

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف

**شناسایی زون های مطلوب برای عملیات شکست هیدرولیکی و اولویت بندی**

**آنها با رویکرد انتگرال های فازی در تعدادی از چاه های جنوب غربی ایران**

**نگارنده: افتخار شعبانی کیا**

اساتید راهنما

**دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی**

**دکتر بهزاد تخم چی**

استاد مشاور

**دکتر احمد رمضان زاده**

خرداد ۱۳۹۶

شماره: ۲۶۹۶۱۹۳۵  
تاریخ: ۴/۲۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم افتخار شعبانی کیا با شماره دانشجویی ۹۳۳۳۵۸۴ رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف تحت عنوان شناسایی زون‌های مطلوب برای عملیات شکست هیدرولیکی و اولویت‌بندی آن‌ها با رویکرد انتگرال‌های فازی در تعدادی از چاه‌های جنوب غربی ایران که در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز ... ۱۸۰.۵۰ درجه بسیار خوب)  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر بهزاد تخم‌چی	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر احمد رمضان‌زاده	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سجاد نگهبان	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب‌امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۸/۲۷



تصريح: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیلی) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ:

پدرم بہ استواری کوه

بہ مادرم بہ زلالی چشمہ

بہ مسرم بہ صمیمیت باران

و بہ عزیزانم بہ طراوت شبنم...

## تقدیر و شکر

سپاس خدای عزوجل را که همواره بندگان را مورد لطف و عنایتش قرار داده است، خدایی که بار دیگر مرا تحت الطاف بیکرانش قرار داد تا بتوانم قدمی دیگر در مسیر اعتلا و پیشرفت تحصیل پیش بردارم. بی شک در ابتدا باید قدر دان پدر و مادر مهربانم باشم که یک بار دیگر با فراهم نمودن اسباب رفاه آسایش، در گذر از این مرحله زندگانی نیز یاریم نمودند و البته امیدوارم به روزی که تنها بتوانم گوشه‌ای بسیار کوچک از زحماتشان را جبران نمایم. در ادامه مراتب سپاس و قدردانی خویش را نشا استید راهبهای ارجمندم، آقایان دکتر ابوالقاسم کاکلار روحانی و دکتر بهزاد تخم‌چی نموده و از خداوند متعال سلامتی، موفقیت و بهروزی را برای ایشان خواستارم. همچنین بر خود لازم می‌دانم که از زحمات آقایان دکتر احمد رمضان زاده، مهندس حامد امیری و مهندس متین طیب زاده به خاطر هم‌فکری‌ها و راهنمایی‌هایی که داشته‌اند، تشکر کنم.

در خاتمه سپاس گزار کلیه دوستان و عزیزانی، هستم که مراد پایان رسانیدن این پایان نامه یاری نمودند، مطمئناً موفقیت و سلامتی ایشان آرزوی قلبی این حقیر خواهد بود.

## تعهد نامه

اینجانب افتخار شعبانی‌کیا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه شناسایی زون‌های مطلوب برای عملیات شکست هیدرولیکی و اولویت‌بندی آن‌ها با رویکرد انتگرال‌های فازی در تعدادی از چاه‌های جنوب‌غربی ایران تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر بهزاد تخم‌چی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه تاکنون 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده:

به دلیل محدود بودن منابع فسیلی و غیرقابل تجدید بودن آنها، تمهیداتی جهت بازیافت هر چه بیشتر نفت از مخازن در نظر گرفته می‌شود. ازدیاد برداشت و بهبود ضریب بازیافت از مخازن از طریق انگیزش چاه با استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی، یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تولید بهینه می‌باشد. کلید موفقیت عملیات شکست هیدرولیکی به‌طور شاخصی به انتخاب چاه و لایه کاندید بستگی دارد. به‌طور کلی هدف از انتخاب کاندید، انتخاب یک یا گروهی از چاه‌ها و یا زون‌ها برای عملیات است که بیشترین احتمال موفقیت را دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر انتخاب چاه و لایه کاندید به‌خوبی 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 اگر به‌طور هیدرولیکی شکاف‌زنی شوند قادرند به‌صورت اقتصادی تولید کنند.

در این پژوهش، به‌منظور انتخاب لایه‌های کاندید در چاه‌های ۴۸۸ و ۳۹۷ میدان نفتی اهواز در مخزن بنگستان، ابتدا به‌ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، نگارهای پتروفیزیکی (شامل نگار تخلخل، چگالی، صوتی و ...)، گزارش‌های حفاری، نگارهای تصویری و آزمایش‌های درون‌چاهی پرداخته شد. سپس بر اساس مطالعات صورت‌گرفته و با توجه به شرایط مخزن و داده‌های موجود در چاه‌ها، شش پارامتر ضخامت، تخلخل، اشباع آب، اختلاف تنش زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی، شاخص شکاف‌پذیری و شاخص شکاف‌پذیری کل به‌عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین معیارها در انتخاب لایه‌های کاندید در چاه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند؛ در گام بعد، بر اساس این معیارها به شناسایی و تحلیل لایه‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی پرداخته شد. در نهایت به‌منظور کاهش ریسک و عدم قطعیت در انتخاب و اولویت‌بندی مناسب‌ترین کاندید، از الگوریتم انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت استفاده گردید.

نتایج نهایی به دست آمده نشان داد که در سازند ایلام به ترتیب لایه‌های C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۳۵۴ تا ۳۴۰۳ متری)، C<sub>2</sub>-2 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۴۳۲ تا ۳۴۵۰ متری) و C<sub>1</sub>-1 در چاه ۴۸۸ (از عمق ۳۳۶۷ تا ۳۳۹۵ متری) و در سازند سروک به ترتیب لایه‌های E<sub>2</sub>-1 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۶۵۹ تا ۳۶۸۳ متری) و E<sub>1</sub> در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۵۸۹ تا ۳۶۰۸ متری) مناسب‌ترین کاندیدها جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشند.

**کلیدواژه:** شکست هیدرولیکی، مدل ژئومکانیکی، انتخاب لایه کاندید، شاخص شکاف‌پذیری،

انگزال‌های فازی، مخزن بنگستان.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

شعبانی کیا، ا.، کامکار روحانی، ا.، تخمچی، ب.، ۱۳۹۶، تخمین پارامترهای ژئومکانیکی موثر در عملیات شکاف هیدرولیکی و ارائه مدل ژئومکانیکی یک بعدی در مخزن بنگستان (مطالعه موردی در یکی از میادین جنوب غرب ایران)، چهارمین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه تهران، تهران.

## فهرست مطالب

فصل اول	۱
کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ مروری بر سابقه تحقیق	۳
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق	۶
۴-۱ روش انجام تحقیق	۷
۵-۱ ساختار پایان نامه	۷
فصل دوم	۹
مبانی شکست هیدرولیکی و عوامل مؤثر بر آن	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ سابقه شکست هیدرولیکی	۱۰
۳-۲ نحوه انجام عملیات شکست هیدرولیکی	۱۲
۴-۲ کاربردهای شکست هیدرولیکی	۱۳
۵-۲ مکانیسم شکست هیدرولیکی	۱۳
۱-۵-۲ شرایط برای شکست کششی	۱۵
۲-۵-۲ ایجاد شکاف و شکست سازند	۱۵
۳-۵-۲ جهت گیری، رشد و محدودسازی شکاف	۱۷

۱۹	..... ۶-۲ تعیین تنش برجا در شکست هیدرولیکی
۲۱	..... ۱-۶-۲ تست نشت استاندارد
۲۳	..... ۲-۶-۲ تست نشت گسترده
۲۶	..... ۷-۲ جمع‌بندی
۲۷	..... فصل سوم
۲۷	..... ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در تعدادی از چاه‌های میدان اهواز
۲۸	..... ۱-۳ مقدمه
۲۸	..... ۲-۳ میدان نفتی اهواز
۳۱	..... ۳-۳ موقعیت جغرافیایی چاه‌های مورد مطالعه
۳۳	..... ۴-۳ زون‌بندی مخزن بنگستان میدان اهواز
۳۸	..... ۵-۳ مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی
۴۰	..... ۶-۳ مدل ژئومکانیکی چاه‌ها در میدان نفتی مورد مطالعه
۴۰	..... ۱-۶-۳ پارامترهای الاستیک سنگ
۴۴	..... ۲-۶-۳ پارامترهای مقاومتی سنگ
۵۰	..... ۳-۶-۳ فشار منفذی
۵۲	..... ۴-۶-۳ وضعیت تنش‌های برجا
۵۶	..... ۵-۶-۳ تنش در مختصات استوانه‌ای
۵۸	..... ۶-۶-۳ معیار شکست

۶۵	..... تنش‌های برجا در چاه‌های مورد مطالعه
۷۲	..... پنجره ایمن گل حفاری
۷۵	..... جمع‌بندی
۷۷	..... فصل چهارم
۷۷	..... انتخاب چاه و لایه کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی
۷۸	..... ۱-۴ مقدمه
۷۹	..... ۲-۴ اهمیت انتخاب چاه و لایه کاندید
۸۰	..... ۳-۴ پیشینه مطالعات
۸۴	..... ۴-۴ معیارهای انتخاب لایه کاندید
۸۴	..... ۵-۴ انتخاب چاه و لایه کاندید در میدان نفتی اهواز
۸۵	..... ۱-۵-۴ شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی
۹۱	..... ۲-۵-۴ انتخاب و تحلیل لایه مناسب در سازند ایلام و سروک
۹۴	..... ۶-۴ روش انتگرال‌های فازی
۹۶	..... ۷-۴ اولویت‌بندی لایه‌های کاندید با رویکرد انتگرال‌های فازی
۹۹	..... ۸-۴ جمع‌بندی
۱۰۱	..... فصل پنجم
۱۰۱	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۲	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری

١٠٥..... ٢-٥ پیشنهادات

١٠٧..... منابع و مأخذ

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): شکاف عمودی در اطراف یک چاه قائم ..... ۱۴
- شکل (۲-۲): فشار در یک چاه قائم در حین عملیات شکاف هیدرولیکی ..... ۱۷
- شکل (۳-۲): جهت‌گیری‌های مختلف شکاف ..... ۱۸
- شکل (۴-۲): محدودسازی یک شکاف در بین لایه‌هایی با تنش بیشتر: ..... ۱۹
- شکل (۵-۲): نمودار حاصل از آزمایش نشت استاندارد ..... ۲۳
- شکل (۶-۲): نمودار استاندارد حاصله از ترسیم فشار و زمان یا حجم متناظر در آزمایش نشت گسترده ..... ۲۵
- شکل (۱-۳): موقعیت جغرافیایی میدان نفتی اهواز ..... ۲۹
- شکل (۲-۳): نقشه پهنه‌بندی میدان اهواز به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی ..... ۳۱
- شکل (۳-۳): موقعیت چاه ۴۸۸ در میدان اهواز ..... ۳۲
- شکل (۴-۳): موقعیت چاه ۳۹۷ در میدان اهواز ..... ۳۲
- شکل (۵-۳): عمق قرارگیری زون‌ها در دو سازند ایلام و سروک در چاه‌های ۳۹۷ و ۴۸۸ میدان مورد مطالعه ..... ۴۳
- شکل (۶-۳): نتیجه مدل‌سازی پارامترهای الاستیسیته استاتیک و دینامیک در چاه ۴۸۸ ..... ۴۳
- شکل (۷-۳): نتیجه مدل‌سازی پارامترهای الاستیسیته استاتیک و دینامیک در چاه ۳۹۷ ..... ۴۴
- شکل (۸-۳): ضریب اصطکاکی داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر- کلمب ..... ۴۷
- شکل (۹-۳): نتیجه مدل‌سازی پارامترهای مقاومتی در چاه ۴۸۸ ..... ۴۹
- شکل (۱۰-۳): نتیجه مدل‌سازی پارامترهای مقاومتی در چاه ۳۹۷ ..... ۵۰
- شکل (۱۱-۳): برون‌یابی چگالی تا سطح زمین ..... ۵۴
- شکل (۱۲-۳): تنش‌های اصلی اطراف یک چاه قائم تحت شرایط تنش دومحوره بر اساس معادلات کرش

- ۵۶.....
- شکل (۳-۱۳): تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای..... ۵۷
- شکل (۳-۱۴): تنش‌ها و شکستگی‌های اطراف چاه..... ۵۹
- شکل (۳-۱۵): شکست کششی و برشی و وزن ایمن گل حفاری..... ۶۰
- شکل (۳-۱۶): نتیجه مدل‌سازی تنش‌های برجا و فشار منفذی با نتایج حاصل از تست XLOT و RFT در چاه ۴۸۸..... ۶۶
- شکل (۳-۱۷): نمایش شکستگی‌های القایی در چاه ۴۸۸..... ۶۷
- شکل (۳-۱۸): شیب، آزمون شیب و امتداد شکستگی‌های القایی مشاهده شده در چاه ۴۸۸..... ۶۸
- شکل (۳-۱۹): نمایش شکستگی برشی در چاه ۳۹۷..... ۷۰
- شکل (۳-۲۰): نتیجه مدل‌سازی تنش‌های برجا و فشار منفذی با نتایج حاصل از معیارهای شکست و RFT در چاه ۳۹۷..... ۷۱
- شکل (۳-۲۱): امتداد شکستگی برشی رخداده در چاه ۳۹۷..... ۷۲
- شکل (۳-۲۲): نتایج پیش‌بینی پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از دو معیار شکست در چاه ۴۸۸..... ۷۴
- شکل (۳-۲۳): نتایج پیش‌بینی پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از دو معیار شکست در چاه ۳۹۷..... ۷۵
- شکل (۴-۱): مثلث موفقیت در عملیات شکست هیدرولیکی..... ۸۰
- شکل (۴-۲): نتیجه مدل‌سازی معیارهای انتخاب لایه کاندید در چاه ۴۸۸..... ۹۲
- شکل (۴-۳): نتیجه مدل‌سازی معیارهای انتخاب لایه کاندید در چاه ۳۹۷..... ۹۳

## فهرست جداول

- جدول (۱-۳): ویژگی‌های ساختاری- تولیدی بخش‌های اصلی میدان اهواز ..... ۳۰
- جدول (۲-۳): داده‌های لازم برای ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی ..... ۳۹
- جدول (۳-۳): روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی ..... ۴۲
- جدول (۴-۳): روابط تجربی جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره ..... ۴۵
- جدول (۵-۳): مقادیر عمق و فشار مبنا در سازند ایلام و سروک ..... ۵۱
- جدول (۶-۳): شرایط تکتونیکی مختلف با توجه به مقادیر تنش‌های اصلی ..... ۵۳
- جدول (۷-۳): حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موهر- کلمب ..... ۶۱
- جدول (۸-۳): حد بالا فشار گل با استفاده از معیار موهر- کلمب ..... ۶۲
- جدول (۹-۳): حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موگی- کلمب ..... ۶۴
- جدول (۱۰-۳): حد بالا فشار گل با استفاده از معیار موگی- کلمب ..... ۶۴
- جدول (۱-۴): زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۴۸۸ ..... ۹۳
- جدول (۲-۴): زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۳۹۷ ..... ۹۴
- جدول (۳-۴): ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ سازند ایلام ..... ۹۸
- جدول (۴-۴): ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ سازند سروک ..... ۹۸



فصل اول

کلیات

امروزه با رشد روزافزون جمعیت و گسترش صنعت در کشور، نیاز به استحصال از منابع نفت و گاز بیش از پیش ملموس گردیده است. با نگاهی سطحی به وضعیت فعلی منابع هیدروکربوری و مقایسه آن با گذشته مشخص می‌گردد که تولید و استخراج از ذخایر ارزان و در دسترس رو به افول بوده و برای تأمین نیازهای کشور در آینده‌ای نه‌چندان دور، استفاده از ذخایر پرهزینه‌تر گریزناپذیرتر خواهد بود. تولید نفت با گذشت زمان، به دلیل کاهش فشار مخزن و بسته شدن ترک‌ها و منافذ میکروسکوپی موجود در سنگ مخزن، کاهش می‌یابد. طی سالیان بسیار، تیم‌های مهندسی مخزن به دنبال راه‌هایی برای جلوگیری از بستن چاه‌های نفت و گاز در سال‌های اولیه تولید که حاصل آسیب سازند و تراوایی طبیعی کم در مخازن کربناته است، بوده‌اند. این مسدودسازی چاه‌ها باعث از دست دادن درآمد هنگفتی ناشی از هیدروکربن‌های بازمانده شده‌اند. 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 تراوایی طبیعی سازند و یا در بسیاری از موارد بهبود هر دو همراه باشد (Alkaabi, 2003).

شکست هیدرولیکی<sup>۱</sup> از جمله تجاری 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 شکست 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.

---

<sup>1</sup> Hydraulic fracturing

## ۲-۱ مروری بر سابقه تحقیق

روش شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۴۷، اولین بار توسط شرکت هالیبرتون<sup>۱</sup> در ایالت کانزاس آمریکا انجام شد. شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ به صورت خیلی ساده انجام گردید و در طول زمان، پیشرفت‌های بسیار زیادی در آن صورت گرفته است. اگرچه مواردی از افزایش تولید در نتیجه شکست هیدرولیکی تا قبل از ۱۹۶۷ گزارش گردیده، مطالعه پیشرفته روی شروع و گسترش شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۶۷ توسط همیسون<sup>۲</sup> و فیرهوست<sup>۳</sup> انجام شده است. سرعت پیشرفت استفاده از این روش به حدی بوده است که تا سال ۱۹۸۱ به بیش از هشتصد هزار مورد، و تا سال ۱۹۸۸ به بیش از یک میلیون مورد اجرای عملیات رسیده است (Adachi et al., 2007). تا سال ۲۰۱۰ بیش از ۲/۵ میلیون مورد شکست هیدرولیکی (بیش از یک میلیون مورد در ایالت متحده آمریکا) انجام شده و در حال حاضر استفاده از این روش به شدت اوج گرفته است (King, 2012). تاکنون چندین مورد مطالعه عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن کربناته ایران و انتخاب لایه کاندید برای شکست هیدرولیکی انجام شده است که به چند مورد آن‌ها در زیر اشاره شده است.

درویش و همکاران (۱۳۹۱) به منظور بررسی امکان انجام عملیات شکست هیدرولیکی در مخزن بنگستان، با تعیین فشار شکست برشی و کششی میانگین در کل ناحیه مورد مطالعه، توانستند لایه کاندید برای شکست هیدرولیکی را انتخاب کنند.

شیرکوند و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از معیار شکست و مدل ژئومکانیکی سنگ مخزن توانستند به تحلیل پایداری و انتخاب مناسب‌ترین لایه جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در یکی از مخازن هیدروکربنی ایران در خلیج فارس دست یابند.

---

<sup>1</sup> Halliburton

<sup>2</sup> Hamison

<sup>3</sup> Firhoust

شادی‌زاده و حبیب‌نیا (۲۰۰۹) با استفاده از خواص مکانیکی سنگ مخزن و روابط همبستگی توانستند گرادیان شکست و گرادیان تنش افقی را در برخی از چاه‌های مخزن بنگستان محاسبه نموده و با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تست‌های ریزشکاف<sup>۱</sup> تطابق خوبی را ارائه دهند. در نهایت با محاسبه گرادیان تنش افقی حداقل، درصد اشباع آب و تخلخل در برخی از چاه‌ها نتیجه‌گیری شد که سازند ایلام گزینه مناسبی برای عملیات شکست هیدرولیکی است.

حیدرآبادی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از آنالیزهای مغزه، تست ریزشکاف و تست ساق حفاری<sup>۲</sup> به محاسبه پروفیل تنش افقی حداقل (تغییرات تنش افقی حداقل با عمق) پرداختند و عواملی مانند نمودار تنش افقی حداقل، شدت و جهت تنش‌های برجا، تراوایی سازند، اشباع هیدروکربورها، تاریخچه تولید و نمودارهای عملکرد چاه را به عنوان معیارهای انتخاب چاه مناسب جهت شکست هیدرولیکی در نظر گرفتند و نهایتاً با بررسی تمامی این عوامل، چاه مناسب جهت شکست هیدرولیکی را تعیین کردند. فو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به منظور ارزیابی زمین‌شناسی شکستگی مصنوعی در شیل‌های قاره‌ای و ارزیابی قابلیت شکاف‌پذیری<sup>۴</sup> آن‌ها در سازند یانگ‌چانگ<sup>۵</sup>، در حوضه آردوس<sup>۶</sup> در چین، با در نظر گرفتن عوامل کانی‌شناسی، مکانیک‌سنگی، تنش‌های برجا، مدول یانگ، نسبت پواسون، محتوای کوارتز، محتوای رس و غیره از یک روش کمی تحت عنوان شاخص شکاف‌پذیری<sup>۷</sup> (شاخصی از شکنندگی<sup>۸</sup> می‌باشد که به صورت یک مقدار کمی از صفر تا یک تعریف می‌شود (Mullen and Enderlin, 2012)) استفاده نمودند که با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)<sup>۹</sup> تخمین زده شد. در نهایت با توجه به مقدار  $FI=0/59$  برای حوضه آردوس، نتایج نشان داد که این حوضه دارای شکاف‌پذیری نسبتاً خوبی

---

<sup>1</sup> Mini frac test

<sup>2</sup> Drill stem test

<sup>3</sup> Fu

<sup>4</sup> Fracability

<sup>5</sup> Yangchang

<sup>6</sup> Ordos

<sup>7</sup> Fracability Index

<sup>8</sup> Brittleness

<sup>9</sup> Analytic hierarchy process (AHP)

برای شکست هیدرولیکی است.

روش‌های هوشمند، از جمله روش‌های مؤثر در تعیین زون‌های حاوی هیدروکربن است. پرکاربردترین فنون هوشمند شامل شبکه عصبی مصنوعی و انتگرال‌های فازی<sup>۱</sup> می‌باشند. لطفی عسگرزاده در سال ۱۹۶۵ نظریه جدید عدم قطعیت را که با تئوری احتمالات متمایز بود ابداع نمود. سپس سوگنو<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۲ از انستیتو تکنولوژی توکیو، نظرات لطفی عسگرزاده را با ارائه مفاهیم اندازه فازی و انتگرال‌های فازی در رساله دکتری خود تعقیب کرد. نظریه انتگرال‌های فازی توسط سوگنو به‌عنوان ابزاری برای بررسی مسائل غیرقطعی معرفی شد. انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت<sup>۳</sup> پرکاربردترین نوع از انتگرال‌های فازی به شمار می‌روند (Shieh et al., 2009).

مسعودی و همکاران (۱۳۹۰) توانستند با به‌کارگیری روش‌های ترکیب اطلاعات (مبتنی بر نظریه احتمالات شرطی بیزین و انتگرال‌های فازی) به شناسایی زون‌های تولید هیدروکربن در مخازن کربناته دست یابند.

در این مطالعه دو چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ در مخزن بنگستان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌منظور ساخت مدل ژئومکانیکی در چاه‌ها از نقطه‌نظر ژئومکانیکی برای انجام شکست هیدرولیکی، پارامترهای ژئومکانیکی (شامل پارامترهای ارتجاعی سنگ، تنش‌های برجا، فشار منفذی و ...) تخمین زده شد و سپس زون‌های کاندید برای شکست هیدرولیکی شناسایی و نتایج نهایی به روش انتگرال‌های فازی با هم ترکیب شدند و زون‌های کاندید مطابق این روش اولویت‌بندی گردیدند. بخش آخر این کار پژوهشی، نوآوری این پژوهش می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Fuzzy Integrals

<sup>2</sup> Sugeno

<sup>3</sup> Choquet

### ۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

به دلیل محدود بودن منابع فسیلی و غیرقابل تجدید بودن آن‌ها، تمهیداتی جهت بازیافت هر چه بیشتر نفت از مخازن در نظر گرفته می‌شود. از جمله مشکلات بازیافت نفت، پایین بودن تراوایی سازند و یا کاهش تراوایی در اثر رسوبات آسفالتین است. جهت رفع این مشکل از چاه از روش‌های تحریک استفاده می‌کنند. یکی از این روش‌ها، روش شکست هیدرولیکی می‌باشد (حسینی و کیوانی، ۱۳۹۱). اگرچه فرآیند شکست هیدرولیکی در مخازن شکاف‌دار دنیا بارها با موفقیت به اجرا درآمده است (Aguilar- Razo, 2000)، ولی در ایران شکاف‌دار بودن مخازن و دبی بالای چاه عامل اصلی عدم توجه به این فرآیند حتی در بخش تحقیقات می‌باشد. در حالی که مطالعه تجربیات گذشته نشان می‌دهد که موفقیت در عملیات وابسته به انجام مطالعات دقیق ژئومکانیکی و آزمایش‌های میدانی از قبیل آزمایش ریزشکاف است (Zoveidavianpoor et al., 2012).

تاکنون توجه جدی به جایگاه شکست هیدرولیکی در ازدیاد تولید مخازن کربناته ایران نشده است و با توجه به اینکه اکثر مخازن ایران وارد نیمه دوم عمر خود شده‌اند، برای افزایش تولید می‌توان از روش شکست هیدرولیکی استفاده نمود. به منظور افزایش قطعیت و اطمینان و کاهش ریسک و خطا در تصمیم‌گیری و عوارض ناشی از آن در تعیین و اولویت‌بندی لایه‌های مستعد برای شکست هیدرولیکی می‌توان از تکنیک‌های ترکیب اطلاعات بهره جست. روش انتگرال‌های فازی یکی از پرکاربردترین فنون هوشمند در ترکیب اطلاعات می‌باشد (Bishop, 1995). این روش، ابزار بسیار قدرتمند و متنوعی در اختیار کارشناسان قرار می‌دهد و با توجه به هوشمندی آن، انعطاف‌پذیری و درصد موفقیت بیشتری دارد (Tanani and Keller, 1990).

به همین منظور در این پژوهش سعی بر آن است تا بتوان لایه‌های مستعد شکست هیدرولیکی را شناسایی و سپس توسط روش انتگرال‌های فازی اولویت‌بندی نمود.

## ۴-۱ روش انجام 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 با استفاده از نرم‌افزار<sup>۱</sup> IP ساخته شد و پارامترهای ژئومکانیکی از جمله مدول‌های الاستیک، پارامترهای مقاومتی و تنش‌ها محاسبه شدند.

پس از ساخت مدل ژئومکانیکی با توجه با 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. با به‌کارگیری همه اطلاعات و منظور نمودن ضرایب تأثیر این معیارها، رتبه‌بندی لایه‌های کاندید با استفاده از روش انتگرال‌های فازی در محیط نرم‌افزار MATLAB، در تعدادی از چاه‌های مخزن بنگستان انجام شد. در نهایت در دو سازند ایلام و سروک مناسب‌ترین کاندیدها برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی معرفی شدند.

## ۵-۱ ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر مشتمل بر پنج فصل می‌باشد؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، مروری بر مطالعات صورت گرفته، ضرورت و روش انجام کار می‌پردازد. در فصل دوم در رابطه با سابقه شکست هیدرولیکی و نحوه انجام این عملیات مطالبی ارائه شده است. در این فصل همچنین به کاربردهای شکست هیدرولیکی، مکانیسم ایجاد آن و تعیین تنش‌های برجا در شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. در فصل سوم ابتدا توضیحاتی در رابطه با میدان نفتی مورد مطالعه، موقعیت جغرافیایی چاه‌ها، سازندها و زون‌های موجود در این سازندها توضیحاتی داده شده است. در ادامه نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه‌های مورد مطالعه شامل محاسبه و تخمین پارامترهای الاستیک و مقاومتی، تخمین

---

<sup>1</sup> Interactive Petrophysics

تنش‌های برجا و فشار منفذی و همچنین نحوه کالیبره کردن آن‌ها شرح داده شده است. در پایان این فصل نیز به طراحی پنجره ایمن گل حفاری در چاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد.

در فصل چهارم در ارتباط با نحوه انتخاب چاه و لایه کاندید در چاه‌های مورد مطالعه توضیحاتی ارائه شده است. در این فصل ابتدا به مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه در دنیا و میادین ایران پرداخته شده است. سپس با توجه به این مطالعات، شرایط مخزن و داده‌های موجود، معیارهایی برای انتخاب چاه و لایه کاندید ارائه گردیده است. در گام بعد به ارزیابی و شناسایی لایه‌های کاندید بر اساس این معیارها پرداخته شده است. در نهایت لایه‌های کاندید با استفاده از روش انتگرال‌های فازی در سازند ایلام و سروک اولویت‌بندی شدند.

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



# فصل دوم

مبانی شکست‌پسند و لیکمی و عوامل مؤثر بر

آن

## ۲-۱ مقدمه

شکست هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های تحریک چاه به‌منظور افزایش تولید نفت و گاز در مخازن با تراوایی کم است. در این عملیات تزریق سیال به داخل چاه و افزایش فشار وارده بر آن باعث ایجاد شکاف در دیواره چاه می‌گردد که به عملیات شکاف‌زنی نیز معروف است. استفاده از این روش باعث غلبه بر مشکلات حفاری و صدمات ناشی از بهره‌برداری در حوالی محور چاه می‌شود که می‌تواند سطح تولید از چاه‌ها را افزایش دهد. این روش در مخازن شیلی و درون توده‌های زغالی کاربرد گسترده‌ای دارد و به‌طور معمول به‌کار گرفته می‌شود؛ همچنین در مخازن دارای سنگ سخت، یکی از گزینه‌های تکمیل چاه می‌باشد. نکته قابل ذکر در این روش این است که انجام فرآیند عملیات شکست هیدرولیکی فقط یک بار در طول عمر چاه صورت می‌گیرد که طی همان یک مرتبه، باعث افزایش قابل توجهی در میزان تولید تا پایان عمر چاه می‌شود.

در این فصل، ابتدا سابقه‌ای از شکست هیدرولیکی بیان شده است. پس از آن به‌نحوه انجام عملیات شکست هیدرولیکی، کاربردها و مکانیسم آن اشاره گردیده است. در پایان توضیحات مختصری از روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری میدانی تنش‌های برجا ارائه شده است.

## ۲-۲ سابقه شکست هیدرولیکی

تاریخچه ایجاد شکاف برای تحریک چاه‌های نفتی کم‌عمق، در درون سنگ‌های سخت به‌وسیله‌ی نیتروگلیسیترین مایع، به سال‌های دهه‌ی ۱۸۶۰ و در برخی از ایالات آمریکا از جمله پنسیلوانیا، نیویورک، کنتاکی و ویرجینیای غربی برمی‌گردد؛ ولی به‌دلیل استفاده از مواد منفجره و نه فشار سیال در ایجاد شکاف، این نوع شکست در اکثر موارد غیرقانونی و با خطرات زیادی همراه بود. در سال ۱۹۳۰ نظریه استفاده از ماده غیرمنفجره مانند اسید برای تحریک چاه ارائه شد. اسید، سنگ را شکسته و سطح شکسته‌شده را ناصاف می‌کرد و این عاملی برای ایجاد کانال‌هایی برای افزایش تولید می‌شد. بعدها

فلوید<sup>۱</sup> از شرکت نفت و گاز استنلن<sup>۲</sup> برای اولین بار به بررسی رابطه بین عملکرد تولیدی چاه و فشار وارده در فرآیند شکافزنی هیدرولیکی پرداخت؛ که این مطالعه پایه‌ی انجام اولین عملیات شکافزنی هیدرولیکی در سال ۱۹۴۷ توسط شرکت استنلن در یکی از چاه‌های میدان گازی هیوگاتن<sup>۳</sup> در جنوب شرقی ایالت کانزاس آمریکا گردید (Charlez, 1997). در این عملیات که بر روی سازند آهکی ۲۴۰۰ فوت (۷۳۰ متر) انجام گرفت مخلوطی از ۳۸۰۰ گالن محلول بنزین ژله‌ای شده<sup>۴</sup> و ماسه‌های رودخانه کانزاس به درون چاه تزریق شد. ولی در تولید چاه تغییر چندانی مشاهده نگردید. در همین راستا در سال ۱۹۴۸ کلارک<sup>۵</sup> فرآیند انجام عملیات شکافزنی هیدرولیکی را به نام شرکت استنلن ثبت کرد که یک سال بعد یعنی در سال ۱۹۴۹ امتیاز استفاده از آن به شرکت نفت هالیبرتون فروخته شد. آن شرکت نیز در همان سال در ابتدا دو پروژه‌ی اقتصادی شکافزنی را در اکلاهما و تگزاس عملیاتی کرد. در سال اول، این عملیات بر روی ۳۳۲ چاه اجرا شد و به‌طور متوسط باعث افزایش ۷۵٪ تولید گردید از این‌رو کاربرد این روش با سرعتی غیر قابل تصور افزایش یافت و باعث افزایش ذخایر نفت ایالت متحده گردید. تا جایی که تا اواسط دهه‌ی ۱۹۵۰ بیش از ۳۰۰۰ پروژه شکافزنی عملیاتی شده بود. این افزایش تا جایی رشد کرد که در سال ۲۰۰۸ به بیش از ۵۰۰۰۰ پروژه شکافزنی با تغییرات قیمتی بین ۱۰۰۰۰ تا ۶ میلیون دلار (برای هر پروژه) رسید و باز هم روند صعودی خود را ادامه داد؛ تا جایی که تا نیمه نخست سال ۲۰۱۲ بیش از ۲/۵ میلیون پروژه شکافزنی در چاه‌های نفت و گاز دنیا عملیاتی شده است که از این میان بیش از یک میلیون پروژه در کشور ایالات متحده آمریکا انجام گردیده است. برخی تخمین‌ها بیانگر این واقعیت است که شکافزنی هیدرولیکی باعث افزایش ۳۰٪ ذخایر نفتی آمریکا و ۹۰٪ ذخایر گازی آن کشور شده است. ذکر این نکته خالی از لطف نیست که در حال حاضر هر پروژه شکافزنی به‌طور معمول شامل ۸ تا ۴۰ عملیات شکافزنی در یک چاه است (Montgomery, 2010; )

---

<sup>1</sup> Floyd Farris

<sup>2</sup> Stanolind Oil Gas Corporation

<sup>3</sup> Hugoton

<sup>4</sup> Gelled gasolin

<sup>5</sup> Clork

(King, 2012). همچنین گستردگی این تکنولوژی به حدی رسیده است که برای استخراج اورانیم از اعماق نیز از آن استفاده می‌گردد که با سهولت بیشتری بتوان آب اکسیژنه را به درون لایه‌های اورانیم دار تزریق کرد و اورانیم موجود را حل و سپس استخراج نمود.

