





دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه اکتشاف معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مدل‌سازی تولید ماسه (جامدات) و ارزیابی پارامترهای مرتبط با آن در یکی از  
چاه‌های نفتی ایران

رامین محمدی شیرکلایی

اساتید راهنما

دکتر فرامرز دولتی ارده جانی

دکتر علی مرادزاده

اساتید مشاور

مهندس رئوف غلامی

مهندس فرهاد صادق‌زاده

بهمن ۱۳۹۲



دانشگاه علمی کاربردی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۹۲/۹۳/۱۲۶۲-۴

تاریخ: ۹۳/۱۲/۱۰

ویرایش:

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رامین محمدی شیرکلایی، رشته معدن، گرایش اکتشاف، تحت عنوان: مدل سازی تولید ماسه (جامدات) و ارزیابی پارامترهای مرتبط با آن در یکی از چاه های نفتی ایران که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز ۱۸+۵)
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	a عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر فرامرز دولتی ارده جانی	۱- استاد راهنما
	استاد	دکتر علی مرادزاده	۲- استاد راهنما
	—	مهندس رئوف غلامی	۳- استاد مشاور
	—	مهندس فرهاد صادق زاده	۴- استاد مشاور
	استادیار	دکتر علی رضا عرب امیری	۵- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر حسین میرزایی	۶- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر فضل الله ساغروانی	۷- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده:



## تقدیم به پدر و مادرم :

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسبیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

## تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ: "

از پدر و مادر عزیزم ... این دو معلم بزرگوام، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یابوری بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند؛ از اساتید با کمالات و شایسته؛ جناب آقایان دکتر فرامرز دولتی‌ارده‌جانی و علی مرادزاده که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفته‌اند؛ از جناب آقایان مهندس رؤف غلامی و فرهاد صادق‌زاده که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقایان دکتر میرزایی و ساغروانی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

## تعهد نامه

اینجانب رامین محمدی شیرکلایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی تولید ماسه (جامدات) و ارزیابی پارامترهای مرتبط با آن در یکی از چاه های نفتی ایران تحت راهنمایی دکتر فرامرز دولتی ارده جانی و دکتر علی مرادزاده متعهد می شوم.

- 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 می باشد 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 می گردد.
- 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 می باشد . 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 نمی باشد.

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

## چکیده

فرآیند تولید ماسه یا جامدات در چاه‌های نفتی که عمدتاً در طول حفاری و شکست هیدرولیکی در میادین تحکیم نیافته اتفاق می‌افتد، یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی است که می‌تواند منجر به ریزش چاه، فوران گل حفاری و گیر کردن رشته ابزار حفاری در چاه گردد. مهم‌ترین عوامل تشکیل ماسه یا جامد در چاه، گسیختگی منطقه دارای ماسه به دلیل سست بودن، مقاومت فشاری اندک و تنش موثر بالای منطقه به دلیل تولید و تهی‌شدگی مخزن است. در مطالعه حاضر سعی شده تا با تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن از طریق نگارهای چاه، پتانسیل تولید ماسه در دیواره چاه طی فرایند حفاری و تولید با ارائه اندرکنش (سیستم مهندسی سنگ) پارامترهای موثر و مدل مکانیکی زمین معین گردد. در ابتدا، با بهره‌گیری از روابط تجربی و نگارهای مختلف پارامترهای الاستیک دینامیکی سنگ مخزن تخمین زده شد و بعد از تبدیل به مقادیر استاتیکی با نتایج حاصل از آزمایشات مغزه مورد تایید قرار گرفت. سپس به محاسبه مقاومت فشاری تک محوره سنگ مخزن به کمک روابط تجربی مختلف پرداخته شده است. در ادامه فشار منفذی سیال با استفاده از نگار صوتی و مقاومت ویژه تعیین گردید و نتایج حاصل از این مدل‌سازی‌ها با داده‌های تست سازند (MDT) کالیبره گردید. سپس با توجه به فشار منفذی و پارامترهای ژئومکانیکی، بزرگی تنش‌های برجا که شامل تنش عمودی و تنش افقی حداقل و حداکثر است، محاسبه گردید و نتایج با داده‌های تست نشت (LOT) کالیبره شدند. در ادامه تنش‌های مماسی، شعاعی و محوری روی دیواره چاه مورد نظر محاسبه گردید. سپس با تحلیل سیستم مهندسی سنگ مشخص شد پارامترهای تنش موثر، خواص پتروفیزیکی، خواص سیال، افت فشار، هندسه حفره تولید، فشار مخزن، خواص مکانیکی و تراکم و جهت حفر حفره تولید به ترتیب بیشترین اندرکنش را در فرایند ماسه‌دهی چاه دارند. در میان پارامترهای مختلف، تنش موثر یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم است. بزرگی تنش‌های موثر دیواره بستگی به بزرگی تنش‌های بر جای موثر، شعاع چاه، فاصله از مرکز چاه و فشار منفذی دارد. بنابراین با کنترل هر یک از این پارامترها می‌توان اثر تنش موثر در تولید ماسه را تا حدودی کنترل کرد. به عبارت دیگر

چنانچه با انتخاب وزن مناسب گل حفاری و نرخ بحرانی تولید بتوان تنش‌های اطراف چاه را کنترل کرد می‌توان تولید ماسه را نیز کنترل کرد. در ادامه با استفاده از معیارهای شکست سنگ (موهر-کلمب، موگی-کلمب و هوک-براون) بازه مجاز فشار گل حفاری تعیین شده و نتایج حاصل از سه معیار با هم مقایسه شده است. از نتایج این بخش می‌توان به تخمین بهتر فشارهای گل حفاری تعیین شده با استفاده از معیار موگی-کلمب در حالت تنش‌های نابرابر افقی نسبت به دیگر معیارها اشاره کرد. نتایج حاصل شده به کمک گزارشات حین حفاری و تولید مورد تایید قرار گرفت. در نهایت نیز با تعیین مناطق مختلفی که دچار خردشدگی و شکستگی کششی شده‌اند نشان داده شده است که با تعیین نرخ بحرانی تولید از تولید ماسه در حین تولید می‌توان تا حدودی جلوگیری نمود.

**واژه‌های کلیدی:** نگارهای چاه، پتانسیل تولید ماسه، سیستم مهندسی سنگ، معیارهای شکست و مدل مکانیکی زمین.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱- مدل سازی پتانسیل تولید ماسه به کمک نگارهای پتروفیزیکی و روابط شکست برشی سنگ، اولین

همایش ملی نفت و گاز ایران، کرمان مهرماه ۱۳۹۲

۲- ارائه سیستم مهندسی سنگ برای ارزیابی پتانسیل تولید ماسه در چاهها، اولین همایش ملی نفت و

گاز ایران، کرمان مهرماه ۱۳۹۲

## فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- بیان مسئله .....	۲
۳-۱- سابقه و ضرورت انجام تحقیق .....	۴
۴-۱- اهداف و سوالات تحقیق .....	۷
۵-۱- روش تحقیق .....	۸
۶-۱- سازمان دهی پایان نامه .....	۸

## فصل دوم: زمین‌شناسی میدان و داده‌های مورد استفاده

۱-۲- مقدمه .....	۱۲
۲-۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی میدان آزادگان .....	۱۲
۳-۲- سازندهای منطقه مورد مطالعه .....	۱۴
۳-۲-۱- سازند سروک .....	۱۴
۴-۲- داده‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه .....	۱۶

## فصل سوم: تولید جامدات، روش‌های پیش‌بینی آن و سیستم مهندسی

۱-۳- مقدمه .....	۲۰
۲-۳- تولید ماسه / جامدات .....	۲۰
۳-۲-۱- پی‌آمد تولید جامدات .....	۲۱
۳-۳- شرایط تولید ماسه و روش‌های پیش‌بینی آن .....	۲۲

۳-۳-۱- مشاهدات صحرایی تولید ماسه	۲۲
الف- تک پارامتری	۲۳
ب- دو پارامتری	۲۳
ج- چند پارامتری	۲۳
۳-۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی	۲۴
۳-۳-۳- مدل سازی نظری	۲۵
الف- گسیختگی برشی	۲۵
ب- گسیختگی کششی	۲۶
ج- فرسایش	۲۷
۳-۳-۴- روش‌های تجربی	۲۸
الف- روش زمان گذر امواج صوتی	۲۸
ب- روش ترکیب مدول‌های مختلف	۲۸
ج- روش شلومبرژه	۲۹
د- روش تخلخل	۲۹
ه- روش کنترل ته چاهی	۳۰
۳-۴-۴- روش‌های پیش‌گیری و کنترل تولید ماسه	۳۰
۳-۴-۱- کنترل ماسه از طریق کاهش نیروهای حرکتی	۳۱
۳-۴-۲- کنترل ماسه از طریق تحکیم شیمیایی سازند	۳۲
۳-۴-۳- کنترل مکانیکی تولید ماسه	۳۲
۳-۵-۵- سیستم مهندسی سنگ	۳۳
۳-۵-۱- ماتریس اندرکنش	۳۴
۳-۵-۲- شدت و مقدار غالب بودن پارامترها	۳۵

۳-۵-۳- کد گذاری ماتریس اندرکنش .....	۳۶
۳-۵-۴- تفسیر ماتریس اندرکنش .....	۳۷
۳-۶- جمع بندی .....	۳۸

## فصل چهارم: بررسی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن

### میدان مورد مطالعه

۱-۴- مقدمه .....	۴۲
۲-۴- ابزار دو قطبی برشی .....	۴۲
۱-۲-۴- تخمین پارامترهای مکانیکی بر اساس اطلاعات نگارهای چاه .....	۴۳
۳-۴- ضرورت کالیبراسیون داده ها .....	۴۵
۴-۴- تعیین پارامترهای الاستیکی دینامیکی .....	۴۶
۱-۴-۴- مدول یانگ .....	۴۶
۲-۴-۴- نسبت پواسون .....	۴۷
۳-۴-۴- مدول برشی .....	۴۷
۵-۴-۴- مدول بالک .....	۴۸
۵-۴- تعیین پارامترهای الاستیکی استاتیکی .....	۴۹
۶-۴- تعیین مقاومت فشاری تک محوره .....	۵۳
۷-۴- برآورد تنش های اصلی برجا .....	۵۶
۱-۷-۴- تنش قائم .....	۵۷
۲-۷-۴- تنش افقی حداقل .....	۵۷

۶۲.....	۴-۷-۳- تنش افقی حداکثر
۶۲.....	۴-۸- فشار منفذی
۶۳.....	۴-۸-۱- تعیین فشار منفذی با استفاده از نگار صوتی
۶۵.....	۴-۸-۲- تعیین فشار منفذی با استفاده از نگار مقاومت ویژه
۶۷.....	۴-۹- نتیجه‌گیری

### فصل پنجم: پارامترهای موثر در ماسه‌دهی و مدل مکانیکی زمین

۷۰.....	۵-۱- مقدمه
۷۰.....	۵-۲- شاخص پتانسیل تولید ماسه
۷۱.....	۵-۲-۱- ویژگی‌های مخزن
۷۲.....	الف- خواص پتروفیزیکی سازند
۷۲.....	ب- خواص مکانیکی سنگ
۷۳.....	ج- خواص سیال درون سازند
۷۳.....	۵-۲-۲- بارهای مرزی
۷۳.....	الف- تنش برجا
۷۴.....	ب- فشار مخزن
۷۴.....	۵-۲-۳- فعالیت‌های فنی و مهندسی
۷۴.....	الف- ابعاد و هندسه چاه و حفرات موجود در دیواره منطقه تولید
۷۵.....	ب- جهت و زاویه بین حفرات موجود در دیواره منطقه تولید
۷۵.....	ج- افت فشار
۷۵.....	۵-۳- ماتریس اندرکنش و طبقه بندی پارامترهای تولید ماسه
۷۶.....	۵-۳-۱- کدگذاری ماتریس

۷۸	۵-۳-۲- نمودار علت و تأثیر
۸۲	۵-۴- مدل سازی تولید ماسه
	۵-۴-۱- کاربرد معیار شکست موهر- کلمب، موگی- کلمب و هوک- براون جهت
۸۳	ارزیابی پایداری چاه
۸۹	۵-۵- شناسایی مناطق تولید ماسه و حرکت دانه های آن
۹۱	۵-۶- نرخ تولید بحرانی
۹۳	۵-۷- نتیجه گیری

### فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۹۶	۶-۱- جمع بندی نتایج و بحث روی آنها
۹۹	۶-۲- پیشنهادها
۱۰۱	مراجع

### پیوست الف: فرم نظرسنجی ارائه شده در این مطالعه

۱۱۲	الف-۱- مقدمه
۱۱۲	الف-۲- نحوه تکمیل فرم نظرسنجی

### پیوست ب: تنش های اطراف گمانه و معیارهای شکست

۱۱۶	ب-۱- مقدمه
۱۱۶	ب-۲- تنش در اطراف چاه مایل

ب-۲-۱- معادلات انتقال	۱۱۶
ب-۳- تنش در اطراف چاه‌های قائم	۱۲۰
ب-۴- معیارهای شکست	۱۲۳
ب-۴-۱- معیار شکست موهر- کلمب	۱۲۴
ب-۴-۱-۱- وزن بهینه گل بر اساس معیار موهر- کلمب	۱۲۵
ب-۴-۲- معیار شکست موگی- کلمب	۱۲۸
ب-۴-۲-۱- بررسی پایداری چاه با استفاده از معیار موگی- کلمب	۱۳۰
ب-۴-۳- معیار شکست هوک- براون	۱۳۱
ب-۴-۳-۱- معیار تعمیم یافته هوک- براون	۱۳۱
ب-۴-۳-۲- پایداری دیواره چاه بر اساس معیار هوک- براون	۱۳۲

## شکل‌ها

شکل ۱-۱- مقالات با کلید واژه تولید جامدات با تفکیک سال	۵
شکل ۱-۲- مقالات با کلید واژه تولید جامدات با تفکیک کشورها از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۳	۶
شکل ۱-۳- فلوجارت طراحی شده برای مدل‌سازی پدیده تولید ماسه در مطالعه حاضر	۹
شکل ۱-۲- موقعیت میدان نفتی آزادگان	۱۳
شکل ۲-۲- واحد های سنگ شناسی منطقه زاگرس	۱۵
شکل ۲-۳- حوضه نفتی آزادگان	۱۶
شکل ۲-۴- نمودار تغییرات نگارهای گاما، چگالی، صوتی، تخلخل و مقاومت ویژه در چاه ۶ میدان آزادگان	۱۸
شکل ۳-۱- شکست برشی و کششی در دیواره چاه	۲۷

- شکل ۳-۲- شماتیک ساده‌ای از گراول پک ..... ۳۳
- شکل ۳-۳- موقعیت قرارگیری پارامترهای اولیه و اندرکنش میان آنها در ماتریس اندرکنش ..... ۳۴
- شکل ۳-۴- ماتریس اندرکنش مهندسی سنگ ..... ۳۶
- شکل ۳-۵- (الف) مفهوم اثر و تأثیر مربوط به هر یک از پارامترها در ماتریس اندرکنش(ب) نمودار  
علت- تأثیر ..... ۳۷
- شکل ۳-۶- مراحل رسم نمودار علت- تأثیر با کدگذاری نیمه کمی خبره ..... ۳۸
- شکل ۴-۱- مقایسه مدول الاستیک دینامیکی و استاتیکی ..... ۴۵
- شکل ۴-۲- نمودار تغییرات مدول یانگ دینامیکی در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط  
تجربی ..... ۴۶
- شکل ۴-۳- نمودار تغییرات نسبت پواسون در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط تجربی ..... ۴۷
- شکل ۴-۴- نمودار تغییرات مدول برشی دینامیکی در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط  
تجربی ..... ۴۸
- شکل ۴-۵- نمودار تغییرات مدول بالک دینامیکی در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط  
تجربی ..... ۴۸
- شکل ۴-۶- مدول یانگ استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه کینگ ..... ۵۱
- شکل ۴-۷- مدول بالک استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه کینگ ..... ۵۱
- شکل ۴-۸- مدول یانگ استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه عیسی و کزی  
..... ۵۱
- شکل ۴-۹- مدول بالک استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه عیسی و کزی  
..... ۵۱



- شکل ۴-۱۰- مدول یانگ استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه فچائر ۵۲....
- شکل ۴-۱۱- مدول بالک استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه فچائر ۵۲.....
- شکل ۴-۱۲- مدول یانگ استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه وانگ ۵۲....
- شکل ۴-۱۳- مدول بالک استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه وانگ ۵۲.....
- شکل ۴-۱۴- مدول یانگ استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه جامبونیسون ۵۳.....
- شکل ۴-۱۵- مدول بالک استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه جامبونیسن ۵۳.....
- شکل ۴-۱۶- مقاومت فشاری تک محوره برای مخزن مورد نظر به کمک روابط تجربی مختلف ۵۵....
- شکل ۴-۱۷- مقاومت فشاری تک محوره برای مخزن مورد نظر به کمک روابط تجربی مختلف ۵۶..
- شکل ۴-۱۸- نمودار تیپیک آزمون نشتی ۵۹.....
- شکل ۴-۱۹- تنش افقی حداقل محاسبه شده در چاه ۶ میدان آزادگان توسط رابطه تجربی پوروالاستیک که توسط داده‌های تست نشت کالیبره شده است ۶۰.....
- شکل ۴-۲۰- تنش افقی حداقل محاسبه شده در چاه ۶ میدان آزادگان توسط رابطه تجربی هابرت و ویلیز که توسط داده‌های تست نشت کالیبره شده است ۶۱.....
- شکل ۴-۲۱- تنش افقی حداقل محاسبه شده در چاه ۶ میدان آزادگان توسط رابطه تجربی ایتون که توسط داده‌های تست نشت کالیبره شده است ۶۱.....
- شکل ۴-۲۲- تنش افقی حداکثر محاسبه شده توسط رابطه تجربی پوروالاستیک برای چاه ۶ میدان آزادگان ۶۲.....

شکل ۴-۲۳- فشار منفذی به دست آمده از رابطه ایتون با استفاده از نگار صوتی در چاه ۶ میدان آزادگان.....	۶۴
شکل ۴-۲۴- فشار منفذی به دست آمده از رابطه ایتون با استفاده از نگار مقاومت ویژه در چاه ۶ میدان آزادگان.....	۶۶
شکل ۵-۱- اندرکنش میان پارامترهای موثر در شروع تولید ماسه یعنی ویژگی‌های مخزن، بار مرزی و فعالیت‌های فنی و مهندسی .....	۷۲
شکل ۵-۲- ماتریس اندرکنش کامل طراحی شده در مطالعه حاضر جهت پیش‌بینی پدیده تولید ماسه .....	۷۷
شکل ۵-۳- کدگذاری به روش نیمه‌کمی خبره ماتریس اندرکنش ۸×۸ جهت پیش‌بینی تولید ماسه .....	۷۸
شکل ۵-۴- نمودار علت و تأثیر مطابق با پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه .....	۷۹
شکل ۵-۵- هیستوگرام شدت اندرکنش میان پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه .....	۸۱
شکل ۵-۶- تغییرات تنش شعاعی ( $S_{rr}$ )، محوری ( $S_{zz}$ ) و مماسی ( $S_{tt}$ ) در دیواره چاه ۶ میدان آزادگان .....	۸۵
شکل ۵-۷- انتخاب پنجره وزن بهینه گل حفاری برای چاه شماره ۶ میدان آزادگان بر اساس معیارهای شکست موهر- کلمب، هوک- براون و موگی- کلمب .....	۸۸
شکل ۵-۸- مقایسه فشار منفذی بدست آمده از رابطه ایتون با فشار روباره در چاه شماره ۶ میدان آزادگان .....	۹۰
شکل پیوست الف-۱- ماتریس اندرکنش کامل طراحی شده در این مطالعه برای پیش‌بینی تولید ماسه .....	۱۱۴

شکل پیوست ب-۱- سیستم مختصات برای چاه انحرافی	۱۱۷
شکل پیوست ب-۲- هندسه انتقال	۱۱۹
شکل پیوست ب-۳- نمایی شماتیک تنش‌های مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ )، محوری ( $\sigma_{zz}$ ) و شعاعی ( $\sigma_{rr}$ )	
اطراف چاه قائم	۱۲۱
شکل پیوست ب-۴- مقطع چاه و موقعیت تنش‌های اطراف چاه	۱۲۲
شکل پیوست ب-۵- منحنی مربوط برآزش بر دایره موهر جهت محاسبه مقاومت برشی سنگ بر	
اساس معیار موهر- کلمب	۱۲۵

## جداول

جدول ۱-۲- نگارهای تهیه شده در چاه ۶ میدان آزادگان به همراه بازه عمقی آنها	۱۷
جدول ۱-۳- پارامترهای موثر بر تولید ماسه	۲۴
جدول ۱-۴- روابط تجربی بین پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مدول یانگ	۵۰
جدول ۲-۴- روابط تجربی مقاومت فشاری تک محوره و پارامترهای دیگر فیزیکی	۵۴
جدول پیوست ب-۱- تعیین حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) از معیار موهر- کلمب	۱۲۷
جدول پیوست ب-۲- تعیین حداکثر فشار گل ( $P_{mf}$ ) از معیار موهر- کولمب	۱۲۸
جدول پیوست ب-۳- تعیین حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) از معیار موگی- کلمب	۱۳۰
جدول پیوست ب-۴- تعیین حداکثر فشار گل ( $P_{mf}$ ) از معیار موگی- کلمب	۱۳۱
جدول پیوست ب-۵- تعیین حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) از معیار هوک- براون	۱۳۳
جدول پیوست ب-۶- تعیین حداکثر فشار گل ( $P_{mf}$ ) از معیار هوک- براون	۱۳۳



فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

پارامترهای ژئومکانیکی نقش حیاتی در ارزیابی پایداری و توسعه میادین نفت و گاز ایفا می‌کنند. با توجه به عمق، دما و فشار بالای حاکم بر سازندهای حاوی هیدروکربور، تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با آنچه که به صورت کلی مکانیک سنگ شناخته می‌شود کاملاً متفاوت خواهد بود. بدون شک، امروزه ژئومکانیک دانشی کلیدی برای تحلیل پایداری، تعیین محل مناسب حفاری و غلبه کردن بر مشکلات مرتبط با خصوصیات مکانیکی سنگ به شمار می‌رود. ژئومکانیک اساساً دانشی است که به بررسی و تحلیل رفتار لایه‌های زیرسطحی در برابر تنش‌های وارده می‌پردازد. این تنش‌ها ممکن است تنش‌های طبیعی درون زمین و یا تنش‌های القا شده توسط انسان در عملیات مختلف، از جمله حفاری باشد. بنابراین همان‌گونه که از نام این علم پیداست، کلید مشکلات فیزیکی و مکانیکی حاصل از اندرکنش سنگ با خصوصیات مکانیکی متفاوت و تنش‌های موجود، در حیطه مطالعات این علم قرار می‌گیرد (آشتیانی عبدی، ۱۳۸۸).

## ۱-۲- بیان مسئله

با توجه به حجم وسیع مشکلات موجود در مراحل مختلف تولید و بهره‌برداری از مخازن هیدروکربنی که بخش بزرگی از آنها در طی حفاری چاه‌ها و بخشی دیگر در حین بهره‌برداری از آن موضوعیت می‌یابند، مطالعات ژئومکانیکی نقش عمده‌ای را در شناسایی و کنترل این مشکلات چه در بعد زمان و چه در بعد مکان ایفا خواهند کرد. منظور از بعد مکان اعماق و سازندهای مختلف از نقطه شروع حفاری در سطح زمین تا نقطه پایان آن در عمق مخزن می‌باشد. منظور از بعد زمان نیز از زمان شروع حفاری تا آخرین روزهای تولید از مخزن است. بنابراین بدین شکل می‌توان به گستره وسیع نقش این دانش در مطالعات میادین نفت و گاز پی برد.

امروزه مشکلات عدیده‌ای در میادین عملیاتی صنعت نفت از مرحله شروع حفاری تا رسیدن نفت به سطح زمین وجود دارد (آشتیانی عبدی، ۱۳۸۸). تولید از مخازن هیدروکربنی با تغییراتی در خواص ژئومکانیکی سازند همراه است. این تغییرات، وضعیت و مقدار تنش زیر سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تغییرات ژئومکانیکی حاصل از شیوه‌های تولید در مخزن و لایه‌های روباره آن به همراه زمین شناسی پیچیده میدان، می‌تواند پایداری چاه‌ها را متأثر سازد و موجب مچالگی لوله جداری<sup>۱</sup> و تولید ماسه از چاه گردد که در نهایت موجبات از دست دادن چاه را فراهم می‌سازند. تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها مانند ضرایب الاستیک و مقاومتی برای پیش بینی تغییرپذیری ذخایر و مسائل مهندسی نظیر شکست هیدرولیکی<sup>۲</sup>، تولید ماسه، تخمین ذخایر، پیش‌بینی نفوذپذیری چاه‌های حفاری و فرونشست<sup>۳</sup> ضروری است. شناسایی مقاومت سنگ یکی از پارامترهای مهم در مهندسی شکست هیدرولیکی و تحلیل شرایط پایداری چاه‌ها می‌باشد.

فرآیند تولید ماسه یا جامدات در چاه‌های نفتی که عمدتاً در طول حفاری و شکست هیدرولیکی در سنگ مخزن تحکیم نیافته و سست اتفاق می‌افتد، یکی از بزرگ‌ترین مشکلات حفاری است که می‌تواند منجر به ریزش چاه، فوران گل حفاری و گیرکردن رشته ابزار حفاری در چاه گردد. سازندهای دارای ماسه و کربنات‌های سست از دسته مخازنی به حساب می‌آیند که در آنها احتمال رخداد مشکلات حفاری ذکر شده وجود دارد. این سازندها قبل از حفاری در تعادل هیدرومکانیکی (تعادل استاتیکی تنش برجا و فشار منفذی) به سر می‌برند اما انجام حفاری برای تولید یا شکست هیدرولیکی باعث توزیع دوباره تنش و فشار منفذی در اطراف چاه می‌شود. در طول فرآیند تولید هیدروکربن از سازندهای ماسه سنگی تحکیم نیافته یا کربنات‌های سست، به دلیل چسبندگی پایین ذرات و تنش موثر بالا به دلیل کم شدن فشار منفذی، ذرات ماسه از یکدیگر جدا شده و از سازند وارد چاه می‌شوند. از آنجا که بیش از ۷۰ درصد مخازن هیدروکربوری دنیا در سازندهای سست واقع شده‌اند

<sup>۱</sup> -Casing collapse

<sup>۲</sup> -Hydraulic fracturing

<sup>۳</sup> -Subsidence

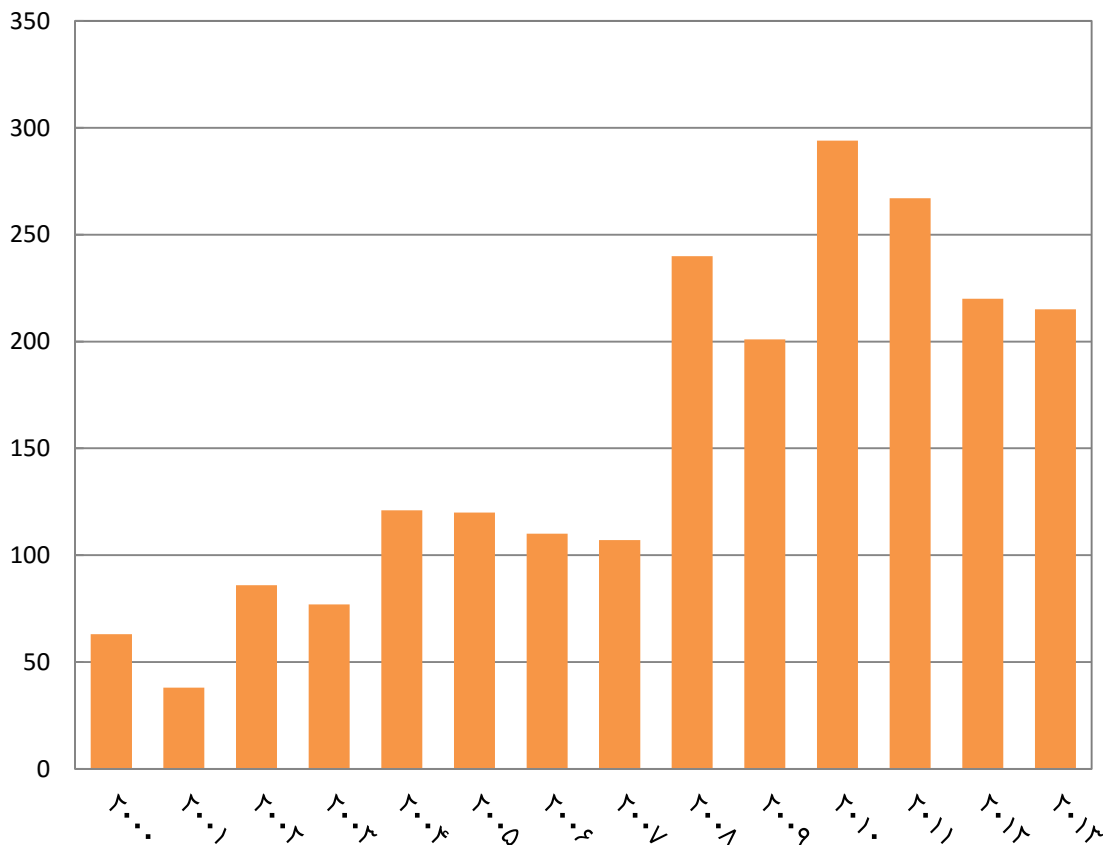
(Penberthy and Shaughnessy, 1992)، به صورت متداول، پس از شناسایی مناطق دارای پتانسیل تولید ماسه، از شبکه‌ها برای جلوگیری از ورود ماسه به داخل چاه استفاده می‌شود. فرآیند استفاده و نصب شبکه‌ها که در انواع مختلفی موجود بوده و در شرایط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسیار پرهزینه می‌باشد. بنابراین، باید احتمال تولید ماسه در چاه به یقین تبدیل شود تا از این شبکه‌ها استفاده گردد وگرنه هزینه بسیار زیادی بر پروژه تحمیل خواهد شد.

### ۱-۳- سابقه و ضرورت انجام تحقیق

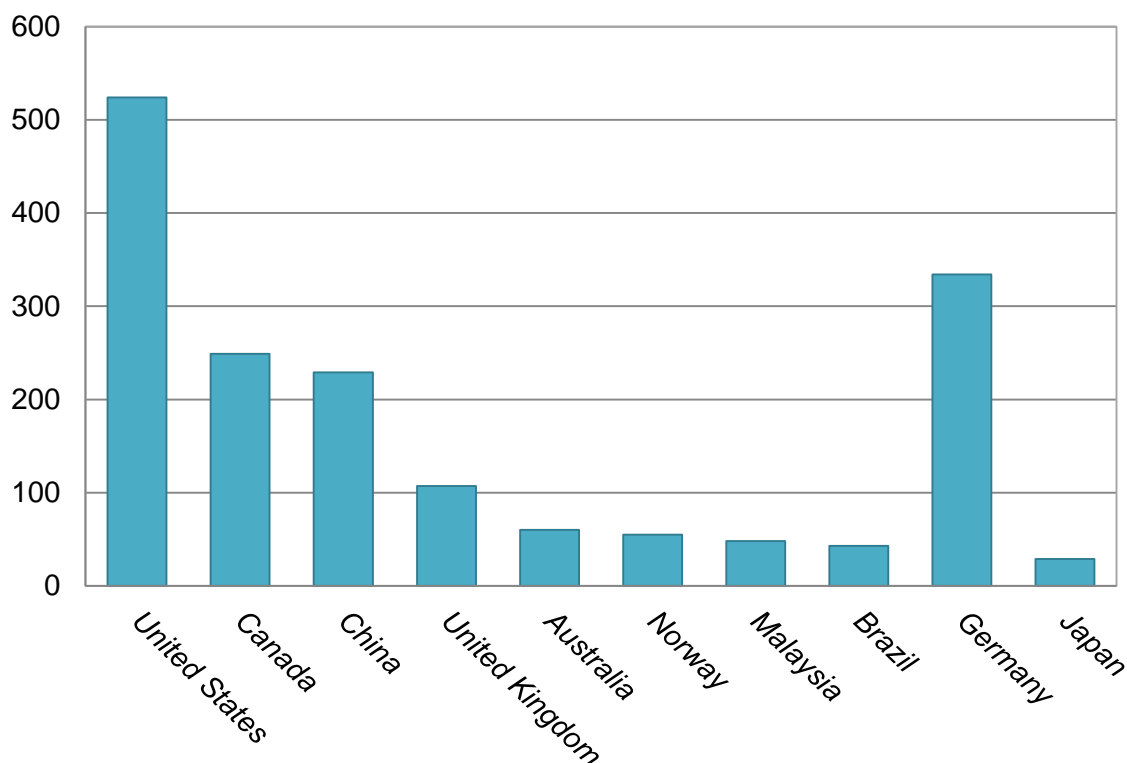
مطالعات زیادی در زمینه تولید ماسه در مخازن سرتاسر جهان انجام شده است که از این میان می‌توان به چند مورد اشاره کرد. ال-اود و دسوکی (Al-Awad and Desouky, 1997) به کمک نمونه‌های آزمایشگاهی به بررسی پتانسیل تولید ماسه مخازن ماسه‌سنگی عربستان پرداختند. هدف از برداشت نمونه‌ها، انجام آزمون‌های گسیختگی تک محور و سه محور بوده است. برای بحث کانی-شناسی و مشخص شدن اندازه ذرات از پراش سنج اشعه ایکس و ال‌ک‌های استاندارد استفاده شده است. تحلیل آماری نیز برای بررسی تفاوت آماری میان نمونه‌های ماسه‌ای بدست آمده از چاه نفتی و خرده سنگ‌های جمع‌آوری شده از ماسه‌سنگ‌های گسیخته شده انجام شده است. نرخ بحرانی تولید مخازن نفتی میدان حاضر نیز تعیین گردید. کینگسلی و ابولیمین (Kingsley and Abhulimen, 2008) یک مدل کلی برای پیش‌بینی میزان تولید ماسه در چاه‌های نفتی و گازی ارائه کردند. در این مدل ویژگی‌های مختلف سنگ مخزن تحت شرایط مختلف تنش برجا، افت فشار مخزن و معیارهای شکست مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً با ارائه عامل ماسه‌دهی ( $K_{ds}$ ) پتانسیل تولید ماسه در چاه مورد نظر محاسبه گردید. آموس و همکاران (Amos et al, 2012) مدلی عددی جهت پیش‌بینی میزان تولید ماسه در سازندهای تحکیم نیافته ارائه کردند و بر اساس مدل ارائه شده پایداری دیواره چاه و حفرات تولید مورد بررسی قرار گرفت. آنها مهم‌ترین عوامل تشکیل ماسه یا جامدات در چاه را گسیختگی منطقه دارای ماسه به دلیل سست بودن، مقاومت فشاری اندک و تنش موثر بالای منطقه



به دلیل تولید و تهی‌شدگی مخزن معرفی کردند. همچنین علی‌پور و میرزا احمدیان در سال ۲۰۱۲ به بررسی شروع پدیده تولید ماسه به کمک نگارهای پتروفیزیکی و تنش‌های برجا پرداختند. آنها با استفاده از معیار شکست موهر- کلمب به تعیین افت فشار بحرانی چاه پرداختند. با توجه به شرایط و پارامترهای موثر در فرآیند تولید ماسه، در مطالعات بسیاری سعی شده است تا با استفاده از روش‌های تحلیلی (Pyatakhin, 2006; Papamichos et al, 2010) و روش‌های عددی (Vaziri et al, 2002; Zhou et al, 2011; Ranjith et al, 2013) روش‌های پیش‌بینی این پدیده مورد ارزیابی قرار گیرند. شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ به ترتیب مقالات با کلید واژه تولید جامدات (ماسه) با تفکیک سال و کشورها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: مقالات با کلید واژه تولید جامدات (ماسه) با تفکیک سال



شکل ۱-۲: مقالات با کلید واژه تولید جامدات (ماسه) با تفکیک کشورها از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۳

در ایران نیز مطالعات محدودی در رابطه با تولید جامدات صورت گرفته است. بداغ آبادی (بداغ آبادی، ۱۳۸۵) در پایان نامه کارشناسی ارشد خود به پیش‌بینی تولید ماسه با استفاده از روش‌های تجربی، فیزیکی و عددی پرداخته است. در این مطالعه، نمونه‌های مصنوعی مخلوط سیمان و ماسه با حفره‌ای در میان آنها ساخته شدند و تحت شرایط مخزن قرار گرفتند تا مکانیزم تولید ماسه شناخته شود. برای این منظور دستگاهی طراحی و ساخته شد. سپس با استفاده از روش‌های تجربی مناطق مستعد تولید ماسه در میدان منصوری شناخته شده و سپس با استفاده از مدل سازی عددی آنالیز دقیق‌تری از تولید ماسه انجام شد. همچنین فتاح پور (فتاح پور، ۱۳۹۱) در رساله دکتری تخصصی خود سعی کرد تا با طراحی و اجرای شبیه‌سازی فیزیکی و عددی مناسب، ابعاد مختلف پدیده تولید ماسه را مورد بررسی قرار دهد. بزرگی مدل فیزیکی امکان بررسی پارامترهای مختلف و به‌ویژه حفره‌های تولید با ابعاد واقعی و همچنین امکان بررسی دو حفره تولید در مجاورت هم را فراهم نمود.

اگرچه اکثر مطالعات انجام شده، مطالعات جامعی بوده‌اند، اما در این میان مطالعات محدودی به بیان پارامترهای درگیر و موثر بر تولید ماسه پرداخته و آن‌ها را معرفی نموده‌اند. از آنجا که مخازن هیدروکربوری ایران در سازندهای ماسه سنگی و کربناته قرار گرفته‌اند و توجه به این نکته که در بسیاری از موارد احتمال تولید ماسه و جامدات در چاه‌هایی که در این مخازن حفر می‌شوند، وجود دارد، مطالعه حاضر سعی خواهد کرد تا با بررسی پارامترهای موثر در فرآیند تولید ماسه و روش‌های ارزیابی پتانسیل تولید ماسه در اینگونه موارد، راه حل مناسب برای پیش‌بینی چنین فرآیندی را ارائه نماید.

## ۱-۴- اهداف و سوالات تحقیق

هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی پتانسیل تولید ماسه یا جامدات (کربنات) در یکی از چاه‌های نفتی جنوب ایران در طول فرآیند تولید با استفاده از روابط تجربی و مطالعات چاه نگاری خواهد بود. علاوه بر آن در طول این مطالعه سعی خواهد شد تا با شناخت تمامی پارامترهای موثر در تولید ماسه، ماتریس اندرکنش تولید ماسه بر اساس سیستم مهندسی سنگ ارائه گردد. در واقع یک سیستم مهندسی جدید که در برگزیده پارامترهای موثر در فرآیند تولید ماسه خواهد بود، ارائه خواهد شد. همچنین سعی خواهد شد تا با استفاده از نگارهای چاه و کالیبره نمودن آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی، مقادیر فشار منفذی و تنش‌های برجا محاسبه و با تعیین وزن بهینه گل حفاری در مورد پتانسیل تولید ماسه یا جامدات میدان مورد نظر بررسی‌های لازم صورت پذیرد.

با توجه به موارد بیان شده، سوالات اصلی تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد.

۱- آیا احتمال تولید ماسه یا جامدات در چاه مورد بررسی وجود دارد؟

۲- مهم‌ترین پارامترهای موثر در فرآیند تولید ماسه کدامند؟

۳- سیستم مهندسی سنگ ارائه شده تا چه حد می‌تواند اندرکنش‌های میان پارامترهای موثر در

پدیده تولید ماسه را توجیه نماید؟

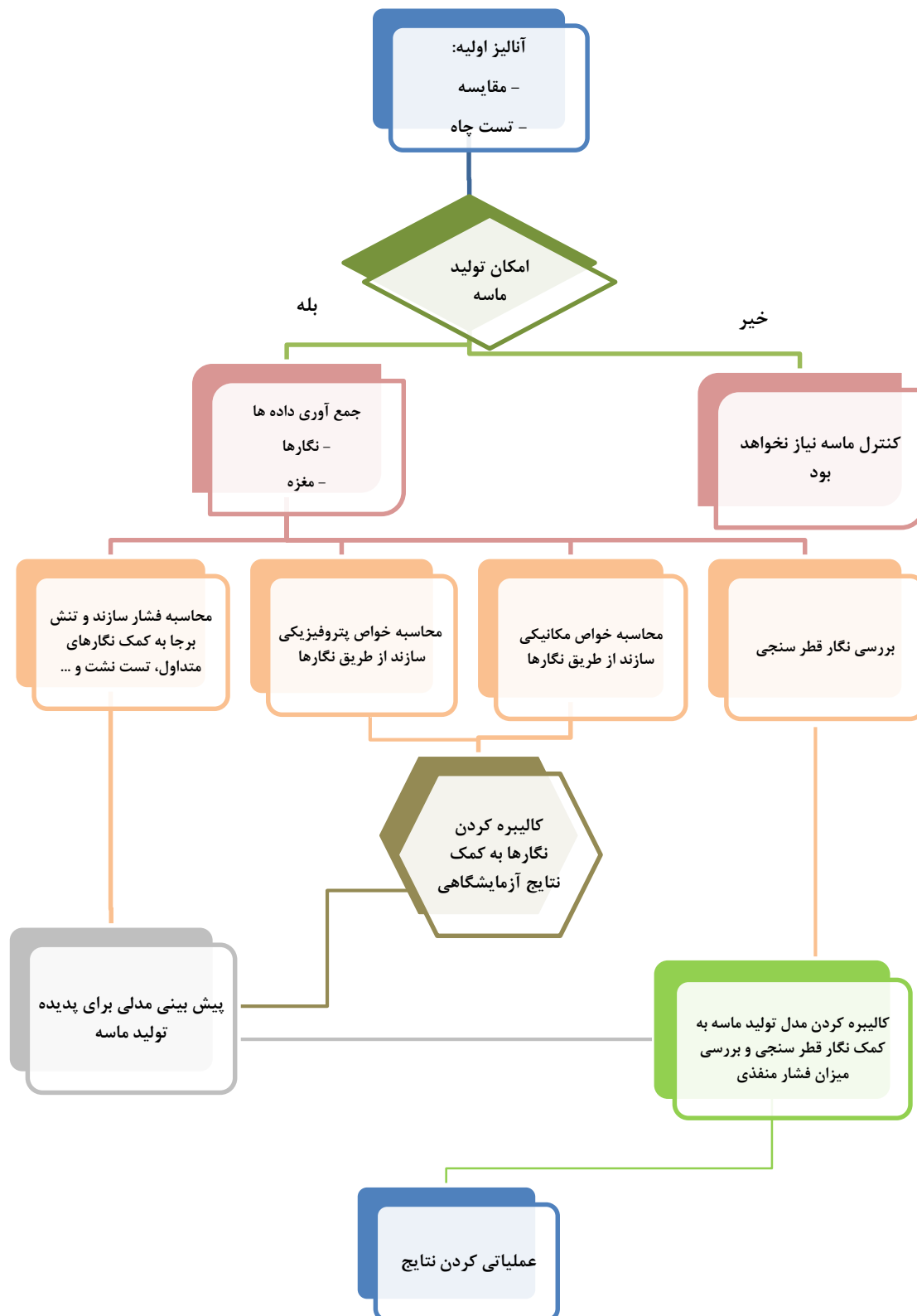
۴- روش‌های مناسب ارزیابی و تحلیل مسئله کدامند؟

### ۱-۵- روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا با استفاده از اطلاعات ژئومکانیکی حاصل، مقدار و جهت تنش و پارامترهای ژئومکانیکی مانند مدول الاستیک، نسبت پواسون و ... محاسبه می‌گردد. با تعیین این پارامترها و نیز بررسی اطلاعات حین حفر و تکمیل چاه، تلاش می‌شود پتانسیل تولید ماسه (جامدات) با استفاده از نرم افزار تحلیلی Interaction petrophysic مورد بررسی قرار گرفته و امکان رخداد آن پیش‌بینی شود. علاوه بر آن، با انجام مطالعه جامع سعی خواهد شد تا با شناخت تمامی پارامترهای موثر در تولید ماسه، ماتریس اندرکنش برای این پدیده بر اساس سیستم مهندسی سنگ ارائه گردد. با توجه به شرایط بیان شده و پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه، فلوجارت شکل ۱-۳ برای انجام تحقیق متصور خواهد بود.

