می‌شود. ارتباط بین این پارامترها و زمان گذر موج برشی در شکل‌های ۷-۳ تا ۹-۳ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳ زمان گذر موج برشی در مقابل زمان گذر موج فشاری در چاه ۴۸۸



شکل ۸-۳ زمان گذر موج برشی در مقابل نگار تخلخل نوترونی در چاه ۴۸۸



شکل ۳-۹ زمان گذر موج برشی در مقابل چگالی در چاه ۴۸۸

### ۳-۳-۳ بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌هایی است که در حوزه هوش جمعی<sup>۱</sup> جای می‌گیرد. این الگوریتم توسط کندی و ابرهارت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۵ معرفی و با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی چون ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌های کوچک و بزرگ در کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده است.

در این الگوریتم هر ذره<sup>۳</sup>، نماینده یک جواب ممکن است که در فضای مسأله حرکت می‌کند؛ تغییر مکان هر ذره در فضای جستجو تحت تأثیر دانش خود و همسایگانش است، بنابراین موقعیت ذرات دیگر نیز روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی، فرآیند جستجویی است که در آن ذرات به سمت نواحی مناسبی حرکت می‌کنند. ذرات در گروه از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به دست آمده، به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند. اساس کار PSO بر این استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تا کنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند (Kennedy and Eberhart, 1995).

<sup>۱</sup> Swarm intelligence

<sup>۲</sup> Kennedy and Eberhart

<sup>۳</sup> Particle

الگوریتم PSO شامل سه مرحله است: ایجاد ذرات (موقعیت و سرعت ذرات)، بهروزرسانی سرعت و در نهایت بهروزرسانی موقعیت. با انجام این سه مرحله موقعیت هر ذره از یک حرکت (تکرار) به حرکتی دیگر تغییر می‌کند. در ابتدا موقعیت ذره  $i$ ام در زمان  $k$  برابر با  $X_i^k$  و سرعت آن برابر با  $V_i^k$  است. این مقادیر در ابتدا به طور تصادفی و با استفاده از حد بالا و پایین متغیرها تعیین می‌شوند. مرحله دوم بهروزرسانی سرعت تمام ذرات در زمان  $k+1$  با استفاده از مقادیر تابع هدف<sup>۱</sup> است. مقدار تابع هدف ذرات تعیین می‌کند که بهترین موقعیتی که یک ذره تا کنون تجربه کرده،  $P_i$ ، چقدر است و همچنین مشخص می‌کند که کدام ذره بهترین مقدار عمومی<sup>۲</sup>،  $P_k^g$ ، را در بین ذرات دارد. با استفاده از این اطلاعات و همچنین با در نظر گرفتن سرعت کنونی،  $V_i^k$ ، جهت حرکت برای تکرار بعدی،  $V_{k+1}^i$ ، با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{k+1}^i = wV_k^i + c_1r_1(P_i^i - X_k^i) + c_2r_2(P_k^g - X_k^i) \quad (۱۱-۳)$$

این رابطه شامل پارامترهای تصادفی  $r_1$  و  $r_2$  است که متغیرهایی تصادفی با توزیع یکنواخت هستند. این متغیرها باعث می‌شوند که فضای مسأله به خوبی پوشش داده شده و همچنین از گیر افتادن در جواب بهینه محلی<sup>۳</sup> جلوگیری شود. در این رابطه جمله اول نشان دهنده حرکت کنونی ذره، جمله دوم نشان دهنده حافظه شخصی ذره<sup>۴</sup> و جمله سوم نشان دهنده اثر جمعی است. همچنین ضرایب  $w$ ،  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب ضریب اینرسی<sup>۵</sup>، ضریب اطمینان شخصی<sup>۶</sup> و ضریب اطمینان جمعی<sup>۷</sup> هستند. مقادیر  $c_1$  و  $c_2$  معمولاً<sup>۲</sup> در نظر گرفته می‌شوند.

پس از بهروزرسانی سرعت، بهروزرسانی موقعیت آخرین مرحله الگوریتم است که با استفاده از رابطه ۱۲-۳ انجام می‌شود. نحوه بهروزرسانی موقعیت یک ذره در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است (Hassan, et al., 2004).

$$X_{k+1}^i = X_k^i + V_{k+1}^i \quad (۱۲-۳)$$

<sup>۱</sup> Objective Function

<sup>۲</sup> Global

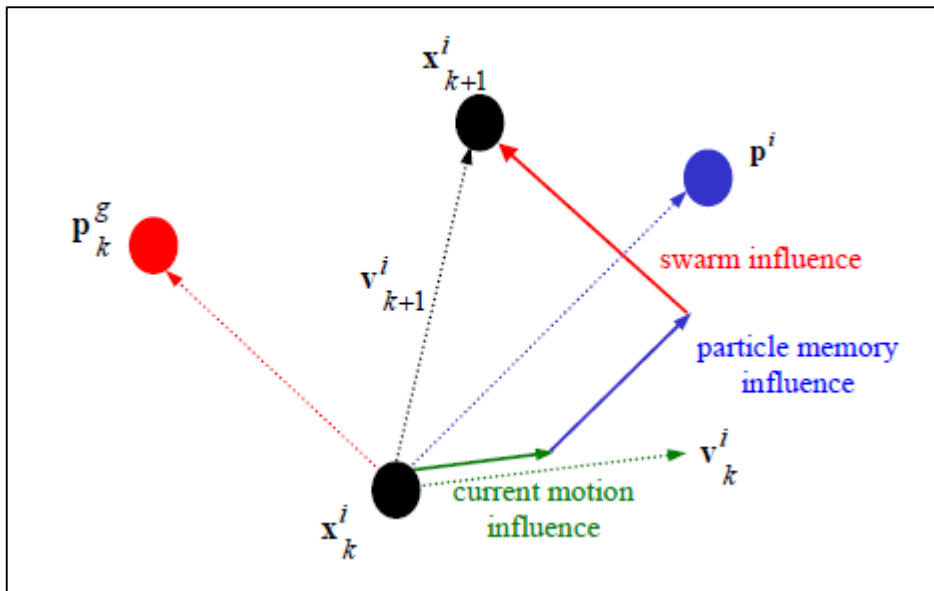
<sup>۳</sup> Local optima

<sup>۴</sup> Particle own memory

<sup>۵</sup> Inertia factor

<sup>۶</sup> Self-confidence factor

<sup>۷</sup> Swarm confidence factor



شکل ۳-۱۰ به‌روزرسانی موقعیت یک ذره در بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Hassan, et al., 2004)

ضریب اینرسی در واقع درصدی از سرعت قبلی ذره را در محاسبه سرعت جدید تأثیر می‌دهد. هرچه این میزان بیشتر باشد جستجوی عمومی افزایش یافته و هرچه کمتر باشد جستجوی محلی افزایش می‌یابد. در این تحقیق ضریب اینرسی ابتدا ۱ در نظر گرفته شد و سپس از رابطه زیر برای کاهش آن در هر تکرار استفاده شد است (Venter, et al., 2002):

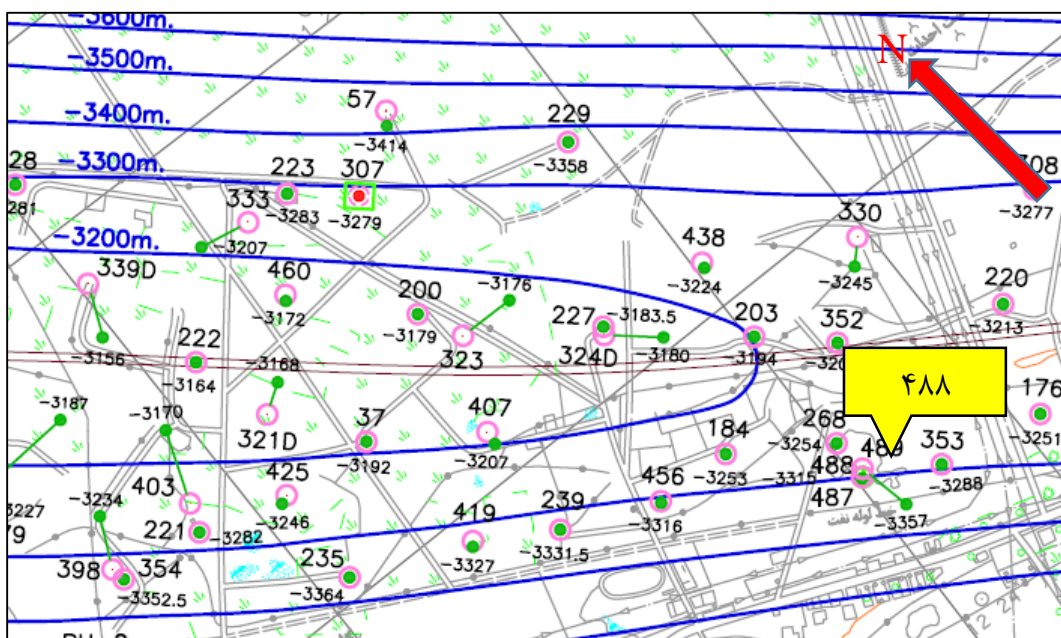
$$w(k+1) = \alpha w(k), \alpha = 0.975 \quad (3-13)$$

### ۳-۳-۴ تخمین موج برشی در چاه‌ها

در این تحقیق سه چاه قائم ۳۶۸،۳۹۷ و ۴۸۸ در میدان اهواز مورد مطالعه قرار گرفته است. در این چاه‌ها نگارهای پتروفیزیکی موجود بوده اما موج برشی تنها در بخشی از سازند سروک در چاه ۴۸۸ اندازه‌گیری شده و در چاه‌های دیگر باید تخمین زده شود.

### ۳-۴-۱ تخمین موج برشی در چاه ۴۸۸

این چاه که ارتفاع میز دوار در آن نسبت به سطح دریا ۲۵ متر است از عمق ۳۳۴۵ متری تا ۳۵۱۹ در سازند ایلام و از ۳۵۱۹ تا ۴۲۷۶ در سازند سروک حفر شده است. موقعیت این چاه در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. در این چاه زمان گذر موج برشی از عمق ۳۵۰۳ متر تا ۳۹۱۶ متری موجود است.

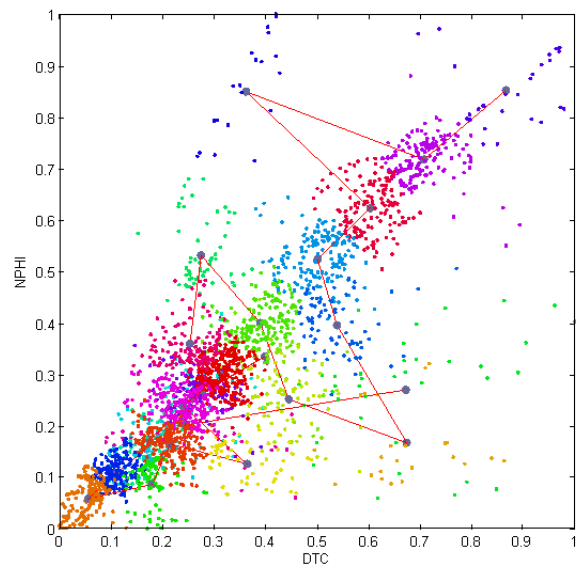


شکل ۳-۱۱ موقعیت چاه ۴۸۸ در میدان اهواز

به منظور تخمین موج برشی در قسمت‌هایی از چاه ۴۸۸ که اطلاعات موج برشی در آن موجود نیست، یک خوشه‌بندی بر حسب پارامترهای زمان گذر موج فشاری (DTC)، تخلخل نوترونی (NPHI) و چگالی (RHOB) انجام شد. تفکیک الگوهای مشابه در دو مرحله انجام شد؛ ابتدا داده‌های این سه پارامتر در چاه ۴۸۸ با استفاده از مقادیر حداکثر و حداقل در کل چاه نرمالایز شده و به وسیله روش SOM به ۲۵ خوشه تقسیم شدند. در شکل ۳-۱۲ نتایج خوشه‌بندی پارامترها در قسمت‌هایی از چاه که موج برشی موجود بوده است، نشان داده شده است.

شکل ۳-۱۳ خوشه‌بندی داده‌ها در چاه ۴۸۸ و در قسمت‌هایی که موج برشی اندازه‌گیری نشده است را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در این شکل نیز الگوهایی مشابه با شکل ۳-۱۲ وجود دارد.

بنابراین در ادامه سعی شد این الگوها به صورت دستی تفکیک شوند. بدین ترتیب که به عنوان مثال در شکل ۱۲-۳ ملاحظه شد که تعدادی از خوشه‌ها از یک الگوی خطی پیروی می‌کنند، به همین دلیل این خوشه‌ها با هم ترکیب شده و به عنوان خوشه A در نظر گرفته شدند. سپس در شکل ۱۳-۳ نیز خوشه مشابه با خوشه A به همان صورت تفکیک شد (شکل ۱۴-۳).



شکل ۱۲-۳ خوشه‌بندی داده‌ها در صفحه DTC-NPHI در قسمت‌های دارای موج برشی

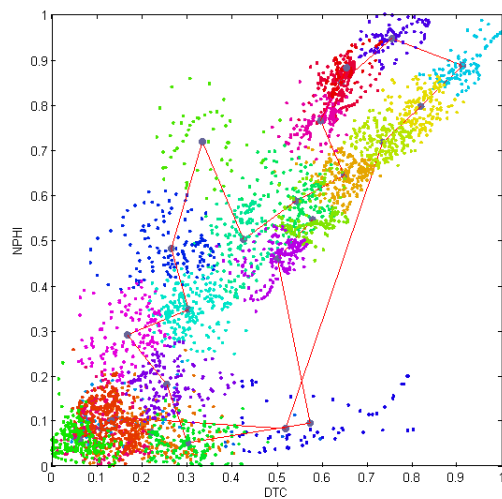
در ادامه ۳ عدد دیگر از خوشه‌های تفکیک شده به وسیله روش SOM با هم ترکیب شده و به عنوان خوشه B در نظر گرفته شدند (شکل ۱۵-۳). همانطور که در شکل ۱۵-۳ ملاحظه می‌شود خوشه مشابه با خوشه B در قسمت‌هایی از چاه که سرعت موج برشی اندازه‌گیری نشده است، قابل تفکیک است. خوشه C نیز به همین صورت تفکیک شد (شکل ۱۶-۳).

لازم به ذکر است که به منظور تفکیک دقیق خوشه‌های خطی<sup>۱</sup> بایستی از روش‌های خوشه‌بندی مانند روش گوستاوسون-کسل<sup>۲</sup> یا گت-جوا<sup>۳</sup> استفاده کرد. اینگونه روش‌ها قابلیت تفکیک خوشه‌های خطی را دارند. با این وجود به دلیل این که خوشه‌بندی موضوع اصلی این تحقیق نیست، تفکیک خوشه‌ها به طور دستی صورت گرفت.

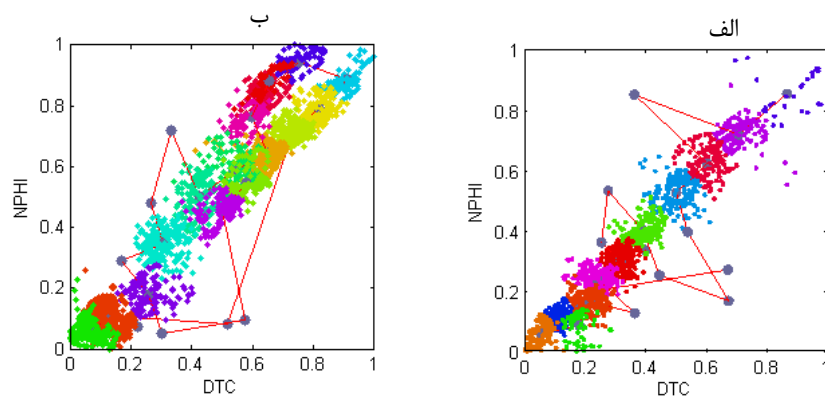
<sup>۱</sup> On-line

<sup>۲</sup> Gustafsson-Kessel

<sup>۳</sup> Gath-Geva

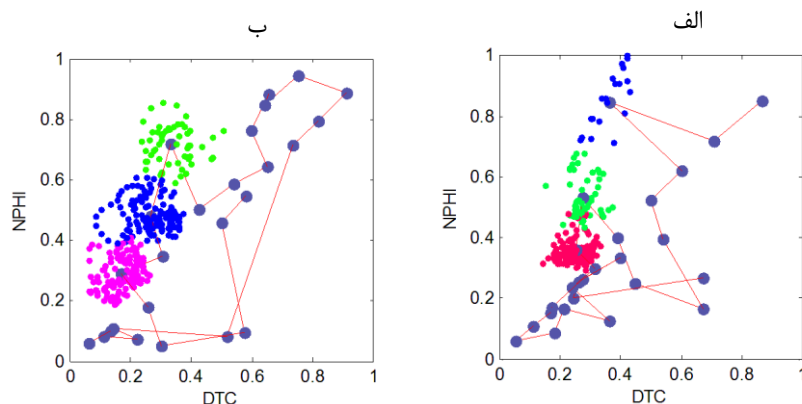


شکل ۳-۱۳ خوشه‌بندی داده‌ها در صفحه DTC-NPHI چاه ۴۸۸، در قسمت‌های بدون موج برشی

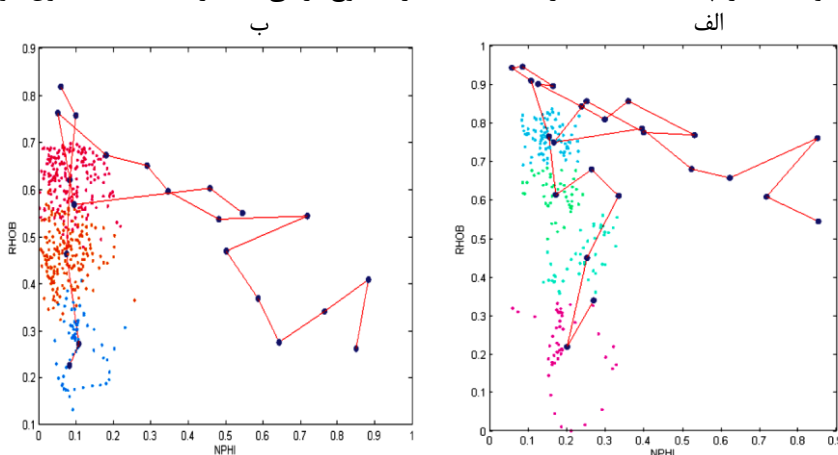


شکل ۳-۱۴ خوشه A در چاه ۴۸۸: الف) در قسمت‌های دارای موج برشی ب) در قسمت‌های بدون موج برشی





شکل ۳-۱۵ خوشه B در چاه ۴۸۸: الف) در قسمت‌های دارای موج برشی ب) در قسمت‌های بدون موج برشی



شکل ۳-۱۶ خوشه C در چاه ۴۸۸ در صفحه NPHI-RHOB: الف) در قسمت‌های دارای موج برشی ب) در قسمت‌های بدون موج برشی

پس از جداسازی خوشه‌ها، برای تخمین موج برشی در هر خوشه یک رابطه رگرسیونی به دست آمد. ضرایب این روابط با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO به گونه‌ای تعیین شد که مقدار میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (MSE) کمینه شود. در جدول ۳-۴ روابط رگرسیونی برای خوشه‌های A، B و C آورده شده است.

جدول ۳-۴ روابط به دست آمده برای تخمین موج برشی در چاه ۴۸۸

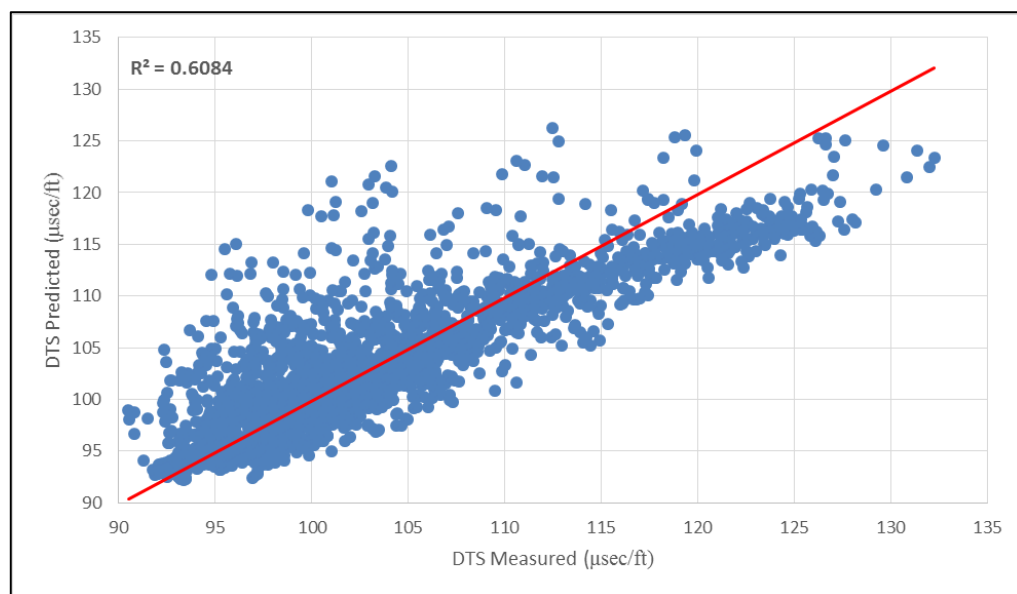
شماره رابطه	رابطه	خوشه
(۱۴-۳)	$DTS = 53.0916 + 0.4594DTC + 777.3014NPHI + 7.2797RHOB - 250.0832NPHI \times RHOB$	A
(۱۵-۳)	$DTS = 18.1519 + 0.9872DTC + 70.968NPHI + 9.8472RHOB$	B
(۱۶-۳)	$DTS = 88.5921 + 0.1682DTC + 148.6077NPHI - 0.5RHOB$	C

<sup>۱</sup> Mean Squared Error

به منظور روشن تر شدن اثر خوشه‌بندی و رگرسیون چندگانه در کاهش خطای تخمین موج برشی، از رابطه رگرسیونی زیر نیز که تنها با استفاده از زمان گذر موج فشاری به دست آمده استفاده شد (شکل ۳-۷):

$$DTS = 1.3536DTC + 28.6612 \quad R^2=0.7014 \quad (۱۷-۳)$$

در این رابطه DTC و DTS هر دو بر حسب میکروثانیه بر فوت هستند. شکل ۳-۱۷ مقادیر موج برشی تخمینی با استفاده از رابطه ۳-۱۷ را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در چاه ۴۸۸ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷ زمان گذر موج برشی اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله رگرسیون تک متغیره در چاه ۴۸۸

در شکل ۳-۱۸ مقادیر موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون چندگانه بدون انجام خوشه‌بندی نشان داده شده است. در این حالت رابطه رگرسیونی زیر حاصل شد:

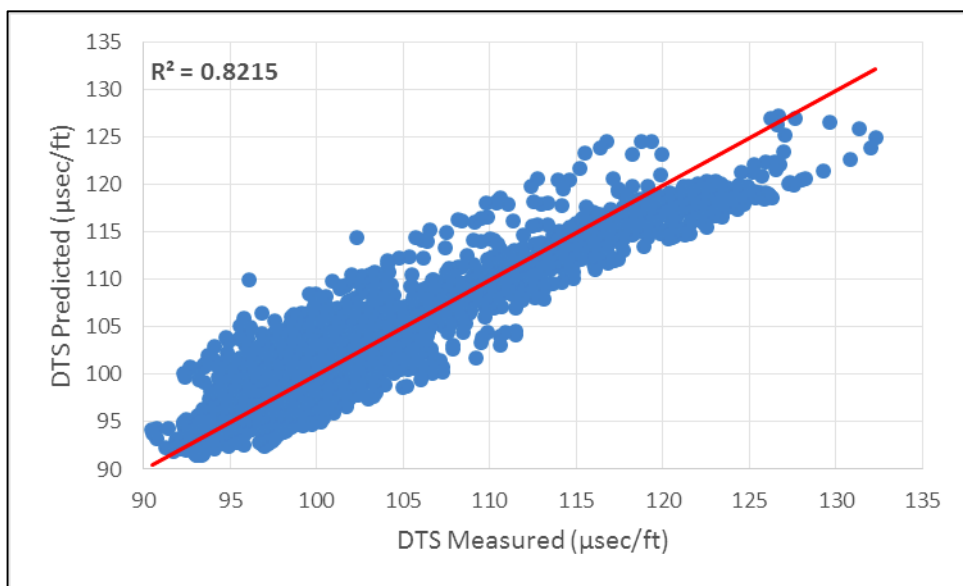
$$DTS = 69.077 + 0.57 DTC + 120.74 NPHI - 1.065 RHOB \quad (۱۸-۳)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود هنگامی که از روش رگرسیون چندگانه برای تخمین موج برشی استفاده شده، مقدار ضریب همبستگی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. با این حال همان‌طور که در شکل

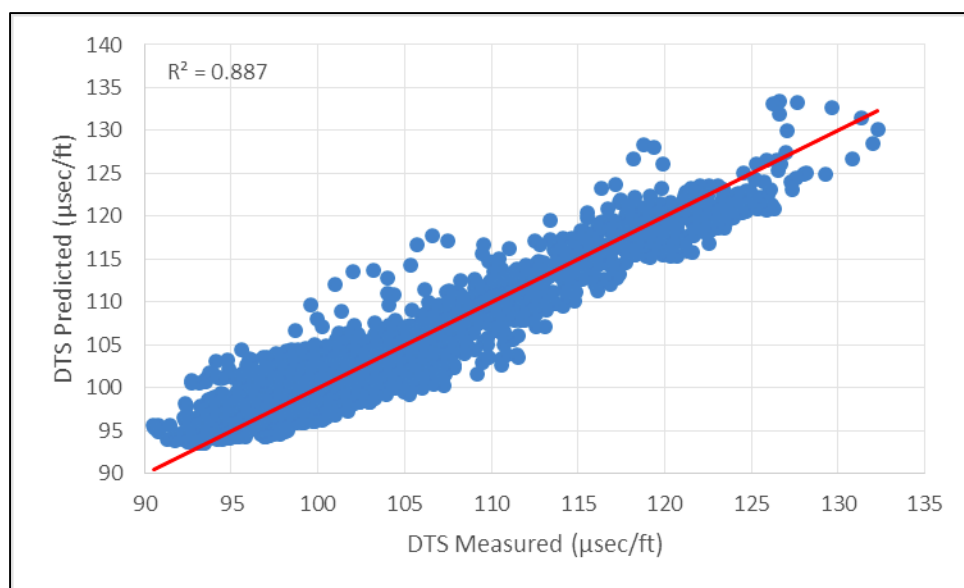
۱۹-۳ دیده می‌شود بهترین نتیجه زمانی حاصل شده که ابتدا یک خوشه‌بندی بر روی داده‌ها صورت گرفته و سپس برای هر خوشه یک رابطه رگرسیونی چندگانه ارائه شده است.

در شکل ۲۰-۳ مقادیر موج برشی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به وسیله رگرسیون چندگانه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انطباق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد. در شکل ۲۱-۳ نیز می‌توان توزیع خطای مدل رگرسیون چندگانه و خطای نسبی این مدل را ملاحظه کرد.

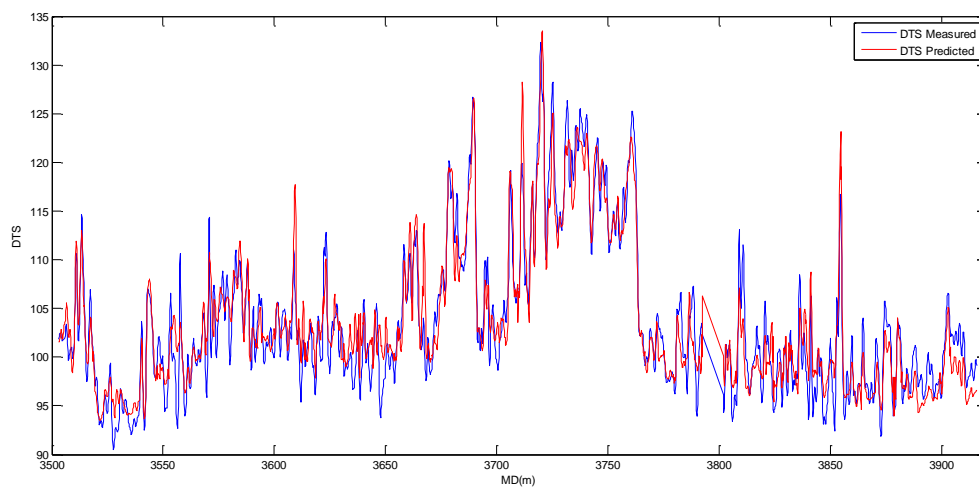
در جدول ۵-۳ نیز نتایج به طور خلاصه آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود استفاده از روش رگرسیون چند متغیره به همراه خوشه‌بندی داده‌ها توانسته خطای مدل را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. بنابراین مقادیر موج برشی در این چاه با استفاده از این روش تخمین زده شد.



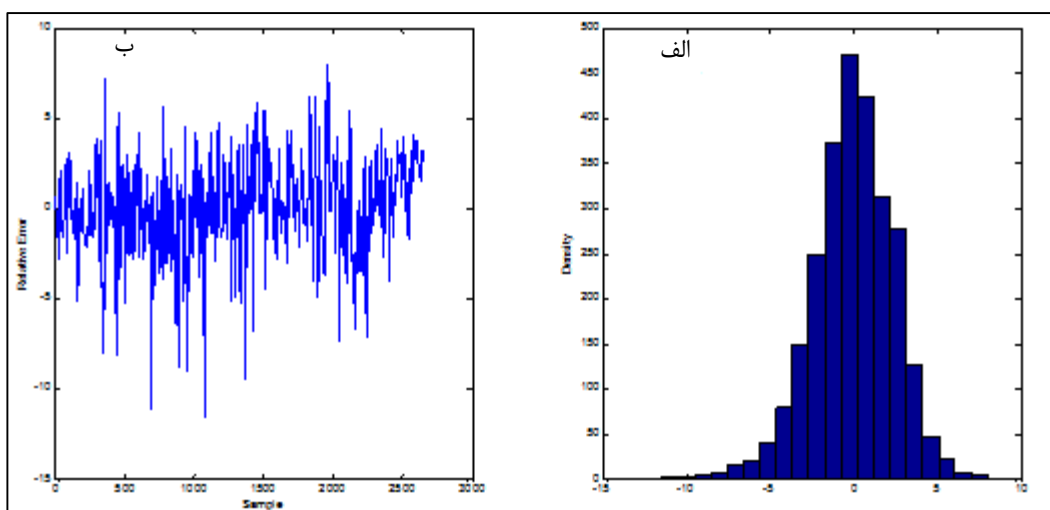
شکل ۱۸-۳ زمان گذر موج برشی اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله رگرسیون چندگانه بدون انجام خوشه‌بندی در چاه ۴۸۸



شکل ۳- ۱۹ زمان گذر موج برشی اندازه گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله رگرسیون چندگانه و با انجام خوشه‌بندی در چاه ۴۸۸



شکل ۳- ۲۰ مقایسه بین مقدار موج برشی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به وسیله مدل رگرسیون چندگانه با انجام خوشه‌بندی



شکل ۳- ۲۱ الف) توزیع خطای مدل رگرسیون چندگانه ب) خطای نسبی مدل رگرسیون چندگانه

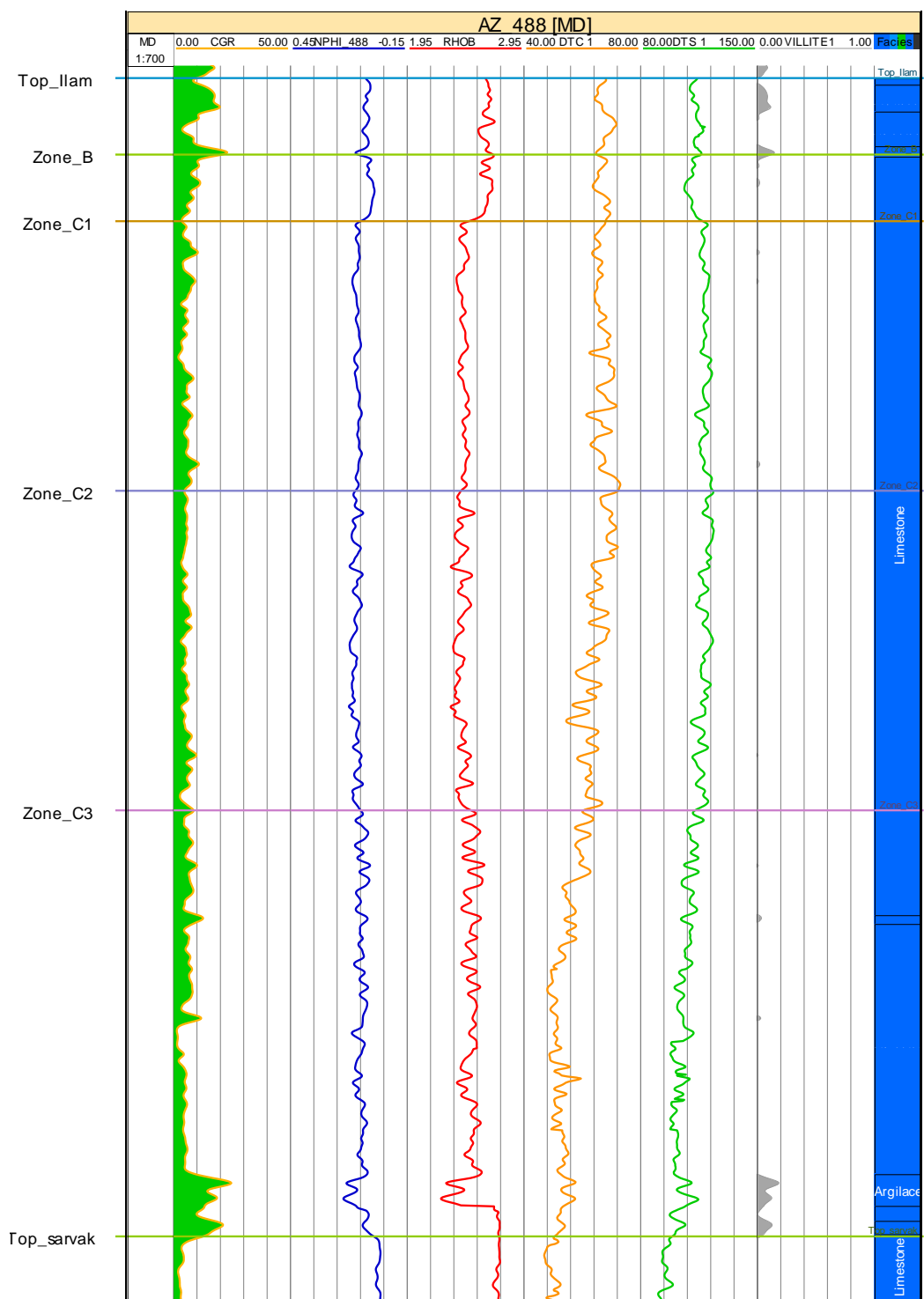
جدول ۳- ۵ مقایسه روش‌های مختلف در تخمین موج برشی در چاه ۴۸۸

روش	$R^2$	RMSE
رگرسیون تک متغیره با DTC	0/6084	4/093
رگرسیون چند متغیره، بدون خوشه بندی	0/8215	3/002
رگرسیون چند متغیره، با خوشه بندی	0/887	2/468

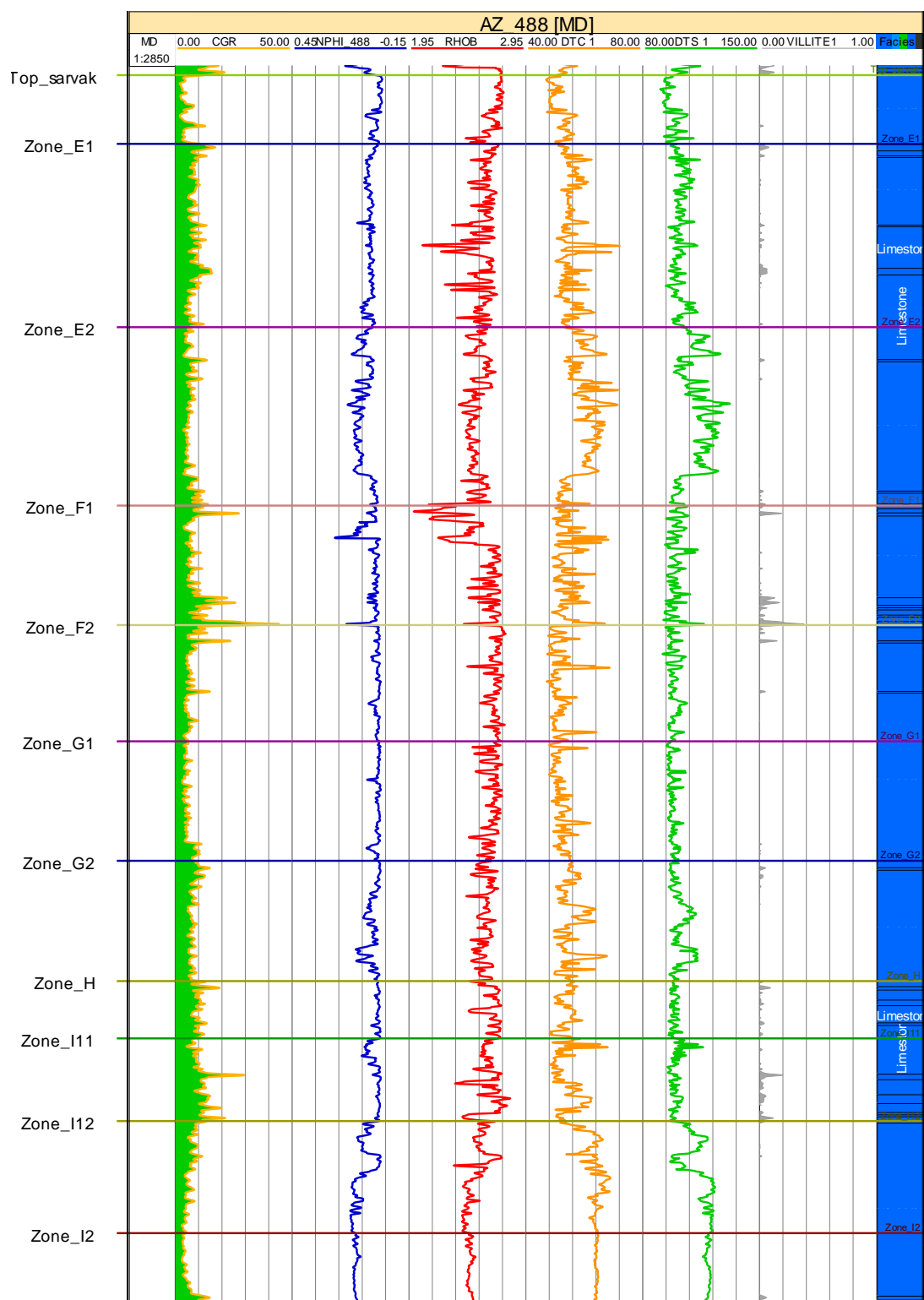
در شکل‌های ۳-۲۲ و ۳-۲۳ نگارهای پتروفیزیکی و همچنین زمان گذر موج برشی تخمین زده شده در این چاه در سازندهای ایلام و سروک نشان داده شده است. در این شکل‌ها ستون اول از سمت چپ عمق بر حسب متر، ستون دوم اشعه گاما بر حسب GAPI، ستون سوم تخلخل نوترونی، ستون چهارم چگالی بر حسب gm/cc، ستون پنجم زمان گذر موج فشاری بر حسب ( $\mu\text{sec}/\text{ft}$ )، ستون ششم زمان گذر موج برشی بر حسب ( $\mu\text{sec}/\text{ft}$ )، ستون هفتم مقدار رس و ستون آخر هم لیتولوژی را نشان می‌دهد. همانطور که در ستون آخر نیز ملاحظه می‌شود، سازند ایلام و سروک در چاه ۴۸۸ عمدتاً از آهک و در برخی بازه‌ها از آهک رسی تشکیل شده است.

### ۳-۳-۴-۲ تخمین موج برشی در چاه ۳۶۸

چاه شماره ۳۶۸ با موقعیت ۰۳۸ جنوب و ارتفاع میز دوار ۲۸/۷ متر نسبت به سطح دریا، به منظور توسعه و تولید نفت مجاز روزانه در یال جنوبی میدان اهواز جهت تغذیه واحد بهره‌برداری شماره یک این میدان حفاری گردیده است (شکل ۳-۲۴). در این عملیات چاه تا عمق نهایی ۴۰۸۰/۵ متر حفار صورت گرفته است. این چاه از عمق ۳۱۸۰ متری در سازند ایلام و از عمق ۳۳۴۸ متری تا انتهای چاه در سازند سروک حفر شده است. سازند ایلام و سروک در این چاه به طور عمده از آهک خالص و بعضاً از آهک شیلی به همراه سه رگه شیل آهکی تشکیل شده است.