## ۲-۳ نحوه انجام عملیات شکست هیدرولیکی

در فرآیند شکست هیدرولیکی، شکستگی در سنگ توسط سیال آغاز و گسترش می‌یابد. با تزریق سیال ویسکوز به درون چاه اختلاف فشار بین چاه و سازند افزایش یافته که نرخ این افزایش فشار رابطه‌ی مستقیمی با دبی تزریق خواهد داشت. نهایتاً این اختلاف فشار از مقدار مورد نیاز برای ایجاد شکاف در سازند تجاوز کرده و باعث ایجاد شکاف در آن می‌گردد. در این لحظه اگر پمپ‌ها خاموش شوند یا فشار درون چاه به هر دلیلی کاهش یابد، شکاف ایجاد شده بسته خواهد شد؛ ولی با تزریق پروپانت<sup>۱</sup> به همراه سیال به درون شکاف، بعد از کاهش فشار، شکاف به علت وجود پروپانت‌ها بسته نخواهد شد و به دلیل تخلخل و تراوایی این مجموعه‌ی حاصل شده از دانه‌های پروپانت<sup>۲</sup>، مسیری با تراوایی بالا بین مخزن و چاه ایجاد می‌شود. بعد از تزریق سیال حاوی پروپانت و ایجاد شکاف موادی به درون شکاف تزریق می‌شود تا مواد ژلاتینی رسوب داده در دیواره شکاف و سنگ‌های اطراف را در خود حل کند تا با تولید از چاه آن مواد حل شده از چاه خارج شوند و در تولید از چاه اثر منفی نگذارند. شاید مهم‌ترین قسمت این عملیات پروسه‌ی تزریق باشد که خود به چند مرحله قابل تقسیم است. مراحل تزریق برای ایجاد شکاف را با توجه به غلظت پروپانت و گرانروی سیال تزریقی به چند قسمت تقسیم می‌کنند. قسمت اول را پیش‌پد<sup>۳</sup> گویند که برای پر کردن فضای درون لوله مغزی و لوله جداری و همچنین ایجاد اولیه شکاف استفاده می‌گردد. در مرحله بعد پد که سیالی با گرانروی بیشتری از پیش پد است و مانند پیش پد فاقد پروپانت است تزریق می‌شود که وظیفه‌ی آن توسعه ارتفاع و بازشدگی شکاف است تا پروپانت‌های

---

<sup>1</sup> Proppant

<sup>2</sup> Proppant pack

<sup>3</sup> Prepad

تزریقی در مراحل بعدی، قابلیت ورود و جایگیری در شکاف را داشته باشند.

بعد از تزریق پد و ایجاد شکاف، در هر مرحله که تعداد آن وابسته به نظر مهندس ناظر و شرایط پروژه است، غلظت پروپانت افزایش می‌یابد تا به مقدار نهایی خود برسد. به سیالات تزریقی در این مرحله دوغاب<sup>۱</sup> گفته می‌شود. غلظت پروپانت را کم‌کم افزایش می‌دهند زیرا تجربیات میدانی نشان داده است که با این کار نحوه قرارگیری دانه‌های پروپانت در درون شکاف بهتر خواهد بود. در برخی موارد نیز در آخرین مرحله‌ی تزریق، سیالی بدون وجود پروپانت به درون سازند تزریق می‌گردد که به آن پد نهایی<sup>۲</sup> گفته می‌شود و باعث تحویل همه پروپانت‌های موجود در درون لوله مغزی و فضای چاه به شکاف می‌شود (حسینی و کیوانی، ۱۳۹۱).

## ۴-۲ کاربردهای شکست هیدرولیکی

با این‌که کاربرد اصلی شکست هیدرولیکی در حیطه‌ی افزایش تولید نفت و گاز است ولی از کاربردهای دیگر آن نیز می‌توان به تحریک چاه‌های آبی (Banks et al., 1996)، حفر سنگ‌ها در معدن‌کاری (Brown, 2007)، تزریق پساب‌های صنعتی و هسته‌ای (Frank and Barkley, 1995)، اندازه‌گیری تنش‌های درجا درون زمین (Aamodt and Kuriyagawa, 1981)، در چاه‌های ژئوترمال به‌منظور افزایش بهره‌دهی و تولید انرژی و افزایش نرخ تزریق دی‌اکسید کربن به درون زمین (اهداف محیط زیستی و ازدیاد برداشت مخازن نفتی و گازی) اشاره کرد.

## ۵-۲ مکانیسم شکست هیدرولیکی

ایجاد شکاف در عمق زمین وابستگی شدیدی به مقدار فشار همه‌جانبه‌ی<sup>۳</sup> وارده در آن عمق، که ناشی از وزن لایه‌های فوقانی است دارد و تأثیر آن بر شکاف‌های کششی بیش از دیگر حالت‌های شکست

<sup>1</sup> Slurry

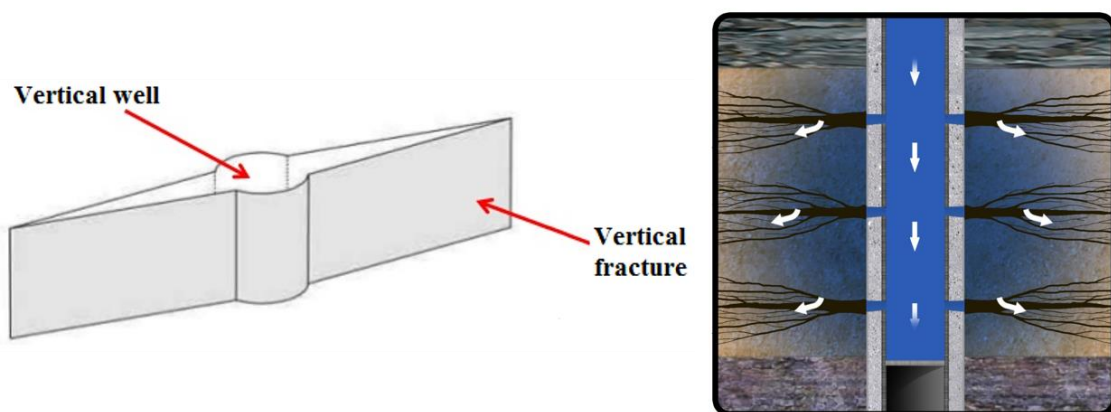
<sup>2</sup> Postpad

<sup>3</sup> Confining pressure

است. زیرا در این حالت، دو طرف شکاف از هم فاصله گرفته و باعث ایجاد فضای خالی می‌گردند که برای این حرکت و فاصله گرفتن دو طرف شکاف از یکدیگر نیاز به فائق آمدن بر فشار همه جانبه ی وارده علاوه بر مقاومت سنگ می‌باشد. از این رو می‌توان گفت شکاف هیدرولیکی کششی زمانی اتفاق خواهد افتاد که تنش مؤثر<sup>۱</sup> وارده با افزایش فشار منفذی به اندازه کافی کاهش یابد؛ به طوری که تنش اصلی حداقل<sup>۲</sup> کششی شود و از مقاومت کششی سنگ تجاوز کند، که در نتیجه شکاف هیدرولیکی کششی ایجاد و توسعه می‌یابد (Fjaer et al., 2008).

لازم به ذکر است که جهت ایجاد ترک، همیشه بر راستای تنش اصلی حداقل عمود بوده و از این رو می‌توان با توجه به جهت شکاف ایجاد شده جهت تنش اصلی حداقل و حداکثر که عمود بر هم هستند را به دست آورد. ولی به طور معمول در اعماق زیاد زمین (عمق مخازن نفتی کم‌تراوا)، تنش اصلی حداقل غالباً تنش افقی و تنش اصلی حداکثر عمودی و ناشی از وزن لایه‌های فوقانی است؛ از این رو شکاف ایجاد شده عمودی خواهد بود.

اگر یک چاه قائم را در نظر بگیریم، مطابق شکل (۱-۲) 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)

<sup>1</sup> Effective Stress

<sup>2</sup> Minimum Principal Stress

## ۱-۵-۲ شرایط برای شکست کششی

شکست کششی زمانی رخ می‌دهد که کشش وارد بر سازند از مقاومت کششی آن بیشتر شود. از آنجا 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 است) (Fjaer et al., 2008):

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

که در آن 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) (Fjaer et al., 2008):

$$(\sigma - P_f) < 0 \quad (2-2)$$

## ۲-۵-۲ 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:

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

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

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

در این روابط  $P_w$  فشار گل حفاری،  $\sigma_r$  تنش شعاعی،  $\sigma_\theta$  تنش مماسی،  $\sigma_z$  تنش قائم،  $\sigma_h$  و  $\sigma_H$

<sup>1</sup> Formation Breakdown

به ترتیب تنش افقی حداکثر و حداقل،  $\vartheta$  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:

$$\sigma_{\theta,max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \quad (۲-۶)$$

$$\sigma_{\theta,min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \quad (۲-۷)$$

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

$$P_w^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_f + T_0 \quad (۲-۸)$$

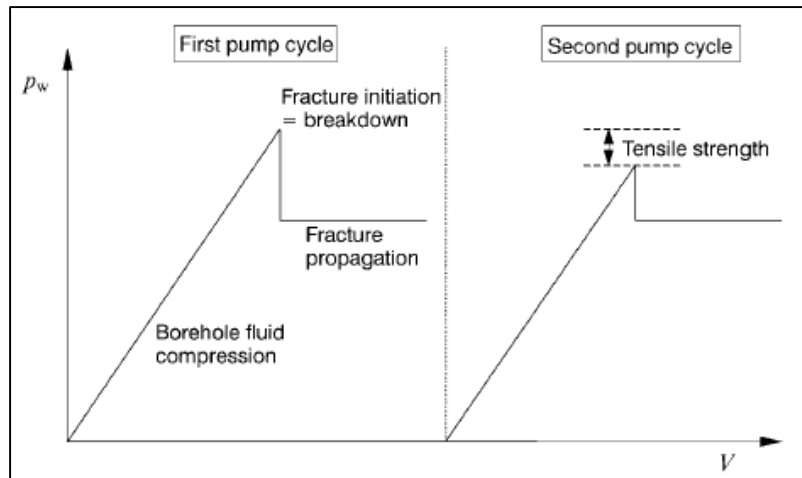
چون طبق تعریف  $\sigma_H$  بزرگ‌تر از  $\sigma_h$  است، در نتیجه زمانی که تنش‌های افقی نابرابرند، فشار ایجاد شکاف کمتر از حالتی است که تنش‌های افقی برابرند.

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

نمودار سمت راست در شکل (۲-۲) 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 تنش‌های 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 می‌توان برابر با مقاومت کششی سازند در نظر گرفت (Fjaer et al., 2008).



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

### ۳-۵-۲ جهت‌گیری، 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:

$$P_w = 3\sigma_h - \sigma_V - P_f + T \quad (۹-۲)$$

و در حالتی که چاه موازی با  $\sigma_h$  است فشار ایجاد شکاف برابر است با:

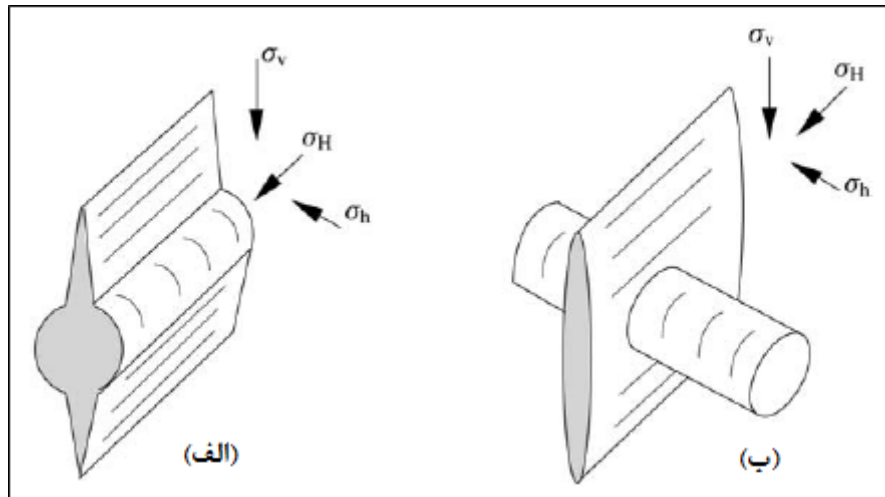
$$P_w = 3\sigma_H - \sigma_V - P_f + T \quad (۱۰-۲)$$

واضح است که فشار ایجاد شکاف چاه در جهت  $\sigma_h$  بیشتر از  $\sigma_H$  است. همچنین جهت شکاف نسبت

<sup>۱</sup> Confinement

<sup>۲</sup> Deviated well

به چاه در هر دو مورد متفاوت خواهد بود. مطابق شکل (۲-۳-الف)، تنش حداقل عمود بر چاه است و شکاف در این حالت موازی با چاه خواهد بود. همچنین شکل (۲-۳-ب) حالتی است که چاه موازی با جهت  $\sigma_h$  است، در این حالت شکاف عمود بر محور چاه خواهد بود.



شکل (۲-۳): جهت‌گیری‌های مختلف شکاف، شکاف موازی با چاه (شکل الف) و شکاف عمود بر چاه (شکل ب) (Fjaer et al., 2008)

در مواردی که چاه در جهت هیچ‌کدام از تنش‌های اصلی نمی‌باشد، به‌طورمثال 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 این‌که تنش روباره معمولاً به‌طور 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> (۱۹۸۷) در تحقیقی نشان دادند که در لایه‌های شیلی تنش‌های افقی می‌توانند به شرایط تنش لیتواستاتیک<sup>۴</sup> برسند، در حالی‌که مقدار این تنش‌ها در مورد ماسه‌سنگ‌ها بسیار کمتر است. اختلاف در تنش‌های افقی زمانی

<sup>1</sup> Non-planar

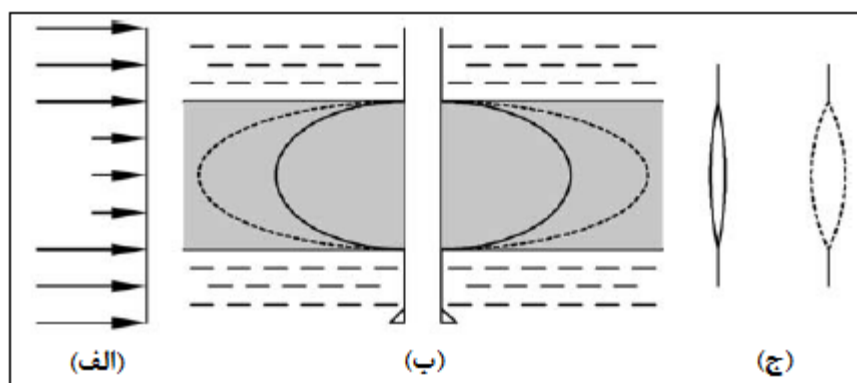
<sup>2</sup> Warpinski

<sup>3</sup> Teufel

<sup>4</sup> Lithostatic

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 عامل مؤثرتری است.

شکل (۲-۴) شکاف‌زنی یک لایه‌ی ماسه‌سنگی را نشان می‌دهد که سازندهای بالایی و پایینی آن شیلی هستند. در شکل (۲-۴-الف)، 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 (شکل (۲-۴-ب)). به‌منظور گسترش چنین شکافی، مطابق شکل (۲-۴-ج)، نیروهای وارد بر دیواره‌های شکاف باید به سمت بیرون شکاف باشند؛ که این امر باعث افزایش عرض شکاف می‌شود.



شکل (۲-۴): محدودسازی یک شکاف در بین لایه‌هایی با تنش بیشتر (Fjaer et al., 2008)

## ۲-۶ تعیین تنش برجا در شکست هیدرولیکی

در طراحی شکاف هیدرولیکی، آگاهی از تانسور تنش‌های برجا جهت توسعه مدل گسترش شکاف و رسیدن به شکاف هیدرولیکی مطلوب، ضروری است (Kenned et al., 2012). 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). مقدار این تنش افقی حداقل را می‌توان از فشار درون شکاف بلافاصله

بعد از این که پمپاژ متوقف می شود به دست آورد که این فشار، فشار آنی بستن<sup>۱</sup> (ISIP) نامیده می شود. تنش افقی حداکثر در تحلیل پایداری چاه جهت تعیین وزن گل بهینه، محل نشاندن لوله جداری و تعیین احتمال شکست برشی در گسل های موجود مفید است. با وجود اهمیت این تنش در ژئومکانیک، تعیین دقیق آن بسیار دشوار است (Zoback, 2010).

اندازه گیری میدانی تنش های برجا به سادگی امکان پذیر نیست. متغیرهای بسیاری هم چون اثر مشبک ها و نحوه ی انتشارشکاف در زون موردنظر بر این اندازه گیری ها اثر می گذارند. با این حال، با بررسی فشار عملیاتی ته چاه<sup>۲</sup> (BHTP) و انجام تست های تزریق / افت<sup>۳</sup> و تزریق / برگشت جریان<sup>۴</sup> می توان مقادیر دقیق تنش برجا را اندازه گیری کرد (Holditch et al., 1987).

اشکال روش هایی مانند آنالیز مغزه و نگارها این است که باید با استفاده از شکاف زنی سنگ کالیبره شوند. بنابراین هنگامی که نیاز است تنش ها به طور دقیق اندازه گیری شوند، استفاده از تست های تزریق مناسب تر است.

تست های ریزشکاف یکی از روش های اصلی جهت اندازه گیری تنش های برجا می باشد. این تست ها با استفاده از سیال شکاف زنی و در نرخ پمپ های از قبل برنامه ریزی شده اما با حجم سیال کمتری انجام می شوند. با طراحی و انجام درست این تست ها می توان اطلاعات مهمی درباره هندسه شکاف، اختلاف تنش های برجا و ضریب هرزروی سیال<sup>۵</sup> به دست آورد (Jones and Britt, 2009). تست نشت استاندارد<sup>۶</sup> (LOT) و تست نشت گسترده<sup>۷</sup> (XLOT or ELOT) از جمله تست های ریزشکاف هستند که در ادامه به توضیح آن ها پرداخته شده است.

---

<sup>1</sup> Instantaneous shut-in pressure

<sup>2</sup> Bottom hole treating pressure

<sup>3</sup> Injection/fall-off

<sup>4</sup> Injection/flowback

<sup>5</sup> Fluid loss coefficient

<sup>6</sup> Standard leak off test

<sup>7</sup> Extended leak off test

بیش از چهل سال است که آزمایش نشت در نقاط مختلف جهان جهت تخمین تنش در اعماق مختلف زمین انجام می‌گیرد. انجام این آزمایش برای نخستین بار در ایران از سال ۱۳۹۰ در شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب آغاز شده است. این آزمایش به‌نوعی آزمایش شکست هیدرولیکی کوچک مقیاس محسوب می‌گردد که در زیر محل پاشنه جداری و آستری چاه‌ها انجام می‌گیرد. اساس انجام آن، تحت فشار قرار دادن بخش انتهایی چاه تا شروع شکستگی در سازند می‌باشد. این آزمایش در مرحله حفاری چاه انجام می‌گیرد و ضمن آن فضای چاه توسط شیر فوران‌گیر<sup>۱</sup> (BOP) بسته شده و چاه به آرامی با استفاده از سیال حفاری تحت فشار قرار می‌گیرد و با اولین علائم نشت سیال به داخل سازند، پمپاژ سیال به داخل چاه متوقف می‌شود. باید توجه داشت که آزمایش نشت در مفهوم کلی جهت یافتن گرادیان شکست یک سازند معین به کار گرفته می‌شود (گزارش مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳).

هدف از انجام این آزمایش تعیین مقدار تنش افقی کل حداقل (در رژیم گسلش عادی و امتدادلغز) و تنش عمودی (در رژیم گسلش معکوس)، به‌منظور افزایش صحت و دقت مدل ژئومکانیکی زمین<sup>۲</sup>، کالیبره کردن تنش افقی حداقل، به‌دست آوردن وزن گل ایمن به‌منظور بررسی قابلیت حفاری با فشارهای بالاتر گل زیر محل جداره‌گذاری و در نتیجه حفاری ایمن در اعماق زیرین، کسب اطمینان از مقاومت سیمان و عدم نشت در محل کفشک لوله جداری و جمع‌آوری داده‌های مقاومتی سنگ جهت بهینه‌سازی طراحی چاه‌های آتی می‌باشد. نتیجه این آزمایش نموداری است که مطابق شکل (۲-۵) از ترسیم فشار-حجم گل و یا فشار-زمان به‌دست می‌آید. اگر قبل از رسیدن به فشار نشت (نقطه A)، آزمایش قطع گردد بیانگر آزمایش محدود<sup>۳</sup> (LT) یا آزمایش یکپارچگی سازند<sup>۴</sup> (FIT) است. چنین آزمایشی صرفاً نشان می‌دهد که در حداکثر فشار اعمال‌شده، سیال به‌محدوده بیرون از دیواره چاه

<sup>1</sup> Blow-Out Preventer

<sup>2</sup> Mechanical Earth Model (MEM)

<sup>3</sup> Limit Test

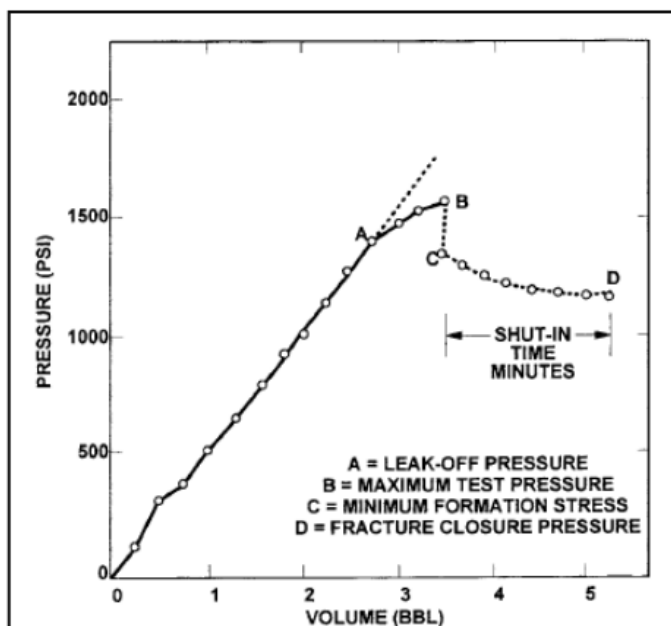
<sup>4</sup> Formation Integrity Test

گسترش نمی‌یابد. همان‌طور که در شکل (۲-۵) مشاهده می‌گردد نقطه A محلی است که در آن روند نمودار از حالت خطی خارج می‌شود؛ که نشان‌دهنده شروع تشکیل شکستگی در سازند یا تغییر در تراوایی به علت افزایش تنش می‌باشد. بدین معنی که نرخ نفوذ سیال در سازند بالا می‌رود. این هرزروی سیال باعث ایجاد تغییر شیب نمودار نشت می‌شود. در واقع تا رسیدن به نقطه A نمودار (LOP)<sup>۱</sup>، افزایش فشار می‌تواند بیانگر گشادشدگی چاه، سرعت ثابت در ایجاد یا رشد ریزترک‌ها و یا نفوذ سیال درون سازند باشد. در واقع در فشاری که انحراف مشخصی نسبت به رفتار افزایش خطی فشار دیواره گمانه نسبت به زمان مشاهده گردد (نقطه LOP)، نوعی شکست هیدرولیکی رخ داده است. از نقطه A تا نقطه B، سرعت رشد شکستگی غیرخطی می‌گردد و در خلال آن گسترش شکست هیدرولیکی به فاصله دور از دیواره چاه و عمود بر حداقل تنش اصلی به وقوع می‌پیوندد. فشار معادل نقطه LOP تقریباً برابر با تنش افقی اصلی حداقل است. البته با ادامه ثبت داده‌های فشار، بعد از توقف پمپاژ (نقطه B)، فشار معادل نقطه C را نیز می‌توان به عنوان تنش اصلی حداقل منطقه در نظر گرفت که تقریباً با LOP برابر است. البته مطابق مطالعات صورت گرفته در نقاط مختلف دنیا LOP معمولاً حدود ۱۱ درصد تنش حداقل را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند و بنابراین فشار معادل بستن جریان چاه<sup>۲</sup> (نقطه C) معمولاً تخمین بهتری از تنش حداقل منطقه ارائه می‌دهد (Zoback, 2010).

---

<sup>1</sup> Leak-Off Point

<sup>2</sup> Shut-In



شکل (۲-۵): نمودار حاصل از آزمایش نشت استاندارد (Zoback, 2010)

## ۲-۶-۲ تست نشت گسترده

این آزمایش محدودیت‌های آزمایش نشت (LOT) را بدون صرف زمان بیشتر پوشش می‌دهد. آزمایش نشت گسترده خیلی شبیه به شکست هیدرولیکی است؛ با این تفاوت که در روش‌های شکست هیدرولیکی به تجهیزات کامل‌تری نیاز است. اگر انجام این آزمایش با دقت بالا مدنظر باشد، به کارگیری نرخ جریان ثابت و پایین (در حدود 1BBL/min یا کمتر)، استفاده از سیال با گرانروی کم (مثل آب) و اندازه‌گیری پیوسته فشار ضروری است (گزارش مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳).

یکی از اهداف اصلی و مهم مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی، تعیین میزان تنش‌های برجای منطقه و سیستم حاکم بر آن‌ها در توالی چاه و در محدوده میدان مورد مطالعه است؛ که امکان انجام این مهم در این آزمایش وجود دارد. هدف از انجام این آزمایش، نه‌تنها نیل به اهداف مورد نظر در آزمایش نشت استاندارد می‌باشد، بلکه امکان تعیین تنش افقی حداکثر منطقه، مقاومت کششی سنگ، فشار لازم جهت توسعه ترک و فشار بازکردن درزه‌های موجود را نیز فراهم می‌کند (Zoback, 2010). همچنین در آزمایش نشت گسترده با توجه به امکان تعیین تنش افقی حداکثر و با دانستن تنش قائم می‌توان رژیم

تنش را تشخیص داد در صورتی که در آزمایش نشت استاندارد نمی‌توان رژیم تنش منطقه را به‌طور دقیق تعیین نمود.

روش انجام آزمایش نشت گسترده مشابه آزمایش نشت استاندارد است. آزمایش با پمپ کردن سیال حفاری به‌درون حفره چاه شروع می‌شود و همانند آزمایش نشت استاندارد، نقطه نشت (LOP) تعیین می‌گردد. در ادامه آزمایش فشار شکست سازند<sup>۱</sup> (FBP) ثبت شده و پس از مشخص شدن فشار انتشار شکستگی، پمپ را خاموش کرده و روند کاهشی فشار را تا زمانی که منحنی، بسته شدن شکستگی را نشان دهد (حدود ۱۵ تا ۳۰ دقیقه) پایش می‌شود. سپس دو تا چند چرخه آزمایش، بر حسب دقت مورد نیاز و کیفیت داده‌های حاصله، تکرار می‌شود. چرخه اول افت فشار، تخمینی از تنش افقی حداقل می‌دهد ولی بهترین تخمین از مقدار تنش افقی حداقل از چرخه‌های دوم و سوم حاصل می‌گردد؛ زیرا بر مقدار مقاومت کششی سازند غلبه شده است. فشار انتشار شکستگی<sup>۲</sup> (FPP) در چرخه‌های دوم و سوم نیز ثبت می‌شود. در این آزمایش همه اهدافی که در آزمایش نشت استاندارد به‌دنبال آن هستیم با دقت بالاتر و دقیق‌تری به‌دست می‌آید.

شکل (۲-۶) نتایج آزمایش نشت گسترده را نشان می‌دهد. در این شکل، انحراف مشخص روند خطی افزایش فشار دیواره چاه نسبت به زمان، نقطه نشت (LOP)، نشان‌دهنده شکست هیدرولیکی است. گسترش شکست هیدرولیکی به‌فاصله دور از دیواره چاه و عمود بر حداقل تنش اصلی است و فشار اندازه‌گیری‌شده در نقطه نشت، تقریباً برابر با تنش اصلی حداقل است. حداکثر فشار به‌دست آمده طی آزمایش، فشار شکست سازند (FBP) نامیده می‌شود و بیانگر فشاری است که گسترش شکستگی با فاصله از دیواره گمانه رخ می‌دهد. چنانچه پمپاژ با نرخ ثابتی ادامه داشته باشد، فشار پمپاژ اندازه‌گیری‌شده در چاه تا مقدار نسبتاً ثابتی زیر فشار شکست سازند افت می‌کند که اصطلاحاً فشار

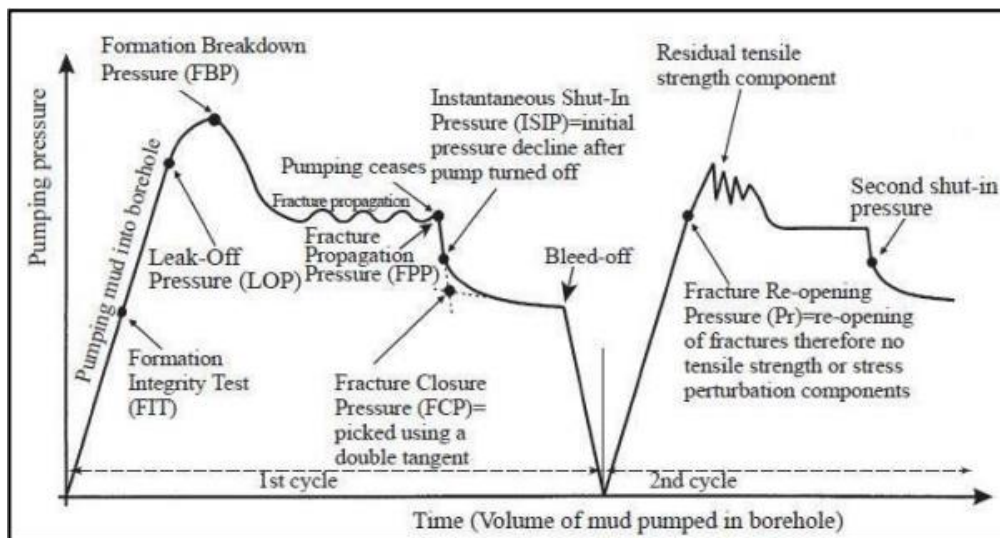
---

<sup>1</sup> Formation Breakdown Pressure

<sup>2</sup> Fracture Propagation Pressure



انتشار شکست (FPP) نامیده می‌شود که این فشار همراه با گسترش شکستگی است. در نبود مقاومت زیاد در نزدیکی دیواره چاه (به عبارت دیگر زمانی که نرخ جریان و گرانیوی سیال به حد کافی پایین باشند)، FPP نزدیک به تنش اصلی حداقل است. از این رو مقادیر FPP و LOP بایستی به هم نزدیک باشند. اندازه‌گیری دقیق‌تر تنش اصلی حداقل، از فشار آنی بستن<sup>۱</sup> (ISIP) (پس از خاموش کردن پمپ) و بعد از توقف ناگهانی جریان به درون چاه به دست می‌آید. در آزمایش‌هایی که با دقت بالا انجام شده است، LOP، FPP و ISIP غالباً مقادیر تقریباً یکسانی داشته و می‌توانیم اطلاعات قابل قبولی درباره بزرگی تنش حداقل منطقه به دست آوریم. اگر از سیال گرانیو و یا سیال حاوی پروپانت معلق استفاده شده باشد FPP به علت ایجاد اصطکاک زیاد افزایش خواهد یافت. در چنین مواردی فشار بسته شدن شکستگی<sup>۲</sup> (FCP) اندازه‌گیری بهتری از تنش اصلی حداقل نسبت به FPP یا ISIP را ارائه می‌دهد. FCP با ترسیم فشارها به صورت تابعی از ریشه دوم زمان بعد از خاموش کردن پمپ و بررسی تغییر در مسیر خطی افت فشار تعیین می‌گردد. بهترین تخمین از مقدار تنش حداقل منطقه از چرخه‌های دوم و سوم حاصل می‌شود (Zoback, 2010).



