



(مقاله مروری)

## ارزیابی چالش های بهره برداری از مخازن گازی غیرمتعارف از دیدگاه ژئومکانیکی

شکیب مراسلی<sup>۱</sup>، عباس هاشمی زاده<sup>۲\*</sup>، فرهود نوائی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

(دریافت: فروردین ۱۴۰۱، پذیرش: آبان ۱۴۰۱)

### چکیده

با گسترش صنعت نفت و گاز، نیاز روزافزون کشورهای صنعتی به سوخت های فسیلی و وابستگی اقتصادی برخی کشورها به این صنعت، بهره برداری از منابع هیدروکربنی روزبه روز در حال افزایش است. استخراج های بی رویه و ترس از کاهش این منابع، صنعت را به استفاده از منابع جایگزین یعنی مخازن غیرمتعارف گازی هدایت می کند اما بهره برداری از این مخازن با چالش هایی از نظر حفاری و تولید به واسطه تراوایی پایین روبه رو است. ژئومکانیک دانشی مشترک میان رشته های مهندسی مخزن و زمین شناسی است که تولید و تزریق پیوسته نفت و گاز، آن را به بخش مهمی از مطالعات مهندسی مخزن تبدیل می کند. ارزیابی ویژگی های ژئومکانیکی به منظور شناسایی چالش ها در مخازن غیرمتعارف هیدروکربنی و طراحی بهینه عملیات شکاف هیدرولیکی برای افزایش ضریب بازیابی از این مخازن، به عنوان مهم ترین انگیزه در راستای مطالعات در زمینه دانش ژئومکانیک است که در این مطالعه به آن پرداخته شده است. پژوهش حاضر به بررسی جامع و نظام مند جنبه های ژئومکانیکی این مخازن مانند مخازن گاز شیل، ماسه ای متراکم گازی، هیدرات گازی و تزریقی دی اکسید کربن پرداخته و چالش های حفاری و شکاف هیدرولیکی آن ها از جمله مچاله شدن لوله جداری و آستری را از دیدگاه ژئومکانیکی مورد بحث و بررسی قرار داده و مطالعات موردی در بررسی ژئومکانیکی میدان های گازی مارسلوس، لانگ مکی، روزنیت، مورتری و مونتنی در کشورهای آمریکا، چین، استرالیا و کانادا بیان شده که نتایج آن در تخمین پارامترهای استاتیک و دینامیک و نیز طراحی شکاف هیدرولیکی مخازن گازی شیلی حائز اهمیت است. نتایج مطالعات نشان می دهد که در این مخازن؛ برخلاف مخازن متعارف، دمای سیال حفاری نقش مهم تری را نسبت به چگالی آن در پایداری دیواره چاه ایفا می کند و منجر به تغییر در ویژگی های فیزیکی و کاهش استحکام آن می شود. همچنین می توان با استفاده از پیش بینی نسبت پواسون و تنش های اعمالی، ناحیه هایی با خطر مچالگی لوله جداری را شناسایی نمود و از سوی دیگر در طراحی فرآیند سیمان کاری، هر چه میزان گستره فضای خالی در غلاف سیمان کمتر باشد لوله آستری یکپارچگی خود را بهتر حفظ می کند. از سوی دیگر بررسی ها نشان می دهند که نسبت پواسون و مدول یانگ تأثیر بسزایی بر شاخص شکنندگی شیل ها و به دنبال آن شاخص شکاف پذیری در راستای انتخاب مناسب ترین سازند برای عملیات شکاف هیدرولیکی دارند. مطابق بررسی ها، سازندی با شاخص شکاف پذیری برابر با ۱ مناسب ترین سازند برای این عملیات محسوب می شود.

### کلمات کلیدی

ژئومکانیک، مخازن غیرمتعارف گازی، سیال حفاری، شکاف هیدرولیکی، مچالگی لوله جداری

\*عهده دار مکاتبات: [abbas.hashemizadeh@gmail.com](mailto:abbas.hashemizadeh@gmail.com)

DOI: [10.22034/ANM.2022.2857](https://doi.org/10.22034/ANM.2022.2857)

## ۱- مقدمه

هدف از توسعه فرآیند تحقیقات جمع‌آوری سؤالات مختلف در حوزه‌های مختلف و پاسخ دادن به آن‌ها در طی نگارش مقاله است [۲،۱].

با توجه به نقش مطالعات مروری در دستیابی به دانش به‌روز و همچنین اهمیت جنبه‌های ژئومکانیکی و علم مکانیک سنگ در افزایش بهره‌وری از مخازن گازی غیرمتعارف، پژوهش حاضر به بررسی جامع و نظام‌مند جنبه‌های ژئومکانیکی این مخازن (از قبیل مخازن گاز شیل، مخازن ماسه‌ای متراکم گازی، مخازن هیدرات گازی و مخازن تزریقی دی‌اکسیدکربن) پرداخته است و چالش‌های حفاری و شکاف هیدرولیکی مخازن مذکور از جمله مچاله شدن لوله جداری و آستری را از دیدگاه ژئومکانیکی موردبحث و بررسی قرار داده است. در نتیجه با آگاهی از ویژگی‌های الاستیک این‌گونه مخازن روش‌هایی مناسب برای دستیابی به تولید بهینه از این مخازن حاصل می‌گردد.