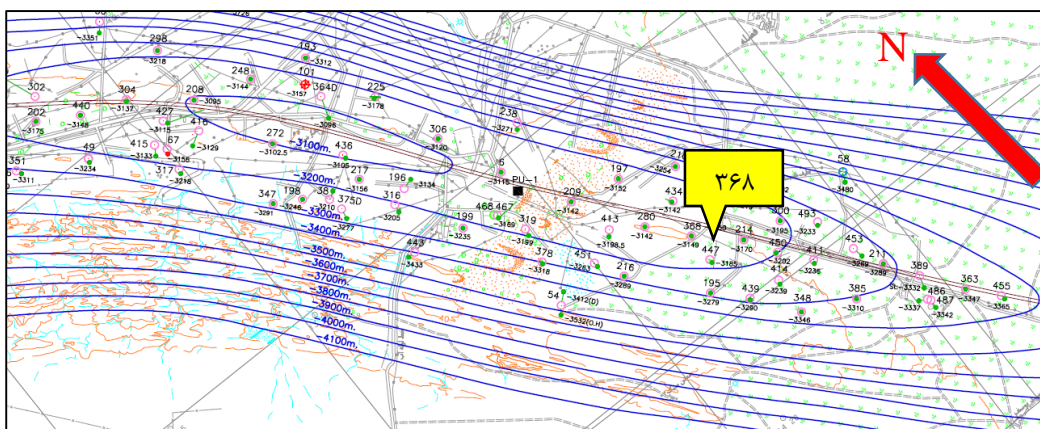


شکل ۳-۲۲ نگارهای پتروفیزیکی و موج برشی تخمین زده شده در چاه ۴۸۸، سازند ایلام



شکل ۳-۲۳ نگارهای پتروفیزیکی و موج برشی تخمین زده شده در چاه ۴۸۸، سازند سروک

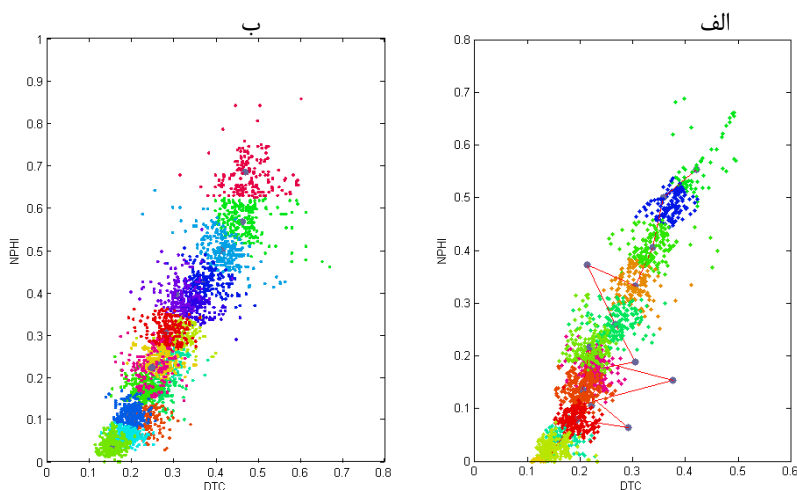




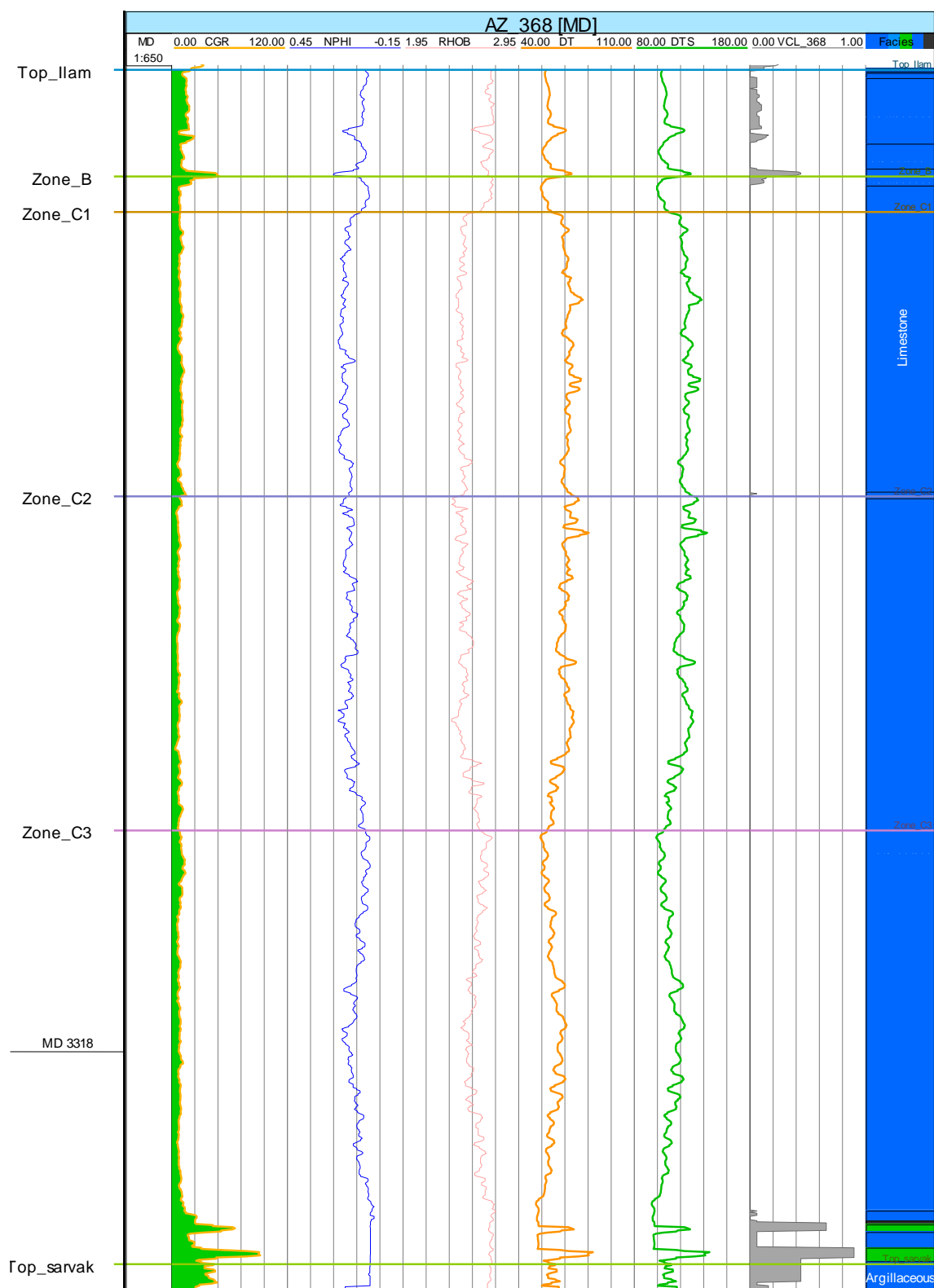
شکل ۳-۲۴ موقعیت چاه ۳۶۸ در میدان اهواز

برای تخمین موج برشی در این چاه، پس از این که خوشه‌بندی بر حسب پارامترهای DTC، NPHI و RHOB انجام شد، مشخص شد که اکثر داده‌ها الگویی مشابه با الگوی A در چاه ۴۸۸ دارند (شکل ۳-۲۵). همچنین حدود ۴ درصد داده‌ها نیز از الگوی C در چاه ۴۸۸ پیروی می‌کردند. بنابراین موج برشی در الگوهای A و C در این چاه به ترتیب با استفاده از روابط ۳-۱۴ و ۳-۱۶ تخمین زده شد.

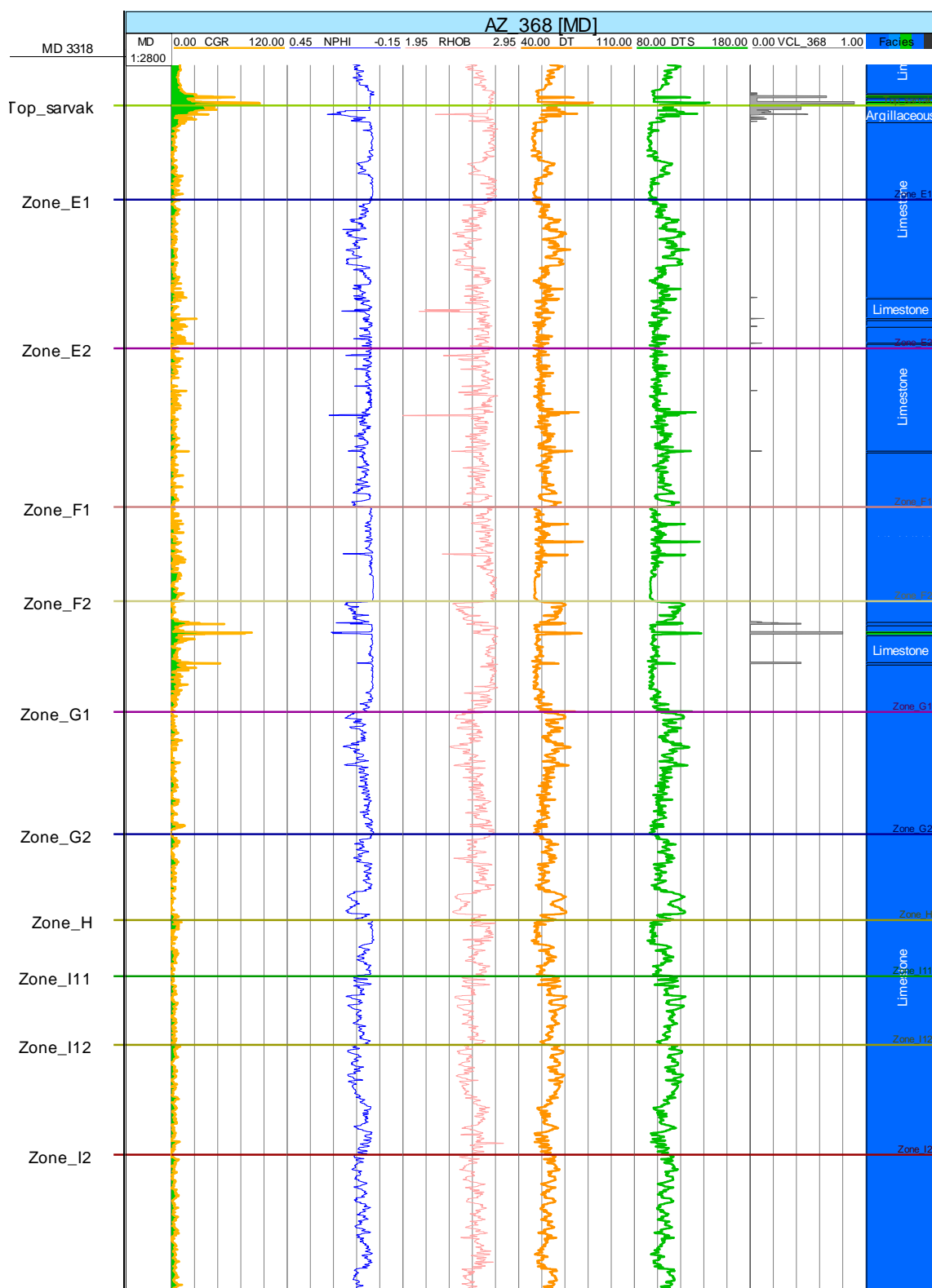
در شکل‌های ۳-۲۶ و ۳-۲۷ نگارهای پتروفیزیکی و همچنین موج برشی تخمین زده شده در چاه ۳۶۸ در سازندهای ایلام و سروک نشان داده شده است. در این شکل‌ها ستون اول از سمت چپ عمق بر حسب متر، ستون دوم اشعه گاما بر حسب GAPI، ستون سوم تخلخل نوترونی، ستون چهارم چگالی بر حسب gm/cc، ستون پنجم زمان گذر موج فشاری بر حسب (μsec/ft)، ستون ششم زمان گذر موج برشی بر حسب (μsec/ft)، ستون هفتم مقدار رس و ستون آخر هم لیتولوژی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۵ خوشه A در صفحه DTC-NPHI: (الف) چاه ۴۸۸ (ب) چاه ۳۶۸



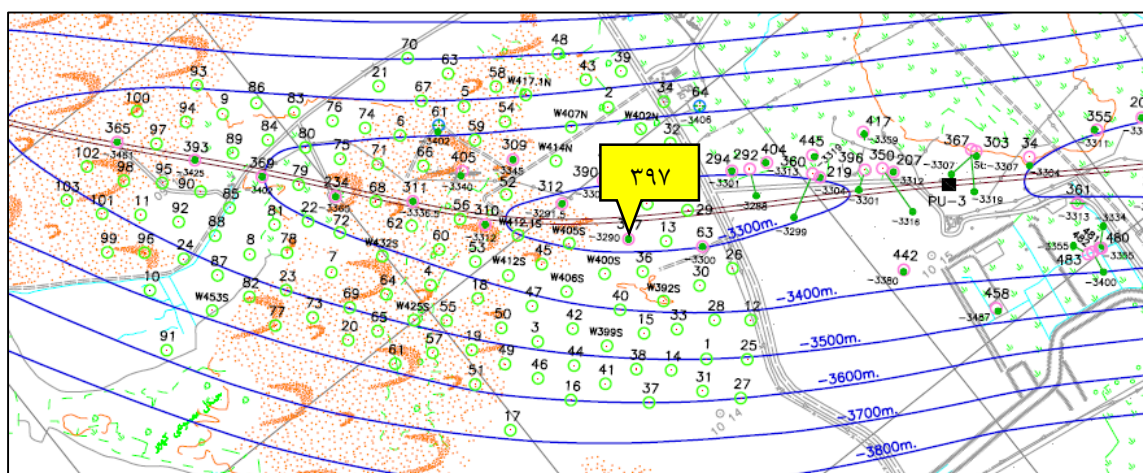
شکل ۳-۲۶ نگارهای صوتی، تخلخل و چگالی در چاه ۳۶۸، سازند ایلام



شکل ۳- ۲۷ نگارهای صوتی، تخلخل و چگالی در چاه ۳۶۸، سازند سروک

### ۳-۴-۳-۳ تخمین موج برشی در چاه ۳۹۷

چاه ۳۹۷ در بخش غربی میدان اهواز و در نزدیکی ستیغ واقع شده است (شکل ۳-۲۸). ارتفاع میز دوار در این چاه ۲۵ متر از سطح دریا است. این چاه از عمق ۳۳۱۸ متری در سازند ایلام و از عمق ۳۵۱۱ متری در سازند سروک حفر شده است. عمق نهائی در این چاه ۳۸۳۰ متر است.



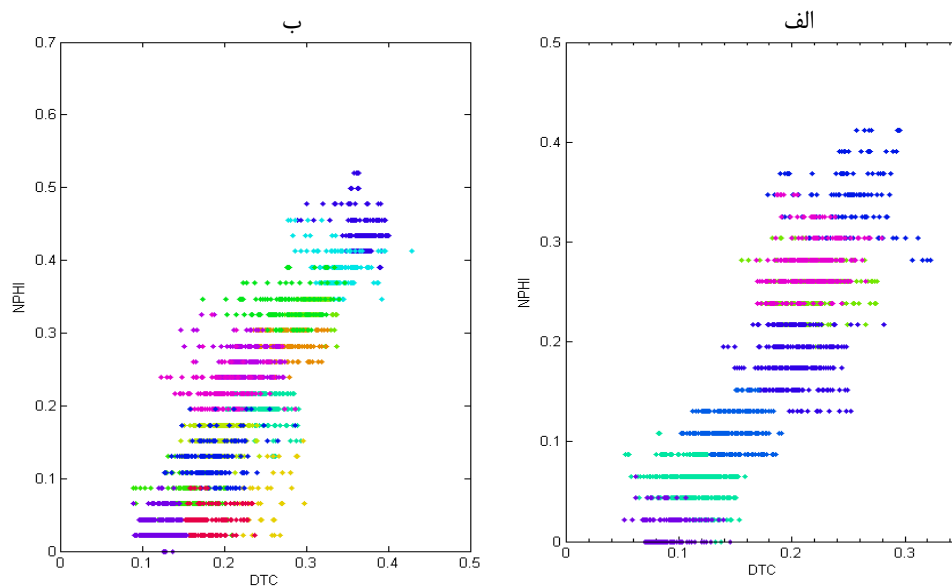
شکل ۳-۲۸ موقعیت چاه ۳۹۷ در میدان اهواز

برای تخمین موج برشی در این چاه نیز از روش خوشه‌بندی و رگرسیون چندگانه استفاده شد. با این تفاوت که در این چاه از اطلاعات چاه ۴۵۰ برای تخمین موج برشی استفاده شد. پس از خوشه‌بندی مشخص شد که اکثر داده‌های چاه ۳۹۷ در خوشه A قرار می‌گیرند که خوشه مشابه با آن در چاه ۴۵۰ قابل تفکیک است (شکل ۳-۲۹). بنابراین از رابطه ۳-۱۹ که از خوشه A در چاه ۴۵۰ به دست آمده برای تخمین موج برشی در این چاه استفاده شد. حدود ۸ درصد از داده‌های این چاه نیز در خوشه C قرار گرفتند که الگویی مشابه با خوشه C در چاه ۴۸۸ داشت و بنابراین از رابطه ۵-۱۶ برای تخمین موج برشی در این خوشه استفاده شد.

$$DTS = 35.4466 + 1.2945DTC + 29.8765NPHI - 2.2294RHOB \quad (۳-۱۹)$$

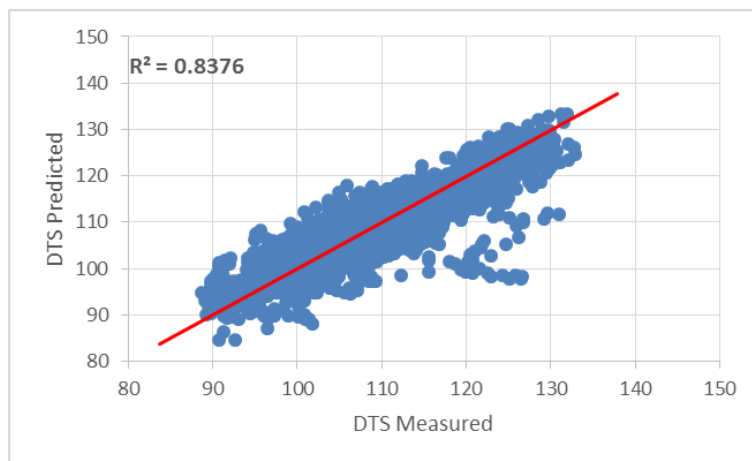
همچنین از رابطه ۳-۲۰ نیز که تنها بر حسب زمان گذر موج فشاری به دست آمده در تخمین موج برشی در چاه ۴۵۰ استفاده شد تا نتایج آن با روش رگرسیون چند متغیره مقایسه شود.

$$DTS = 1.51DTC + 19.443 \quad (۳-۲۰)$$

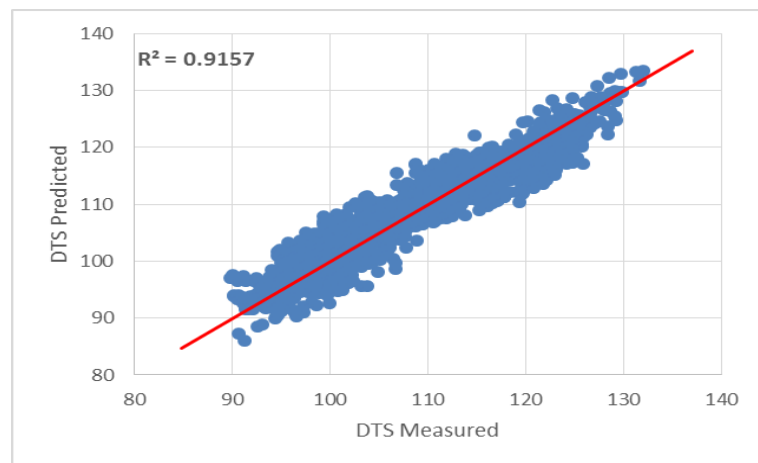


شکل ۳- ۲۹ خوشه A در صفحه DTC-NPHI: (الف) چاه ۴۵۰ (ب) چاه ۳۹۷

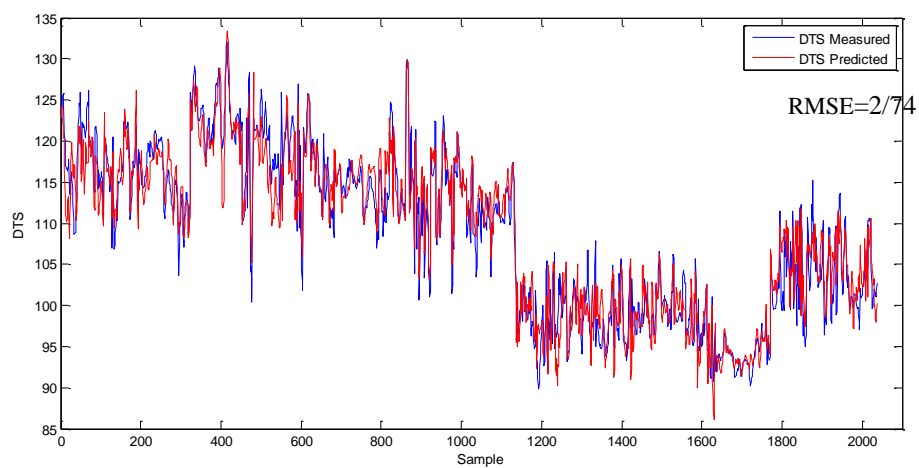
شکل ۳-۳۰ نتایج موج برشی پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه ۳-۲۰ در مقابل موج برشی اندازه‌گیری شده در چاه ۴۵۰ نشان می‌دهد. در شکل ۳-۳۱ نیز نتایج موج برشی تخمین زده شده با استفاده از روش خوشه‌بندی و رگرسیون چندگانه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این روش باعث شده تا ضریب همبستگی به طور چشم‌گیری افزایش پیدا کند. در شکل ۳-۳۲ می‌توان ملاحظه کرد که انطباق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. و در نهایت در شکل ۳-۳۳ نگارهای پتروفیزیکی به همراه موج صوتی تخمین زده شده در سازندهای ایلام و سروک آورده شده است.



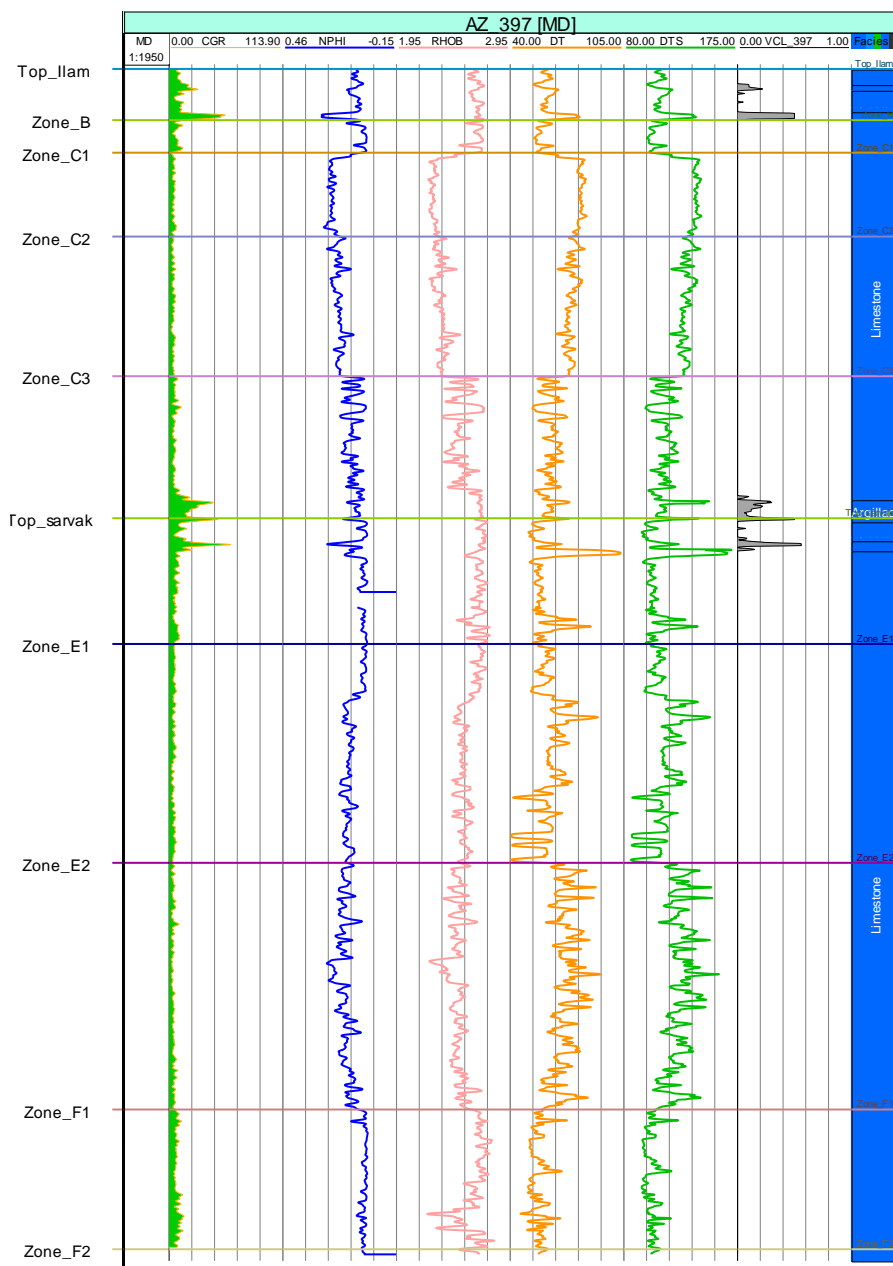
شکل ۳-۳۰ موج برشی پیش‌بینی شده به وسیله رگرسیون تک متغیره (رابطه ۳-۲۰) در مقابل موج برشی اندازه‌گیری شده در چاه ۴۵۰



شکل ۳-۳۱ موج برشی پیش‌بینی شده با استفاده رگرسیون چند متغیره (رابطه ۳-۱۹) در خوشه A در مقابل موج برشی اندازه‌گیری شده در این خوشه در چاه ۴۵۰



شکل ۳-۳۲ مقایسه نتایج بین مقادیر موج برشی پیش‌بینی شده به وسیله مدل رگرسیون چندگانه و خوشه‌بندی و مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۳-۳۳ نگارهای پتروفیزیکی در چاه ۳۹۷، سازندهای ایلام و سروک

### ۳-۴ ساخت مدل ژئومکانیکی

برای ساخت مدل ژئومکانیکی استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، نگارهای چاه (نگار تخلخل، چگالی، صوتی و غیره)، گزارش‌های حفاری، نگارهای تصویری و آزمایش‌های درون‌چاهی ضروری است. با به دست آمدن خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ مدل ساخته می‌شود و با استفاده از آزمایش‌های مکانیک سنگی و درون‌چاهی مدل کالیبره می‌گردد. به طور کلی مراحل اصلی ساخت مدل ژئومکانیکی به صورت زیر است:

- مشخص کردن سازندها بر اساس جنس آن‌ها؛ برخی سازندها دارای رفتار دانه‌ای (مانند ماسه سنگ) و برخی دیگر دارای رفتار رسی (مانند شیل) هستند. بدین منظور می‌توان از نگار گاما استفاده کرد.

- تخمین خواص سنگ شامل خواص الاستیک مانند مدول یانگ، خواص مقاومتی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره و کالیبره نمودن آن‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی.

- تخمین مقادیر تنش و فشار منفذی در میدان؛ در این حالت تنش عمودی با استفاده از نگار چگالی به دست می‌آید. سپس تنش‌های افقی تخمین زده می‌شوند. تنش‌های افقی را می‌توان بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های درون‌چاهی و یا با استفاده از ناپایداری‌های مشاهده شده در نگارهای تصویری کالیبره نمود (Archer and Rasouli, 2012).

پارامترهای ژئومکانیکی معمولاً به وسیله نگارهای پتروفیزیکی، نگارهای صوتی فشاری و برشی تخمین زده می‌شوند و با کمک آزمون‌های درون‌چاهی و آزمایشگاهی کالیبره می‌گردند. در این بخش نحوه تخمین پارامترهای الاستیک، مقاومتی و تنش‌ها در ۳ چاه مورد مطالعه تشریح و نتایج به دست آمده نشان داده می‌شود.

### ۳-۴-۱ پارامترهای الاستیک سنگ

مهم‌ترین پارامترهای الاستیک سنگ که در ساخت مدل ژئومکانیکی کاربرد دارند، مدول یانگ و نسبت پواسون هستند. این دو پارامتر از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\nu_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (۳-۲۱)$$



$$E_{dyn} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (22-3)$$

با مشخص شدن این دو پارامتر، می‌توان مدول برشی و مدول حجمی را با استفاده از روابط الاستیک محاسبه نمود:

$$G_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{2(1+\nu)} \quad (23-3)$$

$$K_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{3(1-2\nu)} \quad (24-3)$$

در این روابط  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه،  $\rho$  چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $E$  مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال،  $G$  مدول برشی بر حسب گیگاپاسکال و  $K$  مدول حجمی بر حسب گیگاپاسکال است (Fjaer, et al., 2008).

در عملیات چاه‌پیمایی مدت زمان گذر موج فشاری و برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت اندازه‌گیری می‌شود، که با DTS و DTC نشان داده می‌شوند. به منظور تبدیل مدت زمان گذر موج به سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$V(\text{km/s}) = \frac{304.8}{DT(\mu\text{s}/\text{ft})} \quad (25-3)$$

در این مطالعه ضریب پواسون، مدول الاستیک، مدول برشی و مدول حجمی به ترتیب با استفاده از روابط ۳-۲۱ تا ۳-۲۴ تخمین زده شدند.

### ۳-۴-۲ تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی

از آنجایی که اندازه‌گیری‌های صوتی در فرکانس‌های بالا انجام می‌شوند، خواص الاستیکی که از نگارها محاسبه می‌شوند خواص الاستیک دینامیکی هستند. اما از آنجا که تغییر شکل یا شکستگی‌های رخ داده در چاه در مقایسه با انتشار موج با فرکانس بالا، فرآیندهای آهسته‌تری هستند، در نتیجه در مدل‌سازی

ژئومکانیکی باید از خواص الاستیک استاتیکی استفاده کرد. بدین منظور خواص الاستیک محاسبه شده از نگارها را معمولاً با استفاده از نتایج آزمایش‌های مغزه کالیبره می‌کنند (Chardac et al, 2005).

به دلیل هزینه بالا و مشکلاتی که در تهیه مغزه وجود دارد، روابط تجربی فراوانی برای تبدیل مقادیر دینامیکی به استاتیکی وجود دارد. این روابط برای مناطق خاص، مطابق با لیتولوژی و شرایط منطقه تهیه شده است. تعدادی از این روابط که در مخازن کربناته و سنگ آهک کاربرد دارد در جدول 3-6 آورده شده است. در این روابط  $E_{sta}$  و  $E_{dyn}$  مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بر حسب Gpa هستند.

جدول 3-6 روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی

شماره رابطه	رابطه	محل استفاده	مرجع
(۲۶-۳)	$E_{sta} = 0.4145E_{dyn} - 1.0593$	مخازن کربناته ایران	(Afsari, et al. 2009)
(۲۷-۳)	$E_{sta} = 0.77E_{dyn} + 0.02$	سنگ آهک	(Eissa and Kazi 1988)
(۲۸-۳)	$E_{sta} = 0.018E_{dyn}^2 + 0.422$	سنگ آهک	(Fjaer, et al., 2008)

در این تحقیق از رابطه ۳-۲۹ برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی استفاده شد. این رابطه از مطالعات آزمایشگاهی که شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب در این میدان انجام داده به دست آمده است. در این رابطه  $E_{sta}$  و  $E_{dyn}$  به ترتیب مدول یانگ استاتیکی و دینامیکی بر حسب Gpa هستند.

$$E_{sta} = 0.7E_{dyn} \quad (۲۹-۳)$$

نسبت پواسون نیز از عوامل مهم در مدل‌سازی ژئومکانیکی می‌باشد که طبق تعریف، نسبت تغییرشکل عرضی به تغییرشکل طولی در اثر اعمال تنش به جسم است. با استفاده از رابطه زیر می‌توان نسبت پواسون دینامیکی را به استاتیکی تبدیل کرد (Afsari, et al., 2009):

$$\nu_{sta} = 0.7 \nu_{dyn} \quad (۳۰-۳)$$

با این حال نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط شرکت ملی نفت مناطق نفت‌خیز جنوب نشان می‌دهد که در این میدان مقدار دینامیکی و استاتیکی نسبت پواسون تقریباً برابر است. بنابراین در این مطالعه نیز از رابطه ۳-۳۱ استفاده شده است.

$$\nu_{sta} = \nu_{dyn} \quad (3-31)$$

پس از محاسبه مدول یانگ و نسبت پواسون استاتیک، با استفاده از روابط ۳-۲۳ و ۳-۲۴ می‌توان مدول برشی و مدول حجمی استاتیک را نیز محاسبه کرد.

در شکل‌های ۳-۳۵ تا ۳-۴۰ می‌توان مقادیر محاسبه شده مدول‌های الاستیک را در چاه‌های ۳۶۸، ۳۹۷ و ۴۸۸ در سازندهای ایلام و سروک مشاهده کرد. در این شکل‌ها ستون اول عمق بر حسب متر، ستون دوم نگار گاما بر حسب GAPI، ستون سوم نسبت پواسون و ستون هفتم لیتولوژی را نشان می‌دهد. در ستون‌های چهارم تا ششم نیز به ترتیب مدول برشی، مدول یانگ و مدول بالک استاتیکی و دینامیکی بر حسب GPa نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر استاتیکی مدول‌ها (نمودارهای قرمز رنگ) کمتر از مقادیر دینامیکی (نمودارهای آبی رنگ) آن‌هاست.

### ۳-۴-۳ پارامترهای مقاومتی سنگ

مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مقاومت کششی، چسبندگی ذاتی و زاویه اصطکاک داخلی پارامترهای مقاومتی هستند که برای ساخت مدل ژئومکانیکی محاسبه می‌شوند. با استفاده از مغزه‌ها و انجام آزمایش می‌توان این پارامترها را محاسبه کرد اما در صورت عدم وجود نتایج آزمایشگاهی می‌توان این پارامترها را از روابط تجربی و با استفاده از نگارهای مرتبط نیز تخمین زد.

برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره روابط بسیاری وجود دارد که هرکدام از این روابط مطابق با شرایط سازندهایی که آزمایش روی مغزه آن‌ها انجام شده توسعه داده شده‌اند. در جدول ۳-۷ تعدادی از روابط موجود برای مخازن کربناته آمده است. در این روابط  $V_p$  سرعت موج فشاری بر حسب Km/s، DTC زمان گذر موج فشاری بر حسب  $\mu s/ft$ ، E مدول الاستیک بر حسب Gpa و UCS مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب Mpa است.

در این مطالعه از رابطه ۳-۳۲ که توسط شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ارائه شده است، استفاده می‌شود.

$$UCS = 2.28E_{sta} + 7.3 \quad (32-3)$$

در این رابطه مدول یانگ استاتیک بر حسب Gpa بوده و مقاومت فشاری تک محوره بر حسب Mpa به دست می‌آید.

همچنین برای محاسبه مقاومت کششی در این تحقیق از رابطه ۳-۳۳ استفاده شد که از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب به دست آمده است.

$$T_s = 0.09UCS \quad (33-3)$$

جدول ۳-۷ روابط تجربی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوره

شماره رابطه	رابطه	محل استفاده	مرجع
(۳۴-۳)	$UCS = \frac{(\frac{7682}{DTC})^{1.82}}{145}$	سنگ آهک و دولومیت	(Chandong et al., 2006)
(۳۵-۳)	$UCS = 31.54V_p - 63.7$	سنگ‌های کربناته	(Yasar et al., 2004)
(۳۶-۳)	$UCS = 4.1089E_{sta} + 2.28$	سنگ‌های کربناته ایران	(Afsari et al., 2009)
(۳۷-۳)	$UCS = 570.808e^{-0.031DTC}$	سنگ‌های کربناته	(Amani et al., 2013)
(۳۸-۳)	$UCS = 194.4 - 0.6072DTC - 646.1 NPHI - 0.01644DTC^2 + 8.792(NPHI \times DTC)$	سنگ‌های کربناته	(Amani et al., 2013)
(۳۹-۳)	$UCS = 13.8 E_{dyn}^{0.51}$	سنگ آهک 10<UCS<300 Mpa	(Chandong et al., 2006)

روابط ارائه شده برای مرتبط ساختن زاویه اصطکاک داخلی با خصوصیات پتروفیزیکی بسیار محدود است. پلامب<sup>۱</sup> رابطه زیر را برای سنگ‌های خرده آواری<sup>۲</sup> ارائه کرده است (Archer and Rasouli, 2012):

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - \phi - V_{shale}) + 62.2 (1 - \phi - V_{shale})^2 \quad (40-3)$$

در این رابطه درصد حجم شیل را می‌توان با استفاده از نگار گاما (GR) از طریق رابطه زیر به دست آورد:

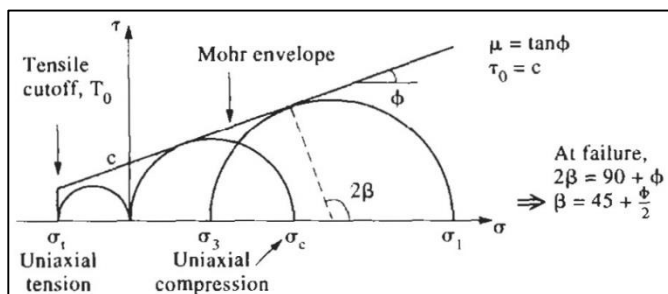
$$GR = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (41-3)$$

یکی دیگر از روابطی که برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد رابطه لال<sup>۳</sup> است که عبارت است از (Lal, 1999):

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{V_p - 1000}{V_p + 1000} \right) \quad (42-3)$$

در این روابط  $\phi$  تخلخل،  $V_{shale}$  حجم شیل بر حسب درصد و  $V_p$  سرعت موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه است.

چسبندگی سنگ را می‌توان به عنوان مقاومت برشی سنگ در حالتی که تنش نرمالی بر روی آن اعمال نمی‌گردد، تعریف نمود (Hudson, 2003). چسبندگی در واقع محل برخورد خط شکست معیار موهر-کلمب با محور تنش برشی تعریف شده است (شکل ۳-۳۴).



شکل ۳-۳۴ ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب (Hudson, 2003)

<sup>۱</sup> Plumb

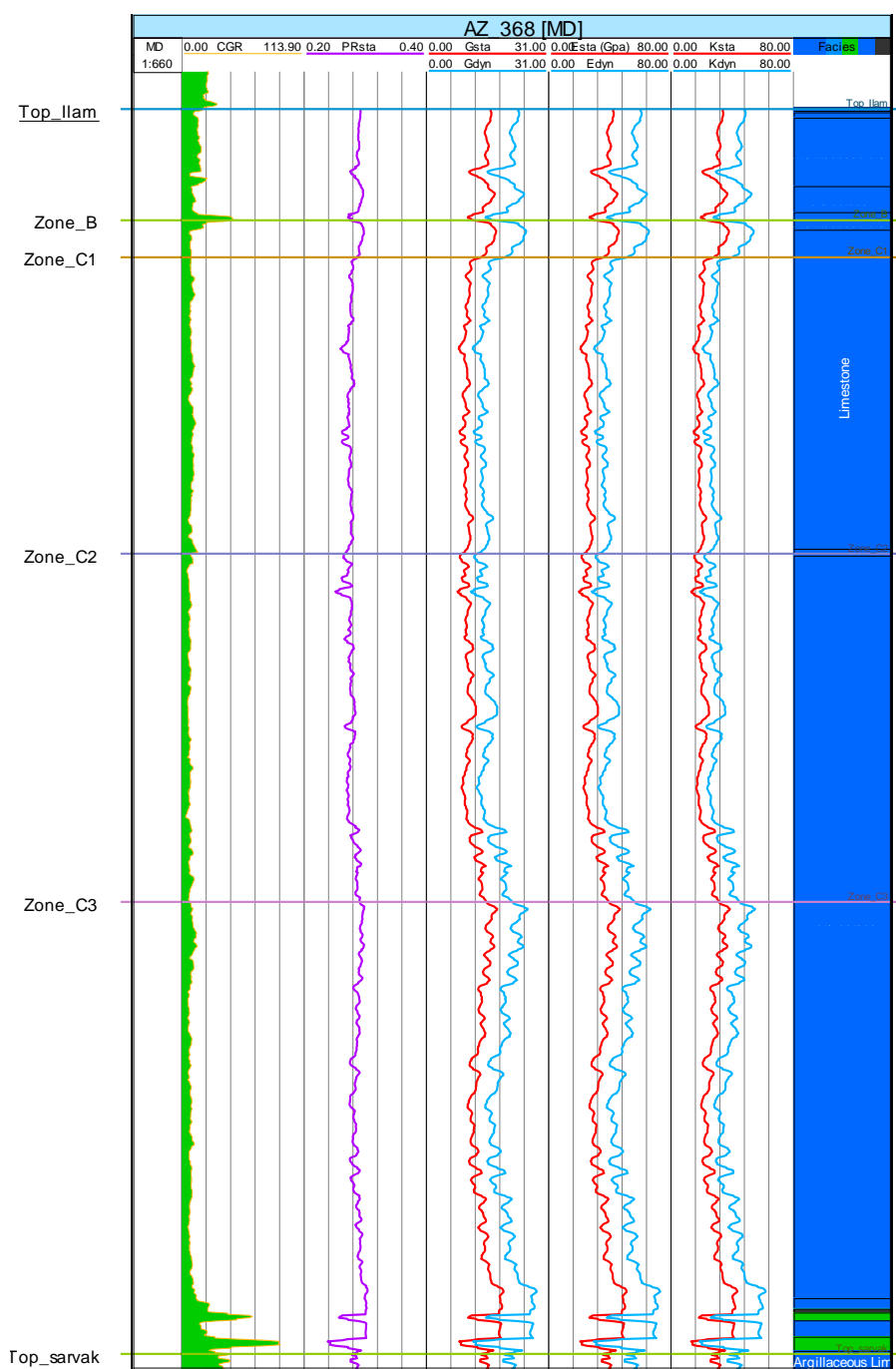
<sup>۲</sup> Clastic Rock

<sup>۳</sup> Lal

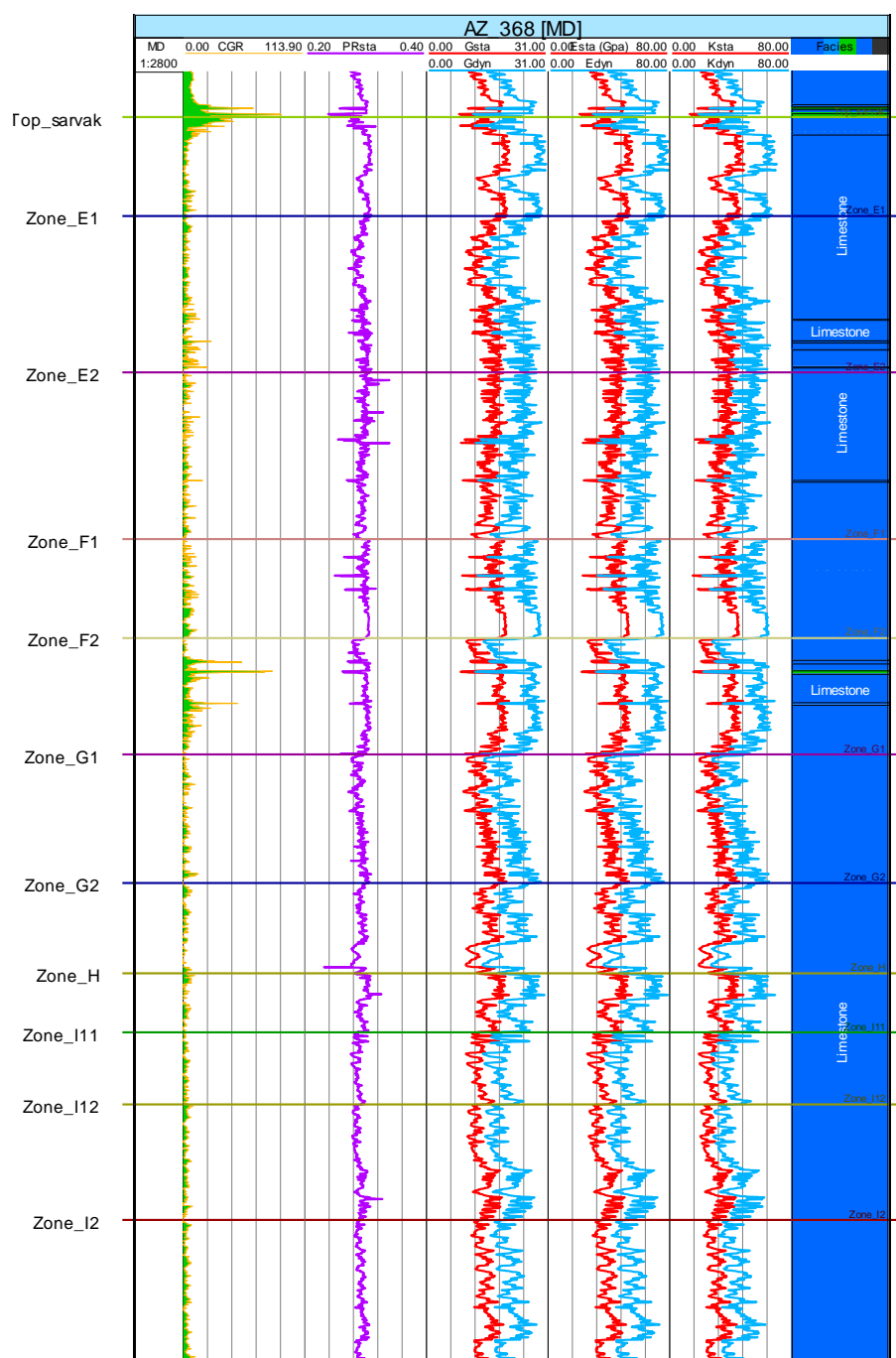
رابطه تجربی برای محاسبه مقدار چسبندگی با استفاده از پارامترای پتروفیزیکی ارائه نشده است؛ اما با توجه به این که سایر پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه هستند، می توان با مراجعه به رابطه معیار موهر-کلمب مقدار چسبندگی را نیز از رابطه زیر محاسبه کرد (Hudson, 2003):

$$C = \frac{UCS}{2 \tan(45 + \frac{\phi}{2})} \quad (43-3)$$

در این مطالعه برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب از روابط ۳-۴۰ و ۳-۴۳ استفاده شد. در شکل های ۳-۴۱ تا ۳-۴۵ پارامترهای مقاومتی محاسبه شده در چاه های مورد مطالعه نشان داده شده است. در این شکل ها ستون اول عمق بر حسب متر، ستون دوم نگار گاما بر حسب GAPI، ستون سوم و چهارم به ترتیب مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی بر حسب MPa، ستون پنجم زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه، ستون ششم چسبندگی بر حسب MPa و ستون هفتم لیتولوژی است.