شکل (۲-۶): نمودار استاندارد حاصله از ترسیم فشار و زمان یا حجم متناظر در آزمایش نشت گسترده (Zoback, 2010)

<sup>1</sup> Instantaneous Shut-in Pressure

<sup>2</sup> Fracture Closure Pressure

## ۷-۲ جمع‌بندی

در این فصل مطالبی مقدماتی در رابطه با سابقه شکست هیدرولیکی، نحوه انجام عملیات و همچنین کاربردهای این عملیات ارائه گردید. همان‌گونه که ذکر شد شکست هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های 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. در ادامه این فصل توضیحاتی در مورد مکانیسم شکست هیدرولیکی، فشار ایجاد و شکست سازند و روابط مربوط به آن‌ها ارائه شد. می‌توان چنین اظهار داشت که شکست هیدرولیکی زمانی رخ می‌دهد که کشش وارد بر سازند از مقاومت کششی آن بیشتر شود. همچنین فشار ایجاد شکاف زمانی که تنش‌های افقی نابرابر می‌باشند، کمتر از حالتی است که تنش‌های افقی برابر هستند. جهت‌گیری، رشد و محدودسازی شکاف هیدرولیکی در گام بعد مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که شکاف هیدرولیکی همواره در جهت حداقل مقاومت شروع به رشد می‌کند و سپس جهت آن به سمت جهت عمود بر تنش اصلی حداقل تغییر خواهد کرد. علاوه بر آن، مشخص شد که بزرگی اختلاف در تنش‌های حداقل می‌تواند از انتشار شکاف از یک لایه به لایه دیگر جلوگیری کند.

در بخش پایانی این فصل، روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری میدانی تنش‌های برجا مورد بررسی قرار گرفت و توضیحاتی در رابطه با تست‌های ریزشکاف ارائه شد و کاربردها و تفاوت‌های آن‌ها بیان گردید. به‌طور کلی می‌توان گفت تست‌های ریزشکاف مانند تست نشت استاندارد (LOT) و نشت گسترده (XLOT) می‌توانند اطلاعات مهمی درباره هندسه شکاف، اختلاف تنش‌های برجا و ضریب هرزروی سیال فراهم آورند.

فصل سوم

ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی در

تعدادی از چاه‌های میدان اهواز

### ۱-۳ مقدمه

مدل‌سازی ژئومکانیکی مخزن یکی از اهداف مهم در دستیابی به یک استراتژی موفق در توسعه مخزن می‌باشد. مدل ژئومکانیکی یک بعدی یک نمایش عددی از وضعیت تنش‌های برجا و خواص مکانیکی لایه‌های زمین در یک چاه است که پایه و اساس سایر مطالعات ژئومکانیکی از جمله آنالیز پایداری دیواره چاه، عملیات شکست هیدرولیکی، مدیریت تولید ماسه و طراحی پنجره وزن گل ایمن برای حفاری را در بر می‌گیرد (Zoback, 2007). ساخت مدل ژئومکانیکی خطرات پیش‌بینی نشده در طول طراحی چاه و حفاری آن را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد.

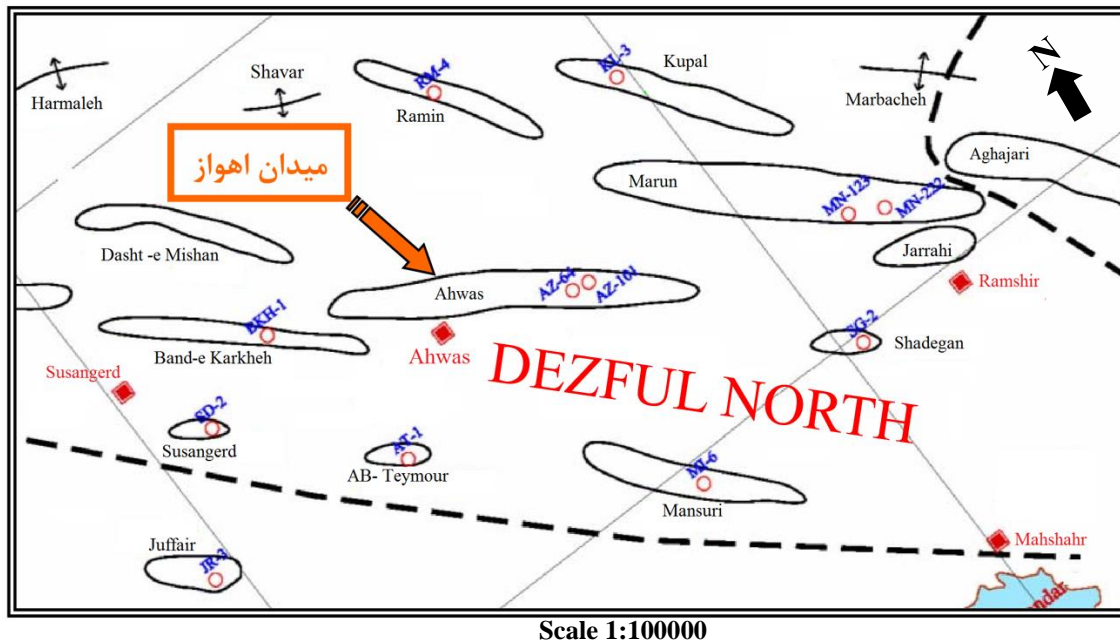
یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌سازی ژئومکانیکی استفاده از آن در طراحی عملیات شکست هیدرولیکی و انتخاب چاه و لایه کاندید برای این عملیات می‌باشد. با آگاهی از عوامل تأثیرگذار بر طراحی شکست هیدرولیکی، مدل ژئومکانیکی ساخته می‌شود؛ بنابراین تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ از قبیل تنش‌های اصلی، مقاومت سنگ، فشار منفذی و ضرایب الاستیک برای طراحی شکست هیدرولیکی امری ضروری است (Afsari et al., 2009).

در این فصل ابتدا توضیحاتی در رابطه با میدان نفتی اهواز، چاه‌ها و سازندهای مورد مطالعه در این میدان ارائه می‌گردد. سپس مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی بیان شده و روابط مختلف برای تخمین پارامترهای نام‌برده شده شرح داده می‌شود و در نهایت در دو چاه در این میدان مدل ژئومکانیکی شامل پارامترهای الاستیک، مقاومتی، فشار منفذی و مقدار و جهت تنش‌ها ساخته شده و نتایج ارائه خواهد شد.

### ۲-۳ میدان نفتی اهواز

میدان نفتی اهواز در جنوب غربی ایران و در فروافتادگی دزفول قرار دارد که دارای روند شمال غربی جنوب شرقی، به موازات رشته کوه زاگرس می‌باشد و بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ و ۴۹ درجه و عرض‌های

جغرافیایی ۳۱ و ۳۲ درجه قرار دارد. طول میدان اهواز ۶۷ کیلومتر و عرض آن ۶ کیلومتر است. این میدان نفتی در حاشیه شمال شرقی شهرستان اهواز، بین میداین مارون در شرق، بندکرخه و سوسنگرد در غرب و در بخش‌های جنوب شرقی و جنوب غربی آن به ترتیب میداین شادگان و آب تیمور واقع شده است و جزء میداین نفتی عظیم محسوب می‌شود (شکل ۱-۳).



شکل (۱-۳): موقعیت جغرافیایی میدان نفتی اهواز (شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹)

میدان اهواز یک نفت‌گیر عظیم ساختاری بوده که از آخرین چین‌های زاگرس می‌باشد. این تاق‌دیس بر روی یک بالا آمدگی<sup>۱</sup> در طبقات قدیمی تر اتفاق افتاده است. سازوکار چین خوردگی برای تحلیل منطقی تراکم شکستگی‌ها و برآورد ذخیره مخزنی امری ضروری به نظر می‌رسد. که می‌توان این سازوکار را در این ناحیه ترکیبی از دو سازوکار چین خوردگی خمشی- لغزشی و چین خوردگی با سطح خنثی دانست و علاوه بر این، وجود گسل‌های تراستی واقع در یال شمالی و جنوبی و احتمالاً بالا آمدگی‌های بلوک‌های پی‌سنگی، پیچیدگی‌های سازوکار چین خوردگی در این میدان را افزایش می‌دهد. مخازن اصلی این میدان شامل سازند آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی بوده که مخزن آسماری در عمق

<sup>1</sup> Hurst

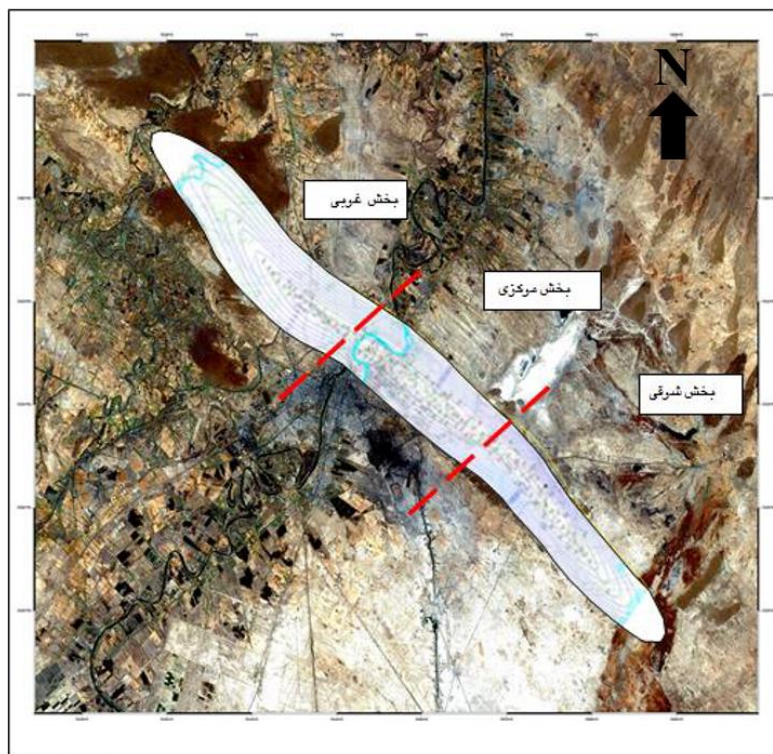
۲۵۰۰ متری و بنگستان در عمق حدود ۳۰۰۰ متری و خامی در عمق ۴۶۰۰ متری واقع شده است (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴). ابعاد تاقدیس اهواز در مخزن بنگستان دارای طول تقریبی ۶۵ کیلومتر و پهنای آن در نیمه غربی ۳-۵ کیلومتر و در بخش‌های مرکزی ۴,۵-۶ کیلومتر است که در بخش شرقی به ۳ کیلومتر هم می‌رسد. میزان تغییرات شیب ساختمانی، این میدان را به سه بخش ساختمانی تقسیم می‌کند. بدین ترتیب که در بخش غربی متوسط شیب ۹-۱۱ درجه و در بخش‌های مرکزی شیبی حدود ۱۵ درجه می‌باشد. محدوده شرقی با شیب متوسط ۲۶-۳۴ درجه در یال شمالی دارای بیشترین شیب ساختمانی است که این مقدار شیب در یال جنوبی بین ۱۴-۲۱ درجه متغیر است. بر این اساس، تاقدیس اهواز در برش عرضی در دماغه‌ها و بخش‌های مرکزی و غربی متقارن می‌باشد که باعث پهن شدن ناحیه لولا گردیده و در بخش شرقی نامتقارن است و با داشتن بلندترین برجستگی ساختمانی در این منطقه به‌میزان ۳۰۹۸ متر مرتفع‌ترین قسمت‌های تاقدیس اهواز را شامل می‌شود.

جدول (۱-۳) ارتباط معناداری میان پارامترهای شیب و میزان تولید را نشان می‌دهد. شیب زیاد در یک منطقه حاکی از فعال بودن تکتونیک در آن منطقه است. فعالیت زمین‌ساختی عامل اصلی ایجاد شکستگی‌ها در هر منطقه است، لذا به‌طور 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 باعث هرزروی گل و تولید بیشتر چاه‌ها می‌شود.

جدول (۱-۳): 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)

مطابق شکل (۲-۳) می‌توان پهنه‌بندی میدان اهواز را با توجه به اطلاعات ژئوفیزیک لرزه‌ای به سه قسمت شرقی، مرکزی و غربی نسبتاً مجزا از نظر ساختاری پهنه‌بندی کرد. 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 داشته که این امر با هرزروی کمتر، تراکم شکستگی کمینه و حداقل شیب لایه‌ها نیز منطبق است (توانایی و همکاران ۱۳۹۴).



شکل (۲-۳): نقشه پهنه‌بندی میدان اهواز به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی (توانایی و همکاران، ۱۳۹۴)

### ۳-۳ موقعیت جغرافیایی چاه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش دو چاه قائم ۴۸۸ و ۳۹۷ در میدان اهواز مورد مطالعه قرار گرفته است. در چاه ۴۸۸ 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 (۳-۳) نشان داده شده است. همچنین چاه ۳۹۷ در بخش غربی میدان اهواز و در نزدیکی ستیغ واقع شده است (شکل







## ۳-۴ زون بندی مخزن بنگستان میدان اهواز

مخزن بنگستان یک مخزن کربناته متعلق به کرتاسه است. این مخزن در محل میدان اهواز شامل دو سازند ایلام و سروک است. نتایج مطالعات رسوب‌شناختی و پتروفیزیکی نشان می‌دهد که زون‌های A، B و C متعلق به ایلام و زون‌های D، E، F، G، H، I و J متعلق به سازند سروک است. بر اساس زون‌بندی جدید مخزن بنگستان میدان اهواز، زون‌های E، F، G و I هرکدام به دو زیرزون ۱ و ۲ تقسیم‌بندی شده و همچنین زون I<sub>1</sub> به دو زیرزون I<sub>11</sub> و I<sub>12</sub> تقسیم گردیده است (شکل ۳-۵). اطلاعات مختصری از هر زون در ادامه آمده است (گزارش شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۹).

### • زون A

بالاترین بخش مخزن بنگستان و در واقع سرسازند ایلام است. این زون تناوبی از آهک‌های رسی عمیق دریا و باندهای شیلی لامینه‌ای با ضخامت متوسط ۱۷ متر و تخلخل کمتر از ۵ درصد و همچنین اشباع آب بالای ۸۵ درصد فاقد خصوصیات مخزنی است.

### • زون B

این زون با متوسط ضخامت ۱۲ متر از رخساره مادستونی- وکستونی کم‌انرژی رس‌دار که حاوی فرامینیفرهای پلانکتون و الیگوسترژیند است، تشکیل شده است و به لحاظ خصوصیات مخزنی تفاوت چندانی با زون A ندارد، لذا به‌عنوان یک زون مخزنی بهره‌ده در نظر گرفته نمی‌شود.

### • زون C<sub>1</sub>

این زون با ضخامت متوسط ۴۱ متر بهترین زون مخزنی بهره‌ده با نسبت ضخامت خالص به ناخالص ۰/۸ بوده که در یک محیط رسوبی کم تا متوسط انرژی سابتایدال رسوب‌گذاری شده است و دربردارنده الیگوسترژیند به‌همراه مقدار کمی رودیست است. متوسط تخلخل این زون ۱۶ درصد و اشباع آب ۱۵/۵ درصد است. به‌طور کلی می‌توان گفت که روند تغییرات تخلخل در زون C ایلام از سمت شرق به‌سمت

غرب میدان به صورت تدریجی رو به افزایش است.

### • زون C<sub>2</sub>

این زون شامل آهک‌های نوع وکستون- پکستون بوده و به همراه کاهش میزان حجم رس و ورود خرده‌های رودیستی در شرایط پراثرژی تشکیل شده است. متوسط ضخامت این زون ۴۶ متر بوده و با تخلخل ۱۴/۵ درصد و اشباع آب ۲۱ درصد دارای نسبت ضخامت خالص به ناخالص برابر با ۰/۴ است. در این زون نیز که از زون‌های مخزنی خوب به شمار می‌رود، روند تغییرات تخلخل از سمت شرق به سمت غرب میدان به صورت تدریجی رو به افزایش است.

### • زون C<sub>3</sub>

این زون با رخساره غیردریایی کالکرت یا کالیچی شروع شده و توسط شیل‌های آب شیرین (دارای لامیناسیون و حاوی استراکد) پوشیده می‌شود. متوسط ضخامت این زون ۶۲ متر، تخلخل ۸ درصد، اشباع آب ۵۳ درصد و نسبت ضخامت خالص به ناخالص برابر ۰/۲ است. حداکثر تخلخل در مرکز و غرب میدان به ۱۵ درصد می‌رسد.

### • زون D

بالاترین بخش مخزن سروک است که در حدود ۵۱ متر ضخامت دارد. این زون شامل وکستون تا پکستون‌های سخت و متراکم است که در سرتاسر مخزن گسترش داشته و دو زون مخزنی C در سازند ایلام و زون E در سازند سروک را از هم جدا می‌کند. حد بالایی این زون یک سطح فرسایشی که معرف دگرشیبی تورونین- سنومانین است که معمولاً شامل آهک‌های خردشده و برشی است. متوسط تخلخل این زون زیر ۳ درصد بوده و اشباع آب آن نیز بالای ۶۵ درصد است. آهک‌های زون D در یک محیط دریایی کم‌عمق تا اینترتایدال و همچنین در محیط‌های بسته و محدود تشکیل شده‌اند.

### • زون E<sub>1</sub>

این زون شامل مادستون‌های محیط دریایی کم‌عمق بوده که به سمت پایین به عمق آب افزوده می‌شود. متوسط ضخامت این زون ۱۰۴ متر و متوسط تخلخل این زون ۵/۵ درصد است که تا حداکثر ۱۰ درصد در مرکز و غرب میدان نیز می‌رسد. همچنین متوسط اشباع آب و نسبت ضخامت خالص به ناخالص این زون به ترتیب ۳۶ درصد و ۰/۲۲ می‌باشد.

### • زون E<sub>2</sub>

این زون شامل فواصلی از زون E است که دارای بافت گرینستون تا پکستون بوده و به لحاظ سنگ مخزنی بهترین پارامترهای مخزنی را شامل می‌شوند. ضخامت متوسط این زون در حدود ۸۰ متر بوده و از حداقل ۶۰ تا حداکثر ۱۲۵ متر متغیر است. متوسط تخلخل این زون ۸ درصد بوده که تا حداکثر ۱۳ درصد نیز می‌رسد. متوسط اشباع آب در این زون حدود ۳۵ درصد است و با متوسط ضخامت خالص به ناخالص ۰/۹ خصوصیات خوبی از لحاظ مخزنی نشان می‌دهد.

### • زون F<sub>1</sub>

بخش‌های بالایی این زون به‌طور غالب از آهک‌های مادستونی تشکیل شده که به سمت پایین‌تر در یک محیط کم‌عمق جزر و مدی به بافت گرینستونی نزدیک می‌شود. این زون عموماً تخلخل کمتری داشته ولی لازم به ذکر است که آهک‌های فوق به‌وسیله رسوبات کانالی از پکستون‌های متخلخل قطع شده‌اند و تشکیل سنگ‌های مخزنی خوب را داده‌اند. ضخامت متوسط این زون ۵۶ متر بوده و متوسط تخلخل در این زون ۲/۸ درصد است؛ ولی در بخش‌هایی تا حداکثر ۱۶ درصد هم می‌رسد. همچنین متوسط اشباع آب در این زون ۵۸ درصد و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن ۰/۰۵ است.

### • زون F<sub>2</sub>

این زون از آهک‌های وکستونی سخت تشکیل شده که عمدتاً در یک محیط کم‌عمق رسوب‌گذاری

شده است. هرچند که تغییرات سطح دریا و نوسانات آن باعث رسوب‌گذاری آهک‌های گرینستونی و افزایش تخلخل در آن شده است ولی به‌طور کلی زون F جداکننده دو زون مخزنی E و G است. متوسط ضخامت این زون ۵۵ متر بوده و تخلخل آن در حدود ۳ درصد است ولی در بخش‌هایی تا حداکثر ۱۵ درصد هم می‌رسد. همچنین متوسط اشباع آب این زون ۵۶ درصد و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن ۰/۰۲ است.

#### • زون G<sub>1</sub>

این زون در قسمت انتهایی حاشیه پلاتفورم رسوب‌گذاری کرده است. مقدار ضخامت متوسط این زون ۶۷ متر و تخلخل متوسط آن ۶/۷ درصد است که تا ۱۶ درصد هم می‌رسد. اشباع آب متوسط و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن نیز به ترتیب ۳۷ درصد و ۰/۳۶ است.

#### • زون G<sub>2</sub>

این زون عمدتاً شامل گرینستون است که ضخامت متوسط آن ۶۰ متر و تخلخل متوسط آن ۱۰ درصد است که تا حداکثر ۲۰ درصد هم می‌رسد. اشباع آب متوسط و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن به ترتیب ۳۷ درصد و ۰/۳۴ است.

#### • زون H

این زون عموماً از گرینستون‌های دانه‌ریز با تخلخل کم که در محدوده محیطی لاگون تا سوپراتایدال رسوب‌گذاری شده، تشکیل یافته است. نوسانات سطح دریا در محیط جزر و مدی باعث بروز تغییرات شدید رخساره‌ای در این زون گردیده به‌طوری که این زون که غالباً به‌عنوان یک زون غیرمخزنی و جداکننده زون‌های G در بالا و I در پایین می‌باشد، از لحاظ مخزنی خصوصیات متفاوتی از خود نشان می‌دهد. مقدار ضخامت متوسط این زون ۴۱ متر بوده و تخلخل متوسط آن ۳ درصد است که تا حداکثر ۱۳ درصد هم می‌رسد. مقادیر اشباع آب و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن به ترتیب برابر با ۵۶ درصد و ۰/۰۶ است.

• زون I<sub>11</sub>

این زون شامل آهک‌های بیوکلاست به همراه خرده‌های رودیستی پراکنده در آن (متعلق به محیط دریایی کم‌عمق و پایدار) است. این زون نیز با ضخامت متوسط ۵۳ متر از زون‌های مخزنی به‌شمار می‌رود که تخلخل متوسطی در حدود ۵/۸ درصد و اشباع آب متوسط ۴۷/۶ دارد. همچنین نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن ۰/۲۲ است.

• زون I<sub>12</sub>

این زون شامل گرینستون- پکستون بوده که اجزای اصلی آن شامل فرامینیفرهایی نظیر میلیولید و پلویید است. مقدار ضخامت متوسط این زون ۶۱ متر بوده و تخلخل متوسط آن ۱۰ درصد که تا حداکثر ۱۹/۵ درصد نیز می‌رسد. مقادیر اشباع آب و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن به ترتیب برابر با ۳۷/۷ درصد و ۰/۲۹ است.

• زون I<sub>2</sub>

غالباً از آهک‌های گرینستون- پکستون تشکیل شده است. مقدار ضخامت متوسط این زون ۹۹ متر و تخلخل متوسط آن ۹/۴ درصد است که تا حداکثر ۲۰ درصد نیز می‌رسد. مقادیر اشباع آب و نسبت ضخامت خالص به ناخالص در آن به ترتیب برابر با ۴۶/۸ درصد و ۰/۱۴ است.

• زون J

پایین‌ترین حد سازند سروک است. این زون با ضخامت تقریبی ۱۱۷ متر شامل وکستون‌های سخت و متراکم است که با تخلخل زیر ۳ درصد فاقد هرگونه خواص مخزنی است.

سازند ایلام					سازند سروک										عمق عل (m)		
Z-A	Z-B	Z-C			Z-D	Z-E		Z-F		Z-G		Z-H	Z-I			Z-J	سازند عمقی
		C-1	C-2	C-3		E-1	E-2	Z-F1	Z-F2	Z-G1	Z-G2		Z-I1	Z-I2	Z-I2		
۳۳۱۸	۳۳۴۰	۳۳۵۴	۳۳۹۰	۳۴۵۰	۳۵۱۱	۳۵۶۵	۳۶۵۹	۳۷۶۵	۳۸۲۵	قرائت نشده						۳۸۲۰	
۳۳۴۵	۳۳۵۶.۵	۳۳۶۶.۵	۳۴۰۷	۳۴۵۵	۳۵۱۹	۳۵۶۱	۳۶۷۳	۳۷۸۲	۳۸۵۵	۳۹۲۶	۳۹۹۹	۴۰۷۲.۵	۴۱۰۷.۵	۴۱۵۸	۴۲۲۶.۵	قرائت نشده	۴۲۷۶

شکل (۳-۵): عمق قرارگیری زون‌ها در دو سازند ایلام و سروک در چاه‌های ۳۹۷ و ۴۸۸ میدان مورد مطالعه

### ۳-۵ مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی

اولین قدم برای ساخت مدل ژئومکانیکی، آماده کردن و طبقه‌بندی داده‌های ورودی مورد نیاز و در دسترس می‌باشد. در این مرحله تمامی اطلاعات مرتبط با مدل ژئومکانیکی جمع‌آوری شده و در نهایت خصوصیات ژئومکانیکی توسط مدل پیش‌بینی می‌گردد. استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، نگارهای چاه، داده‌های حفاری (گزارش‌های روزانه حفاری، نگار گل و ...)، نگارهای تصویری، آزمایش‌های درون‌چاهی، داده‌های آزمایشگاهی و فشار منفذی برای ساخت مدل ژئومکانیکی ضروری می‌باشد (Afsari et al., 2009). با به‌دست آمدن خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ مدل ساخته می‌شود و با استفاده از آزمایش‌های مکانیک سنگی و درون‌چاهی مدل کالیبره می‌گردد. به‌طور کلی مراحل اصلی ساخت مدل ژئومکانیکی را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

- 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).

مطابق جدول (۳-۲)، نگارها و داده‌های لازم برای ترسیم مقاطع مختلف مدل ژئومکانیکی نشان داده شده است. در ادامه، نحوه تخمین پارامترهای ژئومکانیکی شامل پارامترهای الاستیک، مقاومتی و

تنش‌های برجا در ۲ چاه مورد مطالعه تشریح و نتایج به‌دست آمده نشان داده می‌شود.

جدول (۲-۳): داده‌های لازم برای ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی (Plumb et al., 2000)

نوع مقطع	نگارهای مورد نیاز	سایر داده‌ها
چینه‌شناسی	نگار اشعه گاما، چگالی، مقاومت، سرعت امواج فشاری ( $V_c$ )	خرده‌های حفاری، چاه‌پیمایی، چینه‌شناسی
فشار منفذی ( $P_p$ )	سرعت امواج فشاری، نگارهای مقاومت، Check-shot survey	اختلاف سرعت در داده‌های لرزه‌ای، گزارش‌های روزانه حفاری Formation integrity test
تنش قائم ( $\sigma_v$ )	چگالی حجمی	خرده‌های حفاری
تنش افقی حداقل ( $\sigma_h$ )	سرعت امواج فشاری و برشی ( $V_c$ ) و Wireline stress tool، ( $V_s$ )	فشار منفذی، آزمون تزریق، آزمون تزریق پیشرفته، آزمون ریزترک‌ها، گزارش‌های روزانه Step-rate injection حفاری tests
تنش افقی حداکثر ( $\sigma_H$ )	نگارهای تصویری، مدل تنش چاه	مقاومت سنگ، مدل تنش چاه، $\sigma_H, P_p$
راستای تنش‌ها	نگارهای کالیپر، نگارهای تصویری Oriented Velocity Anisotropy	نقشه‌های ساختاری، داده‌های سه‌بعدی لرزه‌نگاری
پارامترهای الاستیک: مدول الاستیسیته ( $E$ )، مدول برشی ( $G$ )، مدول حجمی ( $K$ )، نسبت پواسون ( $\nu$ )	نگارهای صوتی ( $V_c$ ) و ( $V_s$ )، چگالی حجمی	آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه، خرده‌های حفاری
پارامترهای مقاومتی سنگ: مقاومت فشاری تک‌محوره ( $UCS$ )، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک ( $\phi$ )	نگارهای صوتی ( $V_c$ ) و ( $V_s$ )، چگالی حجمی، چینه‌شناسی	آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه، خرده‌های حفاری
مکانیسم شکست	نگارهای تصویری، نگارهای کالیپر	گزارش‌های روزانه حفاری، چاه‌پیمایی

### ۳-۶ مدل ژئومکانیکی چاه‌ها در میدان نفتی مورد مطالعه

در این تحقیق مدل‌سازی ژئومکانیکی برای چاه‌های نفتی میدان مورد مطالعه، به‌منظور آگاهی از وضعیت تنش‌ها و پارامترهای ژئومکانیکی در اطراف دیواره چاه صورت گرفته است.

در گام اول داده‌های مختلفی از چاه‌های مورد نظر جمع‌آوری شده است. این داده‌ها شامل نگارهای پتروفیزیکی، داده‌های مربوط به اندازه‌گیری آزمایشگاهی فشار منفذی (RFT)<sup>۱</sup>، نگار تصویری و داده‌های حاصل از اندازه‌گیری تنش‌های اصلی با انجام تست نشت گسترده بوده است. گام‌های دیگر شامل تخمین پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ، محاسبه تانسور تنش، فشار منفذی و کالیبره کردن آن‌ها با نتایج تست‌های درون‌چاهی بوده که در ادامه توضیح داده می‌شود.

### ۳-۶-۱ پارامترهای الاستیک سنگ

مهم‌ترین پارامترهای الاستیک سنگ که در ساخت مدل ژئومکانیکی کاربرد دارند، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، مدول برشی و مدول حجمی هستند. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند (Zoback, 2010; Archer and Rasouli, 2012):

$$E_{dyn}(GPa) = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۱-۳)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1}{\left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1} \quad (۲-۳)$$

در این روابط  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی بر حسب (ft/ $\mu$ s)،  $\rho$  چگالی بر حسب (gr/cm<sup>3</sup>)،  $\Delta t_c$  و  $\Delta t_s$  به ترتیب زمان گذر امواج فشاری و برشی در سنگ بر حسب (ft/ $\mu$ s)، ورودی‌های اصلی برای محاسبه مدول الاستیسیته و نسبت پواسون هستند. با مشخص شدن مدول الاستیسیته و

<sup>۱</sup> Repeat formation tester (RFT)



نسبت پواسون، سایر پارامترهای الاستیک مانند مدول برشی و حجمی را می‌توان با استفاده از روابط (۳-۳) و (۴-۳) محاسبه نمود (Zoback, 2010).

$$G_{dyn}(\text{GPa}) = \frac{E_{dyn}}{2(1 + \nu)} \quad (۳-۳)$$

$$K_{dyn}(\text{GPa}) = \frac{E_{dyn}}{3(1 - 2\nu)} \quad (۴-۳)$$

در این مطالعه برای محاسبه پارامترهای الاستیک سنگ از روابط فوق استفاده شده است. توجه به این نکته ضروری است که این روابط برای محاسبه مقادیر دینامیکی الاستیسیته سنگ استفاده می‌شوند. مقادیر دینامیکی به دست آمده از این روابط نسبت به مقادیر استاتیکی که از آزمایش به دست می‌آیند مقدار بزرگتری را نشان می‌دهند. دلیل این تفاوت می‌تواند وجود سیال منفذی باشد. موج صوتی در شرایط وجود فشار منفذی برداشت می‌گردد، درحالی که نتایج آزمایشگاهی در شرایط زهکش حاصل می‌شوند. اگرچه سیال منفذی به تنهایی نمی‌تواند دلیل تفاوت زیاد میان دو مقدار الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی باشد (King, 1983). لذا می‌بایست با معادلات مناسب، مقادیر استاتیک خصوصیات الاستیسیته را محاسبه نمود.

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 (۳-۳) آورده شده است. در این روابط  $E_{sta}$  و  $E_{dyn}$  مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بر حسب Gpa هستند.