### ۱-۶- سازمان‌دهی پایان‌نامه

با توجه به مطالب بیان شده در این فصل، ابتدا در فصل دوم توضیحاتی در زمینه میدان مورد مطالعه، ویژگی‌ها و ساختار زمین‌شناسی آن آورده خواهد شد. در فصل سوم تولید جامدات، روش‌های پیش‌بینی آن و سیستم مهندسی سنگ معرفی خواهد شد، در فصل چهارم به ارزیابی پتروفیزیکی سنگ مخزن جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی میدان مورد مطالعه می‌پردازیم و در ادامه در فصل پنجم با مطالعه جامع بر روی پارامترهای موثر در فرآیند تولید ماسه، ماتریس سیستم مهندسی سنگ برای این پدیده ارائه می‌گردد و وزن بهینه گل جهت ارزیابی پتانسیل تولید ماسه در چاه‌ها با بکارگیری معیارهای شکست مختلف محاسبه می‌شود، در ادامه این فصل نرخ بحرانی تولید نیز تعیین می‌گردد و سپس مطالب مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادها در فصل ششم ارائه می‌شود.



شکل ۱-۳: فلوجارت طراحی شده برای مدل سازی پدیده تولید ماسه در مطالعه حاضر



## فصل دوم

زمین‌شناسی میدان و داده‌های

مورد استفاده

## ۲-۱- مقدمه

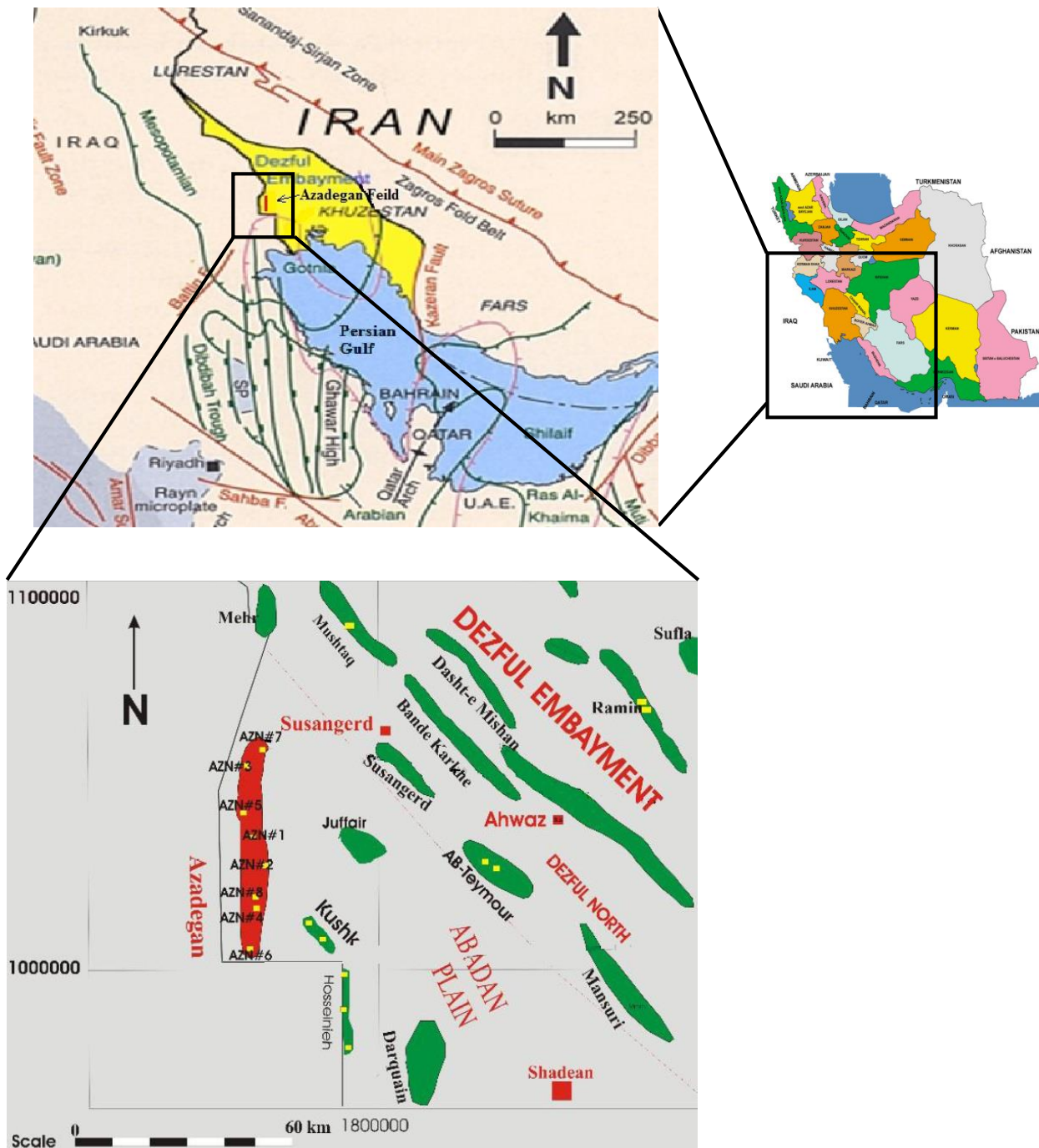
میدان نفتی آزادگان یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی ایران و یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی جهان محسوب می‌شود که محدوده‌ای به وسعت ۱۵۰۰ کیلومتر مربع را می‌پوشاند. این میدان در ۱۰۰ کیلومتری غرب اهواز و در منطقه دشت آزادگان قرار گرفته است. از آنجا که چاه مورد مطالعه در این میدان قرار گرفته است، در این فصل کلیاتی در مورد این میدان و سازندهای آن همراه با داده‌های مورد استفاده ارائه خواهد شد.

## ۲-۲- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی میدان آزادگان

این میدان نفتی به موازات خط مرزی ایران و عراق، در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب غرب میدان جفیر و ۸۰ کیلومتری غرب اهواز واقع شده است (شکل ۲-۱). میدان آزادگان با وسعتی در حدود ۱۵۰۰ کیلومتر مربع و حجم نفت در جای بالغ بر ۳۰ میلیارد بشکه، یکی از عظیم‌ترین میادین نفتی توسعه نیافته جهان محسوب می‌شود. در این میدان چهار لایه سروک، بخش زیرین کژدمی، گدوان و فهلیان به عنوان مخازن قابل بهره‌برداری شناخته شده و با حفر چاه شماره ۷ این میدان، سازندهای نفتی ایلام و لایه ماسه‌سنگی آزادگان (بورگان) نیز حاوی نفت قابل تولید ارزیابی گردیده است. مطابق با شکل ۲-۱ تاقدیس آزادگان فاقد هرگونه رخنمون بوده، امتداد آن شمالی-جنوبی و با تاقدیس دارخوین دارای روند مشابه می‌باشد (نیک طبع، ۱۳۸۱). روند این تاقدیس‌ها از جهت شمالی-جنوبی از طبقات قدیمی‌تر پیروی می‌کند. حضور نمک‌های قسمت شمالی خلیج فارس و عربستان که مربوط به اواخر پرکامبرین و اوایل کامبرین می‌باشند، نحوه تشکیل این ساختارها را بهتر نشان می‌دهد. رشد ساختارهای زمین‌شناسی در میدان نفتی آزادگان ممکن است پیش از دوران مزوزوئیک و یا قبل از آن به مرور زمان شکل گرفته باشد. به نظر نمی‌رسد که فازهای فشاری مربوط به دوران سنوزوئیک نقش زیادی در این تغییر شکل داشته باشد. با توجه به نقشه‌های عمقی لرزه‌ای،



این تاق‌دیس در افق‌های بنگستان و خامی دارای بستگی می‌باشد. در تاق‌دیس آزادگان کلیه سازندها با توالی معمول زمین شناسی بر روی هم قرار گرفته‌اند و بدون گسل و گسستگی می‌باشند (نیک طبع، ۱۳۸۱). شکل ۱-۲ موقعیت میدان نفتی آزادگان را نشان می‌دهد.



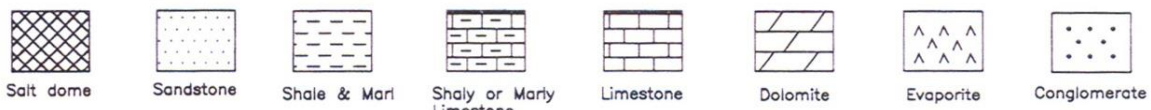
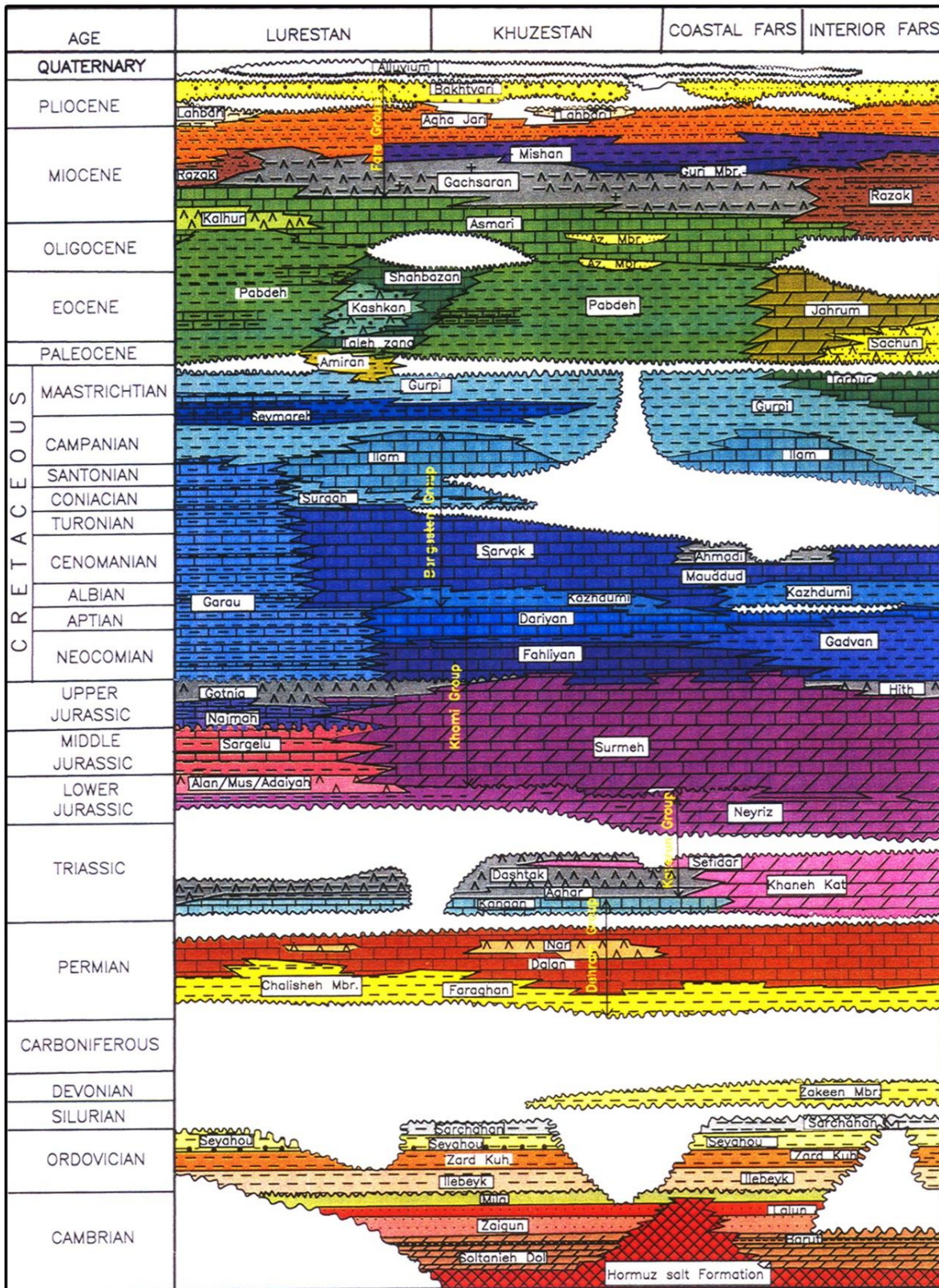
شکل ۱-۲: موقعیت میدان نفتی آزادگان (نیک طبع، ۱۳۸۱)

## ۲-۳- سازندهای منطقه مورد مطالعه

سازندهایی که چاه شماره ۶ میدان آزادگان از آن‌ها عبور می‌کند از جدید به قدیم به ترتیب سازندهای آسماری، جهرم، پابده، گورپی، ایلام، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان، گرو و گوتیان می‌باشند (Heydari and Rezaee, 2003). به دلیل واقع شدن بازه مخزنی ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر در سازند سروک تنها به توضیحاتی در رابطه با این سازند اکتفا می‌کنیم.

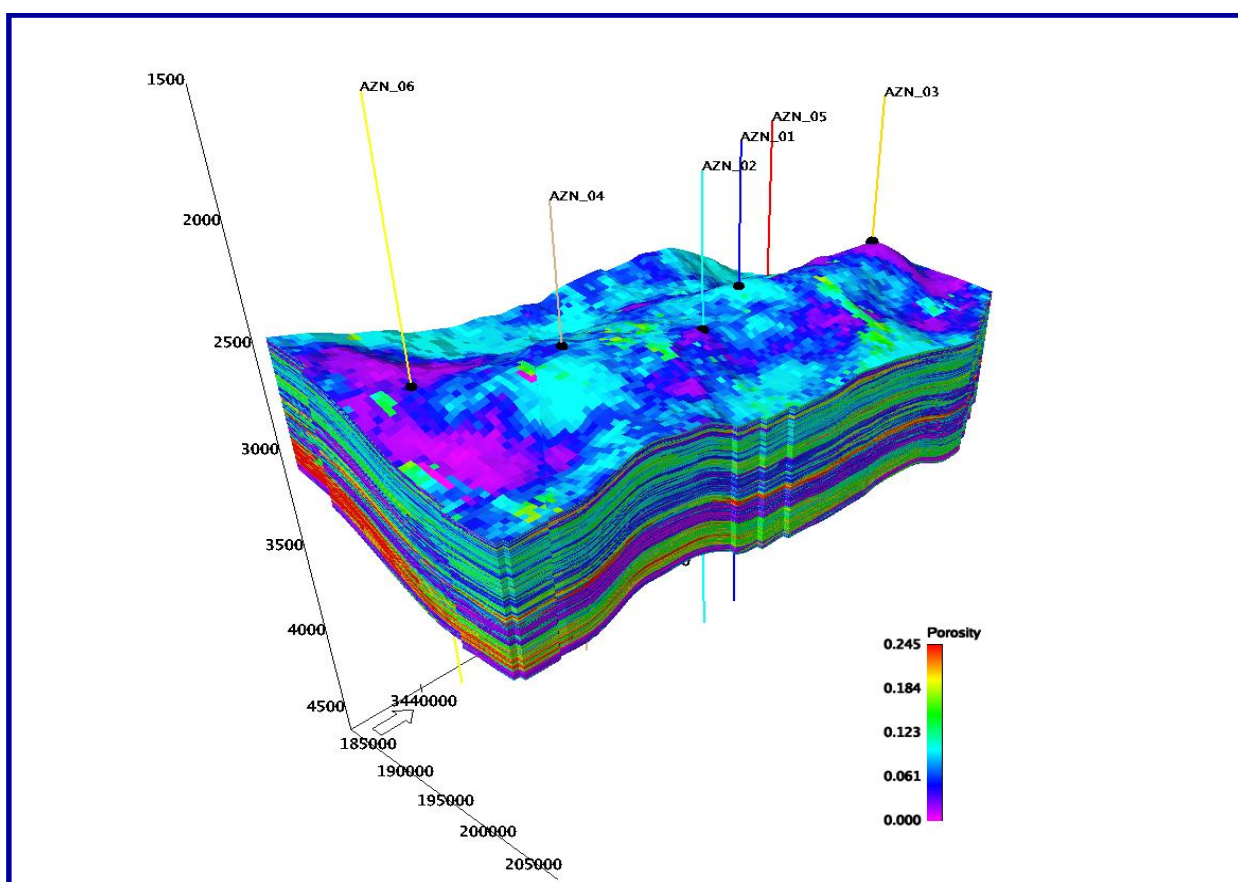
### ۲-۳-۱- سازند سروک

نام این سازند از تنگه سروک، در کوه بنگستان در منطقه خوزستان انتخاب شده و دارای دو رخساره مشخص می‌باشد: رخساره‌ای کم عمق به ضخامت ۸۲۱ متر و رخساره‌ای دیگر شامل آهک-های لایه نازک دانه ریز و تیره رنگ که در اعماق بیشتری تشکیل شده و در آن فسیل‌های ذره‌بینی پلاژیک هم یافت می‌شود. سازند سروک توالی ضخیمی از سنگ‌های کربناته با سن آلبین-تورونین است و یکی از مخازن مهم هیدروکربنی در جنوب غرب ایران محسوب می‌شود. این سنگ‌ها در یک پلاتفرم کربناته در حوضه زاگرس نهشته شده است. برش الگوی سازند سروک در دامنه جنوب غربی کوه بنگستان واقع شده است. سازند سروک به سه بخش پایینی (مادود)، میانی (احمدی) و سروک بالایی تقسیم شده است. سازند سروک در ناحیه مورد مطالعه از سنگ آهک‌های نازک تا ضخیم لایه تشکیل شده است. این سازند به صورت هم شیب بر روی سازند کژدمی قرار گرفته است در حالی که مرز بالایی آن با سازند ایلام ناپیوسته است (شکل ۲-۲) و با افق لاتریتی پیژوئیددار مشخص می‌شود. سازند سروک در منطقه زاگرس متشکل از دو رخساره کم ژرفا و ژرف است. رخساره کم ژرفا از سنگ آهک ضخیم لایه تا توده‌ای حاوی فسیل‌های رودیست و شکم‌پا تشکیل شده است. رخساره ژرف متشکل از سنگ آهک‌های نازک لایه حاوی فسیل الیگوستژین است (درویش زاده، ۱۳۸۲).



شکل ۲-۲: واحدهای سنگ شناسی منطقه زاگرس (NISOC, 1382).

سنگ‌شناسی سازند سروک عمدتاً شامل سنگ آهک و درصد ناچیزی آهک دولومیتی و کانی‌های رسی می‌باشد. این سازند دارای فواصلی است که حاوی هیدروکربور بوده اما درصد اشباع آب آن پایین می‌باشد (دالوند و موسوی، ۱۳۸۵). ضخامت مخزن در این سازند بین ۳۰ تا ۷۵۰ متر متغیر است. متوسط تخلخل در چاه شماره ۶ میدان آزادگان حدود ۱۲ درصد و اشباع متوسط آب ۱۰ درصد است. شکل ۲-۳ شماتیک ساده‌ای از مدل تخلخل در حوضه نفتی آزادگان را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: شمایی از مدل تخلخل حوضه نفتی آزادگان همراه با چاه‌های موجود در آن (شاعری و گشنیزجانی، ۱۳۷۹)

## ۲-۴- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق متعلق به چاه شماره ۶ میدان آزادگان می‌باشد. داده‌های این چاه شامل نگارهای پتروفیزیکی مانند نگار چگالی (RHOB)، تخلخل نوترونی (NPHI)، صوتی

(DT)، مقاومت ویژه (RT)، گاما (GR)، نگار تصویری صوتی دوقطبی (DSI)<sup>۱</sup>، نگار کالیپر (CAL) و داده‌های تست سازند (MDT)<sup>۲</sup> می‌باشد. از آنجا که نگارهای چاه محدود به عمق قرارگیری مخزن در فواصل ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ متری می‌باشد و نگار DSI برداشت شده در این چاه برای عمق ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متری موجود می‌باشد، بیشتر تمرکز مطالعه حاضر در بازه نگار DSI خواهد بود. در طول فرایند حفاری مغزه‌های آزمایشگاهی از بازه مخزنی ۲۷۰۰ تا ۲۹۴۳ متر برداشت، سپس در آزمایشگاه تحت شرایط بار هیدرواستاتیک به تعیین تراکم‌پذیری، تخلخل و نفوذپذیری این نمونه‌ها پرداخته شده است. ضمناً تست نشت<sup>۳</sup> (LOT) در چاه مورد نظر در بازه مخزنی ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ صورت گرفته که برای کالیبراسیون تنش افقی حداقل مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به همراه بازه عمقی آنها در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲: نگارهای تهیه شده در چاه ۶ میدان آزادگان به همراه بازه عمقی آنها.

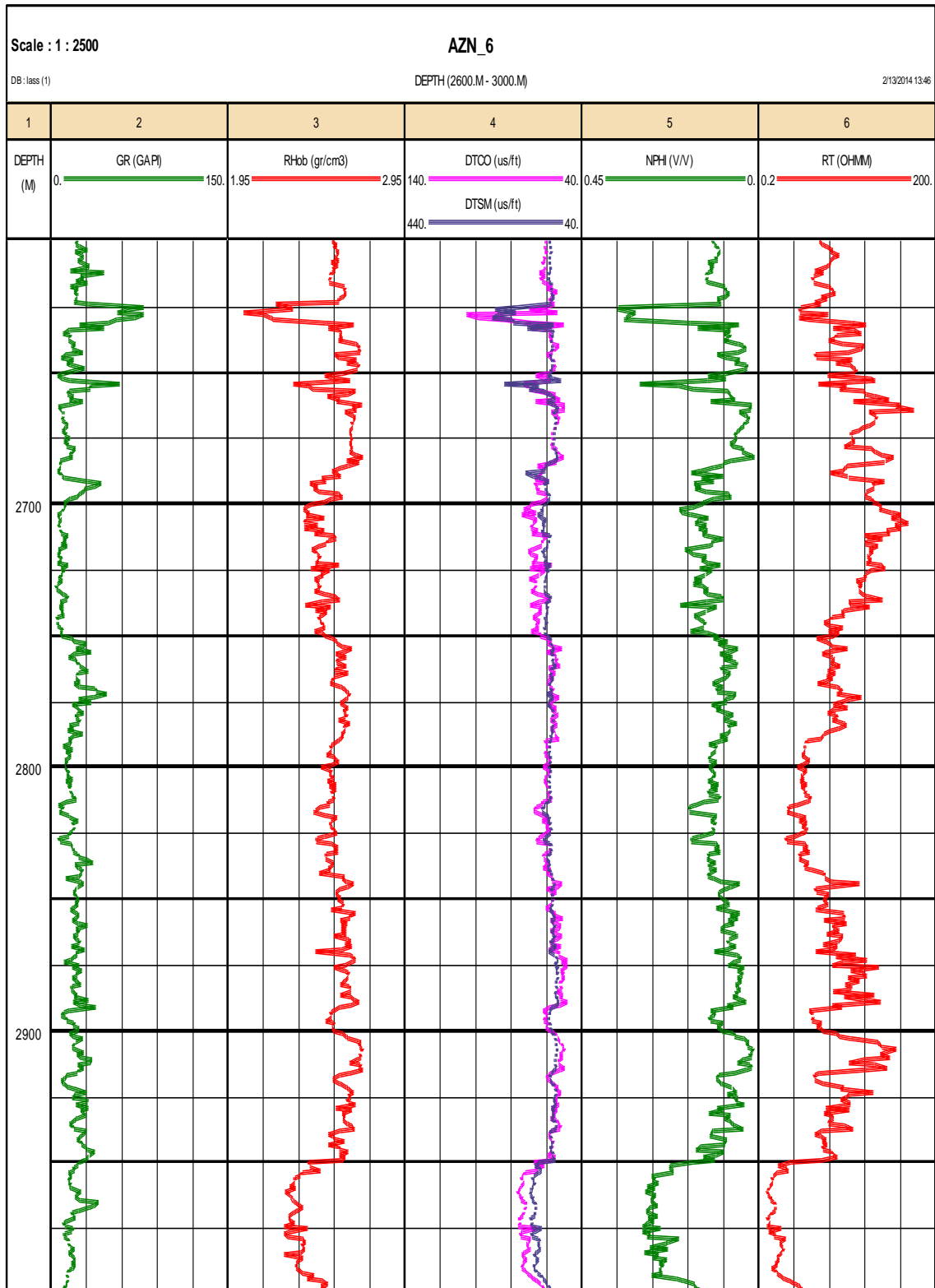
نگار	RHOB	NPHI	DT	RT	GR
بازه عمقی (متر)	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۲۵۰۰-۳۵۰۰
نگار	DSI	CAL	LOT	Core	
بازه عمقی (متر)	۲۶۰۰-۳۰۰۰	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۲۷۶۲-۲۷۷۴-۲۸۶۷	۲۸۸۰-۲۹۳۷-۲۹۴۳

نمودار تغییرات نگارهای پتروفیزیکی مانند گاما، چگالی، صوتی، تخلخل نوترونی و مقاومت ویژه در چاه ۶ آزادگان در بازه عمقی ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متری، در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>- Dipole Sonic Imager (DSI)

<sup>۲</sup>- Modular Formation Dynamics Tester (MDT)

<sup>۳</sup>- Leak Off Test



شکل ۲-۴: نمودار تغییرات نگارهای گاما، چگالی، صوتی، تخلخل و مقاومت ویژه در چاه ۶ میدان آزادگان

فصل سوم

تولید جامدات، روش‌های

پیش‌بینی آن و سیستم مهندسی

## ۳-۱- مقدمه

با توجه به آنچه که بیان شد، هدف از مطالعه حاضر بررسی پارامترهای موثر و مدل‌سازی تولید ماسه با استفاده از روابط تجربی و ایجاد مدل مکانیکی زمین می‌باشد. فصل حاضر سعی خواهد کرد تا با ارائه توضیحات لازم در مورد پدیده ماسه‌دهی، چگونگی تولید ماسه در چاه و روش‌های پیش‌بینی و پیش‌گیری از آن را ارائه نماید. به علاوه، در نهایت سیستم مهندسی سنگ نیز که روشی مناسب برای شناسایی پارامترهای موثر در مسائل مرتبط با سیستم‌های سنگی است، ارائه خواهد شد.

## ۳-۲- تولید ماسه/جامدات

اصطلاح تولید ماسه یا جامدات طیف گسترده‌ای از پدیده‌ها را در بر می‌گیرد ( Al-Awad and Desouky, 1997). به‌طور کلی، در طول فرآیند تولید، ذرات جامد ناشی از خردشدگی برشی دیواره چاه یا ذرات به جا مانده از شکست هیدرولیکی، به همراه سیال موجود در مخزن وارد چاه می‌شوند. این محصول جانبی ناخواسته از تولید هیدروکربن، تولید جامدات نامیده می‌شود. مقدار مواد جامد تولید شده می‌تواند چند گرم در هر متر مکعب از سیال مخزن تا مقادیر فاجعه آمیزی را که باعث پر شدن چاه و تخریب کامل آن می‌شود، به خود اختصاص دهد. بر اساس مطالعات انجام شده، بیش از هفتاد درصد ذخایر هیدروکربنی جهان در مخازنی قرار گرفته‌اند که تولید مواد جامد در آن‌ها محتمل است. مشکل تولید جامدات بیشتر به مخازن ماسه‌سنگی بر می‌گردد، از این رو تولید ماسه بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. با این حال، این مشکل ممکن است در مخازن کربناته و ذغال سنگی نیز رخ دهد (Fjaer et al, 2008).



## ۳-۲-۱- پی‌آمد تولید جامدات

اگرچه پدیده تولید جامدات می‌تواند برخی اثرات مثبت مانند بهبود تخلخل و نفوذپذیری مخازن و کاهش نیروی دراگ (مقاوم به حرکت) جریان سیال در سازند را به همراه داشته باشد (Benjing et al, 2008)، عموماً اثرات منفی آن توجه بیشتری را به خود جلب می‌کند. در واقع، این پدیده سبب مشکلات بسیاری می‌گردد که از آن جمله می‌توان به فرسایش و خوردگی تجهیزات سطحی و ته-چاهی، بی‌ثباتی حفرات تولید و چاه، گسیختگی لوله جداری، هزینه کارگری و تفکیک ماسه از هیدروکربورها، مشکلات زیست‌محیطی که ماسه‌های کثیف ممکن است ایجاد کنند و ... اشاره نمود. با توجه به مشکلات بیان شده، پدیده تولید ماسه را می‌توان به سه گروه تقسیم بندی نمود:

الف- تولید ماسه گذرا که در آن ماسه به طور پیوسته و با نرخ کاهشی تولید می‌شود. با تولید پیوسته ماسه تحت شرایط ثابت، نرخ تولید کاهش می‌یابد و تغییر در شرایط مشاهده می‌شود (Fjaer et al, 2008).

ب- تولید ماسه به طور مداوم که در آن ماسه به طور مداوم و با نرخ نسبتاً ثابتی تولید می‌شود. شدت تولید ماسه در این شرایط به محدودیت‌های عملیاتی، ظرفیت جداکننده ماسه از هیدروکربورها، موقعیت چاه و غیره بستگی دارد. بخشی از این ماسه در داخل چاه ته نشین می‌شود و باعث گیرکردن تجهیزات حفاری می‌گردد. با توجه به ظرفیت بالابری جریان سیال و غلظت ماسه بخشی از حفره تولید در طی فاصله زمانی تولید مسدود می‌شود. حجم ماسه ته نشین شده در حفره به طراحی چاه بستگی دارد و می‌تواند چندین متر مکعب باشد (Veeken et al, 1991).

پ- تولید ماسه فاجعه آمیز که در آن ماسه با نرخ بالایی تولید و باعث از دست رفتن چاه می‌گردد. در این نوع تولید دانه‌های ماسه باعث ایجاد پل‌های ماسه‌ای با حجم متوسط در چاه می‌شوند و یا ریزش توده‌های ماسه موجب انسداد چاه می‌گردد (Fjaer et al, 2008).

### ۳-۳- شرایط تولید ماسه و روش‌های پیش‌بینی آن

عملیات حفاری، تهی‌شدگی مخزن و تزریق سیال باعث توزیع مجدد تنش در اطراف چاه می‌شوند. این توزیع مجدد تنش بر روی حد آستانه‌ای تنش برشی اثر می‌گذارد و منجر به گسیختگی سازند و تولید ماسه می‌شود (Tiab and Donaldson, 2004). تولید ماسه در سنگ‌های سالم یا بکر اتفاق نمی‌افتد. حتی اگر سنگ تحکیم نیافته باشد، جریان سیال باید نیروی کافی برای انتقال دانه‌های ماسه را داشته باشد. در نتیجه تولید ماسه تنها در صورتی ممکن خواهد بود که فشار سیال در مناطق با سنگ‌های خرد و تحکیم نیافته بالا باشد. سنگ‌های خرد شده در چنین شرایطی به دلیل تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه ایجاد می‌شوند که اصطلاحاً مناطق با شکستگی برشی<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند.

با توجه به شرایط موثر در تولید ماسه در چاه، روش‌های پیش‌بینی ماسه را می‌توان به چهار دسته مشاهدات صحرایی، روش‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی نظری و روش‌های تجربی تقسیم بندی نمود. در ادامه هر یک از این روش‌ها توضیح داده می‌شوند.

#### ۳-۳-۱- مشاهدات صحرایی تولید ماسه

روش‌های پیش‌بینی ماسه بر اساس تجربیات صحرایی بر ایجاد ارتباط میان داده‌های موجود حاصل از تولید ماسه چاه در چاه و پارامترهای عملیاتی تکیه دارد. این پارامترها که عموماً پدیده تولید ماسه را تحت تأثیر قرار می‌دهند در جدول ۳-۱ ارائه شده‌اند. پارامترهای عملیاتی عموماً به سه دسته تک پارامتری، دو پارامتری و چند پارامتری تقسیم می‌شوند که در ادامه توضیحاتی در مورد آن‌ها آورده شده است.

<sup>۱</sup> - Break out

## الف- روش تک پارامتری

در ساده‌ترین حالت ممکن عموماً تنها از یک پارامتر برای پیش‌بینی میزان تولید ماسه استفاده می‌شود. به عنوان مثال، برای نصب گراول پک برای جلوگیری از ورود ماسه به چاه، پارامتر عمق بحرانی در نظر گرفته می‌شود. عمق بحرانی به منطقه از چاه گفته می‌شود که پس از آن امکان تولید ماسه وجود دارد. یکی دیگر از معیارها برای نصب گراول پک زمان عبور امواج صوتی فشارشی ( $\Delta t_c$ ) است که برای مناطق با پتانسیل تولید ماسه ۹۰ تا ۱۲۰ میکروثانیه بر فوت خواهد بود (Tixier et al, 1975). به‌طور کلی می‌توان گفت که رویکرد تک پارامتری هر چند محافظه کارانه می‌باشد اما عملی بوده و اغلب با توجه به سهولت آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (Veeken et al, 1991).

## ب- روش دو پارامتری

مدل‌های تک پارامتری بیان شده عموماً، افت فشار مخزن ( $\Delta P_{dd}$ ) و کاهش فشار چاه ( $\Delta P_{de}$ ) را مد نظر قرار نمی‌دهند در حالی است که این پارامترها نقش بسیار مهمی در پدیده تولید ماسه ایفا می‌کنند. در این مدل، افت فشار کل ( $\Delta P_{td} = \Delta P_{de} + \Delta P_{dd}$ ) در مقابل زمان عبور موج صوتی به عنوان معیاری برای تولید ماسه در چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد (Veeken et al, 1991).

## ج- روش چند پارامتری

همبستگی چند پارامتری می‌تواند تحلیل‌های مرتبط با تولید ماسه را بهبود بخشد. تولید ماسه به طیف گسترده‌ای از عوامل نظیر عمق، زمان عبور صوت، نرخ تولید، افت فشار، شاخص بهره‌وری، کانال‌های انتقال آب و گاز وابسته است. بنابراین با بهره‌گیری از این پارامترها، چاه‌هایی که در آنها تولید با ماسه و یا بدون حضور ماسه صورت می‌پذیرد به خوبی قابل تفکیک هستند. اما تکنیک‌های چند پارامتری به دلیل نیاز به داده‌های گسترده به طور معمول مورد استفاده قرار نمی‌گیرند (Veeken et al, 1991).

جدول ۳-۱: پارامترهای موثر بر تولید ماسه (Veeken et al, 1991)

مقاومت	جنس سنگ سازند
تنش بر جای افقی و عمودی عمق (که بر مقاومت، تنش و فشار موثر است)	
فشار منفذی	مخزن
نفوذپذیری	
ترکیبات درون سیال (نفت، گاز و آب)	
شعاع زهکشی	
ضخامت مخزن	
همگنی و ناهمگنی مخزن	تکمیل چاه
جهت و قطر چاه	
نوع تکمیل چاه	
اطلاعات در مورد حفره موجود در دیواره زون تولید	
کنترل ماسه	
نحوه تحریک سیال درون مخزن	تولید هیدروکربور
اندازه لوله و تجهیزات حفاری	
نرخ جریان	
افت فشار	
سرعت جریان	
میزان خسارت	
تهی شدگی	
وارد شدن آب و گاز به داخل هیدروکربور	
حجم ماسه تولید شده	

### ۳-۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی

روش‌های آزمایشگاهی تولید ماسه برای مشاهده و شبیه‌سازی تولید ماسه در یک محیط کنترل شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر به تحلیل مکانیزم‌های موثر بر تولید ماسه کمک شایانی خواهد نمود. روش‌های آزمایشگاهی تولید ماسه را می‌توان بر روی انواع مختلفی از ماسه سنگ‌ها پیاده‌سازی نمود. در تست‌های آزمایشگاهی بر روی مواد تحکیم نیافته، تولید ماسه به نرخ جریان و نیروی موئینگی بستگی دارد. در هنگام تولید ماسه حفره‌ای ایجاد می‌شود که به تدریج با افزایش

میزان جریان بزرگتر خواهد شد تا زمانی که نرخ جریان از حد بحرانی عبور کند و باعث گسیختگی حفره شود. نرخ جریانی که سبب گسیختگی حفره می‌شود در حدود ۵ تا ۱۰ بشکه در روز است و تقریباً مستقل از مخلوط ماسه، اندازه حفره، تنش‌های مرزی و فشار منفذی خواهد بود. در مقابل، تولید ماسه و بزرگ شدن حفره برای ماسه سنگ تحکیم یافته به میزان زیادی توسط تنش موثر مرزی کنترل می‌شود (Fjaer et al, 2008).

### ۳-۳-۳- مدل‌سازی نظری

اکثر ابزارهای پیش‌بینی ماسه بر اساس مدل‌سازی نظری به پیش‌بینی پایداری حفره موجود در دیواره منطقه تولید و دیگر حفرات می‌پردازند. ابزارهای پیش‌بینی ماسه بر اساس مدل‌سازی نظری بر پایه معادلات ریاضی خواهند بود. بر اساس مطالعات انجام شده، مکانیزم‌هایی مانند شکست برشی، کششی و فرسایش از جمله فرآیندهای موثر در تولید ماسه در نگاه اول هستند. در ادامه مکانیزم این شکست‌ها به تفصیل ارائه خواهند شد.

#### الف- شکست برشی

این پدیده زمان اتفاق می‌افتد که تنش‌های مماسی القایی بر روی دیواره از مقاومت فشاری سنگ بیشتر شود. در این شرایط سنگ‌های موجود در دیواره خرد شده و در صورت وجود جریان سیال بالا وارد چاه خواهند شد. مقدار شکستگی برشی بر حسب زاویه بازشدگی بیان می‌شود که به آن عرض شکستگی برشی گفته می‌شود و با  $W_{BO}$  نشان داده می‌شود (Tingay, 2008). به صورت دقیق‌تر می‌توان فرآیند شکستگی برشی را بر اساس شرایط تنش شعاعی ( $\sigma_r$ ) و تنش مماسی ( $\sigma_\theta$ ) اطراف چاه بیان کرد. تنش شعاعی موثر از طریق رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\sigma'_r = P_w - P_r \quad (۱-۳)$$

که در آن،  $\sigma'_r$  تنش شعاعی موثر ( $psi$ )،  $P_w$  فشار چاه ( $psi$ ) و  $P_r$  فشار مخزن ( $psi$ ) می‌باشد. از طرفی دیگر تنش مماسی در اطراف چاه دارای دو مقدار بیشینه و کمینه می‌باشد که به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$\sigma'_{\theta=0} = 3\sigma'_h - \sigma'_H - P_w + P_r \quad (2-3)$$

$$\sigma'_{\theta=90} = 3\sigma'_H - \sigma'_h - P_w + P_r \quad (3-3)$$

که در آنها،  $\sigma'_H$  تنش افقی بیشینه و  $\sigma'_h$  تنش افقی حداقل می‌باشد.

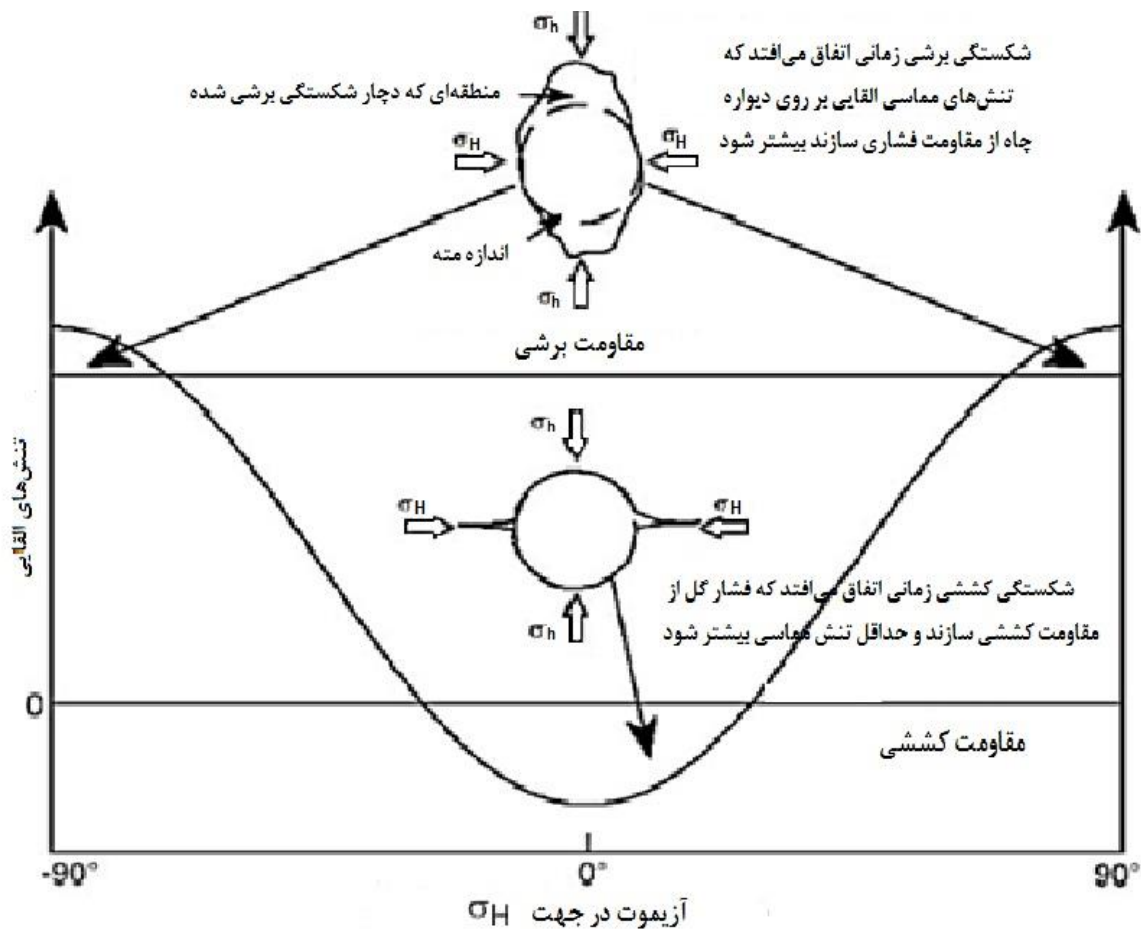
در این شرایط بیشینه مقدار تنش مماسی در زاویه ۹۰ درجه بر دیواره چاه اعمال می‌شود که اگر تنش شعاعی نتواند با آن برابری کند، در این منطقه شکستگی برشی ایجاد خواهد شد. برای بررسی دقیق چگونگی ایجاد منطقه برشی و امکان ایجاد آن از معیارهای شکست سنگ مانند موهر-کلمب، هوک-براون و یا موگی-کلمب استفاده می‌شود. شکل ۳-۱ نحوه ایجاد شکستگی برشی و کششی در دیواره چاه را نشان می‌دهد.

### ب- شکست کششی

فرآیند ایجاد شکست کششی (T) در دیواره چاه بسیار شبیه فرآیند گسیختگی برشی خواهد بود با این تفاوت که در گسیختگی کششی، فشار وارد بر دیواره چاه از طریق سیال حفاری از مقاومت کششی سنگ و حداقل تنش مماسی بیشتر شود و موجبات هرز روی و تولید ذرات خرد شده سنگ را فراهم کند. به صورت معادله ۳-۴ می‌توان شرایط این گسیختگی را بیان کرد.

$$P_w = P_r + \sigma_{\theta \min} + T \quad (4-3)$$

در معادله فوق اگر فشار چاه از تنش کششی، حداقل تنش مماسی و فشار مخزن بیشتر شود، گسیختگی کششی ایجاد می‌شود که شرایط اولیه تولید ماسه را فراهم می‌آورد. گسترش ترک یا شکستگی در این گونه گسیختگی‌ها در راستای تنش افقی حداکثر  $\sigma_{H,Max}$  و عمود بر تنش افقی حداقل  $\sigma_{h,Min}$  خواهد بود.