همچنین از آنجاکه مطالعه موردی<sup>۲</sup> به‌صورت گسترده، ژرف و جزئی‌نگر به مطالعه یک مورد خاص می‌پردازد و در نتیجه به محدوده وسیعی از دانش برای تحلیل سیستم‌های پیچیده دسترسی می‌یابد، این اطمینان در پژوهش مطالعه موردی حاصل می‌شود که تمام اجزا موردبررسی قرار گرفته‌اند. از این‌رو در این مقاله پس از بررسی نظام‌مند جنبه‌های ژئومکانیکی مخازن گازی غیرمتعارف، به مطالعات موردی در بررسی ژئومکانیکی میدان‌های گازی مارسلوس، لانگ مکسی، روزنیت، مورتری، مونتنی و کوپیاگو در کشورهای آمریکا، چین، استرالیا، کانادا و کلمبیا پرداخته شده و چالش‌های موجود در این عملیات به‌دقت موردبحث و بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در تخمین پارامترهای استاتیک و دینامیک و نیز طراحی شکاف هیدرولیکی مخازن گازی شیلی حائز اهمیت است.

با توجه به گستردگی مخازن غیرمتعارف گازی<sup>۳</sup> و لزوم تولید مطلوب از این منابع، طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی متناسب با جنبه‌های ژئومکانیکی مهم‌ترین گام بهره‌برداری از این منابع است. منابع نفت و گاز از جنبه‌های زیادی مانند شکل سنگ‌های منشأ و مخزن، مکانیزم‌های تشکیل، نفوذ، توزیع و رخداد با هم متفاوت هستند. مخازن غیرمتعارف منابعی هستند که از لحاظ اقتصادی با روش‌های استخراج منابع متعارف قابل بهره‌برداری نیستند

با توجه به افزایش نیاز جوامع به استفاده از منابع نفت و گاز متعدد و از طرفی کاهش بهره‌برداری از منابع متعارف، منابع غیرمتعارف به گزینه‌های جذابی برای دستیابی به نرخ تولید مطلوب تبدیل شده‌اند. از همین رو نیاز به بررسی جامع و نظام‌مند مخازن غیرمتعارف در راستای شناخت و افزایش ضریب بازیابی این مخازن توسط عملیات شکاف هیدرولیکی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. از آن‌جهت که مطالعات محققان پیشین در رابطه با مخازن غیرمتعارف، اغلب پراکنده و هرکدام از زاویه‌ای خاص به بررسی این مخازن پرداخته‌اند، در این مقاله سعی بر این بوده است تا ویژگی‌های ژئومکانیکی این مخازن در راستای شناسایی و طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی برای تحریک مناسب این مخازن به‌طور جامع گردآوری و در اختیار پژوهشگران در این زمینه قرار گیرد. در همین راستا ابتدا به اهمیت نگارش مقالات مروری و در ادامه مباحث به تعریف مخازن غیرمتعارف و پس‌از آن به بررسی اهمیت ویژگی‌های ژئومکانیکی این مخازن پرداخته خواهد شد.

به‌طورکلی، مقالات مروری، می‌توانند برای پیشرفت علمی تمامی رشته‌ها فوق‌العاده مفید باشند؛ زیرا ادغام بینش‌های حاصل از تحقیقات موجود از طریق یک متآنالیز یا ترکیب آن‌ها از طریق یک ارزیابی نظام‌مند، می‌تواند کمک شایان توجهی در راستای تبیین موضوع از جهت‌های مختلف نماید [۱]. مقالات مروری به دسته‌های گوناگونی همچون مقالات مروری روایتی، نظام‌مند و مرور بهترین شواهد تقسیم‌بندی می‌شوند. در مقالات مروری نظام‌مند هدف دنبال نمودن و ترکیب تحقیقات مختلفی که بر روی یک سؤال خاص با استفاده از روش‌های سازمان‌یافته و شفاف به جمع‌آوری داده می‌پردازند، است [۱]. این نوع مقالات مروری را می‌توان به‌طورکلی حاوی چندین بخش مختلف همچون طراحی مطالعه، نمونه‌برداری، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و گزارش‌نویسی دانست [۱]. اولین گام برای نگارش این نوع مقاله طرح سؤالی بنیادی به‌عنوان بخشی از فرآیند تحقیقاتی است [۲]. در همین راستا در پژوهش حاضر با طرح سؤالاتی همچون "چگونگی تأثیر ویژگی‌های ژئومکانیکی بر افزایش ضریب بازیابی از مخازن غیرمتعارف گازی و چالش‌های حفاری موجود در این مخازن" به‌عنوان اولین گام در فرآیند تحقیقاتی پرداخته شده است؛ بنابراین

معدله‌های تجربی استفاده کرد که توابعی از داده‌های دینامیکی هستند.