جدول (۳-۳): روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی

شماره رابطه	رابطه	محل استفاده	مرجع
(۵-۳)	$E_{sta} = 0.4145E_{dyn} - 1.0593$	مخازن کربناته ایران	(Afsari et al., 2009)
(۶-۳)	$E_{sta} = 0.77E_{dyn} + 0.02$	سنگ آهک	(Eissa and Kazi 1988)
(۷-۳)	$E_{sta} = 0.018E_{dyn}^2 + 0.422$	سنگ آهک	(Fjaer et al., 2008)

در این تحقیق از رابطه (۸-۳) برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی استفاده شد. این رابطه از مطالعات آزمایشگاهی که شرکت ملی مناطق نفت خیز 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.

$$E_{sta} = 0.7E_{dyn} \quad (۸-۳)$$

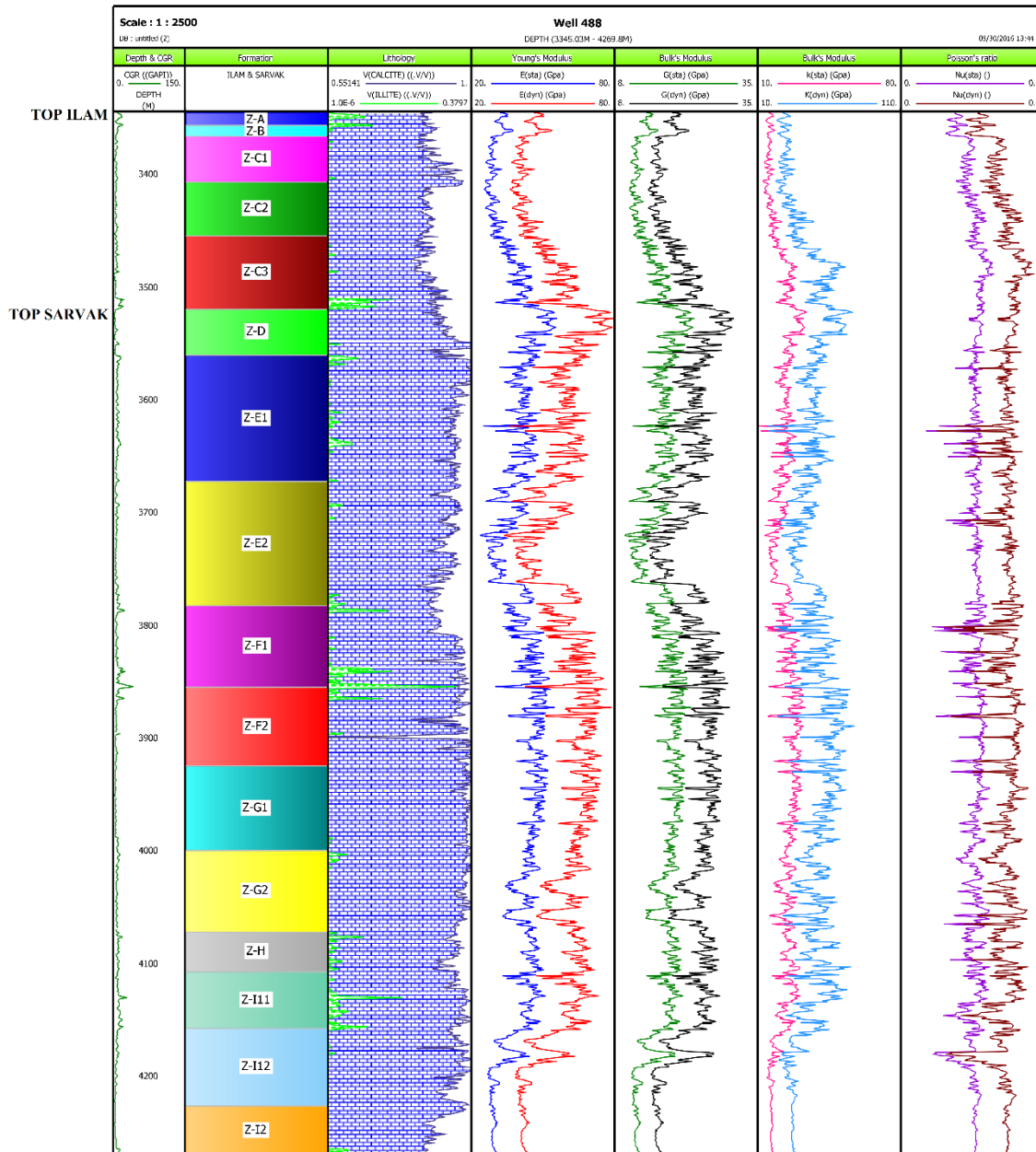
نسبت پواسون نیز از عوامل مهم در مدل سازی ژئومکانیکی می باشد که طبق تعریف، نسبت تغییرشکل عرضی به تغییرشکل طولی در اثر اعمال تنش به جسم است. در این تحقیق از رابطه (۹-۳) برای تبدیل نسبت پواسون دینامیکی به استاتیکی استفاده شد (Afsari et al., 2009):

$$\nu_{sta} = 0.7 \nu_{dyn} \quad (۹-۳)$$

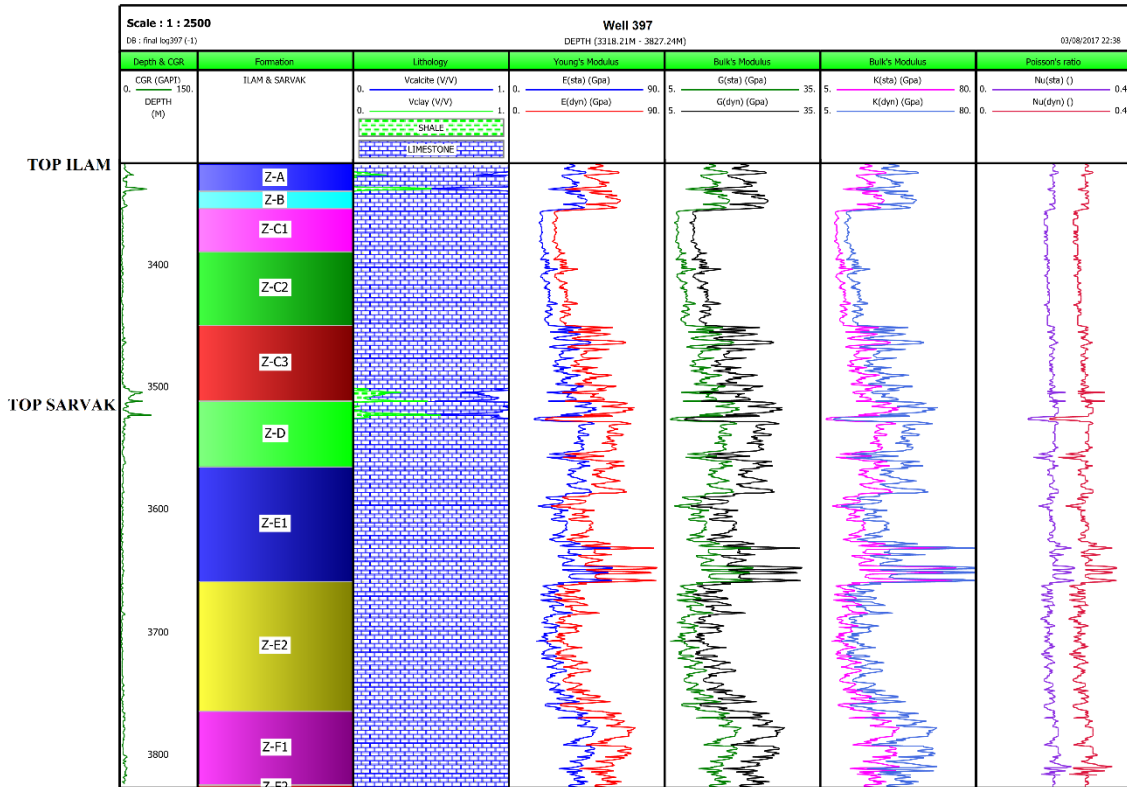
پس از محاسبه مدول یانگ و نسبت پواسون استاتیک، با استفاده از روابط (۳-۳) و (۴-۳) می توان مدول برشی و مدول حجمی استاتیک را نیز محاسبه کرد.

در شکل های (۶-۳) و (۷-۳) می توان مقادیر محاسبه شده پارامترهای الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی سنگ را در چاه های ۴۸۸ و ۳۹۷ در سازندهای ایلام و سروک مشاهده کرد. ستون اول از سمت چپ شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون دوم چینه شناسی، ستون سوم لیتولوژی، ستون چهارم بیانگر مقادیر استاتیک و دینامیک مدول یانگ، ستون پنجم بیانگر مقادیر استاتیک و دینامیک مدول برشی، ستون ششم مقادیر استاتیک و دینامیک مدول حجمی و در نهایت ستون هفتم مقادیر استاتیک

و دینامیک ضریب پواسون می باشد. نتایج به دست آمده بیانگر کاهش خواص الاستیسیته سنگ در نواحی شیلی می باشد. همان طور که ملاحظه می شود مقادیر استاتیکی مدول ها کمتر از مقادیر دینامیکی آن ها است.



شکل (۳-۶): نتیجه مدل سازی پارامترهای الاستیسیته استاتیک و دینامیک در چاه ۴۸۸



شکل (۷-۳): نتیجه مدل سازی پارامترهای الاستیسیته استاتیک و دینامیک در چاه ۳۹۷

### ۲-۶-۳ پارامترهای مقاومتی سنگ

این پارامترها شامل مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مقاومت کششی، چسبندگی ذاتی و زاویه اصطکاک داخلی می‌باشند؛ که برای ساخت مدل ژئومکانیکی محاسبه می‌گردند. با استفاده از مغزه‌ها و انجام آزمایش می‌توان این پارامترها را محاسبه کرد (Ali et al., 2003)؛ اما در صورت عدم وجود نتایج آزمایشگاهی می‌توان این پارامترها را از روابط تجربی و با استفاده از نگارهای مرتبط نیز تخمین زد. در ادامه روش تخمین هر یک از پارامترهای مذکور مورد بحث قرار گرفته و خواص مقاومتی سازندها در چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ میدان مورد مطالعه تخمین زده می‌شوند.

برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره روابط بسیاری وجود دارد که هر کدام از این روابط مطابق با شرایط سازندهایی که آزمایش روی مغزه آنها انجام شده توسعه داده شده‌اند. از آنجایی که این

تحقیق در سازندهای کربناته صورت پذیرفته است، در ادامه تنها به برخی از روابط موجود برای سنگ‌های کربناته و مخازن کربناته اشاره گردیده است. در جدول (۳-۴) تعدادی از روابط موجود جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره برای مخازن کربناته آمده است. در این روابط  $V_p$  سرعت موج فشاری بر حسب  $\text{ft}/\mu\text{s}$ ، زمان گذر موج فشاری بر حسب  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ،  $E$  مدول الاستیک بر حسب  $\text{GPa}$  و  $\text{UCS}$  مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب  $\text{MPa}$  است. تنها در رابطه‌ی (۳-۱۸) مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب  $\text{psi}$  و  $G_{\text{dyn}}$  مدول برشی دینامیکی بر حسب  $\text{MPsi}$  می‌باشد.

جدول (۳-۴): روابط تجربی جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره

شماره رابطه	رابطه	محل کاربرد	مرجع
(۳-۱۰)	$UCS = \frac{(7682)^{1.82}}{145 DTC}$	سنگ آهک و دولومیت	(Chandong et al., 2006)
(۳-۱۱)	$UCS = 2.28E_{sta} + 7.3$	شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب و سازند کربناته	(پرهیزگار، ۱۳۹۳)
(۳-۱۲)	$UCS = 9.95 V_p^{1.21}$	سنگ آهک، مارن، دولومیت، ماسه‌سنگ، دیاباز و توف	(Christaras et al., 1997)
(۳-۱۳)	$UCS = 31.54V_p - 63.7$	سنگ‌های کربناته	(Yasar et al., 2004)
(۳-۱۴)	$UCS = 4.1089E_{sta} + 2.28$	سنگ‌های کربناته ایران که گاهی شامل ورقه‌هایی از شیل می‌باشد	(Afsari et al., 2009)
(۳-۱۵)	$UCS = 570.808e^{-0.031DTC}$	سنگ‌های کربناته	(Amani et al., 2013)
(۳-۱۶)	$UCS = \frac{10^{(2.44 + \frac{109.4}{DTC})}}{145}$	سنگ‌های کربناته	(Chandong et al., 2006)

(Chandong et al., 2006)	سنگ آهک 10<UCS<300 Mpa	$UCS = 13.8 E_{dyn}^{0.51}$	(۱۷-۳)
(Nagy et al., 2011)	سنگ آهک	$UCS = 72.325 G_{dyn}^{4.5156}$	(۱۸-۳)
(Chandong et al., 2006)	سازند کریناته در خاورمیانه 30<UCS<150 Mpa 0.05< $\varphi$ <0.2	$UCS = 143e^{(-6.95\varphi)}$	(۱۹-۳)
(Chandong et al., 2006)	سازند کریناته 10<UCS<300 Mpa 0 < $\varphi$ < 0.2	$UCS = 135e^{(-4.8\varphi)}$	(۲۰-۳)
(Amani et al., 2013)	سازند کریناته	$UCS = 194.4 - 0.6072DTC - 646.1\varphi - 0.01644DTC^2 + 8.792(\varphi \cdot DTC)$	(۲۱-۳)

در این مطالعه از رابطه (۱۱-۳) که توسط شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ارائه شده است، استفاده گردید. در این رابطه مدول یانگ استاتیک بر حسب GPa بوده و مقاومت فشاری تک محوره بر حسب MPa به دست می‌آید. در نهایت با به دست آمدن مقادیر مقاومت فشاری تک محوره، می‌توان مقادیر مقاومت کششی را به دست آورد. مقاومت کششی در اکثر سازندها معادل یک‌دهم مقاومت فشاری در نظر گرفته می‌شود. در برخی موارد مانند شکاف‌های موجود از قبل، مقاومت کششی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود (Ali et al., 2003). برای محاسبه مقاومت کششی در این تحقیق از رابطه (۲۲-۳) استفاده شد (Hobbs, 1964).

$$T_s = 0.1UCS \quad (۲۲-۳)$$

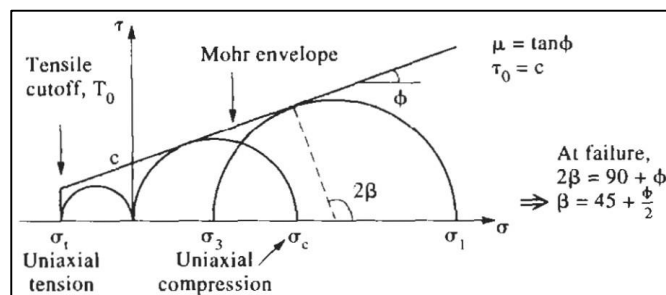
زاویه اصطکاک داخلی را می‌توان به‌وسیله حجم شیل به‌دست آمده از نگارها به‌دست آورد. برای این منظور از رابطه‌ی پلامب<sup>۱</sup> که در سال ۱۹۹۴ منتشر شده است، استفاده می‌شود (Archer and Rasouli, 2012).

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - \phi - V_{shale}) + 62.2 (1 - \phi - V_{shale})^2 \quad (23-3)$$

در این رابطه  $\phi$  تخلخل سازند و  $V_{Shale}$  حجم شیل بر حسب درصد است که می‌توان آن را با استفاده از نگار گاما (GR) از طریق رابطه (۳-۲۴) به‌دست آورد (Crain, 2012).

$$GR = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (24-3)$$

آخرین پارامتر مقاومتی سنگ، چسبندگی می‌باشد که به‌عنوان مقاومت برشی سنگ در حالتی که تنش نرمالی بر روی آن اعمال نمی‌گردد، تعریف می‌شود (Hudson, 2003). چسبندگی در واقع محل برخورد خط شکست معیار موهر-کلمب با محور تنش برشی تعریف شده است (شکل ۳-۸).



شکل (۳-۸): ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب (Hudson, 2003)

رابطه تجربی برای محاسبه مقدار چسبندگی با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی ارائه نشده است؛ اما با توجه به این که سایر پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه هستند، می‌توان با مراجعه به رابطه معیار موهر-کلمب مقدار چسبندگی را نیز از رابطه (۳-۲۵) محاسبه کرد

<sup>1</sup> Plumb

(Hudson, 2003):

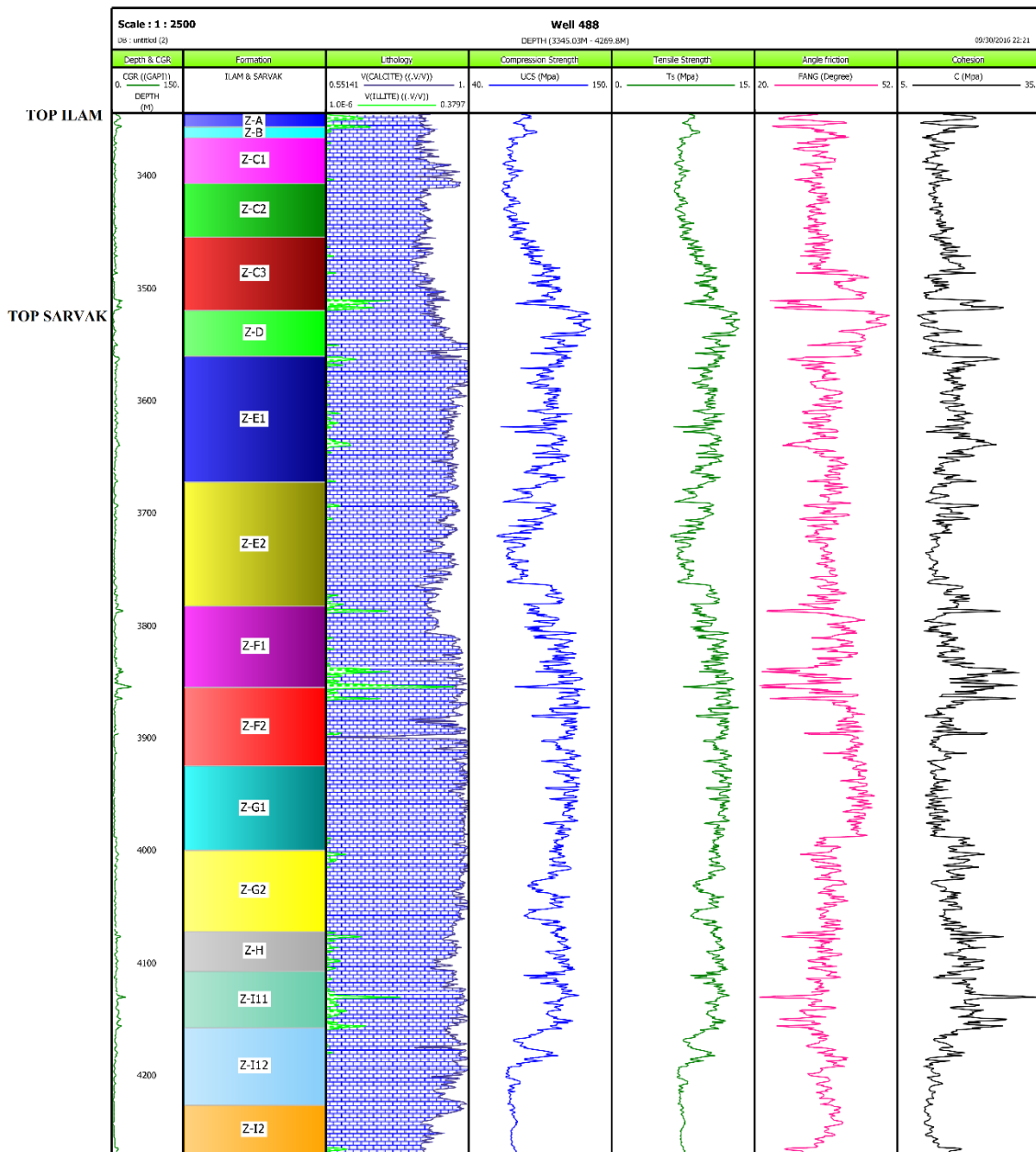
$$C = \frac{UCS (1 - \sin\phi)}{2\cos\phi} \quad (25-3)$$

اگرچه معیار موهر- کلمب در محاسبه مقادیر چسبندگی به طور نسبتاً دقیقی عمل نمی کند، لذا به دلیل عدم وجود یک رابطه جهانی برای تعیین این پارامتر، به ناچار از رابطه (۲۵-۳) در این پژوهش استفاده گردید. همچنین برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی از رابطه (۲۳-۳) استفاده شد.

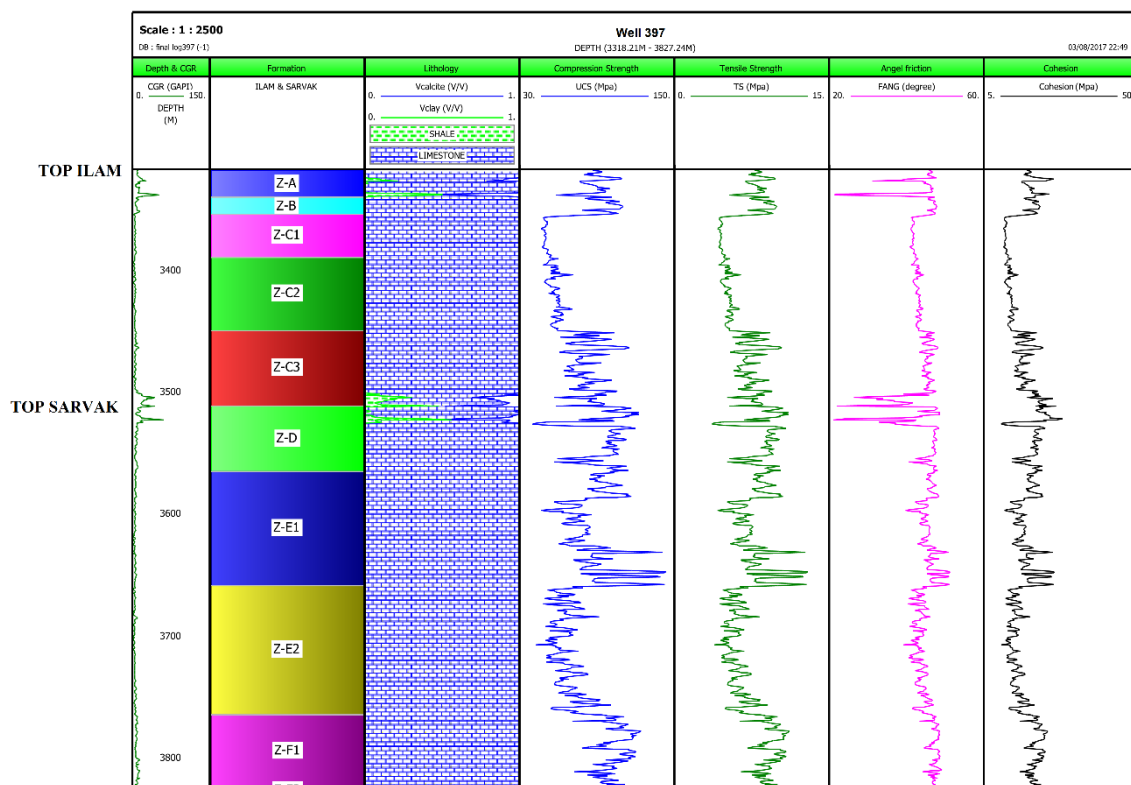
در شکل های (۹-۳) و (۱۰-۳) می توان پارامترهای مقاومتی محاسبه شده در چاه های ۴۸۸ و ۳۹۷ در سازندهای ایلام و سروک را مشاهده نمود. ستون اول از سمت چپ شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون دوم چینه شناسی، ستون سوم لیتولوژی، ستون چهارم و پنجم به ترتیب مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی بر حسب MPa، ستون ششم زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه و ستون هفتم چسبندگی بر حسب MPa است.

مطابق شکل های (۹-۳) و (۱۰-۳)، در ستون چهارم و پنجم رابطه معکوس میان رفتار اشعه گاما با مقدار مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی دیده می شود. نظر بر این که پرتو گاما بیانگر میزان حجم شیل در سنگ می باشد (Moradi et al., 2016)، کاهش مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی در مناطق شیلی توجیه پذیر است. در ستون ششم و هفتم زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نشان داده شده است. تغییرات نمودار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی رابطه ای معکوس را نشان می دهد. با توجه به این که نگار اشعه گاما به طور مستقیم بیانگر تغییرات میزان شیل در سازند است، می توان پی برد با افزایش میزان شیل در سازند، چسبندگی افزایش و اصطکاک داخلی سازند کاهش می یابد.





شکل (۳-۹): نتیجه مدل سازی پارامترهای مقاومتی در چاه ۴۸۸



شکل (۳-۱۰): نتیجه مدل‌سازی پارامترهای مقاومتی در چاه ۳۹۷

### ۳-۶-۳ فشار منفذی<sup>۱</sup>

فشار منفذی به فشار سیال موجود در فضای متخلخل سنگ گفته می‌شود که یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی ژئومکانیکی است. ژانگ در سال ۲۰۱۱ به ارایه روابط گوناگون با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی و اعتبارسنجی مطالعات با استفاده از نتایج آزمایش پرداخته است (Zhang, 2011). همچنین روابط متعددی جهت تخمین فشار منفذی با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی وجود دارد. در این میان می‌توان به روش روند عادی ایتون<sup>۲</sup> و روش‌های ضمنی هولبروک<sup>۳</sup> اشاره نمود (Detournay et al, 2005). رابطه ایتون با استفاده از زمان انتقال موج برشی و چگالی توده سنگ برای محاسبه گرادیان فشار منفذی استفاده می‌شود. عرب عامری (۱۳۹۳) با مقایسه روش‌های مختلف

<sup>1</sup> Pore Pressure

<sup>2</sup> Eaton Normal Trend

<sup>3</sup> Holbrook Explicit Methods

محاسبه فشار منفذی، استفاده از گرادیان فشار سیالات را دقیق‌ترین راه برای تخمین فشار منفذی ارزیابی کرده است. در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه‌های مورد مطالعه 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 (۳-۲۶) می‌توان فشار منفذی را محاسبه نمود (Zhang, 2011).

$$P_2 = P_1 + \rho_f g(Z_2 - Z_1) \quad (۳-۲۶)$$

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 (۳-۵) 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 (۳-۲۶) فشار منفذی در چاه‌ها تخمین زده شده است. در این رابطه مقدار گرادیان نفت برابر با ۰/۳۵ psi/ft در نظر گرفته شد. به‌علاوه مقادیر محاسبه شده با استفاده از نتایج به‌دست آمده از آزمایش RFT<sup>۱</sup> (گزارش حفاری شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۵؛ ۱۳۸۸) کالیبره شدند. در ادامه نتایج محاسبه فشار منفذی با این روش در شکل (۳-۱۶) نشان داده خواهد شد.

جدول (۳-۵): مقادیر عمق و فشار مبنا در سازند ایلام و سروک

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	

<sup>1</sup> Repeat Formation Tester

در تعریفی دقیق از تنش، تنش تانسوری است که چگالی نیروها را در تمام سطوح از هر نقطه دلخواه توصیف می‌کند (Hudson, 2003). دانستن نوع تغییرات تنش و خصوصیات مکانیکی سنگ، یک پارامتر کلیدی جهت توسعه میادین می‌باشد. در نواحی که از نظر زمین‌شناسی پیچیده هستند، مانند نواحی گسل‌دار و یا چین‌خورده، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به ساختار زمین‌شناسی باعث می‌شود که درک بهتری برای رسیدن به اهداف ژئومکانیکی به‌وجود آید (Fernandez-Ibanez et al., 2010). برخی از مولفه‌های تنش در یک ساختار را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم به‌دست آورد؛ اما برخی دیگر را باید بر اساس روابط موجود تخمین زد. برای استفاده از تنش برجا در مدل ژئومکانیکی لازم است تا هم بزرگی و هم جهت تنش‌های اصلی شامل تنش عمودی ( $\sigma_v$ )، تنش اصلی افقی حداقل ( $\sigma_{hmin}$ )، تنش اصلی افقی حداکثر ( $\sigma_{hmax}$ ) اندازه‌گیری شوند و جهت یکی از تنش‌های افقی به‌منظور بررسی وضعیت تنش در اعماق زمین، شناسایی گردد (Landau and Zoback, 2010).

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 خواهد بود. در نهایت چنان‌چه هر دو تنش افقی بزرگ‌تر از تنش عمودی باشند، صفحات گسل در امتداد آزمون شیب گسل بر روی یک‌دیگر لغزیده و شرایط رژیم تنش معکوس<sup>۲</sup> را ایجاد می‌نمایند (Zoback et al., 2003). لذا تنش قائم، در شرایط گسل نرمال به‌عنوان تنش اصلی حداکثر، در شرایط گسل امتدادلغز به‌عنوان تنش اصلی متوسط، و در شرایط گسل معکوس به‌عنوان تنش اصلی حداقل در نظر گرفته می‌شود (جدول ۳-۶) (Landau and Zoback, 2010).

---

<sup>1</sup> Strike Slip

<sup>2</sup> Reverse Regime

جدول (۳-۶): شرایط تکتونیکی مختلف با توجه به مقادیر تنش‌های اصلی (Landau and Zoback, 2010).

تنش			شرایط
$\sigma_3$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	
$\sigma_{hmin}$	$\sigma_{hmax}$	$\sigma_v$	گسل نرمال
$\sigma_{hmin}$	$\sigma_v$	$\sigma_{hmax}$	گسل امتدادلغز
$\sigma_v$	$\sigma_{hmin}$	$\sigma_{hmax}$	گسل معکوس

عموماً در چاه دو نوع شکستگی دیده می‌شود، یکی شکستگی برشی است و دیگری شکستگی‌های القایی ناشی از حفاری. این شکستگی‌ها را به راحتی می‌توان از نگارهای تصویری به دست آمده از چاه مشاهده نمود و از آن‌ها برای تخمین بزرگی و راستای تنش‌ها استفاده کرد (Afsari et al., 2009). در ادامه روش به دست آوردن مولفه‌های تنش و جهت تنش‌های اصلی بررسی شده و سپس مقادیر تنش‌های اصلی در چاه‌های ۴۸۸ و ۳۹۷ در میدان مورد مطالعه تخمین زده می‌شود.

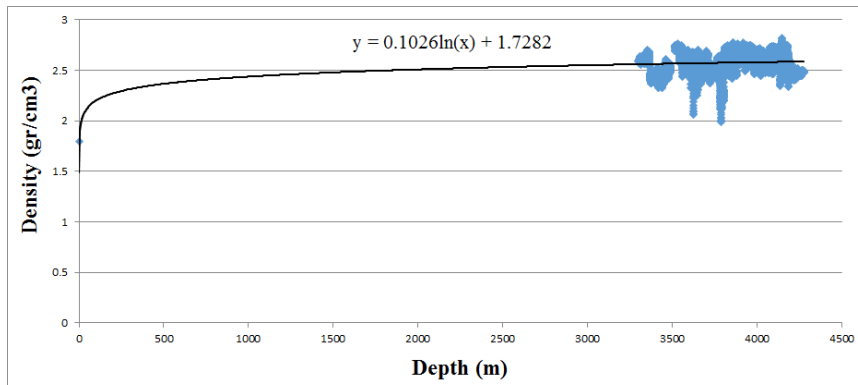
#### • تنش عمودی

تنش عمودی در هر نقطه از چاه معادل وزن روباره می‌باشد که بر اساس نگار چگالی و با استفاده از انتگرال گیری دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر مطابق رابطه (۳-۲۷) به دست می‌آید (Zoback, 2010):

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z)g dz \approx \bar{\rho}gz \quad (3-27)$$

در این رابطه  $\sigma_v$  تنش عمودی،  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط،  $g$  ثابت گرانش و  $z$  عمق از سطح زمین است.

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 ۱/۸ 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



شکل (۱۱-۳): برون‌یابی چگالی تا سطح زمین (Archer and Rasouli, 2012)

• تنش‌های افقی

برای تخمین مقادیر و جهت تنش‌های افقی در چاه قائم، روش‌های متعددی ارائه شده است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها جهت اندازه‌گیری تنش برجا، استفاده از روش‌های شکست هیدرولیکی است. به‌عنوان مثال در آزمایش نشت، فشار تزریق معادل تنش اصلی حداقل در نظر گرفته می‌شود (Fernandez-Ibanez et al., 2010). 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):

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (28-3)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1 - \nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (29-3)$$

در این روابط  $\nu$  ضریب پواسون،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $P_p$  فشار منفذی و  $\sigma_v$  تنش عمودی بر حسب MPa،  $E_{sta}$  مدول الاستیسیته استاتیک بر حسب GPa،  $\epsilon_x$  و  $\epsilon_y$  به‌ترتیب کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است.

روش کار به‌منظور تخمین تنش با روابط فوق به این‌گونه است که با جاگذاری تمام مقادیر به‌جز

مقادیر مجهول کرنش‌های تکتونیکی، مقادیر تنش افقی حداقل و حداکثر بر حسب کرنش تکتونیکی به دست می‌آید. با عددگذاری انتخابی برای مقادیر کرنش تکتونیکی، مقادیر تنش را آنقدر جابه‌جا کرده تا با شرایط شکستگی‌های کششی و برشی ثبت‌شده در نگار کالیپر و گزارش حفاری تطابق داشته باشد (Landau and Zoback, 2010). به همین منظور، می‌بایست برای پیش‌بینی وقوع شکست در دیواره چاه با وضعیت تنش‌های پیش‌بینی‌شده، از معیارهایی برای وقوع 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 (۳-۱۲) نشان داده شده است، حفر یک چاه قائم باعث می‌شود تا مسیرهای تنش در جهت‌های موازی و عمود بر دیواره چاه دچار تغییر شده و در اطراف چاه تمرکز تنش ایجاد شود. این شکل وضعیت تنش اطراف چاه قائم را تحت شرایط بارگذاری دومحوره بر اساس معادلات کرنش<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, 2010).