شکل ۳-۱: شکست برشی و کششی در دیواره چاه (After Tingay, 2008)

### ج- فرسایش

به تولید تدریجی دانه‌های ماسه از سطح دیواره چاه به دلیل از دست دادن چسبندگی بین ذرات فرسایش گفته می‌شود. بر اساس مطالعات دورت و همکاران (Durrett et al, 1977) فرسایش زمانی رخ خواهد داد که نیروی کششی اعمال شده بر ذرات بیش از نیروی چسبندگی بین ذرات باشد. چسبندگی در این شرایط به دو عامل سیمان‌شدگی و نیروی موئینگی وابسته است. بنابراین تولید ماسه زمانی رخ می‌دهد که نیروی سیال بین دانه‌ها به علت غلظت بالای سیال از مقاومت چسبندگی سازند تجاوز کند. معمولاً، بالاترین مقدار افت فشار در سازندهایی با مقاومت چسبندگی پایین رخ می‌دهد. در جامدات و ماسه سنگ‌های تحکیم نیافته، مقاومت چسبندگی نزدیک به صفر است؛ بنابراین گسیختگی چسبندگی دلیل اصلی تولید ماسه در ماسه‌سنگ‌های تحکیم نیافته می‌تواند باشد.

### ۳-۳-۴- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی که معمولاً برای بررسی ماسه‌دهی چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل روش‌های: زمان گذر امواج صوتی، ترکیب مدول‌های مختلف پتروفیزیکی، روش شلومبرژه، تخلخل و کنترل فشار ته چاهی می‌باشند که در ادامه به‌طور مختصر بیان می‌شوند. بطور معمول انتخاب یک راه حل مناسب برای پیش‌بینی میزان تولید ماسه امری بسیار مشکل است اما با انتخاب چندین روش می‌توان درصد خطا را تا حدی کاهش داد (Hangen and Dandan, 2005).

#### الف- روش زمان گذر امواج صوتی<sup>۱</sup>

نگار صوتی ابزاری است که می‌تواند به عنوان معیاری برای تولید ماسه استفاده شود. در این روش مقدار بحرانی زمان گذر امواج صوتی فشاری برابر با  $89/9 \mu s/ft$  در نظر گرفته می‌شود (Hangen and Dandan, 2005). اگر این مقدار از این حد بیشتر شود، چاه ماسه تولید می‌کند. این مقدار برای چاه‌های مختلف اندکی فرق می‌کند. این می‌تواند به نوعی بیان کننده مقاومت سازند باشد. عموماً در سازندهای ضعیف است که زمان عبور موج به دلیل شکستگی و سست بودن سازند افزایش می‌یابد.

#### ب- روش ترکیب مدول‌های مختلف<sup>۲</sup>

با ترکیب نگارهای صوتی و چگالی، با دقت بالای ۸۰ درصد می‌توان به ارزیابی تولید ماسه پرداخت. محققان با انجام آنالیز عددی نشان دادند که اگر مدول ترکیبی ( $E_c$ ) سازند بیشتر از  $2/88 \times 10^6 psi$  باشد ماسه تولید نمی‌گردد در حالی که اگر  $E_c$  بین  $2/16 \times 10^6 psi$  و  $2/88 \times 10^6 psi$  باشد، مقدار کمی ماسه تولید می‌گردد. اما تولید ماسه زمانی شدت خواهد یافت که  $E_c$  از  $2/16 \times 10^6 psi$  کمتر شود. مقدار عددی  $E_c$  یا ترکیب مدول‌های الاستیکی به کمک فرمول ذیل قابل محاسبه است (Hangen and Dandan, 2005):

<sup>1</sup> - Interval transit-time method

<sup>2</sup> - Combination modulus method



$$E_C = \frac{9.94 \times 10^8 \times \rho_r}{\Delta t_C^2} \quad (5-3)$$

که در آن،  $E_C$  مقدار ترکیبی مدول‌های مختلف ( $10^6 \text{ psi}$ )،  $\Delta t_C$  زمان گذر امواج صوتی فشاری ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ ) و  $\rho_r$  چگالی لایه ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ ) است. با توجه به بررسی‌های انجام شده تولید ماسه در بیشتر سازندها امری معمولی به شمار می‌آید. ممکن است برخی بیشتر و برخی از لایه‌ها کمتر ماسه تولید کنند.

### ج- روش شلومبرژه<sup>۱</sup>

در این روش مقدار عددی شلومبرژه یعنی  $E_S \times E_B$  محاسبه می‌گردد، که تابع تخلخل سنگ، نسبت پواسون ( $\nu$ ) و زمان گذر امواج صوتی فشاری ( $\Delta t_C$ ) است. شرکت شلومبرژه این روش را پس از انجام آزمایشات مختلف در میدانی واقع در خلیج مکزیک ارائه کرده است. بر طبق این الگو، اگر مقدار رابطه ۳-۶ از  $5/51 \times 10^9 \text{ psi}$  بیشتر شود ماسه تولید نمی‌شود و در عین حال ماسه زمانی تولید می‌گردد که مقدار رابطه زیر از  $4/79 \times 10^9 \text{ psi}$  کمتر شود (Hangen and Dandan, 2005).

$$E_S \times E_B = \frac{(9.94 \times 10^8)^2 (1 - 2\nu)(1 + \nu) \rho^2}{6(1 - \nu)^2 (\Delta t_C)_4} \quad (6-3)$$

که در آن،  $E_S \times E_B$  مقدار عددی شلومبرژه بر حسب ( $10^9 \text{ psi}$ ) است.

### د- روش تخلخل<sup>۲</sup>

با نگاه به سازندهای ماسه سنگی ضعیف، می‌توان این‌طور استنباط کرد که تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در رخداد تولید ماسه به‌شمار می‌آید. اگر تخلخل سازند از ۳۰ درصد تجاوز کند احتمال تولید ماسه بالا می‌رود. اگر تخلخل مقداری بین ۱۰ تا ۳۰ درصد داشته باشد احتمال تولید ماسه وجود دارد (Hangen and Dandan, 2005).

<sup>۱</sup> - Schelumberger method

<sup>۲</sup> - Porosity method

### ه - روش کنترل فشار ته چاهی<sup>۱</sup>

بر اساس مطالعات انجام شده، روش کنترل فشار چاه می‌تواند روشی مناسب برای کنترل تولید ماسه باشد. بر این اساس، پایداری سازندها نه تنها به ویژگی‌های سازند بلکه به فشار ته چاه نیز وابسته است. بنابراین معادله ۷-۳ می‌تواند برای جلوگیری از تولید ماسه به کمک فشار ته چاه ( $P_{wf}$ ) استفاده شود (Hangen and Dandan, 2005).

$$P_{wf} \geq \rho g \beta H (\cos \phi) \left( \frac{2\nu}{1-\nu} - a \right) \times 10^3 - C \quad (7-3)$$

که در آن،  $H$  عمق مد نظر ( $ft$ )،  $g$  شتاب گرانی ( $ft/s^2$ )،  $C$  چسبندگی ذرات ( $psi$ )،  $\nu$  نسبت پواسون،  $\beta$  ضریب آنیزوتروپی سنگ و  $\phi$  زاویه شیب سازند می‌باشد.

### ۳-۴ - روش‌های پیش‌گیری و کنترل تولید ماسه

عموماً در سازندهای سست و ناپایدار که دارای پتانسیل تولید ماسه می‌باشند از روش‌های کنترل جامدات نظیر گراول پک و شبکه استفاده می‌شود. در گراول پک‌ها، هیدروکربن‌ها قبل از ورود به چاه از داخل ذارت شن (گراول‌ها) به عنوان فیلتر عبور می‌کنند تا ذرات جامد همراه آن‌ها حذف گردند. شبکه‌ها، شبکه‌های فلزی با منفذهای ریز هستند که درون چاه قرار می‌گیرند و مانند فیلتر از ورود ذرات ریز ماسه به چاه جلوگیری می‌کند. استفاده از شبکه‌ها یا گراول پک‌ها باعث افزایش هزینه‌های تکمیل چاه می‌شود و منجر به کاهش بهره‌وری چاه می‌گردد. گرفتگی این فیلترها نیز ممکن است باعث بروز مشکل شود. از راه‌های دیگر کنترل جامدات می‌توان به تحکیم شیمیایی سازند اشاره کرد که توسط آن با تزریق رزین به درون سنگ مقاومت و چسبندگی ذرات افزایش می‌یابد.

نکته‌ای که در اینجا باید به آن اشاره شود این است که چگونگی انتخاب سیستم کنترل ماسه یک حالت کمی و فرمولی ندارد یعنی رابطه یا فرمولی وجود ندارد که با قرار دادن تعدادی پارامتر در

<sup>1</sup> - Bottom- hole pressure control method

آن بتوان در نهایت به یک جواب یعنی یک سیستم برای کنترل ماسه دست یافت. بلکه در این حالت با تعاریف و بازه‌هایی از کارایی‌ها مواجه می‌باشیم و در واقع یک حالت کیفی در کار می‌باشد و تصمیم‌گیری در این زمینه در نهایت به قضاوت مهندسی مدیران متولی امر بر می‌گردد. با توجه به نکات ذکر شده، روش‌های کنترل ماسه را می‌توان به سه روش، کاهش نیروهای حرکتی، کنترل ماسه از طریق تحکیم شیمیایی سازند و کنترل مکانیکی ماسه تقسیم نمود.

### ۳-۴-۱- کنترل ماسه از طریق کاهش نیروهای حرکتی

کاهش نیروهای حرکتی و نیروهای جاری شونده معمولاً موثرترین و ساده‌ترین روش مبارزه با تولید ماسه می‌باشند. نیروهای حرکتی به طرق زیر کاهش پیدا می‌کنند:

الف- تکمیل چاه با شبکه‌های بزرگ‌تر و تمیز

ب- افزایش تعداد شبکه‌ها در واحد طول

ج- افزایش طول مسیر مشبک

د- ایجاد کانال‌های مصنوعی در سازند از طریق ایجاد شکاف هیدرولیکی

ه- کم کردن تولید تاحدی که میزان ماسه در نفت تولیدی به کمترین حد خود برسد.

در یک تولید طبیعی، صرف نظر از میزان تولید همیشه مقداری ماسه تولید می‌شود. اگر میزان تولید از یک مقدار معینی افزایش پیدا کند، تولید ماسه به صورت فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. اگر لازم باشد به دلایل اقتصادی میزان تولید بالا برود باید مقدار بحرانی میزان تولید را محاسبه نمود و هرگز از این میزان تجاوز ننمود. مطلوب‌ترین رفتار با این‌گونه مخازن نگه داشتن میزان تولید در زیر میزان بحرانی است پس تولید کم و مداوم در این‌گونه مخازن بهترین توصیه است ( Van Buren and Van den Broek, 1999).

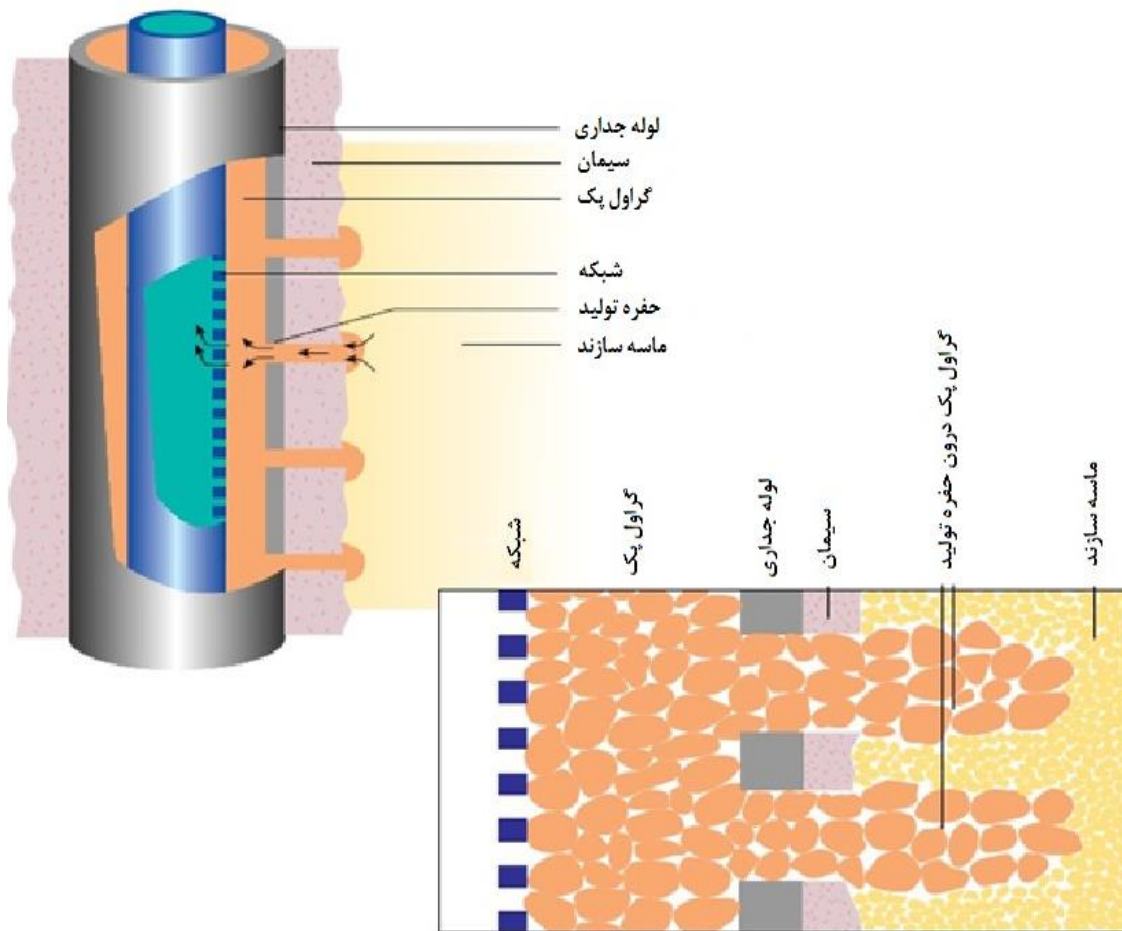
### ۳-۴-۲- کنترل ماسه از طریق تحکیم شیمیایی سازند

در این روش، ماسه سازند را در منطقه نزدیک چاه طوری از لحاظ سیمان‌بندی محکم می‌کنند که این ماسه‌ها در اثر نیروهای هیدرودینامیکی که در اثر تولید ایجاد می‌شوند، حرکت نکنند. در این روش رزین به داخل سازند تزریق می‌شود. بعد از سخت شدن رزین سازند نیز سخت می‌شود، اما از طرف دیگر این روش باعث کاهش نفوذ پذیری می‌شود زیرا کانال‌ها تا حدودی توسط رزین پر می‌شوند (Hooshmandkoochi and Ghorbani, 2007).

### ۳-۴-۳- کنترل مکانیکی تولید ماسه

در روش‌های مکانیکی، برای کنترل ماسه از فیلتر یا گراول پک استفاده می‌شود. موضوع اصلی در این روش‌ها این است که کنترل ماسه باعث کاهش تولید نگردد. باید مرتباً این نکته را مد نظر قرار داد که تولید هیدروکربور بیشتر منجر به تولید بیشتر ماسه‌ها می‌شود.

گراول پک، یک فیلتر دانه دانه با نفوذپذیری بسیار بالا است که از ورود ماسه سازند به داخل چاه جلوگیری می‌نماید شکل ۲-۳ شماتیک ساده‌ای از گراول پک را نشان می‌دهد. در این روش، یک محلول دوغابی از گراول‌هایی با اندازه مشخص را به همراه یک سیال حمل‌کننده، به فضای حلقوی بین صافی و لوله جداری مشبک کاری شده پمپ می‌کنند. گراول‌های موجود در حفره مشبک‌ها، افت فشاری را که بر قابلیت تولید تأثیر زیادی دارد، افزایش می‌دهند. این روش دارای اشکالات و معایبی است؛ از جمله اینکه در طول نصب، سیال حمل‌کننده به داخل سازند نفوذ کرده و به تراوایی سازند آسیب می‌رساند و تولید را محدود می‌کنند. گراول پک، قطر مؤثر چاه‌ها را نیز کاهش می‌دهد؛ از اینرو، روش کنترل تولید ماسه را پرهزینه می‌سازد. البته با وجود این معایب، روش بسیار مفیدی در جلوگیری از حرکت ذرات ماسه و تولید آنهاست و امروزه، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hooshmandkoochi and Ghorbani, 2007).



شکل ۳-۲: شماتیک ساده‌ای از گراول پک (After Carlson et al, 1992)

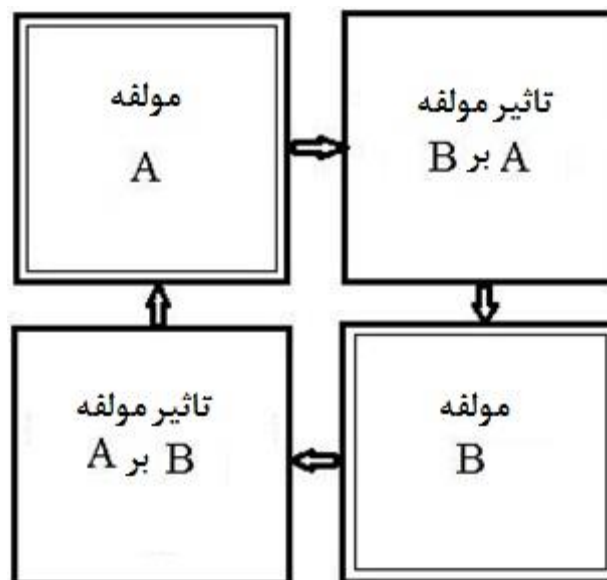
### ۳-۵- سیستم مهندسی سنگ

پارامترها و متغیرهای موثر در پروژه‌های مهندسی سنگ، اثرات خاصی بر روی یکدیگر و همین‌طور بر کل سیستم دارند. مطالعه پارامترهای مختلف موثر در پروژه‌های مهندسی امری ضروری بشمار می‌آید. هادسون در سال ۱۹۹۲، سیستم مهندسی سنگی را ارائه کرده است که در آن به بررسی ارتباط درونی میان پارامترهای مختلف موثر در طراحی و ساخت پروژه‌های مهندسی سنگ پرداخته شده است. هدف از بکارگیری سیستم مهندسی سنگ، شناسایی پارامترهای مربوط به مشکلات و اثرات متقابل آن‌ها نسبت به یکدیگر و در نهایت درک بهتری از مسائل و مشکلات مهندسی سنگ

است. در این تحقیق از سیستم مهندسی سنگ جهت ارزیابی و آنالیز پارامترهای موثر در تولید ماسه استفاده شده است. ساختار و چگونگی استفاده از این ماتریس در ادامه آورده شده است.

### ۳-۵-۱- ماتریس اندرکنش<sup>۱</sup>

سیستم مهندسی سنگ به مطالعه اندرکنش و اثر پارامترهای موثر در یک سیستم بر یکدیگر می‌پردازد. ساختار کلی یک ماتریس اندرکنش در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در این شکل پارامترهای موثر با  $A$  و  $B$  مشخص شده‌اند که روی قطر اصلی ماتریس قرار دارند. این ماتریس لیستی از موضوعات با مفاهیم مختلف است که در نهایت به کمیت‌های عددی تبدیل می‌شود. اندرکنش پارامترها در بخش‌های غیر قطری قرار می‌گیرد و در جهت ساعتگرد مورد مطالعه قرار می‌گیرند (Hudson and Harrison, 1997).



شکل ۳-۳: موقعیت قرارگیری پارامترهای اولیه و اندرکنش میان آنها در ماتریس اندرکنش (After Hudson and Harrison, 1997).

<sup>۱</sup>-Interaction matrix

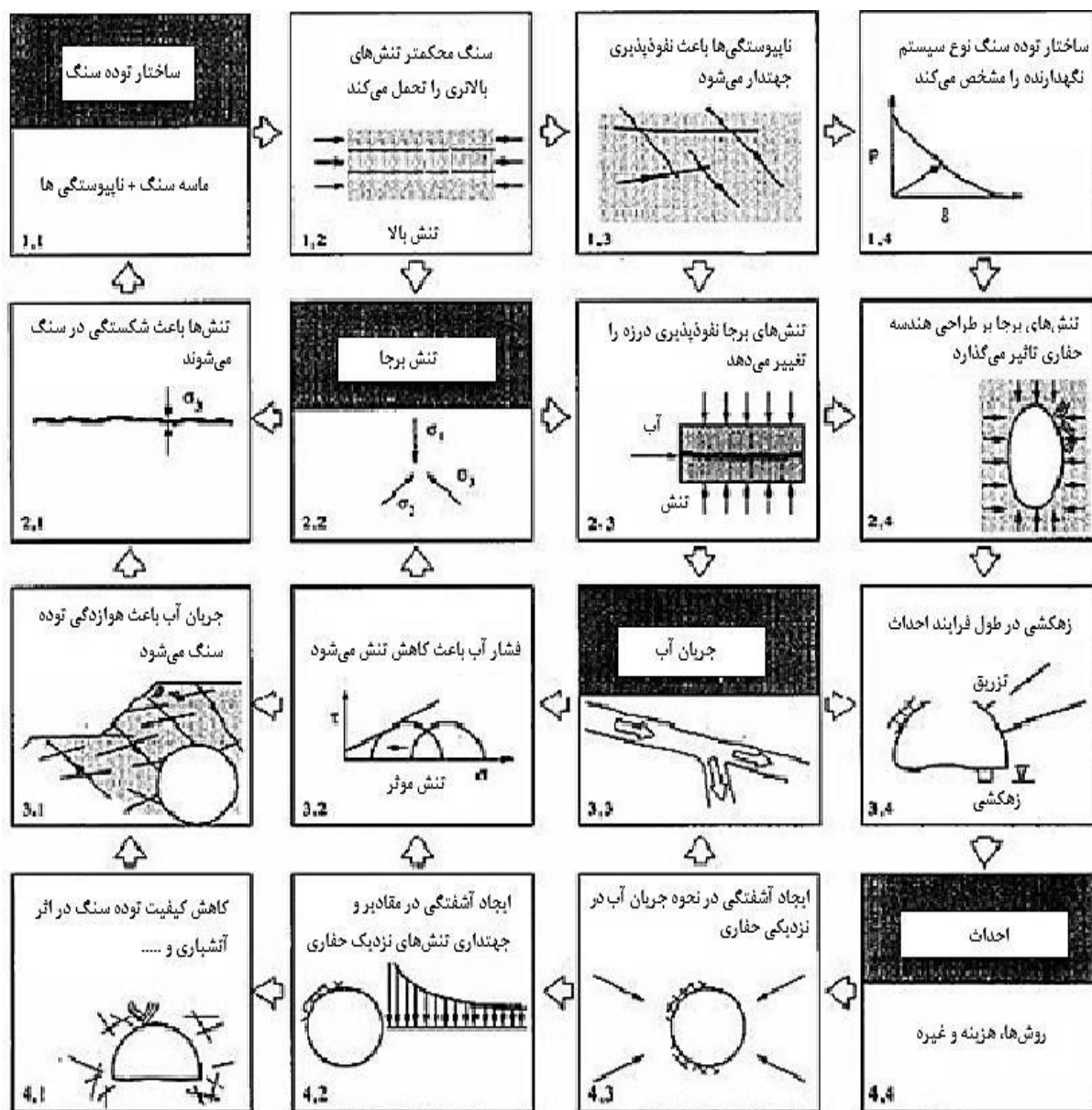
شکل ۳-۴ نمایی کلی از یک سیستم مهندسی سنگ را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای اصلی نظیر ساختار توده سنگ، تنش برجا، جریان آب و ساختار بندی روی قطر اصلی ماتریس قرار گرفتند. این ماتریس چهار در چهار دارای ۴ متغیر اصلی و ۱۲ اندرکنش است. تعیین دقیق اندرکنش میان پارامترها منجر به تفسیر دقیق مسائل مهندسی سنگ می‌شود. اگر به ماتریس حاضر دو پارامتر دیگر اضافه شود این ماتریس به یک ماتریس شش در شش با ۶ متغیر اصلی و ۳۰ اندرکنش تبدیل خواهد شد. اندرکنش میان پارامترهای اصلی مکانیک سنگی تنها توسط ماتریس اندرکنش قابل مطالعه و تفسیر است (Hudson and Harrison, 1997). سطرها و ستون‌های ماتریس اندرکنش همان‌گونه که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است با عدد نمایش داده می‌شوند. اندرکنش میان مولفه‌هایی که در قطر اصلی قرار گرفته‌اند، در مولفه‌های فرعی ارائه می‌شود. سطرها در این ماتریس اثر پارامترها را بر سیستم و ستون‌ها اثر سیستم بر پارامترها را بیان می‌کند. به‌عنوان مثال، المان ۳۲ تأثیر، حضور آب بر تنش برجا را نشان می‌دهد در حالیکه المان مکمل یعنی ۲۳ تأثیر تنش برجا بر حضور آب را بررسی می‌کند.

### ۳-۵-۲- شدت و مقدار غالب بودن پارامترها

به‌طور کلی بعضی از پارامترها نسبت به پارامترهای دیگر، بر روی سیستم تأثیر بیشتری خواهند داشت و در مقابل سیستم نیز تأثیر بیشتری را بر روی برخی پارامترها نسبت به پارامترهای دیگر دارد. کدگذاری ماتریس اندرکنش روشی در جهت تعیین شدت و مقدار غالب بودن پارامترها می‌باشد (Hudson, 1992).

## ۳-۵-۳- کد گذاری ماتریس اندرکنش

به منظور تفسیر سیستم مهندسی سنگ روش‌های متعددی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش ارائه شده است. که عبارتند از روش دوتایی (باینری)، کدگذاری نیمه کمی خبره<sup>۱</sup> (ESQ)، روشی براساس ارتباط میان شیب پارامترهای موثر و روش صریح به کمک آنالیز عددی (Ceryan and Ceryan, 2008).



شکل ۳-۴: ماتریس اندرکنش مهندسی سنگ (صادقی و رسولی، ۱۳۸۶).

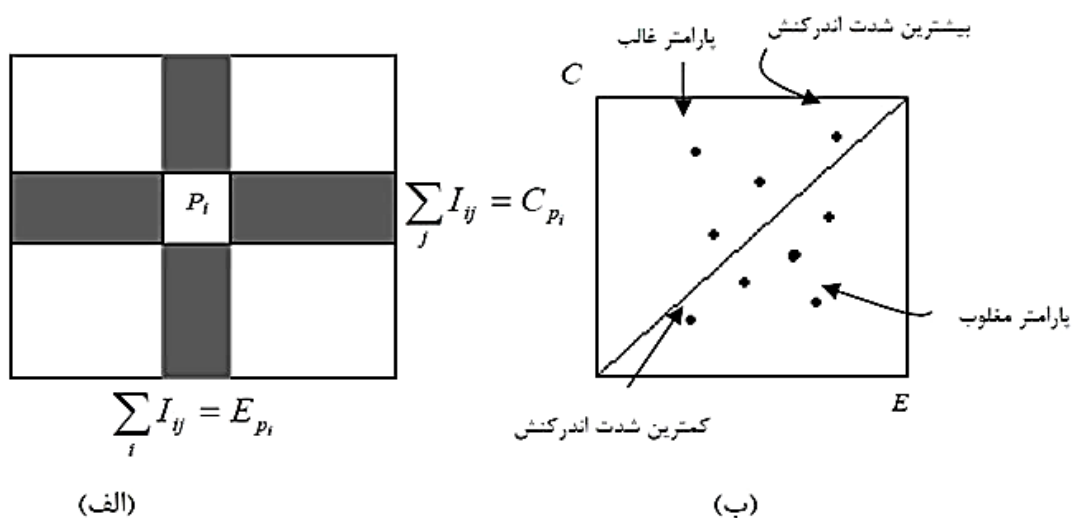
<sup>1</sup> - Expert Semi-Quantitative



## ۳-۵-۴- تفسیر ماتریس اندرکنش

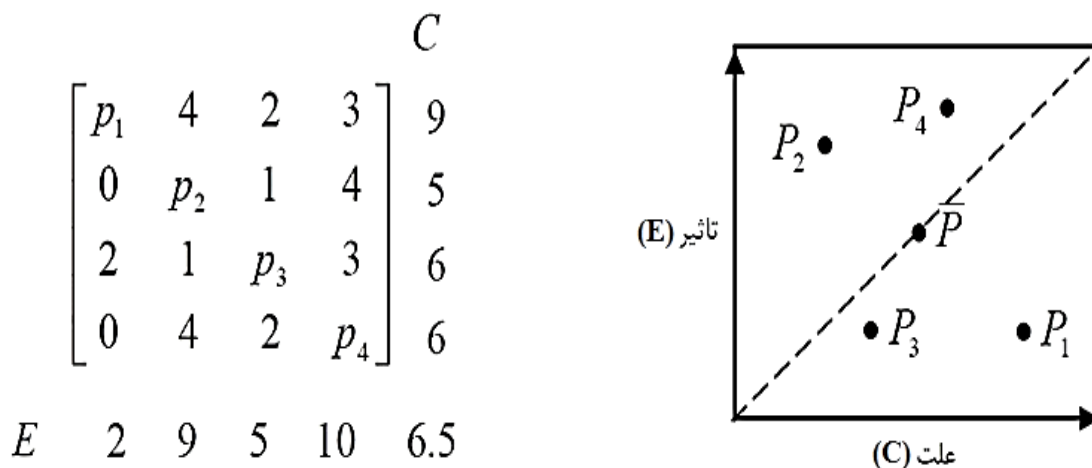
در ماتریس اندرکنش اثر یک پارامتر روی سیستم اثر (علت) و اثر سیستم روی پارامتر تأثیر نامیده می‌شود. بعد از کدگذاری ماتریس می‌توان مجموع هر ردیف و ستون را به دست آورد. مجموع مقادیر ردیف به عنوان علت یا اثر پارامتر نام (Pi) روی سیستم در محور مختصات به C و مجموع مقادیر هر ستون به عنوان تأثیر یا اثر سیستم روی پارامتر را می‌توان در محور مختصات به صورت E نشان داد. بنابراین مقدار C نشانگر مسیری است که اثرات Pi روی سیستم دارد و مقدار E نشانگر تأثیری است که سیستم روی Pi دارد. شکل ۳-۵ چگونگی اثرگذاری یک پارامتر و همچنین تأثیرپذیری آن از سیستم در قالب یک دستگاه مختصات علت-تأثیر به نمایش در آمده است (Hudson, 1992).

شکل ۳-۶ نحوه رسم نمودار C-E را نشان می‌دهد. پس از کدگذاری ماتریس، مقادیر علت (اثر) و تأثیر تمام پارامترها محاسبه شده و بر روی نمودار رسم می‌شوند. موقعیت هر نقطه در فضای C-E وضعیت اندرکنش آن پارامتر را مشخص می‌نماید. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع E+C پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندرکنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار عددی تفاضلی C-E بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور بر روی سیستم بیشتر می‌باشد.



شکل ۳-۵: (الف) مفهوم اثر و تأثیر مربوط به هر یک از پارامترها در ماتریس اندرکنش (ب) نمودار علت-تأثیر (صادقی و رسولی، ۱۳۸۶).

مقدار منفی برای C-E نشان دهنده غلبه سیستم بر پارامتر مورد نظر است. همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود، پارامتر  $P_1$  بیشترین غلبه، پارامتر  $P_2$  کمترین غلبه، پارامتر  $P_3$  کمترین اندرکنش و پارامتر  $P_4$  بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند. پارامتر  $\bar{P}$  نیز مقدار متوسط اندرکنش در سیستم را نشان می‌دهد (Hudson, 1992).



شکل ۳-۶: مراحل رسم نمودار علت-تأثیر با کدگذاری نیمه کمی خبره (صادقی و رسولی، ۱۳۸۶).

### ۳-۷- جمع‌بندی

با توجه به تمامی موارد بیان شده، مهم‌ترین عوامل تشکیل ماسه یا جامدات در چاه، گسیختگی منطقه دارای ماسه به دلیل سست بودن، مقاومت فشاری اندک و تنش موثر بالای منطقه به دلیل تولید و تهی‌شدگی مخزن می‌باشد. در واقع تغییرات فشار منفذی در هنگام تولید در مناطق سست که دارای مقاومت بسیار پایینی هستند، باعث می‌شود تا ذرات ماسه به شکل ذرات ریز در آمده و همراه با فشار سازند وارد چاه شوند. البته علاوه بر تمامی موارد فوق، پارامترهای دیگری مانند شرایط تنش و تکتونیک منطقه، فشار گل حفاری، اختلاف فشار سازند و گل حفاری (افت) و ... در تولید ماسه در چاه موثر هستند. با توجه به نیاز به تجهیزات ویژه به منظور جلوگیری از تولید جامدات در چاه و هزینه‌های ناشی از آن، تصمیم‌گیری در مورد نصب یا عدم نصب پکرها نیاز به اطلاعات کاملی خواهد

داشت. بنابراین، در این مطالعه سعی خواهد شد تا با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر روش پیش‌بینی تولید ماسه با استفاده از نگارهای چاه و روش‌های تجربی ارائه گردد.



## فصل چهارم

بررسی و تعیین پارامترهای

ژئومکانیکی سنگ مخزن میدان مورد

مطالعه

## ۴-۱- مقدمه

پارامترهای ژئومکانیکی از جمله خصوصیات الاستیک، مقاومتی و تنش برجای سنگ از جمله پارامترهای ضروری در مبحث پایداری دیواره چاه و شکست هیدرولیکی می‌باشد. تعیین این پارامترها بدون وجود اطلاعات زمین‌شناسی و فیزیک سنگ از جمله دانسیته، تخلخل و سرعت موج امکان پذیر نمی‌باشد. این فصل به ارزیابی ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی، داده‌های نگار چاه و اطلاعات پتروفیزیکی می‌پردازد. علاوه بر آن، تنش‌های اصلی قائم و افقی و همچنین فشار منفذی نیز محاسبه می‌گردند. در این راستا ابتدا توضیحاتی در زمینه ابزار دوقطبی برشی ارائه خواهد شد و سپس چگونگی تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، تنش‌های اصلی و فشار منفذی از طریق روابط تجربی و اطلاعات نگار چاه ارائه می‌گردد.

## ۴-۲- ابزار دوقطبی برشی

ابزار دو قطبی برشی<sup>۱</sup> (DSI) از یک آرایه شامل هشت ایستگاه گیرنده استفاده می‌کند و اطلاعات ورودی به ایستگاه‌ها را به صورت همزمان ثبت کرده و توسط یک سیستم تله متری با سرعت بالا به سطح زمین ارسال می‌کند. این امر باعث بالا رفتن سرعت نمودارگیری توسط این ابزار می‌شود. علاوه بر فرستنده دو قطبی از یک فرستنده تک قطبی نیز در این سوند استفاده می‌شود و اطلاعات ثبت شده توسط واحد پردازشگر MAXIS برداشت و پردازش می‌شوند. این ابزار قابلیت ترکیب با سایر ابزارهای نمودارگیری را داراست. سرعت نمودارگیری ابزار مذکور به خاطر داشتن ترکیب و شکل جدید در حالتی که به تنهایی رانده می‌شود به ۳۶۰۰ فوت بر ساعت می‌رسد. ولی چنانچه با سایر ابزارها ترکیب شود سرعت آن با توجه به ابزارهای همراه آن تنظیم خواهد شد. عمق تجسس ابزارهای نمودارگیری صوتی به عواملی از قبیل نوع سازند، فاصله بین فرستنده و گیرنده، طول موج مورد نظر، فرکانس منبع و نوع سیگنال دریافتی بستگی دارد (سعیدی، ۱۳۸۸).

<sup>۱</sup> - Dipole Shear Sonic Imager (DSI)

پارامترهای مهم جهت استفاده در تحلیل پتروفیزیکی که توسط این ابزار اندازه‌گیری می‌شوند عبارتند از:

- نفوذ پذیری حاصل از موج استنلی
- $DTCO$  - کندشدگی (زمان گذر امواج) فشاری بر حسب میکروثانیه بر فوت ( $\mu s/ft$ )
- $DTSM$  - کندشدگی (زمان گذر امواج) برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت ( $\mu s/ft$ )
- نسبت پواسون

به‌طور معمول همه ابزارهای DSI امروزه این پارامترها را اندازه‌گیری می‌کنند. امواج استونلی مستقیماً تحت تأثیر نفوذپذیری قرار نمی‌گیرند، بلکه از تحرک یعنی نسبت نفوذپذیری به ویسکوزیته سیال منفذی بدست می‌آیند. نفوذپذیری بر روی امواج استونلی به سه طریق تأثیر می‌گذارد. امواج استونلی می‌تواند در مرزهایی با امپدانس تیز مانند شکستگی‌ها، لیتولوژی یا تغییرات قطر چاه منعکس شود. به علاوه با افزایش نفوذپذیری سازند سرعت امواج استونلی کاهش می‌یابد. میرائی امواج زمانی رخ می‌دهد که سیال درون سازند نفوذ پذیر محصور شده و انرژی با حرکت نسبی بین سیال منفذی ویسکوز و ماتریکس الاستیک جامد (سازند) هدر رود (سعیدی، ۱۳۸۸). بنابراین میرائی با نفوذپذیری همبستگی داشته ولی متاسفانه مرزهای لیتولوژی یا هندسه متغیر چاه نیز امواج استونلی را میرا می‌کنند. در نتیجه در این حالت بررسی سایر نگارهای چاه و مغزه برای تشخیص علل ایجاد میرائی ضروری می‌باشد. به‌صورت کلی، می‌توان گفت کاهش امواج استونلی هم در نتیجه نفوذپذیری سازند یا یک دیواره صاف و بدون نقص چاه یا در نتیجه شستشو و شکست دیواره می‌باشد.

#### ۴-۲-۱- تخمین پارامترهای مکانیکی بر اساس نگارهای چاه

پارامترهای مکانیک سنگی که از طریق ابزار DSI و سایر نگارهای چاه قابل تعیین هستند عبارتند از مقاومت فشاری تک محوره سنگ، مدول یانگ، بالک و برشی، نسبت پواسون و مقاومت

کششی (Ito et al, 2001). با استفاده از اندازه‌گیری‌های ابزار DSI و داده‌های مربوط به وزن مخصوص لایه‌ها، پارامترهای مکانیکی به شرح زیر محاسبه می‌شوند (Zoback, 2007):

$$G_{dyn} = \rho V_S^2 \quad (۱-۴)$$

$$\lambda_{dyn} = \rho V_S^2 - 2\rho V_S^2 \quad (۲-۴)$$

$$k_{dyn} = \rho V_P^2 - \frac{4}{3}\rho V_S^2 \quad (۳-۴)$$

$$E_{dyn} = \rho V_S^2 \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \quad (۴-۴)$$

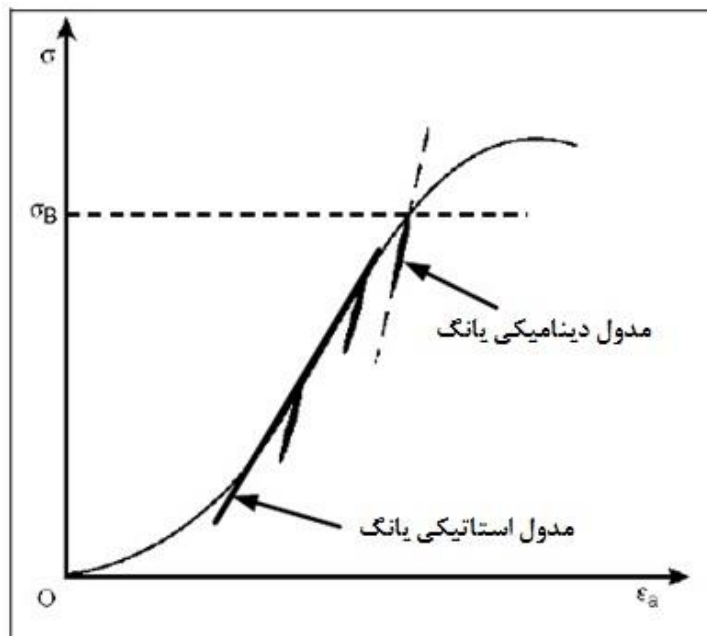
$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (۵-۴)$$

در روابط بالا،  $V_P$  و  $V_S$  سرعت موج فشاری و برشی،  $\nu$  نسبت پواسون،  $E$  مدول یانگ،  $G$  مدول برشی،  $\lambda$  ضریب لامه و  $K$  مدول بالک دینامیکی می‌باشند.

با استفاده از روابط بالا و سرعت موج فشاری و برشی و چگالی سنگ می‌توان مدول‌های الاستیک دینامیک سنگ را محاسبه نمود. اما مدول‌های الاستیک دینامیکی سنگ به دلیل استفاده از سرعت امواج بیش از مقدار واقعی تعیین می‌شوند. بنابراین باید به پارامترهایی که از طریق آزمایش‌های مکانیک سنگی به دست می‌آیند و پارامترهای الاستیک استاتیکی نامیده می‌شوند تبدیل شوند. تفاوت اصلی این دو اختلاف در میزان کرنش تولید شده در سنگ می‌باشد. ثابت‌های الاستیک دینامیکی در واقع مدول مماسی در کرنش‌های خیلی پایین (در حدود  $10^{-5}$ ) می‌باشند بنابراین با مدول استاتیکی که در آنها کرنش تا حدود  $10^{-2}$  نیز می‌رسد، قابل مقایسه نمی‌باشد (شکل ۴-۱). به‌طور کلی مقادیری که از روش‌های دینامیکی به دست می‌آیند بیشتر از مقادیری هستند که از روش‌های استاتیکی حاصل می‌شوند. هرچه مقدار چگالی سنگ بیشتر باشد، احتمال یکسان شدن ثابت‌های الاستیک استاتیک و دینامیک بیشتر می‌شود. این در حالی است که اختلاف در این ثابت‌ها در سنگ‌های با تخلخل و شکستگی بالا بیشتر می‌باشد (Thiercelin and Roegiers, 2003). البته سیال منفذی نیز می‌تواند عاملی جهت تفاوت میان مدول‌های استاتیکی و دینامیکی سنگ‌ها باشد. بنابراین



مدول‌های استاتیکی اندازه‌گیری شده در سنگ‌های اشباع برابر یا بیشتر از مدول‌های استاتیکی یک آزمایش زهکشی خواهند بود. این تأثیر همواره وجود دارد اما نمی‌تواند اختلاف زیاد میان ضرایب استاتیکی و دینامیکی سنگ‌های نیمه اشباع را توجیه کند.



شکل ۴-۱: مقایسه مدول الاستیک دینامیکی و استاتیکی (After Thiercelin and Roegiers, 2003).

البته لازم به ذکر است که نسبت پواسون دینامیکی و استاتیکی تفاوت بسیار بالایی با یکدیگر ندارند و تقریباً یکسان می‌باشند (Thiercelin and Roegiers, 2003).

#### ۴-۳- ضرورت کالیبراسیون داده‌ها

اگرچه روابط تجربی برای تخمین غیر مستقیم مدول تغییر شکل پذیری سنگ روشی ساده و کم هزینه هستند، اما این گونه روابط، همیشه از عدم اعتماد کافی مربوط به محدودیت کیفیت داده‌های قابل دسترس، تغییرات نوع سنگ و طبیعت ناهمگن بودن ماده سنگ رنج می‌برند. از این رو روابط ارائه شده برای این گونه مطالعات باید با استفاده از داده‌های آزمایشات برجا و اطلاعات میدان کالیبره شوند.

#### ۴-۴- تعیین پارامترهای الاستیک دینامیکی

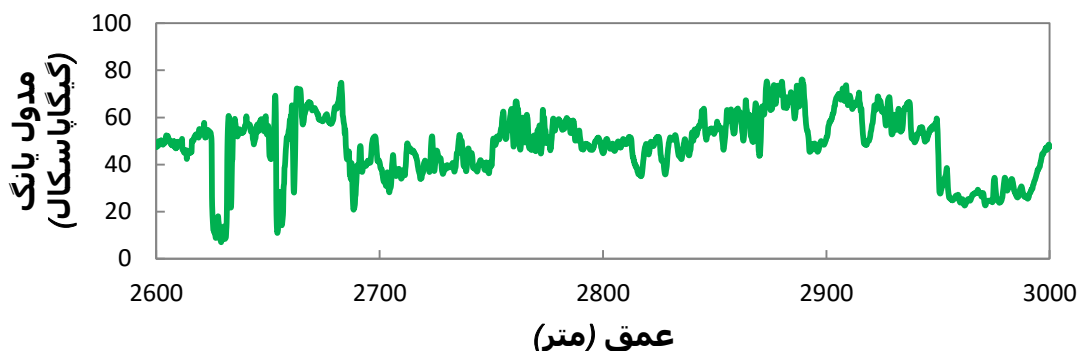
همانطور که قبلاً ذکر شد، در صورت داشتن سرعت امواج فشاری، برشی و چگالی سنگ می‌توان مدول‌های الاستیکی دینامیکی سنگ را محاسبه کرد. در مطالعه حاضر، با استفاده از داده‌های نگارهای DSI، دانسیته و ... مدول برشی، مدول بالک، مدول یانگ و نسبت پواسون به کمک روابط (۴-۱) تا (۴-۵) محاسبه شدند. نتایج این محاسبات در بازه‌ی مخزنی ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر در یکی از چاه‌های میدان نفتی آزادگان در ادامه ارائه شده است.