## ۲- مخازن غیرمتعارف گازی

### ۲-۱- مخازن گاز شیل

رشد روزافزون تولید جهانی، با گسترش بهره‌برداری از مخازن گاز شیل ادامه خواهد یافت. این مخازن بعد از مخازن نفت سنگین دومین منبع بزرگ انرژی‌های غیرمتعارف به شمار می‌روند. انتشار کم دی‌اکسیدکربن و عاری بودن از دی‌اکسید گوگرد از جمله مزایای این منابع محسوب می‌گردد [۱۱]. آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۵ گزارش کرد که بیش از ۷۵۷۶/۶ تریلیون فوت مکعب ذخیره قابل‌برداشت گاز شیل در ۴۶ کشور دنیا وجود دارد، با این حال تنها مقدار کمی از این منابع برای تولید مناسب هستند. منابع گاز شیل به‌طور عمده در آمریکای شمالی قرار دارند. شکل ۱ نشانگر چگونگی توزیع این منابع در منطقه‌های مختلف جهان است [۱۳]. شیل‌ها از ذرات رس بسیار فشرده به‌اندازه‌ای کوچک‌تر از میکرومتر، تخلخل نانومتری و کانی‌شناسی مختلف تشکیل شده‌اند [۱۱]. بر اساس مطالعه مورلی، شیل‌ها در دسته سنگ‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند که تقریباً بیش از ۴۰ درصد مواد معدنی رسی را در خود دارند و شامل کانی‌های رسی نظیر ایلیت، ایلیت - مونتوریلونیت و کلریت هستند [۱۴]. از سوی دیگر ژانگ بیان می‌کند که مواد معدنی رسی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های اصلی شیل‌ها مانند تراوایی و شکنندگی می‌گذارند که همین موضوعی تعیین‌کننده در آینده بهره‌برداری از هیدروکربن‌ها است [۱۵، ۱۱]. به عقیده گروهی از محققان مانند چوپرا برای آن که یک مخزن گاز شیل مخزنی مطلوب محسوب شود باید شاخص‌هایی داشته باشد تا با ترکیب بهینه این شاخص‌ها بتوان به تولیدی مطلوب دست یافت. از جمله مهم‌ترین شاخص‌ها می‌توان به کل محتوی مواد آلی<sup>۱۲</sup>، بلوغ حرارتی مواد آلی، گاز برجا و نازکی یا شکنندگی<sup>۱۳</sup> اشاره کرد. مخازن گاز شیل سیستم منفذی با مقیاس نانومتری دارند که بر قابلیت ذخیره هیدروکربن و انتقال سیال به شبکه‌های شکاف شیل تأثیر زیادی می‌گذارند. به‌طور کلی این مخازن تخلخل بسیار کم در حدود ۴ تا ۶/۵ درصد و همچنین تراوایی پایینی دارند [۱۳]. بنابر گزارش ژاروی

[۳]. در واقع منابعی با حجم زیاد و ویژگی‌های مخزنی بسیار ضعیف هستند که تخلخل کمتر از ۱۰ درصد و تراوایی مطلق کمتر از یک میلی داری از جمله ویژگی‌های این مخازن به شمار می‌روند [۴]. تولید از این مخازن با روش‌های متعارف ممکن نیست، بنابراین باید از روش‌هایی مانند حفاری افقی، شکاف هیدرولیکی و دیگر روش‌های نوین استفاده کرد تا بتوان با هزینه‌ای بهینه این منابع را از اعماق استخراج کرد [۵]. مخازن غیرمتعارف گازی شامل مخازن گاز شیل<sup>۴</sup>، مخازن ماسه‌ای متراکم گازی<sup>۵</sup> و مخازن هیدرات گازی<sup>۶</sup> می‌شوند [۷، ۶].

در سال‌های اخیر محققان از علم ژئومکانیک برای بررسی ناپایداری دیواره چاه، آگاهی‌یافتن از ویژگی‌های الاستیک لایه‌های زیرزمینی و طراحی و انجام عملیات شکاف هیدرولیکی بهره‌برده‌اند [۹، ۸]. ناگل ژئومکانیک را ارزیابی مهندسی واکنش میان تنش‌ها و فشارهای سنگ، ویژگی‌های مکانیکی و هندسه سنگ می‌نامد. هندسه می‌تواند سطح سنگ، نقطه یا حجم تحت تأثیر تنش، فشار و ویژگی‌های مکانیکی را محاسبه کند [۱۱، ۱۰]. یکی از دلایل توجه به ناپایداری چاه در مسائل ژئومکانیکی روی دادن مشکلاتی مانند گیرلوله حفاری، هرزروی گل در عملیات حفاری، فروپاشی دیواره چاه و به دنبال آن مشکلاتی جبران‌ناپذیر مانند از دست دادن نیروی انسانی و یا منابع مادی است. به‌منظور تجزیه و تحلیل پایداری دیواره چاه باید ویژگی‌های الاستیک و مشکلات مربوطه را بررسی کرد. در همین راستا از روش‌های استاتیک و دینامیک برای آگاهی از ویژگی‌های الاستیک سنگ و لایه‌های زیرزمینی استفاده می‌کنند. از جمله این روش‌ها در بخش استاتیک می‌توان به آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری<sup>۷</sup> و سه محوری<sup>۸</sup> و در بخش دینامیک به تجزیه و تحلیل داده‌های صوتی اشاره کرد [۱۱]. برای اندازه‌گیری سرعت صوتی موج‌های فشاری<sup>۹</sup> و برشی<sup>۱۰</sup> که در میان نمونه حرکت می‌کنند، از روش فراصوت استفاده می‌شود. موج فشاری سریع‌ترین حرکت را دارد و مواد را در جهت انتشار خود فشرده و منبسط می‌کند، با این حال موج برشی آرام‌تر حرکت می‌کند و باعث نوسان مواد در طول مسیر انتشار خود می‌شود. ثابت‌های الاستیک از اندازه‌گیری سرعت موج‌ها با آزمایش فراصوت<sup>۱۱</sup> تعیین می‌شوند [۱۲، ۱۱]. در صورت دسترسی نداشتن به نمونه مغزه، می‌توان از

می‌کند [۱۵]. بر اساس شعاع انحنای<sup>۴</sup>، چاه‌های افقی به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. شعاع طولانی با شعاع انحنای (۱۰۰ فوت / ۲-۶ درجه)
۲. شعاع متوسط با شعاع انحنای (۱۰۰ فوت / ۶-۳۵ درجه)
۳. شعاع کوتاه با شعاع انحنای (۳ فوت / ۵-۱۰ درجه) [۲۲، ۱۲، ۱۱].