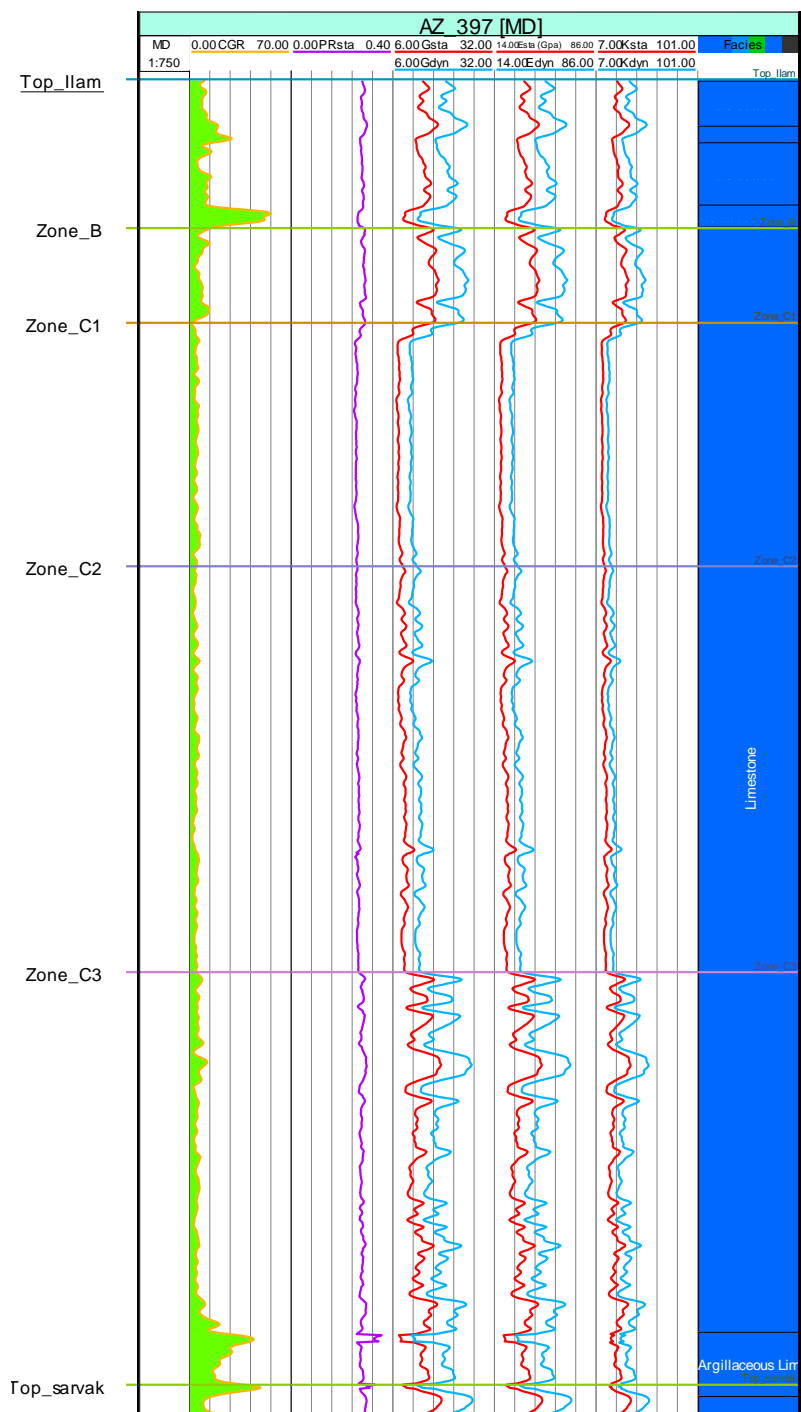


شکل ۳-۳۵ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۶۸، سازند ایلام

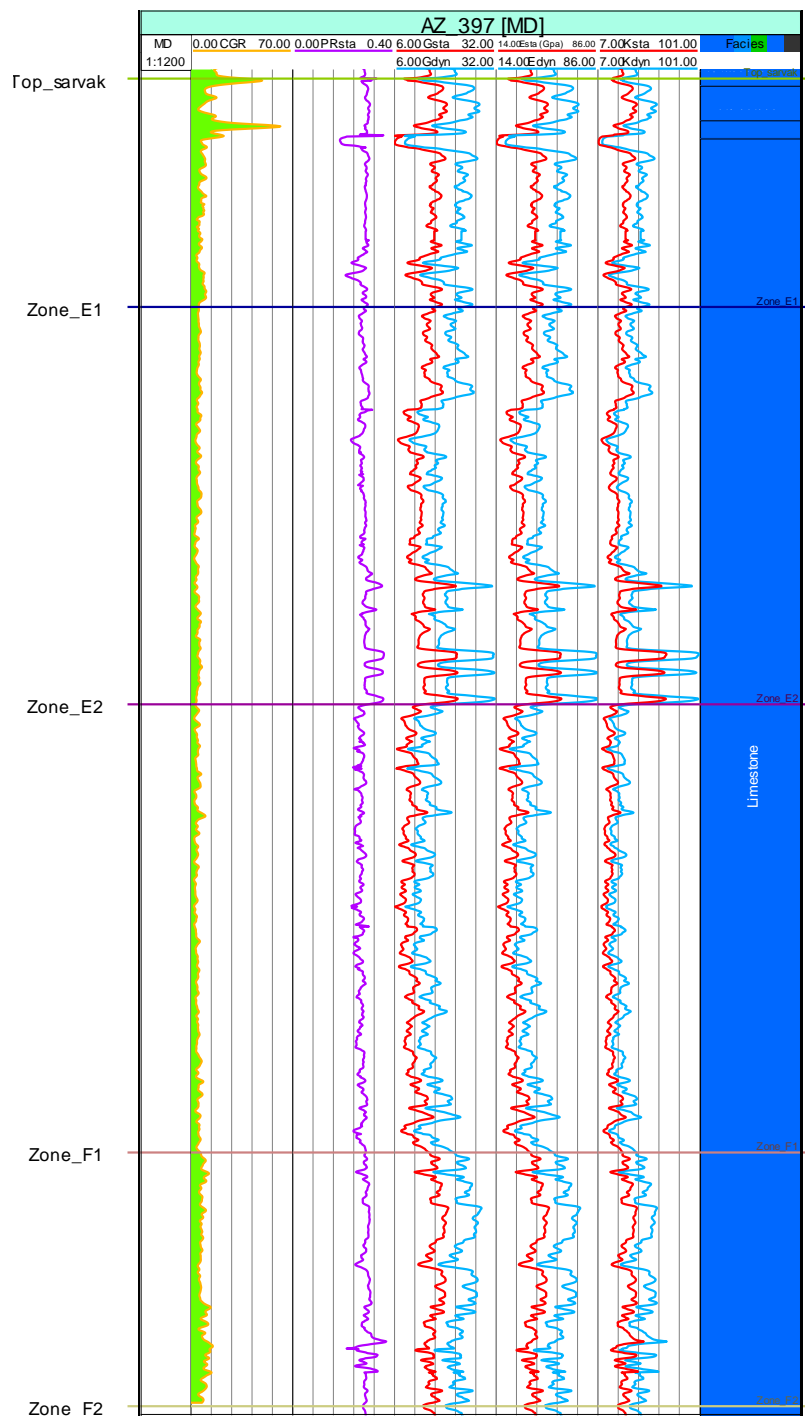


شکل ۳-۳۶ مدل‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۶۸، سازند سروک

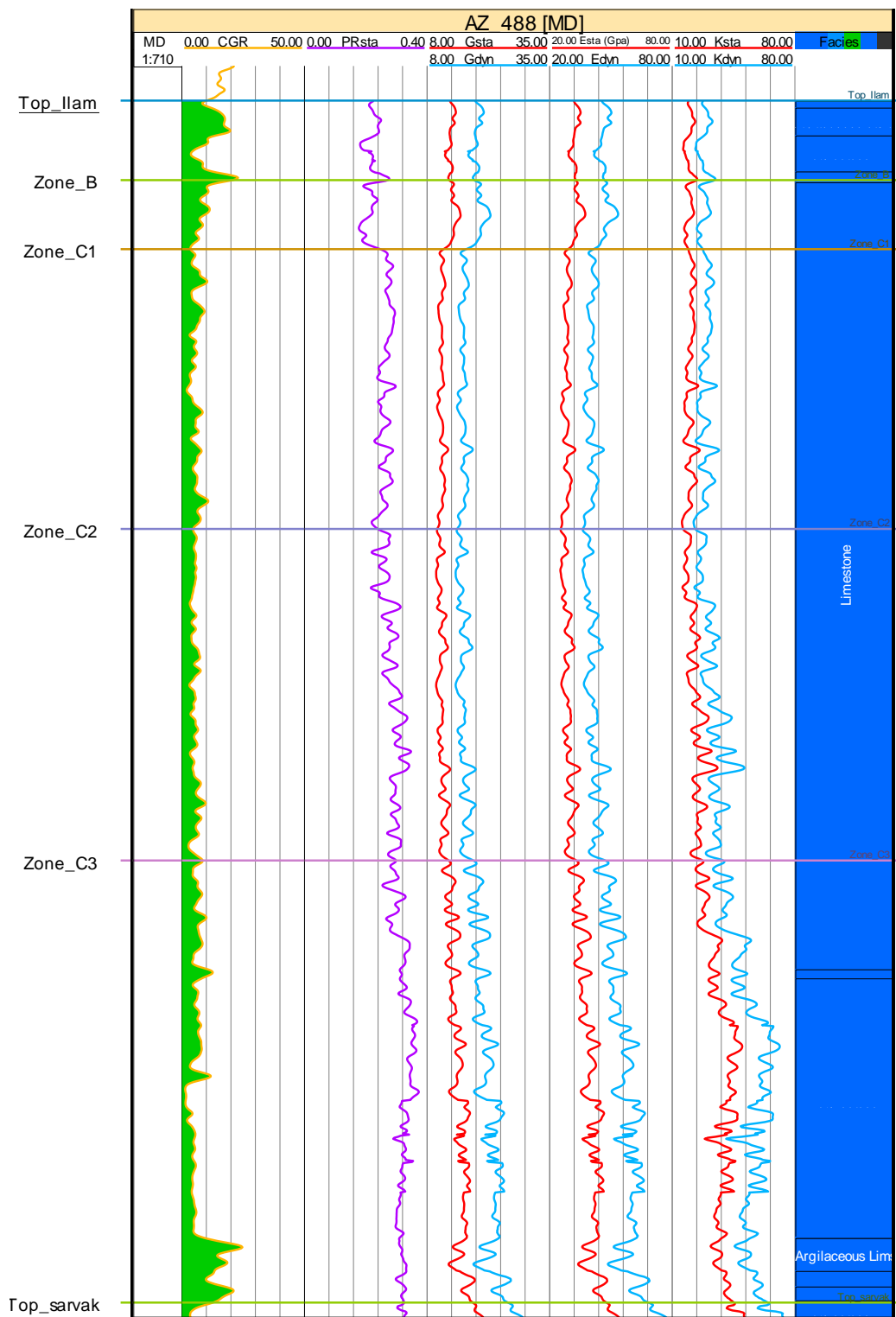




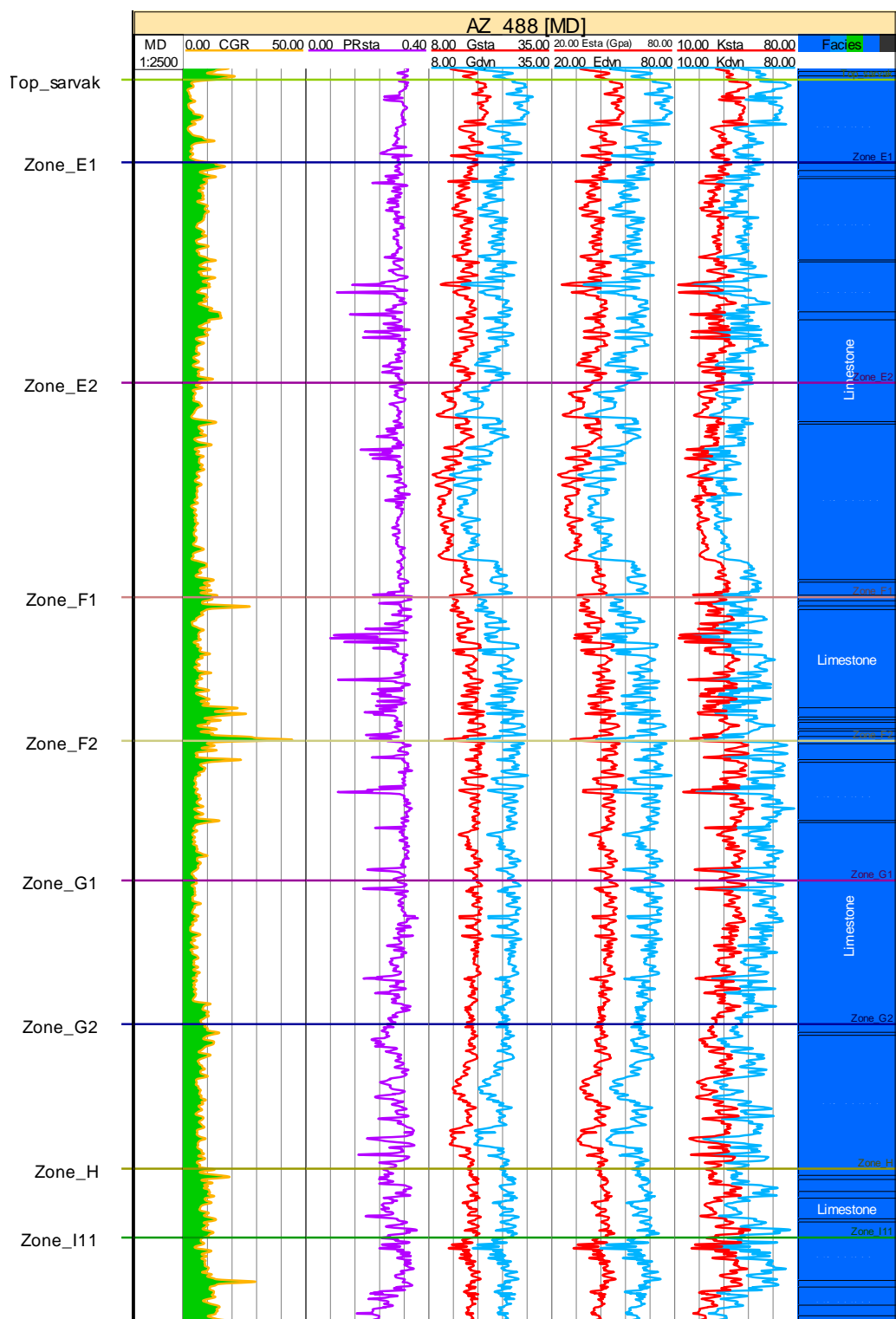
شکل ۳- ۳۷ مدول‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۹۷، سازند ایلام



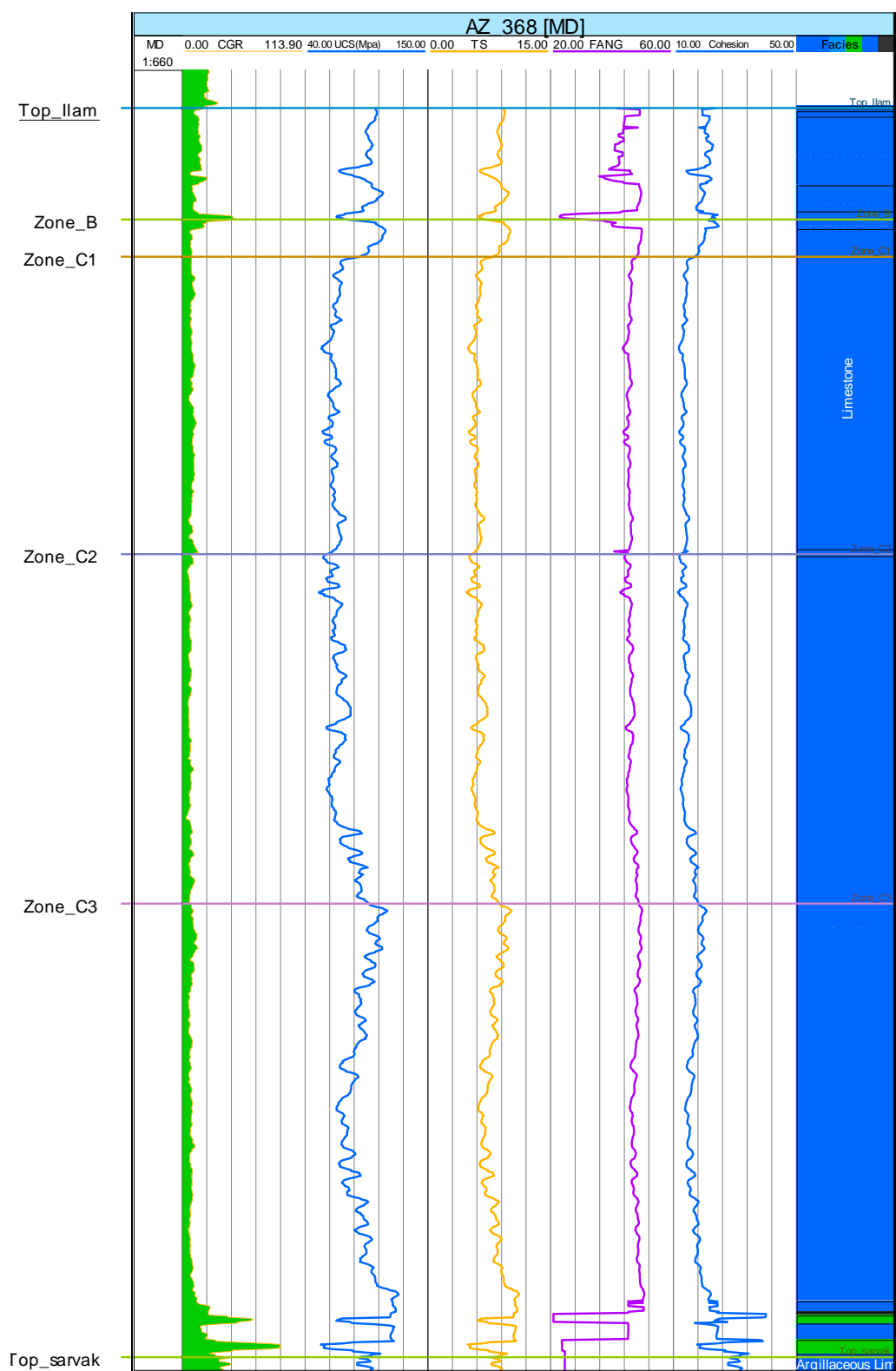
شکل ۳- ۳۸ مدل‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۳۹۷، سازند سروک



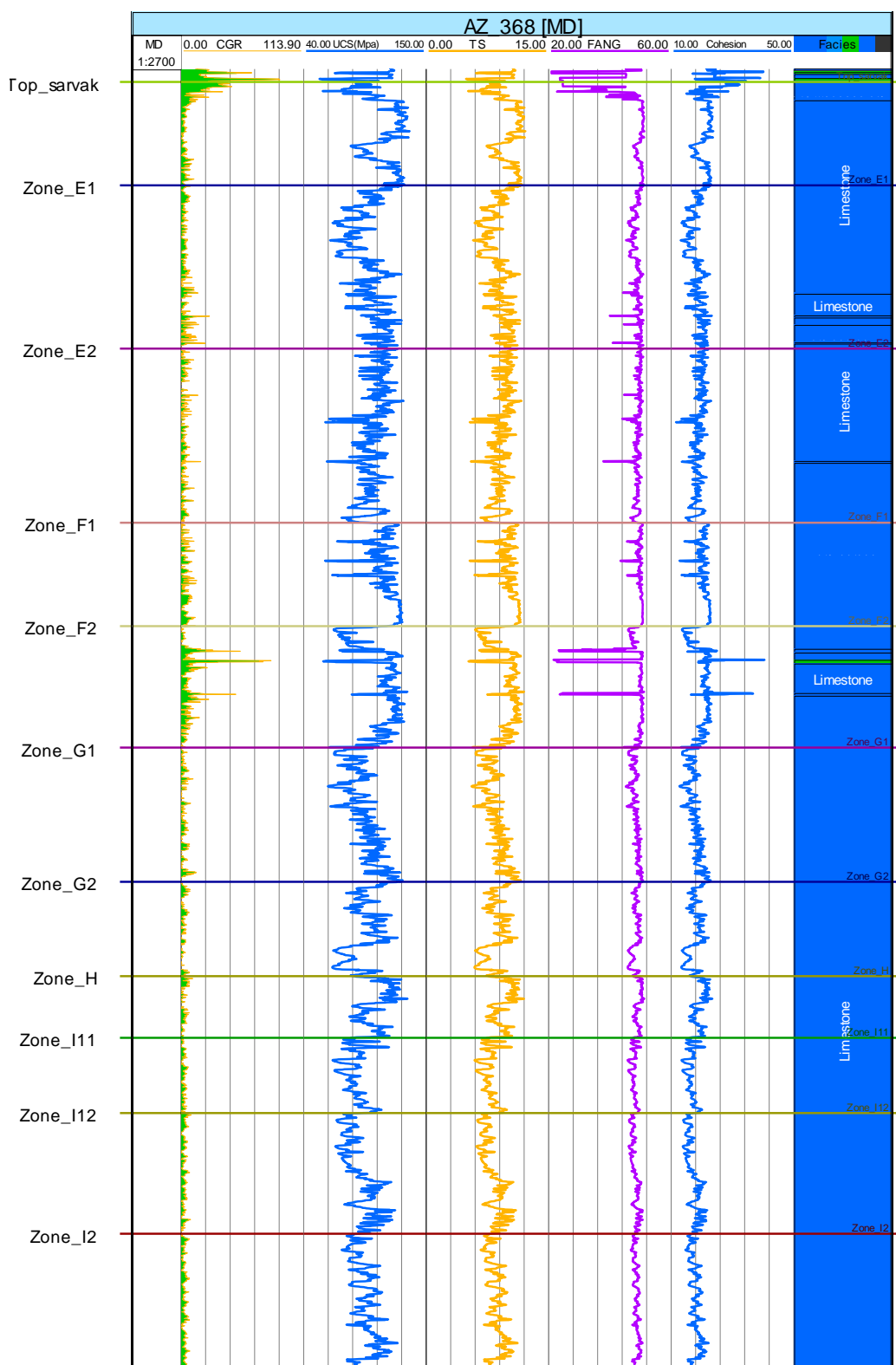
شکل ۳-۳۹ مدول های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۴۸۸، سازند ایلام



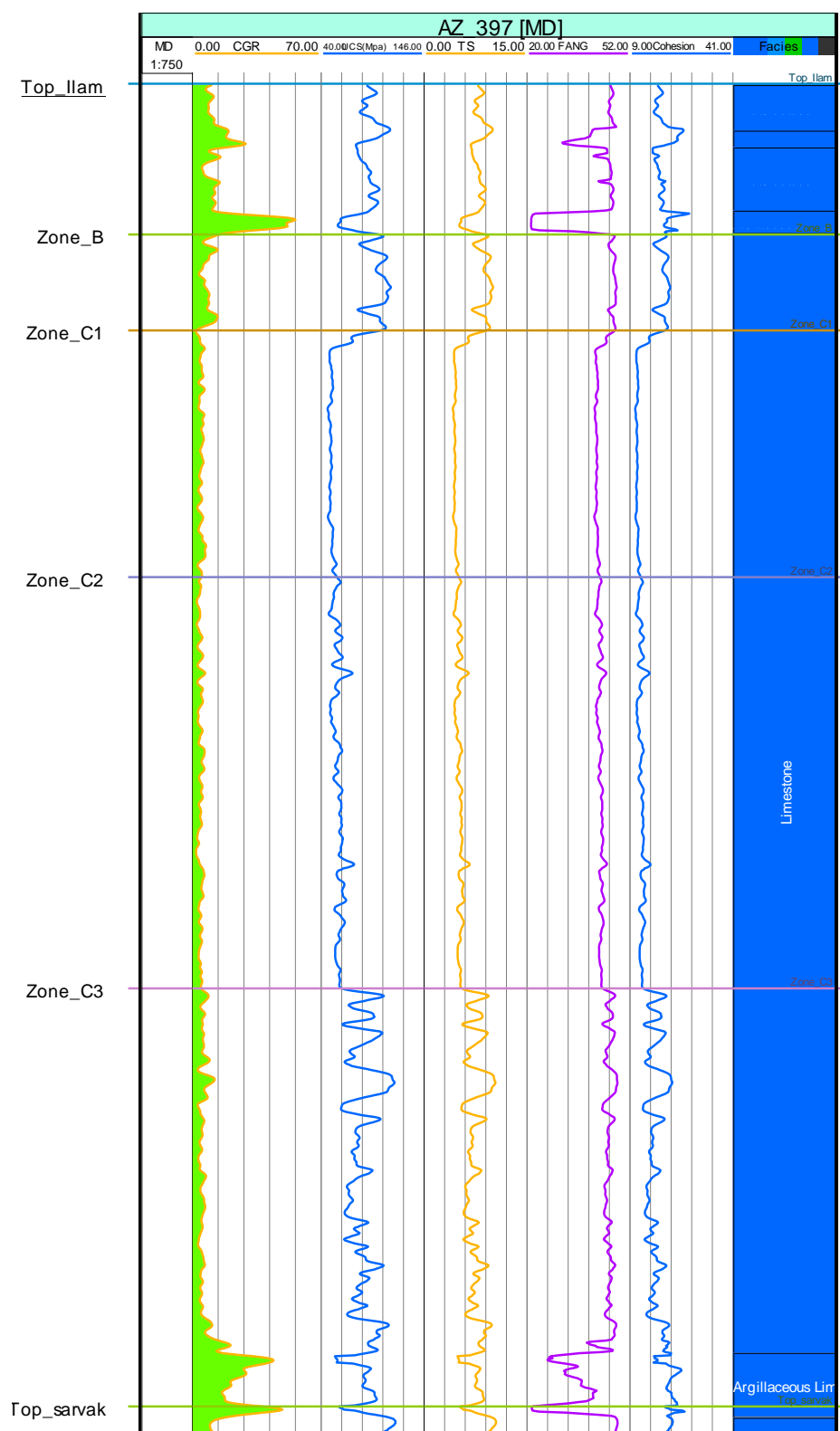
شکل ۳- ۴۰ مدل‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی در چاه ۴۸۸، سازند سروک



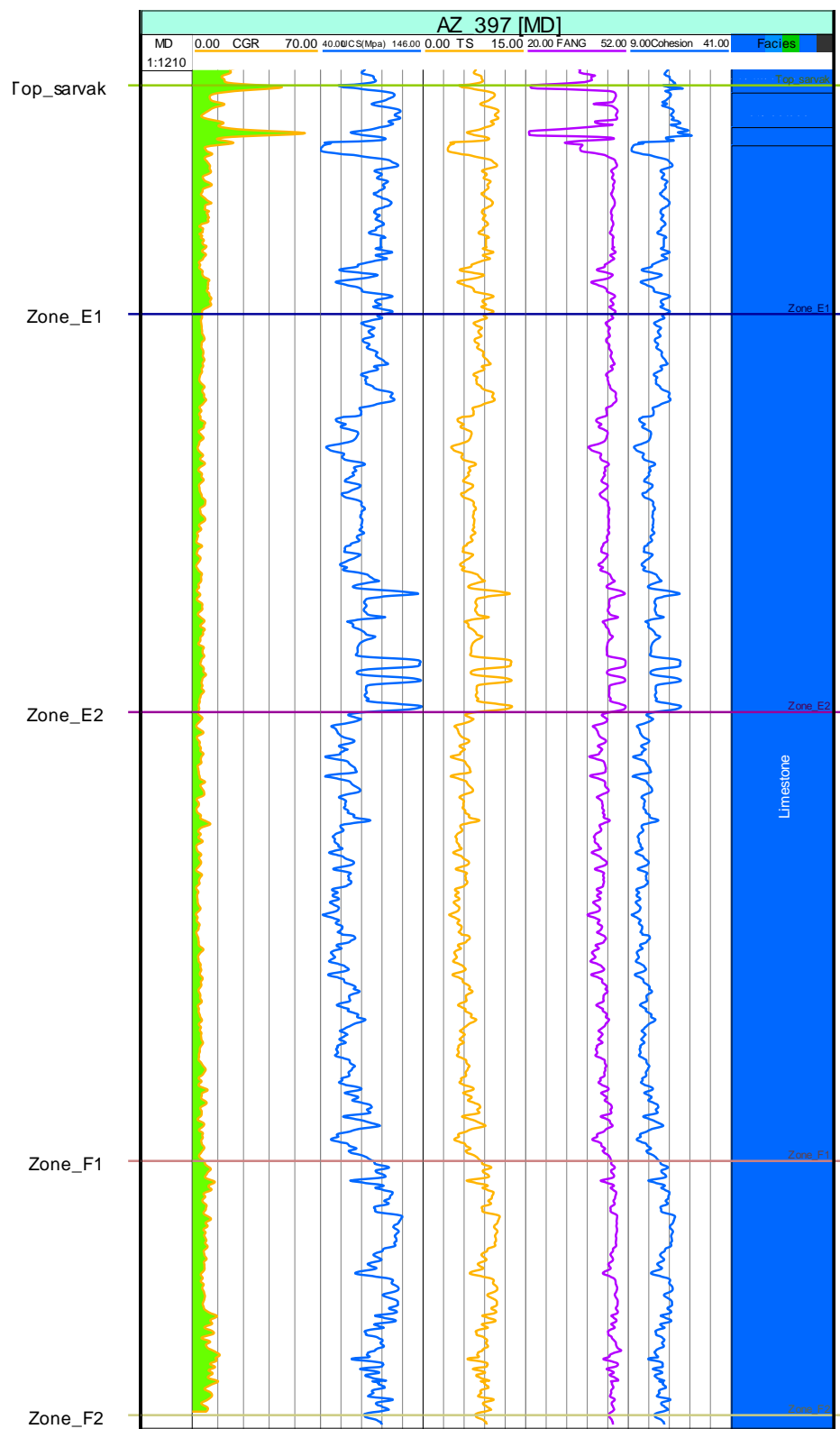
شکل ۳- ۴۱ پارامترهای مقاومتی سازند ایلام در چاه ۳۶۸



شکل ۳-۴۲ پارامترهای مقاومتی سازند سروک در چاه ۳۶۸

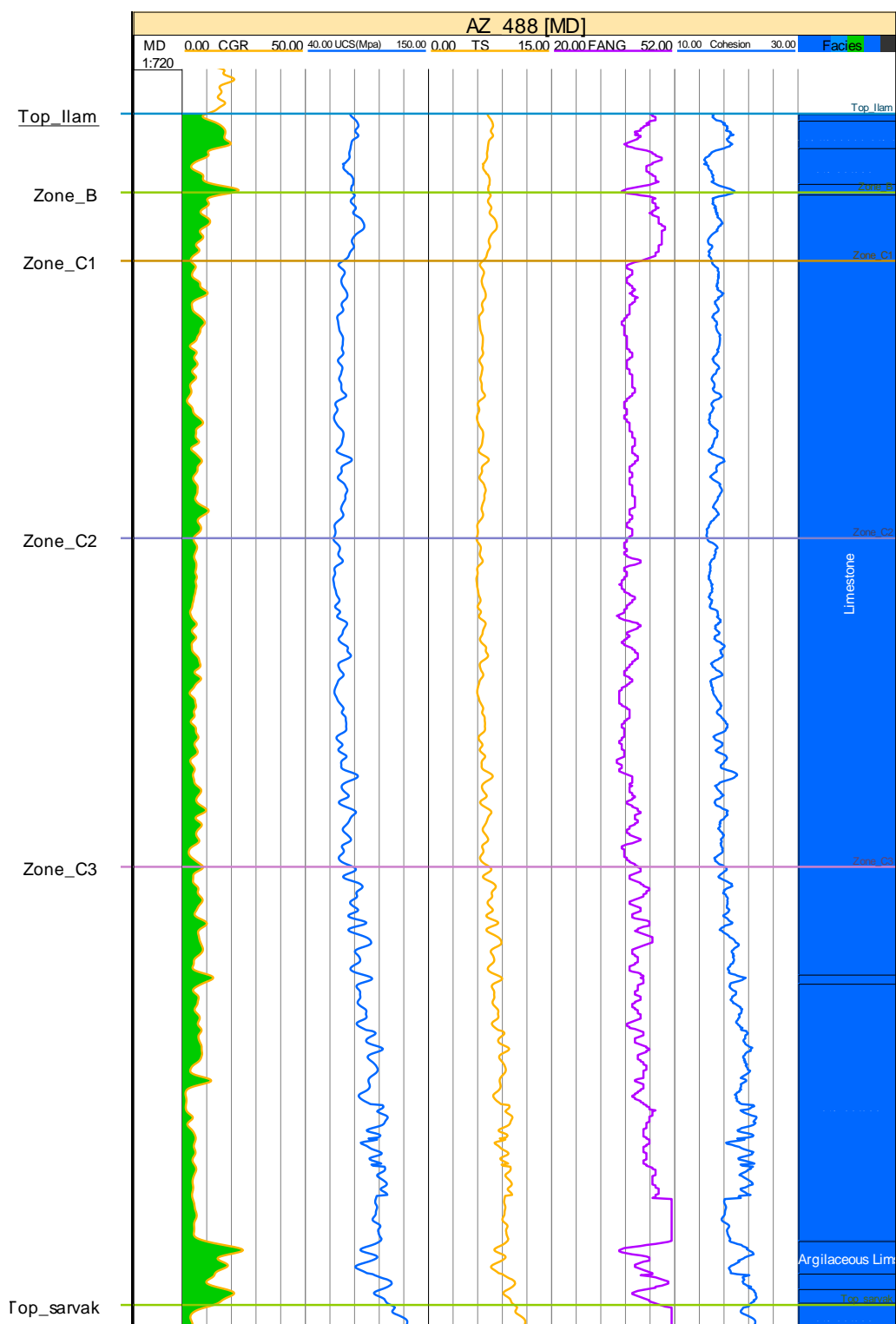


شکل ۳-۴۳ پارامترهای مقاومتی سازند ایلام در چاه ۳۹۷

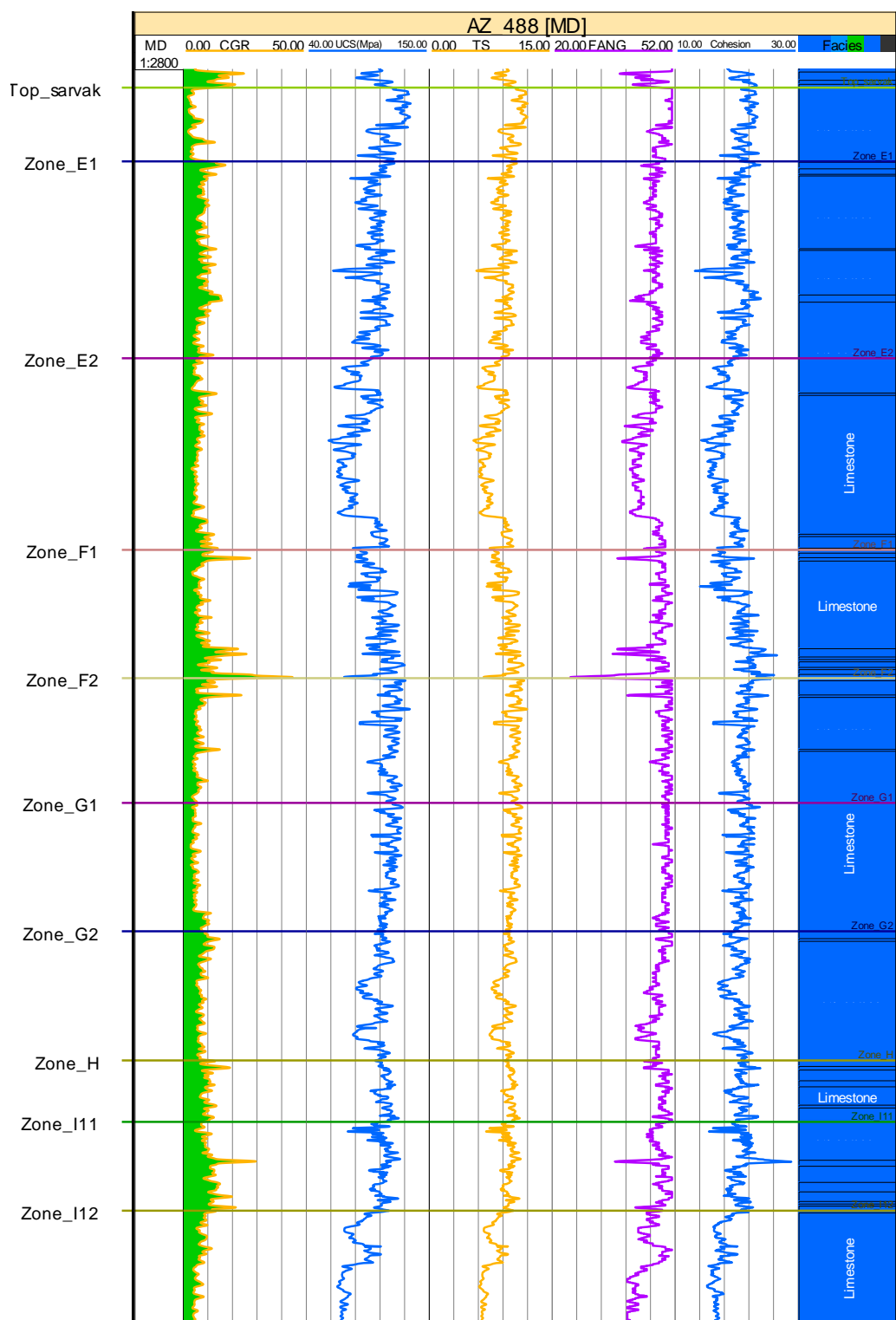


شکل ۳-۴۴ پارامترهای مقاومتی سازند سروک در چاه ۳۹۷





شکل ۳-۴۵ پارامترهای مقاومتی سازند ایلام در چاه ۴۸۸



شکل ۳-۴۶ پارامترهای مقاومتی سازند سروک در چاه ۴۸۸

### ۳-۴-۴ فشار منفذی

فشار منفذی که طبق تعریف به فشار سیال موجود در فضای متخلخل سنگ گفته می‌شود، یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی ژئومکانیکی است. فشار منفذی طبیعی، به فشار معادل ستون آب بالادست تا سطح ایستابی گفته می‌شود. چنانچه به دلایل زمین‌شناسی و یا تکتونیک، میزان فشار منفذی کمتر یا بیشتر از فشار همه‌جانبه (فشار منفذی طبیعی) گردد، فشار منفذی غیرطبیعی<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد. همچنین اگر فشار سیال مخزن به ۴۸٪ تا ۹۵٪ فشار روباره برسد، شرایط فشار لیتواستاتیک خواهد بود (Zhang, 2011).

برای به دست آوردن نگار پیوسته‌ای از فشار منفذی روابط مختلفی ارائه شده است که در این میان رابطه تجربی ایتون<sup>۲</sup> یکی از متداول‌ترین روش‌هاست. اما این روش و به طور کلی روش‌های مبتنی بر نگارهای چاه‌پیمایی بر مبنای خواص سازندهای شیلی توسعه یافته‌اند و بنابراین فشارهای محاسبه شده در این روش‌ها فشارهای موجود در سازند شیلی است.

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه‌ها از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا و گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز از طریق رابطه زیر می‌توان فشار منفذی را محاسبه کرد:

$$P_2 = P_1 + \rho_f g(Z_2 - Z_1) \quad (3-44)$$

در این رابطه  $P_1$  فشار سیال سازند در عمق  $Z_1$ ،  $P_2$  فشار سیال در عمق  $Z_2$ ،  $\rho_f$  چگالی سیال و  $g$  شتاب جاذبه زمین است (Zhang, 2011).

در جدول ۳-۸ مقادیر عمق و فشار مبنا در سازند ایلام و سروک نشان داده شده است. با استفاده از مقادیر این جدول و با استفاده از رابطه ۳-۴۴ فشار منفذی در چاه‌ها تخمین زده شده است. در این رابطه مقدار گرادیان نفت برابر با ۰/۳۵ psi/ft در نظر گرفته شد. به علاوه مقادیر محاسبه شده با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش RFT<sup>۳</sup> کالیبره شدند. در ادامه نتایج محاسبه فشار منفذی با این روش نشان داده خواهد شد.

---

<sup>۱</sup> Abnormal Pressure

<sup>۲</sup> Eaton

<sup>۳</sup> Repeat Formation Tester

جدول ۳-۸ مقادیر عمق و فشار مبنا در میدان نفتی اهواز

سازند	فشار در عمق مبنا (psi)	عمق مبنا (m)
ایلام	۵۷۵۰	۳۳۵۰
سروک- زون D و E	۴۵۵۰	۳۷۵۰
سروک- زون F و G	۴۹۰۰	
سروک- دیگر زون‌ها	۵۵۰۰	

### ۳-۴-۵ تنش‌های برجا

به طور کلی تنش‌های برجا شامل تنش اصلی عمودی و دو تنش افقی نابرابر هستند. در محیط‌هایی که از لحاظ تکتونیکی غیرفعال هستند تنش‌های افقی کوچکتر از تنش عمودی هستند، با این حال در رژیم‌های تکتونیکی فعال مقدار تنش افقی بزرگتر از تنش عمودی است (Zoback, 2007). تنش‌ها از مهم‌ترین پارامترهای مدل ژئومکانیکی هستند که در هر مطالعه ژئومکانیکی باید مقدار و جهت آن‌ها تعیین شود.

در صورتی که مقدار تنش عمودی از هر دو تنش افقی بیشتر باشد، رژیم تنش نرمال اتفاق می‌افتد. همچنین در صورتی که مقدار تنش افقی حداکثر از تنش عمودی بزرگتر باشد، صفحات گسل در امتداد یکدیگر لغزیده اما به بالا یا پایین جابجا نمی‌گردند و در این حالت رژیم تنش امتدادلغز<sup>۱</sup> خواهد بود. در نهایت چنانچه که هر دو تنش افقی بزرگتر از تنش عمودی باشند، صفحات گسل در امتداد آزمون شیب گسل بر روی یکدیگر لغزیده رژیم تنش معکوس<sup>۲</sup> است (Zoback et al., 2003).

#### • تنش عمودی

تنش عمودی ناشی از وزن طبقات بالایی است که می‌توان آن را با استفاده از چگالی روباره در هر نقطه‌ای به دست آورد. به دلیل اینکه در سطوح افقی پوخته زمین نباید تنش برشی وجود داشته باشد، یکی از جهت‌های اصلی تنش عمودی در نظر گرفته شده است. تنش عمودی با استفاده از رابطه ۳-۴۵ و بر اساس نگار چگالی به دست می‌آید:

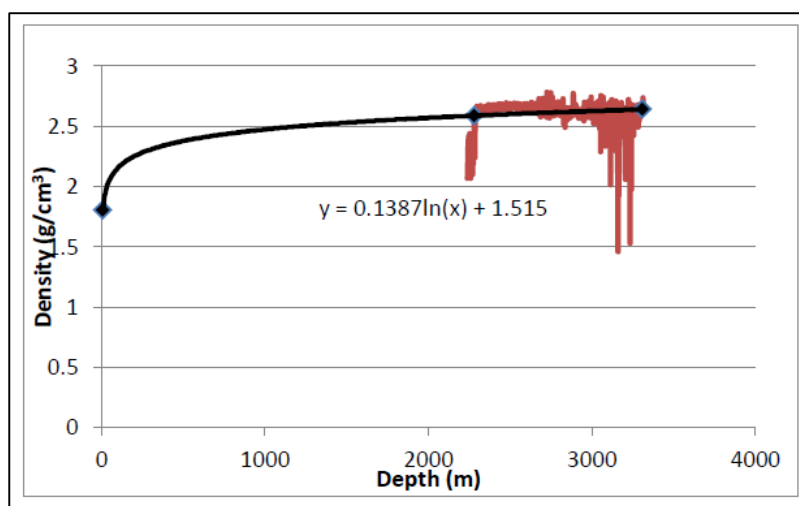
$$S_v = \int_0^z \rho(z) g dz \approx \bar{\rho} g z \quad (۴۵-۳)$$

<sup>۱</sup> Strike Slip

<sup>۲</sup> Reverse Regime

در این رابطه  $S_v$  تنش عمودی،  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط،  $g$  ثابت گرانش و  $z$  عمق از سطح زمین است (Zoback, 2007).