#### ۴-۴-۱- مدول یانگ

بنا به تعریف نسبت تنش عمودی وارد بر سطح به تغییر شکل نسبی عمودی ( $\varepsilon$ ) در آن امتداد را ضریب یانگ یا مدول الاستیسیته می‌گویند:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (۴-۶)$$

که  $E$  در رابطه بالا نماینده صلبیت و استحکام جسم است (با توجه به آنکه  $\varepsilon$  فاقد بُعد است)، دارای بعد تنش ( $\sigma$ ) یعنی نیرو بر سطح می‌باشد (ترابی، ۱۳۹۰). در شکل ۴-۲ تغییرات مدول یانگ دینامیکی در مخزن مورد مطالعه نشان داده شده است. روند کلی تغییرات مدول یانگ با تغییرات زمان گذر امواج فشاری مشابه می‌باشد.



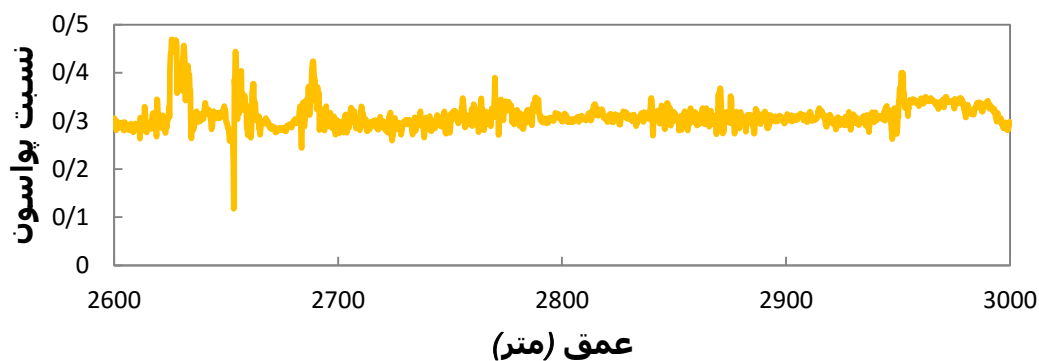
شکل ۴-۲: نمودار تغییرات مدول یانگ دینامیکی در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط تجربی

## ۴-۴-۲- نسبت پواسون

نسبت پواسون کمیته جهت تعیین انبساط جانبی نسبت به انقباض طولی است. این پارامتر به صورت نسبت کرنش طولی به جانبی بیان می‌شود و از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (۷-۴)$$

شکل ۴-۳ نسبت پواسون به دست آمده از طریق روابط الاستیک را نشان می‌دهد.



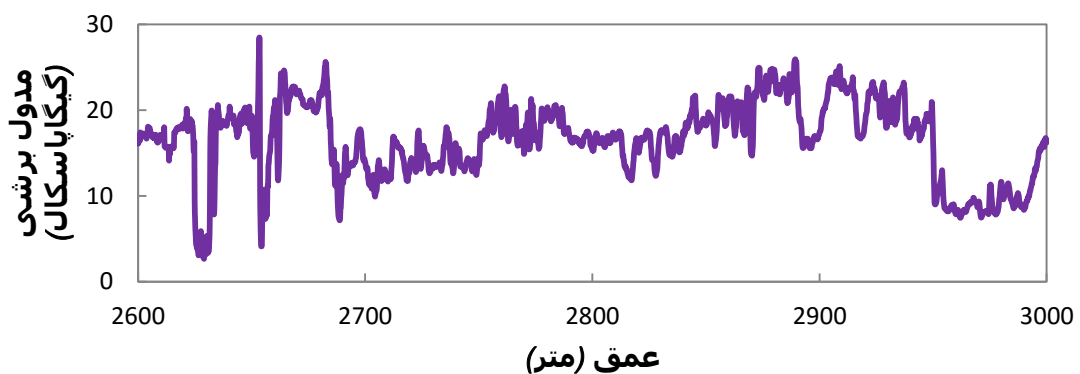
شکل ۴-۳: نمودار تغییرات نسبت پواسون در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط تجربی

با توجه به شکل ۴-۳، مقدار نسبت پواسون در سازند سروک به‌طور میانگین برابر  $0/3$  می‌باشد که در برخی فواصل تا  $0/45$  نیز می‌رسد.

## ۴-۴-۳- مدول برشی

مدول برشی<sup>۱</sup> یا مدول صلبیت که با  $G$  نمایش داده می‌شود برابر با نسبت تنش برشی به کرنش برشی است. مدول برشی نوعی مقاومت مکانیکی است که یک نمونه در برابر تنش برشی تحمل می‌کند (کاظمی، ۱۳۹۱). این مدول برای بازه مخزنی ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر در چاه مورد نظر محاسبه و در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Modulus of Rigidity



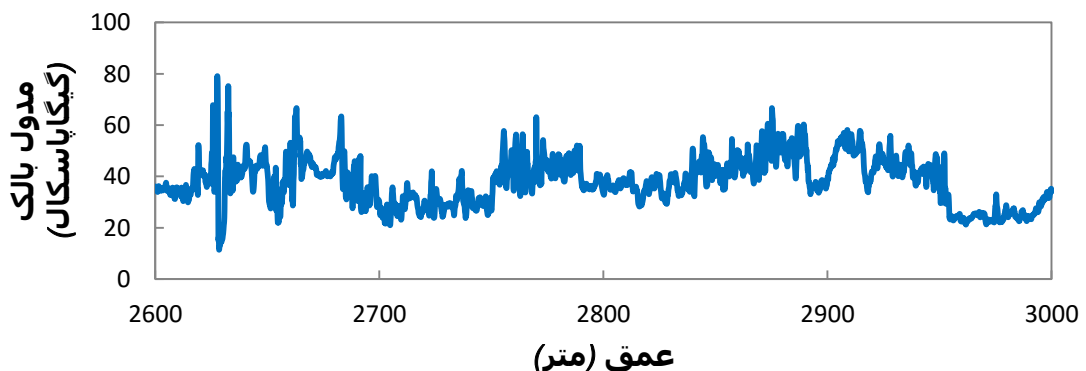
شکل ۴-۴: نمودار تغییرات مدول برشی دینامیکی در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط تجربی

با توجه به شکل ۴-۴، مقدار مدول برشی در سازند سروک در فاصله ۵ تا ۲۵ گیگاپاسکال متغیر است.

#### ۴-۴-۴- مدول بالک

یکی دیگر از ضرایب الاستسیته ضریب تغییرات حجمی است که با  $K$  نمایش داده می‌شود و از طریق تنش هیدرواستاتیک یا همه جانبه ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = P$ ) مفهوم پیدا می‌کند (ترابی، ۱۳۹۰). با داشتن مدول یانگ ( $E$ ) و نسبت پواسون ( $\nu$ ) و با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان مدول بالک را محاسبه کرد. شکل ۴-۵ میزان تغییرات مدول بالک مخزن مورد نظر را نشان می‌دهد.

$$K = E/3(1 - 2\nu) \quad (۸-۴)$$



شکل ۴-۵: نمودار تغییرات مدول بالک دینامیکی در چاه شماره ۶ میدان آزادگان به کمک روابط تجربی

هدف از تعیین مدول‌های الاستیک سنگ در این تحقیق، استفاده از آن‌ها جهت محاسبه تنش-های وارد بر دیواره چاه می‌باشد. اما همان‌طور که بیان شد مدول‌های دینامیکی اختلاف زیادی با مدول‌های استاتیکی دارند (Eissa and Kazi, 1988; Plona and Cook, 1995; Yaser and Erdogan, 2004)، بنابراین باید به حالت استاتیکی تبدیل شوند. در ادامه روابطی برای تبدیل این مدول‌ها بیان می‌شوند که هر رابطه مربوط به شرایط خاصی است. در صورت به کارگیری این روابط، مدول‌های بدست آمده باید کالیبره شوند. در این تحقیق به منظور کالیبره نمودن مدول‌های مختلف، از داده‌های آزمایش هیدرواستاتیکی استفاده خواهد شد. آزمایش هیدرواستاتیکی برای تعیین نفوذپذیری، تحرک و مدول تراکم‌پذیری انجام می‌شود که می‌تواند برای مدول بالک استفاده شود. از آنجایی که قابلیت تراکم‌پذیری نمونه‌ها در عمق‌های مختلف موجود است و توجه به این نکته که مدول بالک با مدول یانگ و نسبت پواسون ارتباط دارد (رابطه ۴-۸)، با کالیبراسیون مدول بالک، مدول‌های دیگر وابسته به آن نیز کالیبره می‌گردند.

#### ۴-۵- تعیین پارامترهای الاستیکی استاتیکی

پارامترهای ژئومکانیکی نقش حیاتی در برآورد تنش‌های برجا، نشست، تراکم مخزن و تحلیل پایداری چاه ایفا می‌کنند (Chang et al, 2006). اما همان‌گونه که بیان شد، پارامترهای الاستیکی به دست آمده از نگار چاه، پارامترهای دینامیکی بوده و باید به پارامترهای استاتیکی تبدیل شوند. در این راستا روابط تجربی برای تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی ارائه شده است که با توجه به شرایط زمین‌شناسی میدان متفاوت خواهند بود. در ادامه برخی از این روابط می‌آید.

کینگ (King, 1983) در مطالعات خود بر روی سنگ‌های آذرین و دگرگونی رابطه زیر را برای ارتباط مدول یانگ دینامیک با استاتیک ارائه کرد:

$$E_s = 1.26E_d - 29.5 \quad (۹-۴)$$

که در آن میزان مدول دینامیک و استاتیک بر حسب گیگاپاسکال ( $Gpa$ ) است.

عیسی و کزی (Eissa and Kazi, 1988) با مطالعه بر روی انواع سنگ‌های رسوبی رابطه زیر را برای مدول یانگ دینامیک و استاتیک ارائه دادند:

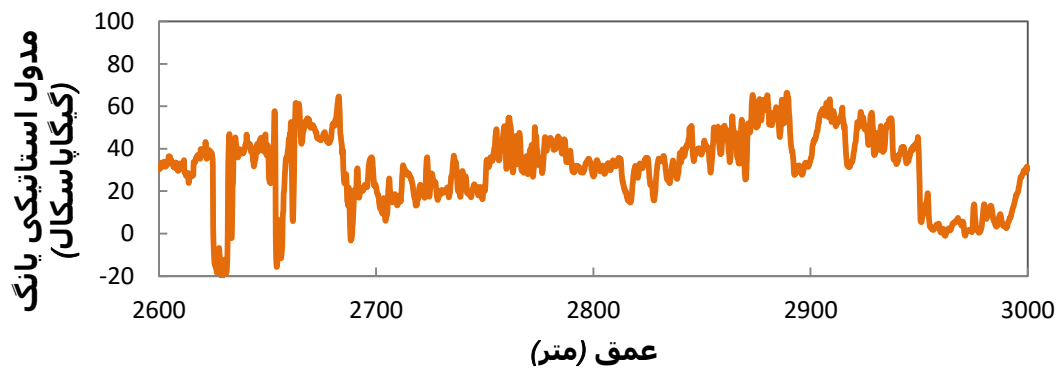
$$E_s = 0.74E_d - 0.82 \quad (10-4)$$

مقایسه رابطه ۹-۴ با رابطه ۱۰-۴ نشان می‌دهد که در سنگ‌های آذرین و دگرگونی نسبت به سنگ‌های رسوبی، مدول یانگ استاتیک با افزایش مدول یانگ دینامیک با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. جدول ۱-۴ برخی از روابط تجربی که برای سازندهای کربناته در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند را معرفی می‌کند.

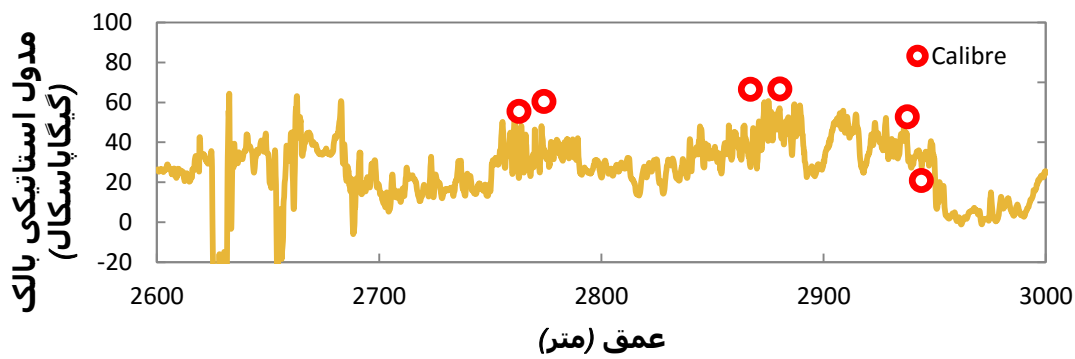
جدول ۱-۴: روابط تجربی بین پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مدول یانگ

رابطه	مقاومت فشاری تک محوره	نوع سنگ	مرجع
(۱۱-۴)	$E_s = 0.18E_d^2 + 0.422E_d$	سنگ‌های آهکی	(Fjaer et al, 2008)
(۱۲-۴)	$E_s = 1.153E_d - 15.197$	سنگ‌های آهکی	(Wang, 2000)
(۱۳-۴)	$E_s = 1.43E_d - 32$	سنگ‌های آهکی	(Jambunathan, 2008)
(۱۴-۴)	$E_s = 0.84E_d + 0.7$	دولومیت	(Jambunathan, 2008)
(۱۵-۴)	$E_s = 1.153E_d - 15.2$	سنگ‌های کربناته	(Wang, 2000)
(۱۶-۴)	$E_s = 0.541E_d + 12.852$	سنگ‌های آهکی	(Ameen et al, 2009)

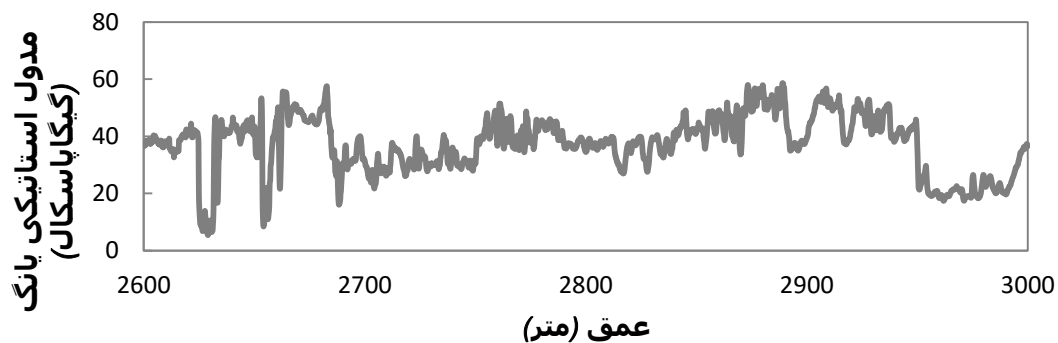
بنابراین با استفاده از روابط (۹-۴) تا (۱۶-۴) می‌توان مدول‌های دینامیکی را به مدول‌های استاتیکی تبدیل کرد و نتایج حاصل را توسط نمونه‌های مغزه کالیبره نمود. در ادامه هر یک از روابط فوق مورد ارزیابی قرار گرفتند تا نتایج و قابلیت آنها برای تولید نتایج مطلوب مشخص شود. نتایج این مطالعه در شکل‌های ۶-۴ تا ۱۵-۴ نشان داده شده است.



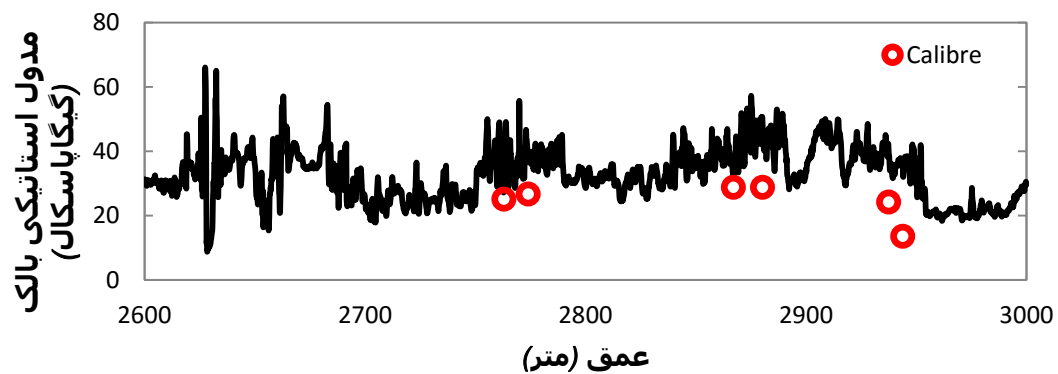
شکل ۴-۶: مدول یانگ الاستاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (King,1983)



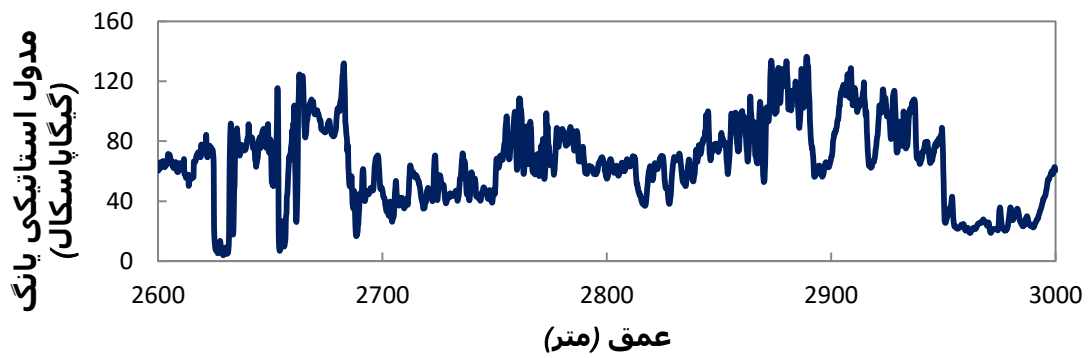
شکل ۴-۷: مدول بالک الاستاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (King,1983)



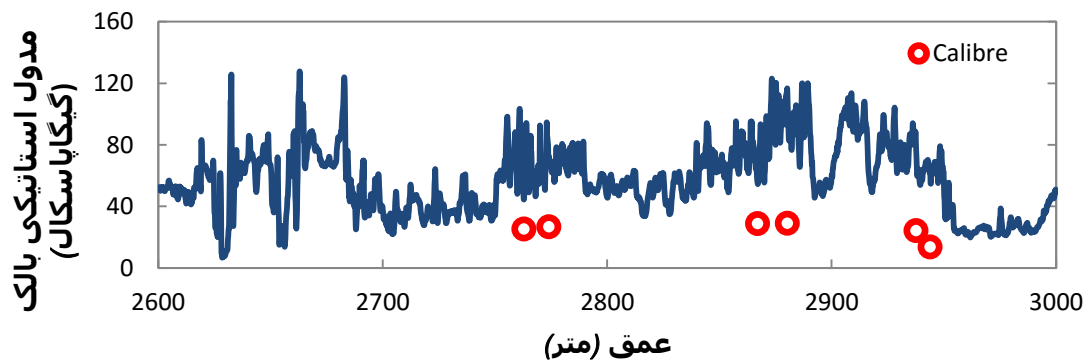
شکل ۴-۸: مدول یانگ الاستاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Eissa and Kazi,1988)



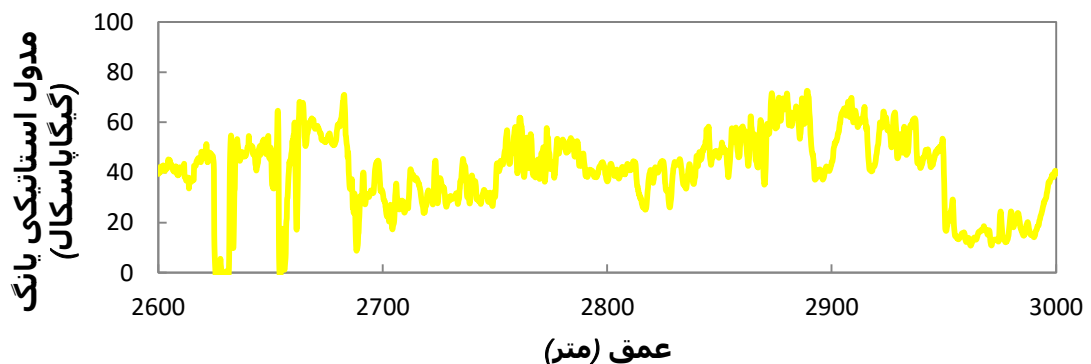
شکل ۴-۹: مدول بالک الاستاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Eissa and Kazi,1988)



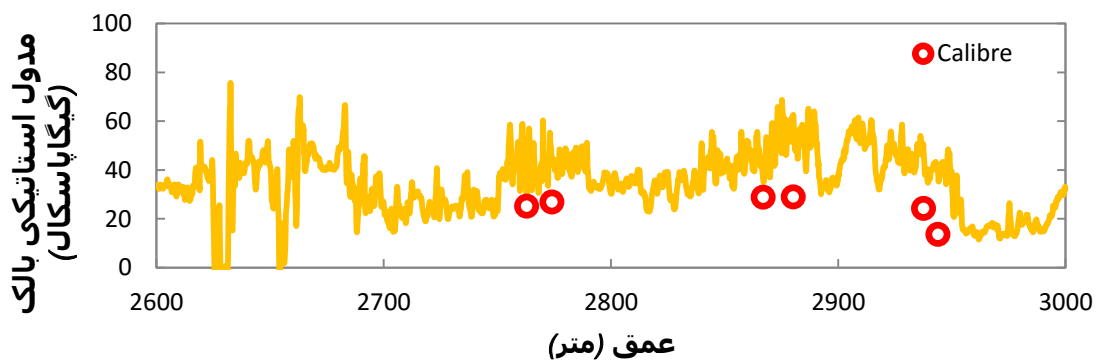
شکل ۴-۱۰: مدول استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Fjaer et al, 2008)



شکل ۴-۱۱: مدول استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Fjaer et al, 2008)

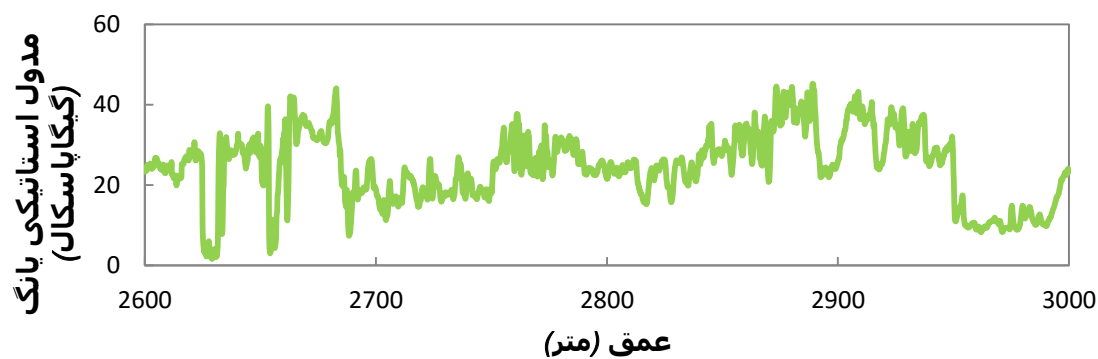


شکل ۴-۱۲: مدول استاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Wang, 2000)

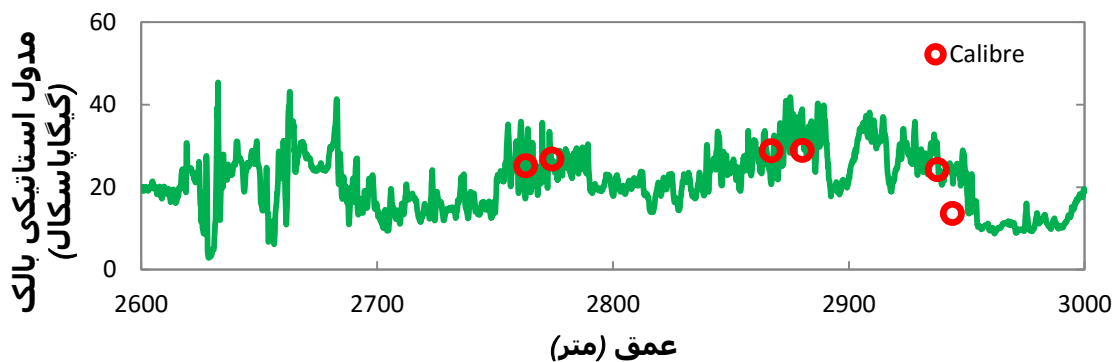


شکل ۴-۱۳: مدول استاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Wang, 2000)





شکل ۴-۱۴: مدول الاستاتیکی محاسبه شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Jambunathan, 2008)



شکل ۴-۱۵: مدول بالک الاستاتیکی کالیبره شده برای مخزن مورد نظر به کمک رابطه (Jambunathan, 2008)

در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۵ دواپر قرمز رنگ مدول بالک الاستاتیکی به دست آمده از آزمایش‌های هیدرواستاتیک روی نمونه مغزه در بازه مخزنی میدان مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج کالیبراسیون نشان می‌دهد که مدول بالک و یا به عبارت دیگر مدول یانگ الاستاتیکی حاصل از رابطه جامبسون در بین روابط ارائه شده مناسب‌ترین رابطه است.

#### ۴-۶- تعیین مقاومت فشاری تک محوره ( $UCS^1$ )

مقاومت فشاری تک محوره یکی از پارامترهای اصلی در ارزیابی پایداری دیواره چاه با توجه به شکستگی‌های درون چاهی می‌باشد. این پارامتر از طریق آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در آزمایشگاه تعیین می‌شود. این در حالی است که به دلیل اهمیت بالای مغزه و هزینه بسیار بالای برداشت آن، نمونه‌های مغزه عموماً به صورت محدود برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی موجود

<sup>1</sup> - Uniaxial Compressive Strength

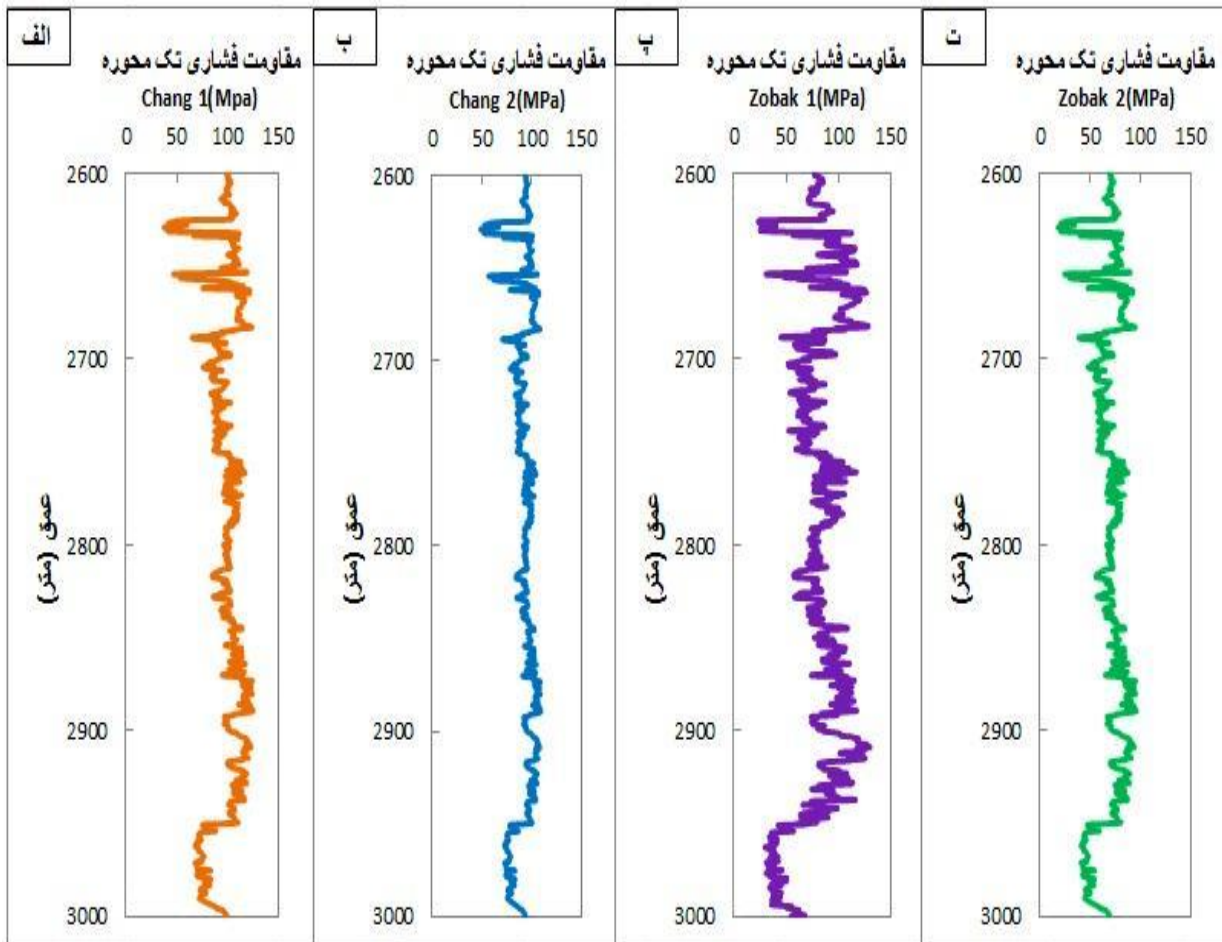
هستند. بنابراین، بهترین راه حل، استفاده از روابط تجربی برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره و استفاده از نمونه‌های مغزه برای کالیبراسیون آنها می‌باشد. این روابط تجربی با ایجاد ارتباط میان مقاومت فشاری و دیگر پارامترهای فیزیکی از جمله تخلخل، سرعت موج، دانسیته و مدول یانگ، به پیش بینی این پارامتر می‌پردازند. این در حالی است که هر یک از روابط ارائه شده برای مناطق با زمین‌شناسی مختلف متفاوت هستند. جدول ۲-۴ تعدادی از روابط تجربی ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره سازند را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴: روابط تجربی مقاومت فشاری تک محوره و پارامترهای دیگر فیزیکی

$UCS$  (Mpa),  $E$  (Mpa),  $\phi$  (%),  $V_p$  (m/s)

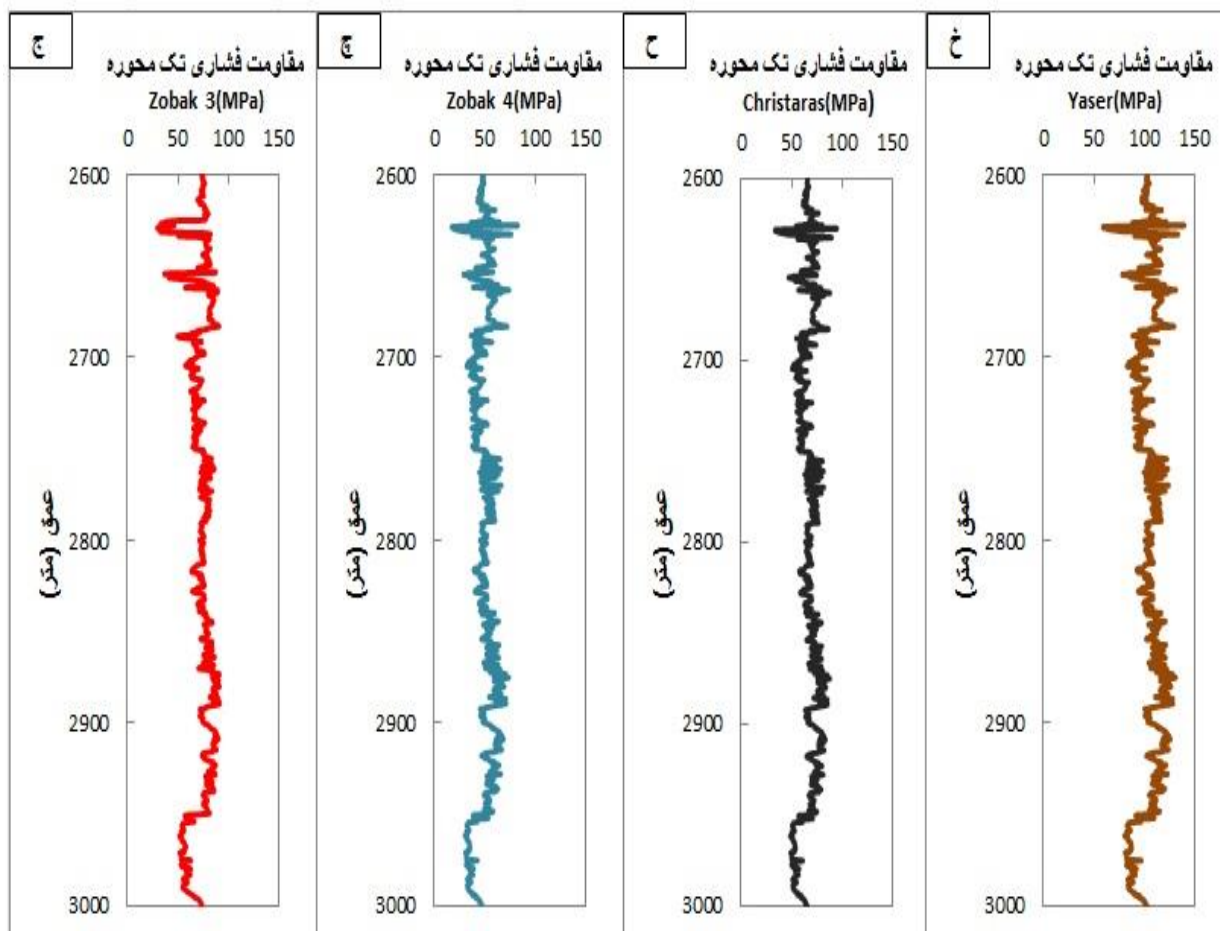
مرجع	نوع سنگ	مقاومت فشاری تک محوره	رابطه
(Chang et al, 2006)	سنگ آهک		$UCS = 13.8E^{0.51}$ (۱۷-۴)
(Chang et al, 2006)	سنگ آهک، کربناته		$UCS = 25.1E^{0.34}$ (۱۸-۴)
(Zoback, 2007)	سنگ‌های کربناته		$UCS = 135.9 \exp(-4.8\phi)$ (۱۹-۴)
(Zoback, 2007)	سنگ آهک		$UCS = 0.4067E^{0.54}$ (۲۰-۴)
(Zoback, 2007)	سنگ‌های کربناته		$UCS = 2.4E^{0.36}$ (۲۱-۴)
(Zoback, 2007)	سنگ‌های کربناته		$UCS = 0.4067E^{0.51}$ (۲۲-۴)
(Christaras et al, 1993)	سنگ‌های آهک، مارن، دولومیت، ماسه سنگ		$UCS = 9.9V_p^{1.21}$ (۲۳-۴)
(Yaser and Erdogan, 2004)	سنگ‌های آهک، دولومیت، بازالت، تراورتن، ماسه سنگ		$UCS = 21.677V_p + 0.0648$ (۲۴-۴)

شکل‌های ۱۶-۴ و ۱۷-۴ نتایج محاسبه مقاومت فشاری تک محوره در بازه مخزنی مورد نظر با استفاده از روابط تجربی اشاره شده در جدول بالا را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که در جدول ۲-۴ بیشتر سعی شده از روابطی استفاده شود که با سازند مورد بررسی در میدان حاضر همخوانی داشته باشد.



شکل ۴-۱۶: نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده سنگ مخزن الف: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۱۷)، ب: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۱۸)، پ: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۱۹)، ت: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۲۰).

همان‌طور که بیان شد، مقادیر محاسبه شده برای مقاومت فشاری تک محوره به کمک روابط تجربی ارائه شده نیاز به کالیبراسیون دارند ولی از آنجایی که مغزه‌ای جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره تهیه نشده است، بنابراین مقادیر مختلف محاسبه شده در پیش‌بینی میزان شکستگی برشی استفاده می‌شوند و در نهایت مقاومت فشاری تک محوره‌ای که بهترین نتیجه را ارائه کند، می‌تواند به عنوان مقاومت فشاری تک محوره مناسب در چاه مد نظر استفاده شود. با توجه به شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷، مقدار تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در چاه ۶ میدان آزادگان در فاصله ۵۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال متغیر است.



شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده سنگ مخزن، ج: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۲۱)، چ: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۲۲)، ح: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۲۳)، خ: مقاومت فشاری محاسبه شده توسط رابطه (۴-۲۴).

#### ۴-۷- برآورد تنش‌های اصلی برجا

مقدار و جهت تنش‌های اصلی برجا بدون شک از اصلی‌ترین عواملی هستند که بر پایداری چاه اثر به‌سزایی دارند. با در نظرگرفتن این فرض که سطوح بالایی لایه‌های تشکیل دهنده یک سازند رسوبی حالت صفحه‌ای داشته و امتدادی تقریباً افقی دارد، می‌توان گفت در یک مجموعه از سازندهای رسوبی، جهت مؤلفه‌های اصلی تنش‌های برجا در امتدادهای عمودی و افقی خواهد بود. مسلماً موارد متعددی مانند مناطق هم‌جوار منطقه‌های گسله، اطراف گنبد‌های نمکی و یا نواحی روراندگی وجود دارند که باعث منحرف شدن جهت تنش‌ها می‌شوند. متداول‌ترین روش برای برآورد

تنش‌های قائم در مناطقی که از لحاظ تکتونیکی وضعیت عادی دارند، محاسبه وزن طبقات فوقانی است. اما روش‌های غیرمستقیم و روابط تجربی متعددی به منظور برآورد میزان تنش‌های برجای افقی وجود دارند که هر یک با دقت متفاوتی به پیش‌بینی این تنش‌ها می‌پردازند. در ادامه چگونگی محاسبه تنش‌های افقی و عمودی در لایه‌های زیر سطحی ارائه خواهد شد.

#### ۴-۷-۱- تنش قائم

برآورد و اندازه‌گیری تنش‌های برجا فرآیندی بسیار پیچیده است چون هیچ روش شناخته شده‌ای وجود ندارد که در آن تنش‌های زیر سطحی به صورت دقیق محاسبه شده باشند. تنش برجای عمودی اصلی ( $S_V$ ) معمولاً به وزن روباره اطلاق می‌گردد و از طریق انتگرال‌گیری از چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق مورد نظر به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S_V = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (۲۵-۴)$$

که در آن  $\rho(z)$  چگالی توده سنگ در عمق  $z$ ،  $g$  شتاب گرانش و  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط لایه‌های سنگی می‌باشد. در صورت عدم وجود نگار چگالی در عمق مد نظر، می‌توان با استفاده از برون‌یابی نگار دانسیته یا از طریق نگارهای دیگر مقدار چگالی را تعیین نمود.

#### ۴-۷-۲- تنش افقی حداقل

یکی از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های افقی، شکستگی هیدرولیکی<sup>۱</sup> است. روش اندازه‌گیری تنش به کمک شکست هیدرولیکی معمولاً در گمانه عمودی کاربرد دارد. علاوه بر این فرض می‌شود که دیواره گمانه نفوذناپذیر است و سازند پیوسته، همگن، ایزوتروپ و الاستیک خطی است.

<sup>۱</sup> - Hydraulic Fracture

در چاه‌های عمیق، آزمون شکست هیدرولیکی امکان پذیر نیست بنابراین با توجه به شرایط حفاری، تست نشت<sup>۱</sup> (LOT) به طور معمول انجام می‌شود (Zoback et al, 2003). این آزمون پس از فرایند لوله‌گذاری درست چند متر زیر کفشک لوله جداری انجام می‌پذیرد. در این تست فشار گل نسبت به گذر زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد تا جایی که فشار به مقداری برسد که حجم کوچکی از گل به داخل سازند نشت کند. در نقطه شروع نشت (LOP) افزایش فشار چاه با گذشت زمان به صورت خطی کاهش می‌یابد. پس از رسیدن به نقطه شروع نشت (LOP) آزمایش متوقف می‌شود. شکل ۴-۱۸ منحنی آزمون نشتی را نشان می‌دهد. معمولاً نقطه LOP به عنوان حداقل تنش افقی ( $\sigma_h$ ) در نظر گرفته می‌شود.

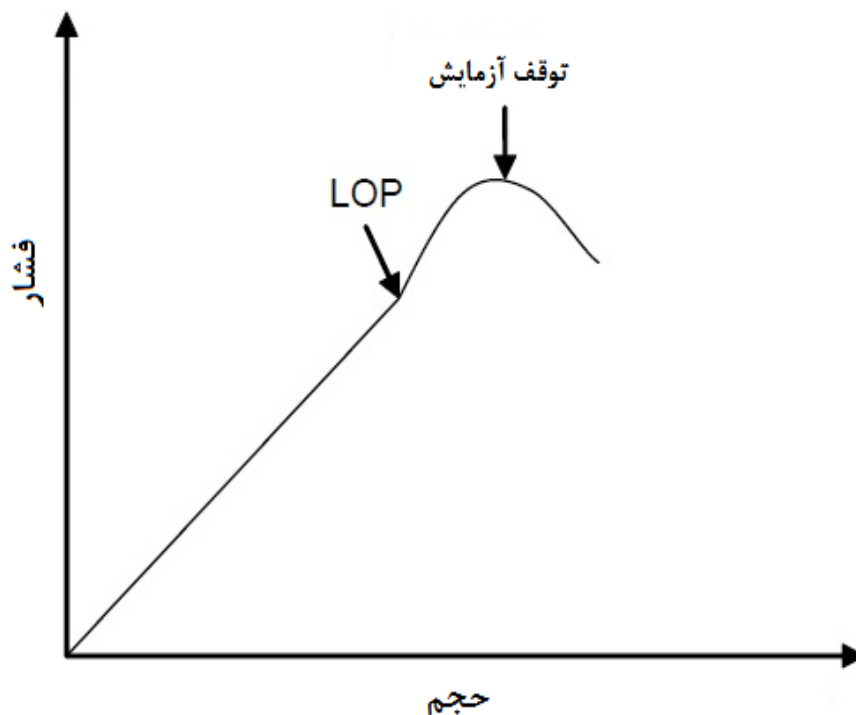
از آزمون ریز شکاف<sup>۲</sup> نیز جهت تعیین تنش افقی حداقل استفاده می‌شود. این روش شامل تزریق تقریباً یک متر مکعب از سیال با ویسکوزیته کم به طور آرام از لوله جداری سوراخ شده یا در یک چاه باز و ایجاد یک شکستگی هیدرولیکی در یک بازه کوتاه و مسدود از چاه می‌باشد. در حین آزمایش ترک ایجاد شده چندین بار باز و بسته می‌شود طوری که کاهش فشار به صورت متوالی کنترل می‌شود تا زمانی که فشار انسداد ثابتی به دست آید. این فشار تنش حداقل افقی می‌باشد.

در آزمایش دیگری که آزمون شکاف‌های کوچک<sup>۳</sup> نام دارد، شکستگی‌های از قبل موجود را تحریک می‌کنند. در حالت کلی این آزمایش شامل تزریق با فشار بالا بیشتر از ده مترمکعب از سیال ویسکوز می‌باشد. در این حالت نیز تنش افقی حداقل برابر با فشار انسداد ترک می‌باشد که از ثبت منحنی فشار- زمان به دست می‌آید. آزمایش شکاف کوچک در بازه بزرگ‌تری نسبت به آزمایش ریز شکاف انجام می‌گیرد.