حفاری چاه افقی در مقایسه با چاه عمودی به واسطه ایجاد سطح تماس بیشتر بین مخزن و چاه در مخازن غیرمتعارف به‌گزینۀ چالش‌برانگیز برای مهندسان تبدیل شده است. کاهش پدیده مخروط شدگی آب و گاز در چاه‌های افقی نسبت به چاه‌های عمودی یکی دیگر از دلایل استفاده از حفاری افقی در صنعت محسوب می‌شود [۲۳]. درعین‌حال حفاری چاه افقی دارای چالش‌ها و محدودیت‌هایی است. فشار منفذی با گذشت زمان و تولید از مخزن روندی کاهشی را طی می‌کند از همین‌رو این کاهش فشار می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی در راستای حفاری مانند آسیب به سازند، ناپایداری در دهانه چاه و هرزروی شود در همین راستا پیشنهاد می‌شود از روش‌های تقویت پایداری چاه همچون استفاده از گل حفاری با وزن مناسب برای کنترل سازندهای شیلی در مخازن غیرمتعارف استفاده شود. از طرفی برخی محدودیت‌ها ممکن است منجر به انحراف آزیموت حفاری چاه افقی از جهت تنش افقی شوند. اگر چاه افقی با زاویه‌ای نسبت به جهت کمینه تنش افقی حفاری شود به‌عنوان چاه خارج از آزیموت و اگر به‌صورت موازی باشد به‌عنوان چاه روی آزیموت شناخته می‌شود. این موضوع بر انتشار شکاف‌های هیدرولیکی و بهره‌وری چاه اثرگذار است، به‌این‌ترتیب که با افزایش انحراف چاه از جهت کمینه تنش افقی، بهره‌وری و میزان گاز تولیدی کاهش می‌یابد [۲۴]. کاهش بهره‌وری در این شرایط ناشی از ایجاد تنش‌های برشی در اطراف دهانه چاه و مشبک‌ها است. در شرایطی که کانال مشبک‌ها موازی با جهت تنش‌های افقی باشد، هیچ‌گونه تنش برشی رخ نمی‌دهد برای همین میزان بهره‌وری روندی افزایشی به خود می‌گیرد. با توجه به مطالب بیان‌شده، تأثیر تنش‌های درجا بر طراحی چاه و میزان بهره‌وری آن کاملاً ملموس است [۲۴، ۲۰].

گاز موجود در مخازن شیلی ممکن است زیست‌زا، گرمازا یا ترکیبی از هر دوی این‌ها باشد. گاز شیل در شکستگی‌ها و ماتریس حفره‌ها به‌صورت گاز آزاد، در مواد آلی یا مواد معدنی به‌صورت گاز جذب شده و در کروژن و قیر به‌صورت گاز حل‌شده وجود دارد. گازهای آزاد و جذب‌شده ۲۰ تا ۸۰ درصد کل گاز موجود در مخازن شیل را تشکیل می‌دهند و ضریب بازبایی آن‌ها کمتر از ۵ تا ۲۰ درصد است [۱۴]. اثر ویژه دما بر روی مخزن ایجاد کرنش حجمی و به دنبال آن ایجاد تنش‌های حرارتی است که می‌تواند منجر به بروز تنش‌های برشی و کششی در اطراف دهانه چاه شود. مدول یانگ تأثیر بسزایی بر ایجاد تنش‌های حرارتی دارد برای همین هر چه یک ماده سخت‌تر باشد، تنش‌های حرارتی القایی بزرگ‌تر خواهند بود [۱۵]. بر اساس نظریه ترموالاستیک افزایش دما در دهانه چاه منجر به افزایش تنش‌های فشاری و به دنبال آن کاهش پایداری دیواره چاه می‌شود حال آنکه با کاهش دما عکس این موضوع رخ می‌دهد و پایداری دیواره چاه افزایش می‌یابد. در سازندهایی با تراوایی پایین همچون شیل‌ها، گرما می‌تواند منجر به افزایش فشار منفذی و ایجاد تنش‌های کششی و ایجاد شکاف شود چون در این سازندها توزیع حرارتی به دلیل تراوایی پایین از توزیع سیال بیشتر است [۱۹]. از سوی دیگر کاهش دما در دهانه چاه ابتدا افت فشار را در پی خواهد داشت و سپس به مقدار اولیه خود برمی‌گردد، در سازندهایی با تراوایی بالا اثر فشار منفذی ناشی از حرارت سریع از بین می‌رود [۲۰، ۱۸، ۱۴].



شکل ۱: توزیع منابع گاز شیل در سراسر جهان [۱۳].

#### ۱-۱-۲- توسعه مخازن گاز شیل و توزیع منابع گاز

توسعه و بهره‌برداری از مخازن گاز شیل مستلزم حفاری چاه افقی است [۲۱]. با حفاری چاه افقی حجم بیشتری از مخزن در تماس با چاه قرار می‌گیرد و با انجام عملیات شکاف هیدرولیکی، ورود سیال از مخزن به چاه تسهیل پیدا