مشکلی که ممکن است وجود داشته باشد این است که نگار چگالی معمولاً در بخش‌های مخزنی موجود است. در این صورت باید مقادیر بالادست به روش برون‌یابی تخمین زده شوند. بدین صورت که چگالی سنگ در نزدیکی سطح زمین را برابر  $1/8$  در نظر گرفته و با برارش تابعی لگاریتمی بر نمودار چگالی، رابطه‌ای برای محاسبه چگالی در بخش‌هایی که نگار چگالی موجود نیست به دست می‌آید (شکل ۳-۴۷) (Archer and Rasouli, 2012).



شکل ۳-۴۷ برون‌یابی چگالی تا سطح زمین (Archer and Rasouli, 2012)

#### • تنش‌های افقی

روش‌های متعددی برای تخمین مقادیر و جهت تنش‌های افقی در چاه قائم ارائه شده است. در میان روش‌های مختلف آزمایش شکاف هیدرولیکی متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری برجای تنش است. در اعماق زیاد که امکان اجرای آزمایش شکاف هیدرولیکی وجود ندارد، آزمایش LOT جایگزین می‌گردد. اگرچه این آزمایش در صنعت نفت با هدف تعیین حد بالای فشار گل حفاری انجام می‌گیرد، مقادیر به دست آمده از این آزمایش تقریباً برابر با مقدار تنش اصلی افقی حداقل است (Amadei and Stephansson, 1997). در کنار روش‌های اندازه‌گیری برجا، روش‌های تخمین تنش به دلیل کم‌هزینه بودن و سرعت در محاسبه مورد استقبال محققین قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های متداول برای تخمین تنش‌های افقی استفاده از روابط پوروالاستیک است (Archer and Rasouli, 2012):

$$S_h = \frac{\vartheta}{1-\vartheta} (S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\vartheta^2)} (\varepsilon_x + \vartheta \varepsilon_y) \quad (46-3)$$

$$S_H = \frac{\vartheta}{1-\vartheta} (S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\vartheta^2)} (\varepsilon_y + \vartheta \varepsilon_x) \quad (47-3)$$

در این روابط  $\vartheta$  ضریب پواسون،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $P_p$  فشار منفذی و  $S_V$  تنش عمودی بر حسب Mpa،  $E_{sta}$  مدول الاستیسیته استاتیک بر حسب Gpa،  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  به ترتیب کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است.

روش تخمین تنش‌های افقی با استفاده از روابط بالا به این صورت است که ابتدا مقادیر کرنش‌های تکتونیکی در این روابط به صورت دلخواه انتخاب شده و مقادیر تنش محاسبه می‌شوند. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر تنش محاسبه شده، توزیع تنش در اطراف چاه و فشار گل، مناطق با احتمال گسیختگی با آنچه از نگار تصویری و کالیپر به دست آمده، مطابقت داده می‌شود. در صورت عدم انطباق مناسب، دوباره مقادیر کرنش تکتونیکی تخمین زده می‌شود تا انطباق کافی حاصل شود. برای پیش‌بینی وقوع شکست در دیواره چاه با وضعیت تنش‌های پیش‌بینی، باید از معیارهای شکست استفاده کرد. در ادامه در مورد معیارهای شکست و انتخاب معیار بحث خواهد شد.

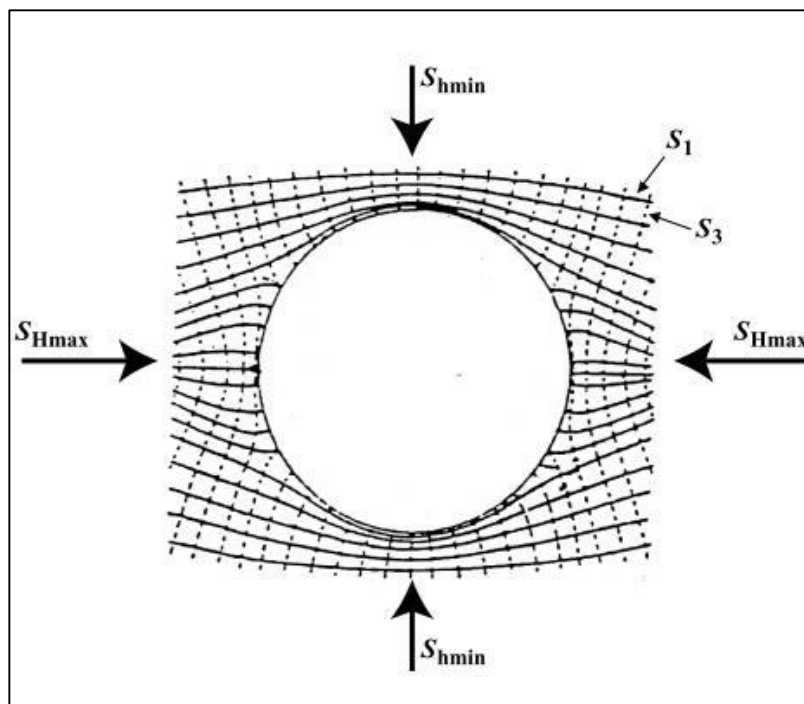
#### • جهت تنش‌های افقی

یکی از راه‌های تعیین جهت تنش‌های افقی، استفاده از شکستگی‌های برشی و کششی دیواره چاه است. شکستگی برشی دیواره چاه قائم در راستای تنش افقی حداقل اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل ۳-۴۸ نشان داده شده حفر یک چاه قائم باعث می‌شود تا مسیرهای تنش در جهت‌های موازی و عمود بر دیواره چاه دچار تغییر کرده و در اطراف چاه تمرکز تنش ایجاد شود. این شکل وضعیت تنش اطراف چاه قائم را تحت شرایط بارگذاری دومحوره بر اساس معادلات کرش<sup>۱</sup> نشان می‌دهد. تنش فشاری در نواحی همگرا شدن خطوط تنش (راستای تنش افقی حداقل) بیشتر از نواحی واگرایی خطوط تنش (راستای تنش افقی حداکثر) است. لذا وقوع شکست برشی در راستای تنش افقی حداقل محتمل‌تر از راستای تنش افقی حداکثر است (Zoback, 2007).

ابزارهای متفاوتی برای تعیین جهت تنش‌های اصلی وجود دارد که در این میان نگارهای تصویری و کالیپر چند بازویی نقش بسزایی دارند. بهترین روش برای تشخیص شکستگی‌های چاه نگارهای تصویری

<sup>۱</sup> Kirsch

هستند. این نگارها عمق بررسی بسیار پایینی دارند. در گل حفاری پایه‌آبی از FMI<sup>۱</sup> و در گل‌های پایه روغنی از OBMI<sup>۲</sup> و UBI<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، که به طور کلی OBMI برای تعیین شیب ساختاری و ساختارهای رسوبی و UBI برای تعیین شکستگی‌ها مناسب است (Schulumberger, 2003).



شکل ۳-۴۸ تنش‌های اصلی اطراف یک چاه قائم تحت شرایط تنش دومحوره بر اساس معادلات کرش (Zoback, 2007)

#### • تنش در مختصات استوانه‌ای

جهت بررسی تنش‌ها در سنگ‌های اطراف یک چاه باید تنش‌ها را در مختصات استوانه‌ای بنویسیم. تنش‌ها در نقطه‌ای با مختصات  $r$ ،  $\theta$  و  $z$  با  $\sigma_r$ ،  $\sigma_\theta$ ،  $\sigma_z$ ،  $\tau_{r\theta}$ ،  $\tau_{rz}$  و  $\tau_{\theta z}$  نشان داده می‌شوند. این تنش‌ها در

<sup>۱</sup> Full-bore Formation Micro Imager

<sup>۲</sup> Oil Base Mud Imager

<sup>۳</sup> Ultrasonic Borehole Imager

یک صفحه عمود بر محور z در شکل ۳-۴۹ نشان داده شده‌اند. روابط بین تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای و مختصات کارتزین به صورت زیر است:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (۴۸-۳)$$

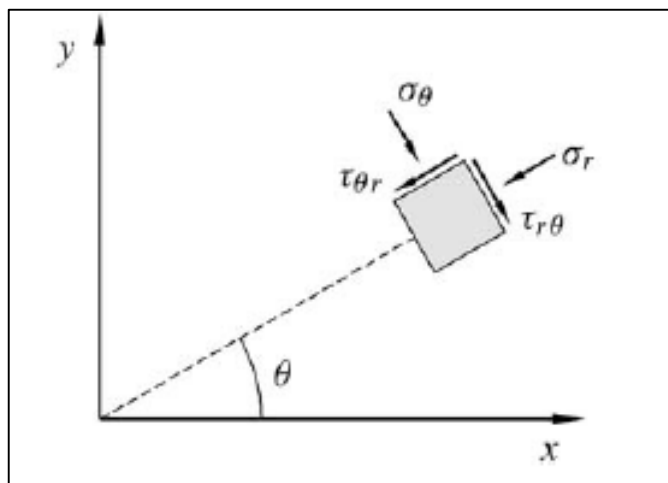
$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (۴۹-۳)$$

$$\sigma_z = \sigma_z \quad (۵۰-۳)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (۵۱-۳)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta \quad (۵۲-۳)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta \quad (۵۳-۳)$$



شکل ۳-۴۹ تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای (Fjaer et al, 2008)

برای یک چاه قائم در جهت تنش‌های اصلی در نهایت تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شوند. در این روابط  $\theta$  زاویه نسبت به جهت تنش افقی حداکثر است:

$$\sigma_r = P_w \quad (۵۴-۳)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w \quad (۵۵-۳)$$



$$\sigma_z = \sigma_v - 2\vartheta(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad (56-3)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \tau_{rz} \quad (57-3)$$

معادله ۵۵-۳ نشان می‌دهد که تنش مماسی در دیوارهٔ چاه بین یک مقدار حداکثر و حداقل تغییر می‌کند که مقدار حداکثر در جهت تنش افقی حداقل و مقدار حداقل در جهت تنش افقی حداکثر اتفاق می‌افتد (Fjaer et al., 2008):

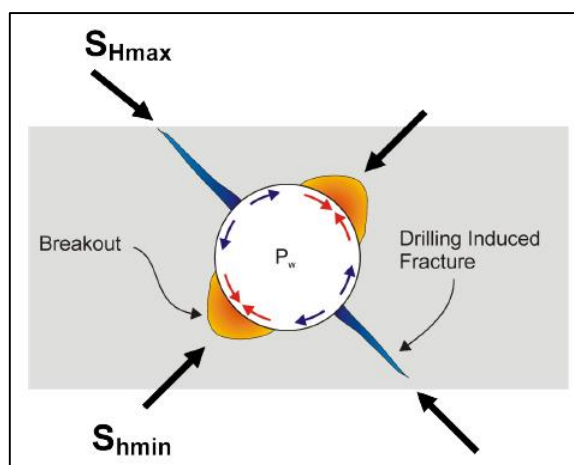
$$\sigma_{\theta, \max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \quad (58-3)$$

$$\sigma_{\theta, \min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \quad (59-3)$$

### ۳-۴-۶ معیار شکست

آنالیز مکانیکی چاه شامل دو مرحله است. در مرحله اول لازم است تا مقدار تنش‌های القایی در دیواره چاه تخمین زده شود و در مرحله دوم مقادیر این تنش‌ها با مقاومت سنگ‌های اطراف چاه مقایسه گردد. برای به دست آوردن تنش‌های مماسی ( $\sigma_\theta$ )، شعاعی ( $\sigma_r$ ) و محوری ( $\sigma_z$ ) می‌توان از روابط ۵۴-۳ تا ۵۷-۳ استفاده کرد. پس از به دست آوردن تنش‌های القایی در صورتی که تنش شعاعی بزرگتر از تنش مماسی باشد ( $\sigma_r > \sigma_\theta$ )، شرایط ایجاد شکستگی کششی و در صورتی که تنش مماسی بزرگتر از تنش شعاعی باشد ( $\sigma_\theta > \sigma_r$ )، شرایط وقوع شکستگی برشی در دیواره چاه فراهم می‌شود. شکست زمانی رخ می‌دهد که میزان تنش القایی از مقاومت سنگ بیشتر شود. در شکل ۵۰-۳ تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، تنش‌های القایی و شکست‌های رخ داده در اطراف چاه نشان داده شده است.

پس از حفر چاه، تنها سیال حفاری در چاه وجود داشته و تلاش می‌کند که رژیم تنش برجای قبل از حفاری را جبران نماید. در صورتی که مقدار فشار گل حفاری ( $P_w$ ) کم باشد، مقدار تنش مماسی افزایش یافته و به مقدار مقاومت سنگ نزدیک می‌شود. چنانچه مقدار فشار گل حفاری ( $P_w$ ) از حد پایین فشار مجاز گل ( $P_{wb}$ ) کمتر شود ( $P_w \leq P_{wb}$ )، مقدار تنش مماسی بر مقاومت سنگ غلبه کرده و در راستای تنش افقی حداقل شکستگی برشی در دیواره چاه رخ خواهد داد (Al-Ajmi, 2006).



شکل ۳-۵۰ شکستگی‌های برشی و کششی در دیواره چاه (Rasouli et al., 2010)

از سوی دیگر با افزایش فشار گل حفاری، میزان تنش شعاعی وارد بر دیواره چاه افزایش می‌یابد. حال اگر فشار گل حفاری از حد بالای فشار گل بیشتر شود، در راستای تنش افقی حداکثر شکستگی کششی به وجود خواهد آمد. برای به دست آوردن حد بالا و پایین فشار گل می‌توان از معیارهای شکست مختلف استفاده کرد. در ادامه به معرفی معیار شکست موهر-کلمب و موگی کلمب<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود.

### ۳-۴-۶-۱ معیار شکست موهر-کلمب

معیار موهر-کلمب ساده‌ترین و در عین حال در عمل پر استفاده‌ترین معیار شکست است. طبق این معیار هنگامی که تنش برشی وارد بر یک صفحه (T) از چسبندگی<sup>۲</sup> طبیعی سنگ به علاوه نیروی اصطکاک در سطح شکست بیشتر شود، شکست برشی رخ خواهد داد. بر اساس این معیار مقاومت برشی با افزایش تنش نرمال وارد بر صفحه شکست به طور خطی افزایش می‌یابد. این معیار بر حسب تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (۳-۶۰)$$

در این رابطه  $C_0$  مقدار مقاومت فشاری تک محوره سنگ است.  $q$  نیز پارامتری است که به زاویه اصطکاک داخلی وابسته بوده و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۳-۶۱)$$

<sup>۱</sup> Mogi- Coulomb

<sup>۲</sup> Cohesion

مقدار مقاومت فشاری تک محوره نیز از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_c = C_o = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۶۲-۳)$$

بر اساس حالت‌های مختلف تنش‌های القایی بر روی دیواره چاه، حد پایین فشار گل با استفاده از معیار شکست موهر-کلمب از روابط جدول ۳-۹ قابل محاسبه است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

جدول ۳-۹ حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

وضعیت تنش	حد پایین فشار گل $P_{wb}$
$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = (B - C_o)/q$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = (A - C_o)/(1 + q)$
$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = A - C_o - qB$
$A = 3\sigma_H - \sigma_h, B = \sigma_v + 2\vartheta(\sigma_H - \sigma_h)$	

### ۳-۴-۶-۲ معیار شکست موگی-کلمب

معیار موهر-کلمب اثر تنش‌های میانی بر مقاومت سنگ را نادیده می‌گیرد. در نتیجه انتظار می‌رود که این معیار محافظه کارانه عمل کرده و فشار گل لازم برای پایداری دیواره چاه را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند. با وجود کاربردهای زیاد معیار شکست موهر کلمب، مثال‌های زیادی از عملکرد نامناسب این معیار شکست وجود دارد که نشان‌دهنده ضعف آن در تخمین فشار گل مورد نیاز است. موگی با انجام آزمایش‌های سه‌محوره بر روی سنگ‌ها نشان داد که تنش اصلی میانی بر روی مقاومت سنگ تأثیر بسزایی دارد. بر این اساس موگی معیار خود را به صورت زیر بیان کرد (Al-Ajmi, 2006):

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (۶۳-۳)$$

که در این رابطه  $\tau_{oct}$  تنش برشی اکتاهدرال<sup>۱</sup> است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (۶۴-۳)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi, b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (۶۵-۳)$$

بر اساس این معیار حد پایین فشار گل با استفاده از روابط موجود در جدول ۳-۱۰ به دست می‌آید (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

<sup>۱</sup> Octahedral

جدول ۳- ۱۰ حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موگی کلمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

وضعیت تنش	حد پایین فشار گل $P_{wb}$
$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(A - 2P_o)]^2 - 3(A - 2B)^2}$
$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 + b'AG)} \right]$
$A = 3\sigma_H - \sigma_h, B = \sigma_v + 2\vartheta(\sigma_H - \sigma_h), H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12),$ $K = a' + b'(B - 2P_o), G = K + b'A, a' = 2c \cos \varphi, b' = \sin \varphi$	

### ۳-۴-۷ تنش‌های برجا در چاه‌های مورد مطالعه

مقدار و جهت تنش‌های برجا از جمله مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در انتخاب لایه کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی هستند. همان‌طور که در پیشتر گفته شد، مقدار تنش قائم و تنش‌های افقی از روابط ۳-۴۵ تا ۳-۴۷ تخمین زده می‌شوند. سپس مقادیر تخمینی با استفاده از آزمایش‌های درون‌چاهی و یا نگارهای تصویری کالیبره می‌شوند. با بررسی و تفسیر نگارهای تصویری، راستای تنش‌ها در چاه نیز به دست می‌آید. راستای تنش افقی حداکثر در راستای شکستگی‌های کششی و راستای تنش افقی حداقل در راستای شکستگی‌های برشی در دیواره چاه است.

نگارهای تصویری در چاه‌های مورد مطالعه موجود بود اما آزمایش نشت گسترده (XLOT) تنها در چاه ۴۸۸ انجام شده است. بنابراین تنش‌های تخمینی در چاه ۴۸۸ با استفاده از نتایج آزمایش XLOT و در چاه‌های ۳۶۸ و ۳۹۷ با استفاده از نگارهای تصویری کالیبره شدند. در ادامه نتایج تخمین تنش در هر یک از چاه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۴-۷-۱ اندازه‌گیری مقادیر تنش در چاه ۴۸۸

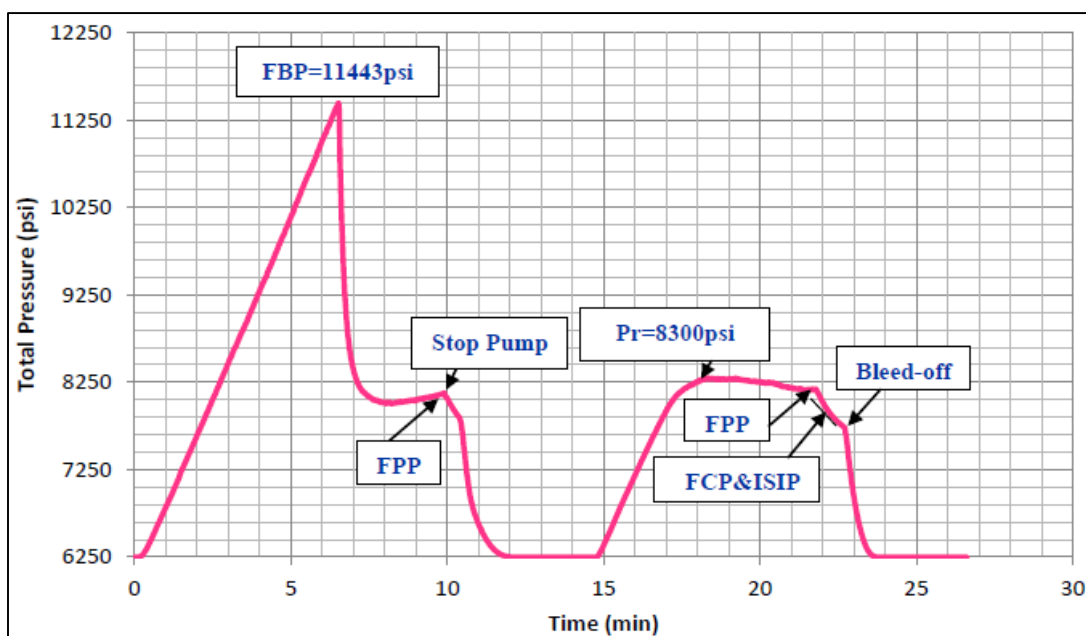
در این چاه در زون D سازند سروک آزمایش نشت گسترده در زیر پاشنه آستری ۷ اینچ درتوالی عمقی ۳۵۱۲/۵ تا ۳۵۱۶ متر حفار انجام شده است. مراحل مختلف این آزمایش به شرح زیر انجام شده است (گزارش مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳):

- ۱- مقطع ۳/۵ متری (در توالی عمقی ۳۵۱۲/۵ تا ۳۵۱۶ متر حفار) از سازند سروک زون D زیر پاشنه آستری ۷ اینچ حفاری گردید.
- ۲- عملیات گردش گل برای خروج کامل خرده‌های حفاری از داخل چاه و نیز حاصل شدن سیال یکنواخت انجام شد.
- ۳- سیال تزریقی مورد استفاده از گل حفاری نوع پایه روغنی با وزن ۷۸ پوند بر فوت مکعب بوده که فشار معادل ستون سیال در عمق ۳۵۱۶ متری برابر با ۶۲۵۰ پام (psi) محاسبه گردید.
- ۴- گل حفاری با متوسط نرخ تزریق حدود ۰/۳ بشکه در دقیقه در دو چرخه به داخل چاه پمپاژ گردید. حجم نهایی تزریق شده به درون چاه در چرخه اول ۲/۸ بشکه و در چرخه دوم ۱/۹ بشکه می‌باشد.
- ۵- فشار اعمال شده به طور پیوسته ثبت و نمودارهای فشار-زمان ترسیم گردید. همچنین مقادیر فشار اعمالی از سطح، فشار در کف چاه و حجم سیال ورودی به سازند در زمان‌های مختلف در طول آزمایش، خاموش کردن پمپ و زمان باز کردن شیر برگشت گل حفاری مشخص شد.
- ۶- آزمایش تا مرحله شکست سنگ<sup>۱</sup> (FBP) ادامه یافت. در این حالت حداکثر فشار اعمال شده از سطح برابر با ۵۱۹۴ پام است. با توجه به شکل ۳-۵۱، شیب نمودار یا به عبارتی نرخ ورود سیال به سازند، تا زمان حدود ۶/۵ دقیقه (لحظه شکست سازند) بدون تغییر بوده و پس از آن نرخ ورود سیال به سازند تغییر یافته است و افت قابل ملاحظه‌ای در نمودار مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده شکست سنگ می‌باشد.
- ۷- با عبور از مرحله شکست و وقوع افت فشار، بدون توقف پمپاژ اجازه انتشار شکستگی داده شده است.
- ۸- پس از تعیین فشار معادل توسعه شکاف<sup>۲</sup> (FPP)، پمپ خاموش شده و شرایط امکان تعیین فشار آنی (ISIP) و فشار بسته شدن شکستگی<sup>۳</sup> (FCP) فراهم گردیده است.
- ۹- آزمایش تا به تعادل رسیدن فشار پایش شده و سپس شیر برگشت گل باز شده است. بعد از محو شدن کامل فشار و اتمام آزمایش در چرخه نخست، آزمایش در چرخه دوم تکرار گردید.

<sup>۱</sup> Fracture Breakdown Pressure

<sup>۲</sup> Fracture Propagation Pressure

<sup>۳</sup> Fracture Closure Pressure



شکل ۳- ۵۱ نمودار فشار کل - زمان تزریق سیال ورودی به سازند در محل پاشنه آستری ۷ اینچ در چاه ۴۸۸  
(گزارش مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳)

نتایج به دست آمده از این آزمایش به صورت زیر است:

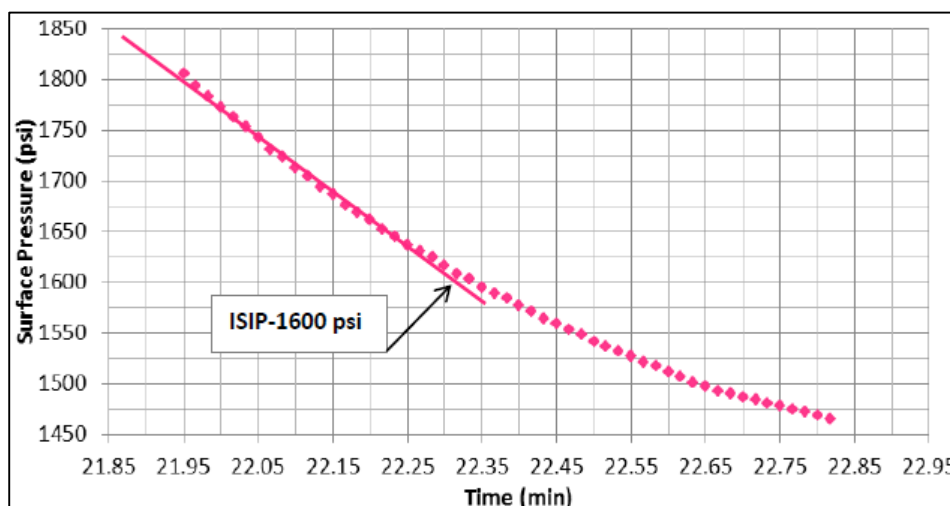
- ۱- حداکثر فشار اعمال شده (فشار معادل نقطه FBP) از سطح در چرخه اول برابر با ۵۱۹۴ پام بوده و با در نظر گرفتن وزن ستون گل، فشار در کف چاه ۱۱۴۴۳ پام ( ۷۸/۹ مگاپاسکال) است که پس از گذشت حدود ۶/۵ دقیقه از شروع آزمایش حاصل شد.
- ۲- با توجه به عدم تثبیت کامل نرخ تزریق سیال در شرایط موجود و با تجهیزات کنونی امکان تعیین نقطه LOP بسیار مشکل و عملاً غیرممکن است.
- ۳- فشار توسعه ترک (FPP) در این آزمایش در حدود ۱۹۰۰ پام در سطح تعیین گردید که با در نظر گرفتن فشار ستون گل حفاری در کف چاه این فشار ۸۱۵۰ پام (۵۶/۲ مگاپاسکال) برآورد می گردد.
- ۴- در این آزمایش به منظور اندازه گیری دقیق تر تنش اصلی حداقل، از فشار آبی پس از خاموش کردن پمپ یا فشار پس از توقف ناگهانی جریان به درون چاه (ISIP) و فشار بسته شدن شکستگی (FCP) استفاده گردید.

۵- مقدار ISIP به صورت تابعی از زمان و با بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار تعیین می‌گردد. در این آزمایش این مقدار در حدود ۱۶۰۰ پام بوده (شکل ۳-۵۲) و با در نظر گرفتن فشار ستون گل حفاری در کف این چاه این فشار ۷۸۵۰ پام برابر با ۵۴/۱ مگاپاسکال تعیین شد.

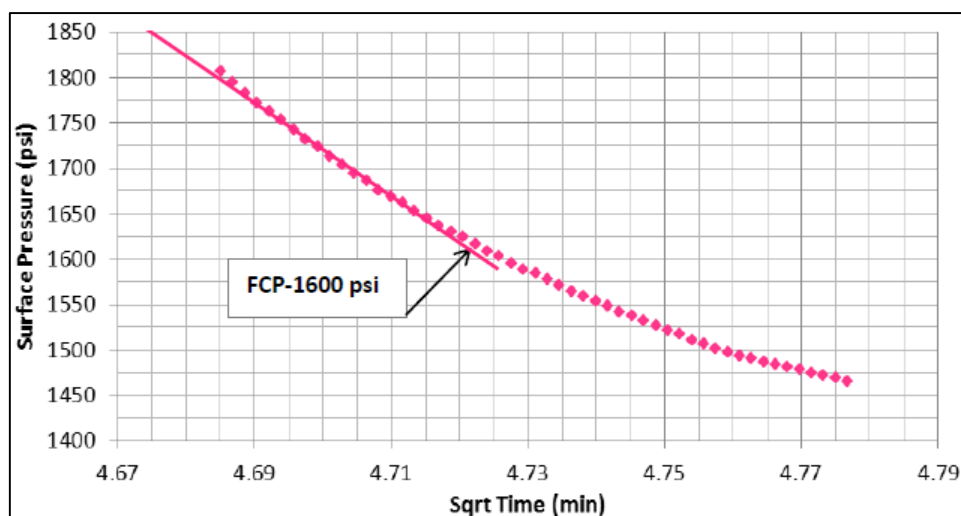
۶- فشار بسته شدن شکستگی (FCP) هم با ترسیم فشارها به صورت تابعی از ریشه دوم زمان بعد از خاموش کردن پمپ، و بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار تعیین گردید که در این آزمایش در حدود ۱۶۰۰ پام بوده (شکل ۳-۵۳) و با در نظر گرفتن فشار ستون گل حفاری در کف این چاه این فشار ۷۸۵۰ پام برابر با ۵۴/۱ مگاپاسکال تعیین شد.

۷- تنش افقی حداقل برابر با فشار معادل نقطه FCP در عمق ۳۵۱۲/۵ تا ۳۵۱۶ متری برابر با ۷۸۵۰ پام (حدود ۵۴/۱ مگاپاسکال و مقدار تنش قائم نیز برای این توالی حدود ۱۳۰۰۰ پام معادل ۸۹/۷ مگاپاسکال تخمین زده می‌شود. همچنین تنش افقی حداکثر در این اعماق با توجه به رابطه ۳-۶۶ و فرض فشار منفذی حدود ۵۷۵۰ پام، در حدود ۹۵۰۰ پام (حدود ۶۵/۵ مگاپاسکال) تخمین زده می‌شود. با توجه به مقادیر تنش رژیم تنش در این چاه به صورت نرمال است.

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_{BD} + T_o - P_p \quad (۳-۶۶)$$



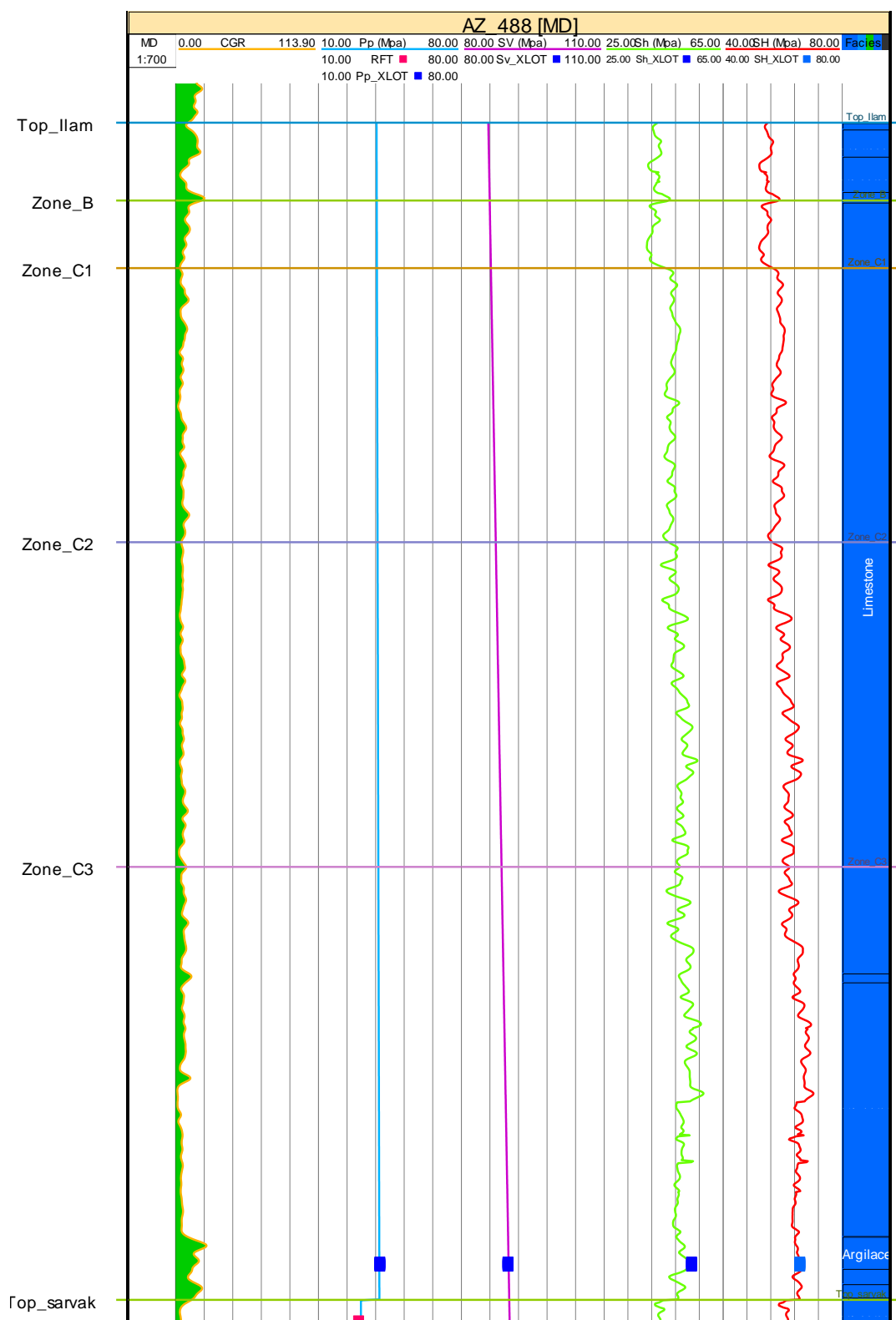
شکل ۳-۵۲ تعیین مقدار ISIP با ترسیم فشار سطحی به صورت تابعی از زمان و بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار (گزارش مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳)



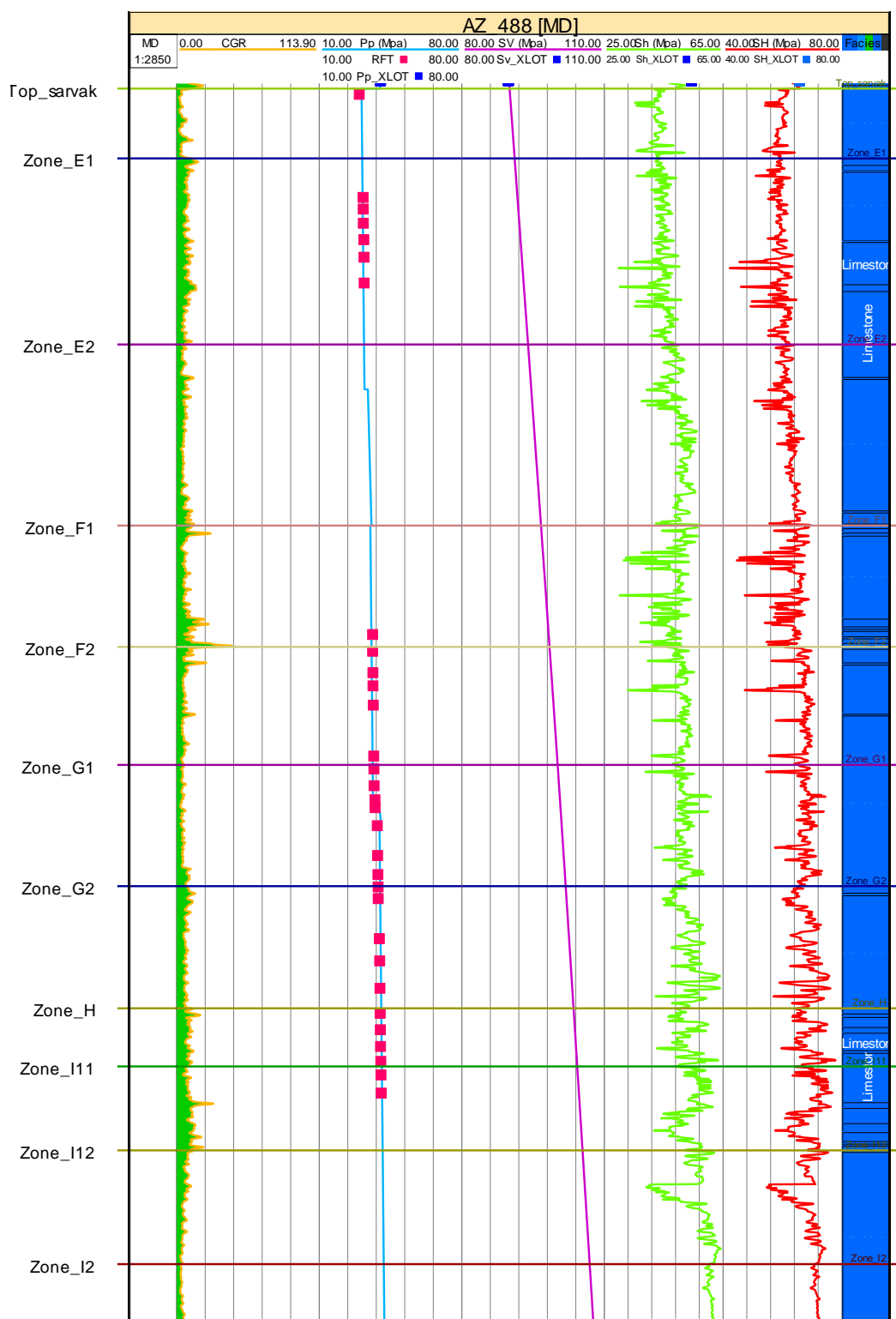
شکل ۳-۵۳ تعیین مقدار FCP با ترسیم فشار سطحی به صورت تابعی از ریشه دوم زمان بعد از خاموش کردن پمپ و بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار (گزارش مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳)

در شکل‌های ۳-۵۴ و ۳-۵۵ نتایج محاسبه تنش‌ها در سازند ایلام و سروک چاه ۴۸۸ و کالیبره کردن آن‌ها با استفاده از نتایج این آزمایش نشان داده شده است. در این شکل‌ها ستون اول عمق بر حسب متر حفار، ستون دوم نگار گاما، ستون سوم مقادیر فشار منفذی بر حسب MPa است. در ستون چهارم، پنجم و ششم نیز به ترتیب مقادیر تنش قائم، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر بر حسب مگاپاسکال نشان داده شده است.





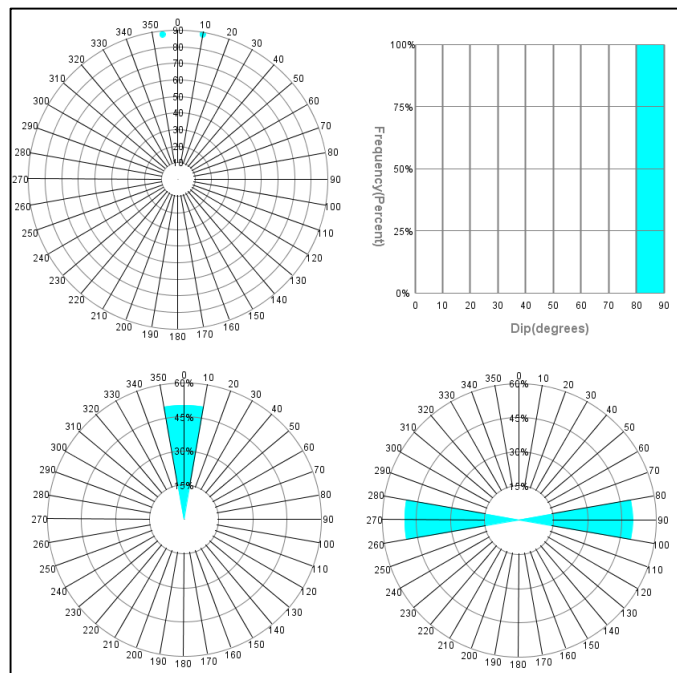
شکل ۳-۵۴ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند ایلام چاه ۴۸۸ به همراه نتایج آزمایش XLOT



شکل ۳-۵۵ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند سروک چاه ۴۸۸، به همراه مقادیر فشار منفذی حاصل از آزمایش

RFT

در این چاه نگار تصویری OMRI در بازه ۲۵۱۸ تا ۲۹۸۸ متری و همچنین از ۳۳۱۸ تا ۳۵۱۰ متری موجود است. ۲ شکستگی القایی<sup>۱</sup> (شکستگی کششی) در اعماق ۳۳۶۹ و ۳۳۹۳ متری مشاهده شده که در شکل ۳-۵۶ اطلاعات این شکستگی‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این شکستگی دارای شیب ۸۰ تا ۹۰ درجه، آزیموت ۳۵۰ تا ۱۰ درجه و امتداد ۸۰ تا ۱۰۰ درجه هستند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در این چاه جهت تنش افقی حداکثر مطابق با امتداد شکستگی‌های القایی و به صورت شرقی - غربی است.



شکل ۳-۵۶ شیب، آزیموت شیب و امتداد شکستگی‌های القایی مشاهده شده در چاه ۴۸۸ (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۲)

### ۳-۴-۷-۲ تخمین تنش برجا در چاه ۳۶۸

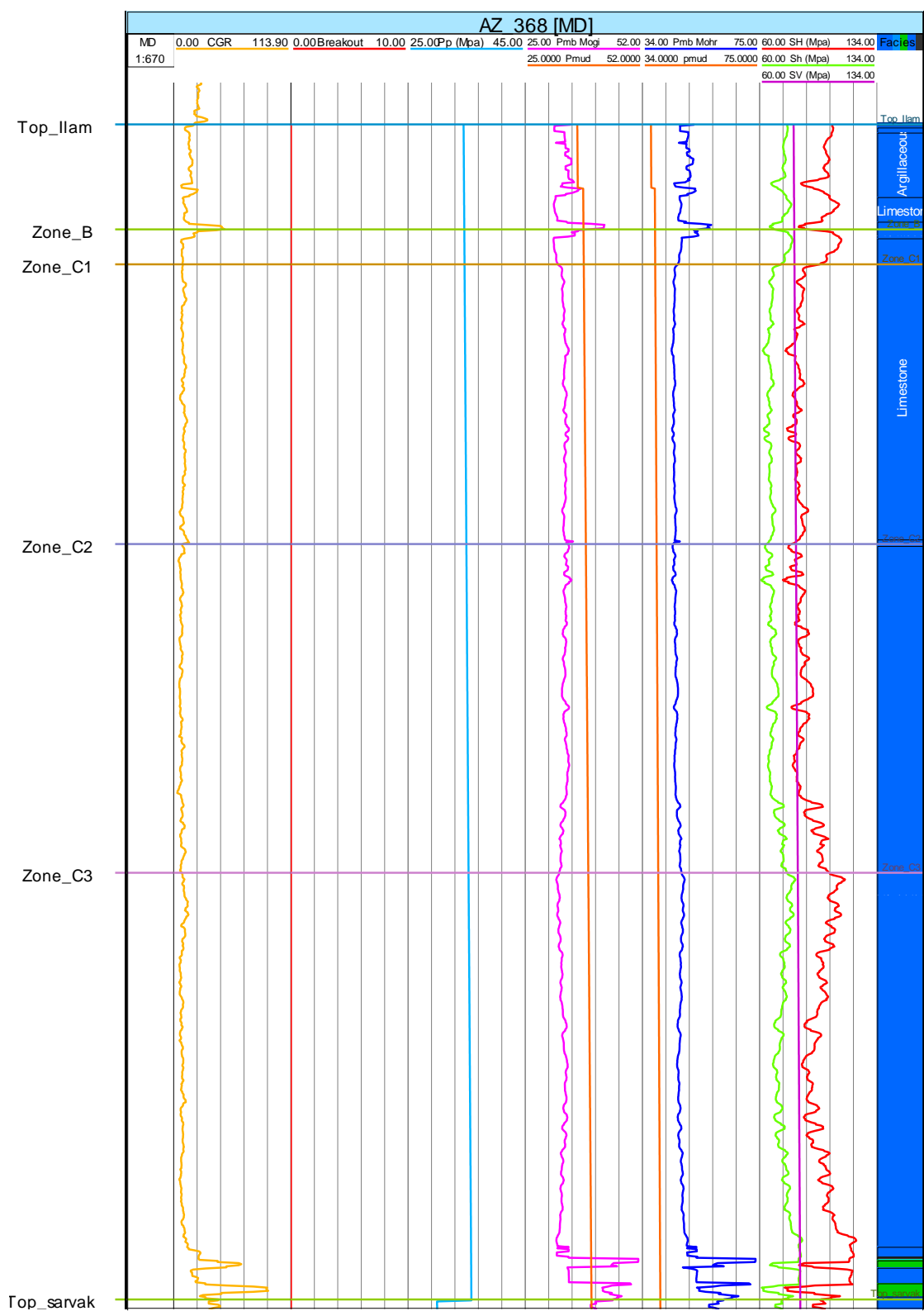
در این چاه آزمایش XLOT انجام نشده اما نگار تصویری UBI در حد فاصل ۳۳۶۴/۷ تا ۳۸۶۳/۵ متر حفار در سازند سروک رانده شده است. برای تخمین تنش‌ها در این چاه از روابط ۳-۴۵ تا ۳-۴۷ استفاده شده است. مقادیر کرنش تکتونیکی در این روابط از طریق سعی و خطا و به گونه‌ای تعیین شده که مناطق با احتمال گسیختگی بالا با آن‌چه در نگار تصویری مشاهده شده است، بیشترین انطباق را داشته باشد. بدین منظور از دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب برای پیش‌بینی وقوع شکستگی برشی استفاده شد.