<sup>۱</sup> - Leak off Test

<sup>۲</sup> - Micro Fracture Test

<sup>۳</sup> - Mini Fracture Test



شکل ۴-۱۸: نمودار تیپیک آزمون نشتی (Al-Ajmi, 2006).

برکیلز و ون ایکلن (Breckels and Van Eekelen, 1982) از داده‌های آزمایش شکست هیدرولیکی استفاده کرده و رابطه‌ای میان تنش افقی حداقل و عمق به دست آوردند که به صورت زیر می‌باشد.

$$\sigma_h = 0.0053D^{1.145} + 0.46(P_p - P_{pn}) \quad D < 3500m \quad (26-4)$$

$$\sigma_h = 0.0264D - 31.7 + 0.46(P_p - P_{pn}) \quad D > 3500m \quad (27-4)$$

که در آنها،  $D$  عمق بر حسب متر،  $P_p$  فشار منفذی،  $P_{pn}$  فشار منفذی نرمال و  $\sigma_h$  مقدار تنش افقی حداقل بر حسب مگاپاسکال هستند.

یکی از روابط بسیار رایج برای محاسبه مقدار تنش افقی حداقل، رابطه تجربی پوروالاستیک<sup>۱</sup> می‌باشد. در این رابطه از فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکتونیک استفاده شده است (Zoback, 2007).

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_h}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \varepsilon_H}{1-\nu^2} \quad (28-4)$$

<sup>۱</sup> - Poroelastic

که در آن،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $\nu$  نسبت پواسون،  $P_p$  فشار منفذی،  $\varepsilon_H$  و  $\varepsilon_h$  کرنش در جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل می‌باشند که در مطالعه حاضر به ترتیب برابر ۱ و ۰/۵ خواهند بود.

هابرت و ویلیز (Hubbert and Willis, 1957) بر اساس مقادیر فشار منفذی ( $P_p$ ) و تنش قائم حاصل از روباره ( $\sigma_v$ ) رابطه‌ای برای تعیین مقدار حداقل تنش افقی (بر اساس داده‌های شکست هیدرولیکی) در یکی از نواحی مکزیک به صورت زیر ارائه کردند:

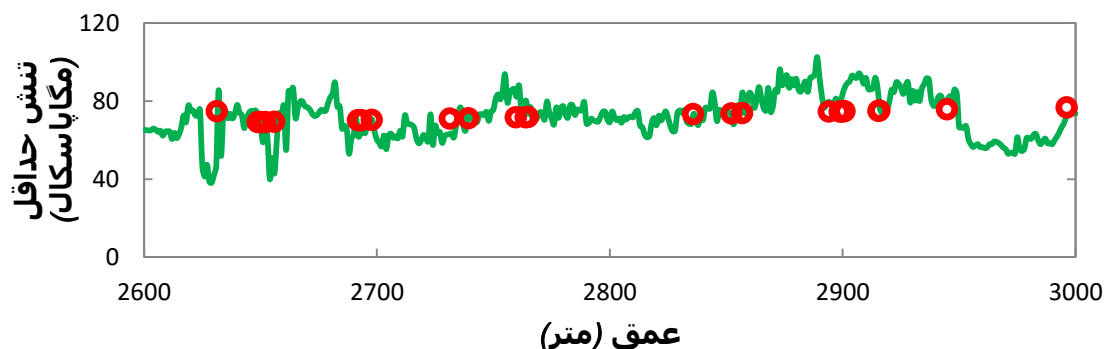
$$\sigma_h = 0.3(\sigma_v - P_p) + P_p \quad (29-4)$$

که در آن ثابت ۰/۳ به صورت تجربی از طریق آنالیز حاصل از داده‌های شکست هیدرولیکی به دست آمده است. بعد از پردازش اولیه مقادیر پیش‌بینی شده، بار دیگر این رابطه مورد بازبینی قرار گرفته شد و مقدار تصحیح شده ۰/۳ به ۰/۵ تصحیح شده است.

ایتون (Eaton, 1969) رابطه‌ای را بر اساس مقدار نسبت پواسون، تنش روباره و فشار منفذی برای تعیین مقدار حداقل تنش افقی ارائه کرده است که به صورت زیر می‌باشد:

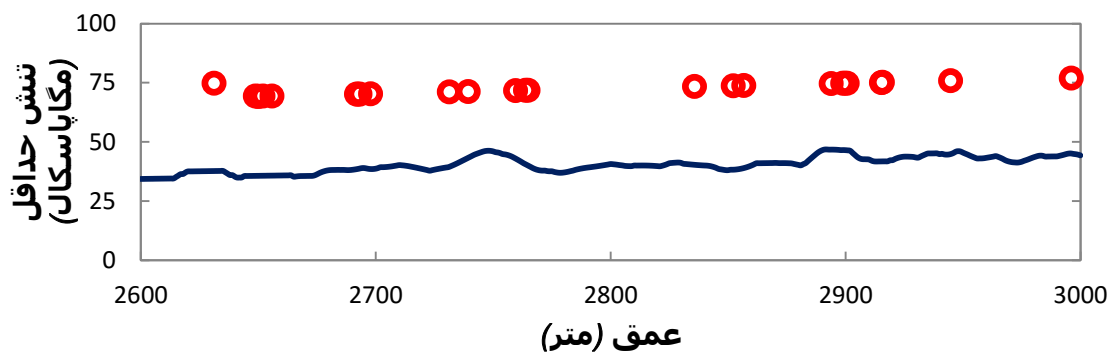
$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - P_p) + P_p \quad (30-4)$$

در میان روابط ذکر شده رابطه تجربی پوروالاستیک بیشترین کاربرد را برای تعیین تنش افقی حداقل دارد. البته باید مقادیر محاسبه شده به کمک داده‌های تست نشت و ریز شکاف کالیبره شوند. در این تحقیق از داده‌های تست نشت جهت کالیبراسیون استفاده شده است. شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۱ تنش افقی حداقل در منطقه مورد مطالعه به دست آمده به کمک روابط تجربی را نشان می‌دهد.

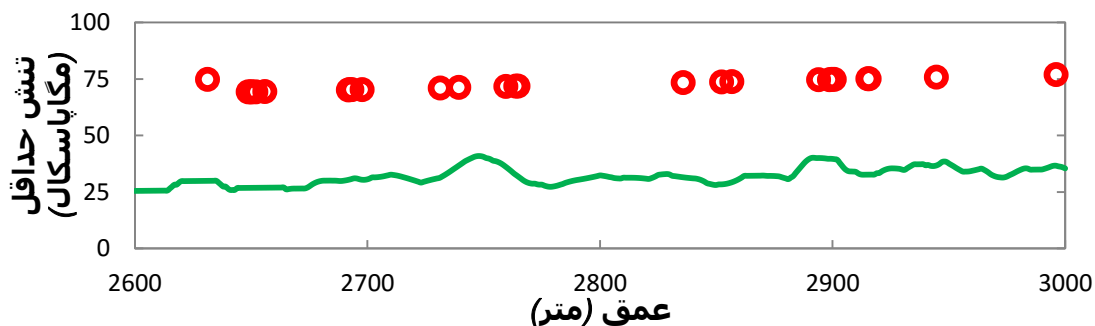


شکل ۴-۱۹: تنش افقی حداقل محاسبه شده در چاه ۶ میدان آزادگان توسط رابطه تجربی پوروالاستیک که توسط داده‌های تست نشت (دوایر قرمز) کالیبره شده است.





شکل ۴-۲۰: تنش افقی حداقل محاسبه شده در چاه ۶ میدان آزادگان توسط رابطه تجربی (Hubbert and Willis, 1957)، که توسط داده‌های تست نشت (دوایر قرمز) کالیبره شده است.



شکل ۴-۲۱: تنش افقی حداقل محاسبه شده در چاه ۶ میدان آزادگان توسط رابطه تجربی (Eaton, 1969)، که توسط داده‌های تست نشت (دوایر قرمز) کالیبره شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۱ نشان داده شده است، مدل به دست آمده از رابطه تجربی پوروالاستیک (رابطه ۴-۲۸) به خوبی توانسته به پیش‌بینی تغییرات تنش افقی حداقل در منطقه مورد مطالعه بپردازد.

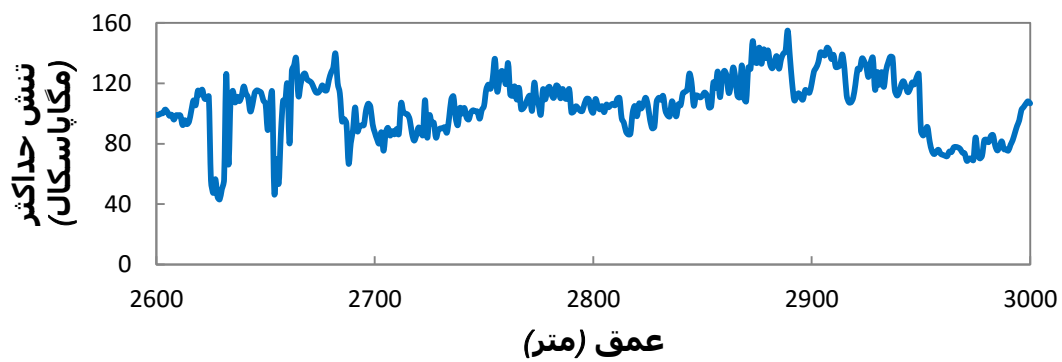
#### ۴-۷-۳- تنش افقی حداکثر

روند کلی همه‌ی روش‌های تعیین تنش برجا به این ترتیب است که پس از تعیین مقدار تنش-های قائم، افقی حداقل و فشار منفذی مقدار تنش حداکثر افقی تعیین می‌شود. بعد از تعیین تنش افقی حداقل به کمک رابطه پوروالاستیک در چاه ۶ میدان آزادگان و کالیبراسیون آن با داده‌های

تست نشت، تنش افقی حداکثر به کمک رابطه تجربی زیر محاسبه شد. در این رابطه، از فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکتونیکی استفاده شده است (Zoback, 2007).

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_H}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \varepsilon_h}{1-\nu^2} \quad (31-4)$$

که در آن،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $\nu$  نسبت پواسون،  $P_p$  فشار منفذی،  $\varepsilon_H$  و  $\varepsilon_h$  کرنش در جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل می‌باشند. شکل ۴-۲۲ تنش افقی حداکثر که توسط رابطه تجربی پوروالاستیک محاسبه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۲: تنش افقی حداکثر محاسبه شده توسط رابطه تجربی پوروالاستیک (۳۱-۴) برای چاه ۶ میدان آزادگان

#### ۴-۸- فشار منفذی

فشار سیال منفذی یکی از پارامترهای مهم در بحث حفاری، تحلیل‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی است و می‌توان آن را فشار سیال موجود در خلل و فرج سازندهای متخلخل تعریف کرد. فشار سیال منفذی در سازندهای رسوبی عموماً از فشار هیدرواستاتیک بیشتر است. عدم اطلاع از این فشار در لایه‌های مختلف، قبل از حفاری، سبب ایجاد خطرات جدی مالی و صدمات جانی خواهد شد. اطلاع از مقدار این کمیت در نقاط مختلف میدان و چاه مورد نظر، باعث کاهش چشم‌گیر خطرات حفاری نظیر تولید ماسه و بهبود طراحی چاه، طراحی وزن بهینه گل و تعیین نقاط نصب لوله جداری در چاه می‌گردد. در اکثر کارهای مهندسی حفاری، از گرادیان فشار منفذی بجای فشار منفذی استفاده می‌شود چون در زمان محاسبه وزن گل حفاری، بیشتر با گرادیان فشار منفذی سروکار داریم.

روش‌های بسیاری جهت پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی ارائه شده‌اند که عموماً شامل روش‌های تجربی با استفاده از نگارهای چاه می‌باشند. این روش‌ها شامل پیش‌بینی فشار منفذی سازندهای زیرزمینی با استفاده از نگارهای مقاومت‌ویژه و صوتی است (Zhang, 2011).

#### ۴-۸-۱- تعیین فشار منفذی با استفاده از نگار صوتی

ایتون (Eaton, 1975)، معادله‌ای تجربی برای پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی ارائه کرده است که در آن از نگار صوتی استفاده شده است. این رابطه به صورت زیر می‌باشد.

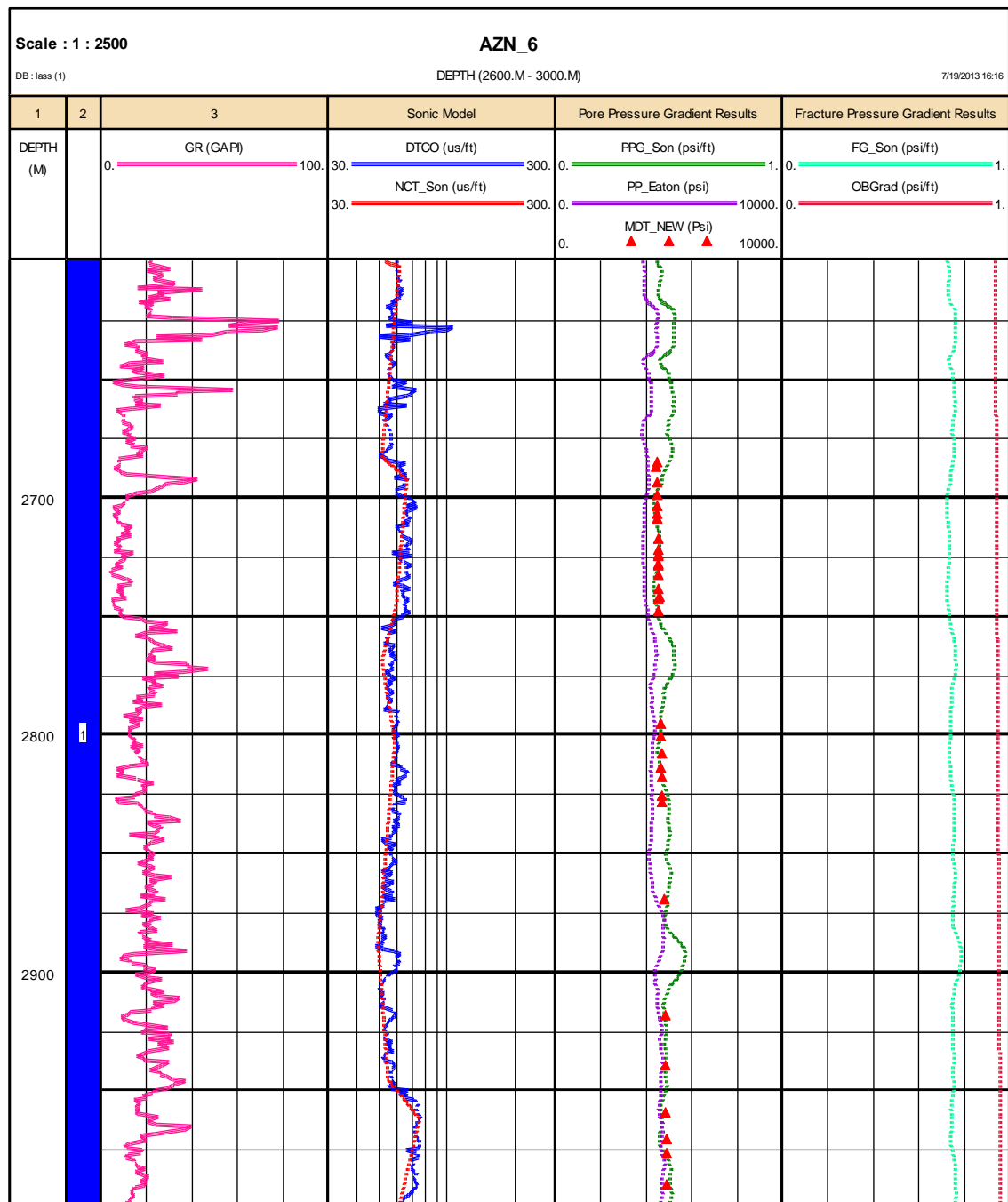
$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left( \frac{NCT}{\Delta t} \right)^3 \quad (۴-۳۲)$$

که در آن،  $P_{pg}$  گرادیان فشار منفذی سازنده؛  $P_{ng}$  گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیکی (۰/۴۵ psi/ft)؛  $OBG$  گرادیان تنش روباره و  $NCT$  زمان گذر امواج صوتی یا کندی امواج تحت فشار نرمال است که از طریق برازش منحنی بر زمان عبور موج فشاری به دست می‌آید در حالی که  $\Delta t$  زمان گذر امواج صوتی به دست آمده از نگار صوتی است. رابطه ایتون یکی از متداول‌ترین روابط برای پیش‌بینی فشار منفذی می‌باشد. البته استفاده از این رابطه به معنای صحیح بودن مقدار فشار منفذی به دست آمده نیست و نیاز به کالیبره شدن با داده‌های آزمایش فشار منفذی واقعی سازند که با ابزار MDT به دست می‌آید، دارد. بنابراین عموماً سعی می‌شود بعد از محاسبه فشار منفذی توسط نگار صوتی، مدل به دست آمده به کمک داده‌های MDT کالیبره شوند.

شکل ۴-۲۳ مقدار فشار منفذی و گرادیان فشار منفذی پیش‌بینی شده از طریق رابطه ۴-۳۲ را نشان می‌دهد. در این شکل مدل NCT-Son و مقدار فشار منفذی پیش‌بینی شده از رابطه ایتون (PP-Son) نشان داده شده است. بعد از کالیبراسیون نگار فشار منفذی با استفاده از داده‌های MDT می‌توان گفت که رابطه ایتون در پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از نگار صوتی عملکرد مناسبی داشته است. در ستون آخر شکل ۴-۲۳ مقدار گرادیان تنش روباره و گرادیان فشار شکست نشان داده

<sup>1</sup> -Normal Compacted Trend Line

شده است. به فشار مورد نیاز جهت گسیختگی سازند که نهایتاً باعث هرزروی گل می‌شود، فشار شکستگی می‌گویند. گرادیان فشار از تقسیم عمق واقعی عمودی (TVD<sup>1</sup>) بر فشار شکستگی بدست می‌آید. به عبارت دیگر، به ماکزیمم وزن گل حفاری گرادیان شکستگی می‌گویند.



شکل ۴-۲۳: فشار منفذی به دست آمده از رابطه ایتون با استفاده از نگار صوتی در چاه ۶ میدان آزادگان

<sup>1</sup> - Total vertical depth (TVD)

## ۴-۸-۲- تعیین فشار منفذی با استفاده از نگار مقاومت ویژه

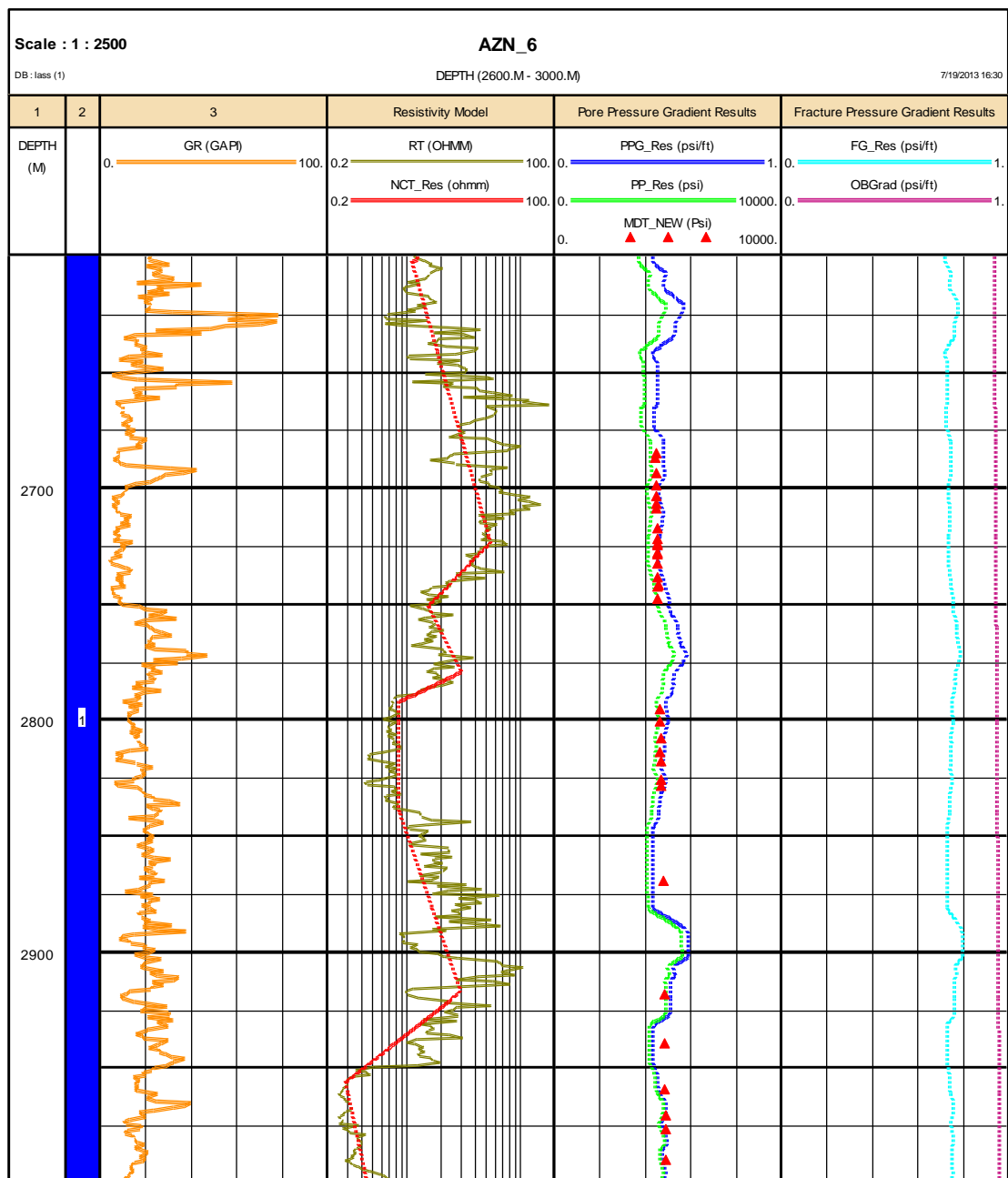
فشار منفذی حوضه‌های رسوبی جوانی که متراکم شده‌اند، با استفاده از نگار مقاومت ویژه قابل محاسبه است. ایتون (Eaton, 1975) معادله زیر را جهت تعیین گرادیان فشار منفذی ارائه کرده است:

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{R}{R_n}\right)^n \quad (۳۳-۴)$$

که در آن،  $P_{pg}$  گرادیان فشار منفذی سازند؛  $OBG$  گرادیان تنش روباره؛  $P_{ng}$  گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک؛  $R$  مقاومت ویژه سازند که از نگار چاه بدست آمده است و  $R_n$  مقاومت ویژه در فشار نرمال است.

شکل ۴-۲۴ فشار منفذی پیش‌بینی شده از رابطه ایتون با استفاده از نگار مقاومت ویژه را نشان می‌دهد. هنگام استفاده از نگار مقاومت ویژه (RT) ابتدا این نگار نرمال گردیده (NCT-Res) یعنی رابطه بین تغییرات این نگار و تغییرات عمق هنگامی که نگار مقاومت ویژه دارای تغییرات عمقی متفاوتی بوده تعیین گردیده است. در نهایت مقدار فشار منفذی به دست آمده از این رابطه با داده‌های MDT کالیبره گردیده است

بعد از کالیبراسیون با توجه به مدل ساخته شده می‌توان نتیجه گرفت که رابطه ایتون در پیش-بینی فشار منفذی از نگار مقاومت ویژه نسبت به نگار صوتی برای چاه مورد مطالعه عملکرد مناسبی نداشته است که می‌تواند به دلیل بازه نوسانات زیاد آن باشد. در انتها در ستون آخر این شکل مقدار گرادیان تنش روباره و گرادیان فشار شکستگی‌ها (FG-Res) نشان داده شده است. با مقایسه گرادیان فشار شکستگی‌ها در شکل‌های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ می‌توان به این نتایج دست یافت که تغییرات گرادیان فشار شکستگی برای نگار مقاومت ویژه بیشتر از نگار حاصل از امواج صوتی بوده است. همچنین مقادیر گرادیان فشار شکستگی حاصل از نگار مقاومت ویژه بیشتر از نگار صوتی می‌باشد.



شکل ۴-۲۴: فشار منفذی بدست آمده از رابطه ایتون با استفاده از نگار مقاومت ویژه RT در چاه ۶

در نهایت بر اساس روابط و مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی فشار منفذی می‌توان گفت رابطه ایتون که بر اساس نگار صوتی و همین‌طور نگار مقاومت ویژه بدست آمده، در پیش‌بینی فشار منفذی جزء منطقی‌ترین رابطه‌ها می‌باشند. یکی از دلایل برتری این رابطه‌ها نسبت به دیگر روابط ارائه شده، استفاده از پارامترهایی است که عموماً به تغییرات فشار منفذی سازند وابسته هستند.

## ۴-۹- نتیجه گیری

همان طور که بیان شده تعیین خواص مکانیکی سازندهای زیر سطحی می تواند به کمک نگارهای درون چاهی انجام شود. تعیین مدولهای الاستیک، مقاومت فشاری تک محوره، تنشهای اصلی و فشار منفذی و همین طور کالیبره نمودن آنها جهت بررسی پایداری دیواره چاه و پتانسیل تولید ماسه بسیار ضروری می باشد. زیرا بر اساس آنها می توان پتانسیل تولید ماسه سازند را ارزیابی نمود. بنابراین ابتدا با استفاده از نگارهای صوتی و چگالی به تخمین پارامترهای الاستیک سنگ پرداختیم. همان طور که بیان شد مدولهای یانگ محاسبه شده با مقدار مدول یانگ حاصل از اندازه گیری های استاتیکی یکسان نیستند. بنابراین به تعیین مدول یانگ استاتیکی به کمک روابط تجربی پرداختیم. از آنجا که در این مطالعه آزمایش های برجای ضریب تراکم پذیری نمونه سنگ های مختلف در بازه مخزنی محاسبه شده است لذا سعی شده با استفاده از آن به کالیبراسیون مدول بالک استاتیکی پردازیم. از میان روابط تجربی مختلفی که در این مطالعه برای تعیین مدول یانگ استاتیکی ارائه شده یعنی کینگ (۱۹۸۳)، عیسی و کزی (۱۹۸۸)، فجائر (۲۰۰۸)، وانگ (۲۰۰۰) و جامبسون (۲۰۰۸)، رابطه جامبسون بهترین نتیجه را ارائه نمود. در ادامه به تعیین مقاومت فشاری تک محوره پرداختیم، باید توجه داشت مقادیر محاسبه شده مقاومت فشاری تک محوره به کمک روابط تجربی ارائه شده نظیر چانگ (۲۰۰۶)، زویاک (۲۰۰۷)، کریستاس (۱۹۹۷) و یاسر و اردوغان (۲۰۰۴)، نیاز به کالیبراسیون دارند ولی از آنجایی که مغزه ای جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره تهیه نشده است بنابراین باید از مقادیر مختلف محاسبه شده در پیش بینی میزان شکستگی برشی استفاده کرد و مقاومت فشاری تک محوره ای که بهترین نتیجه را می دهد می توان به عنوان مقاومت فشاری تک محوره مناسب در این چاه ارائه شده است.

علاوه بر پارامترهای الاستیکی، فشار منفذی هم یکی از مهم ترین پارامترهای موثر در فرایندهای ژئومکانیکی می باشد. در میان روابط ذکر شده رابطه ایتون یکی از متداول ترین روابط برای پیش بینی فشار منفذی می باشد. بنابراین در این تحقیق از نگار صوتی و مقاومت ویژه جهت پیش بینی فشار

منفذی استفاده شد و در نهایت با تعیین و کالیبراسیون فشار منفذی چاه ۶ میدان آزادگان به کمک داده‌های MDT مشخص شد، رابطه ایتونی که در آن از نگار صوتی استفاده شده (رابطه ۴-۳۲) نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است. بعد از تعیین پارامترهای پتروفیزیکی و فشار منفذی مقدار تنش‌های وارده به اطراف چاه تعیین شد. از میان روابط ذکر شده در این مطالعه یعنی زوباک (۲۰۰۷)، هابرت و ویلیز (۱۹۵۷) و ایتون (۱۹۶۹)، رابطه پوروالاستیکی که توسط زوباک ارائه شده بهترین عملکرد را در تعیین تنش افقی حداقل و حداکثر داشته است. البته در این تحقیق از داده‌های تست نشت جهت کالیبراسیون تنش افقی حداقل استفاده شده است. با داشتن چنین اطلاعاتی می‌توان بعد از تعیین پارامترهای موثر در ماسه‌دهی چاه، از معیارهای شکست برای ارزیابی شکست کششی و برشی استفاده نمود که قدم اول در تولید ماسه می‌باشد. پس از این مرحله چگونگی کنترل و پیش‌گیری تولید ماسه بسیار حائز اهمیت هستند که در فصل‌های آینده در مورد آن‌ها صحبت خواهد شد.



فصل پنجم

پارامترهای موثر در ماسه‌دهی و

مدل مکانیکی زمین

## ۵-۱- مقدمه

با توجه به مطالب ذکر شده در فصول قبلی، در این فصل ابتدا روابط متقابل میان پارامترهای موثر در رخدادهای تولید ماسه در قالب ماتریس اندرکنش و سیستم مهندسی سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه پتانسیل تولید ماسه در قالب مدل‌سازی مکانیکی زمین ارزیابی می‌شود و چگونگی کاهش و پیش‌گیری از آن ارائه خواهد شد.

## ۵-۲- شاخص پتانسیل تولید ماسه

سیستم مهندسی سنگ هادسون (۱۹۹۲)، بیشتر به بیان مشکلات ژئومکانیکی مربوط به مهندسی معدن و عمران می‌پردازد. همانطور که در فصل سوم اشاره شده است یکی از مهم‌ترین اهداف سیستم مهندسی سنگ، بررسی ارتباط داخلی اندرکنش میان پارامترهای موثر در پروژه‌های مهندسی سنگ است. جهت بررسی و مطالعه‌ی پتانسیل تولید ماسه در چاه و حفرات تولید مراحل زیر انجام می‌شود (Younessi and Rasouli, 2010).

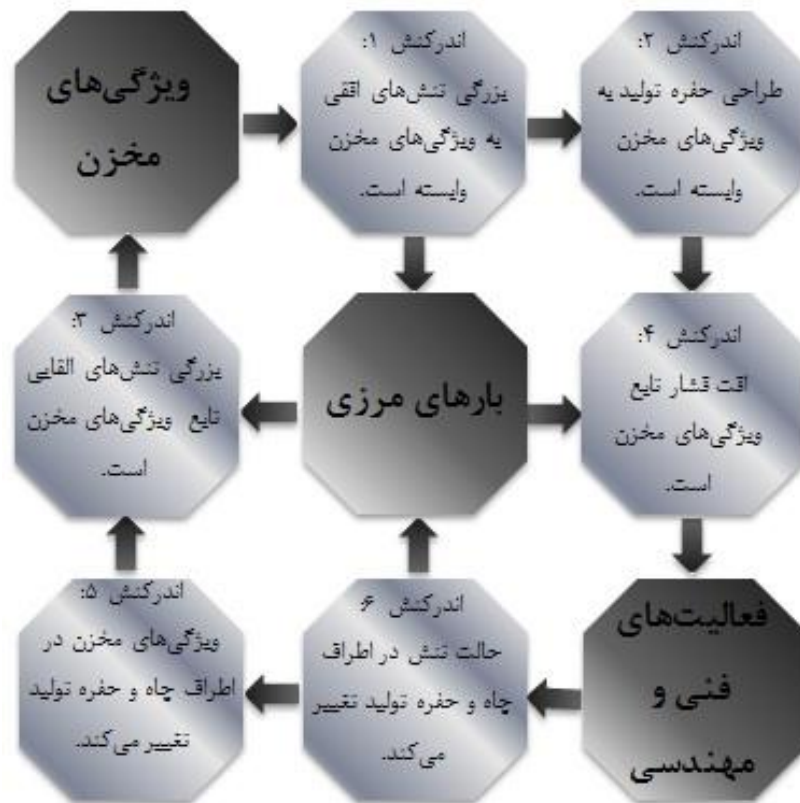
در مرحله اول، پارامترهای مختلف موثر در فرایند تولید ماسه درون چاه و حفرات تولید تعیین می‌شوند. ابتدا با یک مفهوم ساده، از یک ماتریس با چگالی کم شروع می‌کنیم. برای انجام این کار از ۳ پارامتر اصلی موثر در فرایند تولید ماسه: ویژگی‌های مخزن، بارهای مرزی و فعالیت‌های فنی و مهندسی برای معرفی همه مکانیزم‌های گسیختگی محتمل استفاده شده است. دو پارامتر اول را می‌توان به عنوان پارامترهای مکانیک سنگی در نظر گرفت. اگر اندرکنش این دو پارامتر با پارامتر سوم (فعالیت‌های فنی و مهندسی)، به‌طور همزمان بررسی شود می‌توان به مفهوم مهندسی سنگ در ارتباط با ماسه‌دهی سازند پی برد. اندرکنش میان سه پارامتر موثر در شروع تولید ماسه یعنی مشخصات مخزن، بارهای مرزی و فعالیت‌های فنی و مهندسی در شکل ۵-۱ نشان داده شده است که در ادامه به‌طور مختصر شرح داده می‌شوند.

- اندرکنش ۱ (ویژگی‌های مخزن / بارهای مرزی): بزرگی اندازه تنش افقی به ویژگی‌های مخزن وابسته است.
- اندرکنش ۲ (ویژگی‌های مخزن / فعالیت‌های فنی و مهندسی): طراحی چاه به ویژگی‌های مخزن بستگی دارد.
- اندرکنش ۳ (بارهای مرزی / ویژگی‌های مخزن): القاء تنش باعث تغییرات در ویژگی‌های مخزن می‌شود.
- اندرکنش ۴ (بارهای مرزی / فعالیت‌های فنی و مهندسی): افت فشار در چاه تابع ویژگی‌های مخزن است.
- اندرکنش ۵ (فعالیت‌های فنی و مهندسی / ویژگی‌های مخزن): ویژگی‌های مخزن در اطراف چاه و حفره تولید تغییر می‌کند.
- اندرکنش ۶ (فعالیت‌های فنی و مهندسی / بارهای مرزی): شرایط تنش در اطراف چاه متغیر است.

در ادامه این اندرکنش‌ها و پارامترهای موثر در آن‌ها مورد بحث و بررسی بیشتری قرار گرفته‌اند.

## ۵-۲-۱- ویژگی‌های مخزن

شناخت خواص پتروفیزیکی و مکانیکی سازند برای پیش‌بینی ماسه ده بودن یا نبودن آن امری ضروری بشمار می‌آید. با شناخت این پارامترها که بطور مختصر شرح داده می‌شود می‌توان رفتار سازند تحت تنش‌های مختلف را بهتر مورد بررسی قرار داد.



شکل ۵-۱: اندرکنش میان پارامترهای موثر در شروع تولید ماسه یعنی ویژگی‌های مخزن، بار مرزی و فعالیت‌های فنی و مهندسی (Atrer Younessi and Rasouli, 2010)

### الف- خواص پتروفیزیکی سازند

تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی است که اثر قابل توجهی بر شروع ماسه‌دهی چاه دارد. از دیگر پارامترهای پتروفیزیکی می‌توان به قابلیت نفوذپذیری و چگالی سازند اشاره کرد. برای مثال چگالی سازند با تنش برجا متناسب است یا نفوذپذیری سازند با میزان تخلخل متناسب است. هرچه تخلخل بیشتر باشد بی‌ثباتی و گسیختگی سازند بیشتر می‌شود (Abbas et al, 2003).

### ب- خواص مکانیکی سنگ

این خواص بوسیله مدول‌های تغییر شکل و خواص استحکامی سازند تعیین می‌شوند. علاوه بر آن مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی از مهم‌ترین پارامترهایی هستند

که در مطالعه پتانسیل تولید ماسه نقش مهمی را ایفا می‌کنند. شروع گسیختگی در چاه و حفره موجود در دیواره منطقه تولید به مقاومت مکانیکی سازند وابسته است (Tronvoll and Fjaer, 1994).

### ج - خواص سیال درون سازند

اگر نیروهای نگهدارنده‌ی بین دانه‌ها از بین برود، این دانه‌های جدا شده از سنگ مخزن، به حرکت در می‌آیند و توسط سیال درون چاه و حفره موجود در دیواره منطقه تولید به دهانه چاه جریان می‌یابد. بزرگی نیروی حرکتی سیال باعث فرسایش سازندهای ماسه‌ای ضعیف می‌شود. نیروی حرکتی سیال با نرخ جریان و ویسکوزیته سیال رابطه مستقیم دارد. نازل آب یا گلوگاه حفره‌ای در طول مسیر نیز اثر شدیدی بر گسیختگی ذرات ماسه درون چاه و حفره موجود در دیواره منطقه تولید دارد ( Wu et al, 2006).

### ۵-۲-۲- بارهای مرزی

یکی از دلایل اصلی شروع فرایند گسیختگی ماسه، تمرکز تنش و وارفتگی سازند در طول فرایند تزریق و تولید است. وقتی میزان تمرکز تنش و وارفتگی سازند از استحکام سازند تجاوز کند گسیختگی رخ خواهد داد. صرف نظر از حالت تنش، با توجه به ساختار و سیال درون محیط متخلخل تنش‌های وارده به دو دسته تقسیم می‌شوند: تنش‌هایی که به ماتریکس سازند اعمال می‌شود (مانند تنش موثر) و تنش‌هایی که به سیال درون محیط متخلخل سازند اعمال می‌شود، مانند فشار منفذی (Younessi and Rasouli, 2010).

### الف - تنش برجا

حالت تنش در یک میدان با استفاده از جهت و بزرگی آن مشخص می‌شود. در مطالعات ژئومکانیکی معمولاً یک تنش عمودی و دو تنش افقی وجود دارد. تنش عمودی اصلی، به علت وزن

لایه‌های روباره است و تنش‌های افقی ناشی از کرنش جانبی و عوامل تکتونیکی سازند خواهد بود. هرچند، حالات اصلی تنش با درک جهات و بزرگی سه تنش اصلی امکان پذیر خواهد بود (Addis et al, 1994).

### ب- فشار مخزن

معمولاً در اعماق کم تا زمانی که منافذ یا شکستگی‌ها با یکدیگر مرتبط هستند میزان نفوذپذیری سازند بالا است. به فشار هیدرواستاتیک ستون آب بالای عمق مورد مطالعه فشار منفذی می‌گویند. این وضعیت در اعماق زمین تغییر می‌کند. برای مثال: بخش مخزن که معمولاً چند صد متر زیر زمین قرار می‌گیرد توسط لایه‌های بالایی و پایینی تحت فشار قرار می‌گیرد. شروع فرایند تولید ماسه به فشار مخزن و تغییر فشار سیال در طول زمان بستگی دارد (Younessi and Rasouli, 2010).

### ۵-۲-۳- فعالیت‌های فنی و مهندسی

فعالیت‌های فنی و مهندسی نیز تا حدود زیادی باعث برهم زدن تعادل تنش در زمین می‌شوند. در ذیل به تعدادی از این فعالیت‌ها اشاره شده است:

#### الف- ابعاد و هندسه چاه و حفرات موجود در دیواره منطقه تولید

هندسه و بُعد چاه و حفره موجود در دیواره منطقه تولید به نوع مواد منفجره بکار رفته وابسته است. هرچقدر حفرات تولید شده بوسیله این مواد منفجره کوچکتر باشد ثبات بیشتری دارد. علاوه بر مواد منفجره می‌توان از دستگاه با عمق نفوذ زیاد<sup>۱</sup> نیز برای حفر حفرات کوچک استفاده کرد (Venkitaraman et al, 2000).

<sup>۱</sup>- Deep penetrating

### ب- جهت و زاویه بین حفرات موجود در دیواره منطقه تولید

منطقه شکست در اطراف حفره موجود در دیواره منطقه تولید ممکن است گسترش یابد و باعث بی‌ثباتی مناطق نزدیک چاه و نزدیکی حفرات موجود در دیواره منطقه تولید به یکدیگر شود. این اتفاق منجر به افزایش پدیده تولید ماسه در چاه می‌شود. فاصله و جهت حفر حفره موجود در دیواره منطقه تولید تأثیر بسیاری در ثبات چاه دارند. به‌علاوه، در شرایطی که اختلاف میان تنش‌های برجا (عمودی و افقی) قابل توجه باشد حفره موجود در دیواره منطقه تولید باید در جهت ماکزیمم پایداری حفر گردد. زیرا تحت این شرایط اختلاف میان تنش‌های برجا حداقل می‌شود (Venkitaraman et al, 2000).

### ج- افت فشار

جریان سیال در اکثر مواقع از محیطی با فشار بالا به محیطی با فشار پایین در حرکت است. در حین تولید مواد هیدروکربنی در چاه، فشار چاه به‌مراتب کمتر از فشار مخزن است. به اختلاف فشار میان چاه و مخزن افت فشار می‌گویند. نرخ تولید با افت فشار قابل کنترل است. افت فشار بحرانی از تولید ماسه جلوگیری می‌کند. میزان افت فشار بحرانی در طول حیات مخزن تغییر می‌کند زیرا پارامترهای وابسته به آن در حال تغییر هستند (Qiu et al, 2006).

## ۵-۳- ماتریس اندرکنش و طبقه بندی پارامترهای تولید ماسه

اطلاع از واکنش‌هایی که در اثر فعالیت‌های مهندسی رخ می‌دهد و ارتباط درونی پارامترهای مختلف موثر نیاز به مطالعات بیشتری دارد. همانطور که در فصل سوم آمده است هر پارامتر تا حدودی هم بر روی سیستم تأثیر می‌گذارد و هم تأثیر می‌پذیرد. ماتریسی که آقای هادسون آنرا ماتریس اندرکنش نامید به مطالعه ارتباطات درونی میان پارامترهای مختلف در سیستم مهندسی سنگ می‌پردازد. ماتریس اندرکنش هادسون، ماتریس مربعی است. پارامترهای اصلی روی قطر اصلی این

ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش میان پارامترهای اصلی در بخش‌های غیر قطری ماتریس قرار می‌گیرند. باید توجه داشت، اندرکنش میان پارامترها ساعتگرد مطالعه می‌شود و به مسیر حرکت وابسته است. همچنین، ماتریس می‌تواند متقارن نباشد.

شکل ۲-۵ ماتریس  $8 \times 8$  طراحی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای تأثیر گذار بر پدیده تولید ماسه در روی قطر اصلی ماتریس و اندرکنش میان این پارامترها در بخش‌های غیر قطری ماتریس قرار گرفتند. المان‌های موجود در بخش‌های غیر قطری ماتریس توسط سیستم کدگذاری اشاره شده در فصل سوم کمی می‌شوند تا میزان غلبه هر پارامتر بر سیستم و سیستم بر هر پارامتر (علت و تأثیر) مشخص شود. در این سیستم هشت پارامتر موثر بر قابلیت تولید ماسه در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۵).

### ۵-۳-۱- کدگذاری ماتریس

برای کمینه سازی ماتریس ارائه شده در شکل ۲-۵ از سیستم کدگذاری نیمه کمی خیره استفاده شده است. در این مطالعه تعدادی پرسش‌نامه (پیوست الف) برای اساتید خیره در مبحث ژئومکانیک مخازن ارسال گردید. باید متذکر شد این سیستم، اندرکنش میان پارامترهای موثر را بصورت مقدار کمی از صفر (هنگامی که پارامترها اثری بر یکدیگر ندارند) تا ۴ (هنگامی که پارامترها بیشترین اثر را بر یکدیگر دارند) نام‌گذاری می‌کند. کدهای شماره ۱، ۲ و ۳ بترتیب بیانگر اندرکنش کوچک، متوسط و بزرگ میان پارامترها خواهند بود.