ابزارهای متفاوتی برای تعیین جهت تنش‌های اصلی وجود دارد که در این میان نگارهای تصویری و کالیپر چند بازویی نقش به‌سزایی دارند. بهترین روش برای تشخیص شکستگی‌های چاه نگارهای تصویری هستند. این نگارها عمق بررسی بسیار پایینی دارند. در گل حفاری پایه‌آبی از FMI<sup>۲</sup> و در گل‌های پایه روغنی از OBMI<sup>۳</sup> و UBI<sup>۴</sup> استفاده می‌شود، که به‌طور کلی OBMI برای تعیین شیب

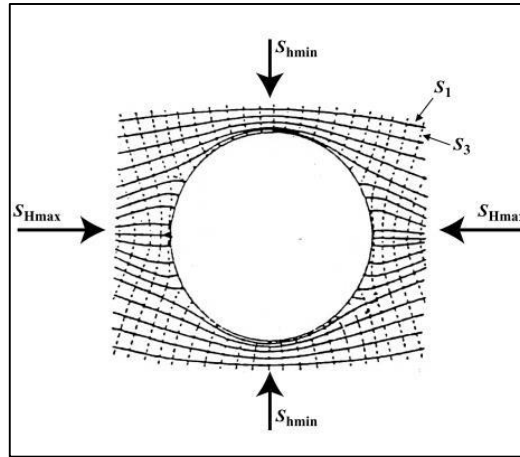
<sup>1</sup> Krisch

<sup>2</sup> Full-bore Formation Micro Imager

<sup>3</sup> Oil Base Mud Imager

<sup>4</sup> Ultrasonic Borehole Imager

ساختاری و ساختارهای رسوبی و UBI برای تعیین شکستگی‌ها مناسب است (Schulumberger, 2003).



شکل (۳-۱۲): تنش‌های اصلی اطراف یک چاه قائم تحت شرایط تنش دومیحوره بر اساس معادلات کرش (Zoback, 2010)

### ۳-۶-۵ تنش در مختصات استوانه‌ای

تنش‌های اصلی در اطراف چاه با سیستم مختصات کارتزین مطرح می‌گردند. به منظور مشخص نمودن وضعیت تنش در راستای محور مختصات چاه، بهتر است که از سیستم مختصات استوانه‌ای استفاده شود. در این سیستم تنش‌ها در نقطه‌ای با مختصات  $r, \theta, z$  با  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}$  نشان داده می‌شوند. این تنش‌ها در یک صفحه عمود بر محور  $z$  در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده‌اند. روابط بین تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای و مختصات کارتزین به صورت زیر است:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (۳-۳۰)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (۳-۳۱)$$

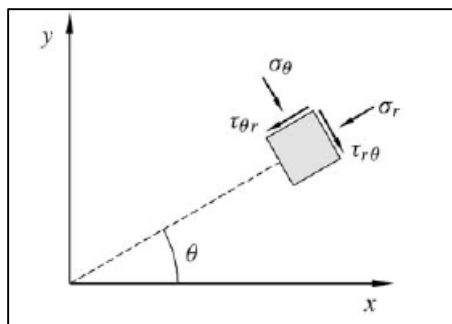
$$\sigma_z = \sigma_z \quad (۳-۳۲)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (۳-۳۳)$$



$$\tau_{rz} = \tau_{xz} \cos\theta + \tau_{yz} \sin\theta \quad (34-3)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{yz} \cos\theta - \tau_{xz} \sin\theta \quad (35-3)$$



شکل (۳-۱۳): 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:

$$\sigma_r = P_W \quad (36-3)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_W \quad (37-3)$$

$$\sigma_z = \sigma_V - 2\theta(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad (38-3)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \tau_{rz} \quad (39-3)$$

معادله (۳-۳۷) نشان می‌دهد که تنش مماسی در دیواره چاه بین یک مقدار حداکثر و حداقل تغییر می‌کند که مقدار حداکثر در جهت تنش افقی حداقل و مقدار حداکثر در جهت تنش افقی حداکثر اتفاق می‌افتد (Fjaer et al., 2008):

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

$$\sigma_{\theta, \min} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_W \quad (41-3)$$

تحلیل 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

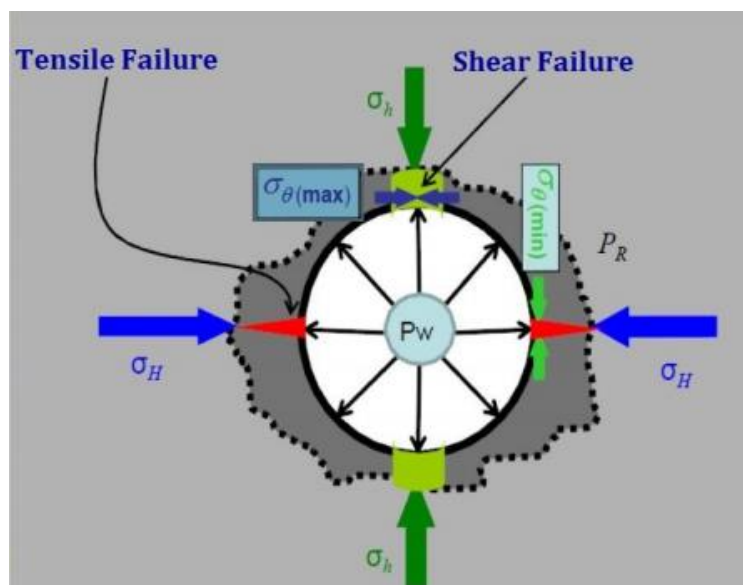
گردد. در این مطالعه برای به دست آوردن تنش‌های مماسی ( $\sigma_{\theta}$ )، شعاعی ( $\sigma_r$ ) و محوری ( $\sigma_z$ ) از روابط (۳-۳۶) تا (۳-۳۹) استفاده شده است.

### ۳-۶-۶ معیار شکست

به طور کل دو مکانیسم شکست برشی و کششی برای وقوع ناپایداری در دیواره چاه قابل مشاهده است. 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 (۳-۱۴) 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 ( $P_{mud}$ ) کم باشد، مقدار تنش مماسی افزایش یافته و به مقدار مقاومت سنگ نزدیک می‌شود. چنانچه مقدار فشار گل حفاری ( $P_{mud}$ ) از حد پایین فشار مجاز گل ( $P_{mb}$ ) کمتر شود ( $P_{mud} \leq P_{mb}$ )، 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). 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. مفهوم پنجره ایمن گل حفاری بر اساس شکستگی‌های برشی و کششی نیز در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. برای به دست آوردن حد بالا و پایین فشار گل می‌توان از معیارهای شکست مختلف استفاده کرد. اغلب معیارهای شکست از پایه شده برای سنگ، بر پایه شکست برشی مطرح شده‌اند. در این میان انتخاب معیار دوبعدی یا سه‌بعدی، خطی یا غیرخطی موضوع تحقیق محققین مختلف بوده است. اگرچه برخی از محققین استفاده از معیار دوبعدی خطی هم‌چون موهر-

کلمب را برای پیش‌بینی شرایط پایداری کافی می‌دانند (Haimson and Song, 1993). ولی برخی دیگر معتقدند تنش اصلی متوسط می‌تواند پاسخ واقع‌بینانه‌تری از وضعیت شکست سنگ داشته باشد (Al-Ajmi, 2006; Ewy, 1999). معیار موهر-کلمب به دلیل صرف‌نظر از تأثیر  $\sigma_2$  در محاسبه وزن گل حفاری بحرانی جهت پایداری چاه، نتایج خیلی محافظه‌کارانه‌ای را در بردارد (Kristiansen et al., 2000). از سوی دیگر، ژانگ<sup>۱</sup> و رادها<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۰ با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از معیارهای شکست برای پیش‌بینی فشار گل حداقل ایمن به نتایج قابل‌اطمینان معیار موگی-کلمب اشاره کرده است (Zhang and Radha, 2010). در ادامه به معرفی معیار شکست موهر-کلمب<sup>۳</sup> و موگی-کلمب<sup>۴</sup> پرداخته می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده از هر یک، تحلیل و ارزیابی می‌گردد.



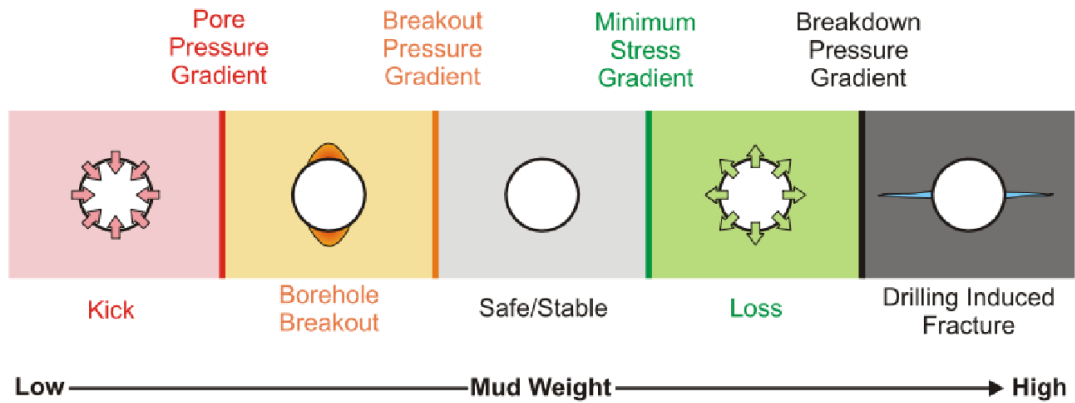
شکل (۳-۱۴): تنش‌ها و شکستگی‌های اطراف چاه (Elkington et al., 1982)

<sup>1</sup> Zhang

<sup>2</sup> Radha

<sup>3</sup> Mohr- Coulomb

<sup>4</sup> Mogi- Coulomb



شکل (۳-۱۵): شکست کششی و برشی و وزن ایمن گل حفاری (Le and Rasouli, 2012)

• معیار شکست موهر-کلمب

یکی از پرکاربردترین معیارهای شکست برشی سنگ، معیار شکست دوبعدی موهر-کلمب است. این معیار، مدلی ساده اما موثر برای تعیین مقاومت برشی سنگ ارائه می‌کند. بر طبق این معیار، پارامترهایی مانند تنش قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ در مقاومت برشی سنگ موثر هستند. هنگامی که تنش برشی وارد بر یک صفحه ( $\tau$ ) از چسبندگی 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 با در نظر گرفتن مقادیر تنش‌های حداکثر و حداقل، و با چشم‌پوشی از تأثیر تنش متوسط به پیش‌بینی شرایط شکست می‌پردازد (Simangunsong et al., 2006). فرم کلی این معیار را می‌توان به صورت رابطه (۳-۴۲) بیان کرد (Brady and Brown, 2005):

$$\tau = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (۳-۴۲)$$

که در آن  $C$  چسبندگی سنگ،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $\sigma_n$  تنش نرمال وارد بر سنگ و  $\tau$  مقاومت برشی سنگ می‌باشد. معیار موهر-کلمب بر حسب مولفه‌های تنش اصلی و در حالت ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ ) به صورت زیر قابل بازنویسی است (Brady and Brown, 2005):

$$\sigma_1 = C_o + q\sigma_3 \quad (43-3)$$

در این رابطه  $C_o$  مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ است.  $q$  نیز پارامتری است که به زاویه اصطکاک داخلی وابسته بوده و به صورت زیر تعیین می‌شود (Brady and Brown, 2005):

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (44-3)$$

مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره نیز از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است (Brady and Brown, 2005):

$$\sigma_c = C_o = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (45-3)$$

بر اساس حالت‌های مختلف تنش‌های القایی بر روی دیواره چاه و به منظور پیش‌بینی پنجره گل ایمن برای جلوگیری از وقوع شکست، حد پایین و بالای فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب مطابق جدول (3-7) و (3-8) قابل محاسبه است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

جدول (3-7): حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

وضعیت تنش	حد پایین فشار گل $P_{wb}$
$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{mb1} = (B - C_o)/q$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{mb2} = (A - C_o)/(1 + q)$
$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{mb3} = A - C_o - qB$
$A = 3\sigma_H - \sigma_h ; B = \sigma_v + 2\vartheta(\sigma_H - \sigma_h)$	

طبق روابط فوق شکست برشی زمانی رخ می‌دهد که فشار گل کمتر از فشار گل پیش‌بینی شده توسط معیار باشد (شرط شکست  $P_{mud} \leq P_{mb}$ ).

جدول (۸-۳): حد بالا فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

وضعیت تنش	حد بالا فشار گل $P_{wb}$
$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{mf1} = C_o + qE$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{mf2} = (C_o + qD)/(1 + q)$
$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{mf3} = ((C_o - E)/q) + D$
$E = \sigma_v - 2\theta(\sigma_H - \sigma_h) ; D = 3\sigma_h - \sigma_H$	

مطابق جدول (۸-۳) نیز شکست کششی در شرایطی رخ می‌دهد که فشار گل حفاری از فشار گل

پیش‌بینی شده توسط معیار بیشتر باشد (شرط شکست  $P_{mud} \geq P_{mf}$ ).

در خصوص شکست کششی در معیار موهر-کلمب، باید به این نکته توجه داشت که این معیار در پیش‌بینی شرایط شکست کششی تخمین دست بالایی داشته و نتایج به دست آمده با واقعیت تفاوت چشم‌گیری دارد. در نتیجه باید به جای فشار شکست کششی، از حد فشار شکست کششی<sup>۱</sup> مطابق رابطه (۴۶-۳) استفاده نمود (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006):

$$P_{w cut off} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_0 - T_0 \quad (46-3)$$

که در آن  $T_0$  مقاومت کششی سازند است.

فشار گل به دست آمده از این رابطه با فشار گل به دست آمده از رابطه مناسب انتخاب شده از جدول

(۸-۳) مقایسه شده و مقادیر کوچکتر به عنوان حداکثر فشار گل انتخاب می‌گردد.

#### • معیار شکست موگی-کلمب

معیار موگی-کلمب در سال ۲۰۰۵ توسط ال‌اجمی، در نتیجه ضعف‌های معیار موهر-کلمب مطرح

شده است (Al-Ajmi, 2006). موگی با انجام آزمایش‌های سه‌محوره بر روی نمونه سنگی نشان داد که

<sup>1</sup> Tensile Cut-off

تنش اصلی میانی بر روی مقاومت سنگ تأثیر به‌سزایی دارد. معیار موگی مطابق رابطه (۴۷-۳) به‌صورت زیر عنوان می‌گردد:

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{m,2}) \quad (47-3)$$

در این رابطه  $f$  تابعی از تغییرات تنش اصلی میانی یکنواخت و صعودی است. در این رابطه  $\tau_{oct}$  تنش برشی هشت‌وجهی<sup>۱</sup> و  $\sigma_{m,2}$  تنش اصلی میانی است. تنش هشت‌وجهی نیز مطابق رابطه (۴۸-۳) برابر است با:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (48-3)$$

الاجمی با تلفیق رابطه موگی با معیار موهر- کلمب،  $f$  را تابعی خطی و ساده معرفی و معیار موگی- کلمب را به‌صورت رابطه (۴۹-۳) تعریف نموده است:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (49-3)$$

از مقایسه این معیار با معیار موهر- کلمب، مقادیر  $a$  و  $b$  به‌صورت روابط (۵۰-۳) و (۵۱-۳) تعریف می‌شوند

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi \quad (49-3)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (50-3)$$

بر اساس این معیار، حد پایین و بالای فشار گل با استفاده از معیار موگی- کلمب مطابق جدول (۳-۹) و (۱۰-۳) قابل محاسبه است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

<sup>1</sup> Octahedral

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

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

همانند معیار موهر-کلمب، اگر فشار گل حفاری کمتر از فشار گل حداقل پیش‌بینی باشد، شکست

برشی به‌وقوع می‌پیوندد (شرط شکست  $P_{mud} \leq P_{mb}$ ).

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

وضعیت تنش	حد بالا فشار گل $P_{wf}$
$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{w1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3D + 2b'N) - \sqrt{J + 12(N^2 + b'DN)} \right]$
$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{w2} = \frac{1}{2}D + \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(D - 2P_o)]^2 - 3(D - 2E)^2}$
$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{w3} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3D - 2b'M) + \sqrt{H + 12(M^2 - b'DM)} \right]$
$D = 3\sigma_h - \sigma_H, E = \sigma_v - 2\vartheta(\sigma_H - \sigma_h), J = D^2(4b'^2 - 3) + (E^2 - DE)(4b'^2 - 12),$ $N = a' + b'(E - 2P_o), M = N + b'D, a' = 2c \cos \varphi, b' = \sin \varphi$	

در اینجا نیز شرط وقوع شکست کششی زمانی است که فشار گل حفاری از فشار گل پیش‌بینی شده

بیشتر گردد (شرط شکست  $P_{mud} \geq P_{wf}$ ).

در ادامه نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌بینی پنجره ایمن گل حفاری هر یک از معیارهای شکست فوق

برای چاه‌های مورد مطالعه نشان داده خواهد شد.



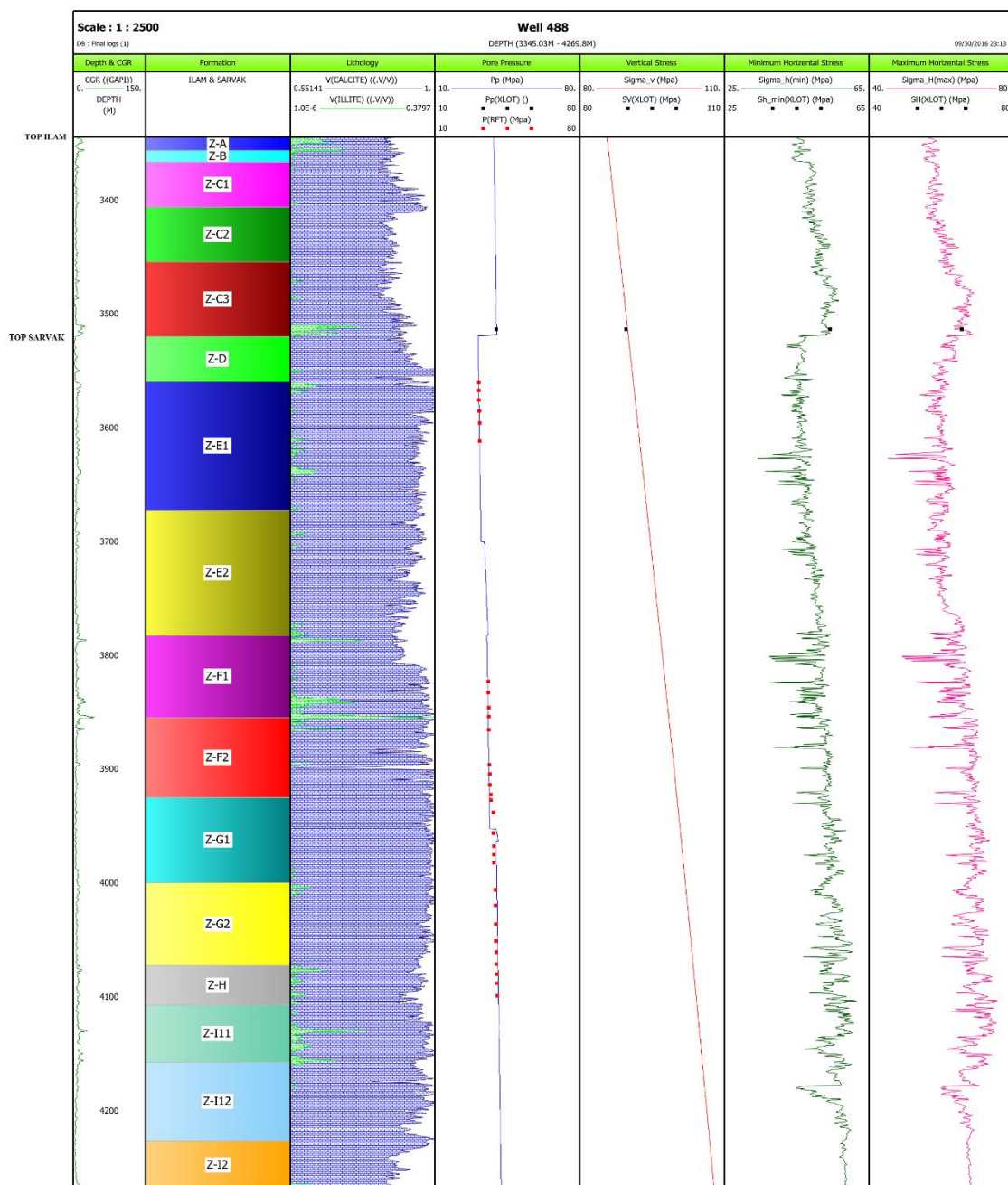
### ۷-۶-۳ تنش‌های برجا در چاه‌های مورد مطالعه

همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، مقدار و جهت تنش‌های برجا از جمله مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها برای عملیات شکست هیدرولیکی هستند. مقدار تنش عمودی و تنش‌های افقی از روابط (۳-۳) تا (۲۷) در چاه‌های ۴۸۸ و ۳۹۷ تخمین زده شده است. سپس مقادیر تخمینی با استفاده از آزمایش‌های درون‌چاهی و یا نگارهای تصویری کالیبره می‌شوند. 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 چاه ۳۹۷ با استفاده از نگارهای تصویری کالیبره شدند.

#### • 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. در شکل (۳-۱۶) نتایج محاسبه تنش‌ها در چاه ۴۸۸ و کالیبره کردن آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایش XLOT نشان داده شده است. در این شکل، ستون اول از سمت چپ شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون دوم چینه‌شناسی، ستون سوم لیتولوژی، ستون چهارم مقادیر فشار منفذی به‌دست آمده از رابطه (۳-۲۶) را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش RFT با نقاط قرمز بر روی نمودار مشخص شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، میان نتایج اندازه‌گیری شده و محاسبات انجام شده همبستگی مناسبی برقرار است. در ستون‌های پنجم تا هفتم مقادیر تنش به‌دست آمده از روابط پروالاستیک نشان داده شده است. آنچه که در این شکل‌ها مشخص می‌باشد همخوانی مناسب مقادیر تنش اندازه‌گیری شده از روابط با مقادیر تنش حاصل از آزمایش XLOT است. همچنین با مقایسه تنش‌های برجا می‌توان گفت که شرایط تکتونیکی منطقه از نوع نرمال می‌باشد. از سویی دیگر، کاهش مقادیر تنش‌های افقی در مناطق شیلی مشهود است؛ به‌علاوه فشار منفذی سازند در همه‌ی اعماق، به‌نسبت تنش عمودی مقادیر کمتری دارد که حاکی از شرایط

همه جانبه فشار منفذی می باشد.

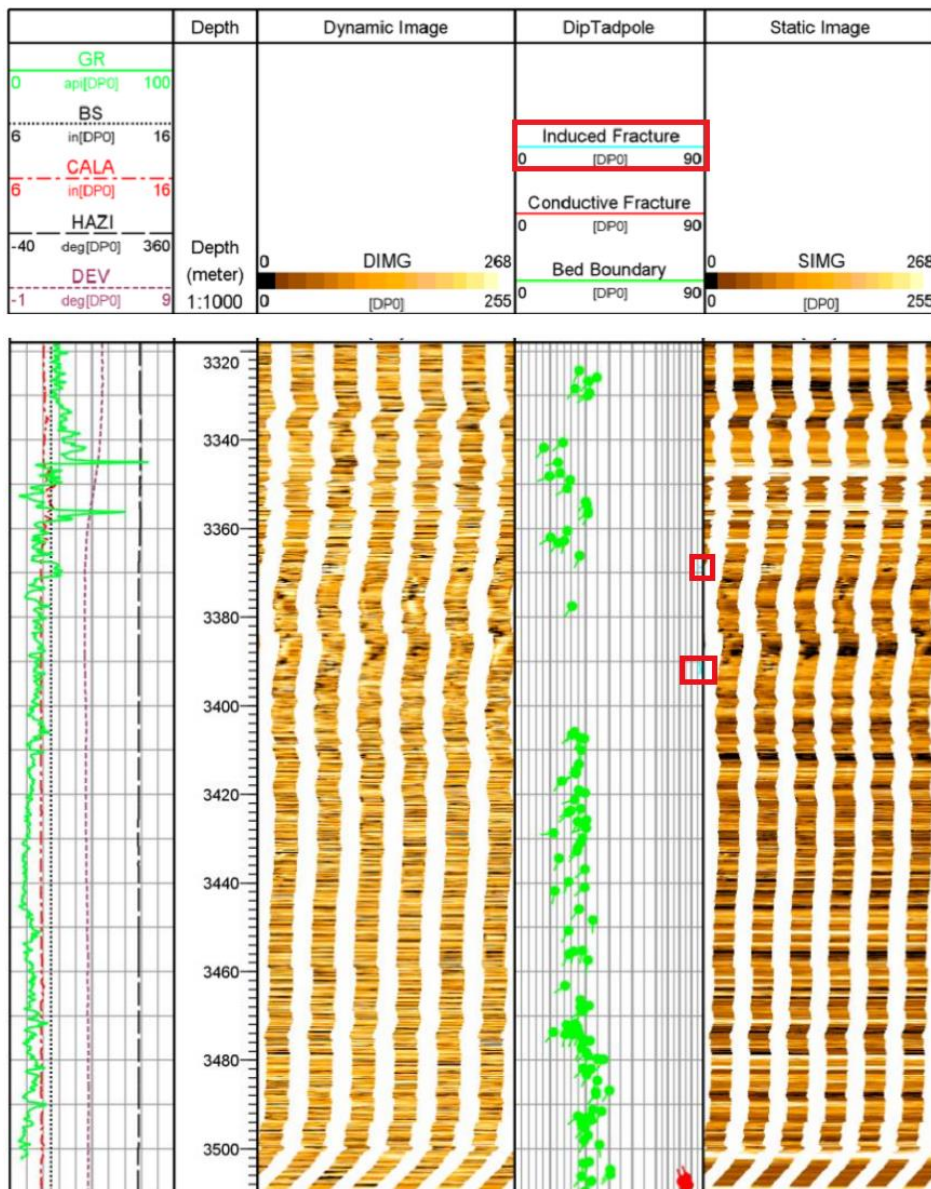


شکل (۳-۱۶): نتیجه مدل سازی تنش های برجا و فشار منفذی با نتایج حاصل از تست XLOT و RFT در چاه ۴۸۸

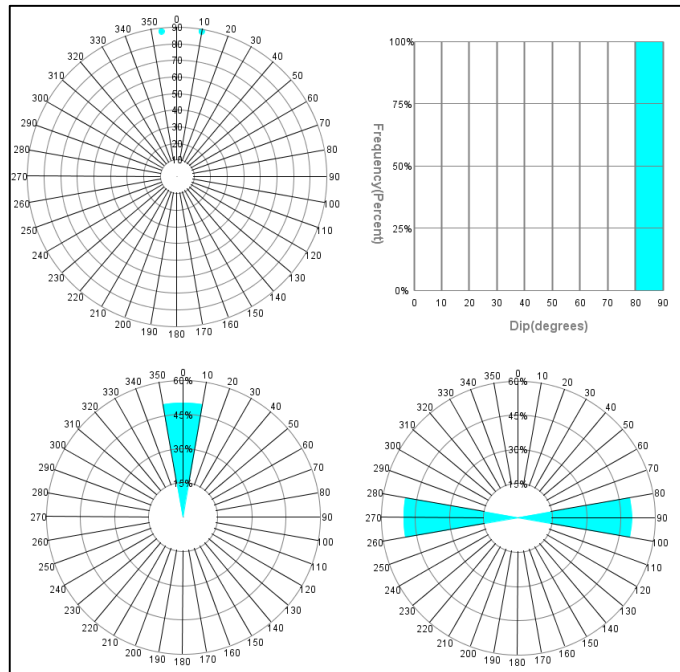
در این چاه نگار تصویری OMRI در بازه ۳۳۱۸ تا ۳۵۱۰ متری موجود است. دو شکستگی القایی<sup>۱</sup>

<sup>1</sup> Induced Fracture

(شکستگی کششی) در اعماق ۳۳۶۹ و ۳۳۹۳ متری مشاهده شد که در شکل (۳-۱۷) با مستطیل قرمز رنگ مشخص گردیده‌اند. همچنین اطلاعات این شکستگی‌ها نیز در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این شکستگی دارای شیب ۸۰ تا ۹۰ درجه، آزیموت ۱۰ تا ۳۵۰ 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 به‌صورت شرقی - غربی است.



شکل (۳-۱۷): نمایش شکستگی‌های القایی در چاه ۴۸۸ (گزارش شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۲)

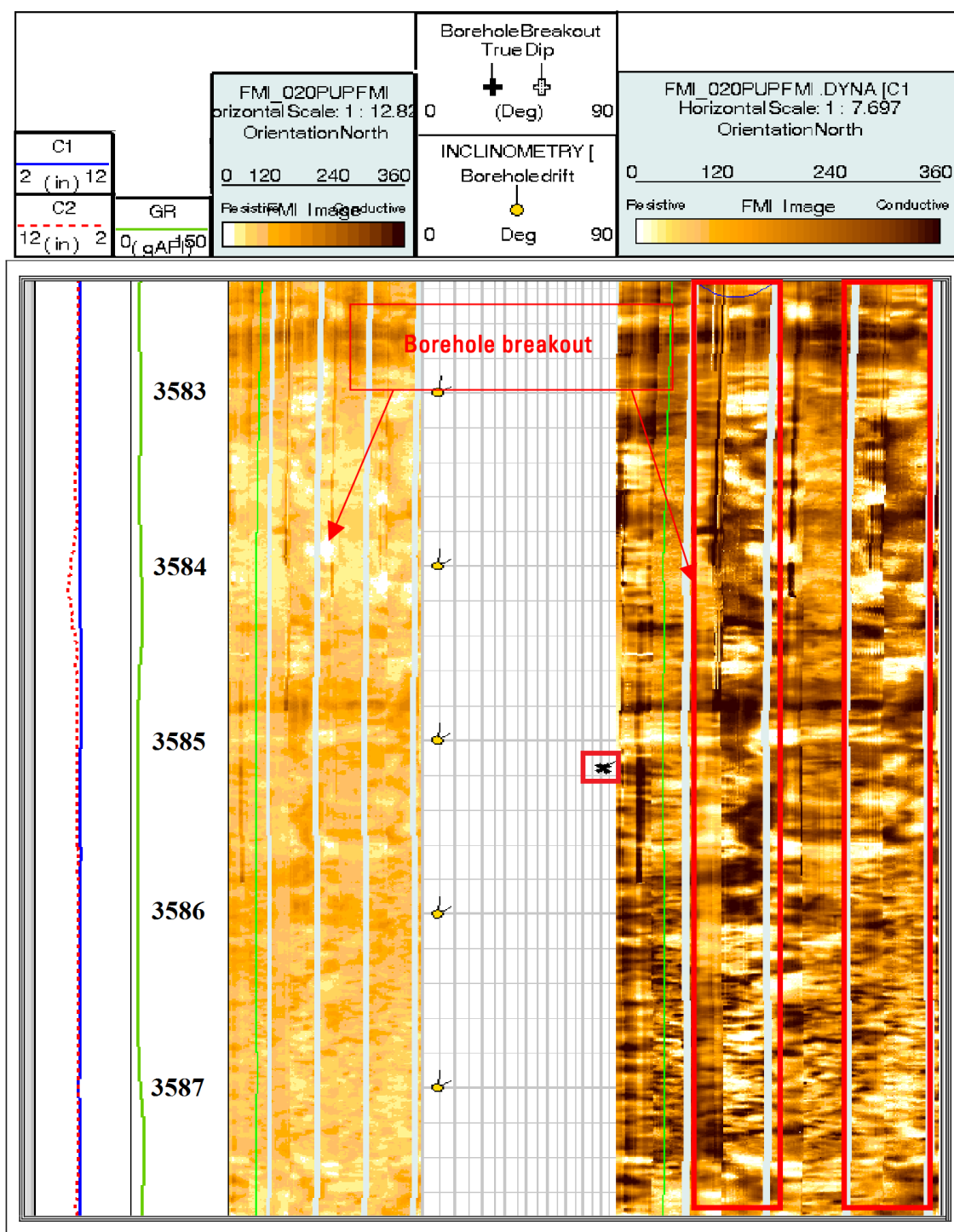


شکل (۳-۱۸): شیب، آزیموت شیب و امتداد شکستگی‌های القایی مشاهده شده در چاه ۴۸۸ (گزارش شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۲)

#### • تخمین تنش برجا در چاه ۳۹۷

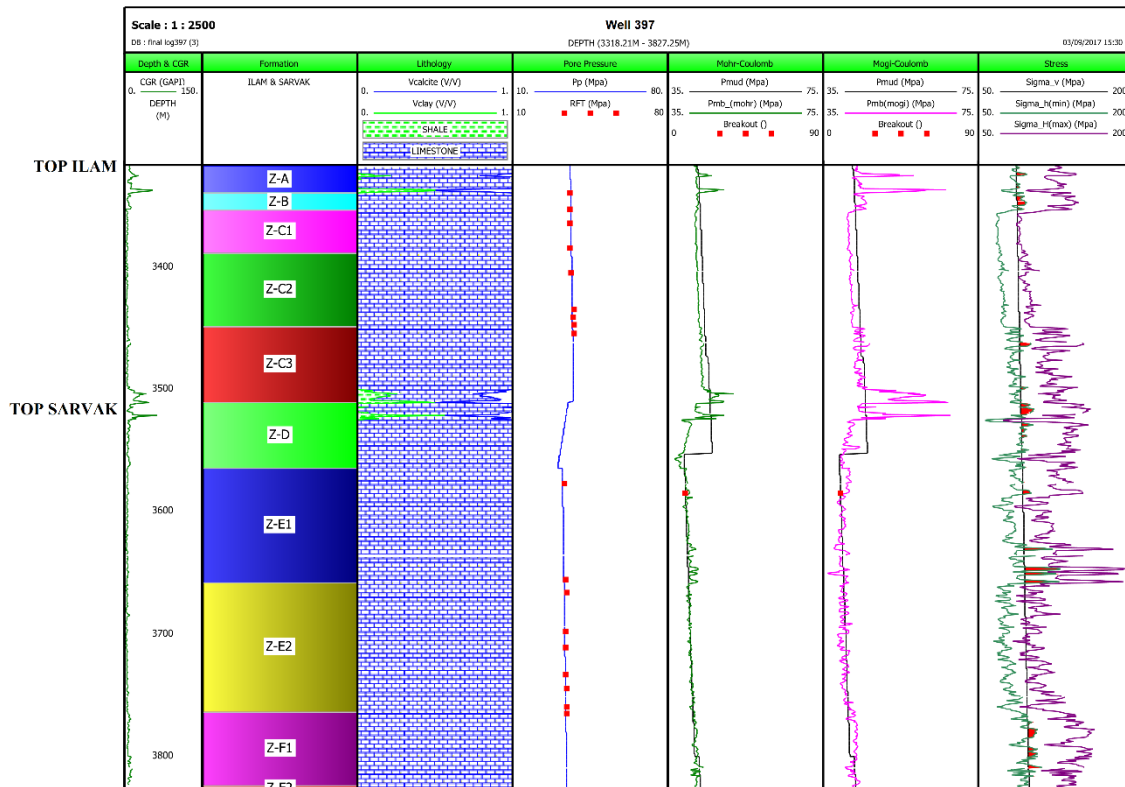
در چاه ۳۹۷ آزمایش XLOT انجام نشده است اما نگار تصویری FMI مطابق شکل (۳-۱۹) در این چاه در سازند سروک و از عمق ۳۵۵۲ تا ۳۸۳۵ متری موجود است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در این چاه تنها یک شکستگی برشی مشخص در عمق ۳۵۸۵ متری رخ داده است. بنابراین در این چاه برای تعیین دقیق‌تر مقادیر تنش و همچنین مشخص کردن جهت تنش‌های افقی از شکستگی‌های برشی مشاهده شده در نگار تصویری استفاده شد؛ بدین صورت که مقادیر کرنش تکتونیکی در روابط (۳-۲۸) و (۳-۲۹) از طریق سعی و خطا به گونه‌ای تعیین شدند 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. در شکل (۳-۲۰) نتایج محاسبه تنش‌ها در چاه ۳۹۷ و کالیبره کردن آن‌ها با استفاده از معیارهای شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب نشان داده شده است. در این شکل، ستون اول از سمت

چپ شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون دوم چینه‌شناسی، ستون سوم لیتولوژی، ستون چهارم مقادیر فشار منفذی به دست آمده از رابطه (۳-۲۶) را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از آزمایش RFT با نقاط قرمز بر روی نمودار مشخص شده است. در این چاه نیز همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، میان نتایج اندازه‌گیری شده و محاسبات انجام شده همبستگی مناسبی برقرار است. 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 این شکل ملاحظه می‌شود که هر دو معیار موهر- کلمب و معیار شکست موگی- کلمب توانسته‌اند شکست برشی رخ داده را به خوبی پیش‌بینی کنند. در ستون هفتم نیز مقادیر تنش‌های عمودی و افقی آمده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود رژیم تنش در این چاه به‌طور عمده به صورت امتداد- لغز و در برخی بازه‌ها معکوس (نواحی قرمز رنگ) است.