## ۲-۲- مخازن ماسه‌ای متراکم گازی

تعریف مشخص و دقیق مخازن متراکم گازی پیچیده است، گاهی آن را تجمع توده‌ی گاز در حوضه عمیق یا میانی و یا مخازن ماسه‌ای متراکم می‌نامند. طبق مصوبه سیاست‌گذاری گاز ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۸، مخازن ماسه‌ای متراکم گازی در دسته مخازنی با تراوایی کمتر از ۰/۱ میلی داری طبقه‌بندی می‌شوند [۲۵]. این مخازن ذره‌های سیلت بیشتر و رس کمتری نسبت به شیل‌ها دارند. مخازن ماسه‌ای انباشته<sup>۱۵</sup> و ماسه‌ای روکش‌دار<sup>۱۶</sup> دو نوع اصلی مخازن ماسه‌ای متراکم گازی به شمار می‌روند. به‌طور معمول بهتر است که حفاری مخازن ماسه‌ای انباشته از طریق چاه‌های عمودی باشد درحالی‌که حفر چاه‌های افقی برای مخازن ماسه‌ای روکش‌دار مناسب‌تر است [۵]. دانش ژئومکانیک از جمله مهم‌ترین عوامل در راستای شناسایی ویژگی‌های مخزن به‌منظور شناخت عوامل مؤثر در جهت افزایش تراوایی مؤثر مخزن است. نقش تنش برجا<sup>۱۷</sup> قبل از تولید و تأثیر شکستگی‌های طبیعی بر نحوه‌ی قرارگیری و جهت چاه‌های افقی در تخلیه مخازن ماسه‌ای متراکم گازی انکارناپذیر است [۲۶]. در تکمیل چاه حفاره باز و همچنین در چاه تحریک‌شده این مورد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بسته به هدف چاه در مخازن ماسه‌ای متراکم گازی از حفاری فروتعدالی و فراتعدالی استفاده می‌شود. تراوایی این نوع مخازن پایین است و برای دستیابی به نرخ تولید مطلوب به هدایت شبکه‌ی شکاف برای ایجاد تراوایی مناسبی نیاز دارند [۲۶، ۱۱، ۱۰]. دانشمندان مختلف روی تأثیر ماهیت تراوایی و تنش‌های ناشی از فشار روباره<sup>۱۸</sup> مطالعه‌های آزمایشگاهی بسیاری انجام دادند [۲۷]. این اثر در مخازن متعارف اهمیتی ندارد اما در مخازن غیرمتعارف از جمله مخازن ماسه‌ای متراکم گازی باید مورد توجه قرار گیرد [۱۰]. به همین منظور یک مدل نسبتاً ساده از داده‌های تجربی ارائه شده است. در این مدل که در رابطه‌های (۱) و (۲) قابل مشاهده است مدول تراوایی  $\gamma$ ، فشار و تراوایی را به هم مرتبط می‌کند [۲۸، ۲۷]. در مخازن متراکم گازی برای تعیین شرایط تنش‌های برجا و ثابت الاستیک بایوت از آزمایش تراکم‌پذیری حجم منافذ<sup>۱۹</sup> استفاده می‌شود. در آزمایش PVC به‌طور هم‌زمان و تدریجی فشار منفذی، تنش‌های افقی و عمودی اضافه می‌شوند تا فشار منفذی با

فشار منفذی درون مخزن برابر شود. سپس تنش‌های عمودی و میانگین تنش‌های افقی را درحالی‌که فشار منفذی ثابت است افزایش می‌دهند تا به حالت تنش‌های برجا برسند. اکنون فشارها و تنش‌ها را ثابت نگه می‌دارند تا همه کشش‌ها به تعادل برسند، در این لحظه نمونه در شرایط تنش‌های برجا است. پس از تعادل برای شبیه‌سازی تولید از مخزن فشار منفذی را کاهش می‌دهند درحالی‌که تنش‌های عمودی و افقی ثابت هستند درنهایت تراکم‌پذیری حجم منافذ بر پایه رابطه (۳) به دست می‌آید [۲۹، ۲۶].

$$\gamma = \frac{1}{K} \frac{dP}{dK} \quad (1)$$

$$K = K_i e^{-\gamma(P_i - P)} \quad (2)$$

$$C_{pv} = -\frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial \sigma_m} \quad (3)$$

که در آن  $K$  و  $K_i$ : به ترتیب تراوایی و تراوایی اولیه ماتریس (مترمربع)،  $P_i$ : فشار اولیه ماتریس (پاسکال)،  $\gamma$ : مدول تراوایی و  $C_{pv}$ : تراکم‌پذیری حجم منافذ (پام) است.

## ۲-۳- مخازن هیدرات گازی

هیدرات‌های گازی نوعی کلاترات و یک ترکیب بلوری غیر استوکیومتری از مولکول‌های گاز هستند که با مولکول‌های آب ترکیب شده‌اند [۳۰]. هیدرات‌های گازی در حوزه انرژی به‌واسطه گستردگی توزیع کربن‌های آلی در آن‌ها نقش بسزایی در تأمین انرژی و سوخت موردنیاز صنایع مختلف دارند. ذخایر کربن هیدرات‌های گازی حدود دو برابر سوخت‌های فسیلی متعارف در سراسر دنیا است و تراکم انرژی بالایی دارند [۳۱، ۳۰]. معمولاً هیدرات‌ها از نظر ویژگی‌های مکانیکی به یخ‌ها تشبیه می‌شوند. یافته‌های محققان مدول یانگ<sup>۲۰</sup>، مدول توده<sup>۲۱</sup> و مدول برشی<sup>۲۲</sup> هیدرات‌ها را تقریباً ۱۵ درصد کمتر از یخ‌ها نشان می‌دهد [۳۳، ۳۲]. گه و سلوان نکته‌ای کلیدی برای این تفاوت بین یخ‌ها و هیدرات‌ها بیان می‌کنند که عبارت است از: انتشار مولکول‌های آب در هیدرات‌ها کمتر از یخ است به این دلیل که هیدرات‌ها باید نسبت به یخ‌ها مقاومت بیشتری در برابر خزش<sup>۲۳</sup> از خود نشان دهند [۳۲]. تجزیه هیدرات‌های گازی از جمله فرآیندهای گرماگیر محسوب می‌شوند و استحکام هیدرات‌های گازی با کاهش دما، افزایش می‌یابند که این موضوع را می‌توان با حلالیت متان در آب توجیه