شکل ۳-۵ ماتریس کدگذاری شده ماتریس شکل ۲-۵ است. همانطور که بیان شد، کدگذاری ماتریس پروسه آسانی نیست و داشتن اطلاعات زیادی چون گزارشات ساختار زمین‌شناسی و گزارشات حفاری امری ضروری به نظر می‌رسد. جهت دستیابی به این هدف پس از دریافت نظرات کارشناسان خیره از طریق پرسش‌نامه ارسال شده و دریافت نظرات آنها ماتریس اندرکنش ارائه شده در این بخش مطابق شکل ۳-۵ کدگذاری شد.



<b>خواص پتروفیزیکی</b>	خواص پتروفیزیکی مستقیماً به خواص مکانیکی سازند وابسته هستند.	با افزایش نفوذپذیری نرخ سیال نیز بیشتر خواهد شد.	تنش عمودی با چگالی رابطه مستقیم دارد.	تنش عمودی با فشار وارده به مخزن رابطه مستقیم دارد.	ذرات کوچک باعث کاهش پایداری هندسه چاه می‌شوند.	با افزایش نفوذپذیری تعداد حفرات کاهش می‌یابد.	نفوذپذیری سازند باعث کاهش افت فشار می‌شود.
در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	<b>خواص مکانیکی</b>	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	تنش های افقی به خواص مکانیکی سازند وابسته هستند.	فشار مخزن به خواص مکانیکی وابسته است.	متوسط قطر حفرات تابع مقاومت سازند است.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.
فرسایش باعث تغییر تخلخل و نفوذپذیری سازند می‌شود.	فرسایش منجر به تغییر خواص مکانیکی سازند می‌شود.	<b>خواص سیال</b>	نرخ و چگالی سیال بر تنش موثر تأثیر می‌گذارد.	خواص سیال باعث تغییر در فشار مخزن می‌گردد.	چگالی سیال بر هندسه حفره تولید اثر می‌گذارد.	خواص سیال نظیر نرخ تولید بر جهت حفره تولید اثر می‌گذارد.	نرخ تولید سیال تابعی از افت فشار است.
تنش القایی در حین حفاری باعث تغییر نفوذپذیری سازند می‌شوند.	خواص مکانیکی در مناطق پلاستیکی القایی تغییر پذیرند.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	<b>تنش موثر</b>	با افزایش تنش فشار مخزن نیز افزایش می‌یابد.	تنش های بزرگ باعث گسیختگی و بزرگ شدگی حفره تولید می‌شوند.	حفره تولید باید در جهت حداقل تنش حفر شود.	افزایش تنش موثر باعث افزایش افت فشار می‌گردد.
افزایش فشار مخزن باعث افزایش تخلخل می‌شود.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	فشار باعث افزایش ویسکوزیته و چگالی سیال می‌شود.	تنش موثر با فشار مخزن رابطه معکوس دارد.	<b>فشار مخزن</b>	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	افت فشار تابعی از فشار مخزن است.
منطقه خرد شده تابع قطر حفره تولید است.	منطقه خرد شده تابع قطر حفره تولید است.	حفر حفرات با قطرهای بزرگ باعث افزایش نرخ سیال می‌شود.	تنش های القایی در اطراف حفره تولید تابع هندسه حفره تولید است.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	<b>هندسه حفره تولید</b>	تعداد حفره تولید با قطر آن رابطه معکوس دارد.	هندسه حفره تولید باعث تغییر در میزان افت فشار می‌گردد.
در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	با افزایش تعداد حفره تولید نرخ تولید افزایش می‌یابد.	بزرگی تنش های القایی به تراکم و جهت حفر آن وابسته است.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	تراکم با قطر حفره تولید رابطه معکوس دارد.	<b>تراکم و جهت حفره تولید</b>	با افزایش تراکم حفره تولید، افت فشار کمتر کاهش می‌یابد.
در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	نرخ سیال تابع افت فشار است.	افت فشار باعث القاء تنش می‌شود.	افت فشار باعث القاء فشار بر مخزن می‌گردد.	افت فشار باعث تغییر در هندسه حفره تولید می‌شود.	در شروع ماسه دهی اندرکنشی وجود ندارد.	<b>افت فشار</b>

شکل ۵-۲: ماتریس اندرکنش کامل طراحی شده در مطالعه حاضر جهت پیش‌بینی پدیده تولید ماسه در چاه

## ۵-۳-۲- نمودار علت و تأثیر

به مجموع اعداد هر ردیف شکل ۳-۵ که میزان تأثیر هر پارامتر بر سیستم را نشان می‌دهند علت می‌گویند و به مجموع اعداد هر ستون شکل ۳-۵ که میزان تأثیر سیستم بر هر پارامتر را نشان می‌دهند تأثیر می‌گویند.

								$\Sigma$ (علت)
<b>P<sub>1</sub></b>	۳	۲	۴	۱	۲	۳	۳	۱۸
۰	<b>P<sub>2</sub></b>	۰	۱	۱	۲	۰	۰	۴
۱	۳	<b>P<sub>3</sub></b>	۲	۲	۱	۱	۲	۱۲
۳	۲	۰	<b>P<sub>4</sub></b>	۲	۱	۱	۲	۱۱
۱	۰	۲	۲	<b>P<sub>5</sub></b>	۰	۰	۳	۸
۱	۲	۲	۳	۰	<b>P<sub>6</sub></b>	۱	۱	۱۰
۰	۰	۲	۳	۰	۱	<b>P<sub>7</sub></b>	۲	۸
۰	۰	۲	۲	۱	۱	۰	<b>P<sub>8</sub></b>	۶
$\Sigma$ (تأثیر)	۶	۱۰	۱۰	۱۷	۷	۸	۶	۱۳

P<sub>1</sub>- خواص پتروفیزیکی

P<sub>5</sub>- فشار مخزن

P<sub>2</sub>- خواص مکانیکی

P<sub>6</sub>- هندسه حفرات تولید

P<sub>3</sub>- خواص سیال

P<sub>7</sub>- تراکم و جهت حفر حفرات تولید

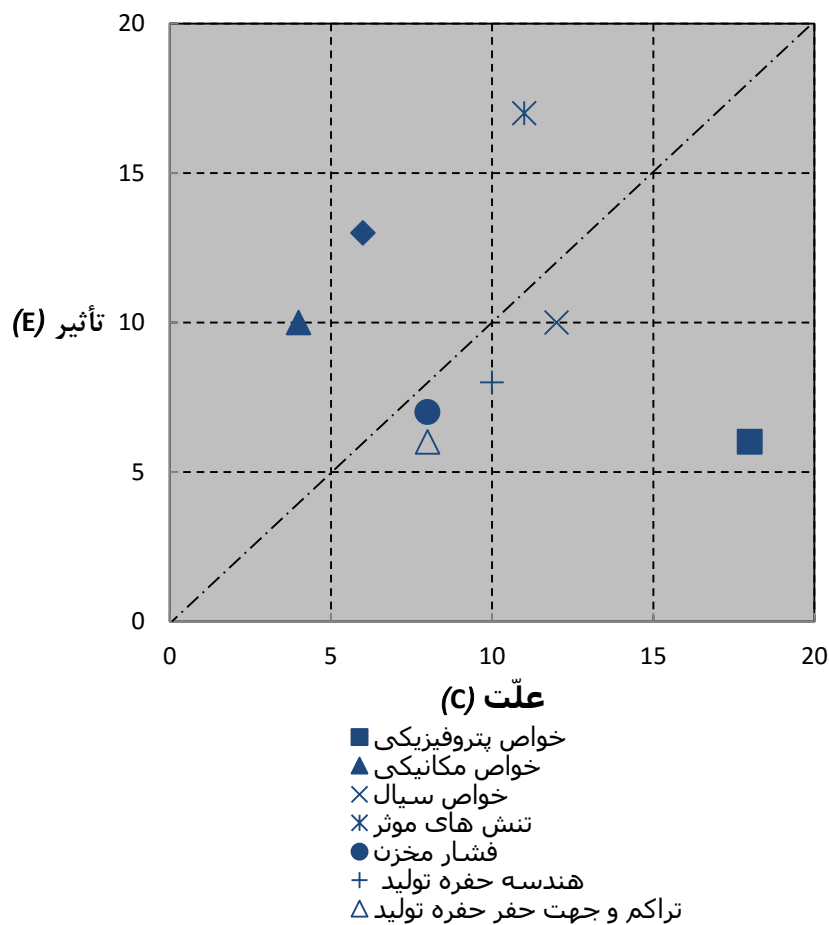
P<sub>4</sub>- تنش‌های موثر

P<sub>8</sub>- افت فشار

شکل ۳-۵: کدگذاری به روش نیمه کمی خبره ماتریس اندرکنش هشت در هشت جهت پیش‌بینی تولید ماسه.

همان‌طوری که در فصل سوم اشاره شد، مقدار اثرگذاری (علت) و تأثیرپذیری (تأثیر) هر پارامتر نسبت به سیستم به صورت یک نقطه در دستگاه مختصات نمودار علت و تأثیر قابل رویت است. شکل ۴-۵ دستگاه مختصات علت (C) و تأثیر (E) مربوط به پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه را نشان می‌دهد. در دستگاه مختصات حاضر بر روی قطر اصلی مقدار C=E است. وقتی در امتداد این قطر از

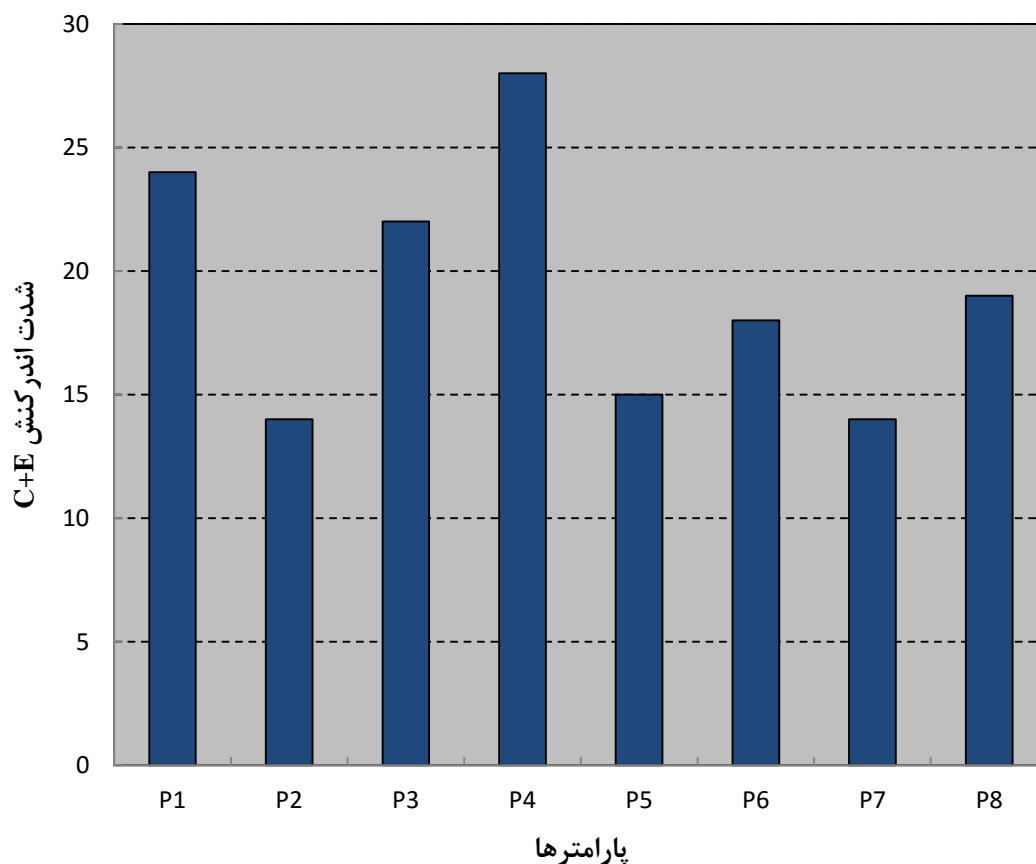
مرکز مختصات فاصله می‌گیریم مقدار E+C افزایش می‌یابد. در ادامه، خطوط شدت اندرکنش (یعنی مقادیر E+C) به منظور ایجاد تمایز بین پارامترهایی که بیشترین و کمترین اندرکنش را دارند رسم می‌شوند. پارامترهایی که در قسمت پایین سمت راست دستگاه مختصات قرار می‌گیرند بیشترین تأثیر را بر سیستم می‌گذارند. با افزایش فاصله از خط قطری مقدار C-E افزایش می‌یابد. پارامترهایی که در قسمت بالا سمت چپ دستگاه مختصات قرار می‌گیرند بیشترین تأثیر را از سیستم می‌پذیرند. با افزایش فاصله از خط قطری مقدار C-E کاهش می‌یابد. رسم نمودار علت و تأثیر، جهت درک صحیح رفتار هر پارامتر درون سیستم لازم است. مقادیر میانگین همه پارامترها ( $C/8, E/8$ ) نزدیک به مرکز نمودار است و این یعنی تأثیر گذاری و تأثیر پذیری سیستم بر پارامترها و برعکس، تقریباً یکسان است.



شکل ۵-۴: نمودار علت و تأثیر مطابق با پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه

شکل ۵-۵ نیز هیستوگرام شدت اندرکنش میان پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در ارزیابی‌های به‌عمل آمده پارامتر خواص پتروفیزیکی بیشترین غلبه، خواص مکانیکی کمترین غلبه، تنش موثر بیشترین اندرکنش و تراکم و جهت حفر حفره تولید کمترین اندرکنش را در سیستم دارند. پارامترهایی نظیر خواص پتروفیزیکی، خواص سیال، افت فشار، هندسه حفره تولید، فشار مخزن نیز مقدار متوسط اندرکنش در سیستم را نشان می‌دهند. همان‌طور که بیان شد تنش موثر یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم است. بزرگی تنش‌های موثر دیواره چاه بستگی به بزرگی تنش‌های برجای موثر، شعاع چاه، فاصله از مرکز چاه و فشار منفذی دارد بنابراین با کنترل هر یک از این پارامترها می‌توان اثر تنش موثر در تولید ماسه را تا حدودی کنترل کرد. به‌عبارت دیگر چنانچه با انتخاب وزن مناسب گل حفاری و نرخ بحرانی تولید بتوان تنش‌های اطراف چاه و حفره موجود در دیواره منطقه تولید را کنترل کرد می‌توان تولید ماسه را نیز کنترل کرد. پارامتر دیگری که نقش مهمی در ماسه‌دهی چاه ایفا می‌کند و بیشترین غلبه بر سیستم را نیز داراست خواص پتروفیزیکی سازند نام دارد. خواص پتروفیزیکی هر سازند یعنی چگالی، تخلخل و نفوذپذیری در مطالعات ژئومکانیکی بسیار با اهمیت می‌باشد. تنش موثر و نرخ تولید هیدروکربور باعث تغییر در تخلخل و نفوذپذیری سنگ مخزن می‌شوند. با افزایش تولید، تخلخل در بازه‌های مخزنی چاه مورد مطالعه افزایش می‌یابد و این افزایش تخلخل تأثیر زیادی بر نرخ تولید ماسه خواهد گذاشت. خواص سیال حفاری نیز از جمله پارامترهایی است که تأثیر زیادی بر کل سیستم دارد یعنی کل سیستم حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات نرخ جریان و ویسکوزیته سیال حفاری دارد. با تغییر نرخ جریان و ویسکوزیته سیال به‌نوعی می‌توان بر مشکل ناپایداری چاه فائق آمد. افت فشار بحرانی که در ادامه به‌تعیین آن می‌پردازیم یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که سیستم تأثیر زیادی بر روی آن خواهد گذاشت. اگر مقاومت فشاری تک محوره کاهش یابد افت فشار بحرانی نیز کاهش می‌یابد. فشار مخزن با اندرکنشی کم، به‌تنهایی تأثیری در شروع ماسه‌دهی چاه و حفره تولید ندارد. در واقع تغییرات فشار مخزنی در هنگام تولید، در مناطق سست که دارای مقاومت بسیار پایینی

هستند، باعث تولید ذرات ماسه می‌شود که این ذرات همراه با فشار سازند وارد چاه می‌شوند. در میان پارامترهای موثر در ماسه‌دهی چاه سیستم تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی سازند نظیر مدول‌های الاستیکی، نسبت پواسون و مقاومت فشاری تک محوره خواهد داشت. خواص مکانیکی در مناطق پلاستیکی اطراف چاه تغییر می‌کنند. بنابراین شناخت دقیق این پارامتر کمک شایانی در مطالعه‌ی بهتر فرایند تولید ماسه خواهد داشت. پارامتر تراکم و جهت حفر حفره تولید از میان پارامترهای مختلف موثر در ماسه‌دهی چاه دارای کمترین اندرکنش می‌باشند دارد، یعنی کل سیستم حساسیت کمتری نسبت به تراکم و جهت حفر حفره تولید دارد. به عبارت کلی هدف از ترسیم هیستوگرام شدت اندرکنش (شکل ۵-۵) تعیین پارامترهای موثر در ماسه‌دهی چاه بوده است تا به واسطه‌ی آن پارامترهای درون سیستم و در نهایت خود سیستم تحت کنترل باشد.



شکل ۵-۵: هیستوگرام شدت اندرکنش میان پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه

در ادامه این فصل به ارائه مدل مکانیکی پتانسیل تولید ماسه می‌پردازیم. اولین گام برای ساخت یک مدل مکانیکی استاندارد، تعیین پارامترهای موثر می‌باشد. یک مدل مکانیکی استاندارد، اطلاعات با ارزشی را در مورد انواع مکانیزم‌های دگر شکلی منطقه‌ای فراهم می‌آورد. از این تحلیل دقیق، همان‌طور که در فصل چهارم بحث شد خواص الاستیکی سنگ حاصل می‌شود. استفاده از این پارامترها به منظور پیش‌بینی فشار منفذی و تنش‌های افقی و عمودی است. باید به این نکته توجه داشت که فعالیت‌های حفاری و تولیدی، باعث تغییر تنش‌های موثر می‌شوند و برخی مواقع باعث آسیب‌های جدی به فعالیت‌های بهره‌برداری از مخازن می‌شود. بنابراین در ادامه سعی خواهد شد با تحلیل صحیح پارامترهای موثر در تولید ماسه به یک مدل ژئومکانیکی صحیح دست یابیم.

## ۵-۴- مدل سازی تولید ماسه

همان‌طور که در فصول گذشته به تفصیل بحث شد، خردشدگی و شکستگی سنگ‌های دیواره چاه‌ها طی حفاری باعث مشکلات اساسی و ناپایداری چاه می‌شوند که می‌توانند منجر به گیرکردن رشته لوله‌های حفاری، هرز رفتن گل و مسدود شدن چاه شوند. مشکلات مربوط به پایداری در خلال حفاری با انتخاب صحیح وزن گل حفاری از بین خواهد رفت. بنابراین، انتخاب وزن بهینه گلی که بتواند موجبات پایداری چاه را فراهم سازد، بسیار مهم و حائز اهمیت خواهد بود. اما زمانی که شکستگی‌های برشی و یا شکست هیدرولیکی اتفاق می‌افتد، با توجه به حضور جریان سیال، ذرات ماسه وارد چاه شده و به سطح آورده می‌شوند. جهت جلوگیری از این مشکل دو راه حل عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرد: استفاده از گراول پک و شبکه به‌عنوان ابزار جلوگیری کننده و انتخاب نرخ تولید مناسب به عنوان روش کاهش دهنده تولید. در ادامه در مورد این دو روش بحث خواهد شد.

## ۵-۴-۱- کاربرد معیار شکست موهر- کلمب، موگی- کلمب و هوک- براون

## جهت ارزیابی پایداری چاه

در این تحقیق با توجه به مباحث مطرح شده در پیوست ب، برای تعیین بازه وزن گل مجاز از معیار شکست موهر- کلمب<sup>۱</sup> به همراه معیارهای دیگر استفاده شده است. برای استفاده از این معیارها ابتدا باید مقدار تنش‌های اصلی با توجه به مباحث مطرح شده در فصل چهارم و پیوست ب محاسبه گردد. برای نیل به این هدف ابتدا تنش‌های محوری ( $S_{zz} = \sigma_{zz}$ )، مماسی ( $S_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}$ ) و شعاعی ( $S_{rr} = \sigma_{rr}$ ) در چاه ۶ میدان آزادگان محاسبه شدند و نتایج آن در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. خردشدگی (شکستگی برشی) در چاه زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از سه حالت اشاره شده در جداول (ب-۱)، (ب-۳) و (ب-۵) اتفاق بیفتد. در چاه حاضر، همان‌طور که در شکل ۵-۶ ستون دوم از سمت چپ مشاهده می‌شود در هر سه معیار شکست موهر- کلمب، موگی- کلمب<sup>۲</sup> و هوک براون<sup>۳</sup>، حالت دوم ( $S_{\theta\theta} \geq S_{zz} \geq S_{rr}$ ) رخ داده است. بنابراین برای تعیین حد پایینی فشار گل از رابطه حالت ۲ در جداول فوق باید استفاده شود. به همین طریق، شکستگی کششی در دیواره چاه زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از سه حالت اشاره شده در جداول (ب-۲)، (ب-۴) و (ب-۶) اتفاق بیفتد. در چاه حاضر، همان‌طور که در ستون دوم از سمت راست شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود در هر سه معیار شکست، حالت دوم ( $S_{rr} \geq S_{zz} \geq S_{\theta\theta}$ ) رخ داده است. بنابراین برای تعیین حد بالایی فشار گل از رابطه حالت ۲ جداول اشاره شده باید استفاده شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مرتبط به پایداری چاه زاویه اصطکاک داخلی<sup>۴</sup> ( $\varphi$ ) می‌باشد. برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی و بکارگیری آن در معیار شکست موهر- کلمب از رابطه زیر استفاده شده است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

$$\varphi = 26.5 - 37.6 \times (1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (1-5)$$

<sup>1</sup> - Mohr- Columb Failure Critria

<sup>2</sup> - Mogi- Columb Failure Critria

<sup>3</sup> - Hoek- Brown Failure Critria

<sup>4</sup> -Friction Angle

که در آن، NPFI تخلخل حاصل از نگار نوترونی و  $V_{Shale}$  حجم شیل می‌باشد که با داشتن نگار پرتو گاما و روابط مربوط به دست می‌آید (مرادزاده و قوامی ریایی، ۱۳۸۰).

برای تعیین ضربه سازند<sup>۱</sup> و هرزروی گل<sup>۲</sup> نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

$$P = \rho gh \quad (۲-۵)$$

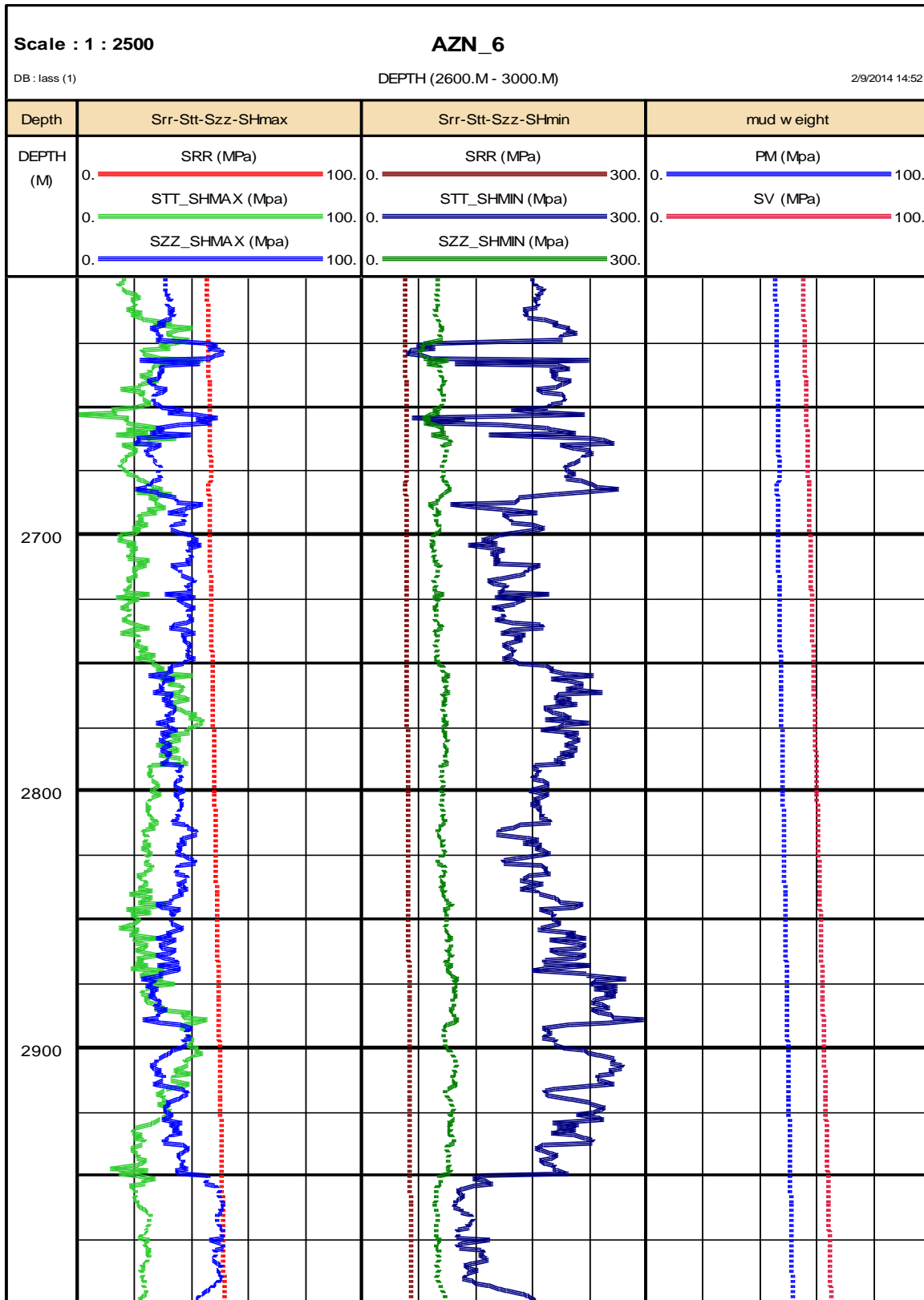
که در آن،  $\rho$  چگالی گل،  $h$  ارتفاع ستون هیدروکربور و  $g$  شتاب گرانش می‌باشد. در این حالت برای تعیین ضربه سازند مقدار  $P$  را برابر فشار منفذی، و برای تعیین مقدار هرز روی گل مقدار  $P$  را برابر حداقل تنش افقی در نظر می‌گیرند. برای تعیین تغییرات مجاز فشار گل، تمام واحدهای بکار رفته در حالت شکستگی برشی، شکستگی کششی، ضربه سازند و هرزروی گل را باید به وزن حجمی گل یعنی  $gr/cm^3$  تبدیل کرد.

نتایج مدل‌سازی برای بررسی پتانسیل تولید ماسه در سنگ‌های دیواره چاه حاضر با استفاده از معیار موهر-کلمب، موگی-کلمب و هوک-براون در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. سازند غالب در بازه عمقی ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متری سروک می‌باشد که عمدتاً آهکی است. شکل ۵-۷ به کمک نرم افزار تحلیلی Interactive Petrophysics رسم شده که در آن وزن گل، ضربه سازند و هرزروی گل مطابق با آنچه قبلاً ذکر گردید از طریق مقادیر به دست آمده برای فشارمنفذی و تنش افقی حداقل (فصل چهارم) محاسبه شده است. در این شکل وزن گل برای هر سه معیار با خط سیاه نشان داده شده است، ضربه سازند با رنگ زرشکی، مقدار هرز روی گل با رنگ سبز، شکستگی برشی (بریک اوت) با رنگ سبز لجنی و در نهایت شکستگی کششی (بریک داون) با رنگ آبی نشان داده شده است.

<sup>1</sup> - Formation Kick

<sup>2</sup> - Mud Loss





شکل ۵-۶: تغییرات تنش شعاعی ( $S_{rr}$ )، محوری ( $S_{zz}$ )، مماسی ( $S_{tt}$ )، فشار گل (PM) و تنش روباره (SV) در دیواره چاه ۶ میدان آزادگان

از آنجایی که برای ارزیابی ماسه دهی چاه، خردشدگی سنگ‌های اطراف چاه در اثر فرایند شکستگی برشی و کششی از پارامترهای اساسی می‌باشند، بنابراین اگر به‌طریقی احتمال این نوع شکستگی‌ها را بتوان پیش‌بینی نمود می‌توان با اتخاذ تمهیدات لازم (مثلاً انتخاب وزن مناسب برای گل حفاری) از بروز ماسه دهی چاه تا حد زیادی جلوگیری نمود. برای این کار استفاده از یک مدل رفتاری همراه با معیار شکست مناسب که بتواند تنش‌های اطراف چاه را به‌درستی تخمین بزند، ضروری است. با توجه به مباحث مطرح شده تعیین وزن بهینه گل حفاری مهم‌ترین عامل در ارزیابی پایداری چاه‌ها می‌باشد. بنابراین، تعیین وزن بهینه گل از مهم‌ترین اهداف مطالعه حاضر است که با استفاده از معیارهای شکست متفاوت انجام شده است. بر اساس مدل به دست آمده، اگر مقدار ضربه سازند بیشتر از وزن گل شود (یعنی مقادیر منطقه زرشکی رنگ از خط سیاه بیشتر شوند) چاه مسدود خواهد شد. این بدان معنی است که برای اجتناب از چنین اتفاقی فشار گل حتماً باید بیشتر از فشار سیال منفذی باشد. حال اگر در بازه‌ای وزن گل بیشتر از اندازه زیاد شود و به مقادیر رسم شده هرز روی گل برسد (یعنی خط سیاه به مقادیر سبز رنگ برسد) در آن ناحیه شکست کششی (بریک داون) رخ خواهد داد. همان‌طور که در مدل حاصل از معیار موهر- کلمب (ستون سمت راست شکل ۵-۷) مشاهده می‌شود، شکستگی کششی در اعماق ۲۶۲۵ تا ۲۶۵۰ متری و اعماق بیشتر از ۲۹۵۰ متری اتفاق می‌افتد که با گزارشات حفاری و همچنین تغییرات نگار قطر سنجی مطابقت نسبتاً خوبی دارد. این در حالی است که بکارگیری این مدل رفتاری در بسیاری از موارد شکستگی برشی (بریک اوت) را به‌خوبی نشان نمی‌دهد. این موضوع خود یکی از ضعف‌های این معیار شکست است که ممکن است به دلیل نادیده گرفتن نقش تنش میانی در شکست سنگ باشد. به همین دلیل در این تحقیق از دو معیار شکست دیگر یعنی موگی- کلمب و هوک- براون نیز برای بررسی بیشتر موضوع استفاده شده است.

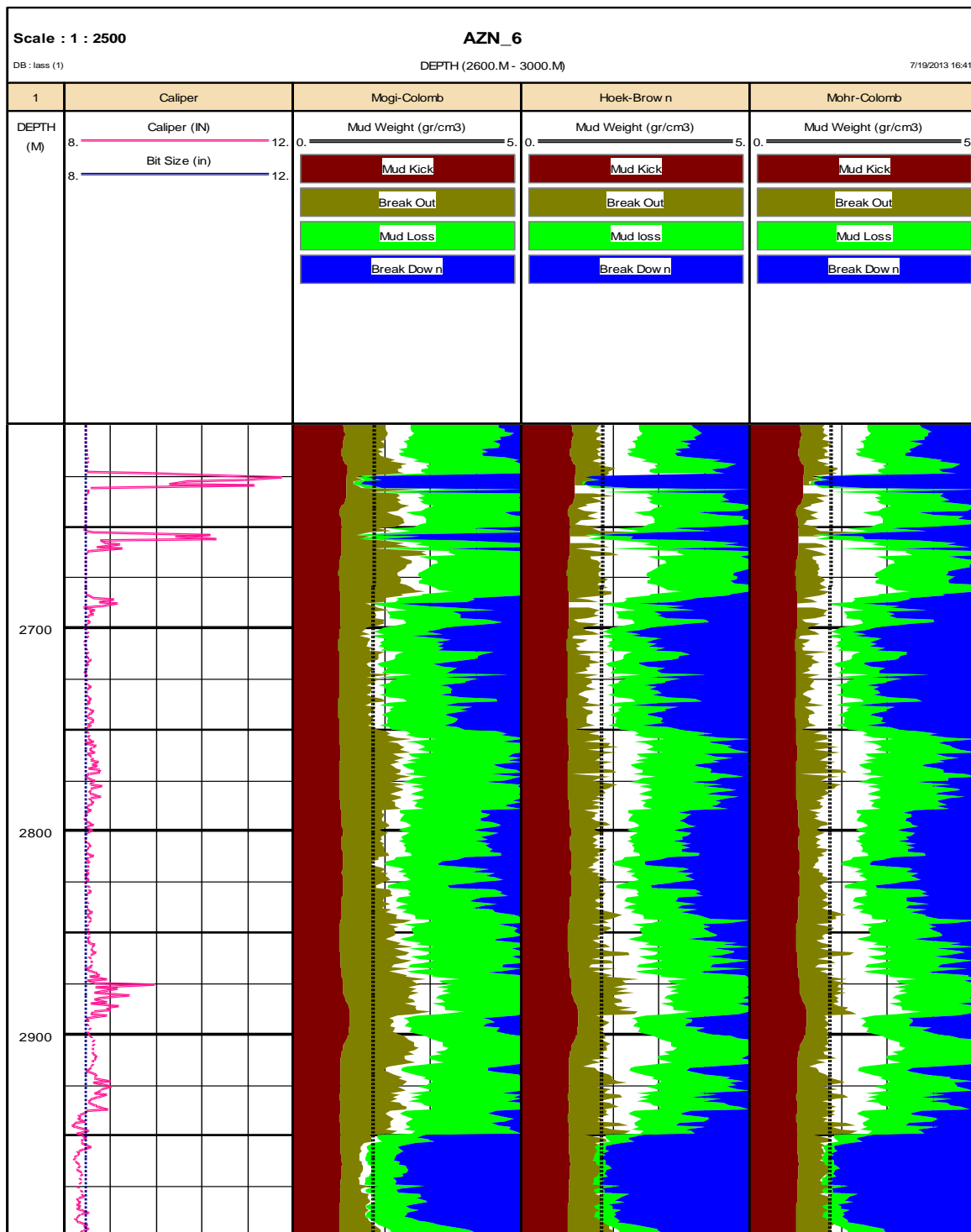
برای تعیین وزن بهینه گل حفاری معیارهای شکست سه بعدی موگی- کلمب و هوک- براون بنا به دلایل فوق مورد استفاده قرار گرفتند. برای استفاده از این معیارها، حد پایین و حد بالای فشار گل

حفاری در معیار موگی - کلمب از حالت ۲ جداول (ب-۳) و (ب-۴) پیوست، و برای معیار هوک - براون از حالت ۲ جداول (ب-۵) و (ب-۶) پیوست، استفاده شده است. مدل‌سازی نتایج حاصل از این دو معیار به همراه معیار شکست دو بعدی موهر - کلمب در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.

اگر بخواهیم در مورد مدل حاصل از بکارگیری معیار هوک - براون بحث کنیم باید به این نکته اشاره کنیم که این معیار در بازه عمقی ۲۶۰۰ تا ۲۸۰۰ متری نتوانسته است شکستگی برشی را مشخص سازد. هرچند در همین بازه میزان شکستگی کششی به‌خوبی مدل شده است. در اعماق بیشتر از ۲۸۰۰ متر معیار شکست هوک - براون نسبت به معیار موهر - کلمب کمی بهتر عمل کرده و نتوانسته شکستگی برشی (یعنی بیرون‌زدن منطقه سبز لجنی از خط سیاه رنگ) را نزدیک به واقعیت تخمین بزند. هرچند در بسیاری از میداين هیدروکربوری از این معیار شکست جهت ارائه مدلی مناسب استفاده می‌شود ولی در چاه ۶ میدان آزادگان این معیار نتوانسته انتظارات کلی را در شناسایی مناطق شکسته برآورده کند.

همان‌طور که در ستون دوم سمت چپ شکل ۵-۷ دیده می‌شود در مدلی که توسط معیار شکست موگی - کلمب ارائه شده در فواصل مخزنی ۲۶۲۰ تا ۲۶۳۵ متری و همچنین بازه عمقی ۲۶۵۰ تا ۲۶۶۵ متری شکستگی کششی (یعنی عبور خط مشکی از منطقه سبز رنگ) رخ داده که با بررسی نگار قطرسنجی می‌توان به این واقعیت پی‌برد. در بازه‌های فوق همان‌طور که شکل نشان می‌دهد به دلیل ایجاد پدیده شکستگی کششی (بریک دوان) پدیده هرزروی رخ داده است علاوه بر آن شکستگی برشی (بیرون‌زدن منطقه سبز لجنی از خط مشکی) از عمق ۲۶۰۰ تا ۲۶۹۰ متری رخ داده است. در بازه‌های مخزنی ۲۷۵۰ تا ۲۷۸۵ و ۲۸۵۰ تا ۲۹۵۰ متری پدیده شکستگی برشی رخ داده است که در شکل بخوبی قابل تشخیص می‌باشد. در بازه مخزنی ۲۹۵۰ تا ۳۰۰۰ متری نیز به دلیل شکست کششی پدیده هرزروی گل مشاهده می‌شود که با توجه به مشاهدات صحرائی و گزارشات حفاری می‌توان به صحت این مسئله پی‌برد. با توجه به موارد فوق می‌توان گفت که مدل ارائه شده

توسط معیار موگی - کلمب نسبت به دو معیار دیگر استفاده شده در این چاه در شناسایی مناطق ناپایدار اطراف چاه بهتر عمل نموده است.



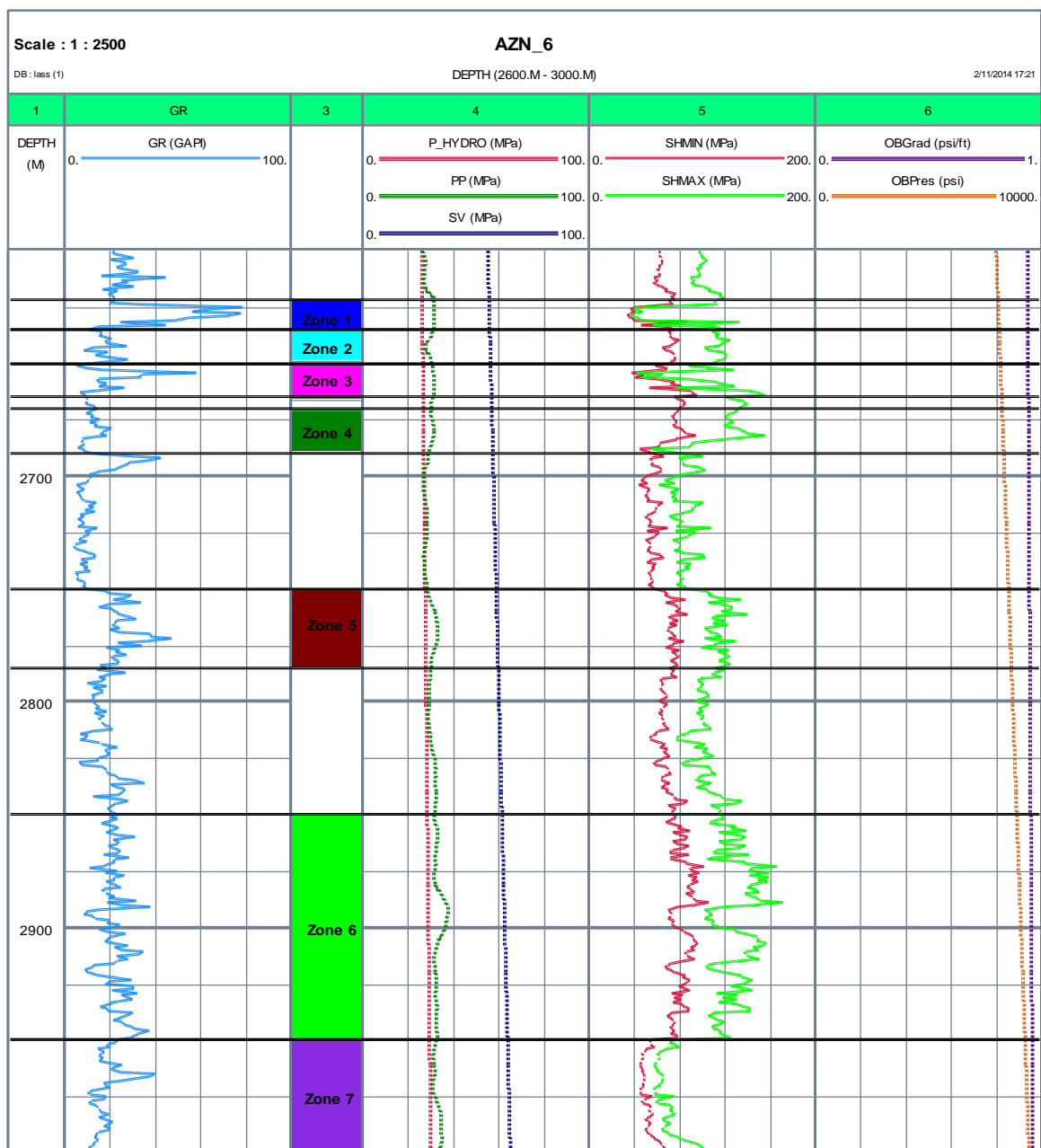
شکل ۵-۷: انتخاب پنجره وزن بهینه گل حفاری برای چاه شماره ۶ میدان آزادگان بر اساس معیارهای شکست موهر - کلمب، هوک - براون و موگی - کلمب

## ۵-۵- شناسایی مناطق تولید ماسه و حرکت دانه‌های آن

همان‌طور که اشاره شد، تولید ماسه به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که یکی از مهم‌ترین این پارامترها نیرو حرکتی سیال می‌باشد که توسط سیال متحرک ایجاد می‌شود. در اثر ایجاد افت فشار در ناحیه اطراف چاه، سیال سازند شروع به حرکت با سرعت به سمت حفره چاه می‌کند هر چه افت فشار ایجاد شده بیشتر شود سرعت حرکت سیال نیز افزایش می‌یابد. حرکت سیال با خود ایجاد یک نیروی مومنتم می‌کند که این نیرو به ذرات سازند وارد می‌شوند و مقدار این نیرو به شدت، بستگی به سرعت و ویسکوزیته (گرانروی) سیال دارد. هر اندازه سرعت حرکتی سیال بیشتر و نفت ویسکوزتر باشد مقدار این نیرو نیز بیشتر می‌شود وقتی که نیروی سیال از نیروی چسبندگی‌ای که ذرات سازند را به یکدیگر متصل کرده است بیشتر شود باعث جدا شدن این ذرات شده و شکل تولید شن را ایجاد می‌کند. اما سوالی که در اینجا مطرح است این است که آیا احتمال تولید ماسه در مناطقی که مشخص شده است وجود دارد یا خیر؟ با توجه به آن که در برخی فواصل مخزنی (شکل ۵-۷) شکستگی کششی و برشی دیده شده است.

برای بررسی ماسه‌دهی بودن مناطقی که دچار شکستگی برشی و شکستگی کششی شده‌اند ابتدا به بررسی فشار روباره و فشار منفذی پرداختیم. با بررسی‌های انجام شده به این نتیجه رسیدیم که فشار منفذی در اعماق خاصی به فشار روباره که ناشی از نیروی وزن طبقات است نزدیک می‌شود، این نزدیکی ممکن است باعث تضعیف چسبندگی بین ذرات سازند و جدا شدن ذرات و در نتیجه با تولید ماسه همراه گردد. در مناطق یک و سه همان‌طور که در بالا ذکر شد با پدیده شکستگی کششی مواجه هستیم. در این منطقه با توجه به شکل ۵-۸ فشار منفذی به فشار روباره نزدیک شده و می‌توان این‌طور بیان نمود که در این مناطق احتمال تولید ماسه وجود دارد که البته در ادامه با تعیین افت فشاری ماسه‌دهی بودن این مناطق مورد بررسی کامل قرار می‌گیرد. در مناطق دو و چهار با پدیده هرز روی و شکستگی برشی مواجه هستیم که در این مناطق نیز فشار منفذی مقدار بیشتری را نسبت به مقدار هیدرواستاتیکی خود دارد لذا در این مناطق نیز تولید ماسه احتمالاً رخ خواهد داد. در مناطق

پنج و شش، شکستگی برشی مشاهده می‌شود که در این دو منطقه نیز به دلیل وجود فشار منفذی بالا احتمال تولید ماسه فراوان خواهد بود، البته این نکته را باید متذکر شد که نتایج حاضر با نرخ تولید بحرانی، گزارشات زمین شناسی و حین حفاری کالیبره خواهند شد. در منطقه هفت با پدیده هرز روی گل مواجه هستیم که در این منطقه به دلیل وجود فشار منفذی هیدرواستاتیکی پدیده تولید ماسه احتمالاً رخ نخواهد داد.