شکل (۳-۱۹): نمایش شکستگی برشی در چاه ۳۹۷ (گزارش شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۶)

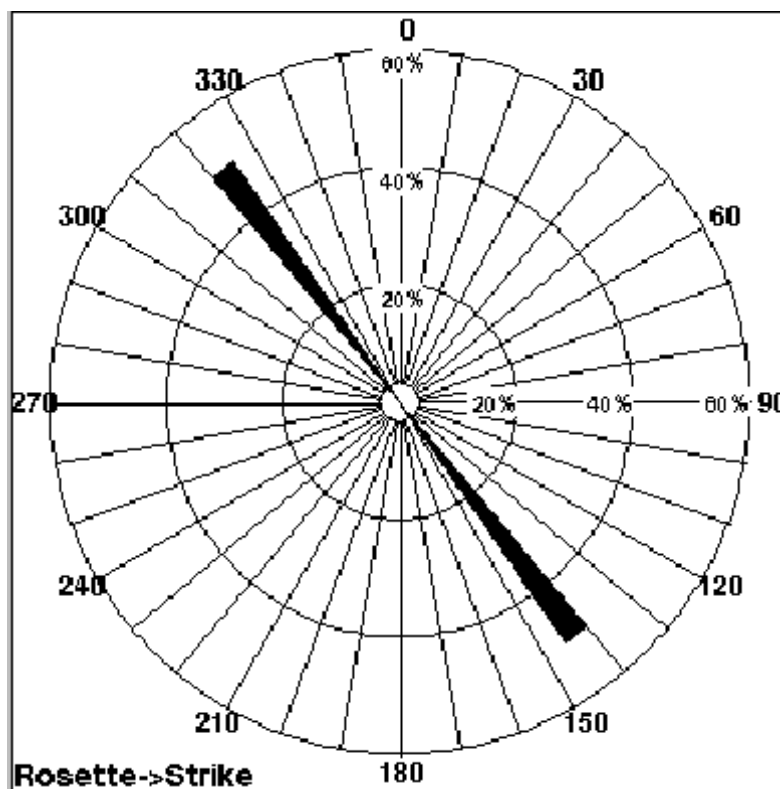




شکل (۳-۲۰): نتیجه مدل سازی تنش های برجا و فشار منفذی با نتایج حاصل از معیارهای شکست و RFT در چاه ۳۹۷

اطلاعات شکستگی برشی مشخص شده در عمق ۳۵۸۵ متری در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است.

با توجه به این شکل امتداد این شکستگی N37W بوده که مطابق با جهت تنش افقی حداقل و امتداد کلی چین خوردگی های زاگرس است.



شکل (۳-۲۱): امتداد شکستگی برشی رخ داده در چاه ۳۹۷ (گزارش شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۶)

### ۳-۶-۸ پنجره ایمن گل حفاری

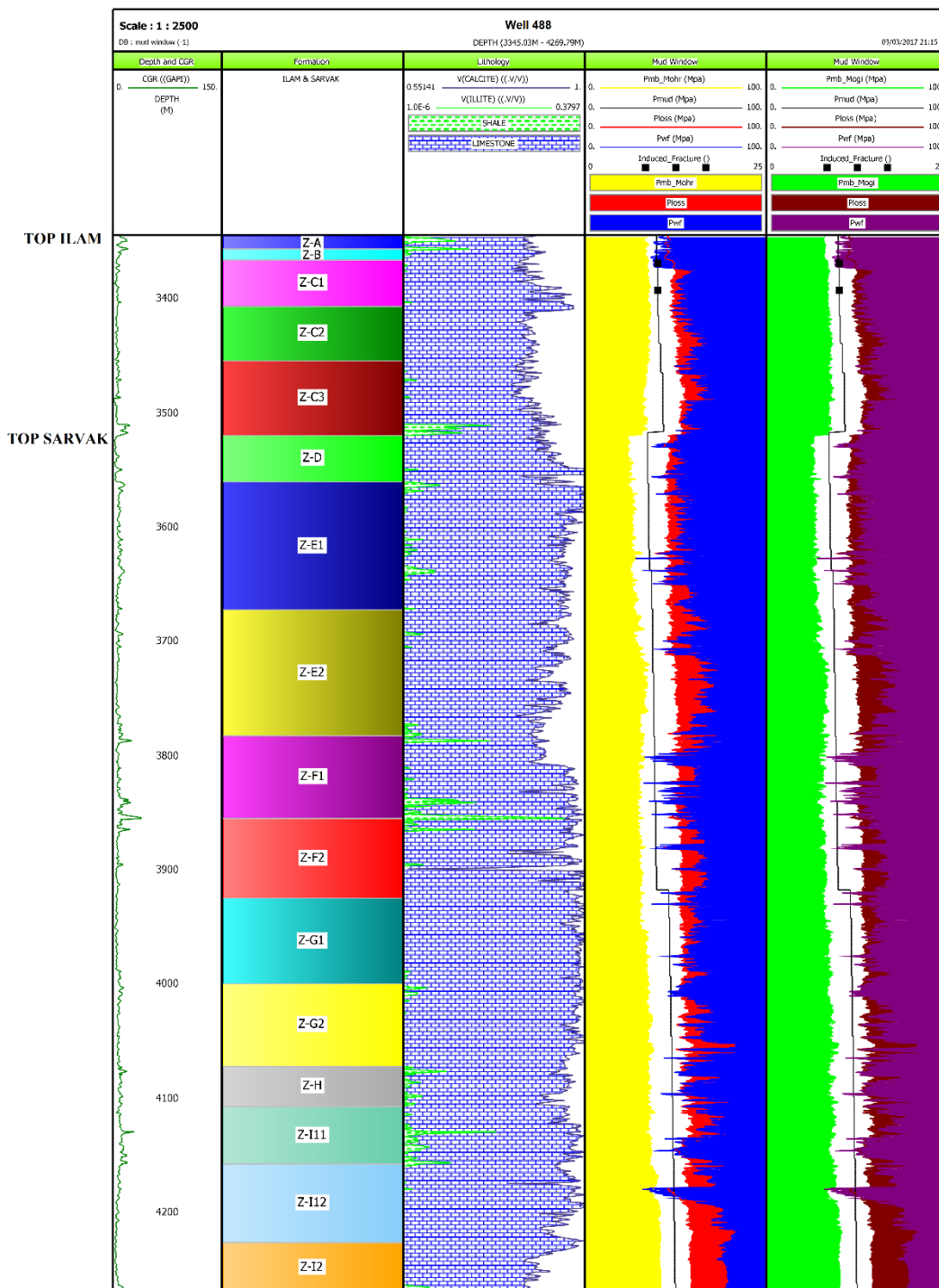
مفهوم پنجره ایمن گل در طی یک فرآیند حفاری، در حقیقت اختلاف بین حداقل و حداکثر وزن گلی است که جهت جلوگیری از ناپایداری چاه در یک عمق مشخص تعیین می‌شود. حد پایین این محدوده وزنی از گل است که به ازای آن چاه بدون گسیختگی شدید برشی پایدار بماند. حد بالایی پنجره گل نیز وزن گلی است که به ازای آن گسیختگی کششی و متعاقباً هرزروی گل در دیواره چاه اتفاق نیفتد (صائمی، ۱۳۹۲). به دست آوردن فشار مناسب گل حفاری یا پنجره گل ایمن، گامی اساسی در تعیین پایداری دیواره چاه خواهد بود. در این راستا می‌توان از معیار شکست‌های مختلف جهت به دست آوردن فشار مناسب گل استفاده نمود. در این تحقیق به منظور طراحی پنجره ایمن گل حفاری از دو معیار شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب استفاده شده است. جهت کالیبره کردن این مدل به دلیل عدم وجود نگار کالیپر در چاه ۴۸۸، از شکستگی‌های مشاهده شده در نگار تصویری چاه مذکور



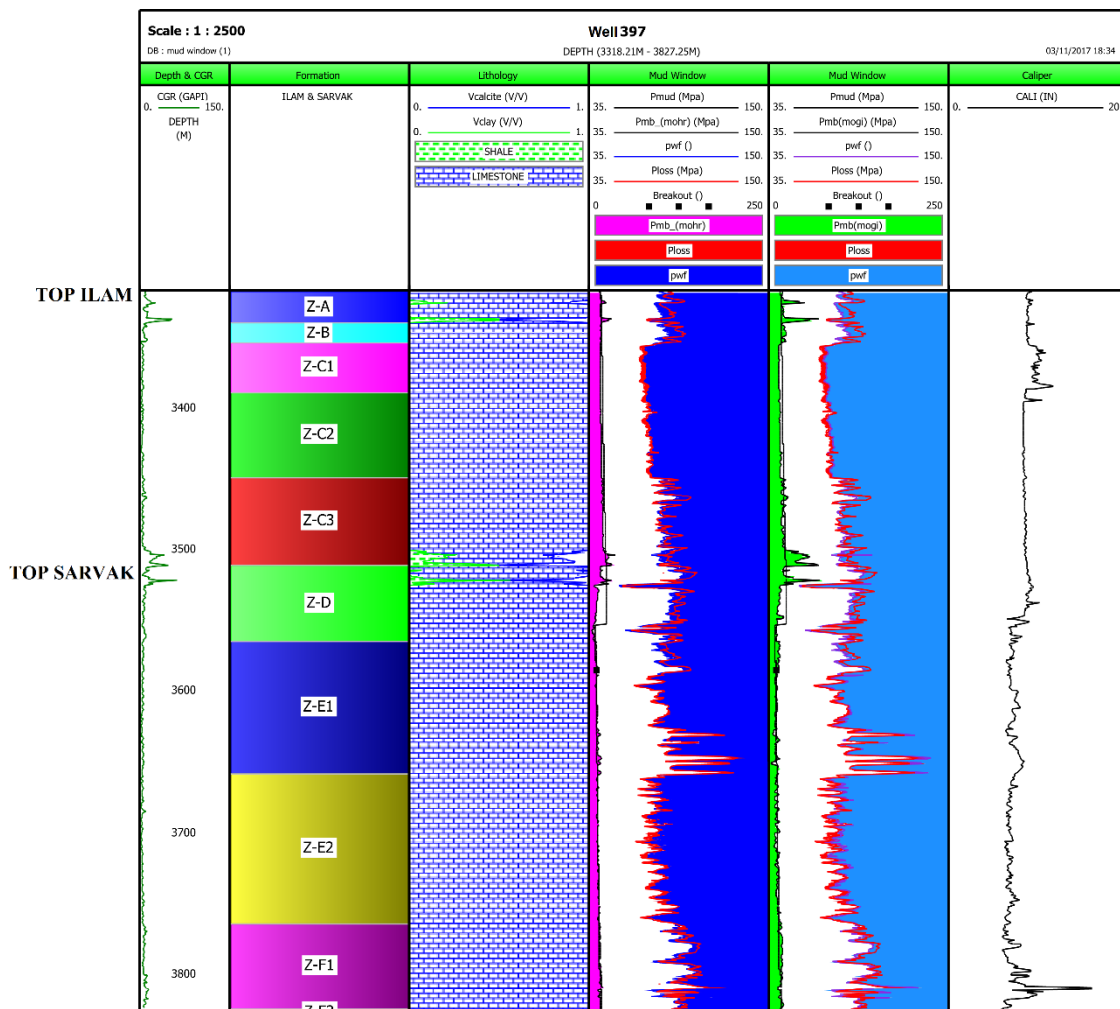
استفاده گردید. همچنین در چاه ۳۹۷ نیز از هر دو نگار کالیپر و تصویری جهت کالیبره کردن مدل استفاده شد. نتایج حاصل از طراحی پنجره گل ایمن برای دو چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ به ترتیب در شکل‌های (۲۲-۳) و (۲۳-۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود ستون اول از سمت چپ شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون دوم چینه‌شناسی، ستون سوم لیتولوژی، ستون چهارم و پنجم به ترتیب پنجره ایمن گل حفاری پیش‌بینی شده از معیارهای شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب را نمایش می‌دهد.

فشار ایمن گل حداقل و حداکثر طبق پیش‌بینی معیار شکست موهر- کلمب در چاه ۴۸۸ به‌طور میانگین برابر ۳۲ و ۶۰ مگاپاسکال است؛ این در حالی است که این مقادیر برای معیار موگی- کلمب حدوداً ۳۳ و ۶۰ مگاپاسکال می‌باشد. در چاه ۳۹۷ نیز مقادیر حداقل و حداکثر طبق پیش‌بینی معیار شکست موهر- کلمب به‌طور میانگین برابر ۴۲ و ۸۳ مگاپاسکال و برای معیار موگی- کلمب تقریباً ۴۳ و ۸۳ مگاپاسکال است. همچنین میانگین فشار گل حفاری در هر دو چاه ، ۴۲ مگاپاسکال بوده است. لذا می‌توان دریافت محدوده پنجره‌های ایمن گل پیش‌بینی شده به‌وسیله دو معیار شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب نتایج قابل‌قبولی داشته‌اند.

درنهایت، هر دو معیار موهر- کلمب و موگی- کلمب با تشخیص صحیح وقوع شکستگی در سازندهای کربناته در دو چاه مذکور، که با نتایج نگار کالیپر و نگار تصویری نیز همخوانی دارد، پیش‌بینی واقع‌بینانه‌ای ارائه داده‌اند.



شکل (۳-۲۲): نتایج پیش‌بینی پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از دو معیار شکست در چاه ۴۸۸



شکل (۳-۲۳): نتایج پیش‌بینی پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از دو معیار شکست در چاه ۳۹۷

### ۷-۳ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا پس از معرفی اجمالی میدان، موقعیت چاه‌های مورد مطالعه و زون‌بندی مخزن بنگستان در میدان اهواز، مراحل و نحوه تهیه پارامترهای لازم جهت ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی تشریح شد. برای تخمین پارامترهای الاستیسیته، مقاومتی، تنش‌های برجا و فشار منفذی از روابط تجربی استفاده گردید. 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 شدند.

مقدار و جهت تنش‌های برجا از جمله مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در انتخاب لایه کاندید

برای عملیات شکست هیدرولیکی هستند. مقادیر تنش قائم با استفاده از نگار چگالی و تنش‌های افقی از روابط پوروالاستیک محاسبه گردیدند.

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 چاه ۳۹۷ از نگار تصویری برای محاسبه دقیق‌تر تنش‌ها استفاده شد. مقادیر کرنش تکتونیک در این روابط از طریق سعی و خطا و به‌گونه‌ای تعیین شد که مناطق با احتمال گسیختگی بالا با آن چه 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 هر دو معیار شکست، نتایج مطلوبی ارائه داده‌اند. همچنین مشاهده شد که رژیم تنش در این چاه به‌طور عمده امتداد-لغز است. جهت تنش افقی حداقل نیز با توجه به امتداد شکستگی‌های مشاهده‌شده در نگار تصویری تعیین شد که در این چاه جهت شکستگی برشی N37W به‌دست آمد که مطابق با امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس است.

در طراحی پنجره گل ایمن حفاری به‌دست آوردن فشار مناسب گل حفاری، نقش اساسی در تعیین پایداری دیواره چاه دارد. به‌منظور تعیین حداقل و حداکثر فشار گل از دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب استفاده گردید و مشخص شد که محدوده پنجره‌های ایمن گل پیش‌بینی شده به‌وسیله دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب در چاه‌های مورد مطالعه نتایج قابل‌قبولی داشته و در تشخیص صحیح وقوع شکستگی در سازندهای کربناته پیش‌بینی واقع‌بینانه‌ای ارائه داده‌اند.

# فصل چهارم

انتخاب چاه و لایه کاغذ جهت انجام

عملیات سنگست سیدرو لکی

بررسی وضعیت تولید چاه‌های میادین نفتی ایران نشان می‌دهد که سالانه به دلیل افت فشار طبیعی مخزن چیزی در حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ هزار بشکه در روز نفت خام از دست می‌رود. جهت بازیافت هر چه بیشتر نفت از این مخازن می‌توان از روش‌های تحریک استفاده نمود. یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین روش‌ها جهت انگیزش چاه به منظور افزایش ضریب بهره‌دهی در مخازن هیدروکربوری شکست هیدرولیکی است (Shadizadeh et al., 2009). این روش با توجه به قابلیت‌هایی که در پایدار نگه‌داشتن گذردهی شکاف دارد، به روش تحریکی استاندارد در مخازن کربناته تبدیل شده است (Zoveidavianpoor et al., 2011). دبی بالای تولید و شکاف‌های طبیعی موجود در اکثر مخازن کربناته ایران، عامل اصلی عدم توجه به این روش تحریک موثر، بوده است. مطالعات تجربی شکست هیدرولیکی در دنیا نشان می‌دهد که موفقیت در این عملیات در درجه اول به انتخاب سیستماتیک چاه و لایه کاندید وابسته است (Hashemi et al., 2013)؛ و برای این که عملیات با موفقیت در ایران انجام شود بایستی مطالعات دقیق ژئومکانیکی، تست‌های یکپارچگی چاه مانند تست نشت، تست ریزشکاف، تست کالیبراسیون و ... انجام گردد (Zoveidavianpoor et al., 2012).

مخزن بنگستان یکی از مخازن کربناته در جنوب غربی ایران است که حدود ۵ درصد از کل تولید میادین نفتی جنوب ایران را فراهم می‌کند. این مخزن به علت مقدار نفت در جای قابل توجه و همچنین تخلخل مناسب، تراوایی و ظرفیت جریانی پایین در برخی از لایه‌های تولیدی، یک گزینه مناسب جهت عملیات شکست هیدرولیکی محسوب می‌شود (Shadizadeh et al., 2009).

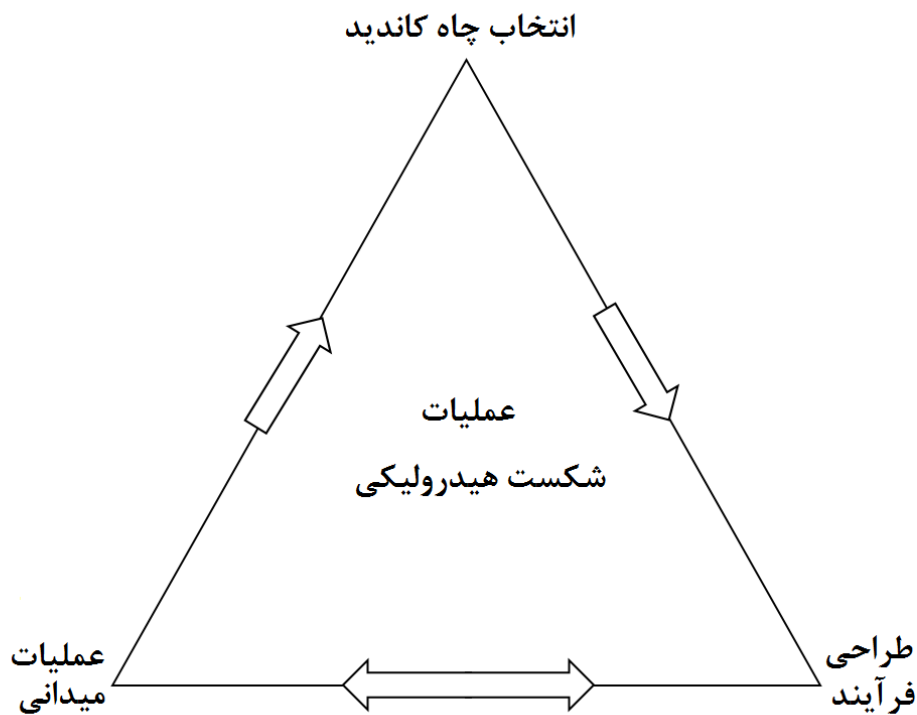
انتخاب مناسب‌ترین لایه جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی از مهم‌ترین موارد جامع شکست هیدرولیکی می‌باشد. مخصوصاً هنگامی که شانس موفقیت یا شکست عملیات تا حد زیادی وابسته به آن است. به منظور کاهش ریسک و عدم قطعیت در تصمیم‌گیری در انتخاب کاندید می‌توان از فنون ترکیب اطلاعات بهره جست.

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 می‌گردد. سپس به شناسایی و تحلیل لایه‌های مناسب با استفاده از معیارهای معرفی شده پرداخته می‌شود. در نهایت با استفاده از یکی از فنون هوشمند در ترکیب اطلاعات (روش انتگرال‌های فازی) لایه‌های کاندید اولویت‌بندی می‌گردند و نتایج به‌دست آمده نشان داده خواهد شد.

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

به‌منظور اجرای موفق عملیات شکست هیدرولیکی، انتخاب اولین چاه از اهمیت خاصی برخوردار است (Zoveidavianpoor, et al., 2012). انتخاب چاه کاندید پیش‌تر، بدون پایه علمی و اصول مهندسی انجام می‌شد. بدین‌صورت که اگر انجام عملیات در چاه مرزی با نتایج خوبی همراه بود در ناحیه مورد نظر شکاف‌زنی‌های متعددی صورت می‌پذیرفت و یا اینکه اگر چاه عملکرد خیلی ضعیفی داشت، بایستی شکاف‌زنی انجام می‌گرفت. اگرچه نتایج به‌دست آمده در چاه‌های مرزی و تجربه دیگران در سازندهای مشابه می‌تواند بسیار مفید باشد؛ اما به‌کارگیری چند فرآیند اساسی می‌تواند احتمال موفقیت و مقدار بهبود تولید را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد (Economides and Martin, 2010). به‌طورکلی در صنعت نفت شناسایی بهترین چاه‌های کاندید برای عملیات‌های مختلف فرآیندی متداول است. در فرآیند انتخاب چاه کاندید برای شکست 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 به‌خوبی 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 به‌طور هیدرولیکی شکاف‌زنی شوند قادرند به‌صورت اقتصادی تولید کنند (Zoveidavianpoor, et al., 2012). علاوه بر کیفیت مخزن و نوع تکمیل، اثربخشی عملیات شکست هیدرولیکی تابعی از سه عامل مهم شامل انتخاب چاه کاندید، طراحی فرآیند و عملیات میدانی است که کاملاً مرتبط با هم هستند. مطابق

شکل (۴-۱)، سه عامل مذکور، سه رأس مثلث موفقیت در عملیات شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهند 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 سه عامل باید به خوبی اجرا شوند تا موفقیت عملیات را تضمین کنند (Zoveidavianpoor, et al., 2012).



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

یکی از دلایل عدم موفقیت عملیات شکست هیدرولیکی در ایران، می‌تواند عدم توجه به یکی از اعضای مثلث (انتخاب چاه و لایه کاندید) باشد.

#### ۳-۴ پیشینه مطالعات

مطالعات متعددی در زمینه انتخاب چاه و لایه کاندید در میداین داخل و خارج از ایران انجام شده است. در ادامه ابتدا به تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در برخی از میداین خارج از ایران و سپس به مطالعات انجام شده در ایران پرداخته شده است.



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

کراسی<sup>۳</sup> (۱۹۸۸) جهت تعیین چاه کاندید، بهبود دبی تولید را به‌عنوان معیار مناسب در نظر گرفت. در این مطالعه ضریب پوسته فعلی چاه با استفاده از تست‌های فشار<sup>۴</sup> محاسبه شد. سپس دبی تولید تثبیت‌شده در ضریب پوسته‌ی برابر ۴- در تمام چاه‌ها محاسبه شده و چاه‌هایی که دبی تولیدشان افزایش بیشتری پیدا کرده بود به‌عنوان چاه‌های دارای پتانسیل برای انجام شکست هیدرولیکی معرفی شدند. این روش در واقع به‌منظور 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.

گوینس<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۰) درجه آسیب سازند و بهره‌دهی<sup>۶</sup> چاه را به‌عنوان مهم‌ترین معیارها در انتخاب چاه کاندید در نظر گرفتند. خواص مخزنی و درجه آسیب سازند با استفاده از آنالیز تست‌های درون‌چاهی تعیین شدند. سپس مدل‌هایی از چاه در حالت قبل از شکست هیدرولیکی و پس از انجام شکست هیدرولیکی ساخته شد و چاه‌هایی که میزان بهره‌دهی آن‌ها در اثر عملیات بهبود بیشتری پیدا کرده بود به‌عنوان چاه‌های کاندید معرفی شدند.

---

<sup>1</sup> Howard and Fast

<sup>2</sup> Consolidation

<sup>3</sup> Krasey

<sup>4</sup> Build- up test

<sup>5</sup> Guoyness

<sup>6</sup> Deliverability

مارتین و اکونومیدس<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) اظهار نمودند که جنبه‌های تکنیکی مخزن و عملکرد شکاف محدودیت عمده‌ای در انتخاب چاه کاندید ایجاد نمی‌کنند، بلکه دلایل ساده‌ای مانند مجاورت با سطح تماس آب و سطح تماس گاز (در مورد مخازن نفتی) هستند که در انتخاب چاه کاندید محدودیت ایجاد می‌نمایند. در این مطالعه شاخص بهره‌دهی بی‌بعد<sup>۲</sup> چاه به‌عنوان معیار مناسب در انتخاب چاه کاندید در نظر گرفته شد.

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>۳</sup> را مورد بررسی قرار داده‌اند. در ادامه به بررسی چند مطالعه که در میادین داخلی کشور صورت گرفته است پرداخته می‌شود. از جمله مطالعاتی که در این زمینه در ایران صورت گرفته است می‌توان به پژوهشی که توسط هلالی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) در سازند آسماری و بنگستان انجام شده است، اشاره کرد. در این تحقیق برای انتخاب لایه کاندید جهت عملیات شکست هیدرولیکی پارامترهای تخلخل، اشباع آب، مقاومت تراکمی تک‌محوره و اختلاف تنش‌های افقی حداقل و حداکثر به‌عنوان مهم‌ترین معیارها در نظر گرفته شد و لایه‌های A در سازند ایلام و D در سازند سروک به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی معرفی شدند. همچنین شادی‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) با هدف تعیین لایه‌های کاندید برای عملیات شکست هیدرولیکی تعدادی از چاه‌های مخزن بنگستان را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه خواص مکانیکی سنگ، تخلخل، اشباع آب و مقدار تنش افقی حداقل به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها در نظر گرفته شد و لایه‌های C<sub>1</sub> و C<sub>2</sub> در سازند ایلام و لایه‌های E<sub>1</sub> و E<sub>2</sub> در سازند سروک به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی معرفی شدند (Shadizadeh et al., 2009).

---

<sup>1</sup> Martin and Economides

<sup>2</sup> Dimensionless Productivity Index

<sup>3</sup> Restimulation

پژوهش دیگری توسط حیدرآبادی و همکاران (۲۰۱۰) بر روی دو چاه در یکی از میادین خاورمیانه صورت گرفت تا چاه مناسب برای عملیات شکافزنی انتخاب گردد. 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 مهم ترین پارامترها برای انتخاب چاه کاندید معرفی شدند. همچنین جهت کمک به فرآیند انتخاب کاندید، مدل هایی از چاه در حالت قبل از شکافزنی و بعد از شکافزنی ساخته شد که وضعیت بهبود نمودار عملکرد جریان<sup>۱</sup> و تغییرات بهره دهی چاهها در اثر شکافزنی را نشان می داد؛ به این صورت که بهره دهی چاه در چاههایی که به صورت جزئی افزایش یافته است، به عنوان کاندید مناسب برای انجام عملیات شکافزنی در نظر گرفته نمی شوند. این معیارها در دو چاه که در سازند کربناته حفر شده اند مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت چاه مناسب برای انجام عملیات تعیین گردید (Heydarabadi et al., 2010).

هاشمی و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه مخزن بنگستان در یکی از میادین داخل کشور پرداختند تا زون ها و چاه های کاندید برای عملیات شکافزنی هیدرولیکی را انتخاب کنند. به دلیل حجم بسیار زیاد داده ها در این مطالعه، معیارهایی برای غربالگری زون ها و چاه ها معرفی شدند. معیارهای غربالگری زون ها 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 زون ها به غربالگری چاه ها پرداخته شد تا با تلفیق نتایج در نهایت کاندیدهای مناسب انتخاب شوند. شاخص بهره دهی<sup>۲</sup>، ضریب پوسته، تراوایی و فشار ته چاهی نیز معیارهایی هستند که برای غربالگری چاه ها مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور انجام فرآیند غربالگری یک برنامه محلی نوشته شد. رابط گرافیکی کاربر<sup>۳</sup> (GUI) در نرم افزار متلب<sup>۴</sup> برای نوشتن این برنامه به کار گرفته شد تا به طور

---

<sup>1</sup> Inflow Performance

<sup>2</sup> Productivity Index

<sup>3</sup> Graphical User Interface

<sup>4</sup> MATLAB

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).

#### ۴-۴ معیارهای انتخاب لایه 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 نمود، دو خطر خاصی که در مورد سنگ‌های کربناته ایران وجود دارد این است که شکاف چندگانه<sup>۱</sup> به دلیل وجود درزه و شکاف‌های طبیعی در این سنگ‌ها ممکن است توسعه یابد و دیگری احتمال وقوع پدیده انسداد<sup>۲</sup> شکاف به دلیل مدول یانگ بالای سازند است. به منظور جلوگیری از توسعه‌ی شکاف چندگانه، ضخامت زون بایستی به‌خوبی 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. همچنین اثر پارامترهای مختلف از قبیل ضخامت زون، مدول یانگ، تنش زون و اختلاف تنش زون هدف با زون بالایی و پایینی که توسط هاشمی و همکاران (۲۰۱۲) بر روی نیم‌طول شکاف مورد مطالعه قرار گرفت، چنین نتیجه شد که از میان این پارامترها، تنش زون بیشترین اثر و ضخامت زون کمترین اثر را بر روی نیم‌طول شکاف دارند. نتیجه دیگری که حاصل گردید، ارتباط مستقیم کاهش تنش زون بالایی با کاهش شدید نیم‌طول شکاف بود (Hashemi et al., 2012).