<sup>۱</sup> Induced Fracture

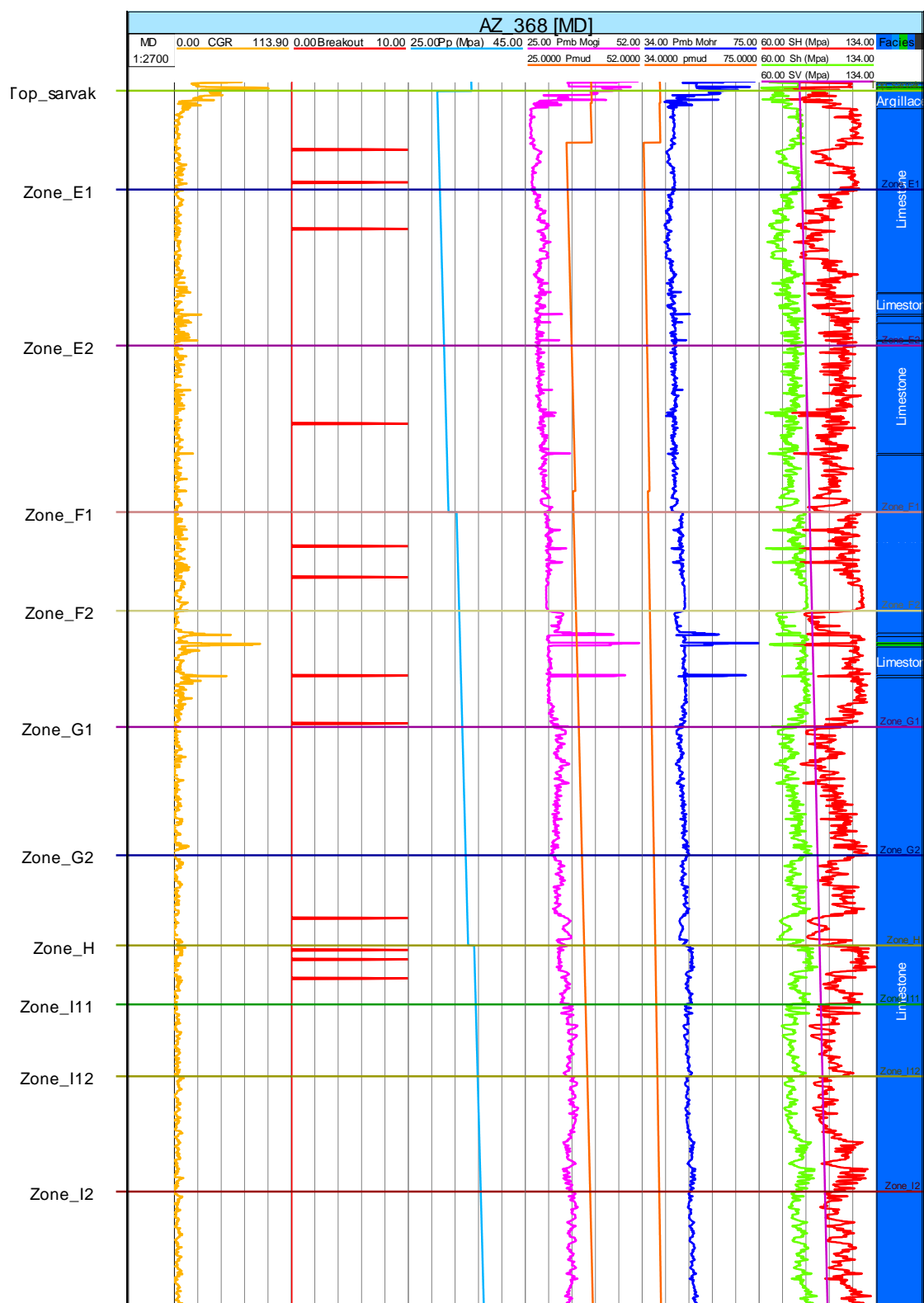
در شکل‌های ۵۷-۳ و ۵۸-۳ نتایج تخمین تنش‌ها نشان داده شده است. در این شکل ستون اول عمق بر حسب متر حفار، ستون دوم نگار گاما، ستون چهارم فشار منفذی بر حسب Mpa، ستون پنجم حداقل فشار گل با توجه به معیار موگی - کلمب و فشار گل حفاری، ستون ششم حداقل فشار گل با توجه به معیار موهر - کلمب و فشار گل حفاری و ستون هفتم نیز مقادیر تنش‌های قائم و افقی را بر حسب Mpa نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد در این چاه در سازند ایلام نگار تصویری موجود نیست. همچنین آزمایش RFT در این چاه انجام نشده است، به همین دلیل برای رسیدن به دقت بهتر سعی شده که فشار منفذی حدود 200Psi کمتر از فشار گل حفاری در نظر گرفته شود. چرا که در حفاری‌های تعادلی معمولاً وزن گل طوری انتخاب می‌شود که فشار گل ۲۰۰Psi بیشتر از فشار منفذی سازند باشد. وزن گل حفاری در این چاه در گزارش‌های روزانه حفاری موجود بود.

شکل ۵۸-۳ نتایج تخمین تنش‌ها در سازند سروک را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که معیار شکست موگی - کلمب به طور کلی نسبت به معیار موهر - کلمب نتایج بهتری داشته و توانسته شکست برشی رخ داده در زون F2 (در عمق ۳۶۸۵ متری) را به خوبی پیش‌بینی کند. معیار موهر - کلمب بسیار محافظه‌کارانه عمل کرده و مقدار حداقل فشار گل را خیلی بالا پیش‌بینی کرده و در تمام طول چاه شکست را پیش‌بینی کرده است. دلیل این امر این است که در این معیار اثر تنش میانی در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین می‌توان دید که در این چاه رژیم تنش به طور عمده امتداد-لغز و در برخی اعماق به صورت نرمال است.

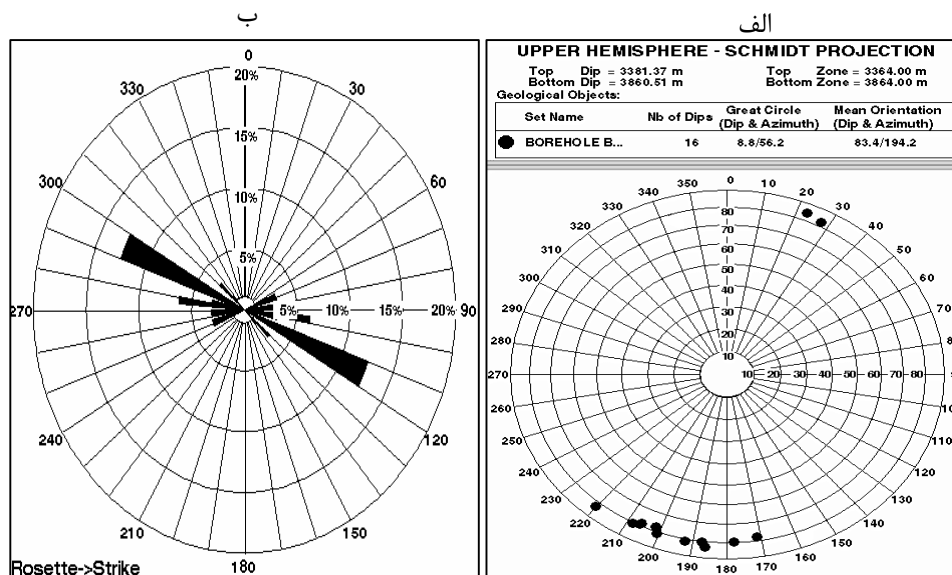
اطلاعات مربوط به آزمون، شیب و امتداد شکستگی‌های برشی رخ داده در این چاه را می‌توان در شکل ۵۹-۳ مشاهده کرد. از آنجا که امتداد شکستگی‌های برشی جهت تنش افقی حداقل را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که جهت تنش افقی در این چاه N65W است که با امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس مطابقت دارد. همچنین در شکل ۶۰-۳ بخشی از نگار تصویری در زون D سازند سروک نشان داده شده است.



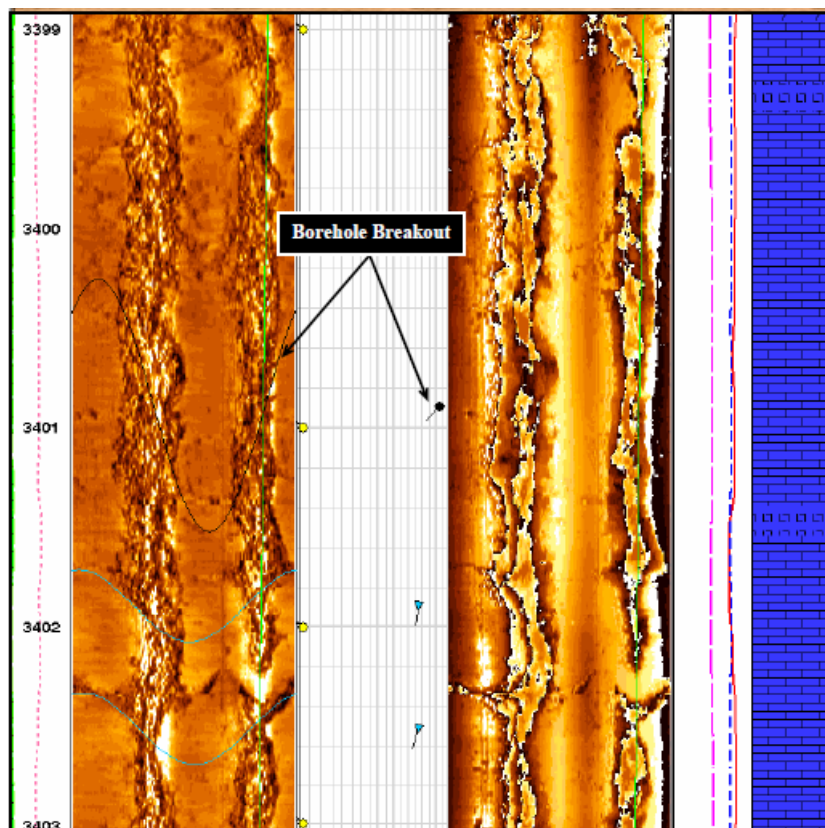
شکل ۳- ۵۷ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند ایلام چاه ۳۶۸



شکل ۳-۵۸ مقادیر تنش و فشار منفذی در سازند سروک چاه ۳۶۸



شکل ۳- ۵۹ اطلاعات مربوط به شکستگی‌های برشی در چاه ۳۶۸. الف) آزمون شکستگی‌های برشی بر روی دایره اشمیت ب) امتداد شکستگی‌های برشی بر روی نمودار رزی (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۹)

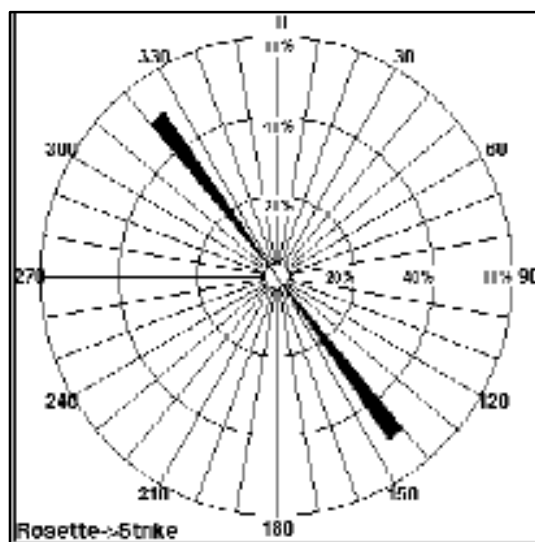


شکل ۳- ۶۰ بخشی از نگار تصویری UBI در زون D سازند سروک در چاه ۳۶۸ (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۹)

### ۳-۴-۷-۳ تخمین تنش برجا در چاه ۳۹۷

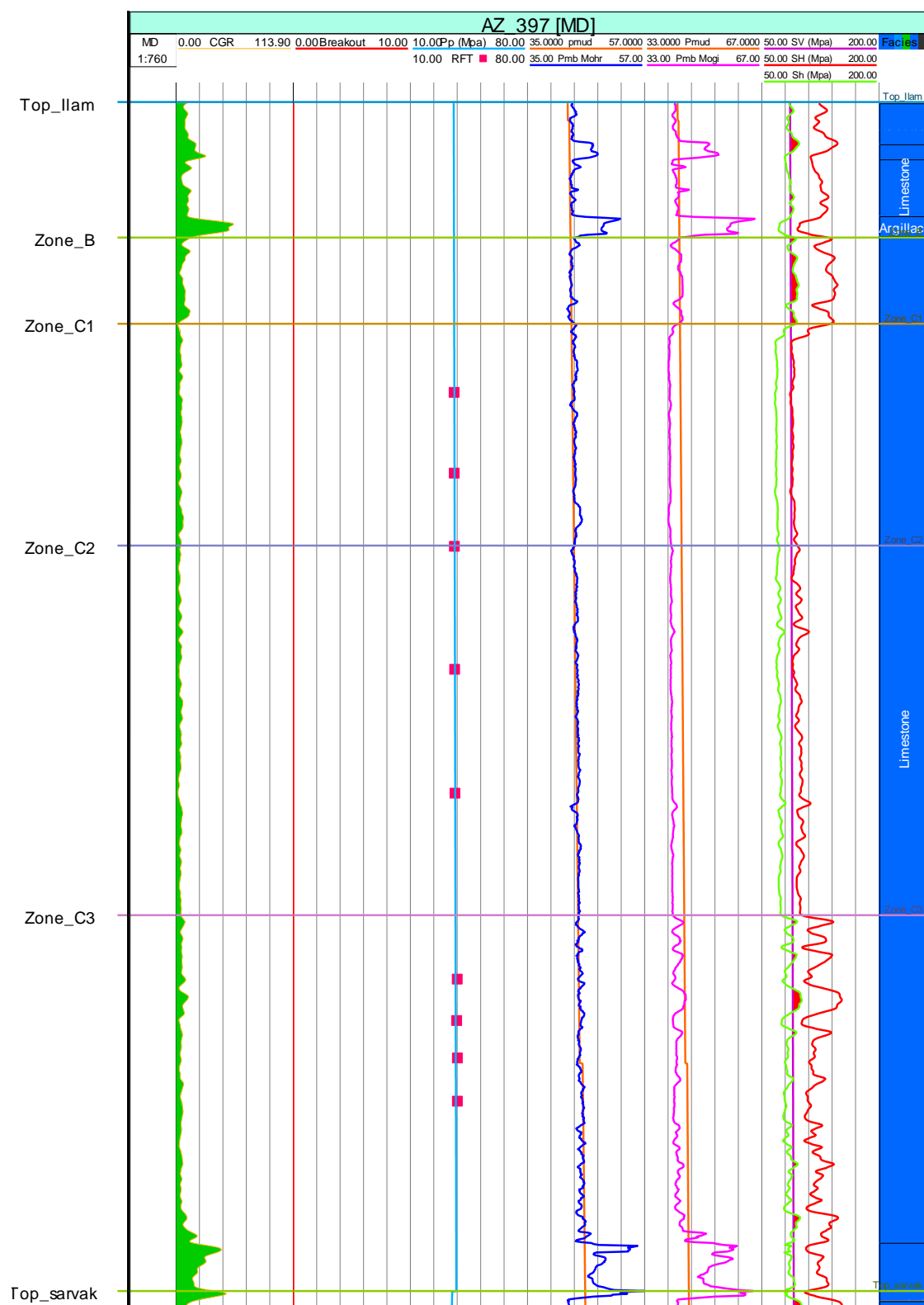
در این چاه نیز مشابه با چاه ۳۶۸، از شکستگی‌های برشی مشاهده شده در نگار تصویری برای تعیین دقیق‌تر مقادیر تنش و همچنین مشخص کردن جهت تنش‌های افقی استفاده شد. نگار تصویری FMI در این چاه در سازند سروک و از عمق ۳۵۵۲ تا ۳۸۳۵ متری موجود است. همان‌طور که در شکل ۳-۶۳ مشاهده می‌شود در این چاه تنها یک شکستگی برشی مشخص در عمق ۳۵۸۵ متری رخ داده است. با توجه به شکل ۳-۶۱ امتداد این شکستگی N37W بوده که مطابق با جهت تنش افقی حداقل و امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس است. این شکست را معیار شکست موگی-کلمب توانسته پیش‌بینی کند (شکل ۳-۶۳). در کل معیار موهر-کلمب در این چاه نیز نتایج مطلوبی به همراه نداشت و بنابراین از معیار موگی-کلمب که نتایج قابل قبولی داشته در ساخت مدل ژئومکانیکی استفاده شد.

در شکل‌های ۳-۶۲ و ۳-۶۳ مقادیر تنش محاسبه شده در این چاه به ترتیب در سازند ایلام و سروک مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها ستون اول عمق بر حسب متر، ستون دوم نگار گاما بر حسب GAPI، ستون سوم شکستگی‌های برشی، ستون چهارم فشار منفذی و نتایج به دست آمده از آزمایش RFT بر حسب Mpa، ستون پنجم و ششم به ترتیب مقادیر حداقل فشار گل به دست آمده با استفاده از معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب را نشان می‌دهد. در ستون هفتم نیز مقادیر تنش‌های قائم و افقی آمده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود رژیم تنش در این چاه به طور عمده به صورت امتداد-لغز و در برخی بازه‌ها به معکوس (نواحی قرمز رنگ) است.

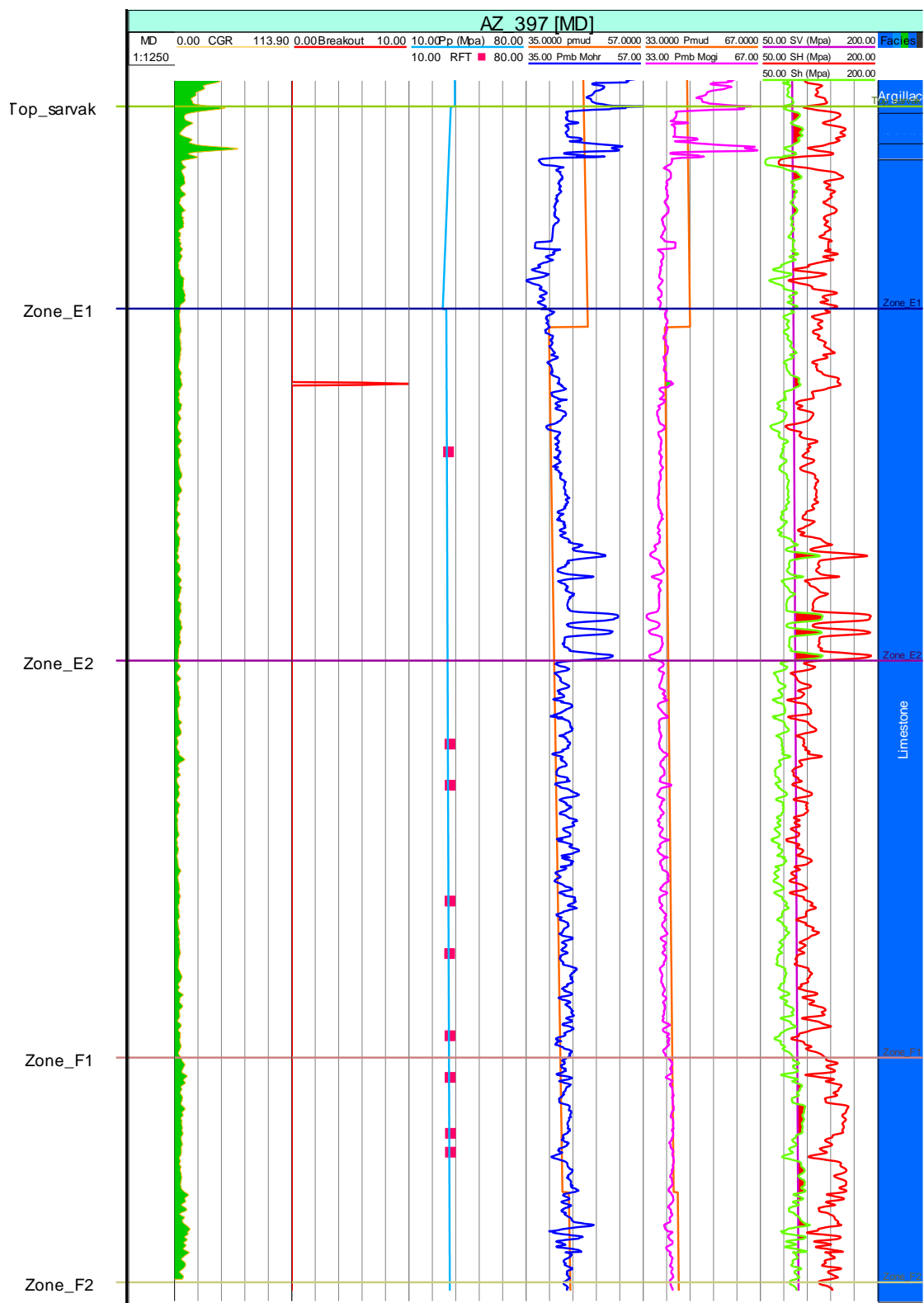


شکل ۳-۶۱ امتداد شکستگی برشی رخ داده در چاه ۳۹۷. امتداد این شکستگی N37W است که با امتداد کلی چین-خوردگی‌های زاگرس مطابقت دارد (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۶)





شکل ۳-۶۲ مقادیر تنش، فشار منفذی و نتایج معیارهای شکست در سازند ایلام در چاه ۳۹۷



شکل ۳-۶۳ مقادیر تنش، فشار منفذی و نتایج معیارهای شکست در سازند سروک در چاه ۳۹۷

### ۳-۵ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا اطلاعاتی در رابطه با میدان اهواز ارائه شده است. این میدان یک نفتگیر عظیم ساختاری است که در جنوب تا جنوب غربی فروافتادگی دزفول شمالی واقع شده است. روند محوری این میدان شمال غرب-جنوب شرق به موازات رشته‌کوه زاگرس بوده و مخازن اصلی این میدان شامل سازند آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی است. مخزن آسماری در عمق ۲۵۰۰ متری و بنگستان در عمق حدود ۳۰۰۰ متری واقع شده است.

سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات ژئومکانیک محسوب می‌شود که متأسفانه به دلیل هزینه بالا، در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نشده است. به همین دلیل از روش‌های مختلفی برای تخمین این پارامتر استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش رگرسیون چندگانه برای تخمین موج برشی استفاده شده است. روش کار بدین صورت بوده که ابتدا در چاه‌های دارای نگار موج برشی یک خوشه‌بندی سه بعدی با استفاده از نگاشت خودسازمان‌ده (SOM) بر حسب پارامترهای زمان گذر موج فشاری (DTC)، تخلخل نوترونی (NPHI) و چگالی (RHOB) انجام شد. سپس سعی شد تا الگوهای موجود بین این پارامترها شناسایی و تفکیک شوند. در ادامه برای هر کدام از این الگوها یک رابطه رگرسیونی بین موج برشی و سه پارامتر مذکور به دست آمد. ضرایب این روابط با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) به طور بهینه تعیین شد. پس از به دست آوردن روابط رگرسیونی در هر الگو، قدم بعدی پیدا کردن الگوهای مشابه در چاه‌هایی است که در آن‌ها موج برشی موجود نیست. در نهایت از روابط به دست آمده در هر الگو برای تخمین موج برشی در الگوهای مشابه استفاده شد.

نتایج به دست آمده نشان داد که این روش می‌تواند دقت تخمین موج برشی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. در چاه ۴۸۸ مشاهده شد که زمانی که موج برشی از روش رگرسیون تک متغیره و تنها با استفاده از زمان گذر موج فشاری تخمین زده شود ضریب همبستگی ۰/۶ است. این مقدار با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و خوشه‌بندی به ۰/۸۸ رسید.

در ادامه این فصل نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی در چاه‌ها شرح داده شد. برای تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی در چاه‌ها از روابط ارائه شده توسط مناطق نفت‌خیز جنوب استفاده شد. همچنین برای تخمین فشار منفذی از روش گرادیان سیال استفاده شد و در نهایت نتایج در هر یک از چاه‌ها با استفاده از نتایج تست RFT کالیبره شد.

مقدار و جهت تنش‌های برجا از جمله مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در انتخاب لایه کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی هستند. مقادیر تنش قائم با استفاده از نگار چگالی و تنش‌های افقی از روابط پوروالاستیک محاسبه شدند.

برای کالیبره کردن مقادیر تنش در چاه ۴۸۸ از نتایج آزمایش نشت گسترده (XLOT) استفاده شد که در زون D سازند سروک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که رژیم تنش در این چاه نرمال است. همچنین شکستگی‌های القایی مشاهده شده در نگار تصویری نشان می‌دهد که جهت تنش افقی حداکثر به صورت شرقی-غربی است.

در چاه‌های ۳۶۸ و ۳۹۷ از نگارهای تصویری برای محاسبه دقیق‌تر تنش‌ها استفاده شد. مقادیر کرنش تکتونیکی در این روابط از طریق سعی و خطا و به گونه‌ای تعیین شد که مناطق با احتمال گسیختگی بالا با آنچه در نگار تصویری مشاهده شده است، بیشترین انطباق را داشته باشد. بدین منظور از دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب برای پیش‌بینی وقوع شکستگی برشی استفاده شد. نتایج نشان داد که معیار شکست موگی-کلمب به دلیل در نظر گرفتن اثر تنش میانی عملکرد بهتری دارد. همچنین مشاهده شد که رژیم تنش در این دو چاه به طور عمده امتداد-لغز است. جهت تنش افقی حداقل نیز با توجه به امتداد شکستگی‌های مشاهده شده در نگارهای تصویری تعیین شد. در چاه ۳۶۸ جهت تنش افقی N65W و در چاه ۳۹۷ این جهت N37W به دست آمد که مطابق با امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس است.

## فصل چهارم

انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی

شکاف‌زنی هیدرولیکی عملیاتی برای بهبود بهره‌دهی یک سازند هیدروکربوری است. اگرچه بیش از ۶۰ سال از انجام موفق این عملیات می‌گذرد، با این حال شرکت‌های نفتی ایرانی گام‌های اولیه‌ای برای انجام این عملیات در میادین نفتی کشور برداشته‌اند. به طور کلی نبود اطلاعات و داده‌های مربوط به خواص مکانیکی سنگ، تنش‌های برجا و به ویژه عدم توجه به مطالعه انتخاب کاندید از دلایل اصلی عدم موفقیت گسترده این عملیات در ایران است.

با فناوری موجود تنها می‌توان ۲۰ تا ۲۵ درصد از نفت برجای اولیه مخازن شکاف‌دار ایران را استخراج کرد که این مقدار ۱۰ درصد از میانگین جهانی آن کمتر است. تخمین زده شده که سالانه به دلیل افت فشار طبیعی مخزن چیزی در حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ هزار بشکه در روز نفت خام از دست می‌رود. در واقع دبی بالای تولید و شکاف‌های طبیعی موجود در اکثر مخازن کربناته ایران دلیل اصلی بی‌توجهی به این روش تحریک مؤثر شده است. مطالعه تجربه شکاف هیدرولیکی در دنیا نشان می‌دهد که موفقیت این عملیات به طور مستقیم به انتخاب چاه و لایه کاندید وابسته است و برای این که عملیات با موفقیت در ایران انجام شود باید مطالعات دقیق ژئومکانیکی، تست‌های یکپارچگی چاه<sup>۱</sup> مانند تست نشت، تست ریزشکاف، تست کالیراسیون و ... انجام شود (Alipour and Bohluli, 2010).

هنگامی که یک مخزن هیدروکربوری با مشکلاتی در تولید اقتصادی مواجه می‌شود، دو سوال اساسی باید توسط تیم تولید جواب داده شود. اول این که "دلیل (یا دلایل) کاهش بهره‌دهی چیست؟" و دوم این که "چگونه می‌توان مشکلات تشخیص داده شده را رفع کرد؟". جواب سوال اول از یک مخزن به مخزنی دیگر متفاوت است اما عمدتاً به مشخصات سنگ و سیال مخزن، وضعیت تخلیه، برنامه تولید و روش تحریک به کار گرفته شده دارد.

به نظر می‌رسد که در مخازن کربناته اسیدکاری و شکاف‌زنی مؤثرترین و ماندگارترین روش‌هایی هستند که در حال حاضر به کار گرفته می‌شوند. مزیت‌های گوناگونی که شکاف‌زنی با پروپانت دارد باعث شده که این روش در مورد مخازن کربناته مناسب‌تر باشد (Zoveidavianpoor, et al., 2011a). شکاف‌زنی با پروپانت با توجه به قابلیتی که در پایدار نگه‌داشتن گذردهی شکاف دارد، به روش تحریکی استاندارد در مخازن کربناته تبدیل شده است. تجربه نشان داده که در مخازن با تنش بندش بالا یا دمای بالای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، شکاف‌زنی با اسید چندان موفق نبوده است. شکاف پروپانتی در مخازنی که تنش افقی

---

<sup>۱</sup> Well Integrity Test

حداقل آن‌ها بیش‌تر از ۵۰۰۰psi است. روش تحریک بهینه است، چون در این مخازن سطوح ناصاف ایجاد شده در روش شکاف‌زنی اسیدی قادر به تحمل این مقدار تنش نیست (Zoveidavianpoor, et al., 2012).

در این فصل ابتدا به اهمیت انتخاب چاه و لایه کاندید و سپس به بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. پس از آن معیارهای به کار گرفته شده برای انتخاب چاه و لایه کاندید در مخزن مورد مطالعه معرفی می‌شود. در ادامه روشی که برای ارزیابی معیارها و انتخاب چاه و لایه کاندید به کار شرح داده شده و در نهایت نتایج به دست آمده نشان داده خواهد شد.

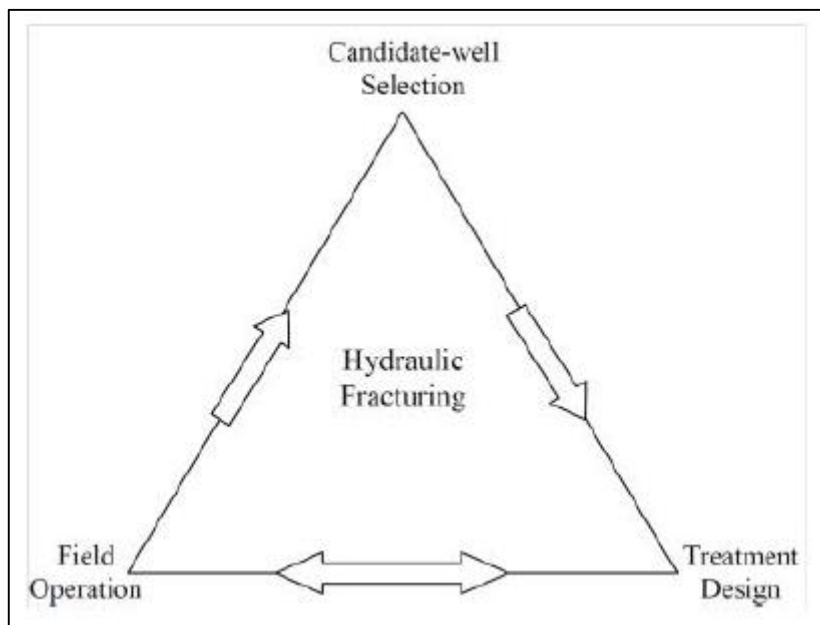
#### ۴-۲ اهمیت انتخاب چاه و لایه کاندید

آسیب سازند که در اثر هجوم سیال (در حین عملیات حفاری) یا در اثر مکانیزم‌های مختلف به هنگام تولید از مخزن ایجاد می‌شود، مانع بزرگی در راه تولید بهینه از مخزن است. به منظور کنار زدن این آسیب و افزایش تولید و ضریب بازیافت در مخازن کربناته باید به دنبال روش تحریکی جایگزین به جای روش تحریک فعلی (اسیدکاری ماتریکس) بود. شکاف هیدرولیکی فرآیندی است که در شرایط گوناگون انجام شده و نشان داده که قابلیت جلوگیری و رفع هر نوع آسیب سازند و بهبود بازیافت هیدروکربن در مخازن کربناته را دارد.

به منظور اجرای موفق عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی، انتخاب اولین چاه از اهمیت خاصی برخوردار است. به طور کلی در صنعت نفت شناسایی بهترین چاه‌های کاندید برای عملیات‌های مختلف فرآیندی متداول است. در فرآیند انتخاب چاه کاندید برای شکاف‌زنی هیدرولیکی، هدف انتخاب یک یا گروهی از چاه‌ها و یا زون‌ها برای عملیات است که بیش‌ترین احتمال موفقیت را دارند. نتایج نشان داده که اگر انتخاب چاه کاندید به خوبی انجام شود، افزایش تولید، مخصوصاً در چاه‌هایی که ضریب پوسته بالا و تراوایی کمی دارند، می‌تواند چشم‌گیر باشد. بیش‌تر مخازن کربناته دارای تراوایی کم هستند، بنابراین تنها در صورتی که به طور هیدرولیکی شکاف‌زنی شوند قادرند به صورت اقتصادی تولید کنند (Zoveidavianpoor, et al., 2012).

علاوه بر کیفیت مخزن و نوع تکمیل، اثربخشی عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی تابعی از ۳ فاکتور مهم است که کاملاً مرتبط با هم هستند: انتخاب چاه کاندید، طراحی فرآیند و عملیات میدانی. در واقع همان‌طور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده، این ۳ فاکتور ۳ رأس مثلث موفقیت در عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی هستند که باید به هم متصل باشند. انجام بهترین طراحی و عملیات میدانی در یک چاه کاندید

اشتباه، منجر به شکست کل عملیات خواهد شد. به عبارت دیگر هر ۳ فاکتور باید به خوبی اجرا شوند تا موفقیت عملیات را تضمین کنند (Zoveidavianpoor, et al., 2012).



شکل ۴-۱ مثلث موفقیت در عملیات شکافزنی هیدرولیکی (Zoveidavianpoor, et al., 2012)

### ۳-۴ پیشینه مطالعات

انتخاب اولین کاندید برای شکافزنی هیدرولیکی کاری چالش برانگیز و پیچیده است، مخصوصاً هنگامی که شانس موفقیت یا شکست عملیات تا حد زیادی وابسته به آن است. اگرچه فاکتورهای بسیاری در موفقیت عملیات شکافزنی هیدرولیکی تأثیر دارند، اما مهم‌ترین آن‌ها انتخاب چاه کاندید است.

در انتخاب چاه کاندید اولین کاری که باید انجام داد مشخص کردن دلیل (یا دلایل) کم بودن بهره‌دهی یک چاه است. بهره‌دهی کم چاه ممکن است در اثر هریک از شرایط زیر رخ دهد (Veatch, et al., 1989):

(۱) کاهش تراوایی اطراف چاه، که حتی در صورت وجود مقادیر قابل ملاحظه‌ای از نفت و گاز برجا و قابل بازیابی، می‌تواند باعث غیراقتصادی شدن تولید در یک چاه شود. آسیب موجود در اطراف چاه را می‌توان با انجام اسیدکاری ماتریکس و یا با ایجاد یک شکاف هیدرولیکی کوتاه و عریض برطرف کرد.



۲) تراوایی سازند بسیار کم باشد، به طوری که نتوان نفت و یا گاز موجود در سازند را به طور اقتصادی تولید کرد. در این گونه موارد با ایجاد شکاف‌های طویل می‌توان تولید را به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داد.

۳) فشار مخزن کافی نباشد. تحت چنین شرایطی شکاف‌زنی هیدرولیکی معمولاً موفق نیست. در ادامه چند مورد از مطالعات صورت گرفته در زمینه انتخاب چاه و لایه کاندید مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۳-۱ مطالعات انجام شده در دنیا

هاوارد و فست<sup>۱</sup> (۱۹۷۰) معیارهای کلی برای انتخاب چاه کاندید را بدین صورت عنوان کردند: (۱) وضعیت تخلیه مخزن، (۲) تراوایی سازند، (۳) عملیات‌های تحریک قبلی، (۴) تاریخچه بهره‌دهی چاه، (۵) تاریخچه‌ی تولید در چاه‌های مرزی، (۶) محل سطح تماس آب-نفت و گاز-نفت، (۷) محدودسازی شکاف، (۸) درجه تحکیم<sup>۲</sup> (Howard and Fast, 1970).

کراسی<sup>۳</sup> (۱۹۸۸) بهبود دبی تولید را به عنوان معیاری برای تعیین چاه کاندید در نظر گرفت. در این مطالعه ضریب پوسته فعلی چاه با استفاده از تست‌های فشار<sup>۴</sup> محاسبه شد. سپس دبی تولید تثبیت شده در ضریب پوسته‌ی ۴- در تمام چاه‌ها محاسبه شده و چاه‌هایی که دبی تولیدشان افزایش بیشتری پیدا کرده بود به عنوان چاه‌های دارای پتانسیل برای انجام شکاف هیدرولیکی معرفی شدند. این روش درواقع به منظور غربالگری چاه‌ها و محدود کردن تعداد چاه‌های کاندید مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن چاه‌های کاندید مورد ارزیابی قرار گرفته و معیارهای دیگری مانند نسبت نفت به آب، تاریخچه تولید، حداکثر دبی تولید سیال، اشباع و مقدار هیدروکربورهای باقی‌مانده در این چاه‌ها بررسی شدند و در نهایت بهترین کاندید جهت انجام عملیات تعیین شد (Krasey, 1988).

---

<sup>۱</sup> Howard and Fast

<sup>۲</sup> Consolidation

<sup>۳</sup> Krasey

<sup>۴</sup> Build- up test

گوینس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۰) درجه آسیب سازند و تحویل دهی<sup>۲</sup> چاه را به عنوان مهم ترین معیارها در انتخاب چاه کاندید در نظر گرفتند. خواص مخزنی و درجه آسیب سازند با استفاده از آنالیز تست های درون چاهی تعیین شدند. سپس مدل هایی از چاه در حالت قبل از شکاف هیدرولیکی و پس از انجام شکاف هیدرولیکی ساخته شد و چاه هایی که میزان تحویل دهی آن ها در اثر عملیات بهبود بیشتری پیدا کرده بود به عنوان چاه های کاندید معرفی شدند (Guoyness, et al., 2000).

مارتین و اکونومیدس<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) عنوان کردند که جنبه های تکنیکی مخزن و عملکرد شکاف محدودیت عمده ای در انتخاب چاه کاندید ایجاد نمی کنند، بلکه دلایل ساده ای مانند مجاورت با سطح تماس آب و سطح تماس گاز (در مورد مخازن نفتی) هستند که در انتخاب چاه کاندید محدودیت ایجاد می کنند. در این مطالعه شاخص بهره دهی بی بعد<sup>۴</sup> چاه به عنوان معیار مناسب در انتخاب چاه کاندید در نظر گرفته شد (Martin and Economides, 2010).

پونگراتز<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۸) فاکتورهای تحت کنترل مانند اندازه، تعداد، فاز و محل مشبک ها را بررسی کردند. در طی عملیات توسعه مجدد، تزریق معمولاً از طریق مشبک های موجود در چاه انجام می گیرد که این امر می تواند اثربخشی عملیات را به شدت محدود کند، چرا که در این صورت این مشبک ها هستند که محل شکاف را تعیین می کنند. این مسأله اغلب باعث بروز مشکلاتی مانند شکاف های چندگانه و یا ایجاد پیچ و خم<sup>۶</sup> در شکاف می شود. در نتیجه به طور معمول قبل از انجام عملیات از تست های کالیبراسیون (مانند تست ریزشکاف و تزریق مرحله ای) استفاده می شود تا طراحی عملیات بهبود یابد. جهت گیری شکاف نسبت به مشبک ها مسأله ی بسیار مهمی بوده و ممکن است باعث ایجاد پیچ و خم ناخواسته در نزدیکی چاه شود که این امر ممکن است منجر به انسداد زودرس<sup>۷</sup> شکاف شود (Pongratz, et al., 2008).

---

<sup>۱</sup> Guoyness

<sup>۲</sup> Deliverability

<sup>۳</sup> Martin and Economides

<sup>۴</sup> Dimensionless Productivity Index

<sup>۵</sup> Pongratz

<sup>۶</sup> Tortuosity

<sup>۷</sup> Premature Screenout

همان‌طور که ملاحظه می‌شود چندین روش برای انتخاب چاه کاندید ارائه شده که البته هیچ کدام به توضیح جزئیات نپرداخته‌اند و عمدتاً انتخاب کاندید برای عملیات تحریک مجدد<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار داده‌اند. در ادامه به بررسی چند مطالعه که در میادین داخلی کشور صورت گرفته است پرداخته می‌شود.

#### ۴-۳-۲ مطالعات انجام شده در میادین کشور

در میادین داخل کشور نیز چندین مطالعه جهت انتخاب چاه کاندید صورت گرفته است. شادی‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) چهار چاه در مخزن بنگستان میدان اهواز را مورد بررسی قرار دادند تا لایه‌های کاندید برای عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی را در این چاه‌ها تعیین کنند. در این مطالعه خواص مکانیکی سنگ، تخلخل، اشباع آب و مقدار تنش افقی حداقل به عنوان مهم‌ترین معیارها در نظر گرفته شده و لایه‌های C1 و C2 در سازند ایلام و لایه‌های E1 و E2 در سازند سروک به عنوان گزینه‌های مناسب برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی معرفی شدند (Shadizadeh, et al., 2009).

مطالعه دیگری توسط حیدرآبادی و همکاران (۲۰۱۰) بر روی دو چاه در یکی از میادین خاورمیانه صورت گرفته تا چاه مناسب برای عملیات شکاف‌زنی انتخاب شود. در این مطالعه تراوایی مخزن، ضریب پوسته، تاریخچه تولید چاه، حجم نفت و یا گاز برجا، اشباع هیدروکربور، فشار مخزن و محدودسازی شکاف به عنوان مهم‌ترین پارامترها برای انتخاب چاه کاندید معرفی شده است. همچنین مدل‌هایی از چاه در حالت قبل از شکاف‌زنی و بعد از شکاف‌زنی ساخته شده که وضعیت بهبود نمودار عملکرد جریان<sup>۲</sup> و تغییرات بهره‌دهی چاه‌ها در اثر شکاف‌زنی را نشان می‌دهد. این امر به فرآیند انتخاب کاندید کمک می‌کند، به این صورت که عملیاتی که بهره‌دهی چاه را به طور جزئی بهبود ببخشد پیشنهاد نشده و چاه مورد نظر کاندید مناسبی برای انجام عملیات نیست. این معیارها در دو چاه که در سازند کربناته حفر شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت چاه مناسب برای انجام عملیات تعیین شده است (Heydarabadi, et al., 2010).