شکل ۵-۸: مقایسه فشار منفذی بدست آمده از رابطه ایتون با فشار روباره در چاه شماره ۶ میدان آزادگان

## ۵-۶- نرخ تولید بحرانی

مدل‌های تجربی و تحلیلی بسیاری جهت تعیین نرخ بحرانی تولید ماسه انجام شده است. یکی از این روش‌ها، تعیین نرخ بحرانی تولید بر مبنای خواص مکانیکی دینامیکی می‌باشد. در این روش که به آن شاخص تولید ماسه<sup>۱</sup> (SPI) نیز گفته می‌شود از حاصل ضرب دو پارامتر الاستیکی سازند یعنی مدول برشی و مدول بالک جهت تعیین حد آستانه‌ای تولید ماسه استفاده می‌شود. بر این اساس اگر شاخص تولید ماسه یا به عبارتی مقدار این حاصل ضرب از  $8 \times 10^{11} \text{ psi}^2$  بیشتر شد، تولید ماسه رخ خواهد داد و اگر این مقدار از  $8 \times 10^{11} \text{ psi}^2$  کمتر شود ماسه‌ای تولید نخواهد شد.

$$G \times K_b = 8 \times 10^{11} \quad (\text{psi}^2) \quad (3-5)$$

که در آن،  $G$  مدول برشی ( $\text{psi}$ ) و  $K_b$  مدول بالک ( $\text{psi}$ ) است. در بازه‌های عمقی مختلف چاه مورد مطالعه، حداکثر مقدار شاخص تولید ماسه برابر  $20 \times 10^{11} \text{ psi}^2$  است و این نشان دهنده محتمل بودن تولید ماسه خواهد بود.

عباس و همکاران (۲۰۰۳)، تعیین میزان افت فشار ( $\Delta P_s$ ) در چاه را به وسیله رابطه ذیل پیشنهاد

دادند:

$$\Delta P_s = \left( \frac{q_s \times \mu \times B_0}{0.00708 \times K \times h} \right) \times s \quad (4-5)$$

که در آن،  $q_s$  نرخ تولید چاه،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $B_0$  عامل حجمی سازند نفتی،  $K$  نفوذپذیری،  $h$  ضخامت منطقه بهره‌ده و  $s$  اثر پوسته می‌باشد. اگر این فشار از مقدار مقاومت کششی سازند ( $T$ ) بیشتر باشد، شکستگی کششی و تولید ماسه رخ خواهد داد و بر اساس آن می‌توان نرخ تولید را ارائه نمود.

در چاه ۶ میدان آزادگان مقادیر هر یک از پارامترهای دخیل در محاسبه افت فشار به این شرح

می‌باشد،  $q_s = 4540 \text{ bbl/day}$ ،  $\mu = 2.9 \text{ cp}$ ،  $B_0 = 1.316$ ،  $K = 72 \text{ md}$ ،  $h = 164.04 \text{ ft}$

<sup>۱</sup> - Sand Production Index(SPI)

$S = +7$ . با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۵-۵ می‌توان میزان افت فشار ( $\Delta P_s$ ) را محاسبه کرد. بنابراین داریم:

$$\Delta P_s = 1443.80 \text{ psi}$$

مقدار افت فشار در چاه مورد نظر در میدان آزادگان برابر  $1443.80 \text{ psi}$  یا  $9/95$  مگاپاسکال است که از حداقل مقاومت کششی سازند که تقریباً یک دهم مقاومت فشاری تک محوره است ( $T = 11 \text{ Mpa}$ ) کمتر می‌باشد. بنابراین گسیختگی کششی نمی‌تواند عامل تولید ماسه در بازه‌های عمقی مختلف در چاه مورد نظر باشد. با توجه به مطالب ذکر شده احتمالاً شکستگی برشی سبب تولید ماسه در چاه حاضر خواهد شد. بنابراین در ادامه افت فشاری بحرانی<sup>۱</sup> (CDP) که سبب شکست برشی و تولید ماسه می‌شود توسط رابطه تجربی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد (Willson et al, 2002):

$$CDP = \frac{1}{2-A} [2P_p - (3\sigma_H - \sigma_h - UCS)] \quad (5-5)$$

که در آن،  $A$  پارامتر ثابتی است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$A = \frac{1-2\nu}{2-\nu} \quad (6-5)$$

که در آن،  $\nu$  نسبت پواسون است. با جایگذاری مقادیر فشار مخزن ( $P_p$ )، تنش افقی حداکثر ( $\sigma_H$ ) و حداقل ( $\sigma_h$ ) و مقاومت فشاری تک محوره ( $UCS$ ) در بازه‌های عمقی که دچار شکستگی برشی شده‌اند (بازه‌های عمقی  $2635$  تا  $2650$ ،  $2670$  تا  $2690$ ،  $2750$  تا  $2785$  و  $2850$  تا  $2950$ ) در رابطه ۵-۶ مقدار حداکثر افت فشار بحرانی در چاه ۶ میدان آزادگان محاسبه گردید:

$$CDP = 14.32 \text{ Mpa}$$

حداکثر مقدار افت فشار بحرانی در چاه ۶ میدان آزادگان  $14/32$  مگاپاسکال می‌باشد. این در صورتی است که مقدار افت فشار در چاه حاضر جهت تولید روزانه  $4540$  بشکه نفت،  $21$  مگاپاسکال است بنابراین تحت این شرایط در بازه‌های عمقی که دچار شکستگی برشی شده‌اند (مناطق دو، چهار،

<sup>1</sup> - Critical drawdown pressure



پنج و شش در شکل ۵-۸) تولید ماسه صورت می‌گیرد. با تعیین نرخ بحرانی تولید می‌توان تا حدودی بر این مشکل غلبه کرد، هرچند باید دقت داشت کاهش نرخ تولید به حدی نباشد که چاه ارزش اقتصادی خود را از دست بدهد. با توجه به مطالب بیان شده، برای تعیین مقدار نرخ تولید بحرانی از رابطه زیر استفاده شده است (Willson et al, 2002):

$$q_{sc} = \frac{0.00708 \times K \times h \times (P_r - P_w)}{\mu \times B_0 \times \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - 0.75 + s \right)} = 3351 \text{ bbl/day} \quad (7-5)$$

که در آن،  $K$  نفوذپذیری،  $h$  ضخامت منطقه بهره‌ده،  $P_r$  فشار مخزن،  $P_w$  فشار چاه،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $B_0$  عامل حجمی سازند نفتی،  $S$  اثر پوسته،  $r_w$  شعاع چاه و  $r_e$  شعاع منطقه اشباع از نفت در اطراف چاه می‌باشد. با جایگذاری مقادیر در رابطه فوق که عمدتاً در صفحات قبل بیان شدند، مقدار نرخ بحرانی تولید برای چاه ۶ میدان آزادگان برابر با ۳۳۵۱ بشکه در روز خواهد بود که از نرخ تولید کنونی به مراتب کمتر است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای کاهش میزان تولید ماسه نرخ تولید به ۳۳۵۱ بشکه در روز کاهش یابد. اگر این نرخ تولید اقتصادی نمی‌باشد باید از ترکیبی از گراول پک و نرخ تولید برای کاهش تولید ماسه استفاده نمود.

## ۷-۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ماتریس اندرکنش نشان می‌دهد که پارامترهای تنش موثر بیشترین اندرکنش و تراکم و جهت حفر حفره تولید کمترین اندرکنش را در فرایند تولید ماسه چاه دارند. یعنی کل سیستم حساسیت کمتری نسبت به تراکم و جهت حفر حفره تولید دارد. در میان پارامترهای مختلف ذکر شده، تنش موثر یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم است. تغییرات تنش موثر را می‌توان با تغییر فشار گل به نوعی کنترل نمود بنابراین با تعیین وزن بهینه گل حفاری می‌توان تنش‌های موثر اطراف چاه مورد مطالعه را تحت کنترل قرار داد. در بررسی‌های انجام شده مشخص شد،

سیستم تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی سازند یعنی مدول‌های الاستیکی، نسبت پواسون و مقاومت فشاری تک محوره دارد.

بعد از شناخت پارامتر موثر در ماسه‌دهی چاه، وزن بهینه گل حفاری تعیین گردید. در این مطالعه از سه معیار شکست استفاده شد تا وزن بهینه گل حفاری تعیین شود. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که معیار موگی - کلمب نتایج قابل قبول تری را نسبت به دیگر معیارهای شکست برای پایداری دیواره چاه حاصل نموده است که در تطابق خوبی با گزارش نهائی حفاری و تکمیل چاه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در مناطق یک، سه و هفت (شکل ۵-۸) با مشکل هرزروی گل مواجه هستیم ولی بدلیل این که افت فشار ( $\Delta P_s$ ) از مقاومت کششی سازند ( $T$ ) کمتر است. بنابراین در این فواصل ماسه تولید نخواهد شد. گزارشات حفاری نیز درستی این مطلب را تایید می‌کنند. در مناطق دو، چهار، پنج و شش (شکل ۵-۸) با پدیده شکستگی برشی مواجه هستیم. در این بازه‌ها حداکثر مقدار افت فشار بحرانی برابر ۱۴/۳۲ مگاپاسکال می‌باشد. این در صورتی است که مقدار افت فشار در چاه ۶ میدان آزادگان جهت تولید روزانه ۴۵۴۰ بشکه نفت، ۲۱ مگاپاسکال می‌باشد، بنابراین تحت این شرایط در بازه‌های عمقی که دچار شکستگی برشی شده‌اند تولید ماسه رخ خواهد داد. گزارشات حفاری وجود ذرات جامد را در این بخش تایید می‌کنند. در نهایت نیز مقدار نرخ بحرانی تولید برای چاه ۶ میدان آزادگان برابر با ۳۳۵۱ بشکه در روز تعیین گردید که از نرخ تولید کنونی یعنی ۴۵۴۰ بشکه در روز به مراتب کمتر است. اگر این نرخ تولید اقتصادی نمی‌باشد باید از ترکیبی از گراول پک و نرخ تولید برای کاهش تولید ماسه استفاده کرد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱- جمع‌بندی نتایج و بحث روی آنها

مطالعه حاضر برای ارزیابی پتانسیل تولید ماسه از چاه‌های یکی از میادین نفتی جنوب غرب کشور انجام شد. در بحث مدل سازی پتانسیل تولید ماسه، تعیین وزن بهینه گل حفاری یکی از مسائل مهم به شمار می‌آید و هر اندازه در تعیین وزن بهینه گل حفاری دقیق‌تر عمل شود، سایر ارزیابی‌ها صحیح‌تر خواهند بود.

در تحقیق حاضر، جهت تحلیل مسائل ابتدا با استفاده از نگارهای صوتی و چگالی به تخمین پارامترهای الاستیک دینامیکی سنگ پرداخته شد و مشخص شد تفاوت قابل توجهی میان پارامترهای الاستیکی که از طریق آزمایشات مکانیک سنگی به دست می‌آیند با مقادیر حاصل از سرعت امواج وجود دارد. از آنجا که در این مطالعه آزمایشات برجا ضریب تراکم‌پذیری نمونه سنگ‌های مختلف در بازه مخزنی محاسبه شده است لذا سعی شده با استفاده از آن به کالیبراسیون مدول بالک استاتیکی پردازیم. جهت تعیین مدول یانگ استاتیکی از روابط مختلفی استفاده شد که در این بین رابطه جامبسون (۲۰۰۸) بهترین نتیجه را نشان داد. در ادامه مقاومت فشاری تک محوره سنگ مخزن با استفاده از روابط تجربی مختلف تخمین زده شد و سپس مقادیر مختلف محاسبه شده آن در پیش-بینی میزان شکستگی برشی استفاده گردید و مقاومت فشاری تک محوره‌ای که توسط چانگ (رابطه ۴-۱۷) ارائه شد، بهترین نتیجه را حاصل نمود و به‌عنوان مقاومت فشاری تک محوره مناسب سنگ مخزن در چاه مورد نظر انتخاب شد.

علاوه بر پارامترهای الاستیکی فشار منفذی هم یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در فرایند حفاری و ژئومکانیکی می‌باشد. در این تحقیق از نگار صوتی و همچنین نگار مقاومت ویژه جهت پیش-بینی فشار منفذی استفاده شد و در نهایت با تعیین و کالیبراسیون فشار منفذی چاه ۶ میدان آزادگان به کمک داده‌های MDT مشخص شد که رابطه ایتون (رابطه ۴-۳۲) که در آن از نگار صوتی بهره گرفته شده، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کند.

بعد از تعیین پارامترهای پتروفیزیکی و فشار منفذی، مقدار تنش‌های وارده به اطراف چاه بررسی شد. در میان روابط مختلف ذکر شده جهت تعیین تنش‌های افقی، مدل به‌دست آمده از رابطه تجربی پوروالاستیک (رابطه ۴-۲۷) بخوبی توانست به پیش‌بینی تغییرات تنش افقی حداقل در منطقه مورد نظر بپردازد. در چاه مورد مطالعه مقدار کرنش در جهت تنش‌های افقی حداکثر ( $\epsilon_H$ ) و حداقل ( $\epsilon_h$ ) به ترتیب ۱ و ۰/۵ می‌باشد. البته در این تحقیق از داده‌های تست نشت (LOT) جهت کالیبراسیون نتایج استفاده گردید.

در ادامه از سیستم مهندسی سنگ و ماتریس اندرکنش جهت مطالعه اندرکنش‌های میان پارامترهای موثر در پدیده تولید ماسه استفاده شد و چگونگی تأثیر هر یک از پارامترها بر تولید ماسه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که پارامترهای تنش موثر، خواص پتروفیزیکی، خواص سیال، افت فشار، هندسه حفره تولید، فشار مخزن، خواص مکانیکی و تراکم و جهت حفر حفره تولید به ترتیب بیشترین اندرکنش را در تولید ماسه چاه دارند. در این میان پارامترهای مختلف موثر در تولید ماسه، تنش موثر یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم است. تغییرات تنش شعاعی ( $\sigma_r$ ) و مماسی ( $\sigma_\theta$ ) را می‌توان با تغییر فشار گل ( $P_m$ ) به نوعی کنترل نمود، اما این در مورد تنش محوری ( $\sigma_z$ ) درست نمی‌باشد. بنابراین با تعیین وزن بهینه گل حفاری می‌توان تنش‌های موثر اطراف چاه حاضر را تحت کنترل قرار داد. پارامترهای پتروفیزیکی نظیر چگالی، تخلخل و نفوذپذیری بیشترین تأثیر را بر سیستم دارند. خواص پتروفیزیکی هر سازند در مطالعات ژئومکانیکی بسیار با اهمیت می‌باشد. تنش موثر و نرخ تولید باعث تغییر در تخلخل و نفوذپذیری سنگ مخزن می‌شوند. تخلخل در برخی از بازه‌های مخزنی چاه ۶ آزادگان به ۲۵ تا ۳۵ درصد نیز می‌رسد این افزایش تخلخل تأثیر زیادی بر نرخ تولید نیز خواهد گذاشت. بعد از حفر چاه، یک فضای خالی درون سنگ مخزن بوجود می‌آید. فضای بوجود آمده در اندک زمانی توسط سیال درون سازند پر می‌شود بنابراین سیال حفاری نیز تأثیر زیادی بر سیستم دارد یعنی کل سیستم حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات نرخ جریان و ویسکوزیته سیال حفاری دارد. افت فشار بحرانی

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که سیستم تأثیر زیادی بر روی آن خواهد گذاشت. اگر مقاومت فشاری تک محوره کاهش یابد افت فشار بحرانی نیز کاهش می‌یابد. فشار مخزن با اندرکنشی کم، به تنهایی تأثیری در شروع ماسه‌دهی چاه و حفره تولید ندارد. در واقع تغییرات فشار مخزنی در هنگام تولید در مناطق سست که دارای مقاومت بسیار پایینی هستند، باعث می‌شود تا ذرات ماسه به شکل ذرات ریز در آمده و همراه با فشار سازند وارد چاه شوند. در میان پارامترهای موثر در رخداد تولید ماسه، سیستم تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی سازند نظیر مدول‌های الاستیکی، نسبت پواسون و مقاومت فشاری تک محوره خواهد داشت. خواص مکانیکی در مناطق پلاستیکی اطراف چاه تغییر می‌کنند. پارامتر تراکم و جهت حفر حفره تولید از میان پارامترهای دیگر دارای کمترین اندرکنش می‌باشند دارد، یعنی کل سیستم حساسیت کمتری نسبت به تراکم و جهت حفر حفره تولید دارد.

بعد از شناخت پارامتر موثر در ماسه‌دهی چاه، وزن بهینه گل حفاری تعیین گردید. در این مطالعه از سه معیار شکست استفاده شد تا وزن بهینه گل حفاری تعیین شود. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که معیار موگی - کلمب نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به دیگر معیارهای شکست برای پایداری دیواره چاه حاصل نموده است که در تطابق خوبی با گزارش نهائی حفاری و تکمیل چاه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در بازه‌های عمقی ۲۶۲۰ تا ۲۶۳۵، ۲۶۵۰ تا ۲۶۶۵ و ۲۹۵۰ تا ۳۰۰۰ متری با مشکل هرزروی گل مواجه هستیم ولی بدلیل این که افت فشار ( $\Delta P_s$ ) از حداقل مقاومت کششی سازند ( $T$ ) کمتر است ( $9/95 \text{ mpa} < 11 \text{ mpa}$ ) بنابراین در این فواصل ماسه تولید نخواهد شد. گزارشات حفاری نیز درستی این مطلب را تایید می‌کنند.

در بازه‌های عمقی ۲۶۲۵ تا ۲۶۵۰، ۲۶۷۰ تا ۲۶۹۰، ۲۷۵۰ تا ۲۷۸۵ و ۲۸۵۰ تا ۲۹۵۰ متری با پدیده شکستگی برشی مواجه هستیم. در این بازه‌ها حداکثر افت فشار بحرانی برابر  $14/32$  مگاپاسکال می‌باشد. این در صورتی است که مقدار افت فشار در چاه ۶ میدان آزادگان جهت تولید روزانه ۴۵۴۰ بشکه نفت، ۲۱ مگاپاسکال می‌باشد، بنابراین تحت این شرایط در بازه‌های عمقی که دچار شکستگی برشی شده‌اند (مناطق ۲، ۴، ۵ و ۶ در شکل ۵-۸) تولید ماسه رخ خواهد داد. گزارشات حفاری وجود

ذرات جامد را در این بخش تایید می‌کنند. در نهایت نیز مقدار نرخ بحرانی تولید برای چاه ۶ میدان آزادگان برابر با ۳۳۵۱ بشکه در روز تعیین گردید که از نرخ تولید کنونی یعنی ۴۵۴۰ بشکه در روز به مراتب کمتر است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای کاهش میزان تولید ماسه نرخ تولید به ۳۳۵۱ بشکه در روز کاهش یابد. اگر این نرخ تولید اقتصادی نمی‌باشد باید از ترکیبی از گراول پک و نرخ تولید برای کاهش تولید ماسه استفاده نمود.

## ۲-۶ پیشنهادها

در ادامه برخی از پیشنهادها که راه‌گشای کارهای آینده می‌باشد بیان گردیده است.

- یکی از محدودیت‌های موجود در انجام این تحقیق، عدم استفاده از مغزه برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی چاه بوده و آنالیز تنش بر پایه تخمین پارامترهای ژئومکانیکی بوده است. لذا استفاده از اطلاعات بدست آمده از آزمایش روی مغزه در تعیین این مشخصات می‌تواند باعث افزایش دقت آنالیز شود. لذا پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده این کار مدنظر قرار گیرد.
- پیشنهاد می‌شود از نرم‌افزار تحلیلی نظیر Flac یا Abaqus جهت بررسی پتانسیل تولید ماسه در چاه‌ها نیز استفاده گردد.
- برای تعیین دقیق محل و جهت شکستگی‌های برشی از نگارهای تصویری دیگری مانند UBI، FMI و FMS در کنار نگار قطر سنجی استفاده شود.





## مراجع

- آشتیانی عبدی، ه؛ (۱۳۸۸)، "دانش نوپای ژئومکانیک مخازن هیدروکربنی"، مجله اکتشاف و تولید، شماره ۶۷، ص ۲۰-۲۱.
- بداغ آبادی، س؛ (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "پیش‌بینی تولید ماسه با استفاده از روش‌های تجربی، فیزیکی و عددی"، دانشگاه تهران، دانشکده معدن، تهران.
- ترابی، ر؛ (۱۳۹۰)، "مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ". چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ص ۱۳.
- دالوند، ف و موسوی، م؛ (۱۳۸۵)، "دیاژنز و خصوصیات مخزنی سازند سروک در منطقه تنگ بیجار"، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین. مقاله شماره ۲۴۴.
- درویش زاده، ع؛ (۱۳۸۲). "زمین شناسی ایران"، چاپ سوم، انتشارات امیرکبیر، تهران، ص ۶۴۸.
- سعیدی، ا؛ (۱۳۸۸). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "تحلیل میدان تنش و نقش آن در شکستگی سنگ مخزن (سازند ایلام و سروک) چاه ۵۴ منصوری و بررسی ناپایداری حفر چاه در این مخزن"، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده معدن، تهران.
- شاعری، د و گشنیزجانی، م؛ (۱۳۷۹)، "گزارش نهایی حفاری و تکمیل چاه اکتشافی، میدان آزادگان، چاه ۶"، اداره کل حفاری اکتشاف.
- صادقی، م و رسولی، و؛ (۱۳۸۶)، "ارزیابی پایداری فضاهاى زیرزمینی به روش سیستم‌های مهندسی سنگ"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص ۲۲۱-۲۲۸.
- فتاح پور، و؛ (۱۳۹۱)، رساله دکتری تخصصی، "شبیه‌سازی فیزیکی و عددی تولید ماسه در چاه‌های نفت"، دانشگاه تهران، دانشکده معدن، تهران.
- کاظمی، م؛ (۱۳۹۱). "تعیین پارامتر لانه و LMR در یکی از مخازن جنوب ایران"، مجله ژئوفیزیک ایران، شماره ۳، ص ۸۳-۹۳.
- مرادزاده، ع و قوامی ربابی، ر؛ (۱۳۸۰)، "چاه‌پیمایی برای مهندسی". ویرایش دوم، جلد اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

## Reference

---

ملکی چشمه منش، ش؛ (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها و ارتباط آن با نگارهای چاه جهت ارزیابی پایداری چاه‌ها"، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، شاهرود.

نیک طبع، م؛ (۱۳۸۱)، "گزارش تکمیلی زمین شناسی چاه شماره ۵ میدان آزادگان"، اداره کل زمین‌شناسی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران.

Abbas, H.H., Habbtar, A.H. and Shebatalhamd, A., (2003). "Sand control during drilling, perforation, completion and production". SPE 13th Middle East Oil Show and Conference, Bahrain, SPE 81492, 81, PP. 57-87.

Addis, M.A., Last, N.C. and Yassir, N.A., (1994). "The estimation of horizontal stresses at depth in faulted regions and their relationship to pore pressure variation, in Rock mechanics in petroleum engineering", Int. J of SPE28140, 11, PP. 11-18.

Al-Adani, N. and Barati, A., (2003). "New hydraulic unit permeability approach with DSI". J of SPWLA-Japan, 32, PP. 9-21.

Al-Ajmi, A.M. and Zimmerman, R.W., (2006). "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion", Int. J of Rock Mech & Min. Sci, 43, PP. 1200-1211.

Al-Ajmi, A., (2006). PhD. Thesis, "Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Al-Awad, M. N., Desouky, S. E. M., (1997). "Sand Prediction from Saudi sandstone". Petroleum Engineering Department, College of Engineering, Saudi Arabia, 52. PP. 407-413.

Alipour, V. and Mirzaahmadian, Y., (2012). "Investigation of sand production onset: A new approach based on petrophysical logs". J of SPE150529, 10, PP. 1-18

Amos, S., Hallibuton, K. and Sharma, M., (2012). "A predictive model for sand production in poorly consolidated sands", IPTC 15087, International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, 15, PP.1-11.

Ameen, M. S., Smart, B. G. D., Somerville, J. M. C., Hammilton, S. & Naji, N. A., (2009). "Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia)". Marine and Petro Geology, 26, PP. 430- 444.

Anderson, T.L., (1995). "Fracture mechanics. Fundamentals and Applications". Second ED. CRC PRESS, Boca Raton.

Backers, T., Stephansson, O. and Rybacki, E., (2002). "Rock fracture toughness testing in mode 2- punch-Through shear Test", Int. J. of Rock mech & sci, 39, PP. 755-769.

## Reference

---

- Benjing, D., Cunzhi, C., Zuokun, Z., Yinghong, Z., Mingming, Q., Min, Z., (2008). "Questions and comprehensive economic evaluation model for sand management. American Rock Mech, Association", 42 , PP. 195-202.
- Biot, M.A., (1941). "General theory of three-dimensional consolidation". J of Appl. Phys., 12 , PP. 155–164.
- Boore, D.M. and Brown, L.T., (1998). "Comparing shear-wave experiment station explosive excavation research laboratory". Livermore, California, 14, PP. 29-32.
- Bowers, G.L., (1995). "Pore pressure estimation from velocity data; accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction". J of SPE Drilling and Completions, 5, PP. 89–95.
- Bratli, R.K. and Risnes, R., (1981). "Stability and Failure of Sand Arches". J of SPE8427, 21, PP. 236-248.
- Bradly, W.B., (1979). "Failure of inclined boreholes". J. of Energy Resour, Tech, 101, PP. 232-239.
- Brown, L.T., (1998). M.Sc. Eng. Thesis, "Comparison of Vs profiles from SASW and borehole measurements at strong motion sites in southern California", University of Texas at Austin, PP. 349.
- Carlson, J., Gurlay, D., King, G., Price-Smith, C. and Waters, F., (1992), "Sand control: why and how? ", completion/ stimulation, PP. 41-53.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., (1985). "Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks. Geophysics", 50, PP. 571-581.
- Ceryan, N. and Ceryan, S., (2008). "An application of the interaction matrices method for slope failure susceptibility zoning: Dogankent settlement area", Giresun, NE Turkey, 67, PP. 375-385.
- Chang, C., Zoback, M. and Khaksar, A, (2006). "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks", J of Petro. Sci & Eng, 51, PP. 223–237.
- Chang, C., Zoback, M.D., and Khaksar, A., (2006). "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks": J of Petro. Sci & Eng, 51, PP. 223–237.
- Chin, L.Y. and Ramos, G.G., (2002). "Predicting volumetric sand production in weak reservoirs", SPE/ISRM paper 78169, presented at the SPE/ISRM rock mechanics conference held in Irving, Texas, 78, PP. 161-170.

## Reference

---

- Christaras, B., Auger, F. and Mosse, E.. (1993). “ Determination of the elastic moduli of rocks Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods to the direct static one”. *Materials & structures*, 27, pp. 222-228
- Durrett, J.L., Golbin, W.T., Murray, J.W. and Tighe, R.E., (1977). “Seeking a Solution to Sand Control”, SPE6210, *J of Petro & Thech*, 29, PP. 1664-1672.
- Eaton, B.A., (1969). “Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations”, SPE3662, 21, PP. 1353-1360.
- Eaton, B.A., (1972). “The Effect of Overburden Stress on Geopressures Prediction from Well Logs”, Paper SPE 3719, 24, PP. 929–934.
- Eaton, B.A., (1975). “The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs”, Society of Petro Eng of AIME, Paper SPE 5544, 6, PP.1-11.
- Edwards, D., Gilland, J., (1993). “Systems Analysis and Design, McGraw-Hill International “, Editions - Printed in Singapore, 10, PP. 1-20.
- Eissa, E.A. and Kazi, A., (1988). “Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks”, *Int. J.of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 25, PP. 479-482.
- Eskandari, H., Rezaee, M.R. and Mohammadnia, M., (2000). “Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from well log data for a carbonate reservoir, south- west Iran”. *CSEG RECORDER*, PP. 42-48.
- Fairhurst, C., (1968). “Methods of determining in situ rock stresses at great depths”, *Missouri River Div Corps of Eng*, 68, PP.1-68
- Fattahpour, V., Moosavi, M. and Mehranpour, M., (2012). “An experimental rock mechanics investigation for sand production in oil fields”. *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium* will be held in San Francisco, USA, 53, PP. 591-597.
- Fjær, E., (1999). “Static and dynamic moduli of weak sandstones”, In: Amadei, B., Kranz, R.L., Scott, G.A., Smeallie, P.H. (Eds.), *Rock Mech for Industry*, 67, PP. 675-681.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Hordurt, P., Raaen, A.M. and Risnes, R., (2008). “Petroleum Related Rock Mechanics”, Elsevier press, *Development in petro Sci*, 53, PP. 341-367.
- Ghalambor, A., Koliba, R., Hayatdavoudi, A. and Alcocer C.F., (1988). ”Prediction of Sand Production in Gulf Coast Wells with the Production of Fsee- Water”, tPaper SPE Symposium on Formation Damage Contorl, Bakersfield, 8, PP. 43-52.
- Ghalambor, A., Hayatdavoudi, A., Alcocer, C.F. and Koliba, R.J., (1989). “Predicting Sand Production in U.S. Gulf Coast Gas Wells Producing Free Water”, *J of Petro & Thech*, 41, PP. 1336-1343.

## Reference

---

- Gjonnes, M., (1998). "Leak-off tests for horizontal stresses determination". SPE17147, J.Pet. Sci. Eng., 20, PP. 63-71.
- Gutierrez, M.A., Braunsdore, N.R., Couzens, B.A., (2006). "Evaluation, calibration and ranking of pore pressure prediction models". SPG1515, The leading Edge, PP. 1516–1523.
- Han, G. and Dusseault, M.B., (2005). "Sand stress analysis around a producing wellbore with a simplified Capillarity model", Int J of Rock Mech & Sci, 42, PP. 1015–1027.
- Hangen, D. and Dandan, H., (2005). "Sand production prediction and selection of completion methods for horizontal wells in intercampo oil field", Venezuela, SPE 93821.
- Heydari, M. and Rezaee, R. M., (2003). "Interpretation of 2-D Reflection Seismic Data and Seismic Stratigraphy of Darquain Field", SW of Iran. Petroleum Engineering and Development Company, PP.1-87.
- Hoek, E and Brown, E.T., (1980). "Empirical strength criterion for rock masses". J. Geotech. Engng Div., ASCE, 106, PP. 1013-1035.
- Hooshmandkoochi, A and Ghorbani,F., (2007). "First Installation Of An Openhole Expandable Sand Screen Completion In The Iranian Oilfield Operational Success And Production Enhancement-A Case History". National Iranian Oil Company, Paper SPE 106972.
- Hottmann, C.E., Johnson, R.K., (1965). "Estimation of formation pressures from log-derived shale properties". Paper SPE 1110, J of Petro & Thech, 17, PP. 717–722.
- Hubbert, M. K. and Willis, D. G., (1957). "Mechanics of hydraulic fracturing". Pet Trans AIME, 210, PP. 153-163.
- Hudson, J.A., (1981). "Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks". Geophys. J of R. Astr. Soc. 64, PP. 133–150.
- Hudson, J.A., (1992). "Rock engineering systems: theory and practice", Ellis Horwood, Chichester.
- Hudson, J.A. and Harrison, J.P., (1997). "Engineering rock mechanics: an introduction to the principles", Elsevier Science.
- Ito, T., Zoback, M.D., Peska, P., (2001). "Utilization of mud weights in excess of the least principal stress to stabilize wellbore", Soc Pet Eng Drilling Completions, PP. 221-230.
- Jambunathan, V., (2008). M.S. Thesis, "Study of mechanical properties of carbonates", he University of Oklahoma, Norma.

## Reference

---

- Jiao, Y. and Hudson, J.A., (1995). "The fully-coupled model for rock engineering systems", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 32, PP. 491-512.
- King, M.S., (1983). "Static and dynamic elastic moduli of rocks under pressure". In: *Proc. 11th US Symp. On Rock Mechanics*, pp. 329-351.
- Kingsley, E. and Abhulimen, A., (2008). "A Generic Model for the Prediction of Sand Production in Oil and Gas Well Systems". OTC 19185, Offshore Tech. Conference, Chemical and Petro & Eng, University of Lagos, PP. 1-25.
- Kirsch, (1898). "Die Theorie der Elastizitat und die Bedürfnisse der Festighetslehre. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*,vo"l. Vol. 42, PP. 797-807.
- Kooijman, A. P., Van den Hoek, P. J., De Bree, Ph., Kenter, C. J., Zheng, Z. And Khodaverdian, M., (1996). "Horizontal Wellbore Stability and Sand Production in Weakly Consolidated Sandstones", SPE 36419, Presented in the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, USA, PP. 35-48.
- Krief, M., Garat, J., Stellingwerf, J. and Venter, J., (1990). "A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full wave from sonic)", *log Anal.* 31, PP. 35-369.
- Lopez, J.L., Rappold, P.M., Ugueto, G.A., Wieseneck, J.B., Vu, K., (2004). "Integrated shared earth model: 3D pore-pressure prediction and uncertainty analysis". *The Leading Edge*, 23, pp. 52–59.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Godfrey, N., (1995). "predicting stress-induced velocity anisotropy in rocks" SEG94305, 60, PP. 1081-1087.
- McKean, M. and Addis, M., (1990). "Wellbore stability: the effect of strength criteria on mud weight recommendations". In: *Proceedings of the 65th Annual Technical Conference and Exhibition, Society of petro & eng. New Orleans, SPE 20405.*
- Nelson, E.J., (2005). "Transverse drilling- induced tensile fracture in the west Tuna area", Gippsland Basin, Astralia: implications for the in situ stress regime, 42, PP. 361-371.
- NISOC, (1382). "Simplified table of rock unit in Zagros area". Geology department report, No. 5252.
- Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, 11–13 September, SPE 100944.
- Papamichos, E., (1999). "Sand production and well productivity in conventional reservoirs", *Rock Mechanics for Industry*, Amadei, Kranz, Scott & Smeallie (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 052 3.
- Papamichos, E., Cerasi, P., Stenebraten, J.F., Berntsen, A.N., Ojala, I., Vardoulakis, I., Brignoli, M., Fuh, G.F., Hans, G., Nadeem, A., Ray, P., Wold, S., (2010). "Sand

## Reference

---

production rate under multiphase flow and water breakthrough”, ARMA 10-340, 44th US rock mech sym & 5th US-Canada Rock mech sym, Salt lake city, USA.

Parra, J.G., Celis, E. and Gennaro, S.D., (2003). “Wellbore Stability Simulations for Underbalanced Drilling Operations in Highly Depleted Reservoirs”. SPE/CIM, Int Conference on Horizontal Well Tech, Calgary, Alberta, SPE 65512.

Penberthy, W.L. and Shaughnessy, C.M., (1992). “Sand Control”.SPE Series on Special Topics, Vol. 1.

Plona, T.J. and Cook J.M., (1995). “Effects of stress cycles on static and dynamic Young's moduli in castle gate sandstone”. American Rock Mech. Association. Document ID: 95-0155.

Pyatakhin, M.V., (2006). “Stabilization of porous reservoir by stressed filter”, J of Petro Sci & Eng, 50, PP. 227– 240.

Qiu, K., Maraden, J.R., Alexander, J., Retnanto, A., Abdelkarim, O.A. and Shatwan, M., (2006). “Practical approach to achieve accuracy in sanding prediction”. SPE100904, Oil & Gas Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, 97, PP.1-19.

Ranjith, P.G., Perera, M.S.A., Perera, W.K.G., Wu, B. and Choi, S.K., (2013), “Effective parameters for sand production in unconsolidated formations: An experimental study” J of Petro Sci & Eng, 105, PP. 34–42.

Rasouli, V., Pallikathekathil, Z.J. and Mawuli, E., (2011). “The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: A case study in Blacktip field, North Australia”, J of petro sci & eng, 76, PP. 195- 212.

Richard, G., Wan and Jin Wang, (2002). “Modeling sand production and erosion growth under combined axial and radial flow”. SPE/Petroleum Society of CIM/CHOA 80139, presented at the 2002 SPE International Thermal Operations and heavy oil symposium and International Horizontal well technology conference held in Calgary, Canada.

Sanaee, R., Shadizadeh, S.R. and Riahi, M.A., (2010). “Determination of the stress profile in a deep borehole in a naturally fractured reservoir”. Int J of Rock Mech & Sci, 47, PP. 599-605.

Sayers, C.M., Johnson, G.M., Denyer, G., (2002). “Predrill pore pressure prediction using seismic data” SEG, 67, PP. 1286–1292.

Singh, R., Kainthola, A. and Singh, T.N., (2012). “Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach”. ASC, 12, PP. 40-45.

Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G., (1996). “Soil Mechanics in Engineering Practice”, 3 rd Edition. John Wiley & Sons.

Thiercelin, M.C., and Roegiers, J.C., (2003). “Formation characterization rock mechanics- reservoir stimulation”, M.J Economides, and K.G. Nolte, ed. T Edition.

## Reference

---

Tiab, D. and Donaldson, E. C., (2004). "Petrophysics (Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties)", Gulf Professional Publishing, Second edition.

Tingay, M., (2008). "Borehole breakout and drilling- induced fracture analysis from image logs". World Stress Map Project. World Stress Map Project, PP. 1-8.

Tixier, M. P., Loveless, G. W. and Anderson, R. A., (1975). "Estimation of Formation Strength from the Mechanical-Properties Log". J of Petro & Thech, PP. 283-293.

Tronvoll, J. and Fjaer, E., (1994). "Experimental study of sand production from perforation cavities". Int J of Rock Mech & Sci, 31, PP. 394–410.

Van Buren, M. and Van den Broek, L., (1999). "Trial of an Expandable Sand Screen to Replace Internal Gravel Packing, Petroleum Development Oman, Calum Whitelaw", Petroline Wellsystems. Paper SPE/IADC 57565.

Vaziri, H., Xiao, Y., Palmer, I., (2002). "Assessment of several sand prediction models with particular reference to HPHT wells". SPE/ISRM 78235, Rock Mech. Conference, Irving, TX, PP. 20–23.

Veeken, C.A.M., Davies, D.R., Kanter, C.J. and Kooijman, A.P., (1991). "Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach". SPE 22792, Society of Petroleum Engineers. 66th Annual Technical Conference.

Venkitaraman, A., Behrmann, L.A. and Noordermeer, A.H., (2000). "Perforating requirements for sand prevention". SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, SPE 58788.

Vernik, L. and Zoback, M.D., (1992). "Estimation of maximum horizontal principal stress magnitude from stress-induced well bore breakouts in the Cajon Pass scientific research borehole". J of Geophys Res; 97; PP. 5109–5119.

Vernik, L. and Bruno, M., (1993). "Empirical relation between compressional strength and porosity of siliciclastic rocks". Int. J of Rock Mech & Sci. & Geomech. Abstr. 30, PP. 677-680.

Wadhwa, R.S., Ghosh, N. and Subba Rao, Ch., (2010). "Empirical relation for estimating shear wave velocity from compressional wave velocity of rock". J. Ind. Geophys. Union, 14, PP. 21-30.

Wang, H. F., (2000). "Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology". Princeton, NJ, Princeton University Press.

Wang, J., Wan, R.G., Settari, A., Walters, D. and Liu, Y.N., (2004). "Sand Production and Instability Analysis in a Wellbore using a Fully Coupled Reservoir-Geomechanics Model", ARMA/NARMS 04-494, presented at Gulf Rocks, the 6th North America Rock Mech Sym. (NARMS), held in Houston, Texas, June. PP. 5 – 9.



## Reference

---

Ward, C.D. and Andreassen, E., (1997). "Pressure while drilling data improves reservoir drilling performance", SPE 37588, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam.

Willson, S.M., Moschovidis, J.R. and Palmer, I.D., (2002). "New model for predicting the rate of sand production", Int. J of Society of petro eng . SPE/ ISRM 78168. PP. 1-9.

Wu, B., Yaakub, M.A., Tan, C.P. and Johar, Z., (2004). "Sand Production Prediction Study for a Multi-Field Gas Development". American Rock Mechanics Association, NARMS 04-504.

Wu, B., Tan, C.P. and Lu, N., (2006). "Effect of water cut on sand production- an experimental study". 2005, Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, SPE 92715.

Yasar, E. and Erdogan, Y., (2004). "Correlating sound velocity with the density", compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. Int. J of Rock Mech & Sci, 41, PP. 871–875.

Yeow, L.M., Johar, Z., Wu, B., Tan, C. and Azriyuddin Yaakub, M., (2004). "Sand production prediction study using empirical and laboratory approach for a multi-field gas development". SPE 87004, presented at the SPE Asia Pacific Conference on integrated modeling for asset management held in Kuala Lumpur, Malaysia.

Younessi, A. and Rasouli, V., (2010). "Rock engineering systems adopted for sanding prediction in perforation tunnels", J of APPEA, PP. 613.

Zhang, J., Standifird, W.B., Lenamond, C., (2008). "Casing ultra-deep, ultra long salt sections in deep water: a case study for failure diagnosis and risk mitigation in record-depth well". Paper SPE 114273 Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA.

Zhang, J., (2011). "Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches". ESR, 108, PP. 50–63.

Zhou, Z.Y., Yu, A.B. and Choi, S.K., (2011). "numerical simulation of the liquid-induced erosion in a weakly bonded sand assembly, Powder Technology". 211, PP.237–249.

Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D. and Wiprut, D.J., (2003). "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells". Int J of Rock Mech & Sci, 40, PP. 1049-1076.

Zoback, M.D., (2007). "Reservoir Geomechanics". Cambridge University Press, Cambridge, ISBN-978-0-521-77069-9.

## Refrence

---

پیوست الف

فرم نظرسنجی ارائه شده در این

مطالعه

## الف-۱- مقدمه

پارامترها و متغیرهای موثر در پروژه‌های مهندسی سنگ، اثرات خاصی بر روی یکدیگر و همین‌طور بر کل سیستم دارند. مطالعه پارامترهای مختلف موثر در پروژه‌های مهندسی امری ضروری به‌شمار می‌آید. هادسون (۱۹۹۲) سیستم مهندسی سنگی را ارائه کرده است که در آن به بررسی ارتباط درونی میان پارامترهای مختلف موثر در پروژه‌های مهندسی سنگ پرداخته شده است. هدف از بکارگیری سیستم مهندسی سنگ، شناسایی پارامترهای مربوط به مشکلات و اثرات متقابل آنها نسبت به یکدیگر است. برای دست یافتن به این هدف و تعیین اثرات متقابل پارامترها نسبت به یکدیگر از سیستم کدگذاری نیمه کمی خیره استفاده شده است. این سیستم، اندرکنش میان پارامترهای موثر را به صورت مقدار کمی از صفر (هنگامی که پارامترها اثری بر یکدیگر ندارند) تا ۴ (هنگامی که پارامترها بیشترین اثر را بر یکدیگر دارند) نام‌گذاری می‌کند. کدهای شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر اندرکنش کوچک، متوسط و بزرگ میان پارامترها خواهند بود.