#### ۴-۵ انتخاب چاه و لایه کاندید در میدان نفتی اهواز

اولین گام برای انتخاب لایه کاندید تعیین عوامل اثرگذار بر شکست هیدرولیکی و مشخص کردن معیارهای مناسب برای انتخاب کاندید با توجه به شرایط مخزن و داده‌های در دسترس است.

---

<sup>1</sup> Multiple Fracture

<sup>2</sup> Screen out

روش‌های جامع و یکسانی برای انتخاب کاندید وجود ندارد، به‌علاوه مطالعات گسترده‌ای در این زمینه در ایران صورت نگرفته است. هر چند می‌توان تعدادی از روش‌های مرسوم اشاره شده در پیشینه مطالعات را در انتخاب لایه کاندید، به‌کار گرفت و به نتایج قابل‌قبولی دست یافت اما در این تحقیق با بررسی مطالعات قبلی انجام شده (به‌خصوص مطالعات صورت‌گرفته در کشور) و همچنین با توجه به شرایط مخزن کربناته مورد مطالعه، تلاش گردید از شاخص‌هایی استفاده شود که ما را در انتخاب لایه هدف با بیشترین بازدهی یاری رساند. معیارهای انتخاب کاندید ضخامت، اشباع آب، تخلخل، اختلاف تنش زون هدف با زون بالایی و پایینی، شاخص شکاف‌پذیری<sup>۱</sup> و شاخص شکاف‌پذیری کل<sup>۲</sup> در نظر گرفته شدند.

#### ۴-۵-۱ شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی<sup>۳</sup>

در سال‌های اخیر برای انتخاب لایه‌ها و چاه‌های مناسب برای عملیات شکست هیدرولیکی از دو شاخص شکاف‌پذیری و شکنندگی استفاده شده است. در این بخش ابتدا به توضیح مختصری از شکنندگی پرداخته شده و سپس شاخص شکاف‌پذیری به اختصار شرح داده شده است.

##### • شکنندگی

هدف اصلی از تحریک حجمی از مخزن، به‌حداکثر رساندن سطح تماس شکستگی و ماتریکس می‌باشد (Mayerhofer et al., 2010). از منظر زمین‌شناسی برای ایجاد شبکه شکستگی بایستی شاخص شکنندگی سازند بالا باشد (Cipolla et al., 2010). بدین منظور شکنندگی، در جایی از مخزن که ماتریکس در آن توانایی شکسته شدن به‌طور مؤثر را داشته باشد، تعریف می‌شود (Jian-chun et al., 2014). شکنندگی یک از پارامترهای مهم از خصوصیات مکانیکی سنگ، برای ارزیابی شبکه شکستگی

<sup>1</sup> Fracability Index

<sup>2</sup> Total Fracability Index

<sup>3</sup> Brittleness Index

در طول شکست هیدرولیکی است (Dong et al., 2013). شکنندگی سنگ هم برای توسعه‌ی شکستگی و هم برای ایجاد شکستگی یکپارچه پارامتر سودمندی است. بنابراین شکنندگی یکی از گزینه‌های غربال‌گری لایه کاندید برای شکست هیدرولیکی است (Li et al., 2013).  
 به دلیل عدم وجود یک رابطه جهانی و جامع برای شکنندگی، روش‌های مختلفی برای ارزیابی آن ارائه شده است.

ریکمن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) رابطه (۱-۴) 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 سازندی می‌تواند اشتباه باشد (Bai, 2016).

جین و همکاران (۲۰۱۴) 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

---

<sup>1</sup> Rickman

به دست آمده از آنالیز کانی شناسی قابل اعتمادتر است (Jin et al., 2014). در این زمینه ابتدا جارویه و همکاران (۲۰۰۷) 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 می شود (Wang and Gale, 2009). همچنین مشخص شد که کانی های سیلیکاته مانند فلدسپار و میکا و همچنین کانی های کربناته دیگر مانند کلسیت نیز نسبت به کانی های رسی شکنندگی بیشتری دارند. بنابراین جین و همکاران (۲۰۱۴) رابطه (۴-۴) را برای محاسبه شکنندگی پیشنهاد کردند که تمام کانی های شکننده را در نظر می گیرد (Jin et al., 2014).

$$B = \frac{W_{QFM}}{W_{Tot}} + \frac{W_{Carb}}{W_{Tot}} \approx \frac{W_{QFM} + W_{Calcite} + W_{Dolomite}}{W_{Tot}} \quad (4-4)$$

که در این رابطه  $\frac{W_{QFM}}{W_{Tot}}$  کسر وزنی کوارتز، فلدسپار و میکا از وزن کل سنگ و  $\frac{W_{Carb}}{W_{Tot}}$  کسر وزنی کانی های کربناته شامل دولومیت، کلسیت (و دیگر کانی های کربناته در صورت وجود از وزن کل سنگ) است. در این مطالعه به منظور محاسبه شکنندگی از رابطه (۴-۴) استفاده گردید.

#### • شاخص شکاف پذیری

ارزیابی شکستگی مخزن با شکنندگی سنگ منطقی به نظر نمی رسد؛ چون مقاومت سنگ را نشان نمی دهد. برای مثال یک مانع شکستگی برای شیل بارنت<sup>۱</sup> می تواند دولومیت آهکی با شکنندگی بالا باشد (Bruner, 2011). برای این منظور یک شاخص جدید به نام شاخص شکاف پذیری (FI)، برای غلبه بر ضعف شکنندگی معرفی شد. به طور خلاصه شاخص شکنندگی میزبان سادگی ایجاد شکاف هیدرولیکی در یک سازند را نشان می دهد. این شاخص به طور کلی مربوط به مقاومت سنگ است اما می تواند به عوامل دیگری نیز بستگی داشته باشد (Bai, 2016). این شاخص با استفاده از یکپارچه سازی شکنندگی و اتلاف انرژی در طول شکست هیدرولیکی فرض می کند که سازند مناسب برای انجام این عملیات، نه تنها

<sup>1</sup> Barnett

شکندگی بالایی دارد بلکه به انرژی کمتر برای ایجاد یک سطح شکستگی جدید نیازمند است. در مورد شکاف پذیری نیز مشابه با شکندگی، رابطه جامعی وجود ندارد و در مطالعات مختلف، با توجه به نوع سازند و شرایط خاص مخزن رابطه‌ای برای شکاف پذیری ارائه شده است. جین و همکاران (۲۰۱۴) رابطه (۵-۴) را برای بررسی شکاف پذیری و انتخاب لایه‌های کاندید در یک مخزن شیلی پیشنهاد کرده‌اند (Jin et al., 2014):

$$FI = \frac{B_n + G_{cn}}{2} \quad (5-4)$$

که در این رابطه  $B_n$  و  $G_{cn}$  به ترتیب شکندگی و نرخ اتلاف انرژی استاندارد شده هستند که طبق روابط (۶-۴) و (۷-۴) محاسبه می‌شوند (Jin et al., 2014):

$$B_n = \frac{B - B_{min}}{B_{max} - B_{min}} \quad (6-4)$$

$$G_{cn} = \frac{G_{c max} - G_c}{G_{c max} - G_{c min}} \quad (7-4)$$

یکی از پارامترهای مهمی که بر روی هندسه و فشار ایجاد شکست هیدرولیکی تأثیر به‌سزایی دارد، مدول یانگ است. با افزایش مدول یانگ انرژی شکستگی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه در طول شکست انرژی بیشتری از بین می‌رود. بنابراین مدل ریاضی جدیدی از FI با توجه به شکندگی و مدول یانگ، طبق رابطه (۸-۴) تعریف می‌شود (Jin et al., 2014):

$$FI = \frac{B_n + E_n}{2} \quad (8-4)$$

که در این رابطه  $E_n$  مدول یانگ استاندارد شده است که مطابق رابطه (۹-۴) محاسبه می‌گردد (Jin et al., 2014):

$$E_n = \frac{E_{max} - E}{E_{max} - E_{min}} \quad (9-4)$$

با توجه به رابطه (۸-۴) می‌توان چنین اظهار داشت که سازند با شکندگی نزدیک به ۱ ممکن است



برای شکستگی مناسب نباشد؛ چون امکان دارد مدول یانگ سازند بالا باشد. از سوی دیگر، سازند با مدول یانگ پایین ممکن است برای ایجاد شکستگی مناسب نباشد؛ چون شکنندگی امکان دارد کم باشد که مانع اتصال شبکه شکستگی با سازند شده و در نتیجه منجر به FI کمتر می‌شود. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت وقتی FI بیشتر از ۰/۷ باشد، سازند کاندیدای خوبی برای عملیات شکست هیدرولیکی است؛ در غیر این صورت نامناسب است (Jin et al., 2014).

تاکنون از شاخص شکاف‌پذیری برای ارزیابی شکنندگی در مخازن شیلی استفاده گردیده است و برای مخازن کربناته رابطه‌ای ارائه نشده است. به‌منظور بررسی این شاخص در مخازن کربناته، در این پژوهش از این شاخص در مخزن بنگستان استفاده گردید و نتایج مطلوبی حاصل شد که در ادامه نتایج نشان داده شده است.

#### • شاخص شکاف‌پذیری کل

همان‌طور که در بخش 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؛ 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. به‌طور کلی در مورد یک مخزن خاص ابتدا باید بر اساس پیشینه زمین‌شناسی و ژئومکانیکی آن، شناختی از مکانیسم 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 (Zhang et al., 2015). 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. امیری و همکاران (۱۳۹۵) به منظور انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکست هیدرولیکی در میدان نفتی اهواز، رابطه جدیدی از شکاف‌پذیری ارائه نمودند. این شاخص مطابق رابطه (۴-۱۰) در نظر گرفته شده است:

$$FI = \frac{E_n + 2B_r}{3\sin(\varphi)} \quad (۴-۱۰)$$

که در این رابطه  $E_n$  از رابطه (۴-۹) و  $B_r$  از رابطه (۴-۴) محاسبه می‌شوند. همچنین  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی بوده که از رابطه (۳-۲۳) محاسبه می‌شود.

به‌طور کلی مطابق رابطه (۴-۱۰)، لایه‌هایی که دارای مدول یانگ کمتر، زاویه اصطکاک داخلی کمتر و شکنندگی بیشتری هستند، شاخص شکاف‌پذیری آن‌ها بیشتر است. علاوه بر پارامترهای الاستیک و مقاومتی، مقدار تنش افقی حداقل و اختلاف تنش‌های افقی در لایه نیز نقش مهمی در عملیات شکست هیدرولیکی دارند؛ بنابراین شکل کامل‌تری از شکاف‌پذیری به نام شاخص شکاف‌پذیری کل (TFI) مطابق رابطه (۴-۱۱) ارائه شده است (امیری و همکاران، ۱۳۹۵):

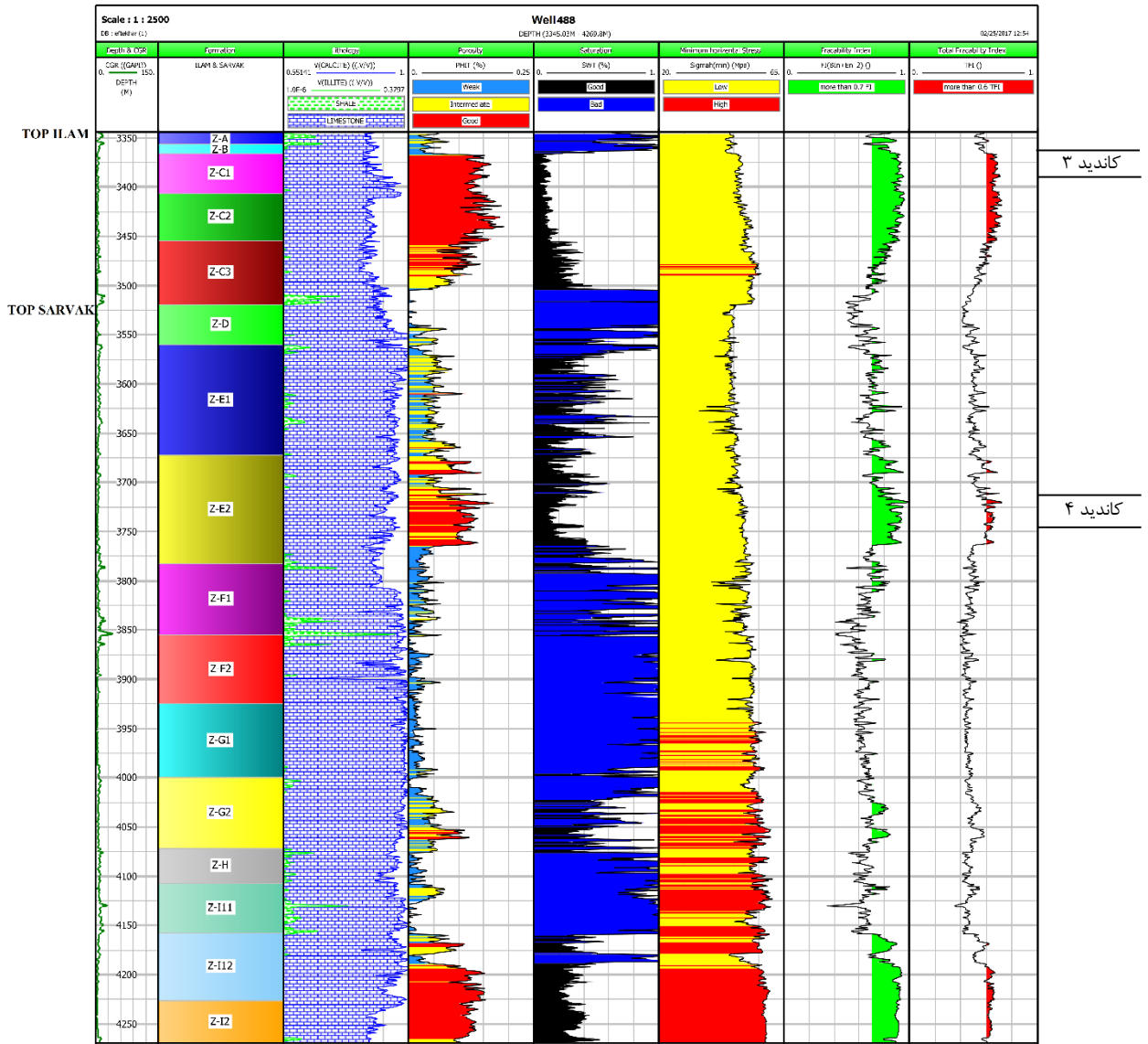
$$TFI = 0.6 \frac{FI - FI_{min}}{FI_{max} - FI_{min}} + 0.1 \frac{\sigma_{hmax} - \sigma_h}{\sigma_{hmax} - \sigma_{hmin}} + 0.3 \frac{\Delta S - \Delta S_{min}}{\Delta S_{max} - \Delta S_{min}} \quad (۴-۱۱)$$

طبق رابطه (۴-۱۱) پارامترهای شکاف‌پذیری (FI)، تنش افقی حداقل ( $\sigma_h$ ) و اختلاف تنش‌های افقی ( $\Delta S$ ) در هر سازند با استفاده از مقادیر حداقل و حداکثر در همان سازند استاندارد می‌شوند. در این رابطه شاخص شکاف‌پذیری کل با افزایش شاخص شکاف‌پذیری و افزایش اختلاف تنش‌های افقی افزایش یافته و با افزایش مقدار تنش‌های افقی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت لایه‌هایی که شاخص شکاف‌پذیری کل آن‌ها بیشتر از ۰/۶ باشد، کاندیدای خوبی برای عملیات شکست هیدرولیکی هستند (امیری و همکاران، ۱۳۹۵).

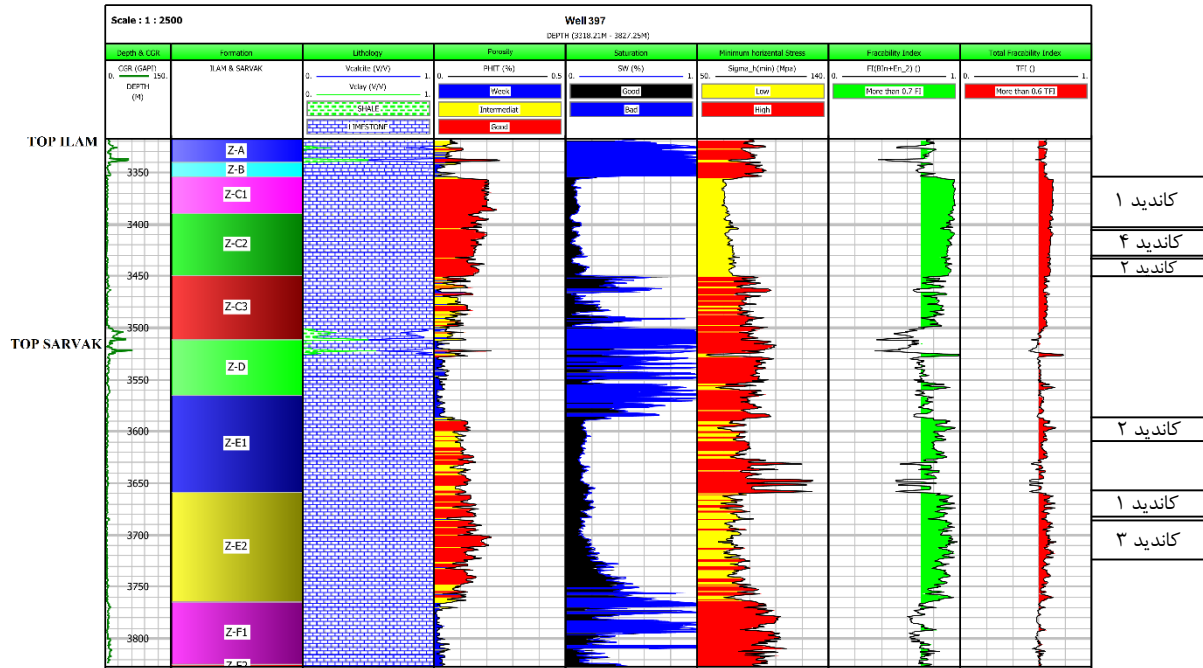
#### ۴-۵-۲ انتخاب و تحلیل لایه مناسب در سازند ایلام و سروک

هدف اصلی از طراحی شکست هیدرولیکی به حداکثر رساندن تولید هیدروکربن از طریق انتخاب لایه‌های کاندید با بالاترین قابلیت شکاف‌پذیری می‌باشد. به‌منظور انتخاب لایه کاندید در سازندهای ایلام و سروک در چاه‌های مورد مطالعه، ابتدا لایه‌های مناسب با توجه به مقدار شاخص شکاف‌پذیری و شاخص شکاف‌پذیری کل انتخاب شدند و سپس در این لایه‌ها چهار معیار ضخامت، تخلخل، اشباع آب و اختلاف تنش‌های زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل (۲-۴) و شکل (۳-۴) به ترتیب نتایج حاصل از مدل‌سازی معیارهای انتخاب لایه کاندید، در دو چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، ستون اول از سمت چپ شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون دوم چینه‌شناسی، ستون سوم لیتولوژی، ستون چهارم درصد تخلخل، ستون پنجم درصد اشباع آب، ستون ششم تنش افقی حداقل، ستون هفتم شاخص شکاف‌پذیری و ستون هشتم شاخص شکاف‌پذیری کل می‌باشند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اعماقی که درصد شیل افزایش یافته است، مقدار شاخص شکاف‌پذیری و شاخص شکاف‌پذیری کل کاهش یافته است. همچنین در زون‌های  $C_1$  و  $C_2$  در این مخزن، FI و TFI مقدار بالاتری نسبت به دیگر زون‌ها به خود اختصاص داده‌اند. در ادامه با ارزیابی معیارها در سازند ایلام و سروک، لایه‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در جداول (۱-۴) و (۲-۴) نشان داده شده‌اند.



شکل (۴-۲): نتیجه مدل سازی معیارهای انتخاب لایه کاندید در چاه ۴۸۸



شکل (۳-۴): نتیجه مدل سازی معیارهای انتخاب لایه کاندید در چاه ۳۹۷

جدول (۱-۴): زون های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۴۸۸

شاخص شکاف پذیری کل	شاخص شکاف پذیری	اختلاف تنش زون هدف با زون های بالایی و پایینی (مگاپاسکال)	تخلخل (درصد)	اشباع آب (درصد)	ضخامت (متر)	بازه عمقی (متر)	زون
۰/۶۸	۰/۹۲	۱/۸	۱۴	۹	۲۸	۳۳۶۷-۳۳۹۵	C <sub>1-1</sub>
۰/۶۸	۰/۹۱	۰/۷۵	۱۵	۹	۲۲	۳۳۹۷-۳۴۱۹	C <sub>1-C2</sub>
۰/۶۸	۰/۹۱	۱/۰۵	۱۵	۱۰	۱۷	۳۴۲۵-۳۴۴۲	C <sub>2</sub>
۰/۶۳	۰/۹۰	۰/۵۵	۱۱	۱۸	۳۲	۳۷۱۸-۳۷۵۰	E <sub>2</sub>

جدول (۴-۲): زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۳۹۷

زون	بازه عمقی (متر)	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	اختلاف تنش زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی (مگاپاسکال)	شاخص شکاف‌پذیری	شاخص شکاف‌پذیری کل
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	۳۳۵۴-۳۴۰۳	۴۹	۸	۱۸	۱۱/۷	۰/۹۳	۰/۷۰
C <sub>2</sub> -1	۳۴۰۵-۳۴۳۱	۲۶	۹	۱۶	۱/۵	۰/۹۱	۰/۶۸
C <sub>2</sub> -2	۳۴۳۲-۳۴۵۰	۱۸	۱۰	۱۴	۶/۷	۰/۹۰	۰/۶۸
E <sub>1</sub>	۳۵۸۹-۳۶۰۸	۱۹	۱۴	۱۰	۱۰/۱۱	۰/۸۷	۰/۶۷
E <sub>2</sub> -1	۳۶۵۹-۳۶۸۳	۲۴	۱۳	۱۳	۱۲/۳	۰/۸۷	۰/۶۷
E <sub>2</sub> -2	۳۶۸۵-۳۷۲۳	۳۸	۱۶	۱۵	۵/۷	۰/۹۰	۰/۶۷

#### ۴-۶ روش انتگرال‌های فازی

به‌منظور کاهش ریسک و عدم قطعیت در تصمیم‌گیری در انتخاب کاندید می‌توان از فنون ترکیب اطلاعات بهره جست. این فنون با استفاده از تلفیق منابع اطلاعاتی چندگانه یک سیستم تصمیم‌گیری ارائه می‌کنند. انتگرال‌های فازی به‌عنوان یکی از قدرتمندترین و انعطاف‌پذیرترین عملگرهای ترکیب اطلاعات شناخته می‌شوند که نخستین بار توسط سوگنو پیشنهاد شدند. این انتگرال‌ها را می‌توان در بسیاری از تصمیم‌گیری‌های برنامه‌های کاربردی استفاده کرد؛ به‌طوری‌که اجازه می‌دهند اطلاعات تحت فرضیات مختلف با منبع اطلاعاتی مستقل با هم ترکیب شوند، حتی زمانی که منابع اطلاعاتی مستقل از هم نیستند (Torra and Narukawa, 2006). فلسفه‌ی ترکیب‌کننده‌های فازی این است که نه‌تنها قدرت تأثیرگذاری هر یک از طبقه‌بندی‌کننده‌ها را به‌تنهایی بررسی می‌کنند، بلکه قدرت تأثیرگذاری هر زیرمجموعه از طبقه‌بندی‌کننده‌ها را نیز جداگانه بررسی می‌نمایند. این قدرت تأثیرگذاری را اندازه فازی می‌نامند. به‌دلیل آنکه این انتگرال‌ها می‌توانند ارتباط میان معیارها را مدل کنند، در طیف وسیعی

از مسائل تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ادامه الگوریتم استفاده شده برای پرکاربردترین انتگرال‌های فازی، یعنی انتگرال سوگنو که یک ترکیب‌کننده‌ی غیرخطی است و انتگرال چوکویت که یک ترکیب‌کننده‌ی خطی است، برای اولویت‌بندی لایه‌های کاندید عملیات شکست هیدرولیکی بیان شده است (Kuncheva, 2004).

اگر  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  یک مجموعه از ورودی‌های مسئله مورد بررسی باشد و  $P(X)$  مجموعه توانی  $X$  باشد، آنگاه تابع  $g: P(X) \rightarrow [0,1]$  برای اندازه‌گیری فازی تعریف می‌گردد که شرایط (۴-۱۲)، (۴-۱۳) و (۴-۱۴) را ارضا می‌کند:

$$g(\emptyset) = 0, g(X) = 1 \quad (۴-۱۲)$$

$$\text{if } A, B \in P(X) \text{ and } A \subset B \rightarrow g(A) \leq g(B) \quad (۴-۱۳)$$

$$\text{if } A, B \subset X, A \cap B = \emptyset \rightarrow g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B) \quad (۴-۱۴)$$

در حالت کلی،  $\lambda$  که چگالی فازی نامیده می‌شود، می‌تواند با توجه به شرایط مرزی  $g_\lambda$  تعیین گردد. مقدار  $\lambda$  با استفاده از معادله‌ی  $g(X) = 1$  و با حل رابطه (۴-۱۵) به دست می‌آید:

$$g_\lambda(X) = \frac{1}{\lambda} \left( \prod_{i=1}^n (1 + \lambda g_i) - 1 \right) \quad \lambda \neq 0 \quad (۴-۱۵)$$

در صورتی که  $A_i = \{x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_n\}$  باشد، مقدار  $g(A_i)$  به صورت بازگشتی با استفاده از روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷) تعیین می‌شود:

$$g(A_i) = g(\{x_1\}) = g_1 \quad (۴-۱۶)$$

$$g(A_i) = g_i + g(A_{i-1}) + \lambda g_i g(A_{i-1}) \quad 1 < i \leq n \quad (۴-۱۷)$$

با فرض اینکه  $h(x_i)$  مقدار پارامتر  $\alpha$  در مجموعه  $X$  و  $g$  معیار فازی تعریف شده بر روی این مجموعه باشد، انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت مطابق با روابط (۴-۱۸) و (۴-۱۹) تعریف می‌شوند:

$$\int_S h.g = \bigvee_{i=1}^n (h(x_i) \cap g(A_i)) \quad (18-4)$$

$$\int_C h.g = \sum_{i=1}^n h(x_i)[g(A_i) - g(A_{i-1})] \quad (19-4)$$

که در آن  $h(x_0) = 0$  و  $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n)$  است (Kuncheva, 2004).

در این روش، برای تعیین اهمیت نسبی معیارها ( $g_i$ ) در انتخاب لایه کاندید و همچنین به منظور تعیین قابلیت اطمینان به پاسخ هر معیار ( $h(x_i)$ ) در انتخاب لایه کاندید، پرسش‌نامه‌ای طرح گردید که در آن اهمیت نسبی معیارها نسبت به هم مورد پرسش قرار گرفت. سپس با استفاده از میانگین نظرات ۱۶ تن از افراد متخصص در زمینه شکست هیدرولیکی، ضرایب وزنی  $h(x_i)$  و  $g_i$  تعیین گردید.

#### ۷-۴ اولویت‌بندی لایه‌های کاندید با رویکرد انتگرال‌های فازی

جهت اولویت‌بندی لایه‌های کاندید برای انجام این عملیات، مطابق پرسش‌نامه‌ای که توسط افراد متخصص در زمینه شکست هیدرولیکی پاسخ داده شد، به ترتیب پارامترهای شاخص شکاف‌پذیری کل، اختلاف تنش زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی، شاخص شکاف‌پذیری، تخلخل/اشباع آب و ضخامت بیشترین تأثیر را در انتخاب لایه کاندید داشتند. بنابراین بیشترین وزن به پارامتر شاخص شکاف‌پذیری کل و کمترین وزن به پارامتر ضخامت تعلق گرفت. همان‌طور که در جدول (۴-۱) و (۴-۲) مشاهده می‌شود، لایه‌ها نتایج نسبتاً نزدیکی به هم دارند. ولی با استفاده از روش انتگرال‌های فازی و با به‌کارگیری همه اطلاعات و دخیل نمودن اوزان معیارها، طبقه‌بندی و اولویت‌دهی جامعی از همه لایه‌ها صورت گرفت. برای این منظور الگوریتم مورد بحث در بخش قبلی در نرم‌افزار MATLAB به‌کار گرفته شد و در نهایت مطابق جدول (۴-۳) و (۴-۴) نتایج رتبه‌بندی هر یک از لایه‌های کاندید در سازندهای ایلام و سروک توسط انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت نشان داده شد. همان‌طور که در جدول (۴-۳) مشاهده می‌شود، لایه  $C_1-C_2$  در چاه ۳۹۷ به دلیل ضخامت بسیار مناسب، اشباع آب خیلی کم، تخلخل



و اختلاف تنش بالا، FI و TFI خیلی خوب نسبت به دیگر لایه‌های سازند ایلام در اولویت اول قرار می‌گیرد؛ به طوری که صحت این موضوع توسط هر دو انتگرال فازی سوگنو و چوکویت تأیید شده است. لایه C<sub>2</sub>-2 در چاه ۳۹۷ نسبت به لایه C<sub>1</sub>-1 در چاه ۴۸۸ ضخامت کمتر و اختلاف تنش بیشتری دارد. اگرچه هر دو لایه از انتگرال فازی سوگنو امتیاز یکسانی دریافت نموده‌اند اما همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، پارامتر اختلاف تنش نسبت به ضخامت از اهمیت بیشتری برخوردار است که تأثیر ضریب اهمیت اختلاف تنش در امتیازدهی انتگرال فازی چوکویت که یک عملگر جمعی می‌باشد، مشهود است؛ بنابراین لایه C<sub>2</sub>-2 در چاه ۳۹۷ در اولویت دوم و لایه C<sub>1</sub>-1 در چاه ۴۸۸ در اولویت سوم قرار می‌گیرد. در ادامه نیز با عنایت به مطالب یاد شده و مقادیر اختلاف تنش دیگر لایه‌ها، با توجه به اینکه مقادیر اشباع آب، تخلخل، FI و TFI بسیار نزدیک به هم می‌باشند، لایه‌های C<sub>2</sub>-1 در چاه ۳۹۷، C<sub>2</sub> در چاه ۴۸۸ و C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> در چاه ۴۸۸ به ترتیب در اولویت‌های چهارم تا ششم قرار می‌گیرند. بر اساس آنچه که در نحوه اولویت‌بندی لایه‌ها در سازند ایلام بیان گردید، مطابق جدول (۴-۴) در سازند سروک، لایه‌های E<sub>2</sub>-1، E<sub>1</sub> و E<sub>2</sub>-2 در چاه ۳۹۷ به دلیل نتایج نسبتاً نزدیک، امتیاز یکسانی از انتگرال فازی سوگنو دریافت نمودند. اما در این لایه‌ها وجود اختلاف تنش زیاد ترتیب اولویت‌بندی آن‌ها را با اختلاف خیلی کم از نظر انتگرال فازی چوکویت در اولویت اول تا سوم قرار می‌دهد. در نهایت لایه E<sub>2</sub> در چاه ۴۸۸ به دلیل کمتر بودن مقادیر TFI و اختلاف تنش (که دارای بیشترین ضرایب اهمیت در اولویت‌دهی لایه‌ها می‌باشند) نسبت به دیگر لایه‌های این سازند در اولویت آخر جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی قرار می‌گیرد.