هاشمی و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه مخزن بنگستان در یکی از میادین داخل کشور پرداختند تا زون‌ها و چاه‌های کاندید برای عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی را انتخاب کنند. به دلیل حجم بسیار زیاد داده‌ها در این مطالعه، معیارهایی برای غربالگری زون‌ها و چاه‌ها معرفی شدند. معیارهای غربالگری زون‌ها عبارتند از ضخامت خالص، میانگین اشباع آب، میانگین اشباع نفت، دوری زون از سطح تماس آب-نفت، مدول یانگ، شدت تنش در زون هدف، اختلاف تنش زون هدف یا زون بالایی و پایینی. پس از غربالگری

---

<sup>۱</sup> Restimulation

<sup>۲</sup> Inflow Performance

زون‌ها به غربالگری چاه‌ها پرداخته شد تا با تلفیق نتایج در نهایت کاندیدهای مناسب انتخاب شوند. شاخص بهره‌دهی<sup>۱</sup>، ضریب پوسته، تراوایی و فشار ته‌چاهی نیز معیارهایی هستند که برای غربالگری چاه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور انجام فرآیند غربالگری یک برنامه محلی نوشته شد. رابط گرافیکی کاربر<sup>۲</sup> (GUI) در نرم افزار متلب (MATLAB) برای نوشتن این برنامه به کار گرفته شد تا به طور خودکار آماده‌سازی داده‌ها و انتخاب کاندید را انجام دهد. این برنامه کار کردن با داده‌ها را آسان‌تر و خطای انتخاب را کاهش می‌دهد (Hashemi, et al., 2012).

#### ۳-۳-۴ شاخص شکاف‌پذیری<sup>۳</sup> و شکنندگی<sup>۴</sup>

در سال‌های اخیر برای انتخاب لایه‌ها و چاه‌های مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی از دو شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی استفاده می‌شود. در این بخش ابتدا به توضیح مختصری در رابطه با این دو شاخص پرداخته و چند مورد مطالعاتی در این زمینه به اختصار بیان می‌شود.

#### • شکنندگی

طبق تعریف شکنندگی توانایی یک ماده برای مقاومت دائم (یا غیر الاستیک) در مقابل تغییر شکل است. زمانی که یک ماده تحت بارگذاری از مرحله الاستیک به مرحله پلاستیک می‌رود، ماده یا در معرض شکست قرار می‌گیرد یا اتساع<sup>۵</sup> در آن رخ می‌دهد. از طرفی دیگر سختی<sup>۶</sup>، توانایی یک ماده برای مقاومت غیردائم (الاستیک) در مقابل تغییر شکل است. به عنوان مثال مدول یانگ معیاری از سختی یک ماده الاستیک (ماده ای که در مرحله الاستیک قرار دارد) است، با این حال مدول یانگ به تنهایی اطلاعاتی درباره شکست مواد به ما نمی‌دهد.

در مورد شکست شکننده<sup>۷</sup> دوره تغییر شکل پلاستیک کوتاه است و چنان‌چه دوره تغییر شکل طولانی باشد ماده تحت شکست شکل‌پذیر<sup>۸</sup> قرار می‌گیرد. درواقع اختلاف بین مواد شکننده و شکل‌پذیر مدت زمانی

---

<sup>۱</sup> Productivity Index

<sup>۲</sup> Graphical User Interface

<sup>۳</sup> Fracability Index

<sup>۴</sup> Brittleness Index

<sup>۵</sup> Dilation

<sup>۶</sup> Stiffness

<sup>۷</sup> Brittle Failure

<sup>۸</sup> Ductile Failure

است که این مواد توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل دائم را دارند (Bai, 2016). همان‌طور که ملاحظه می‌شود شکنندگی یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی سنگ است که در اکثر گزارش‌های پتروفیزیکی به آن اشاره می‌شود. با این حال به دلیل عدم وجود یک رابطه جهانی و جامع برای شکنندگی، روش‌های مختلفی برای ارزیابی آن ارائه شده است.

ریکمن و همکاران (2008) رابطه زیر را برای ارزیابی شکنندگی ارائه کردند:

$$B = \frac{E_n + \vartheta_n}{2} \quad (1-4)$$

که در آن  $E_n$  و  $\vartheta_n$  به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون نرمالایز شده‌اند که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$E_n = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (2-4)$$

$$\vartheta_n = \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta}{\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}} \quad (3-4)$$

این رابطه نشان می‌دهد که سازندهای با مدول یانگ بالاتر و نسبت پواسون کمتر، شکنندگی بیشتری دارند (Rickman, et al., 2008). اما رابطه عکس بین مدول یانگ و نسبت پواسون ممکن است در مورد مواد خاصی مناسب باشد و رابطه بین مدول یانگ و نسبت پواسون ممکن است مستقیم باشد، بنابراین تعمیم چنین روابطی به هر نوع سازندگی می‌تواند اشتباه باشد (Bai, 2016).

جین و همکاران (2014) لیستی از روابط مختلف برای ارزیابی شکنندگی را جمع‌آوری کردند. تعداد زیادی از این روابط بر اساس تست‌های مکانیک سنگی و برخی نیز با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی به دست آمده‌اند که گروه دوم از نظر عملی کاربرد بیشتری دارند. از نقطه نظر فیزیکی اما، شکنندگی به دست آمده از آنالیز کانی‌شناسی قابل اعتمادتر است (Jin, et al., 2014). در این زمینه ابتدا جارویه و همکاران (2007) تنها کوارتز را به عنوان کانی شکننده در نظر گرفتند (Jarvie, et al., 2007). پس از آن مشاهده شده که وجود دولومیت نیز موجب افزایش شکنندگی می‌شود (Wang and Gale, 2009). همچنین مشخص شد که کانی‌های سیلیکاته مانند فلدسپارو میکا و همچنین کانی‌های کربناته دیگر مانند کلسیت نیز نسبت به

کانی‌های رسی شکنندگی بیشتری دارند. بنابراین جین و همکاران (۲۰۱۴) رابطه ۴-۴ را برای محاسبه شکنندگی پیشنهاد کردند که تمام کانی‌های شکننده را در نظر می‌گیرد (Jin, et al., ۲۰۱۴).

$$B = \frac{W_{QFM}}{W_{Tot}} + \frac{W_{Carb}}{W_{Tot}} \approx \frac{W_{QFM} + W_{Calcite} + W_{Dolomite}}{W_{Tot}} \quad (۴-۴)$$

که در این رابطه  $\frac{W_{QFM}}{W_{Tot}}$  کسر وزنی کوارتز، فلدسپار و میکا و  $\frac{W_{Carb}}{W_{Tot}}$  کسر وزنی کانی‌های کربناته شامل دولومیت، کلسیت (و دیگر کانی‌های کربناته در صورت وجود) است.

#### • شاخص شکاف‌پذیری

به طور خلاصه شکاف‌پذیری میزان سادگی ایجاد شکاف هیدرولیکی در یک سازند را نشان می‌دهد. این شاخص به طور کلی مربوط به مقاومت سنگ است اما می‌تواند به فاکتورهای دیگری نیز بستگی داشته باشد (Bai, 2016). اگرچه از شکنندگی می‌توان برای بررسی کیفیت مخزن و آسان یا سخت بودن شکاف‌زنی سازند در برخی شرایط خاص استفاده کرد، اما این پارامتر ممکن است دقیقاً منعکس‌کننده شکاف‌پذیری نباشد. به عنوان مثال سازند آهک-دولومیتی بارنت<sup>۱</sup> دارای شکنندگی بالایی است، اما این سازند یک سد شکاف محسوب می‌شود که از انتشار شکاف در حین فرآیند جلوگیری می‌کند. در چینی شرایطی و تحت فشار تزریق یکسان، شکاف‌زنی در این نوع سازند دشوارتر از شکاف‌زنی در یک سازند شیلی با شکنندگی کمتر است (Zhang, et al., ۲۰۱۵).

در مورد شکاف‌پذیری نیز مشابه با شکنندگی، رابطه جامعی وجود ندارد و در مطالعات مختلف، با توجه به نوع سازند و شرایط خاص مخزن رابطه‌ای برای شکاف‌پذیری ارائه شده است. جین و همکاران (۲۰۱۴) رابطه زیر را برای بررسی شکاف‌پذیری و انتخاب لایه‌های کاندید در یک مخزن شیلی پیشنهاد کرده‌اند:

$$FI = \frac{B_n + K_{IC\_n}}{2} \quad (۵-۴)$$

در این رابطه  $B_n$  شکنندگی (رابطه ۴-۴) و  $K_{IC\_n}$  چقرمگی مود-۱ شکاف<sup>۲</sup> نرمالایز شده هستند که به ترتیب از روابط ۴-۶ و ۴-۷ به دست می‌آیند. چقرمگی شکاف بیانگر توانایی سنگ در مقابل انتشار شکاف از یک ترک موجود از قبل است که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، فشار شکست نیز بیشتر است. بنابراین

<sup>۱</sup> Barnett

<sup>۲</sup> Fracture Toughness

چقرمگی یک اندیس منفی برای شکاف‌پذیری است. با توجه به روابط ۴-۵ و ۴-۷ نیز ملاحظه می‌شود که شکاف‌پذیری با افزایش چقرمگی کاهش و با کاهش چقرمگی افزایش می‌یابد (Jin, et al., ۲۰۱۴).

$$B_n = \frac{B - B_{min}}{B_{max} - B_{min}} \quad (۴-۶)$$

$$K_{IC_n} = \frac{K_{IC_{max}} - K_{IC}}{K_{IC_{max}} - K_{IC_{min}}} \quad (۴-۷)$$

مطالعه دیگری توسط گو و همکاران (۲۰۱۵) بر روی یک مخزن ماسه‌سنگی برای تعیین لایه‌های کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی انجام شده است. در این مطالعه به منظور تعیین رابطه شکاف‌پذیری و فاکتورهای اثرگذار بر روی آن، یک سری آزمایش‌های مکانیک سنگی انجام شده و در نهایت رابطه ۴-۸ برای ارزیابی شکاف‌پذیری پیشنهاد شده است:

$$FI = \frac{B_{Tot}}{\sin(\varphi)K_{IC}} \quad (۴-۸)$$

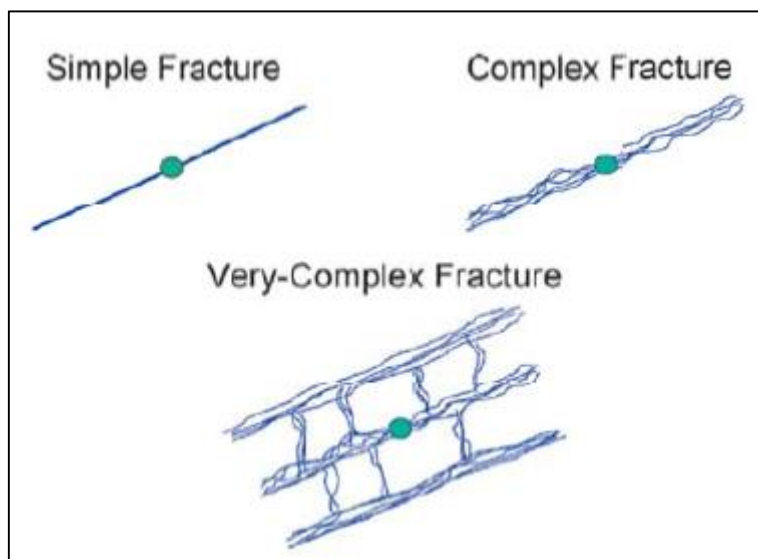
در این رابطه  $B_{Tot}$  شکندگی کل است از میانگین دو رابطه ارائه شده توسط ریکمن و همکاران (۲۰۰۸) و جین و همکاران (۲۰۱۴) به دست آمده است (روابط ۴-۱ و ۴-۴). همچنین  $\varphi$  در این رابطه زاویه اصطکاک داخلی و  $K_{IC}$  چقرمگی مود-۱ شکاف است. طبق رابطه ۴-۸ شکاف‌پذیری با شکندگی رابطه مستقیم و با چقرمگی و زاویه اصطکاک داخلی رابطه عکس دارد. در این مطالعه از اثر درز و شکاف‌های طبیعی سنگ بر روی انتشار شکاف هیدرولیکی صرف نظر شده است (Guo, et al., ۲۰۱۵).

مولن و اندرلین (۲۰۱۲) عنوان کردند که اندیسی که به عنوان شکاف‌پذیری در یک مخزن معرفی می‌شود باید چیزی فراتر از محاسبه خواص مکانیکی سنگ باشد. در این مطالعه تعریف جدیدی از شکاف-پذیری ارائه شده است که فاکتورهای مختلف مانند شرایط رسوب‌گذاری، توزیع کانی‌ها و وجود و جهت‌گیری صفحات ضعف موجود در سنگ را در نظر می‌گیرد. طبق این مطالعه نرخ تولید در چاه‌هایی که شبکه شکاف پیچیده<sup>۱</sup> دارند نسبت به چاه‌هایی که شبکه شکاف در آن‌ها ساده است، بسیار بیشتر است (شکل ۴-۲). اما تنها صرف وجود صفحات ضعف در سنگ به این معنا نیست که شبکه شکاف پیچیده ایجاد خواهد شد. شیب و امتداد این صفحات ضعف موجود در سنگ نسبت به جهت و وضعیت تنش، فشار بازفعالی<sup>۲</sup> صفحات را تعیین می‌کند. صفحاتی که فشار بازفعالی آن‌ها کم (نزدیک به فشار منفذی) است می‌توانند منشأ نشت

<sup>۱</sup> Complex Fracture Network

<sup>۲</sup> Reactivation Pressure

بالا بوده و به اصطلاح زون‌های دزد<sup>۱</sup> هستند. این جهت‌ها باید شناسایی شده و بازه‌های مربوط به آن‌ها غربال شوند. صفحاتی که جهت‌گیری آن‌ها نزدیک به جهت تنش افقی حداقل است به ایجاد شکاف خیلی پیچیده کمک می‌کنند (Mullen and Enderlin, 2012).



شکل ۴-۲ پیچیدگی شکاف هیدرولیکی ایجاد شده در چاه در اثر برخورد با صفحات ضعف ( Mullen and Enderlin, 2012)

#### ۴-۴ انتخاب چاه و لایه کاندید در میدان نفتی اهواز

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی عنوان شد، اولین گام برای انتخاب چاه و لایه کاندید تعیین فاکتورهای اثرگذار بر شکاف هیدرولیکی و مشخص کردن معیارهای مناسب برای انتخاب کاندید با توجه به شرایط مخزن است. همچنین در بخش قبلی ملاحظه شد که روش جامع و یکسانی برای انتخاب کاندید وجود ندارد، به علاوه مطالعات گسترده‌ای در این زمینه در داخل کشور صورت نگرفته است.

در این تحقیق انتخاب لایه‌های کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی در سه مرحله انجام شده است:

(۱) مشخص کردن مهم‌ترین فاکتورها و معیارها برای انتخاب کاندید در مخزن مورد مطالعه با توجه به مطالعات قبلی صورت گرفته، شرایط مخزن و داده‌های موجود در چاه‌ها.

<sup>۱</sup> Thief



۲) ارائه یک شاخص جدید در این مخزن به نام شاخص شکاف‌پذیری کل برای غربال زون‌های مختلف در چاه‌ها و شناسایی لایه‌های مستعد برای آنالیز و تحلیل بیشتر در گام بعدی.

۳) انتخاب لایه‌های کاندید در چاه‌ها بر اساس فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۱</sup> (AHP) و با استفاده از چهار معیار اصلی شاخص شکاف‌پذیری کل، اندیس شکاف‌های طبیعی، محدودسازی شکاف و ضخامت زون کاندید.

در ادامه نحوه انجام هریک از این مراحل در چاه‌های مورد مطالعه شرح داده شده است.

#### ۴-۱-۴ معیارهای انتخاب کاندید

انتخاب معیارهای مناسب چالشی بسیار مهم در فرآیند انتخاب کاندید است. انتخاب معیار را باید بر اساس مطالعات قبلی صورت گرفته و تجربیات میدانی انجام داد. باید توجه داشت که در مورد سنگ‌های کربناته دو خطر خاص وجود دارد؛ خطر اول ایجاد شکاف چندگانه<sup>۲</sup> به دلیل ناهمگنی طبیعی و وجود درزه و شکاف‌های طبیعی موجود در این سنگ‌هاست و دیگری احتمال وقوع پدیده انسداد<sup>۳</sup> شکاف به دلیل مدول یانگ بالای سازند است. به نظر می‌رسد که در مورد سنگ‌های کربناته ایران، زون‌هایی که پتانسیل کافی برای تولید دارند و دور از سطح تماس آب- نفت هستند گزینه‌های مناسبی باشند. همچنین به منظور جلوگیری از توسعه شکاف چندگانه، ضخامت زون باید به خوبی انتخاب شود. علاوه بر این محدودسازی شکاف که در اثر اختلاف تنش بین زون هدف و زون‌های بالایی و پایینی ایجاد می‌شود نیز باید در نظر گرفته شود (Hashemi, et al., ۲۰۱۲).

هاشمی و همکاران (۲۰۱۲) اثر پارامترهای مختلف و میزان اثرگذاری آن‌ها بر روی نیم‌طول شکاف را نیز بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد که ضخامت زون، مدول یانگ، تنش زون و اختلاف تنش زون هدف با زون بالایی و پایینی بیشترین اثر را بر روی نیم‌طول شکاف دارند. همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که افزایش گرادیان تنش، مدول یانگ و ضخامت زون هدف نیم‌طول شکاف را کاهش داده و کاهش این پارامترها باعث افزایش آن می‌شود. از میان این پارامترها تنش زون بیشترین اثر و ضخامت زون کمترین اثر را بر روی نیم‌طول شکاف دارد. همچنین مشخص شد که کاهش تنش زون بالایی نیم‌طول شکاف را به شدت کاهش می‌دهد (Hashemi, et al., ۲۰۱۲).

<sup>۱</sup> Analytical Hierarchy Process

<sup>۲</sup> Multiple Fracture

<sup>۳</sup> Screen out

در این تحقیق با بررسی مطالعات قبلی انجام شده (به خصوص مطالعات صورت گرفته در کشور) و همچنین با توجه به شکافدار بودن مخزن کربناته مورد مطالعه، در نهایت تنش افقی حداقل، مدول یانگ، اختلاف تنش‌های افقی در زون هدف، زاویه اصطکاک داخلی، محدودسازی شکاف، چگالی و جهت‌گیری درزه و شکاف‌های طبیعی سنگ و ضخامت زون به عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین معیارها در انتخاب لایه‌های کاندید در نظر گرفته شدند.

#### ۴-۴-۲ شاخص شکاف‌پذیری کل

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز به آن اشاره شد رابطه واحدی برای ارزیابی شکاف‌پذیری در مخازن مختلف وجود ندارد. محققان بسیاری روابط مختلفی برای ارزیابی شکاف‌پذیری ارائه داده‌اند (Fu, et al., 2015, Zhang, et al., 2015, Mullen and Enderlin, 2012, Guo, et al., 2015, Jin, et al., 2014, Wang, et al., 2015, Fang, et al., 2014) که هدف آن‌ها ترکیب کردن پارامترهای کنترل‌کننده شکاف هیدرولیکی بوده است.

شکاف‌پذیری در واقع اصطلاحی متعلق به حوزه مهندسی نفت و همچنین زمین‌شناسی نفت است که نشان می‌دهد شکاف‌زنی هیدرولیکی در یک مخزن تا چه حد می‌تواند مؤثر باشد. به طور کلی در مورد یک مخزن خاص ابتدا باید بر اساس پیشینه زمین‌شناسی و ژئومکانیکی آن، شناختی از مکانیزم شکست در حین فرآیند شکاف‌زنی پیدا کرد و سپس مؤثرترین شاخصه‌ها و پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی که بر نتایج عملیات شکاف‌زنی اثر می‌گذارند را شناسایی کرده و در نهایت یک روش ارزیابی شکاف‌پذیری که برای آن نوع از مخزن مناسب است را به کار گرفت (Zhang, et al., ۲۰۱۵). بنابراین با توجه به این توضیحات، شکاف‌پذیری تنها محدود به مخازن شیلی و ماسه‌سنگی نیست و در مخازن دیگر مانند مخازن کربناته ایران هم می‌توان شاخصی برای ارزیابی آن ارائه کرد. در این تحقیق با بررسی پارامترهای اثرگذار بر نتایج عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی و داده‌های موجود شاخصی برای ارزیابی شکاف‌پذیری در مخزن بنگستان در میدان اهواز ارائه شده است.

یکی از پارامترهای مهمی که بر روی هندسه و فشار ایجاد شکاف هیدرولیکی تأثیر بسزایی دارد مدول یانگ است. اما علاوه بر مدول یانگ پارامترهای دیگری نیز بر روی شکاف هیدرولیکی اثرگذارند. به عنوان مثال بی (۲۰۱۶) به این مسأله پرداخته که مقاومت فشاری تک محوره (UCS) نقش مهمی در انتخاب لایه‌های کاندید دارد و لایه‌های دارای مقاومت فشاری کمتر را به عنوان لایه‌های شکاف‌پذیرتر در نظر گرفته است (Bai, ۲۰۱۶). بنابراین به منظور بررسی روابط بین پارامترهای الاستیک و مقاومتی یک آنالیز همبستگی

بین این پارامترها در چاه‌های مورد مطالعه انجام شد. به عنوان مثال نتایج آنالیز همبستگی در چاه ۳۶۸ در جدول ۱-۴ نشان داده شده است. در چاه‌های ۳۹۷ و ۴۸۸ نیز نتایجی مشابه با این چاه به دست آمد.

جدول ۴-۱ آنالیز همبستگی بین پارامترهای الاستیک و مقاومتی در چاه ۳۶۸

پارامتر	E	PR	K	G	UCS	TS	FANG	C
E	1	0.94	0.99	0.99	1	1	0.42	0.86
PR	0.94	1	0.95	0.93	0.94	0.94	0.44	0.78
K	0.99	0.95	1	0.99	0.99	0.99	0.42	0.85
G	0.99	0.93	0.99	1	0.99	0.99	0.42	0.86
UCS	1	0.94	0.99	0.99	1	1	0.42	0.86
TS	1	0.94	0.99	0.99	1	1	0.42	0.86
FANG	0.42	0.44	0.42	0.42	0.42	0.42	1	-0.1
C	0.86	0.78	0.85	0.86	0.86	0.86	-0.1	1

در جدول ۴-۱ ملاحظه می‌شود که مدول یانگ با تمام پارامترهای الاستیک و مقاومتی به جز زاویه اصطکاک داخلی همبستگی بسیار بالایی دارد که دلیل آن روابطی است که برای تخمین این پارامترها استفاده شده است (روابط ۳-۲۲، ۳-۲۳، ۳-۳۱، ۳-۳۲). طبق رابطه ۳-۴۲ نیز ملاحظه می‌شود که چسبندگی با زاویه اصطکاک داخلی رابطه عکس دارد. بنابراین مدول یانگ و زاویه اصطکاک داخلی به عنوان نماینده پارامترهای الاستیک و مقاومتی در نظر گرفته شدند و در نهایت رابطه شکاف‌پذیری به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$FI = \frac{E_n + 2Br}{3\sin(\varphi)} \quad (۹-۴)$$

در این رابطه  $Br$  شکنندگی است که از رابطه ۴-۴ محاسبه شده است. رابطه ۴-۱ برای محاسبه شکنندگی در سازندهای شیلی ارائه شده است. به علاوه در این مخزن همانطور که در جدول ۴-۱ نیز ملاحظه می‌شود رابطه مستقیم و مثبتی بین مدول یانگ و نسبت پواسون وجود دارد. در رابطه ۴-۹ مدول یانگ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_n = \frac{E_{max} - E}{E_{max} - E_{min}} \quad (۱۰-۴)$$

طبق روابط ۴-۹ و ۴-۱۰ با افزایش مدول یانگ و زاویه اصطکاک داخلی شکاف‌پذیری کاهش و با کاهش این دو پارامتر افزایش می‌یابد. زاویه اصطکاک داخلی هم از رابطه ۳-۴۰ محاسبه می‌شود. طبق این

رابطه زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تخلخل و درصد رس، کاهش یافته و در نتیجه شکاف پذیری افزایش می‌یابد. اما افزایش درصد رس نباید باعث افزایش شکاف پذیری شود چرا که همان‌طور که گفته شد با افزایش درصد کانی‌های رسی در سنگ شکنندگی کاهش می‌یابد. به همین دلیل از شکنندگی در صورت رابطه استفاده شده است. وارد کردن شکنندگی باعث می‌شود در مناطقی که درصد رس بالا می‌رود (لایه‌های نازک شیلی) شکاف پذیری کاهش یافته و در واقع اثر کاهش زاویه اصطکاک در مخرج (چنانچه به دلیل افزایش درصد رس باشد) تعدیل گردد. به طور کلی طبق این رابطه لایه‌هایی که در آن‌ها مدول یانگ و زاویه اصطکاک داخلی کمتر، و شکنندگی بیشتر است، شاخص شکاف پذیری بیشتری دارند.

اما علاوه بر پارامترهای الاستیک و مقاومتی، مقدار تنش افقی حداقل و اختلاف تنش‌های افقی در لایه نیز نقش مهمی در عملیات شکاف هیدرولیکی دارد. بنابراین شکل کامل‌تری از شکاف پذیری به نام شاخص شکاف پذیری کل (TFI) به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$TFI = W_1 \frac{FI - FI_{min}}{FI_{max} - FI_{min}} + W_2 \frac{\sigma_{hmax} - \sigma_h}{\sigma_{hmax} - \sigma_{hmin}} + W_3 \frac{\Delta S - \Delta S_{min}}{\Delta S_{max} - \Delta S_{min}} \quad (11-4)$$

که در آن :

$$W_1 + W_2 + W_3 = 1 \quad (12-4)$$

طبق رابطه ۴-۱۱ شاخص شکاف پذیری کل با افزایش شاخص شکاف پذیری (FI) و افزایش اختلاف تنش‌های افقی افزایش یافته و با افزایش مقدار تنش افقی حداقل کاهش می‌یابد. در این رابطه پارامترهای شکاف پذیری، تنش افقی حداقل و اختلاف تنش‌های افقی در هر سازند با استفاده از مقادیر حداقل و حداکثر در همان سازند نرمالایز می‌شوند. همچنین  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$  ضرایب وزنی هستند که مجموعشان طبق رابطه ۴-۱۲ باید برابر با ۱ باشد. این ضرایب با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به دست می‌آیند. در ادامه به طور مختصر به این روش و نحوه تعیین ضرایب وزنی و ارزیابی معیارها پرداخته خواهد شد.

#### ۴-۳-۴ تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره<sup>۱</sup> (MCDM) است که نخستین بار توسط ساعتی<sup>۲</sup> (۱۹۷۷) معرفی شد. با استفاده از این روش می‌توان اهمیت نسبی معیارهای کمی و کیفی

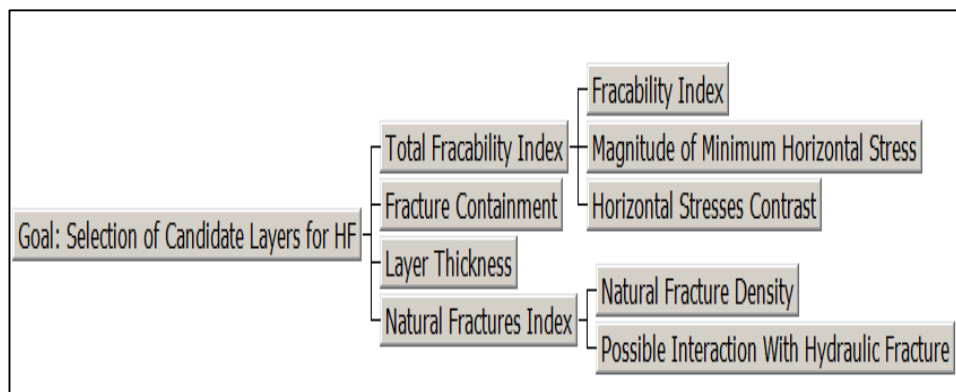
<sup>۱</sup> Multi-Criteria Decision Making

<sup>۲</sup> Saaty

مختلف در یک مسأله تصمیم‌گیری را تعیین کرد (Badri, 2001). به طور کلی تصمیم‌گیری با استفاده از روش AHP در طی ۳ مرحله انجام می‌شود (Dagdeviren, 2008):

- (۱) ساخت درخت سلسله مراتبی
- (۲) تعیین اهمیت نسبی معیارها و گزینه‌ها<sup>۱</sup>
- (۳) نتیجه‌گیری و اولویت‌بندی گزینه‌ها

AHP ابتدا یک مسأله پیچیده تصمیم‌گیری چند معیاره را تجزیه کرده و به یک درخت سلسله مراتبی تبدیل می‌کند که در آن المان‌های مختلف مانند هدف، معیارها و زیرمعیارها با هم در ارتباط‌اند. هدف اصلی مسأله در بالاترین سطح قرار می‌گیرد و پس از آن معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها به ترتیب در سطوح پایین‌تر قرار می‌گیرند (Albayrak and Erensal, 2004). در این تحقیق مراحل مختلف روش AHP با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice انجام شده است. در شکل ۳-۴ درخت سلسله مراتبی ساخته شده برای مسأله انتخاب لایه‌های کاندید برای عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ درخت سلسله مراتبی ساخته شده برای مسأله انتخاب لایه‌های کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی

برای تعیین اهمیت نسبی معیارها و زیر معیارها، یک پرسشنامه طرح شد و در آن اهمیت نسبی هر دو معیار نسبت به هم مورد پرسش قرار گرفت. این پرسشنامه به وسیله شش تن از افراد متخصص و با تجربه در زمینه شکاف هیدرولیکی پاسخ داده شد. سپس با استفاده از میانگین نظرات این افراد، اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارها نسبت به یکدیگر تعیین شد. در روش AHP مقایسه زوجی بین معیارها بر اساس

<sup>۱</sup> Alternatives

یک مقیاس استاندارد انجام می‌شود که در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. در نهایت ضرایب وزنی  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$  تعیین شدند و رابطه شاخص شکاف‌پذیری کل به صورت زیر درآمد:

$$TFI = 0.637 \frac{FI - FI_{\min}}{FI_{\max} - FI_{\min}} + 0.105 \frac{\sigma_{h\max} - \sigma_h}{\sigma_{h\max} - \sigma_{h\min}} + 0.258 \frac{\Delta S - \Delta S_{\min}}{\Delta S_{\max} - \Delta S_{\min}} \quad (۱۳-۴)$$

جدول ۴-۲ مقیاس استاندارد برای مقایسه اهمیت زوجی معیارها (Figueria, et al., 2005)

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to objective
2	Weak	
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another
4	Moderate plus	
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
6	Strong plus	
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favored very strongly over another
8	Very, very strong	
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation

#### ۴-۴-۴ انتخاب چاه و لایه کاندید در سازند ایلام

در سازند ایلام به دلیل عدم وجود لاگ تصویری امکان بررسی شکاف‌های طبیعی وجود نداشت. بنابراین معیارهای انتخاب کاندید در این سازند عبارتند از شاخص شکاف‌پذیری کل، محدودسازی شکاف و ضخامت لایه، که ضرایب وزنی آنها (بر اساس نتایج پرسشنامه) به ترتیب برابر با ۰/۶۷۲، ۰/۲۶۵ و ۰/۰۶۳ است. این ضرایب نشان می‌دهد که از نظر کارشناسان شاخص شکاف‌پذیری کل مهم‌ترین معیار در انتخاب چاه کاندید بوده است.

انتخاب لایه کاندید در این سازند در چاه‌های مورد مطالعه به این صورت انجام شد که ابتدا لایه‌های مستعد با توجه به مقدار شاخص شکاف‌پذیری کل انتخاب شدند و سپس در این لایه‌ها ۳ معیار گفته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برای ارزیابی میزان محدودسازی در هر لایه و مقایسه این معیار بین لایه‌های مختلف، مخزن بر حسب مقدار مدول یانگ به عنوان نماینده پارامترهای ژئومکانیکی (با توجه به نتایج جدول ۴-۱) به ۸ واحد ژئومکانیکی<sup>۱</sup> (GMU) تقسیم شد. در این تقسیم‌بندی واحد ۱ (GMU1) دارای کمترین و واحد ۸ (GMU8) دارای بیشترین مقدار مدول یانگ است. در جدول ۴-۳ بازه تغییرات مدول یانگ در هر یک از واحدهای ژئومکانیکی در چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. پس از واحدبندی ژئومکانیکی مخزن، اختلاف واحد ژئومکانیکی لایه با لایه‌های بالایی و پایینی به عنوان معیاری برای ارزیابی توانایی محدودسازی شکاف در نظر گرفته شد.

جدول ۴-۳ مقادیر مدول یانگ در هریک از واحدهای ژئومکانیکی در چاه‌های مورد مطالعه

واحد ژئومکانیکی	E-488 (GPa)	E-397 (GPa)	E-368 (GPa)
GMU 1	23-27	14.45-22.8	19.7-27.8
GMU 2	27.1-31	22.8-26.9	27.8-31.8
GMU 3	31.1-35.1	26.9-31	31.8-35.9
GMU 4	35.2-39.1	31.1-35.1	35.9-39.9
GMU 5	39.2-43.2	35.2-39.4	39.9-43.9
GMU 6	43.3-47.3	39.4-43.5	43.9-48
GMU 7	47.3-51.3	43.5-47.7	48-52
GMU 8	51.3-55.3	47.8-60.1	52-56

در شکل‌های ۴-۴ تا ۴-۶ نتایج محاسبه شاخص شکاف‌پذیری کل و واحدبندی ژئومکانیکی سازند ایلام نشان داده شده است. در این شکل‌ها ستون اول عمق بر حسب متر، ستون دوم نگار گاما، ستون سوم مدول یانگ، ستون چهارم درصد رس، ستون پنجم شکنندگی، ستون ششم شاخص شکاف‌پذیری کل، ستون هفتم واحد ژئومکانیکی و ستون هشتم لیتولوژی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اعماقی که درصد رس بالا رفته، مقدار شکنندگی کاهش یافته و در نتیجه مقدار شاخص شکاف‌پذیری کل هم

<sup>۱</sup> Geomechanical Unit

کاهش یافته است. همچنین شاخص شکاف‌پذیری کل در زون‌های C1 و C2 در این مخزن مقدار بالاتری نسبت به دیگر زون‌ها دارد.

در نهایت با ارزیابی معیارها با استفاده از روش AHP، لایه‌های کاندید در سازند ایلام اولویت‌بندی شدند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ارزیابی کاندیدها به صورت کیفی انجام شده است. در جدول ۴-۴ نحوه ارزیابی کیفی معیارها نشان داده شده است. اولویت‌بندی نهایی کاندیدها را نیز می‌توان در جدول ۴-۵ ملاحظه کرد.

جدول ۴-۴ نحوه ارزیابی کیفی معیارهای اصلی برای انتخاب کاندید در سازند ایلام

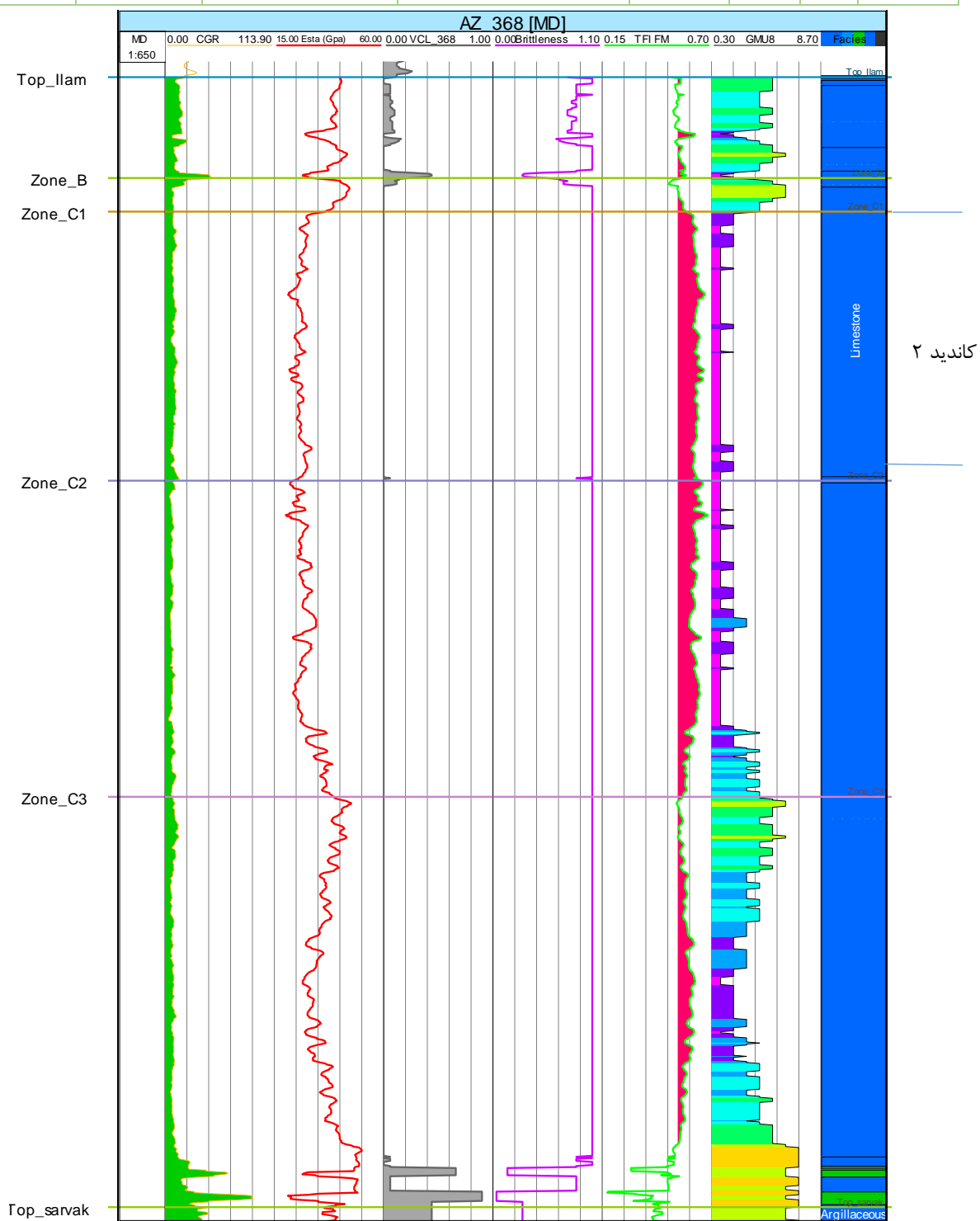
شاخص	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
شکاف‌پذیری کل (TFI)	$TFI < 0.5$	$0.5 < TFI < 0.6$	$0.6 < TFI < 0.65$	$0.65 < TFI < 0.7$	$TFI > 0.7$
ضخامت لایه (متر)	$T < 10$	$10 < T < 20$	$20 < T < 25$	$25 < T < 30$	$T > 30$
محدودسازی شکاف	$\Delta GMU < 1$	$1 < \Delta GMU < 1.3$	$1.3 < \Delta GMU < 2$	$\Delta GMU > 2$	-

جدول ۴-۵ ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی لایه‌های کاندید در سازند ایلام

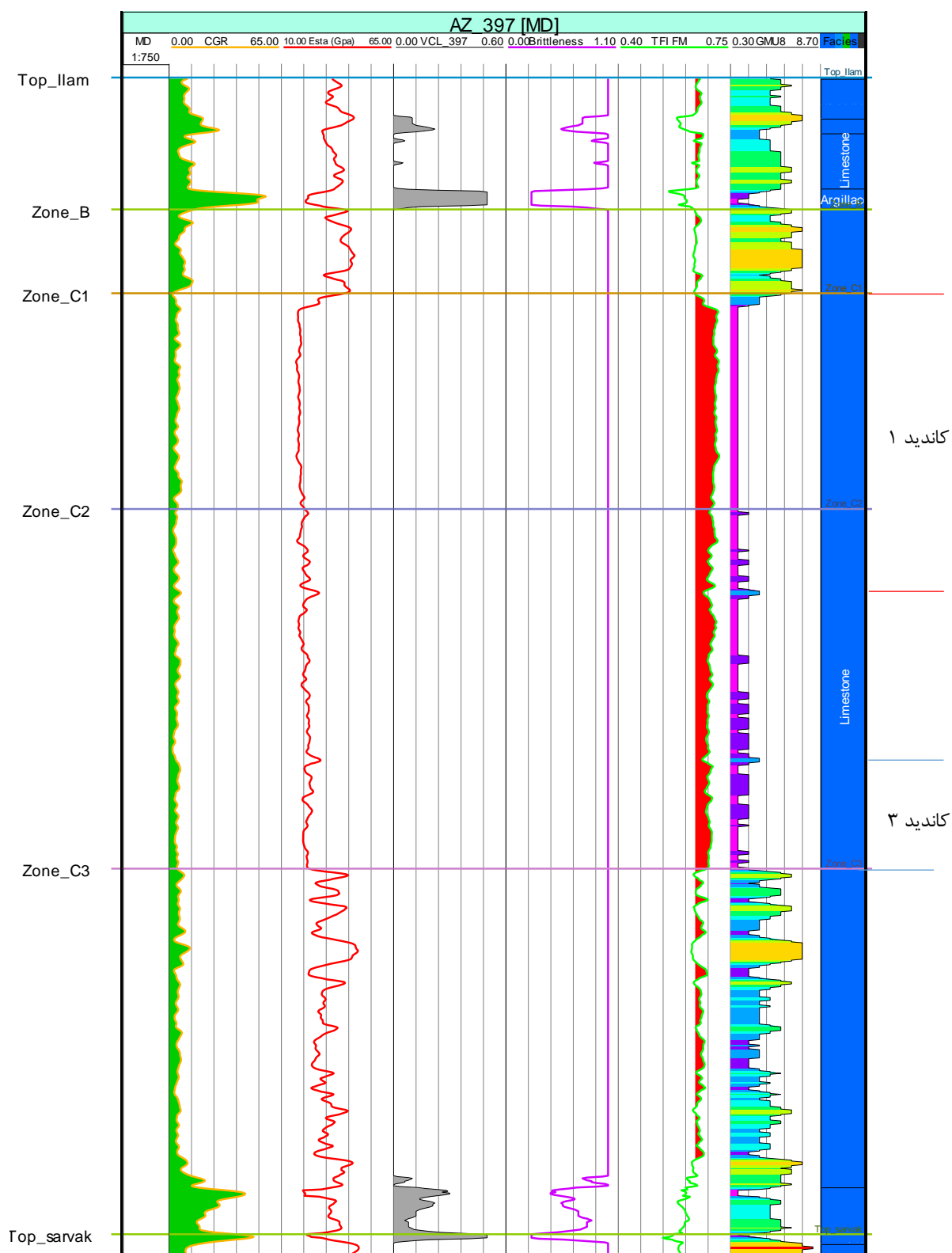
رتبه کاندید	چاه	زون	بازه عمقی (متر)	وضعیت شاخص شکاف-پذیری کل (TFI)	وضعیت محدودسازی شکاف	وضعیت ضخامت	امتیاز کل
۱	۳۹۷	C1	3356-3403	خیلی خوب	خیلی خوب	عالی	0.176
۲	۳۶۸	C1	3200-3237	خوب	خیلی خوب	عالی	0.138
۳	۳۹۷	C2-2	3432-3450	خیلی خوب	خوب	متوسط	0.111
۴	۴۸۸	C1-1	3366-3395	خیلی خوب	متوسط	خیلی خوب	0.103
۵	۴۸۸	C1-C2	3397-3423	خیلی خوب	ضعیف	خیلی خوب	0.097
۶	۳۹۷	C2-1	3405-3431	خیلی خوب	ضعیف	خیلی خوب	0.097
۷	۴۸۸	C2	3425-3440	خیلی خوب	ضعیف	متوسط	0.092
۸	۳۶۸	C2-2	3263-3276	خوب	خوب	متوسط	0.073