## الف-۲- نحوه تکمیل فرم نظر سنجی

چندین نکته در مورد ماتریس اندرکنش وجود دارد. یک، بخش‌های غیرقطری برحسب شرایط معمول و مرسوم یک ماتریس نام‌گذاری می‌شوند. مثلاً شماره اول نماینده سطر و شماره دوم نماینده ستون در هر بخش است. دوم، ماتریس پادمتقارن است. باید توجه داشت که جهت بررسی اندرکنش‌ها در ماتریس، ساعتگرد است یعنی تأثیر مکانیک سنگ بر مهندسی سنگ در ستون چهارم و تأثیر مهندسی سنگ بر مکانیک سنگ در سطر چهارم نشان داده شده است. مجموعه‌ی مولفه‌های ماتریس می‌توانند، مولفه‌های مربوط به ساختار اولیه و یا مربوط به تأثیرات مهندسی باشند. عناصر و مولفه‌هایی که در ماتریس زیر وجود دارند، قسمتی از یک طرح کلی هستند. المان ۳۲ تأثیر خواص سیال بر خواص مکانیکی را نشان می‌دهد که در این المان فرسایش منجر به تغییر خواص مکانیکی سازند

شود. با این حال، المان مکمل یعنی ۲۳ تأثیر خواص مکانیکی بر خواص سیال را بررسی می کند. باید توجه داشت تأثیر خواص مکانیکی بر خواص سیال الزاماً با تأثیر خواص سیال بر خواص مکانیکی یکسان نیست. عملیات مشابه برای المان‌های دیگر نیز انجام پذیرفت. که در آن تأثیر پارامترهای مختلف بر یکدیگر معین می گردد. شکل الف-۱ ماتریس اندرکنش کامل طراحی شده در این مطالعه برای پیش‌بینی تولید ماسه را نشان می‌دهد.



پیوست ب

تنش‌های اطراف گمانه و

معیارهای شکست

## ب-۱- مقدمه

سازندهای زیرزمینی در معرض تنش فشاری عمودی ناشی از وزن طبقات بالایی و تنش‌های افقی ناشی از لایه‌های فشارزای جانبی محصور شده، قرار دارند. قبل از حفاری گمانه، توده سنگ تحت این تنش‌های برجا در حالت تعادل قرار دارند که بعد از عملیات حفاری این تعادل از بین می‌رود. هنگامی که گمانه‌ای حفر می‌شود، باری که توسط سنگ برداشته شده تحمل می‌شد به سنگ‌های مجاور برای برقراری مجدد تعادل انتقال می‌یابد. در نتیجه، تمرکز تنش در اطراف چاه ایجاد می‌شود و همچنین تنش برجا تعدیل می‌یابد. برای ارزیابی پتانسیل ناپایداری مکانیکی گمانه، یک مدل ساختاری مورد نیاز است تا مقدار تنش در اطراف یک گمانه شناخته شود.

## ب-۲- تنش در اطراف چاه مایل

توزیع تنش در اطراف یک حفره دایره‌ای درون یک صفحه نامحدود در حالت کشش یک بعدی بوسیله کرچ<sup>۳۴</sup> ارائه شد (Kirsch, 1898). روابط کرچ به آسانی برای چاه قائم با تنش‌های برجای نامساوی تعمیم داده شد. این روش حل همچنین به معادلات کرچ شناخته شده است. مرجع استاندارد و قابل دسترسی در متون مکانیک سنگ نفت برای حل کامل برادلی<sup>۳۵</sup> می‌باشد (Bradlly, 1979).

## ب-۲-۱- معادلات انتقال

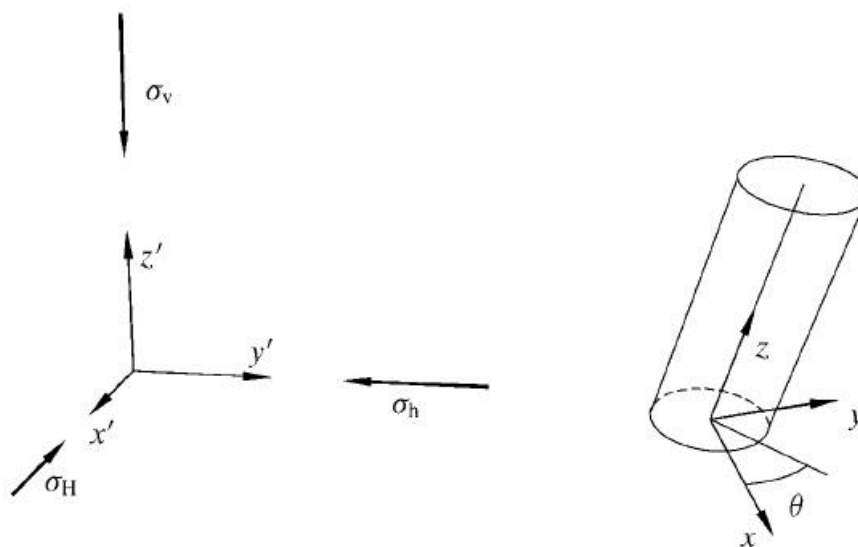
تنش‌های برجای اصلی سیستم مختصاتی را تعریف می‌کنند که در اینجا با  $(x', y', z')$  بیان شده و در شکل (ب-۷-۱) نشان داده شده است. تنش  $\sigma_v$  موازی با  $z'$ ،  $\sigma_H$  موازی با  $x'$  و  $\sigma_h$

<sup>34</sup> - Kirsch

<sup>35</sup> - Bradlly



موازی با  $y'$  در نظر گرفته می‌شود. سیستم مختصات دومی  $(x, y, z)$  تعریف می‌شود که محور  $z$  در راستای محور چاه، محور  $x$  در جهت شعاع انتهایی چاه و محور  $y$  افقی می‌باشد.



شکل ب-۱: سیستم مختصات برای چاه انحرافی (Fjaer et al, 2008)

انتقال از  $(x', y', z')$  به  $(x, y, z)$  در دو حالت می‌تواند به دست آید (شکل ب-۲):

I. چرخش  $a$  حول محور  $z'$

II. چرخش  $i$  حول محور  $y$

انتقال از نظر ریاضی بوسیله کسینوس زاویه میل بدست می‌آید، که  $I_{ij}$  کسینوس زاویه بین محور  $i$  و

محور  $j'$  می‌باشد. با مراجعه به شکل (ب-۳) روابط زیر به درستی بدست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 l_{xx'} &= \cos a \cos i & l_{xy'} &= \sin a \cos i & l_{xz'} &= -\sin i \\
 l_{yx'} &= -\sin a & l_{yy'} &= \cos a & l_{yz'} &= 0 \\
 l_{zx'} &= \cos a \sin i & l_{zy'} &= \sin a \sin i & l_{zz'} &= \cos i
 \end{aligned}
 \tag{ب-۱}$$

در سیستم مختصات  $(x, y, z)$  مقادیر تنش‌های  $\sigma_v$ ،  $\sigma_H$  و  $\sigma_h$  مطابق زیر می‌باشد

$$\sigma_x^0 = l_{xx'}^2 \cdot \sigma_H + l_{xy'}^2 \cdot \sigma_h + l_{xz'}^2 \cdot \sigma_v \tag{ب-۲}$$

$$\sigma_y^0 = l_{yx'}^2 \cdot \sigma_H + l_{yy'}^2 \cdot \sigma_h + l_{yz'}^2 \cdot \sigma_v \tag{ب-۳}$$

$$\sigma_z^0 = l_{zx}^2 \cdot \sigma_H + l_{zy}^2 \cdot \sigma_h + l_{zz}^2 \cdot \sigma_v \quad (4-ب)$$

$$\tau_{xy}^0 = l_{xx}^2 \cdot l_{yx}^2 \cdot \sigma_H + l_{xy}^2 \cdot l_{yy}^2 \cdot \sigma_h + l_{xz}^2 \cdot l_{yz}^2 \cdot \sigma_v \quad (5-ب)$$

$$\tau_{yz}^0 = l_{yx}^2 \cdot l_{zx}^2 \cdot \sigma_H + l_{yy}^2 \cdot l_{zy}^2 \cdot \sigma_h + l_{yz}^2 \cdot l_{zz}^2 \cdot \sigma_v \quad (6-ب)$$

$$\tau_{zx}^0 = l_{zx}^2 \cdot l_{xx}^2 \cdot \sigma_H + l_{zy}^2 \cdot l_{xy}^2 \cdot \sigma_h + l_{zz}^2 \cdot l_{xz}^2 \cdot \sigma_v \quad (7-ب)$$

نمای  $^0$  روی تنش‌های بیانگر تنش‌های بکر سازند می‌باشد.

روش آسان‌تر بیان تنش‌ها بر حسب سیستم مختصات قطبی  $r$ ،  $\theta$  و  $z$  که  $r$  بیانگر فاصله از محور

چاه،  $\theta$  زاویه آزیموت نسبت به محور  $x$  و  $z$  موقعیت در راستای محور چاه می‌باشد (شکل ب- ۸).

مقادیر تنش در مختصات قطبی عبارتست از:

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{\sigma_x^o + \sigma_y^o}{2} \left(1 - \frac{R_W^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x^o - \sigma_y^o}{2} \left(1 + 3\frac{R_W^4}{r^4} - 4\frac{R_W^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\ & + \tau_{xy}^o \left(1 + 3\frac{R_W^4}{r^4} - 4\frac{R_W^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + P_W \frac{R_W^2}{r^2} \end{aligned} \quad (8-ب)$$

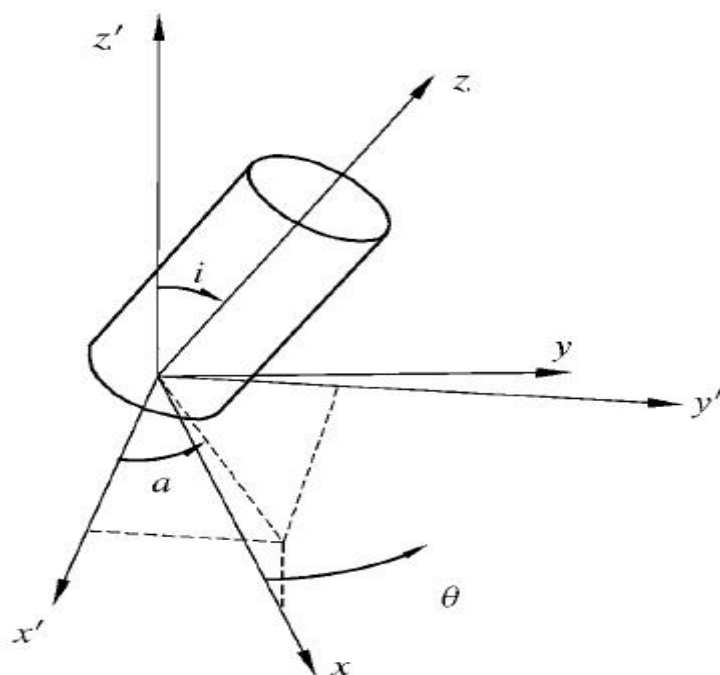
$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{\sigma_x^o + \sigma_y^o}{2} \left(1 + \frac{R_W^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x^o - \sigma_y^o}{2} \left(1 + 3\frac{R_W^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ & + \tau_{xy}^o \left(1 + 3\frac{R_W^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - P_W \frac{R_W^2}{r^2} \end{aligned} \quad (9-ب)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^o - \nu_{fr} \left[ 2(\sigma_x^o - \sigma_y^o) \frac{R_W^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy}^o \frac{R_W^2}{r^2} \sin 2\theta \right] \quad (10-ب)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y^o - \sigma_x^o}{2} \left(1 - 3\frac{R_W^4}{r^4} + 2\frac{R_W^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy}^o \left(1 - 3\frac{R_W^4}{r^4} + 2\frac{R_W^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (11-ب)$$

$$\tau_{r\theta} = (-\tau_{xz}^o \sin \theta + \tau_{yz}^o \cos \theta) \left(1 + \frac{R_W^2}{r^2}\right) \quad (12-ب)$$

$$\tau_{rz} = (\tau_{xz}^o \cos \theta + \tau_{yz}^o \sin \theta) \left(1 - \frac{R_W^2}{r^2}\right) \quad (13-ب)$$



شکل ب-۲: هندسه انتقال (Fjaer et al, 2008)

در روابط فوق شعاع چاه با  $R_w$ ، فاصله از چاه با  $r$ ، نسبت پواسون شکستگی می باشد. همانطور که در شکل (ب-۲) مشخص است مقدار نفوذ به چاه بر حسب  $r^{-2}$  و  $r^{-4}$  می باشد که با افزایش  $r$  به سرعت حذف می شود. حل مسائل بستگی به زاویه  $\theta$  داشته و بیان کننده تغییر تنش ها با مختصات اطراف چاه می باشد. در حالت کلی تنش های برشی غیر صفر می باشند. بنابراین  $\sigma_r$ ،  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_z$  برای چاه در جهت های دلخواه، تنش های اصلی نمی باشند. در دیواره چاه معادلات بصورت زیر ساده می شوند:

$$\sigma_r = P_w \quad (ب-۱۴)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^o + \sigma_y^o - 2(\sigma_x^o - \sigma_y^o) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^o \sin 2\theta - P_w \quad (ب-۱۵)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^o - \nu_{ff} [2(\sigma_x^o - \sigma_y^o) \cos 2\theta + 4\tau_{xy}^o \sin 2\theta] \quad (ب-۱۵)$$

$$\sigma_r = P_w \quad (ب-۱۷)$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz}^o \sin \theta + \tau_{yz}^o \cos \theta) \quad (ب-۱۸)$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad (ب-۱۹)$$

معادلات بالا در تحلیل الاستیک خطی برای پایداری چاه استفاده می‌شوند. تنش‌های بیان شده به-وسیله معادلات (ب-۱) تا (ب-۷) و (ب-۸) تا (ب-۱۹) تنش‌های مواد غیر متخلخل یا برای مواد متخلخل با فشار منفذی ثابت می‌باشند (Fjaer et al, 2008).

### ب-۳- تنش در اطراف چاه‌های قائم

یکی از پرکاربردترین معادلات ارائه شده برای تعیین تنش در دیواره و اطراف چاه معادلات کرچ<sup>۳۶</sup> می‌باشد. در چاه‌های قائم با فرض  $S_v$  به عنوان تنش اصلی قائم، تنش‌های مؤثر در فاصله  $R$  در دستگاه مختصات استوانه‌ای بر اساس معادلات کرچ به صورت زیر می‌باشد (ملکی چشمه‌منش، ۱۳۹۱):

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{h\min})\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{h\min})\left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2} \quad (\text{ب-۲۰})$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{h\min})\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(S_{H\max} - S_{h\min})\left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2} \quad (\text{ب-۲۱})$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(S_{H\max} + S_{h\min})\left(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta \quad (\text{ب-۲۲})$$

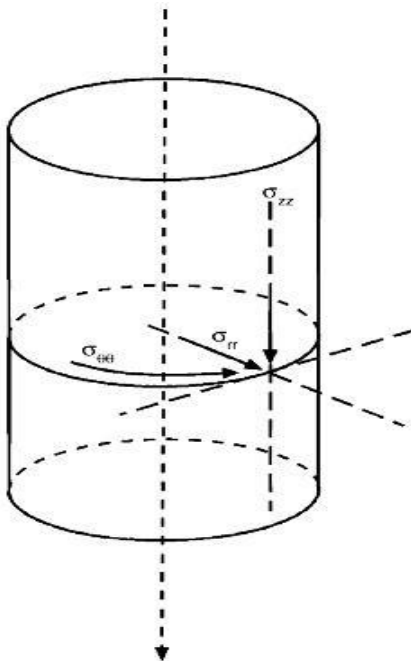
$$\sigma_{zz} = S_v - 2\nu(S_{H\max} - S_{h\min})\cos 2\theta - P_p \quad (\text{ب-۲۳})$$

در روابط بالا  $\tau_{r\theta}$  تنش برشی شعاعی،  $\nu$  نسبت پواسون،  $\Delta P$  اختلاف فشار گل و فشار منفذی،  $\theta$  زاویه‌ای آزیموت  $S_{H\max}$  و  $R$  شعاع چاه می‌باشد. بنابراین، سه تنش اصلی القایی در دیواره چاه به صورت زیر می‌باشند (شکل ب-۳).

- تنش شعاعی مؤثر ( $\sigma_{rr}$ ) عمود بر چاه عمل می‌کند.
- تنش محوری مؤثر ( $\sigma_{zz}$ ) موازی با محور چاه عمل می‌کند.

<sup>36</sup> Kirsch

- تنش مماسی موثر ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) عمود بر صفحه  $\sigma_{rr}$  و  $\sigma_{zz}$  عمل می کند.



شکل ب-۳: نمایی شماتیک تنش‌های مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ )، محوری ( $\sigma_{zz}$ ) و شعاعی ( $\sigma_{rr}$ ) اطراف چاه قائم (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱)

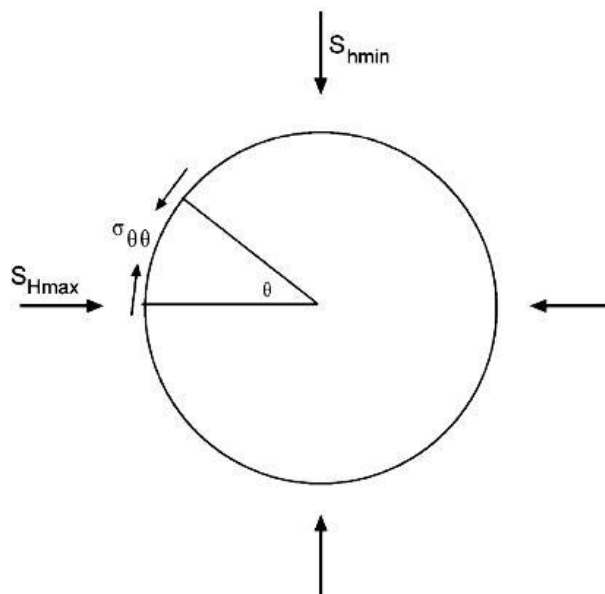
معادلات کرچ عموماً برای محدوده دیواره چاه ساده‌سازی می‌شوند تا بیانگر تغییرات تنش در دیواره باشند. از آنجا که چاه‌های نفتی تحت فشار بالای گل حفاری می‌باشند و کیک گل در دیواره چاه تشکیل می‌شود، فرض نفوذ ناپذیری برای سنگ مخزن معتبر به نظر می‌رسد. در شکل (ب-۴) تنش مماسی در مقطع چاه برای زاویه  $\theta$  نشان داده شده است. اگر تنش‌ها در دیواره چاه بررسی شوند ( $R = r$ ) معادلات کرچ به صورت روابط زیر ساده می‌شوند.

$$\sigma_{\theta\theta} = (S_{H\max} + S_{h\min}) - 2(S_{H\max} - S_{h\min}) \times \cos 2\theta - \Delta P \quad (\text{ب-۲۴})$$

$$\sigma_{rr} = \Delta P \quad (\text{ب-۲۵})$$

$$\sigma_{zz} = S_v - 2\nu(S_{H\max} - S_{h\min}) \cos 2\theta - P_p \quad (\text{ب-۲۶})$$

در رابطه بالا  $\Delta P$  تفاضل فشار چاه (وزن گل) و فشار منفذی می‌باشد.



شکل ب-۴: مقطع چاه و موقعیت تنش‌های اطراف چاه (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱)

روابط کرچ می‌تواند برای محاسبه تنش مماسی حداقل در دیواره چاه (در  $\theta = 0^\circ, 180^\circ$  موازی  $S_{h\min}$ ) ساده سازی شده و به صورت زیر بیان گردد.

$$\sigma_{\theta\theta}^{\min} = 3S_{h\min} - S_{H\max} - \Delta P \quad (\text{ب-۲۷})$$

در حالی که مقدار تنش مماسی حداکثر در دیواره چاه (در  $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ ) از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\sigma_{\theta\theta}^{\max} = 3S_{H\max} - S_{h\min} - \Delta P \quad (\text{ب-۲۸})$$

تفاضل این دو تنش برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{\theta\theta}^{\max} - \sigma_{\theta\theta}^{\min} = 4(S_{H\max} - S_{h\min}) \quad (\text{ب-۲۹})$$

رابطه ب-۲۹ دامنه تغییرات سینوسی تنش مماسی در دیواره چاه را نشان می‌دهد.

بر اساس رابطه کرچ، تمرکز تنش با فاصله از دیواره چاه تغییر می‌کند. تنش مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) در راستای تنش افقی حداقل دارای بالاترین مقدار خود است که این با افزایش فاصله از دیواره چاه کاهش می‌یابد. این تنش در راستای تنش افقی حداکثر روی دیواره چاه ( $R = r$ ) دارای کم‌ترین

مقدار است. در شرایطی که فشار گل حفاری از تنش مماسی حداقل بیشتر باشد، احتمال ایجاد شکستگی کششی در دیواره وجود دارد. در حالی که اگر فشار گل کمتر از تنش مماسی حداکثر باشد، شکستگی برشی در دیواره اتفاق خواهد افتاد.

## ب-۴- معیارهای شکست

مشکلات مربوط به خردشدگی و شکستگی دیواره چاه در خلال حفاری با انتخاب صحیح وزن گل حفاری تا حدود زیادی مرتفع خواهد شد. بنابراین، انتخاب وزن بهینه گلی که بتواند موجبات پایداری چاه را فراهم سازد، بسیار مهم و حائز اهمیت خواهد بود. این مسئله می‌تواند از طریق انتخاب یک معیار شکست مناسب که شرایط تنش‌های به دست آمده را به خوبی مدل‌سازی می‌کند، برطرف گردد. سه معیار شکست موهر-کلمب، موگی-کلمب و هوک-براون عموماً در مسائل مربوط به پایداری چاه برای تعیین حداقل و حداکثر فشار گل حفاری (فشار مجاز) برای جلوگیری از شکست برشی و کششی دیواره چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ zoback, 2007). در هر یک از این معیارهای شکست چنانچه فشار گل حفاری ( $P_m$ ) داخل چاه کوچک‌تر یا مساوی حداقل فشار مجاز گل ( $P_{mb}$ ) باشد دیواره چاه در بخش‌هایی دچار شکست برشی شده و در مواردی که فشار گل مساوی و یا بزرگ‌تر از حداکثر فشار مجاز گل ( $P_{mf}$ ) باشد، بخش‌هایی از دیواره چاه دچار شکست کششی خواهد شد. از این رو برای جلوگیری از بروز شکست برشی و کششی در دیواره چاه محدوده مجاز فشار گل باید در رابطه‌ی زیر صدق کند (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱):

$$P_{mb} < P_m < P_{mf} \quad (\text{ب-۳۰})$$

## ب-۴-۱- معیار شکست موهر - کلمب

این معیار مدلی ساده اما موثر برای تعیین مقاومت برشی سنگ ارائه می‌کند. بر طبق معیار موهر - کلمب، پارامترهایی مانند تنش قائم ( $\sigma_n$ )، چسبندگی ( $C$ ) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) در مقاومت برشی سنگ موثر هستند. بر اساس این معیار، گسیختگی در یک صفحه وقتی اتفاق می‌افتد که رابطه میان تنش برشی و قائم به صورت زیر باشد (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (\text{ب-۳۱})$$

در این معیار فرض بر این است که تنش  $\sigma_2$  یا تنش میانی تأثیری بر شکست سنگ ندارد که البته در همه موارد شاید درست نباشد. بنابراین مقادیر به دست آمده از این معیار عموماً مقادیر قابل اعتمادی نیستند. در آزمایش سه محوره ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ ) این معیار به صورت معادله زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (\text{ب-۳۲})$$

مقدار  $q$  بر حسب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بصورت زیر بیان می‌شود.

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{ب-۳۳})$$

مقاومت فشاری تک محوره ( $\sigma_c = C_0$ ) و مقاومت کششی ( $\sigma_t$ ) تک محوره نیز به صورت زیر بیان می‌شوند:

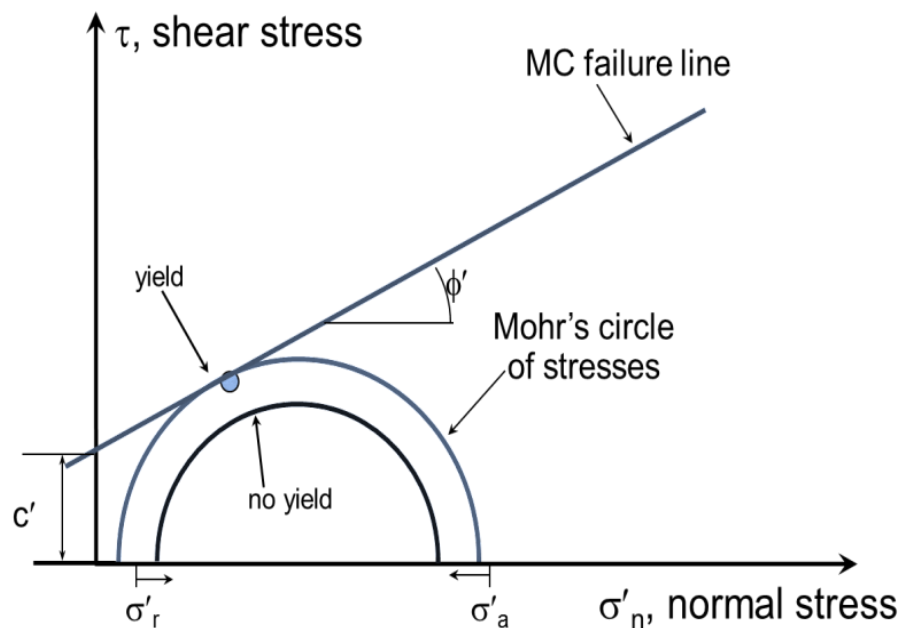
$$\sigma_c = C_0 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{ب-۳۳})$$

$$\sigma_t = \frac{2C \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (\text{ب-۳۴})$$

بر اساس تنش‌های اصلی به دست آمده و زاویه شکست در این معیار می‌توان دایره موهر را رسم نمود. با برازش منحنی بر دایره موهر به دست آمده می‌توان مدل و مقدار مقاومت برشی سنگ را تعیین نمود. همان طور که در شکل ب-۵ نشان داده شده است، با برازش منحنی بر دایره موهر، می‌توان گفت که نقاط زیر سطح منحنی نقاط پایدار هستند و تحت آن‌ها شکست رخ نخواهد داد.



حال اگر نقطه محاسبه شده بر اساس تنش‌های اصلی روی منحنی بی‌افتد، نشان دهنده آن است که سنگ تحت شرایط بحرانی تنش قرار دارد. اما اگر نقطه محاسبه شده در بالای منحنی برآزش شده قرار گیرد، سنگ تحت تنش مد نظر خواهد شکست.



شکل ب-۵: منحنی مربوط برآزش بر دایره موهر جهت محاسبه مقاومت برشی سنگ بر اساس معیار موهر - کلمب

(ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ zoback, 2007).

#### ب-۴-۱-۱- وزن بهینه گل بر اساس معیار موهر - کلمب

همان‌طور که بیان شد، تنش‌های اطراف دیواره چاه عبارتند از تنش‌های مماسی ( $\sigma_\theta$ )، تنش شعاعی ( $\sigma_r$ ) و تنش محوری ( $\sigma_z$ ). تغییرات تنش شعاعی و مماسی را می‌توان با تغییر فشار گل ( $P_m$ ) به نوعی کنترل نمود، اما این در مورد تنش محوری درست نمی‌باشد. بنابراین هرگونه تغییری در فشار گل فقط روی تنش مماسی و شعاعی تأثیر گذار خواهد بود. دو نوع ناپایداری عموماً در دیواره چاه به وجود می‌آید:

**حالت اول:**  $\sigma_r \leq \sigma_\theta$  که مرتبط با شکستگی برشی است. یعنی افزایش بیش از اندازه تنش

مماسی باعث شکستگی برشی در دیواره چاه می‌شود.

**حالت دوم:**  $\sigma_r \geq \sigma_\theta$  مرتبط با شکستگی‌های کششی است. یعنی افزایش بیش از حد تنش

شعاعی باعث شکستگی‌های کششی دیواره چاه می‌شود.

با افزایش فشار هیدرواستاتیک گل حفاری ( $P_m$ )، تنش شعاعی ( $\sigma_r$ ) افزایش می‌یابد و مقدار تنش مماسی ( $\sigma_\theta$ ) به سمت مقاومت کششی سنگ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین حد بالای فشار گل ( $P_{mf}$ ) در ارتباط با شکستگی کششی بوده طوری که باید کمتر از مقدار  $\sigma_\theta$  باشد. با توجه به شرایط بیان شده سه حالت زیر برای تنش‌های اصلی دیواره چاه ( $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$ ) وجود دارد که حد بالای فشار گل را تعیین می‌کنند.

$$\text{الف- } \sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z, \text{ ب- } \sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta, \text{ پ- } \sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$$

در راستای  $\theta = 0$  یا  $\theta = \pi$  مقدار تنش مماسی حداقل است و شکست کششی در این راستا (جهت  $\sigma_H$ ) گسترش می‌یابد و متناسب با آن سه تنش اصلی در دیواره چاه به صورت زیر خواهند بود (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006):

$$\sigma_r = P_m, \quad \sigma_\theta = D - P_m, \quad \sigma_z = E \quad (\text{ب- } ۳۵)$$

در رابطه بالا مقادیر  $D$  و  $E$  برابرند با:

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (\text{ب- } ۳۶)$$

وقتی که مقدار  $P_m$  کم شود، مقدار  $\sigma_\theta$  به سمت مقاومت فشاری حداکثر افزایش می‌یابد. بنابراین حد پایین فشار مجاز گل ( $P_{mb}$ ) در ارتباط با شکستگی برشی دیواره چاه می‌باشد. در اینجا نیز، سه حالت زیر برای تعیین حد پایین فشار مجاز گل وجود دارد.

$$\text{الف- } \sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r, \text{ ب- } \sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r, \text{ پ- } \sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$$

در این حالت برای ایجاد شکستگی برشی که در راستای  $\theta = \pm\pi/2$  ایجاد خواهد شد، مقادیر تنش مماسی و شعاعی و محوری در دیواره چاه از روابط زیر محاسبه خواهند شد.

$$\sigma_r = P_m, \quad \sigma_\theta = A - P_m, \quad \sigma_z = B \quad (\text{ب-۳۷})$$

که در آن  $A$  و  $B$  از طریق زیر محاسبه می‌شوند:

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (\text{ب-۳۸})$$

با جایگزینی معادلات (ب-۳۵) و (ب-۳۶) در معیار موهر-کلمب (رابطه ب-۳۰)، حد پایین فشار گل در سه حالت ذکر شده، مطابق با روابط ذکر شده در جدول (ب-۱) به دست می‌آیند.

جدول ب-۱: تعیین حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) از معیار شکست موهر-کلمب  
(ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_m \leq P_{mb}$ باشد شکست برشی رخ می‌دهد. مقدار $P_{mb}$ در حالت های مختلف برابر است با:
۱	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{mb1} = (B - C) / q$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{mb2} = (A - C) / (1 + q)$
۳	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{mb3} = A - C - qB$

اگر فشار چاه به کمتر از  $P_{mb}$  برسد ( $P_m \leq P_{mb}$ ) شکستگی برشی در دیواره بوجود می‌آید. بنابراین، می‌توان گفت که خردشدگی در چاه با توجه به معیار موهر-کلمب زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از سه حالت اشاره شده در جدول فوق اتفاق بیفتد.

برای شکست کششی نیز با جایگذاری معادلات (ب-۳۷) و (ب-۳۸) در معیار موهر-کلمب (رابطه ب-۳۰) روابط بیان شده در جدول (ب-۲) به دست می‌آیند.

جدول ب-۲: تعیین حداکثر فشار گل ( $P_{mf}$ ) از معیار موهر-کولمب  
(ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	در حالت $P_m \geq P_{mf}$ مقدار $P_{mf}$ باشد شکست کششی رخ می‌دهد. مقدار $P_{mf}$ برای است با:
۱	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{mf1} = C + qE$
۲	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{mf2} = (C - qD)/(1 + q)$
۳	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{mf3} = (C - E)/q + D$

در جداول ب-۱ و ب-۲ مقادیر  $A$  و  $B$  و  $D$  و  $E$  به ترتیب از روابط (ب-۳۷) و (ب-۳۸)،  $C$  (چسبندگی) از رابطه (ب-۳۲) و  $\phi$  نیز از رابطه (ب-۳۱) به دست می‌آید. با توجه به روابط فوق چنانچه فشار چاه بیشتر از  $P_{mf}$  باشد ( $P_m \geq P_{mf}$ )، شکستگی‌ها کششی در دیواره چاه رخ می‌دهد.

#### ب-۴-۲- معیار شکست موگی - کلمب

از آنجائی که، معیار موهر- کلمب اثر تنش اصلی میانی را بر مقاومت سنگ نادیده می‌گیرد، از این رو انتظار می‌رود که این معیار فشار گل لازم برای پایداری دیواره چاه را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند. مثال‌های زیادی از عملکرد نامناسب این معیار در تخمین فشار گل وجود دارد. به عنوان مثال، ورنیک و زوباک (Vernik and Zoback, 1992) از این معیار جهت تعیین اندازه شکستگی برشی استفاده کردند و دریافتند که این معیار مقادیر وزن گل نامناسب ارائه می‌کند. بنابراین استفاده از معیارهای دیگری که تأثیر تنش اصلی میانی را در شکست سنگ در نظر بگیرد ضروری به نظر رسید. ال-اجمی و زیمرمن در سال ۲۰۰۶ معیاری شکست سه بعدی را ارائه کردند که به معیار موگی-کلمب شهرت یافته است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006). این معیار تأثیر تنش اصلی میانی را بر روی مقاومت سنگ در نظر می‌گیرد و برخلاف معیار دراگر- پراگر نتایج غیر واقعی (McLean and Addis, 1990) ارائه نمی‌کند.

موگی با آزمایش‌های چند محوره<sup>۳۷</sup> بر روی سنگ‌ها نشان داد که تنش اصلی میانی روی مقاومت سنگ تأثیر داشته و شکست در راستای صفحه  $\sigma_2$  رخ می‌دهد. بر این اساس موگی معیار خود را به صورت زیر بیان کرد.

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{m,2}) \quad (\text{ب-۳۹})$$

در رابطه فوق  $(\sigma_{m,2})$  تنش اصلی میانی و  $\tau_{oct}$  تنش برشی اکتاهدرال بوده و بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{ب-۴۰})$$

ال عجمی و زیمرمن (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006) رابطه موگی را با اصلاحاتی به صورت زیر ارائه دادند و آن را موگی-کلمب نامیدند.

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (\text{ب-۴۱})$$

از مقایسه این معیار با معیار موهر-کلمب می‌توان نتیجه گرفت که معیار موگی-کلمب منطبق بر معیار موهر-کلمب است. با انطباق این دو معیار مقادیر  $a$  و  $b$  برای معیار موگی-کلمب به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi, \quad b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (\text{ب-۴۲})$$

ال-اجمی و زیمرمن (۲۰۰۶) با توجه به نتایجی که از آزمایشات سه محوره بر روی سنگ‌های مختلف به دست آوردند، نشان دادند که معیار موگی-کلمب می‌تواند با تغییر پارامترها به معیار موهر-کلمب تبدیل شود، بنابراین معیار خود را معیار موگی-کلمب نامیدند.

<sup>37</sup>- Polyaxial

## ب-۴-۲-۱- بررسی پایداری چاه با استفاده از معیار موگی - کلمب

با توجه به اینکه معیار موگی-کلمب یک معیار سه بعدی می‌باشد، برای تحلیل پایداری چاه مناسب به نظر می‌رسد. بنابراین با جایگذاری روابط (ب-۳۵) و (ب-۳۶) در معیار موگی-کلمب (رابطه ب-۴۱) روابط بیان شده در جدول (ب-۳) را برای محاسبه حداقل فشار گل جهت جلوگیری از شکست برشی در چاه ارائه می‌شود. همچنین با جایگذاری روابط (ب-۳۷) و (ب-۳۸) در معیار موگی-کلمب، روابط اشاره شده در جدول (ب-۴) برای محاسبه حداکثر فشار گل جهت جلوگیری از شکست کششی در دیواره چاه ارائه بدست می‌آید.

جدول ب-۳: تعیین حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) از معیار موگی-کلمب  
(ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_m \leq P_{mb}$ باشد شکست برشی در دیواره چاه رخ می‌دهد. بنابراین، $P_{mb}$ در هر حالت برابر است با:
۱	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{mb1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[ (3A + 2b'K) + \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{mb2} = \frac{1}{2} A - \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(A - 2P_0)]^2 - 3(A - 2B)^2}$
۳	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{mb3} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[ (3A - 2b'G) + \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right]$

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), \quad H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12),$$

$$K = a' + b'(B - 2P_0), \quad G = K + b'A, \quad a' = 2c \cos \varphi, \quad b' = \sin \varphi$$

مشابه معیار موهر-کلمب، محدوده مجاز فشار گل برای معیار موگی-کلمب برابر  $P_{mb} < P_m < P_{mf}$  است. اگر  $P_m$  بزرگتر از  $P_{mf}$  باشد شکست کششی و اگر  $P_m$  کمتر از  $P_{mb}$  باشد شکستگی برشی در دیواره چاه ایجاد خواهد شد.

جدول ب-۴: تعیین حداکثر فشار گل ( $P_{mf}$ ) از معیار موگی - کلمب (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_m \geq P_{mf}$ باشد شکست کششی در دیواره چاه رخ می‌دهد. بنابراین، $P_{mf}$ در هر حالت برابر است با
۱	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{mf1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3D + 2b'N) + \sqrt{J + 12(N^2 + b'DN)} \right]$
۲	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{mf2} = \frac{1}{2}D + \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(D - 2P_0)]^2 - 3(D2E)^2}$
۳	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{mf3} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3D + 2b'M) + \sqrt{J + 12(M^2 - b'DM)} \right]$

$D = 3\sigma_h - \sigma_H$ ,  $E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$ ,  $J = D^2(4b'^2 - 3) + (E^2 - DE)(4b'^2 - 12)$ ,  
 $N = a' + b'(E - 2P_0)$ ,  $M = N + b'D$

#### ب-۴-۳- معیار شکست هوک - براون

معیار شکست هوک- براون (Hoek, and Brown, 1980) بر اساس تحقیقات هوک بر روی شکست سنگ سخت و مطالعات براون بر روی رفتار توده سنگ درزه دار به دست آمده است. این معیار برای اولین بار به صورت رابطه زیر ارائه شد.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[ m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^{0.5} \quad (\text{ب-۴۳})$$

که در آن،  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  مقدار تنش‌های موثر اصلی حداکثر و حداقل و  $\sigma_{ci}$  مقاومت فشاری تک محوره سنگ می‌باشند.  $m$  و  $s$  ثابت‌های سنگ هستند که برای سنگ‌های بکر  $s=I$  در نظر گرفته می‌شود.

#### ب-۴-۳-۱- معیار تعمیم یافته هوک - براون

با اعمال تصحیحاتی که در سال ۲۰۰۲ بر روی این معیار انجام گرفت، معیار هوک- براون بصورت زیر ارائه گردید.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{ب-۴۴})$$

که در آن،  $a$  نمای معیار بوده و  $m_b$  و  $s$  پارامترهای توده سنگ می‌باشند که از طریق روابط زیر تعیین می‌گردند:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (\text{ب-۴۵})$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (\text{ب-۴۶})$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (\text{ب-۴۷})$$

که پارامتر  $D$  به درجه آشفستگی توده سنگ بستگی دارد. در رابطه بالا  $GSI$  شاخص زمین‌شناسی می‌باشد.

#### ب-۴-۳-۲- پایداری دیواره چاه بر اساس معیار هوک- براون

معیار تجربی هوک- براون به خوبی رابطه غیر خطی میان تنش اصلی حداکثر ( $\sigma_1$ ) و تنش اصلی حداقل ( $\sigma_3$ ) را برعکس رابطه خطی موهر- کلمب در سنگ اثبات می‌نماید. بنابراین در تحلیل مباحث ژئومکانیکی و پایداری دیواره چاه‌ها این معیار نتایج دقیق‌تری را به دنبال خواهد داشت (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

زانگ و همکاران (۲۰۱۰) با جایگذاری روابط (ب-۳۵) و (ب-۳۶) در معیار هوک- براون (رابطه ب-۴۳) حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) جهت جلوگیری از شکست برشی را مطابق با جدول (ب-۵) ارائه نمودند. همچنین با جایگذاری روابط (ب-۳۷) و (ب-۳۸) در این معیار روابط بیان شده در جدول ب-۶ را برای تعیین حداکثر فشار گل مجاز ( $P_{mf}$ ) جهت جلوگیری از شکست کششی در دیواره چاه ارائه شده است.



مشابه دو معیار قبلی، محدوده مجاز فشار گل برای معیار هوک- براون نیز برابر  $P_{mb} < P_m < P_{mf}$  است. اگر  $P_m$  بزرگ‌تر از  $P_{mf}$  باشد شکست کششی و اگر  $P_m$  کمتر از  $P_{mb}$  باشد شکستگی برشی در سنگ‌های دیواره چاه بوجود می‌آید.

جدول ب-۵: تعیین حداقل فشار گل ( $P_{mb}$ ) از هوک- براون (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_m \leq P_{mb}$ باشد شکست برشی در دیواره چاه رخ می‌دهد. بنابراین در هر حالت، $P_{mb}$ برابر است با:
۱	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{mb1} = \frac{(2B + p) - \sqrt{(2B + p)^2 - 4(B^2 + pP_0 - q)}}{2}$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{mb2} = \frac{(4A + p) - \sqrt{(4A + p)^2 - 16(pP_0 - q + A^2)}}{8}$
۳	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{mb3} = \frac{2(A - B) - \sqrt{4(A - B)^2 - 4[(A - B) - pB + pP_0 - q]}}{2}$

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h, B = \sigma_V + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), q = s\sigma_c^2, p = m\sigma_c$$

جدول ب-۶: تعیین حداکثر فشار گل ( $P_{mf}$ ) از معیار هوک- براون (ملکی چشمه منش، ۱۳۹۱؛ Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_m \geq P_{mf}$ باشد شکست کششی در دیواره چاه رخ می‌دهد. بنابراین در هر حالت، $P_{mf}$ برابر است با:
۱	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{mf1} = \frac{2E + \sqrt{4E^2 - 4[E^2 - pE + pP_0 + q]}}{2}$
۲	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{mf2} = \frac{(4D - p) + \sqrt{(4D - p)^2 - 16[D^2 - pD + pP_0 - q]}}{8}$
۳	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{mf3} = \frac{-2(E - D) + \sqrt{[2(E - D) + p]^2 - 4[(E - D)^2 - pD + pP_0 - q]}}{2}$

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H, E = \sigma_V - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), q = s\sigma_c^2, p = m\sigma_c$$



## **Abstract**

Oil reservoirs are one of the main sources of energy production so maintaining its continuous production is of special importance. One of the biggest problems in extracting oil from weak sand formations is a phenomenon known as sand production. Sand production not only causes instability and loss of wellbore, but also causes irreparable damages to the pipe and surface and bottom of wellbore equipment. Reservoirs that are not consolidated due to the increasing of pressure drop during the production are able to produce sand. Sand production problem in wellbore has not been considered sufficiently in the petroleum industry. The aim of this study was to evaluate the potential of sand production (solid production) from one of the oil wells located in southern part of Iran using empirical correlation and well-log studies. In addition, to achieve such purpose, Mechanical Earth Modeling (MEM) was conducted using the well logs and results were calibrated against the available core and filed data. Final calibration was made using the failure criteria for being sure that break-out observed in caliper log can appropriately be predicted using the estimated geomechanical parameters. Critical production rate was proposed at the end by empirical correlation in order to mitigate sand production induced by shear failure. In addition, effective parameters involved in the sand production process, including rock strength, formation pressure and in situ stress parameters were studied using Hudson Rock Engineering System (RES). RES is one of the best methods in assessment of the effective parameters involved in a geomechanical issues and evaluation of their relationships. In this study, RES was used to investigate the major parameters involved in the sand production process. Performing this study, interaction matrix of the parameters involved in the sand production problem was has been proposed and coded using Expert semi-quantitative coding system to calculate different interactions quantity. The results obtained indicate that effective stress has the greatest effect on sand production systems, while the drawdown pressure and fluid flow parameters are the parameters affected by the system. By controlling the most effective parameters, one can reduce the sand production potential in the wells drilled in the unconsolidated reservoirs.

**Key words:** Well logging, Sand production potential, Rock engineering system, Failure criteria and Mechanical earth modeling.



**Shahrood University**

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

Modeling of sand (solid) production and evaluation of relative parameters  
in one of the Iranian oil wells.

Ramin Mohammadi Shirkolaii

**Supervisors:**

Dr. Faramarz Dolati ardehjani

Dr. Ali Moradzadeh

February 2014