می‌کنند. تغییر فشار منفذی می‌تواند منجر به نفوذ گل حفاری به سازند و تجزیه هیدرات‌های گازی شود. نقطه بحرانی پایداری دیواره چاه در مخازن هیدرات‌های گازی موقعیتی است که پس از عملیات حفاری، تجزیه هیدرات‌های گازی صورت می‌گیرد و نه تنها منجر به کاهش استحکام مخزن شده بلکه منجر به افزایش گاز و آب در حفره‌ها نیز می‌شود [۳۶]. تجزیه هیدرات‌های گازی در فضای منفذی محدودی رخ می‌دهد و به دنبال آن با افزایش مقدار گاز و آب در حفره‌ها، فشار منفذی افزایش می‌یابد. این افزایش فشار توزیع تنش‌ها در لایه‌های رسوبی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. دامنه‌ی افزایش فشار منفذی به ضریب اسمزی<sup>۲۴</sup> و میزان گرمای لایه‌های رسوبی بستگی دارد. هنگامی که سازند تراوایی پایینی داشته باشد و هیدرات‌های گازی نیز به سرعت گرم شوند گاز و آب تولید شده ناشی از تجزیه هیدرات‌ها به سرعت جریان می‌یابند و فشار منفذی را افزایش می‌دهند [۳۶-۳۹]. از دیگر مشکلات ژئومکانیکی این نوع مخازن می‌توان به تولید ماسه آن‌ها اشاره نمود. هیدرات‌های گاز در عمق کم و در سازندهای رسوبی تحکیم نیافته حاوی ذرات ریز ماسه دفن شده‌اند، از همین رو تولید ماسه مشکلی بسیار مهم در تولید از این مخازن به شمار می‌رود [۳۶]. تولید ماسه در هنگام بهره‌برداری از مخازن هیدرات‌های گازی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد بنابراین بهترین روش کنترل آن است که اجازه ورود ذرات دانه‌ریز به دهانه چاه داده شود و از ورود ذرات بزرگ‌تر جلوگیری شود [۳۶، ۳۰]. مدل الاستیک غیرخطی دانکن - چانگ برای رسوبات هیدرات‌های گازی استفاده می‌شود. این مدل به‌طور گسترده رابطه غیرخطی تنش و کرنش را بیان می‌کند و با ترکیب این معادله و معیار شکست موهر-کلمب<sup>۲۵</sup> رابطه (۴) به دست می‌آید. از سوی دیگر تنش مؤثر بر هیدرات‌ها در محیط متخلخل با اشباع جزئی از رابطه (۵) به دست می‌آید [۴۰، ۳۰].

$$E_t = KP \left(\frac{\sigma_3}{P}\right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2C \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}\right]^2 \quad (4)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{S_w P_w + S_g P_g}{S_w + S_g} \delta_{ij} \quad (5)$$

که در آن  $n$  و  $K$ : پارامترهای مدل الاستیک غیرخطی دانکن-چانگ،  $R_f$ : نسبت شکست،  $\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی (درجه)،  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ : به ترتیب بیشینه و کمینه تنش اصلی (پاسکال)،  $S_w$ ،  $S_g$  و  $\delta_{ij}$ :  $C$ : به ترتیب اشباع، تابع دلتای کرونگر و

نمود. سه روش کلی برای تولید گاز طبیعی از مخازن هیدرات‌های گازی به کار برده می‌شوند که عبارتند از:

۱. کاهش فشار

۲. تحریک گرمایی

۳. تزریق مواد شیمیایی [۳۴، ۳۱، ۳۰].

در روش تحریک گرمایی با افزایش دما به وسیله بخار یا آب داغ به تجزیه هیدرات‌ها کمک می‌شود. این گرما منجر به آزاد شدن گازهایی مانند متان می‌شود که می‌توان با حفر چاهی مجزا آن را به سطح منتقل نمود. در روش تزریق مواد شیمیایی، موادی بازدارنده برای از بین بردن تعادل میان فشار و دما در منطقه حاوی هیدرات تزریق می‌شود تا منجر به تجزیه هیدرات‌ها و تولید گاز شود [۳۵].