جدول (۳-۴): ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ سازند ایلام

رتبه کاندید	چاه	زون	بازه عمقی (متر)	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	اختلاف تنش زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی (مگاپاسکال)	شاخص شکاف‌پذیری	شاخص شکاف‌پذیری کل	امتیاز انتگرال فازی سوگنو	امتیاز انتگرال فازی چوکویت
۱	۳۹۷	C <sub>1</sub> - C <sub>2</sub>	۳۳۵۴ -۳۴۰۳	۴۹	۸	۱۸	۱۱/۷	۰/۹۳	۰/۷۰	۰/۳۷۵۰	۰/۲۶۳۴
۲	۳۹۷	C <sub>2</sub> - 2	۳۴۳۲ -۳۴۵۰	۱۸	۱۰	۱۴	۶/۷	۰/۹۰	۰/۶۸	۰/۲۱۵۰	۰/۱۳۷۰
۳	۴۸۸	C <sub>1</sub> - 1	۳۳۶۷ -۳۳۹۵	۲۸	۹	۱۴	۱/۸	۰/۹۲	۰/۶۸	۰/۲۱۵۰	۰/۱۳۳۸
۴	۳۹۷	C <sub>2</sub> - 1	۳۴۰۵ -۳۴۳۱	۲۶	۹	۱۶	۱/۵	۰/۹۱	۰/۶۸	۰/۱۹۳۰	۰/۱۲۲۰
۵	۴۸۸	C <sub>2</sub>	۳۴۲۵ -۳۴۴۲	۱۷	۱۰	۱۵	۱/۰۵	۰/۹۱	۰/۶۸	۰/۱۸۵۰	۰/۱۰۴۲
۶	۴۸۸	C <sub>1</sub> - C <sub>2</sub>	۳۳۹۷ -۳۴۱۹	۲۲	۹	۱۵	۰/۷۵	۰/۹۱	۰/۶۸	۰/۱۴۵۰	۰/۱۰۳۳

جدول (۴-۴): ارزیابی معیارها و اولویت‌بندی زون‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه ۴۸۸ و ۳۹۷ سازند سروک

رتبه کاندید	چاه	زون	بازه عمقی (متر)	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	اختلاف تنش زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی (مگاپاسکال)	شاخص شکاف‌پذیری	شاخص شکاف‌پذیری کل	امتیاز انتگرال فازی سوگنو	امتیاز انتگرال فازی چوکویت
۱	۳۹۷	E <sub>2</sub> - 1	۳۶۵۹ -۳۶۸۳	۲۴	۱۳	۱۳	۱۲/۳	۰/۸۷	۰/۶۷	۰/۲۸۶۰	۰/۲۳۲۷
۲	۳۹۷	E <sub>1</sub>	۳۵۸۹ -۳۶۰۸	۱۹	۱۴	۱۰	۱۰/۱۱	۰/۸۷	۰/۶۷	۰/۲۸۶۰	۰/۲۰۵۸
۳	۳۹۷	E <sub>2</sub> - 2	۳۶۸۵ -۳۷۲۳	۳۸	۱۶	۱۵	۵/۷	۰/۹۰	۰/۶۷	۰/۲۸۶۰	۰/۱۹۶۲
۴	۴۸۸	E <sub>2</sub>	۳۷۱۸ -۳۷۵۰	۳۲	۱۸	۱۱	۰/۵۵	۰/۹۰	۰/۶۳	۰/۱۸۲۶	۰/۱۲۶۸

## ۴-۸ جمع بندی

در این فصل ابتدا به اهمیت انتخاب کاندید در عملیات شکست هیدرولیکی و سپس به بررسی پیشینه مطالعات صورت گرفته در این زمینه در دنیا و در میادین ایران پرداخته شد. در ادامه توضیحاتی در مورد شاخص شکاف پذیری و شکنندگی در مخازن شیلی ارائه گردید. در سال های اخیر از این شاخص ها برای انتخاب لایه کاندید در سازندهای شیلی و ماسه سنگی استفاده شده است. شکاف پذیری نشان می دهد شکاف زنی هیدرولیکی در یک مخزن تا چه حد می تواند مؤثر باشد.

در مورد یک مخزن خاص ابتدا باید بر اساس پیشینه زمین شناسی و ژئومکانیکی آن، شناختی از مکانیسم شکست در حین فرآیند شکاف زنی پیدا کرد و سپس مؤثرترین شاخصه ها و پارامترهای ژئومکانیکی و زمین شناسی که بر نتایج عملیات شکاف زنی اثر می گذارند را شناسایی نموده و در نهایت یک روش ارزیابی شکاف پذیری که برای آن نوع از مخزن مناسب است را به کار گرفت.

در این مطالعه علاوه بر شاخص شکاف پذیری ارائه شده در مخازن شیلی، از شاخص شکاف پذیری کل (TFI) که برای ارزیابی شکاف پذیری در مخزن بنگستان در میدان اهواز ارائه شده است، استفاده گردید. این شاخص تابعی از تنش افقی حداقل، اختلاف تنش های افقی، مدول یانگ، شکنندگی و زاویه اصطکاک داخلی است.

شش معیار ضخامت، تخلخل، اشباع آب، اختلاف تنش زون هدف با زون های بالایی و پایینی، شاخص شکاف پذیری و شاخص شکاف پذیری کل به عنوان معیارهای اصلی برای انتخاب لایه های کاندید در نظر گرفته شدند؛ سپس به شناسایی و تحلیل لایه های مناسب با استفاده از معیارهای معرفی شده پرداخته شد. بدین صورت که ابتدا لایه های مطلوب بر اساس میزان شاخص شکاف پذیری و شاخص شکاف پذیری کل انتخاب شدند. سپس سایر معیارهای مذکور در این لایه ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت با استفاده از الگوریتم انتگرال های فازی سوگنو و چوکویت (نوشته شده در محیط نرم افزار MATLAB) و بر اساس ضرایب تأثیر هریک از معیارها، لایه های کاندید اولویت بندی شدند.

نتایج نهایی به دست آمده نشان داد که در سازند ایلام به ترتیب لایه‌های C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۳۵۴ تا ۳۴۰۳ متری)، C<sub>2</sub>-2 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۴۳۲ تا ۳۴۵۰ متری) و C<sub>1</sub>-1 در چاه ۴۸۸ (از عمق ۳۳۶۷ تا ۳۳۹۵ متری) و در سازند سروک به ترتیب لایه‌های E<sub>2</sub>-1 در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۶۵۹ تا ۳۶۸۳ متری) و E<sub>1</sub> در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۵۸۹ تا ۳۶۰۸ متری) مناسب‌ترین کاندیدها جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشند.

فصل پنجم

تجربہ گیری و پیشہ داری

## ۵-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پایان‌نامه، شناسایی زون‌های مطلوب برای عملیات شکست هیدرولیکی و اولویت‌بندی آن‌ها با رویکرد انتگرال‌های فازی در تعدادی از چاه‌های جنوب‌غربی ایران بود. برای انجام این مهم، ابتدا به‌ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه‌های ۴۸۸ و ۳۹۷ مخزن بنگستان با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، نگارهای پتروفیزیکی (شامل نگار تخلخل، چگالی، صوتی و ...)، گزارش‌های حفاری، نگارهای تصویری و آزمایش‌های درون‌چاهی پرداخته شد. سپس بر اساس مطالعات صورت‌گرفته و با توجه به شرایط مخزن و داده‌های موجود در چاه‌ها، پارامترهای ضخامت، تخلخل، اشباع آب، اختلاف تنش زون هدف با زون‌های بالایی و پایینی، شاخص شکاف‌پذیری و شاخص شکاف‌پذیری کل به‌عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین معیارها در انتخاب لایه‌های کاندید در چاه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند؛ سپس بر اساس این معیارها به شناسایی و تحلیل لایه‌های کاندید جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی پرداخته شد. در نهایت به‌منظور کاهش ریسک و عدم قطعیت در انتخاب و اولویت‌بندی مناسب‌ترین کاندید از روش انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت استفاده گردید.

با توجه به مطالب گفته‌شده در فصل‌های قبل، موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتایج حاصل از این تحقیق به‌طور خلاصه ذکر کرد:

مقدار و جهت تنش‌های برجا از جمله مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها در انتخاب لایه کاندید برای عملیات شکست هیدرولیکی است. با رسم نمودار تنش در مخزن بنگستان در چاه ۴۸۸ مشخص شد رژیم تنش در میدان مورد مطالعه از نوع نرمال است و جهت تنش افقی حداکثر توسط شکستگی‌های القایی مشاهده‌شده در نگار تصویری این چاه به‌صورت شرقی- غربی می‌باشد.

همچنین در چاه ۳۹۷ نیز رژیم تنش به‌طور عمده امتداد- لغز است. جهت تنش افقی حداقل به‌وسیله شکستگی برشی مشاهده‌شده در نگار تصویری این چاه، به‌صورت N37W می‌باشد که مطابق با امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس است.

در چاه ۳۹۷، از نگار تصویری برای محاسبه دقیق‌تر تنش‌ها استفاده شد. مقادیر کرنش تکتونیکی در این روابط از طریق سعی و خطا و به‌گونه‌ای تعیین شد که مناطق با احتمال گسیختگی بالا با آن چه 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 گردید. نتایج نشان داد که هر دو معیار شکست، نتایج مطلوبی ارائه داده‌اند.

در طراحی پنجره گل ایمن حفاری به‌دست آوردن فشار مناسب گل حفاری، نقش اساسی در تعیین پایداری دیواره چاه دارد. به‌منظور تعیین حداقل و حداکثر فشار گل از دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب استفاده گردید و مشخص شد که فشار ایمن گل حداقل و حداکثر طبق پیش‌بینی معیار شکست موهر-کلمب در چاه ۴۸۸ به‌طور میانگین برابر ۳۲ و ۶۰ مگاپاسکال است؛ این در حالی است که این مقادیر برای معیار موگی-کلمب حدوداً ۳۳ و ۶۰ مگاپاسکال می‌باشد. در چاه ۳۹۷ نیز مقادیر حداقل و حداکثر طبق پیش‌بینی معیار شکست موهر-کلمب به‌طور میانگین برابر ۴۲ و ۸۳ مگاپاسکال و برای معیار موگی-کلمب تقریباً ۴۳ و ۸۳ مگاپاسکال است. همچنین میانگین فشار گل حفاری در هر دو چاه ، ۴۲ مگاپاسکال بوده است.

محدوده پنجره‌های ایمن گل پیش‌بینی شده به‌وسیله دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب در چاه‌های مورد مطالعه نتایج قابل‌قبولی داشته و در تشخیص صحیح وقوع شکستگی در سازندهای کربناته پیش‌بینی واقع‌بینانه‌ای ارائه داده‌اند.

در این تحقیق با بررسی پارامترهای اثرگذار بر نتایج عملیات شکست هیدرولیکی و داده‌های موجود، شاخص شکاف‌پذیری کل که تابعی از تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی، مدول یانگ، شکنندگی و زاویه اصطکاک داخلی است می‌تواند در انتخاب لایه‌های کاندید در سایر مخازن کربناته ایران استفاده شود.

رابطه ارائه شده از شاخص شکاف‌پذیری در مخازن شیلی، نتایج قابل قبولی در چاه‌های مورد مطالعه در مخزن بنگستان که جز مخازن کربناته محسوب می‌گردد، نشان داد.

نتایج به دست آمده از پرسش‌نامه تهیه شده، نشان می‌دهد که بر اساس نظر کارشناسان، شاخص شکاف‌پذیری کل اهمیت بیشتری نسبت به سایر معیارها در انتخاب لایه کاندید دارد.

طبق مطالعه صورت‌گرفته، روش انتگرال‌های فازی، ابزار مناسبی برای اولویت‌بندی لایه‌های کاندید در عملیات شکست هیدرولیکی است. این روش رتبه‌بندی می‌تواند سهم عمده‌ای در روند تصمیم‌سازی و سرمایه‌گذاری‌های آتی در خصوص اجرای فرآیند شکست هیدرولیکی ایفا کند. گرچه شاید مطالعات تجربی براساس داده‌های خام بتواند طبقه‌بندی اولیه و محدودی از لایه‌های مناسب ارائه دهد، ولی با استفاده از روش‌هایی نظیر انتگرال‌های فازی می‌توان با به‌کارگیری همه اطلاعات و دخیل نمودن اوزان معیارها، به طبقه‌بندی و اولویت‌دهی جامعی از همه لایه‌ها دست یافت.

نتایج نهایی حاصل از اولویت‌بندی انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت نشان می‌دهد که در سازند ایلام به ترتیب لایه‌های  $C_1-C_2$  در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۳۵۴ تا ۳۴۰۳ متری)،  $C_2-2$  در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۴۳۲ تا ۳۴۵۰ متری)،  $C_1-1$  در چاه ۴۸۸ (از عمق ۳۳۶۷ تا ۳۳۹۵ متری)،  $C_2-1$  در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۴۰۵ تا ۳۴۳۱ متری)،  $C_2$  در چاه ۴۸۸ (از عمق ۳۴۲۵ تا ۳۴۴۲ متری)،  $C_1-C_2$  در چاه ۴۸۸ (از عمق ۳۳۹۷ تا ۳۴۱۹ متری) و در سازند سروک به ترتیب لایه‌های  $E_2-1$  در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۶۵۹ تا ۳۶۸۳ متری)،  $E_1$  در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۵۸۹ تا ۳۶۰۸ متری)،  $E_2-2$  در چاه ۳۹۷ (از عمق ۳۶۸۵ تا ۳۷۲۳ متری) و  $E_2$  در چاه ۴۸۸ (از عمق ۳۷۱۸ تا ۳۷۵۰ متری)، مناسب‌ترین کاندیدها برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی هستند.

نتایج به دست آمده از روش انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت در رتبه‌بندی لایه‌های کاندید یکدیگر را تأیید نمودند؛ همچنین انتگرال فازی چوکویت به دلیل آنکه نوعی عملگر جمع می‌باشد، نسبت به



انتگرال فازی سوگنو نتایج دقیق تر و قابل اطمینان تری ارائه داده است. به همین دلیل این انتگرال می تواند در تصمیم گیری های بلادرنگ کارا و سودمند باشد.

## ۲-۵ پیشنهادات

نتایج به دست آمده از انجام آزمایش های مکانیکی سنگ بر روی مغزه، نقش بسیار پررنگی در کالیبره کردن مدل ساخته شده و انتخاب روابط تجربی مناسب در ساخت مدل دارند. بنابراین پیشنهاد می شود نتایج آزمایشگاهی بیشتری در میدان مورد مطالعه انجام گیرد تا رابطه تجربی مناسب تری برای میدان مورد نظر به دست آید.

آزمایش هایی مانند نشت و نشت گسترده برای کالیبره کردن مدل تنش برجا ارزشمند هستند و اجرای عملیات هایی نظیر آن برای بالا بردن دقت مدل های ژئومکانیکی در ایران مورد نیاز است. پیشنهاد می گردد که اجرای این آزمایش ها در سطح گسترده ای در دیگر میادین نفتی ایران صورت پذیرد.

وجود درز و شکاف های طبیعی در مخازن کربناته ایران یکی از چالش های اصلی در انجام عملیات شکست هیدرولیکی است که می تواند نتایج عملیات را به طور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین توصیه می شود مطالعات آزمایشگاهی گسترده ای برای بررسی اثر درز و شکاف های طبیعی بر روی نحوه انتشار شکاف هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه انجام شود.

در این مطالعه از معیارهای شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب جهت طراحی پنجره ایمن گل حفاری استفاده شد. می توان توصیه نمود، دیگر معیارها همچون معیار دراگر- پراگر و معیار اصلاح شده لید به کار گرفته شود و نتایج حاصل از این معیارها با یکدیگر مقایسه گردند.

پیشنهاد می گردد از دیگر روش های هوشمند در زمینه ترکیب اطلاعات مانند شبکه عصبی و سایر تصمیم گیری های چند معیاره نظیر AHP فازی، Topsis، Saw، Vikor و ANP نیز برای انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکست هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه استفاده گردد و نتایج این روش ها

با یکدیگر مقایسه و یا ترکیب گردند تا بتوان با اطمینان بیشتری در مورد انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکست هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه، اظهار نظر کرد.

به منظور حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های صورت‌گرفته در انتخاب لایه کاندید، توصیه می‌شود که نتایج حاصل از اجرای عملیات شکست هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه با نتایج حاصل از این تحقیق مقایسه گردد.

منابع و مأخذ

## منابع و مأخذ فارسی

امیری، ح.، رمضان‌زاده، ا.، پرهیزگار، م. ح.، (۱۳۹۵)، ارائه یک شاخص شکاف‌پذیری به‌منظور انتخاب چاه و لایه کاندید برای عملیات شکاف هیدرولیکی در میدان نفتی اهواز، دومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، تهران، ایران.

توانایی، ف.، محمدیان، ر.، مسعودی، پ.، (۱۳۹۴)، پهنه‌بندی میدان اهواز از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی، اولین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، مرکز همایش‌های بین‌المللی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران.

حسینی، ع.، کیوانی، س.، (۱۳۹۱)، مبانی عملیات اسیدکاری، نشر تهران، کتاب آوا.

درویش، ه.، آبدیده، م.، عاشوری، س.، (۱۳۹۱)، بررسی امکان عملیات شکست هیدرولیکی در مخزن بنگستان (یکی از میادین نفتی جنوب‌غربی ایران)، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز، شیراز.

شیرکوند، ع.، فاتحی مرجی، م.، دهقان، ع.، (۱۳۹۳)، تحلیل پایداری و انتخاب مناسب‌ترین لایه جهت انجام شکست هیدرولیکی در یکی از مخازن هیدروکربنی ایران در خلیج فارس، کنفرانس ملی علوم معدنی، ساری.

شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، (۱۳۸۹)، گزارش شماره پ-۶۷۵۶، تفسیر نمودار تصویری

**UBI در چاه ۳۶۸.**

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

شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، (۱۳۹۲)، گزارش تفسیر نمودار تصویری OMRI در چاه

۴۸۸، اهواز، ایران.

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، (۱۳۸۶)، گزارش تفسیر نمودار تصویری FMI در چاه ۳۹۷، اهواز، ایران.

صائمی، م.، (۱۳۹۲)، تحلیل ژئومکانیکی و آنالیز ناپایداری دیواره چاه در یکی از میادین گازی جنوب غرب ایران، دومین همایش مهندسی مخازن هیدروکربوری، علوم و صنایع مرتبط، تهران. عرب عامری، ف.، (۱۳۹۳)، مدل سازی فشار منفذی با استفاده از نشانگرهای لرزه ای و نگارهای پتروفیزیکی در یکی از مخازن نفتی جنوب غربی ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

مسعودی، پ.، (۱۳۹۰)، شناسایی فازی زون های تولید هیدروکربنی در مخازن کربناته با رویکرد ترکیب اطلاعات، پایان نامه کارشناسی ارشد اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

هلالی زاده، ع.، زارع، م. ح.، صفیان، ع.، (۱۳۹۵)، بررسی ژئومکانیکی سازند آسماری و بنگستان و انتخاب بهترین لایه جهت عملیات شکاف هیدرولیکی، سومین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی با رویکرد توسعه ارتباط دولت، دانشگاه و صنعت، تهران، موسسه مدیران خبره نارون.

Aamodt, L., Kuriyagawa, M. (1981). *Measurement of instantaneous shut-in pressure in crystalline rock*. Los Alamos National Laboratory; NM (USA).

Adachi, J., Siebrits, E., Peirce, A., and Desroches, J.)2007). *Computer simulation of hydraulic fractures*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(5), pp. 739-757.

Afsari, M., Ghafoori, M. R., Roostaeian, M., Haghshenas, A., Ataei, A., 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. Bahrain: Society of Petroleum Engineers.

Aguilar- Razo, R. (2000). *Propped Fracturing in Gas Carbonate Formations in Mexico*. In SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico. Society of Petroleum Engineers.

Al-Ajmi, A., and Zimmerman, R. (2006a). *A New 3D Stability Model for the Design of NonVertical Wellbores*. In Golden Rocks 2006, the 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

Ali, A. H. A., Brown, T., Delgado, R., Lee, D., Plumb, D., Smirnov, N., Stone, T. (2003). *Watching rocks change-Mechanical earth modeling*. Oilfield Review, 15(1), 22-39.

Alkaabi, A. (2003). *Stimulate the flow*. Schulmberger Middle East & Asia Reservoir Review.

Amani, A., and Shahbazi, K. (2013). *Prediction of rock strength using drilling data and sonic logs*. International Journal of Computer Applications, 81(2).

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*. 1st International Conference on Petroleum and Mineral Resources, Kurdistan, Iraq: University of Koya.

Bai, M. (2016). *Why are brittleness and fracability not equivalent in designing hydraulic fracturing in tight shale gas reservoirs?* Petroleum, 2(1), 1-19.

Banks D, Odling N. E., Skarphagen, H., Rohr-Torp, E. (1996). *Permeability and stress in crystalline rocks*. Terra Nova. 8(3), 223-235.

Bishop, C. M. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. carendon pres, Oxford.

Brady, B. H. and Brown, E. T. (2005). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.

Brown, E. T. (2007). *Block Caving Geomechanics*. 2nd edn. International Caving Study: The University of Queensland.

Bruner, K. R. (2011). *A comparative study of the Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, and Devonian Marcellus shale, Appalachian basin*. National Energy Technology Laboratory Rep., DOE/NETL-2011/1478.

Chandong, C., Zoback, M. D., Khaksar, A. (2006). *Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 223-237.

Charlez, P. A. (1997). *Rock mechanics: petroleum applications* (Vol. 2). Editions Technip.

Christaras, B., Mariolakos, I., Foundoulis, J., Athanasias, S., Dimitriou, A. (1997). *Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece*. 7th International Symposium on the Conservation of Monuments. Mediterranean Basin, 125-132.

Cipolla, C. L., Lolon, E. P., Erdle, J. C., Rubin, B. (2010). *Reservoir modeling in shale-gas reservoirs*. SPE reservoir evaluation & engineering, 13(04), 638-653.

Crain, R. (2012). *Crain's Petrophysical Pocket Pal*. Handbook.

Detournay, E., Sarout, J., Tan, C., Caurel, J. (2005). *Chemoporoelastic Parameter Identification of a Reactive Shale*. Pp. 125–32 in IUTAM Symposium on Physicochemical and Electromechanical Interactions in Porous Media. Springer.

Dong, B. X., Cheng, Y. F., Liu, Y. C., Yi, X. B., Yang, L., Wu, L. Y., Wang, B. (2013). *Research of the petrophysical property of shale gas reservoirs*. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 1, 005.

Eissa, E., and Kazi, A. (1988). *Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 479–482.

Elkington, P. A. S., Stouthamer, P., Brown, J. R. (1982). *Rock strength predictions from wireline logs*. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts (Vol. 19, No. 2, pp. 91-97). Pergamon.

Ewy, R. T. (1999). *Wellbore-Stability Predictions by Use of a Modified Lade Criterion*. SPE Drilling and Completion 14(02):85–91.

Economides, M. J., Martin, T. (2007). *Modern fracturing: Enhancing natural gas production* (pp. 978-1). Houston, Texas: ET Publishing.

Fang, C., Amro, M. (2014). *Influence factors of fracability in nonmarine shale*. In SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition.

Fernandez-ibanez, F., Cardona, F., Holland, M., Araujo, E. M., Brudy, M., Alvarelos, J., Mateus, D. C. (2010). *3D Geomechanical Modeling for the Apiay and Suria Oil Fields (Llanos Orientales Basin, Colombia): Insights on the Stability of Reservoir-Bounding Faults*. In SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers.

Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 53). Elsevier.

Frank, U., Barkley, N. (1995). *Remediation of low permeability subsurface formations by fracturing enhancement of soil vapor extraction*. Journal of hazardous materials, 40(2), 191-201.

Fu, H., Wang, X., Zhang, L., Gao, R., Li, Z., Zhu, X., Xu, W., Li, Q., Xu, T. (2015). *Geological controls on artificial fracture networks in continental shale and its fracability evaluation: A case study in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 26, pp.1285-1293.

Guo, J. C., Luo, B., Zhu, H. Y., Wang, Y. H., Lu, Q. L., Zhao, X. (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.

Guoynes, J., Squire, K., Blauch, M., Yeager, V., Yater, J., Wallace, R., Clark, R. (2000). *Optimizing deliverability in five gas-storage reservoirs-case studies*. In SPE Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers. Morganton, West Virginia, USA.

Haimson, B. C. C. and Song, I. (1993). *Laboratory Study of Borehole Breakouts in Cordova Cream: A Case of Shear Failure Mechanism*. In International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts (Vol. 30, No. 7, pp. 1047-1056). Pergamon.



Hashemi, A., Shadizadeh, S. R., Zoveidavianpoor, M. (2013). *Selection of Hydraulic Fracturing Candidates in Iranian Carbonate Oil Fields: A Local Computerized Screening of Zone and Well Data*. In IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference.

Hashemi, A., Shadizadeh, S. R., Zoveidavianpoor, M. (2012). *A local computerized multi-screening of vast amount of data to select hydraulic fracturing candidates in Iranian carbonate oil fields*. Int J Comput Appl, 39(8), 37-45.

Heydarabadi, F. R., Moghadasi, J., Safian, G., Ashena, R. (2010). *Criteria for selecting a candidate well for hydraulic fracturing*. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Hobbs, D. (1964). *The Tensile Strength of Rocks*. Pp. 385–96 in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 1. Elsevier.

Holditch, S. A., Robinson, B. M., Whitehead, W. S. (1987). *Prefracture and Postfracture Formation Evaluation Necessary To Characterize the Three-Dimensional Shape of a Hydraulic Fracture*. SPE Formation Evaluation, 2(04), 523-534.

Howard, G. C., and Fast, C. R. (1970). *Hydraulic fracturing*. New York, Society of Petroleum Engineers of AIME, 1970. 210 P.

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

Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., 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.

Jian-chun, G., Bo, L., Lu Cong, L. H. (2014). *New Model to Evaluate the Brittleness of Shale Reservoir in Western Sichuan Basin*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, Z4.

Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J. C., Zhang, B. (2014). *Fracability evaluation in shale reservoirs-an integrated petrophysics and geomechanics approach*. In SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Society of Petroleum Engineers.

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. L., Gupta, R., Kotov, S. V., Burton, W. A., Knecht, W. N., Ahmed, U. (2012). *Optimized shale resource development: Proper placement of wells and hydraulic fracture stages*. In Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

King, G. E. (2012). *Hydraulic fracturing 101: what every representative, environmentalist, regulator, reporter, investor, university researcher, neighbor and engineer should know about estimating frac risk and improving frac performance in unconventional gas and oil wells*. In SPE hydraulic fracturing technology conference. Society of Petroleum Engineers.

King, M. S. (1969). *Static and Dynamic Elastic Moduli of Rocks under Pressure*. in the 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

Krusey, R. (1988). *High Grading Fracture Candidate Selection*. Journal of Canadian Petroleum Technology, 27(04), 6 pp.

Kristiansen, T. G., Barkved, O., Pattillo, P. D. (2000). *Use of Passive Seismic Monitoring in Well and Casing Design in the Compacting and Subsiding Valhall Field, North Sea*. In SPE European Petroleum Conference. Society of Petroleum Engineers.

Kuncheva, L. L. (2004). *Combining Pattern Classifiers, Methods and Algorithms*, A Wiley-Interscience publication, Hoboken, 350 pp.

Landau, L. D., and Zoback, M. D. (2010). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press.

Le, K., and Rasouli, V. (2012). *Determination of safe mud weight windows for drilling deviated wellbores: a case study in the North Perth Basin*. WIT Transactions on Engineering Sciences, 81, 83-95.

Li, Q., Chen, M., Jin, Y., Zhou, Y., Wang, F. P., Zhang, R. (2013). *Rock mechanical properties of shale gas reservoir and their influences on hydraulic fracture*. In IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference.

Martin, A. N., Economides, M. (2010). *Best practices for candidate selection, design and evaluation of hydraulic fracture treatments*. In SPE Production and Operations

Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Tunisia.

Mayerhofer, M. J., Lolon, E., Warpinski, N. R., Cipolla, C. L., Walser, D. W., Rightmire, C. M. (2010). *What is stimulated reservoir volume?* SPE Production & Operations, 25(01), 89-98.

Montgomery, C. T., Smith, M. B. (2010). *Hydraulic fracturing: History of an enduring technology*. Journal of Petroleum Technology, 62(12), 26-40.

Moradi, S.; Moeini, M.; al-Askari, M. K. G.; Mahvelati, E. H. (2016). *Determination of Shale Volume and Distribution Patterns and Effective Porosity from Well Log Data Based On Cross-Plot Approach for A Shaly Carbonate Gas Reservoir*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 44, No. 4, p. 042002), IOP Publishing.

Mullen, M., Enderlin, M. (2012). *Fracability Index-More Than Just Calculating Rock Properties*. Paper SPE 159755 presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio Texas, USA, 8–10 October.

Nagy, Z., Pacheo, F., Rosa, M., Ribeiro, M., Jouti, I., Pastor, J., Grandy, A., Fluckiger, S., Gigena, L. (2011). *Use Of geomechanics for optimizing reservoir completion and stimulation strategies for carbonates in the campos Basin, Offshore Brazil*. OTC Brasil. Rio de Janeiro, Brazil: Offshore Technology Conference.

Plumb, R., Edwards, S., Pidcock, G., Lee, D., Stacey, B. (2000). *The mechanical earth model concept and its application to high-risk well construction projects*. In IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.

Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W. V., Kundert, D. (2008). *A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale*. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

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

Shadizadeh, S. R., Habibnia, B. A., Syllabee, R. (2009). *Investigation and selection of suitable layers in bangestan reservoir for hydraulic fracturing operation*. Scientia Iranica. Transaction C, Chemistry, Chemical Engineering, 16(2), p.149.

Shieh, J. I., Wu, H. H., Liu, H.C. (2009). *Applying a complexity – based choquet*

*integral to evaluate students' performance*. Expert systems with Applications, vol. 36, pp. 5100- 5106.

Simangunsong, R., Villatoro, J. J., Davis, A. K., (2006). *Wellbore Stability Assessment for Highly Inclined Wells Using Limited Rock-Mechanics Data*. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Tanani, H., Keller, J. M. (1990). *Information fusion in computer vision using the fuzzy integral systems*. Man and cybernetics, 20(03), pp. 733-741.

Torra, V., Narukawa, Y. (2006). *The interpretation of fuzzy integrals and their application to fuzzy systems*. International journal of approximate reasoning 41(1), 43-58.

Wang, F. P.; Gale, J. F. (2009). *Screening criteria for shale-gas system*. Gulf Coast Asso of Geological Soc. Transactions, 59, pp. 779-793.

Warpinski, N. R., Teufel, L. W. (1987). In-situ stresses in low-permeability, nonmarine rocks. In Low Permeability Reservoirs Symposium. Society of Petroleum Engineers.

Yasar, E. and Erdogan, Y. (2004). *Correlating sound velocity with the densit compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(5), 871-875.

Zhang, F., Zhang, H., Yuan, F., Wang, Z., Chen, S., Li, C., Han, X. (2015). *Geomechanical Mechanism of Hydraulic Fracturing and Fracability Evaluation of Natural Fractured Tight Sandstone Reservoir in Keshen Gasfield in Tarim Basin*. In Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Society of Petroleum Engineers.

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

Zhang, L., and Radha, K. C. (2010). *Stability Analysis of Vertical Boreholes Using a Three-Dimensional Hoek-Brown Strength Criterion*. In GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design (pp. 283-292).

Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Paperback edition. New York: Cambridge University Press.

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.

Zoveidavianpoor, M., Samsuri, A., Shadizadeh, S. R. (2011). *The needs for hydraulic fracturing in Iranian carbonate oilfields: Acid or propped fracture*. In The First National Conference of Novel Technologies in Oil & Gas Industries, IAU, Iran, March (pp. 3-4).

Zoveidavianpoor, M., Samsuri, A. Shadizadeh, S. R. (2012). *Development of a Fuzzy System Model for Candidate-well Selection for Hydraulic Fracturing in a Carbonate Reservoir*. In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

## **Abstract**

Due to limited fossil fuel resources and their non-renewable nature, there exist a great need for maximum recovery of oil reservoirs. Hydraulic fracturing Treatment (HFT) is a common stimulation technology which is being used to enhance hydrocarbon production and recovery factor consequently. Studies have shown that the successful operation of hydraulic fracturing mostly depends on selection of candidate well and layer. Generally, the purpose of selecting a candid is selecting one or a group of wells or zones with the most probability of success. In general, the purpose of selecting candidates is the selection of one or a group of wells or zones for HFT that are most likely to succeed. Researches have shown that appropriate selection of candidate wells and layers, may lead to increase in production, especially in wells with high skin factor and low permeability. Most of the carbonate reservoirs are less permeable, hence, they can economically produce when being hydraulically fractured. In this research, with the aim of selecting candidate layers in wells NO. 488 and 397 in Bangestan reservoir of Ahvaz oil field, a one-dimensional geomechanical model was created using geological data, petrophysical logs (including porosity, density, sonic, etc.), drilling reports, imaging logs and well integrity tests. Then, based on studies conducted, reservoir conditions and wells data, six main criteria – including thickness, porosity, saturation, stress contrast between target zone and upper and lower zones, Fracability Index (FI) and Total Fracability Index (TFI)- were selected as the most important and influential factors for selecting candidate layers in the wells under study. The next step was to Identify and analyze the hydraulic fracturing operation candidate layers based on mentioned criteria. Finally, Choquet and Sugeno fuzzy integrals were used in order to reduce the risk and uncertainty in selection and prioritization of the most suitable candidate. Based on the obtained results, In Ilam formation, layers of C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> in well NO. 397 (from depth 3354 to 3403 m), C<sub>2</sub>-2 in well NO. 397 (from depth 3432 to 3450 m) and C<sub>1</sub>-1 in well NO. 488 (from depth 3367 to 3395 m) and in Sarvak formation layers E<sub>2</sub>-1 in well NO. 397 (from depth 3659 to 3683 m) and E<sub>1</sub> in well NO. 397 (from depth 3589 to 3608 m) are best candidates for implementing hydraulic fracturing operation.

**Key words:** Hydraulic fracturing, Mechanical earth model (MEM), Candidate layer selection, Fraccability Index, Fuzzy integrals, Reservoir of Bangestan



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering  
M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering – Exploration

**Identifying Favorable Zones for Hydraulic Fracturing Operation and  
Prioritization Them in Some Iranian South West Wells; A fuzzy  
Integrals Approach.**

**By: Eftekhar Shabanikia**

**Supervisor:**

**Dr. Abolghasem Kamkar-Rouhani**

**Dr. Behzad Tokhmechi**

**Advisor:**

**Ahmad Ramezanzadeh**

**June 2017**