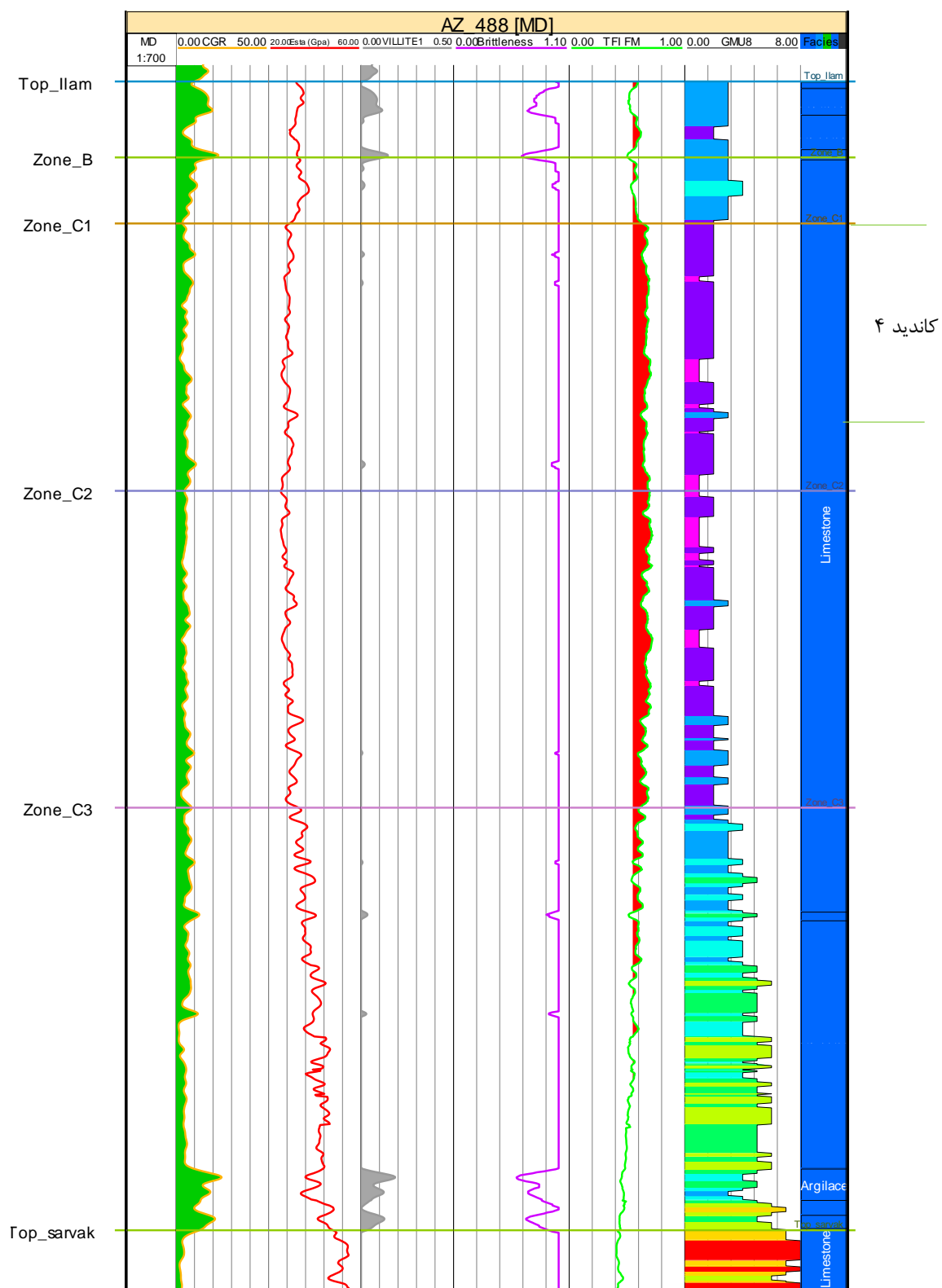
0.056	خوب	ضعیف	خوب	3239-3260	C2-1	۳۶۸	۹
0.054	خوب	خوب	متوسط	3305-3326	C3	۳۶۸	۱۰



شکل ۴-۴ شاخص شکاف پذیری کل و واحد بندی ژئومکانیکی در چاه ۳۶۸، سازند ایلام

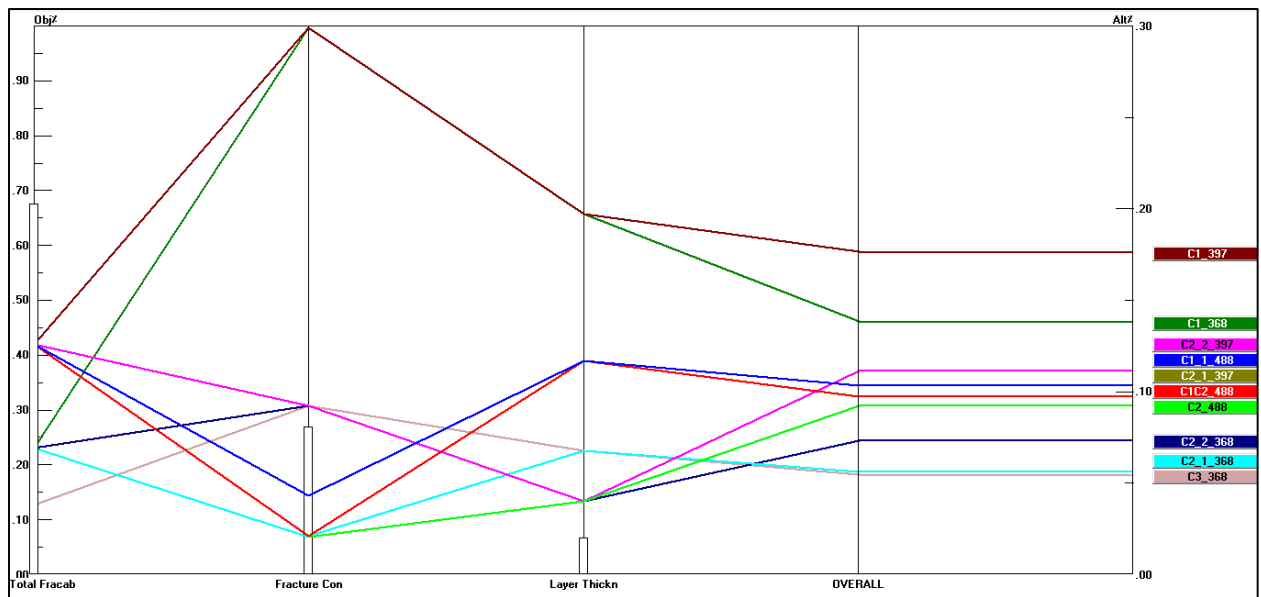


شکل ۴-۵ شاخص شکاف پذیری کل و واحد بندی ژئومکانیکی در چاه ۳۹۷، سازند ایلام



شکل ۴-۶ شاخص شکاف پذیری کل و واحد بندی ژئومکانیکی در چاه ۴۸۸، سازند ایلام

در نرم افزار Expert Choice روش‌های مختلفی برای تحلیل حساسیت گزینه‌ها نسبت به معیارها وجود دارد. در شکل ۴-۷ تحلیل حساسیت عملکرد<sup>۱</sup> نشان داده شده است. در این شکل در محور افقی معیارها نشان داده شده است. بر روی هر معیار یک نمودار میله‌ای وجود دارد که نشان‌دهنده اهمیت آن معیار است. در سمت راست نمودار نیز امتیاز کلی کاندیدها به نمایش درآمده است. به عنوان مثال ملاحظه می‌گردد که دو لایه کاندید اول از نظر محدودسازی و ضخامت لایه وضعیت مشابهی دارند، اما شاخص شکاف‌پذیری کل در لایه C1 در چاه ۳۹۷ بیشتر از لایه C1 در چاه ۳۶۸ است که همین امر باعث شده تا امتیاز کلی این لایه نیز بیشتر شود و در رتبه اول قرار بگیرد.



شکل ۴-۷ تحلیل حساسیت عملکرد لایه‌های کاندید نسبت به معیارها

#### ۴-۴-۵ انتخاب چاه و لایه کاندید در سازند سروک

در سازند سروک بر خلاف سازند ایلام، لاگ تصویری در چاه‌های مورد مطالعه موجود است. بنابراین در این سازند برای انتخاب لایه‌های کاندید مطابق با شکل ۴-۳ معیارهای شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI)، محدودسازی شکاف، شاخص شکاف‌های طبیعی و ضخامت لایه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

شکاف هیدرولیکی در یک محیط همسانگرد همیشه در جهت عمود بر تنش اصلی حداقل، یعنی در جهتی انتشار می‌یابد که در آن جهت بازشدگی راحت‌تر باشد. چرا که هنگامی که شکاف موازی با جهت

<sup>۱</sup> Performance

تنش اصلی حداکثر منتشر می‌شود، بازشدگی در مقابل تنش اصلی حداقل رخ می‌دهد (Hubbert and Willis, 1957).

اما علاوه بر وضعیت تنش، وضعیت شکاف‌های طبیعی موجود در سنگ نیز می‌تواند اثرات قابل توجهی بر روی هندسه شکاف، اثر بخشی عملیات و متعاقباً تولید هیدروکربور داشته باشد. در ادامه ابتدا در مورد اثر شکاف‌های طبیعی بر روی هندسه و همچنین برهم‌کنش آن با شکاف هیدرولیکی توضیحاتی ارائه می‌شود و سپس نحوه ارزیابی آن در چاه‌های مورد مطالعه بحث خواهد شد.

#### ۴-۵-۱ برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی

هنگامی که شکاف هیدرولیکی در مسیر انتشار خود به یک شکاف طبیعی می‌رسد (شکل ۴-۸) برهم‌کنش بین آن‌ها ممکن منجر به سه سناریوی مختلف شود (Blanton, 1986):

(۱) قطع<sup>۱</sup> شکاف طبیعی؛ در این حالت شکاف هیدرولیکی بدون تغییر جهت شکاف طبیعی را قطع کرده و مسطح باقی می‌ماند.

(۲) انحراف<sup>۲</sup> شکاف هیدرولیکی؛ این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که شکاف هیدرولیکی شکاف طبیعی را قطع نمی‌کند، اما فشار سیال برای انحراف شکاف در جهت شکاف طبیعی مناسب است

(۳) توقف<sup>۳</sup> شکاف هیدرولیکی؛ در این حالت شکاف هیدرولیکی بعد از رسیدن و برخورد با شکاف طبیعی متوقف می‌شود. در این مورد فشار سیال کمتر از مقدار مورد نیاز برای گسترش بیشتر شکاف هیدرولیکی است.

پارامترهای مختلفی این برهم‌کنش را کنترل می‌کنند که مهم‌ترین آن‌ها زاویه برخورد شکاف هیدرولیکی با شکاف طبیعی، اختلاف بین تنش‌های افقی و مقاومت برشی شکاف طبیعی است. شکاف هیدرولیکی تنها تحت شرایط اختلاف تنش بالا و زاویه برخورد زیاد قادر به قطع شکاف طبیعی است. در زوایای برخورد و اختلاف تنش کم یا متوسط، شکاف هیدرولیکی به داخل شکاف طبیعی منحرف شده یا به وسیله آن متوقف می‌گردد (Blanton, 1986).

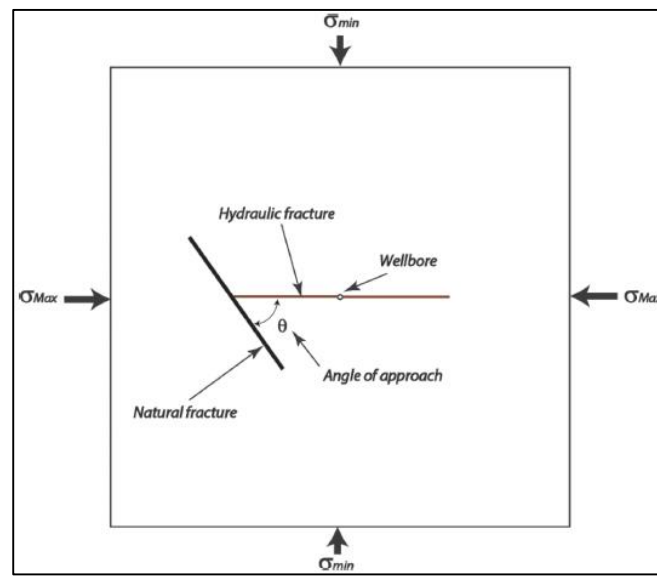
---

<sup>۱</sup> Crossing

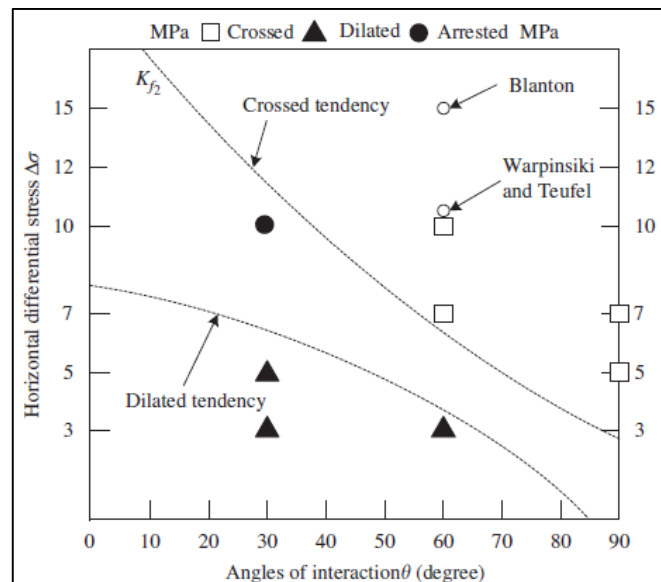
<sup>۲</sup> Offset

<sup>۳</sup> Arresting

مطالعات گسترده‌ای توسط محققان مختلف بر روی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی شکاف طبیعی صورت گرفته است. ژو و همکاران (۲۰۰۸) با انجام یک سری آزمایش‌های شکاف‌زنی، رفتار انتشار شکاف هیدرولیکی و هندسه آن در مخازن شکاف‌دار را مورد بررسی قرار دارند که خلاصه نتایجی که به دست آوردند در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸ برخورد شکاف هیدرولیکی با شکاف طبیعی (Zanganeh, et al., 2014)



شکل ۴-۹ نتایج آزمایشگاهی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیک و شکاف طبیعی (Zhou, et al., 2008)

همان‌طور که در شکل ۴-۹ ملاحظه می‌شود شکاف هیدرولیکی تنها در اختلاف تنش‌های بالا و زوایای برخورد ۶۰ درجه یا بیشتر توانسته شکاف‌های طبیعی را قطع کند. در اختلاف تنش‌های و زوایای برخورد کم فشار سیال درون شکاف تنها برای باز کردن شکاف طبیعی و یا منحرف شدن سیال به درون آن کافی بوده است.

مطالعه دیگری نیز توسط زنگنه و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است. در این مطالعه یک سری آزمایش عددی با استفاده از روش المان مجزا<sup>۱</sup> انجام شده تا اثر شکاف‌های طبیعی بر روی انتشار شکاف هیدرولیکی را بررسی کند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که زمانی که شکاف هیدرولیکی با زاویه برخورد ۶۰ درجه و تحت اختلاف تنش بالا (بیشتر از ۱۱ مگاپاسکال) به یک شکاف طبیعی می‌رسد، می‌تواند شکاف طبیعی را قطع کند. دلیل آن این است که در این حالت فشار مورد نیاز برای باز شدن شکاف در یک جهت ناموازی با تنش افقی حداقل بیشتر از فشار مورد نیاز برای ادامه یافتن شکاف هیدرولیکی در همان جهت قبلی آن است (Zanganeh, et al., 2014).

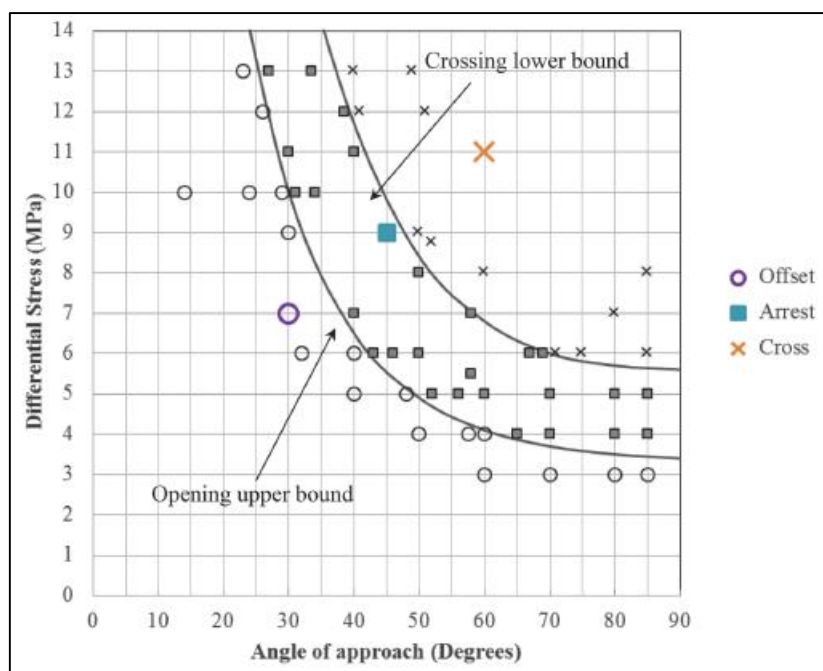
نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد زمانی که زاویه برخورد کمتر از ۳۰ درجه و اختلاف تنش کم (کمتر از ۷ مگاپاسکال) است، شکاف هیدرولیکی به داخل شکاف طبیعی منحرف شده و از نوک<sup>۲</sup> شکاف طبیعی گسترش پیدا می‌کند. این امر اثربخشی شکاف هیدرولیکی را محدود می‌کند، چرا که باعث نشت سیال شکاف‌زنی می‌شود.

سناریوی سوم زمانی رخ می‌دهد که شکاف هیدرولیکی با زاویه ۴۵ درجه و تحت اختلاف تنش متوسط (۹ مگاپاسکال) به شکاف طبیعی می‌رسد. در این حالت شکاف هیدرولیکی متوقف شده، اثربخشی عملیات شکاف‌زنی به شدت کاهش یافته و شکاف نامتقارن در مخزن ایجاد می‌شود. این توقف ممکن است موقت باشد و با ادامه افزایش فشار شکاف هیدرولیکی به داخل شکاف طبیعی منحرف شده و یا آن را قطع کند (Zanganeh, et al., 2014). شکل ۴-۱۰ نتایج به دست آمده از این مدلسازی عددی را در زوایای برخورد و اختلاف تنش‌های مختلف نشان می‌دهد. مطالعات دیگری نیز انجام شده که نتایجی مشابه همین نتایج داشته است (Guo, et al., 2015a, Taleghani and Olson, 2014, Sarmadivaleh and Rasouli, 2010, Aghighi, et al., 2010).

---

<sup>۱</sup> Distinct-element

<sup>۲</sup> Tip



شکل ۴-۱۰ نتایج مدلسازی عددی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیک و شکاف طبیعی (Zanganeh, et al., 2014)

#### ۴-۵-۲ ارزیابی شاخص شکاف طبیعی در سازند سروک

از بین چاه‌های مورد مطالعه فراوانی شکستگی در چاه‌های ۳۹۷ و ۴۸۸ بسیار محدود بوده، اما در چاه ۳۶۸ که در بخش شرقی میدان حفاری شده تعداد زیادی شکستگی در نگار تصویری مشاهده شده است. در ادامه این بخش شکاف‌های طبیعی مشاهده شده در چاه‌ها بررسی شده و نحوه ارزیابی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی توضیح داده می‌شود.

#### • چاه ۳۹۷

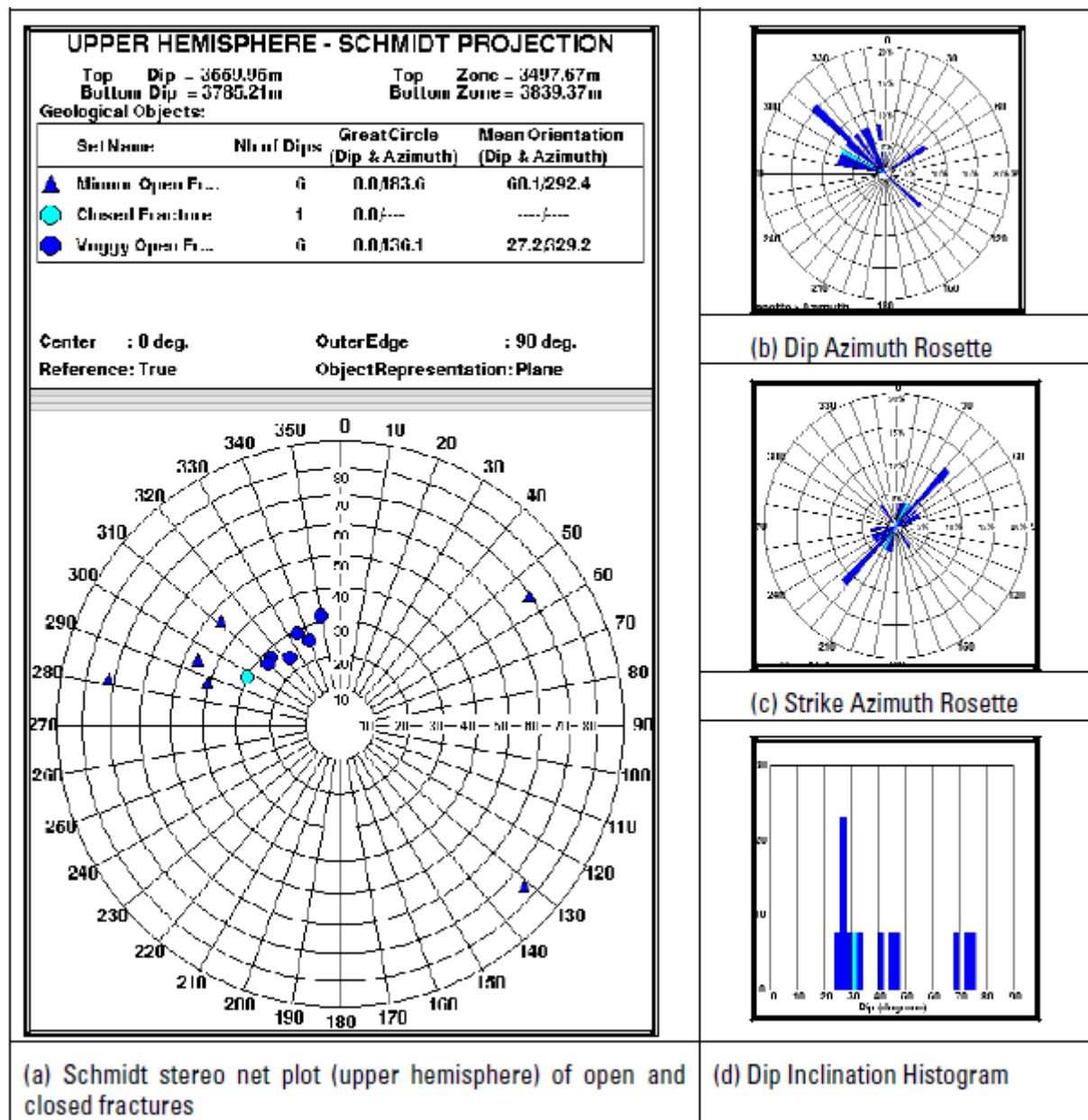
در این چاه روی هم‌رفته ۱۳ شکاف در نگار تصویری FMI مشاهده شده که ۶ تا از آن‌ها شکاف حفره-ای<sup>۱</sup>، ۶ تا شکاف باز کوچک<sup>۲</sup> و یکی هم شکاف بسته است. در شکل ۴-۱۱ وضعیت شیب و امتداد این شکاف‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که امتداد اکثر شکستگی‌ها بین ۳۰ تا ۷۰ درجه است. به علاوه جهت تنش افقی حداکثر در این چاه با توجه به امتداد شکستگی‌های برشی مشاهده شده در نگار

<sup>۱</sup> Vuggy

<sup>۲</sup> Minor Open Fracture



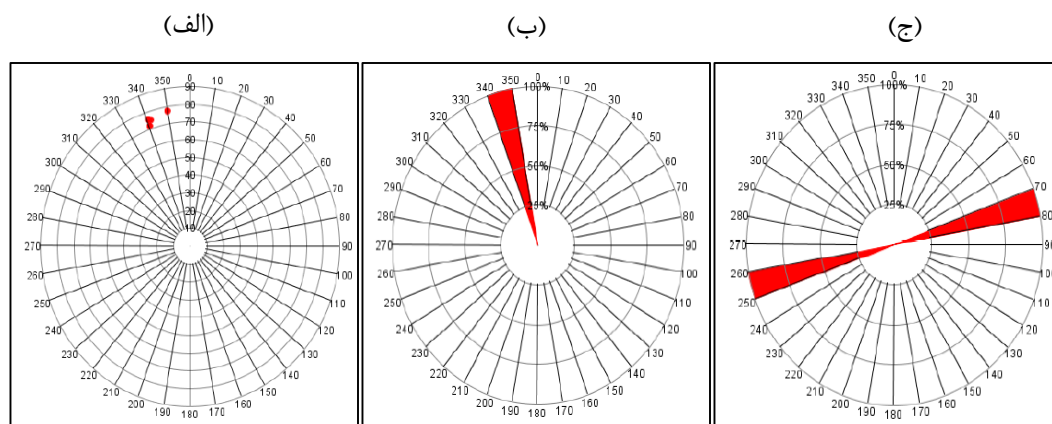
تصویری، N53E است. بنابراین ملاحظه می‌شود که در صورت انجام عملیات شکاف‌زنی در این چاه، زاویه برخورد شکاف هیدرولیکی با شکاف‌های طبیعی کم (کمتر از ۴۵ درجه) خواهد بود.



شکل ۴-۱۱ وضعیت شکاف‌های طبیعی در چاه ۳۹۷، سازند سروک (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۶)

#### • چاه ۴۸۸

در این چاه نیز تنها ۴ شکاف رسانا<sup>۱</sup> در نگار تصویری مشاهده شده که شیب و امتداد آن‌ها در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل امتداد شکاف‌های طبیعی بین ۷۰ تا ۸۰ درجه است. همچنین با توجه به امتداد شکستگی‌های القایی مشاهده شده در چاه، جهت تنش افقی حداکثر N80-100E است. بنابراین در این چاه نیز زاویه برخورد بین شکاف هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی کم خواهد بود.



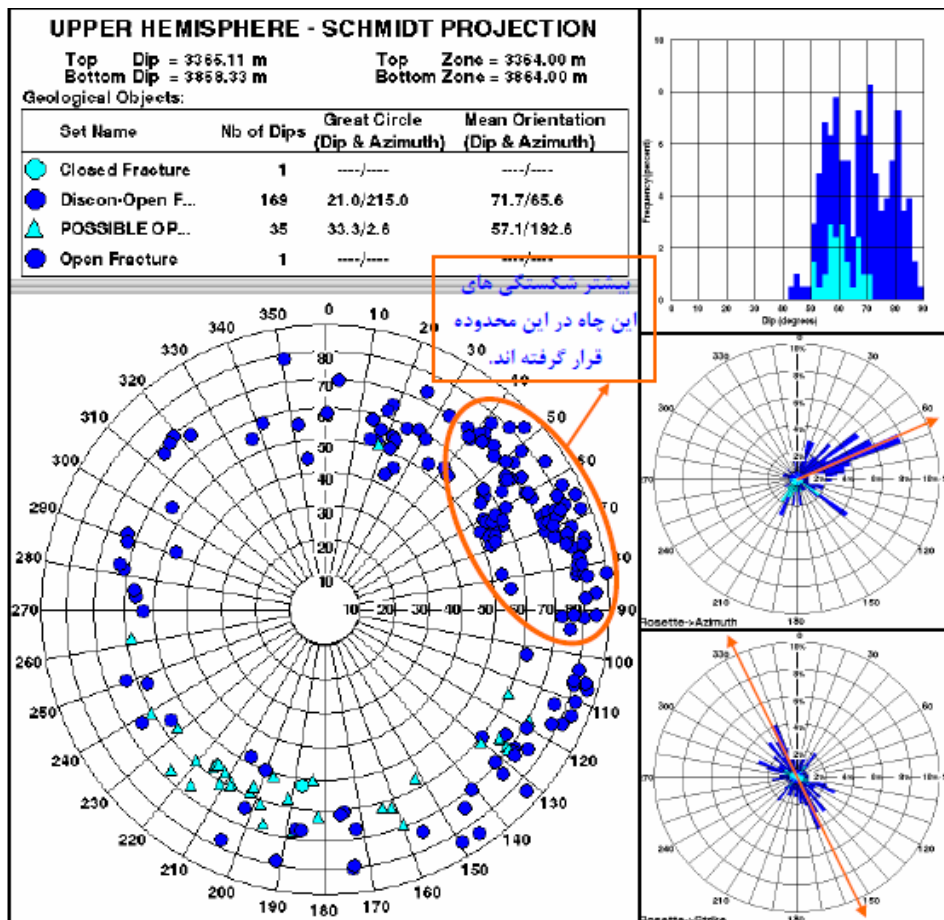
شکل ۴-۱۲ وضعیت شکاف‌های رسانا در چاه ۴۸۸. الف: جهت‌داری شکستگی‌ها بر روی دایره اشمیت، ب: آزمون شکستگی‌ها، ج: امتداد شکستگی‌ها (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۲)

#### • چاه ۳۶۸

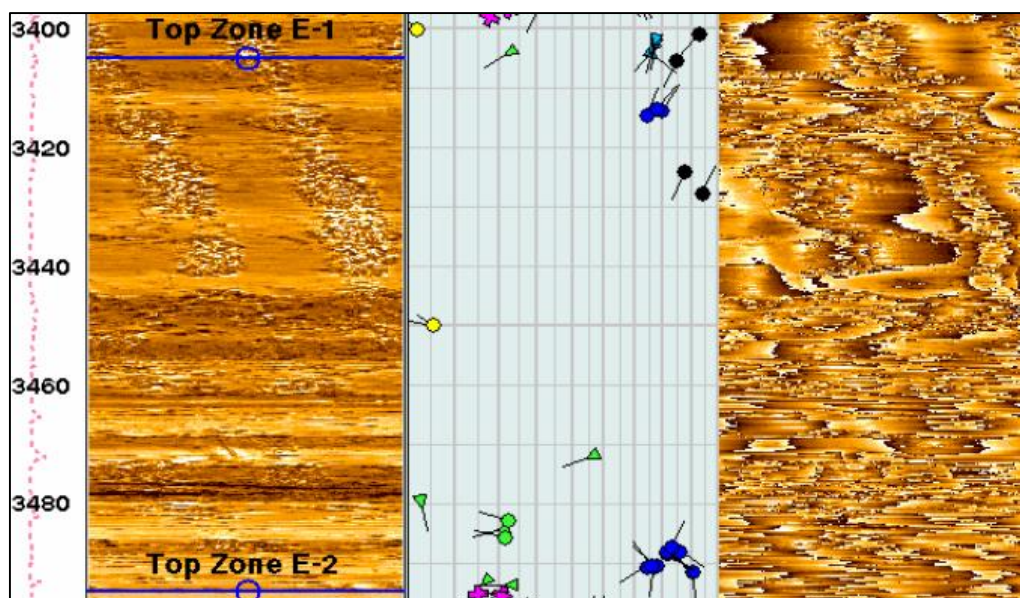
در این چاه در مجموع ۲۰۵ عدد شکستگی باز مشاهده شد که از این تعداد ۱۶۹ عدد شکستگی غیر ممتد، ۱ عدد شکستگی ممتد و ۳۵ عدد شکستگی باز احتمالی است. علاوه بر آن ۱ عدد شکستگی بسته نیز مشاهده شده است. شیب شکستگی‌ها در این سازند از ۵۰ تا ۹۰ درجه تغییر است. جهت شیب شکستگی‌ها نیز پراکندگی زیادی نشان می‌دهد اما جهت تقریبی اکثریت آن‌ها N65E است. امتداد کلی شکستگی‌ها نیز تقریباً N25E است (شکل ۴-۱۳). در این چاه با توجه به شکستگی‌های برشی مشاهده شده در دیواره چاه، جهت تنش افقی حداکثر به طور تقریبی N25E است. با توجه به پراکندگی زیاد امتداد شکستگی‌های مشاهده شده، در این چاه باید زاویه برخورد بین شکاف هیدرولیکی و شکاف طبیعی در هر

<sup>۱</sup> Conductive

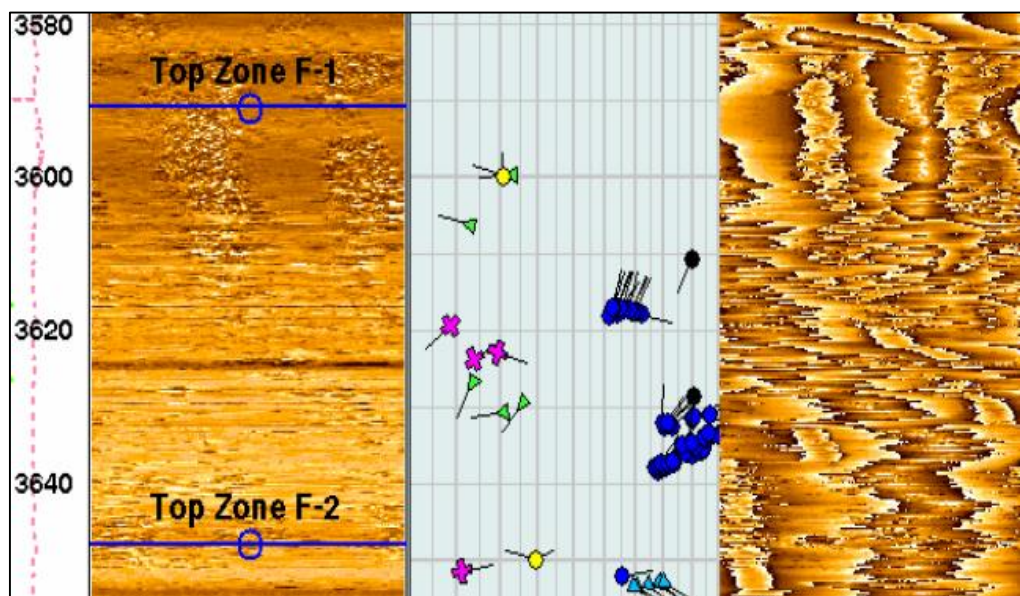
زون را به طور جداگانه مورد بررسی قرار داد. در شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ قسمتی از نگار تصویری UBI در چاه ۳۶۸ در زون‌های E1 و F1 نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳، جهت و امتداد شکاف‌های طبیعی مشاهده شده در چاه ۳۶۸، سازند سروک (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۹)



شکل ۴-۱۴ بخشی از نگار تصویری UBI در زون E1 در چاه ۳۶۸ (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹)



شکل ۴-۱۵ بخشی از نگار تصویری UBI در زون F1 در چاه ۳۶۸ (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹)

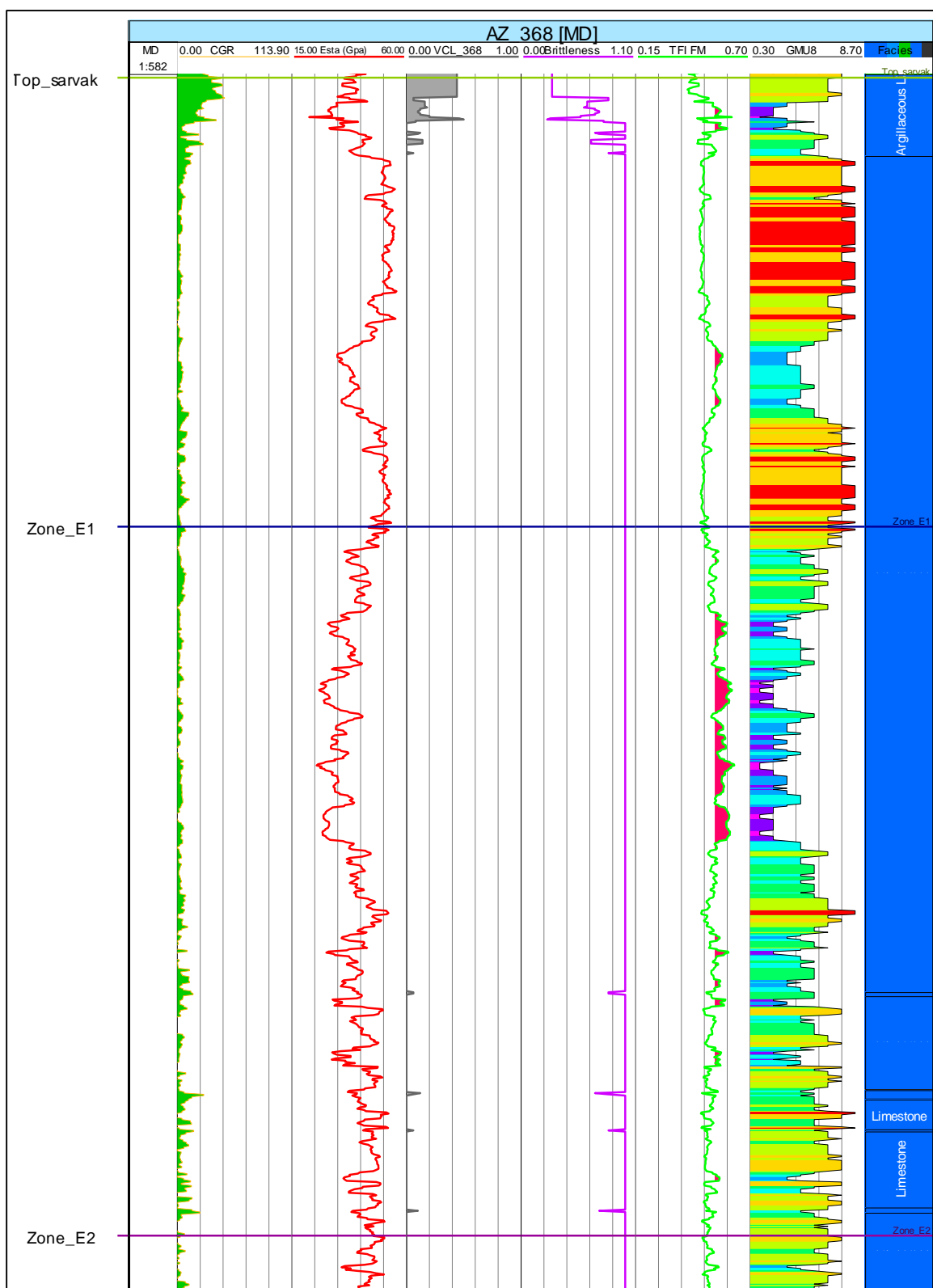
در نهایت با توجه به مطالب گفته شده در بخش قبلی و با توجه به این که در چاه‌های ۳۹۷ و ۴۸۸ توسعه شکاف‌های طبیعی بسیار محدود است. وضعیت برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف طبیعی در چاه‌ها به طور کیفی و مطابق با جدول ۴-۶ ارزیابی شد.

جدول ۴-۶ نحوه ارزیابی برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف طبیعی در سازند سروک

زاویه برخورد (درجه)	اختلاف تنش‌های افقی (مگاپاسکال)	وضعیت
$\theta < 45^\circ$	بی اثر	خیلی ضعیف
$45^\circ < \theta < 60^\circ$	$\Delta S < 10$	ضعیف
عدم وجود شکاف طبیعی	بی اثر	متوسط
$45^\circ < \theta < 60^\circ$	$\Delta S > 10$	خوب
$\theta > 60^\circ$	بی اثر	خیلی خوب

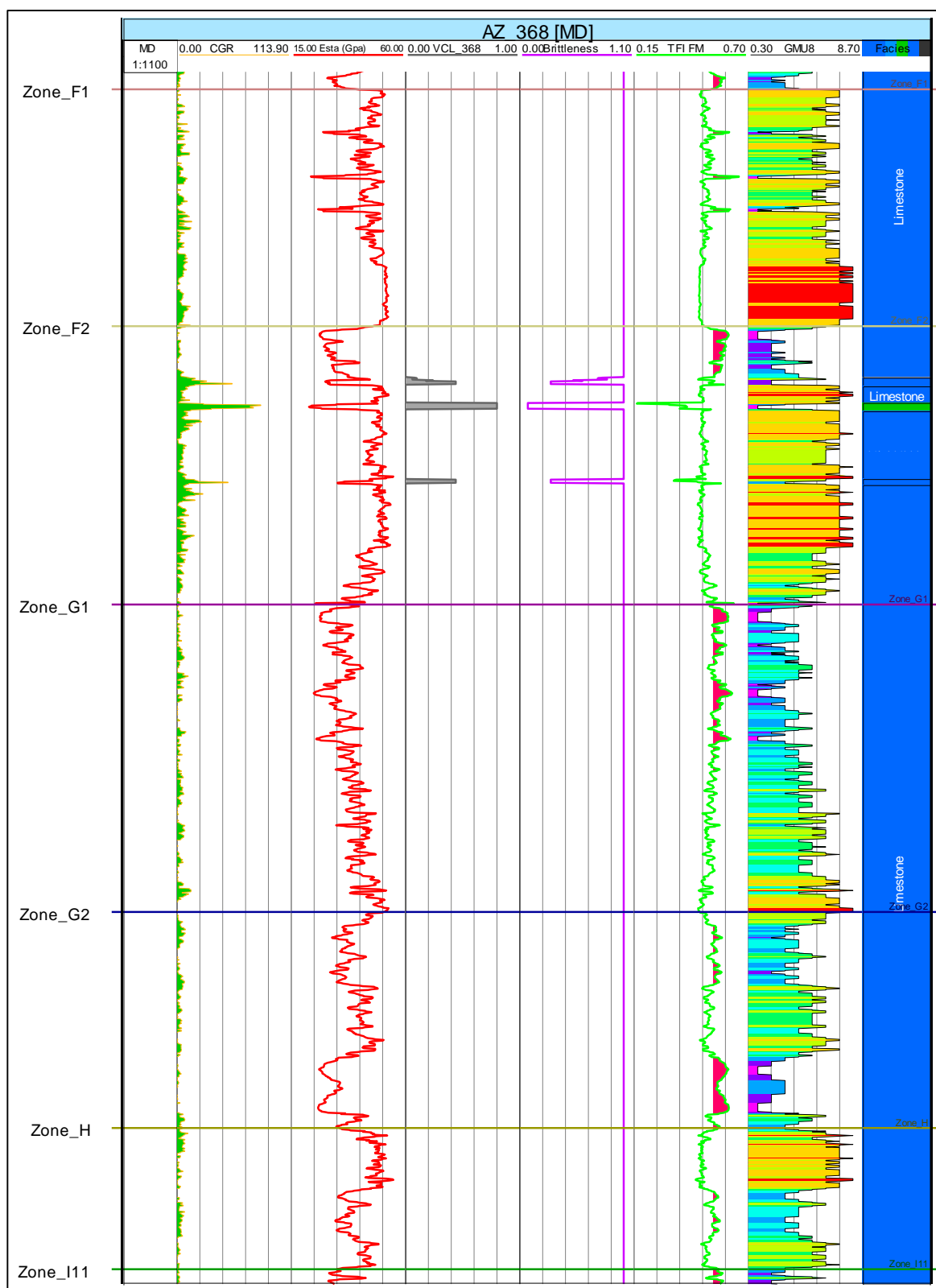
#### ۴-۵-۳ ارزیابی معیارها و انتخاب لایه‌های کاندید در سازند سروک

در این سازند نیز مشابه با سازند ایلام، ابتدا با توجه به مقدار شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI) لایه‌های مستعد شناسایی شدند. سپس چهار معیار شاخص شکاف‌پذیری کل، محدودسازی شکاف، شاخص شکاف-های طبیعی و ضخامت لایه در این لایه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت (مطابق با شکل ۴-۳). ضرایب وزنی این معیارها با توجه به نظر کارشناسان به ترتیب برابر با ۰/۵۷۱، ۰/۲۵۳، ۰/۱۳۲ و ۰/۰۴۴ در نظر گرفته شد که میزان اهمیت این معیارها را نشان می‌دهد. همچنین ضرایب وزنی چگالی شکاف‌های طبیعی و برهم‌کنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف طبیعی به ترتیب برابر با ۰/۸۳۳ و ۰/۱۶۷ به دست آمد. یعنی از نظر کارشناسان اهمیت چگالی شکاف‌های طبیعی بسیار بیشتر از برهم‌کنش بین شکاف طبیعی و شکاف هیدرولیکی است. در شکل‌های ۴-۱۶ تا ۴-۱۹ نتایج محاسبه شاخص شکاف‌پذیری کل و هم‌چنین واحدبندی ژئومکانیکی مخزن نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶ شاخص شکاف پذیری و واحد بندی ژئومکانیکی در چاه ۳۶۸، سازند سروک، زون های D و E1



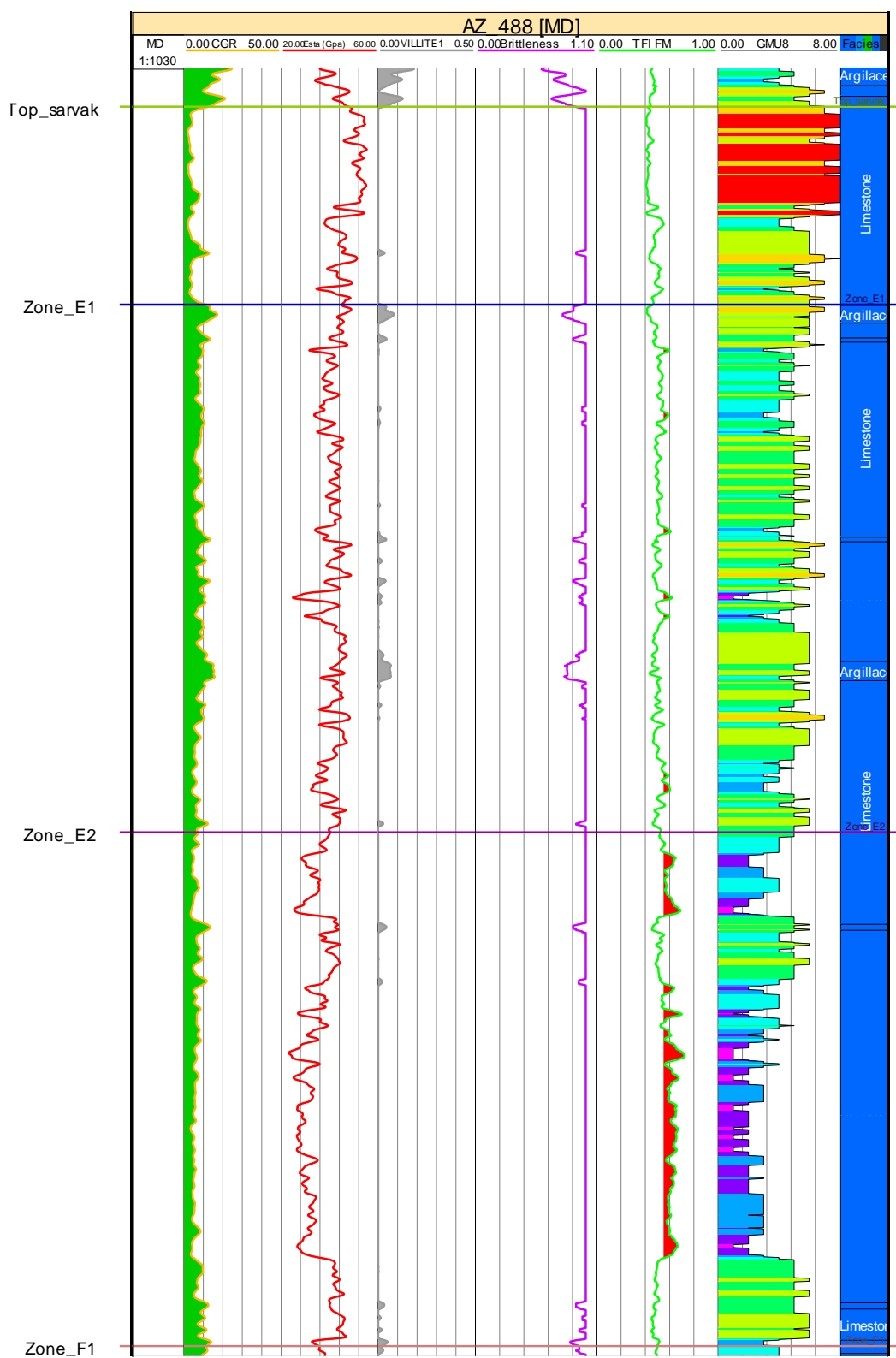


کاندید ۴

شکل ۴- ۱۷ شاخص شکاف پذیری و واحد بندی ژئومکانیکی در چاه ۳۶۸، سازند سروک، زون های F و G و H







شکل ۴-۱۹ شاخص شکاف پذیری و واحد بندی ژئومکانیکی در چاه ۴۸۸، سازند سروک، زون های D و E

ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی لایه‌های کاندید در سازند سروک در جدول ۴-۷ نشان داده شده است. جدول ۴-۸ نیز نحوه ارزیابی کیفی معیارها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود چنانچه شکاف طبیعی در لایه موجود باشد و جهت‌گیری آن نامناسب باشد، وضعیت چگالی شکاف ضعیف در نظر گرفته می‌شود. دلیل این است که در این حالت وجود شکاف طبیعی بیشتر باعث انحراف بیشتر شکاف می‌شود.