### ۱-۳-۲- جنبه‌های ژئومکانیکی مخازن هیدرات‌های گازی

هیدرات‌های گازی در لایه‌های رسوبی در قالب سیمان، پرکننده حفره‌ها و اسکلت‌های رسوبی نهشته می‌شوند بنابراین تأثیر بسزایی در ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های رسوبی می‌گذارند [۳۶]. با بهره‌برداری از این مخازن، هیدرات‌های گازی تجزیه و منجر به ایجاد جریان چند فاز در مخزن می‌شوند که به دنبال آن ویژگی‌هایی مانند تراوایی دچار تغییراتی می‌شوند [۳۷، ۳۰]. از همین رو ویژگی‌های فیزیکی مخازن هیدرات‌های گازی در طی فرآیند انتقال فاز تغییر می‌کنند و سختی و استحکام مخزن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال تزریق بخار تأثیر بیشتری نسبت به افت فشار بر روی استحکام لایه‌های رسوبی هیدرات‌های گازی دارد [۳۲]. در حفاری تحت شرایط فروتعدالی و فراتعدالی، دما نقش مهمی را در تجزیه سازندهای هیدرات‌های گازی ایفا می‌کند چون افزایش دما تجزیه هیدرات‌ها در ناحیه‌ی دهانه چاه را به دنبال دارد [۳۶]. حفاری فراتعدالی در مخازن هیدرات‌های گازی بسیار متداول است به این ترتیب فشار ستون سیال حفاری از فشار منفذی درون سازند بیشتر است. در این مخازن تغییرات دما منجر به تجزیه هیدرات‌های گازی و به دنبال آن تغییر در تنش‌های القایی وارد بر سازند می‌شود از همین رو برخلاف حفاری مخازن متعارف‌های گازی، در این مخازن دمای سیال حفاری نقش مهم‌تری را نسبت به چگالی آن در پایداری دیواره چاه ایفا می‌کند [۳۶]. برای جلوگیری از تجزیه هیدرات‌های گازی در حین فرآیند حفاری از پیش خنک‌کننده‌هایی برای کاهش دمای سیال حفاری استفاده

چسبندگی و  $\sigma_{ij}$  تنش مؤثر بر هیدرات‌ها (پاسکال) است.

#### ۴-۲- جنبه‌های ژئومکانیکی مخازن تزریقی دی‌اکسیدکربن

گاز دی‌اکسیدکربن از جمله گازهای گلخانه‌ای است که همچون سدی در برابر گرما عمل می‌کنند و مانع از سرد شدن زمین می‌شوند به همین جهت از آن‌ها به‌عنوان گازهای زیان‌آور برای محیط‌زیست یاد می‌شود. در همین راستا سعی بر آن است تا با ذخیره‌سازی آن‌ها در سفره‌های آب زیرزمینی و مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز این اثر مخرب از بین برود. در این میان مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز به سبب اطلاعات جامعی که در هنگام اکتشاف و بهره‌برداری از آن‌ها در اختیار است، فراهم بودن تجهیزات سرچاهی و حصول اطمینان از تخلیه حداکثری نفت و گاز موجود در مخزن در طی عملیات ازدیاد برداشت<sup>۲۶</sup> گزینه‌ای مناسب برای تزریق دی‌اکسیدکربن محسوب می‌شوند و در دسته مخازن غیرمتعارف طبقه‌بندی می‌شوند [۴۲، ۴۱].

جذب و ذخیره دی‌اکسیدکربن فناوری مؤثر و کارآمد در راستای کاهش اثر مخرب گازهای گلخانه‌ای تلقی می‌شود. در همین راستا دی‌اکسیدکربن در مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی می‌شود. در پاره‌ای از موارد مهندسان بهره‌بردار برای بهبود تولید و افزایش ضریب بازیابی از مخازن هیدروکربنی از عملیات تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در طی عملیات ازدیاد برداشت نیز استفاده می‌نمایند [۴۱]. یکی از عوامل مهم در دیدگاه ژئومکانیکی تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در طی فرآیند ازدیاد برداشت است. تزریق گاز منجر به جابه‌جایی سیالات برجا، کمک به تولید سیالات هیدروکربنی و افزایش ضریب بهره‌وری مخزن می‌شود بنابراین با افزایش تولید از مخزن و به دنبال آن کاهش فشار منفذی سیالات موجود در مخزن، استحکام مخزن در اثر افزایش فشارهای روباره کاهش می‌یابد و منجر به بروز تنش‌های القایی در نواحی اطراف دهانه چاه می‌شود [۴۲]. تزریق گاز در مخزن احتمال شکست برشی و کششی را افزایش می‌دهد و با تولید از مخزن و به دنبال آن کاهش فشار منفذی، تنش‌های افقی تغییر می‌کنند و این تغییرات در پی تولید از مخزن با استفاده از رابطه (۸) به دست می‌آیند [۴۱-۴۴]. در زمان تولید تغییری در تنش عمودی دیده نمی‌شود چون این تنش در اثر وزن لایه‌های فوقانی است. در رابطه‌های (۹) و (۱۰)،  $A$  فاکتور مسیر تنش است

که به نام تغییرات تنش‌های افقی در پی تولید یا تزریق از مخزن تعریف می‌شود. با تجزیه و تحلیل‌های ژئومکانیکی تأثیر تولید بر حالت تنش‌ها و پایداری گسل‌ها، شکاف‌ها در پوش‌سنگ و محیط مخزن و بیشینه فشار قابل تحمل برای تزریق دی‌اکسیدکربن قابل ارزیابی است [۴۵، ۴۶]. فشار بحرانی، فشار موردنیاز برای فعال‌سازی مجدد گسل‌های تصادفی در مخزن است که با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود، از سوی دیگر فانگ و همکارانش بیشینه فشار قابل تحمل در پوش‌سنگ را بر اساس رابطه (۷) تعریف می‌کنند [۴۶، ۴۷]. افزون بر ویژگی‌های پروالاستیک، تزریق دی‌اکسیدکربن در مخازن گازی با دمایی کمتر از دمای محیط مخزن باعث سرد شدن تدریجی سنگ مخزن در مجاورت چاه تزریقی می‌شود. این کاهش دما منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی و انقباض سنگ مخزن می‌شود که این تنش‌ها بر پایه رابطه (۹) قابل محاسبه هستند [۴۵].