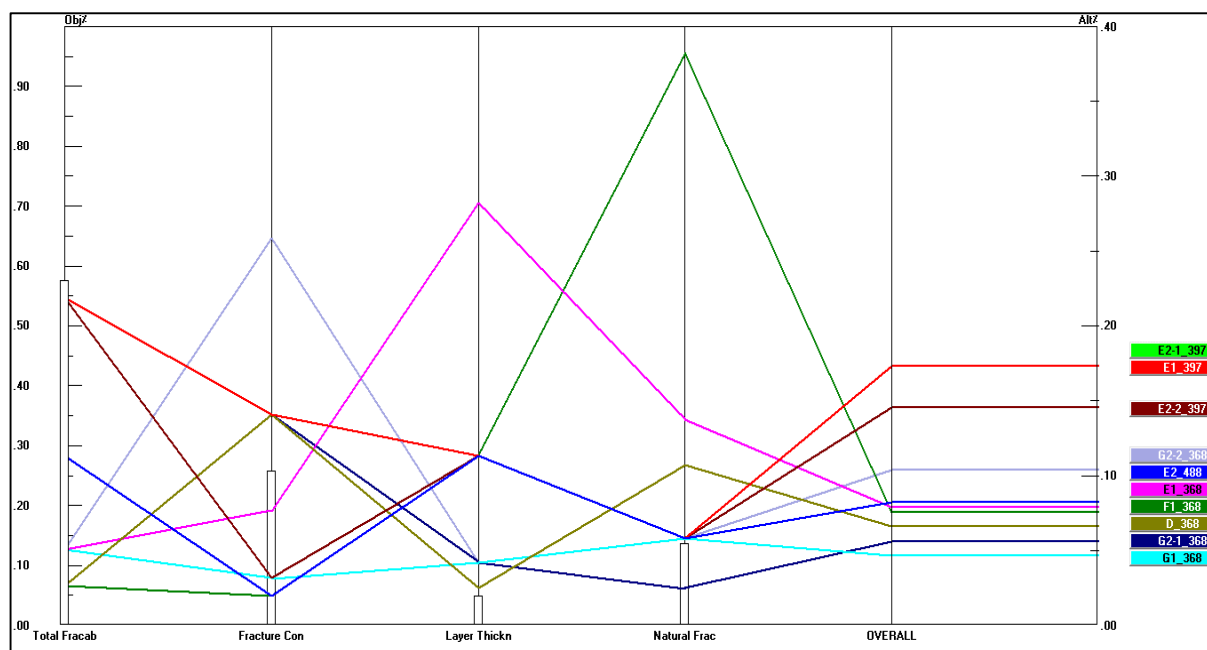
در شکل ۴-۲۰ نیز تحلیل حساسیت عملکرد در لایه‌ها نسبت به معیارها نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول و نیز در شکل ۴-۲۰ ملاحظه می‌شود، در سازند سروک لایه‌های E2-1 و E1 در چاه ۳۹۷ از نظر تمام معیارها نتایج بسیار نزدیکی دارند، با این وجود به دلیل بیشتر بودن ضخامت لایه E2-1 این لایه در رتبه اول قرار گرفته است.

جدول ۴-۷ ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی لایه‌های کاندید در سازند سروک

رتبه کاندید	چاه	زون	بازه عمق	وضعیت TFI	وضعیت محدودسازی	وضعیت شکاف‌های طبیعی		وضعیت ضخامت	امتیاز
						چگالی	برهم-کنش		
۱	۳۹۷	E2-1	3659-3683	خیلی خوب	خیلی خوب	متوسط	متوسط	خوب	0.173
۲	۳۹۷	E1	3589-3608	خیلی خوب	خیلی خوب	متوسط	متوسط	خوب	0.173
۳	۳۹۷	E2-2	3700-3723	خیلی خوب	متوسط	متوسط	متوسط	خوب	0.146
۴	۳۶۸	G2-2	3824-3837	متوسط	عالی	متوسط	متوسط	متوسط	0.104
۵	۴۸۸	E2	3730-3750	خوب	ضعیف	متوسط	متوسط	خوب	0.082
۶	۳۶۸	E1	3410-3445	متوسط	خوب	خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	0.079
۷	۳۶۸	F1	3600-3620	ضعیف	ضعیف	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	0.075
۸	۳۶۸	D	3380-3390	ضعیف	خیلی خوب	خوب	خوب	ضعیف	0.066
۹	۳۶۸	G2-1	3792-3806	ضعیف	خیلی خوب	متوسط	متوسط	متوسط	0.056
۱۰	۳۶۸	G1	3733-3748	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	0.046

جدول ۴-۸ نحوه ارزیابی کیفی معیارهای اصلی در انتخاب کاندید در سازند سروک

شاخص	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
شکاف پذیری کل (TFI)	$TFI < 0.55$	$0.55 < TFI < 0.6$	$0.6 < TFI < 0.65$	$0.65 < TFI < 0.7$	$TFI > 0.7$
ضخامت لایه (متر)	$T < 10$	$10 < T < 15$	$15 < T < 20$	$20 < T < 30$	$T > 30$
محدودسازی شکاف	$\Delta GMU < 1$	$1 < \Delta GMU < 1.5$	$1.5 < \Delta GMU < 2$	$2 < \Delta GMU < 3$	$\Delta GMU > 3$
چگالی شکاف	جهت گیری نامناسب شکاف	عدم وجود شکاف	$0 < FD < 0.2$	$0.2 < FD < 0.4$	$FD > 0.4$



شکل ۴-۲۰ تحلیل حساسیت لایه ها نسبت به معیارها در سازند سروک

#### ۴-۵ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا توضیحاتی در رابطه با اهمیت انتخاب کاندید در عملیات شکاف هیدرولیکی ارائه شد. سپس به بررسی پیشینه مطالعات در زمینه انتخاب کاندید در دنیا و در میادین کشور پرداخته شد. در ادامه توضیحاتی در مورد شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی ارائه شد. در سال‌های اخیر از این شاخص‌ها برای انتخاب لایه کاندید در سازندهای شیلی و ماسه‌سنگی استفاده شده است. شکاف‌پذیری نشان می‌دهد شکاف‌زنی هیدرولیکی در یک مخزن تا چه حد می‌تواند مؤثر باشد. در مورد یک مخزن خاص ابتدا باید بر اساس پیشینه زمین‌شناسی و ژئومکانیکی آن، شناختی از مکانیزم شکست در حین فرآیند شکاف‌زنی پیدا کرد و سپس مؤثرترین شاخص‌ها و پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی که بر نتایج عملیات شکاف‌زنی اثر می‌گذارند را شناسایی کرده و در نهایت یک روش ارزیابی شکاف‌پذیری که برای آن نوع از مخزن مناسب است را به کار گرفت.

در ادامه با بررسی پارامترهای اثرگذار بر نتایج عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی و داده‌های موجود، شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI) برای ارزیابی شکاف‌پذیری در مخزن بنگستان ارائه شده است که تابعی از تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی، مدول یانگ، شکنندگی و زاویه اصطکاک داخلی است و می‌توان از آن در سایر مخازن کربناته ایران نیز استفاده کرد.

چهار معیار اصلی شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI)، محدودسازی شکاف، شاخص شکاف‌های طبیعی و ضخامت لایه به عنوان معیارهای اصلی برای انتخاب لایه‌های کاندید در نظر گرفته شدند. شاخص شکاف‌های طبیعی، چگالی شکاف‌های طبیعی و همچنین جهت‌گیری آن‌ها نسبت به جهت تنش افقی حداکثر را در نظر می‌گیرد. در نهایت معیارهای اصلی با استفاده از روش AHP مورد ارزیابی قرار گرفت و لایه‌ها و چاه‌های کاندید برای انجام شکاف‌زنی هیدرولیکی انتخاب شدند. در سازند ایلام به دلیل این که نگار تصویری موجود نبود، شاخص شکاف‌های طبیعی به عنوان معیار در نظر گرفته نشد و سه معیار دیگر مورد ارزیابی قرار گرفتند.

همان‌طور که ملاحظه شد نتایج نهایی نشان می‌دهد که در سازند ایلام به ترتیب لایه C1 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۳۵۶ تا ۳۴۰۳ متری)، لایه C1 در چاه ۳۶۸ (از عمق ۳۲۰۰ تا ۳۲۳۷ متری) و لایه C2 (از عمق ۳۴۳۲ تا ۳۴۵۰ متری) در چاه ۳۹۷ و در سازند سروک به ترتیب لایه‌های E2 (از عمق ۳۶۵۹ تا ۳۶۸۳ متری) و E1 (از عمق ۳۵۸۹ تا ۳۶۰۸ متری) در چاه ۳۹۷ مناسب‌ترین کاندیدها برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی است.

## فصل پنجم

### جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها

## ۵-۱ جمع‌بندی مطالب پایان‌نامه

- اصطلاح شکاف هیدرولیکی بیانگر فرآیند شروع و گسترش شکستگی در سنگ، ناشی از فشار هیدرولیکی اعمال شده توسط سیال است. انرژی مخازن متعارف هیدروکربوری دیر یا زود به اتمام می‌رسد و این درحالی است که تنها در حدود ۳۰ درصد نفت آن‌ها در مرحله اولیه برداشت می‌شود.
- شکاف هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های تحریک چاه و افزایش تولید نفت و گاز در مخازن با تراوایی کم است. این روش می‌تواند برای بهبود سطح تولید چاه‌ها به وسیله غلبه بر مشکلات حفاری و صدمات ناشی از بهره‌برداری در حوالی محور چاه به کار رود و نیز می‌تواند برای ایجاد شکاف‌هایی با قابلیت انتقال بالای که در اعماق لایه نفوذ کرده‌اند در مخازن با تراوایی کم استفاده شود.
- اثربخشی عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی تابعی از سه فاکتور مهم انتخاب چاه و لایه کاندید، طراحی فرآیند و انجام عملیات میدانی است. در این میان انتخاب چاه و لایه کاندید از اهمیت خاصی برخوردار است. تحقیقات نشان داده که اگر انتخاب چاه و لایه کاندید به خوبی انجام شود، افزایش تولید، مخصوصاً در چاه‌هایی که ضریب پوسته بالا و تراوایی کمی دارند می‌تواند چشم‌گیر باشد.
- میدان اهواز یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی کشور است. مخازن اصلی این میدان شامل مخزن آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی هستند که مخزن بنگستان در عمق حدود ۳۰۰۰ متری واقع شده است. این مخزن شامل دو سازند ایلام و سروک است. در این تحقیق هدف مطالعه ژئومکانیکی مخزن بنگستان در ۳ چاه این میدان بوده تا چاه و لایه کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی انتخاب شود.
- قدم اول برای هرگونه مطالعه ژئومکانیکی ساخت مدل ژئومکانیکی است. مدل ژئومکانیکی یک نمایش عددی از وضعیت تنش‌های برجا و خواص مکانیکی برای یک ستون چینه‌شناسی در یک میدان است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌سازی ژئومکانیکی استفاده از آن در طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی و انتخاب چاه و لایه کاندید برای این عملیات است.
- سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات ژئومکانیک محسوب می‌شود که متأسفانه به دلیل هزینه بالا، در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نشده است. به همین دلیل روش‌های متعددی برای برآورد این پارامتر از سایر نگارهای پتروفیزیکی ارائه شده است.

- در این تحقیق از روش رگرسیون چندگانه برای تخمین موج برشی استفاده شده است. روش کار بدین صورت بوده که ابتدا در چاه‌های دارای نگار موج برشی یک خوشه بندی سه بعدی با استفاده از نگاشت خودسازمان‌ده (SOM) بر حسب پارامترهای زمان گذر موج فشاری (DTC)، تخلخل نوترونی (NPHI) و چگالی (RHOB) انجام شده است. سپس سعی شده است تا الگوهای موجود بین این پارامترها شناسایی و تفکیک شوند. در ادامه برای هرکدام از این الگوها یک رابطه رگرسیونی بین موج برشی و سه پارامتر مذکور به دست آمده است. ضرایب این روابط با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) به طور بهینه تعیین شده‌اند.
- اولین گام برای انتخاب چاه و لایه کاندید تعیین فاکتورهای اثرگذار بر شکاف هیدرولیکی و مشخص کردن معیارهای مناسب برای انتخاب کاندید با توجه به شرایط مخزن است.
- در مورد سنگ‌های کربناته دو خطر خاص وجود دارد؛ خطر اول ایجاد شکاف چندگانه به دلیل ناهمگنی طبیعی و وجود درزه و شکاف‌های طبیعی موجود در این سنگ‌هاست و دیگری احتمال وقوع پدیده انسداد شکاف به دلیل مدول یانگ بالای سازند است. به نظر می‌رسد که در مورد سنگ‌های کربناته ایران، زون‌هایی که پتانسیل کافی برای تولید دارند و دور از سطح تماس آب- نفت هستند گزینه‌های مناسبی باشند. همچنین به منظور جلوگیری از توسعه شکاف چندگانه، ضخامت زون باید به خوبی انتخاب شود. علاوه بر این محدودسازی شکاف که در اثر اختلاف تنش بین زون هدف و زون‌های بالایی و پایینی ایجاد می‌شود نیز باید در نظر گرفته شود.
- در این تحقیق با بررسی مطالعات قبلی انجام شده (به خصوص مطالعات صورت گرفته در کشور) و همچنین با توجه به شکاف‌دار بودن مخزن کربناته مورد مطالعه، در نهایت تنش افقی حداقل، مدول یانگ، اختلاف تنش‌های افقی در زون هدف، زاویه اصطکاک داخلی، محدودسازی شکاف، چگالی و جهت‌گیری درزه و شکاف‌های طبیعی سنگ و ضخامت زون به عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین معیارها در انتخاب لایه‌های کاندید در نظر گرفته شدند.
- در سال‌های اخیر برای انتخاب لایه‌ها و چاه‌های مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی از دو شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی استفاده می‌شود. شکاف‌پذیری نشان می‌دهد شکاف‌زنی هیدرولیکی در یک مخزن تا چه حد می‌تواند مؤثر باشد. در مورد یک مخزن خاص ابتدا باید بر اساس پیشینه زمین‌شناسی و ژئومکانیکی آن، شناختی از مکانیزم شکست در حین فرآیند شکاف‌زنی پیدا کرد و سپس مؤثرترین شاخص‌ها و پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی که

بر نتایج عملیات شکاف‌زنی اثر می‌گذارند را شناسایی کرده و در نهایت یک روش ارزیابی شکاف‌پذیری که برای آن نوع از مخزن مناسب است را به کار گرفت.

- در این تحقیق با بررسی پارامترهای اثرگذار بر نتایج عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی و داده‌های موجود، شاخصی برای ارزیابی شکاف‌پذیری در مخزن بنگستان در میدان اهواز ارائه شده است. این شاخص که شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI) نامیده شده تابعی از تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی، مدول یانگ، شکنندگی و زاویه اصطکاک داخلی است و می‌توان از آن در سایر مخازن کربناته ایران نیز استفاده کرد.
- در نهایت چهار معیار اصلی شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI)، محدودسازی شکاف، شاخص شکاف‌های طبیعی و ضخامت لایه به عنوان معیارهای اصلی برای انتخاب لایه‌های کاندید در نظر گرفته شدند. شاخص شکاف‌های طبیعی، چگالی شکاف‌های طبیعی و همچنین جهت‌گیری آن‌ها نسبت به جهت تنش افقی حداکثر را در نظر می‌گیرد.
- در نهایت معیارهای اصلی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در سازندهای ایلام و سروک مورد ارزیابی قرار گرفت و لایه‌ها و چاه‌های کاندید برای انجام عملیات شکاف‌زنی هیدرولیکی انتخاب شدند. در سازند ایلام به دلیل این که نگار تصویری موجود نبود، شاخص شکاف‌های طبیعی به عنوان معیار در نظر گرفته نشد و سه معیار دیگر مورد ارزیابی قرار گرفتند.
- نتایج نهایی نشان داد که در سازند ایلام به ترتیب لایه C1 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۳۵۶ تا ۳۴۰۳ متری)، لایه C1 در چاه ۳۶۸ (از عمق ۳۲۰۰ تا ۳۲۳۷ متری) و لایه C2 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۴۳۲ تا ۳۴۵۰ متری) بهترین کاندیدها هستند. در سازند سروک نیز به ترتیب لایه‌های E2 (از عمق ۳۶۵۹ تا ۳۶۸۳ متری) و E1 (از عمق ۳۵۸۹ تا ۳۶۰۸ متری) در چاه ۳۹۷ مناسب‌ترین کاندیدها برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی است.



## ۵-۲ پیشنهادها

- در این تحقیق شاخصی با عنوان شاخص شکاف پذیری (FI) برای مخزن بنگستان میدان اهواز ارائه شد. این رابطه می‌تواند به صورت‌های دیگری نیز بیان گردد و یا ضرایب متفاوتی داشته باشد. همچنین پارامترهای دیگری مانند چقرمگی شکاف نیز می‌تواند در این رابطه وارد شود تا عملکرد بهتری در تشخیص لایه‌های کاندید داشته باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه صورت گیرد.
- وجود درز و شکاف‌های طبیعی در مخازن کربناته ایران یکی از چالش‌های اصلی در انجام عملیات شکاف هیدرولیکی است که می‌تواند نتایج عملیات را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین توصیه می‌شود مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای برای بررسی اثر درز و شکاف‌های طبیعی بر روی نحوه انتشار شکاف هیدرولیکی انجام شود.
- در مراحل برداشت داده‌های لازم جهت ساخت مدل ژئومکانیکی، هزینه و زمان زیادی صرف می‌شود. قابلیت‌های مدل ژئومکانیکی و کاربرد آن، باعث جلوگیری از بروز مشکلات در برنامه‌های آینده میدان شده و در بلند مدت سود سرشاری را به ارمغان می‌آورد. لذا به عنوان یک پیشنهاد، نیاز است تا سرمایه‌گذاری‌های لازم در این بخش صورت گیرد.
- عدم قطعیت موجود در ورودی‌های اولیه مدل ژئومکانیکی، تکیه مستقیم بر نتایج به دست آمده از روابط تجربی و عدم دسترسی به مغزه‌های حفاری جهت اعتبارسنجی محاسبات انجام شده می‌تواند بر ابهامات موجود در نتایج به دست آمده بیفزاید. لذا توصیه می‌شود آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه‌های حفاری در هر سازند انجام شود و نتایج به دست آمده از هر مرحله در صورت امکان با نتایج مطالعات آزمایشگاهی مقایسه و کالیبره گردند.
- آزمون‌های برجا مانند آزمون نشت یا نشت گسترده نقش مهمی در کالیبره کردن مدل و افزایش دقت در محاسبه تنش‌ها دارد.
- با توجه به اهمیت سرعت موج برشی در فرآیند ساخت مدل ژئومکانیکی، تهیه این نگار به طور مجزا برای هر چاه توصیه می‌شود.
- در این مطالعه برای تخمین موج برشی از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد که دقت خوبی نیز داشت. با این وجود توصیه می‌شود که برای افزایش هرچه بیشتر دقت تخمین این پارامتر از روش‌های هوشمند مانند روش نرو-فازی استفاده شود.

- در این مطالعه از معیارهای شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب استفاده شد. معیار موهر کلمب به دلیل در نظر گرفتن اثر تنش میانی اصلی کارآیی خوبی نشان نداد. بنابراین توصیه می‌شود که از معیار شکست موگی-کلمب استفاده شود. همچنین می‌توان معیارهای دیگری همچون معیار دراگر-پراگر و معیار اصلاح شده لید را نیز به کار گرفت.
- توصیه می‌شود از روش‌های دیگر تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP فازی، Saw، Topsis، ANP و Vikor نیز برای انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی استفاده شود.

## مراجع

- Afsari M., Ghafoori M.R., Roostaeian M., Haghshenas A., Ataei A. and Masoudi R. (2009) "Mechanical Earth Model (MEM): An Effective Tool for Borehole Stability Analysis and Managed Pressure Drilling (Case Study)." Pp. 1–12 in SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Aghighi M.A., Rahman M.M. and Ravoof S.A. (2010) "Effect of Natural Fracture on Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Geothermal Reservoirs" Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29.
- Al-Ajmi A. and Zimmerman R. (2006a) "A New 3D Stability Model for the Design of Non-Vertical Wellbores" the 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.
- Al-Ajmi A. and Zimmerman R. (2006b) "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43., 1200–1211.
- Al-Ajmi, A. (2006) "Wellbore Stability Analysis Based on a New True-Triaxial Failure Criterion." KTH.
- Albayrak E. and Erensal Y. C. (2004) "Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: an application of multiple criteria decision making problem". Journal of Intelligent Manufacturing, 15(4), 491-503.
- Alipour M. and Bohluli B. (2010) "Geomechanic in petroleum Engineering. Application: Application, Hydraulic fracturing and Geomechanical Modeling. NIOC Journal of Exploration & Production. 86, 27-29.
- Alkaabi A. (2003) "Stimulate the flow" Schulmberger Middle East & Asia Reservoir Review.
- Amadei B. and Stephansson O. (1997) "Rock Stress and Its Measurement" Springer.
- Amani A. and Khalili S. (2013) "Prediction of rock strength using drilling data and sonic logs" International Journal of Computer Application, 5-10.
- API (2009) "Hydraulic Fracturing operation well construction and integrity guidelines" API guidance document hf1 first edition.
- Archer S. and Rasouli, V. (2012) "A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin" 1<sup>st</sup> International Conference on Petroleum and Mineral Resources, Kurdistan, Iraq: University of Koya.
- Badri M. A. (2001) "A combined AHP-GP model for quality control system" International Journal of Production Economics, 72(1), 27-40.

- Bai M. (2016) "Why are Brittleness and Fracability not Equivalent in Designing Hydraulic Fracturing in Tight Shale Gas Reservoirs", doi: 10.1016/j.petlm.2016.01.001.
- Blanton T.L. (1986) "Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs" Society of Petroleum Engineers. SPE 15261. doi:10.2118/15261-MS.
- Brocher T.M. (2005) "Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust" Bulletin of the Seismological Society of America 95 (6), 2081–2092.
- Castagna J.P., Batzle M.L. and Kan T.K. (1993) "Rockphysics—the link between rock properties and AVO response". Castagna, J. P., Backus, M.M. (Eds.), Offset- Dependent Reflectivity theory and Practice of AVO Analysis.
- Chandong C., Zoback M.D. and Khaksar A. (2006) "Empirical Relations between Rock Strength and Physical Properties in Sedimentary Rocks" Journal of Petroleum Science and Engineering, 223-237.
- Chardac O., Murray D., Carnegie A. and Marsden J. (2005) "a Proposed Data Acquisition Program for Successful Geomechanics Projects" SPE 93182.
- Cipolla C.L. and Wrigth C.A. (2002) "Diagnostic techniques to understand hydraulic fracturing: what? Why? and How?", Paper SPE 75359, *SPE Production & Facilities*, Vol.17, N1, pp. 23-35.
- Dagdeviren M. (2008) "Decision Making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE" Journal of Intelligent Manufacturing., 19(4), 397-406.
- Due J. (2008) "Joint inversion of downhole tiltmeter and microseismic data and its application to hydraulic fracture mapping in tight gas sand formation". Presented at the 42th US rock mechanics symposium, held in San Francisco, June 29 to July 2, 2008, ARMA 08-344.
- Economides M.J. and Martin T. (2007) "Modern Fracturing". Enhancement Natural Gas Production, Energy Tribune Publishing.
- Eskandari H., Rezaee M., Javaherian A. and Mohammadnia M. (2003) "Shear Wave Velocity Estimation Utilizing Wireline Logs for a Carbonate Reservoir, South-West Iran." Iranian International Journal of Science. 4(2):209–21.
- Eskandari H., Rezaee M.R. and Mohammadnia M. (2004) "Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from well log data for a carbonate reservoir", south-west Iran. CSEG RECORDER, pp. 42–48.
- Fang C. and Amro M. (2014) "Influence Factors of Fracability in Nonmarine Shale" SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, 2014-02-27, 2014. Society of Petroleum Engineers.

Fjaer E., Holt R.M., Hordurt P., Raeen A.M. and Risnes R. (2008) "Petroleum Related Rock Mechanics. Elsevier.

Figueira J., Greco S. and Ehrgott M. (Eds). (2005) "Multiple Criteria decision analysis: state of the art surveys" (Vol. 78). Springer.

Fu H., Wang X., Zhang L., Gao R. and Li Z. (2015) "Geological controls on artificial fracture networks in continental shale and its fracability evaluation: A case study in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China" <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.034>.

Gang LI., Lorwongam A., Rogiers J.C. (2009) "Critical review of leak-off test as a practice for the determination of in-situ stresses". Presented at the 43th US rock mechanics symposium, held in Ashville, North Carolina June 28 to July 1, ARMA 09-3.

Guo J.C., Luo B., Zhu H.A. and Wang Y.H. (2015) "Evaluation of fracability and screening of perforation interval for tight sandstone gas reservoir in western Sichuan Basin" *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 25., 77-87.

Guo J.C., Luo B., Zhao X. and Zhu H.A. (2015a). "Numerical simulation of interaction of hydraulic fracture and natural fracture based on the cohesive zone finite element method" *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 25. 180-188.

Guoyness J., Squire K., Blauch M., Yeager V., Yater J., Wallace R., Frame R. and Clark, R. (2000) "Optimizing Deliverability in Five Gas-Storage Reservoirs- Case Studies" Paper SPE 65636, presented at the SPE Eastern Regional Meeting. 17-19 October. Morganton, West Virginia, USA.

Hareland G. and Rampersad P.R (1994) "Hydraulic Fracturing Design Optimization in low Permability Reservoir". Presented at the II latin America/carribean petroleum engineering conference held in buenos aires, Argentina, 27 to 29 April. SPE 27033.

Hashemi A., Shadizadeh S. R. and Ziveidavianpoor M. (2012) "A Local Computerized Multi-screening of Vas Amount of Data to select Hydraulic Fracturing Candidates in Iranian Carbonate Oil Fields", *International Journal of Computer Application.*, 39(8), 37-45.

Hassan R., Cohanin B. and Weck O. (2004) "A Comparison of Particle Swarm Optimization and the Genetic Algorithm" Vanderplaats Research and Development, Inc., Colorado Springs, CO, 80906.

Heydarabadi F.R., Moghadasi J. and Ashena, R. (2010). "Criteria for Selecting a Candidate Well for Hydraulic Fracturing", the 34th Annual SPE International Conference and Exhibition Held in Tinapa, Calabar, Nigeria, 31 July to 7 August 2010, Paper SPE 136988.

Holditch S.A., Robinson B.M. and Whitehead W.S (1987) "Prefracture and postfracture formation evaluation necessary to characterize the three dimensional shape of the hydraulic fracture". SPE FORMATION EVALUATION, DECEMBER 1987. Onepetro.org.

Howard G.C. and Fast C. R (1970) “Hydraulic Fracturing”, Monograph Volume 2, Society of Petroleum Engineers of AIME, New York.

Hsiao C. and Tsay F. (1990) “Evaluation of Fracture Parameters Using Pump-in/Flow-back Test” International technical meeting jointly hosted by Petroleum Society of CIM and Society of Petroleum Engineers (SPE), held between June 10 to June 13. Onepetro.org.

Hudson J. (2003), “Engineering Rock Mechanics. University of London.

Hubbert M.K. and Willis D.G. (1957) “Mechanics of hydraulic fracturing. Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME. V.210, (Published in revised form 1972).

Jarvie D.M., Hill R.J., Ruble T.E, and Pollastro R.M. (2007).” Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment” AAPG Bulletin 91 (4), 475-499.

Jin X., Shah S.N., Rogiers J.C. and Zhang Bo. (2014) “Fracability evaluation in shale reservoirs – an integrated petrophysics and geomechanics approach” SPE 168589, SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Woodlands, TX, USA.

Jones J.R and Britt L. (2009), “Design and appraisal of hydraulic fractures” 1<sup>st</sup> edition. Texas: SPE . ISBN: 978-1-55563-143-7.

Kennedy R., Gupta R., Kotov S.V., Burton W.A., Knecht W.N., Ahmed O. (2012) “Optimized shale resource development: Proper placement of wells and hydraulic fracture stages”. Prepared for presentation at the Abu Dhabi international petroleum conference and exhibition held in Abu Dhabi, UAE, 11 to 14 November . SPE 162534. Onepetro.org.

Kennedy J., Eberhart R.C. (1995) “Particle swarm optimization”, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, vol. 4, pp. 1942–1948.

Kohonen T. (2001) “Self-Organizing Maps”, Springer series in Information Sciences, New York, Springer-Verlag, Vol. 30, pp. 501.

Krusey R. (1988) “High-grading Fracture Candidate Selection” J.of. Canadian Petroleum Technology, 27(4), 6 pp.

Lal M. (1999) “Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength” SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Venezuela. SPE 54356.

Lee D., Birchwood R. and Barton T. (2004) “Leak-off test interpretation and modelling with application to geomechanics”. Presented at the gulf rocks 2004, the 6th North American rock mechanics symposium held in Houston, texas, june 5-9. ARMS/NARMS 04-547.

Martin A.N. and Economides M.J. (2010) “Best Practices for Candidate Selection, Design and Evaluation of Hydraulic Fracture Treatments”, SPE 135669, SPE Production and Operations Conference and Exhibition held in Tunis, 2010, Tunisia.

Middlebrook M.L., Aud W.W., Harkrider J.D. and Hanson J.T. (1997) “An evolving approach in the analysis of stress test pressure decline data” first presented at the 1995 SPE Rocky Mountain meeting/ low permeability reservoir symposium held in Denver, Colorado, 20 to 22 march. Onepetro.org.

Montgomery C.T. and Smith M.B. (2010). “Hydraulic Fracturing.” JPT.

Mullen M., Enderlin M. (2012) “Fracability Index-More than Rock Properties” SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2012-01-09, 2012. Society of Petroleum Engineers.

Nauroy J.F. (2011), “Geomechanics applied to the petroleum industry” Google book, IFP Energies nouvelles.

Plahn S.V., Nolte K.G., Thompson L.G. and Miska S (1997) “A Quantitative Investigation of the Fracture Pump-In/Flowback Test” SPE 30504, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas.

Pongratz R., Kuvshinov I.K., Latkin K.E. (2008) “Evolution of Hydraulic Fracturing in Russia”, SPE 114876, presented at Russian Oil & Gas Technical Conference and Exhibition held in Moscow, Russia.

Rahman M.M. and Rahman M.K. (2010) “A overview of hydraulic fracture models and development of improved pseudo-3D models for stimulating tight oil/gas sand.” Energy sources part A Recovery utilization and environmental effects, 1416-1436.

Rasouli V., Pallikathekathil Z.J. and Elike M. (2010) “Optimum Tell Trajectory Design in a Planed Well In Blacktip Field, Australia: a Case Study” APPEA Journal, 50th anniversary issue, 535.

Razi et al. (2010) “Building a Precise Mechanical Earth Model and its Application in Drilling Operation Optimization: A Case Study of Asmari Formation in Mansuri Oil Field”, SPE-32204.

Rezaee M.R., Kadkhodaie A. and Barabadi A. (2007) “Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia”, Journal of Petroleum Science and Engineering, 55, pp. 201–212.

Rickman R., Mullen M., Petre E., Grieser B. and Kundert D. (2008) “A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale”, SPE 115258, SPE ATCE, Denver, CO, USA, Sept. 21-24.

Schlumberger. (2003) “Using borehole imagery to reveal key reservoir features. In Reservoir Optimization Conference. Tehran, Iran.

Settari A. and Cleary M.P. (1982) “Three-Dimensional Simulation of Hydraulic Fracturing ” paper SPE 10504, presented at the SPE Symposium on Reservoir Simulation, New Orleans, Louisiana, USA.

- Shadizadeh S.R. Habibnia B.A. and Syllabee R. (2009) "Investigation and Selection of Suitable Layers in Bangestan Reservoir for Hydraulic Fracturing Operation", *Sceintia Iranica, Transactions C: Chemistry and Chemical Engineering*, 16 : 2, 149-160.
- Taleghani A. and Olson L.O. (2014). "How Natural Fractures Could Affect Hydralic-Fracture Geometry" SPE 167608. Oneperito.org.
- Valko P. and Economides M.J (1995), "hydraulic fracture Mechanics" 1<sup>st</sup> edition. London: John Wiley and Sons. ISBN: 0471956643.
- Van Eekelen, H.A.M (1982) "Hydraulic fracture geometry: fracture containment in layered formations". SPE journal, June 1982.
- Veatch, R.W. (1983) "Overview of current hydraulic fracturing design and treatment technology—Part 1." *Journal of petroleum technology*, 677-688.
- Veatch R. W., Moschovidis, Z. A. and Fast, C.R. (1989) "An Overview of Hydraulic Fracturing", *Recent Advances in Hydraulic Fracturing*, Eds. Gidley, J.L., Holditch, S.A., Nierode, D.E., and Veatch, R.W.Jnr. SPE Monograph 12, 1-38.
- Venter G., Haftka R.T. and Sobieszczanski-Sobieski J (2002) "Multidisciplinary Optimization of a Trasport Artificial Wing using Particle Swarm Optimization", Ninth AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization.
- Wang F.P. and Gale J.F. (2009). "Screening criteria for shale-gas system" *Gulf Coast Asso of Geological Soc. Transactions*, 59, 779-793.
- Warpinski, N.R. and Teufel, L.W. (1987) "Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation". *J. Petr. Tech.* 39 (2), 209–220.
- Wright C.A., Weijers L., Davis E.J. and Mayerhofer, M. (1998) "Understanding hydraulic fracture growth: tricky but not hopeless", Paper SPE 56724 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, October 3-6.
- Xiong H., Davidson B. and Holditch S.A (1996) "A comprehensive approach to select fracturing fluids and additives for fracture treatments". Presented at the 1996 SPE annual technical conference and exhibition, held in Denver, Colorado, USA, October 6 to 9. SPE 36603.onepetro.org.
- Yasar E., Erdogan Y. and Omran I. (2004) "Corelating Sound Velocity with the Density, Compressive Strength and Young's Modulus of Carbonate Rocks" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 871-875.
- Zangeneh N., Eberhardt E. and. Bustin R.M. (2014) "Investigation of the influence of natural fractures and in situ stress on hydraulic fracture propagation using a distinct-element approach" *Earth, Ocean & Atmospheric Sciences*, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.



Zhang J. (2011). "Pore Pressure Prediction from Well Logs: Methods, Modifications, and New Approaches." *Earth-Science Reviews* 108(1-2):50–63.

Zhang F., Zhang H., Yuan F. and Wang Z. (2015) "Geomechanical Mechanism of Hydraulic Fracturing and Fracability Evaluation of Natural Fractured Tight Sandstone Reservoir in Keshen Gasfield in Tarim Basin" SPE-177457-MS.

Zhou J., Chen M., Jin Y., Zhang G. (2008) "Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs" *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45 (7), 1143e1152.

Zoback M., Barton C.A., Brudy M., Castillo D.A. and Finkbeiner T.F. (2003) "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40 (2003) 1049–1076.

Zoback M.D., and Hamison B.C (1981) "Status of hydraulic fracturing method for in-situ stress measurements" Workshop on hydraulic fracturing stress measurements hosted by the University of Wisconsin, held at Monterey, California in december 1981. Onepetro.org.

Zoback M.D (2007) "Reservoir geomechanics". Paperback edition. New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-14619-7.

Zoveidavianpoor M., Samsuri A. and Shadizadeh, S.R. (2012) "Development of a fuzzy system model for candidate-well selection for hydraulic fracturing in carbonate reservoir." SPE oil and gas India conference and exhibition. Mumbai, India.

Zoveidavianpoor M., Samsuri A. and Shadizadeh S.R. (2011). "The Needs for Hydraulic Fracturing in Iranian Carbonate Oilfields: Acid or Propped Fracture? ", Presented in The First National Conference of Novel Technologies in Oil & Gas Industries, IAU.

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب (۱۳۹۳)، گزارش شماره پ-۷۹۹۱ "انجام آزمایش نشت و نشت گسترده در چاه ۴۸۸ میدان اهواز" اهواز، ایران.

توانایی ف، محمدیان ر، و مسعودی پ. (۱۳۹۴) "پهنه بندی میدان اهواز از دیدگاه زمین شناسی ساختمانی" اولین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، مرکز همایش های بین المللی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران.

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب؛ گزارش "مطالعه جامع مخزن آسماری میدان اهواز".

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب (۱۳۸۹)، گزارش "تفسیر نمودار تصویری UBI در چاه ۳۶۸".

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب (۱۳۸۶)، گزارش "تفسیر نمودار تصویری FMI در چاه 397".

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب (۱۳۹۲)، گزارش "تفسیر نمودار تصویری در چاه ۴۸۸".



## Abstract

Hydraulic fracturing Treatment (HFT) is a common stimulation technology which is being used to enhance hydrocarbon production and recovery factor consequently. Selecting a target well/ layer is considered the first stage for a successful HFT and is regarded as a critical decision in the whole process of the execution of HFT. Through candidate well/layer selection, identification and selection of suitable well/ layer will be done considering enough chance of higher production after stimulation job. However, generally no comprehensive method which is reliable for different situations and geological settings has been defined so far. In addition, for fracturing carbonate formations, the possibility of the existence of natural fractures and rock stiffness can be challenging. In this research three wells in the one of Iranian carbonate reservoir have been studied. Mechanical earth model (MEM) consist of elastic moduli, magnitude and direction of stresses, pore pressure profile has been made. Also in order to assess the validity of the MEM, a failure analysis was performed by using image logs. The MEM failure prediction was compared to actual events identified throughout the wells and accuracy of the model was confirmed.

For constructing of MEM, having shear velocity data is necessary. However, in practice the shear sonic is not included in the set of acquired logs for cost saving purposes. Hence, lots of methods have been developed to estimate these data using other available informations of reservoir. In this study, petrophysical properties affecting shear wave velocity was determined. Then by using multiple regression and considering compressive wave velocity, neutron porosity (NPHI) and density (RHOB) as independent variables, shear wave velocity was estimated. Moreover coefficients of regression was optimized by using particle swarm optimization (PSO) algorithm.

In this study, at first a new definition of fracability index, the Total Fracability Index (TFI), has been proposed. The TFI is a function of Young's modulus, mineralogical brittleness, internal friction angle, minimum horizontal stress, and horizontal stress contrast. Then according to previous researches and field experiences four main criteria consist of the TFI, Natural Fracture Index (NFI), layer thickness, and fracture containment capability considered for selecting candidate layers. At the end, by using these criteria and based on analytic hierarchy process (AHP) mathematical modelling, candidate layers in three wells in Bangestan reservoir of Ahwaz oilfield are selected. Results shows that layers C1 and C2 in Ilam formation and layers E1 and E2 in Sarvak formation are best candidates for hydraulic fracturing.

**Keywords:** Hydraulic Fracturing, Geomechanical Modeling, Candidate well/layer selection, Fracability Index



Shahrood University of Technology

Faculty of mining, petroleum and geophysics engineering

**MSc Thesis in petroleum engineering drilling and production**

**Geomechanical Evaluation for Selecting Candidate Wells for Hydraulic  
Fracturing Operation in Bangestan Formations**

By: Hamed Amiri

Supervisors:

Dr Ahmad Ramezanzadeh

September 2016