$$P_c = \frac{3S_{H \max} - S_{h \min}}{2} \quad (6)$$

$$P_{\max} = S_{H \max - cap} + T_{s - cap} \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_T = \frac{E \Delta T \alpha_T}{1 - \nu} \quad (8)$$

$$\Delta \sigma_h = A \Delta P_p \quad (9)$$

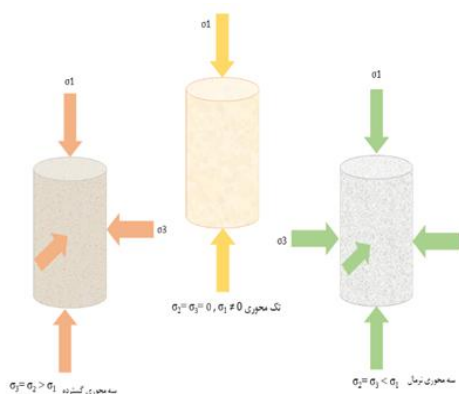
$$A = \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \quad (10)$$

که در آن  $P_c$ : فشار بحرانی (پاسکال)،  $S_{H \max}$ : بیشینه تنش افقی (پاسکال)،  $S_{h \min}$ : کمینه تنش افقی (پاسکال)،  $S_{H \max - cap}$ : بیشینه تنش افقی در پوش‌سنگ (پاسکال)،  $T_{s - cap}$ : مقاومت کششی در پوش‌سنگ (پاسکال)،  $\Delta \sigma_T$ : تغییرات تنش حرارتی (کلوین)،  $\alpha_T$ : ضریب انبساط خطی دمای سنگ (عکس کلوین)،  $A \cdot E$  و  $\nu$  و  $\alpha$ : به ترتیب مدول یانگ، فاکتور مسیر تنش، نسبت پواسون<sup>۲۷</sup> و ثابت بایوت،  $\Delta P_p$ : اختلاف بین فشار اولیه و پایانی مخزن (پاسکال)،  $\Delta \sigma_h$ : کل تنش‌های مؤثر افقی است.

#### ۴-۲-۱- تست نشستی<sup>۲۸</sup> مخازن تزریقی دی‌اکسیدکربن

از تست نشستی برای محاسبه تنش‌های افقی استفاده می‌شود. این آزمایش پس از نصب لوله‌جداری در زمان عملیات حفاری برای تعیین پنجره وزن گل یا بیشینه فشار قابل تحمل پاشنه لوله‌جداری<sup>۲۹</sup> انجام می‌شود [۴۸]. در طی این عملیات چاه برای مدتی بسته می‌شود و سیال با دبی

شدگی) تحت بار محوری قرار می‌گیرد. آزمایش فشرده‌سازی سه‌محوری براساس تعداد مرحله‌های آزمایش و ماهیت بار محوری اعمالی بر نمونه به فشرده‌سازی تک مرحله‌ای<sup>۳۱</sup> و چندمرحله‌ای<sup>۳۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود [۵۱، ۵۳]. از سوی دیگر در روش دینامیک، برای اندازه‌گیری سرعت صوتی موج‌های فشاری و برشی که در میان نمونه حرکت می‌کنند از روش فراصوت استفاده می‌شود. موج فشاری سریع‌ترین حرکت را دارد و مواد را در جهت انتشار خود فشرده و منبسط می‌کند، باین‌حال موج برشی آرام‌تر حرکت می‌کند و باعث نوسان مواد در طول مسیر انتشار خود می‌شود [۲۲، ۱۱]. محدوده فرکانس موج‌ها برای اندازه‌گیری‌های صوتی تحت تأثیر اندازه‌ی نمونه می‌باشند. مزایا و معایب این روش شامل، تعیین مدول الاستیک دینامیک و وابستگی محدوده فرکانس موج‌ها به اندازه نمونه می‌شوند [۱۲، ۱۱]. شکل ۲ الگویی از تنش‌های وارد بر نمونه مغزه در آزمایش تک‌محوری و سه محوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲: روند اعمال تنش‌ها در آزمایش تک‌محوری و سه‌محوری

### ۳-۱- ویژگی‌های الاستیک مخازن گازی

تجزیه و تحلیل ژئومکانیکی به مقایسه ویژگی‌های الاستیک سنگ و مقاومت آن در برابر تنش‌های برجا وابسته است [۲۲، ۱۲]. زمانی که تنش‌های وارد بر سنگ از نقطه تسلیم<sup>۳۳</sup> کمتر باشند سنگ از نظر الاستیک تغییر شکل می‌دهد. هنگامی که تنش‌های وارد بر آن از مقاومت فشاری سنگ بیشتر شوند، از طریق برش یا تراکم به صورت غیرخطی و غیر برگشت‌پذیر تغییر شکل می‌دهد و هنگامی که تنش‌ها کششی شوند ممکن است شکستگی ایجاد شود [۱۱]. ویژگی‌های رایجی مانند نسبت پواسون، مدول یانگ، مدول توده و مدول برشی در توصیف

ثابت به درون چاه پمپ می‌شود. سپس فشار متناسب با حجم سیال پمپ شده در سازند، افزایش می‌یابد تا به نقطه نشستی یا شروع فشار شکست سازند برسد. کاهش فشار بیانگر ایجاد شکاف است و در این زمان بخشی از حجم سیال تزریقی در سازند نفوذ می‌کند. با شروع توزیع شکاف و دستیابی به فشار توزیع شکاف، ناگهان پمپ خاموش می‌شود و سریع افت فشار رخ می‌دهد. شکاف‌ها در فشار بستگی<sup>۳۰</sup> مسدود می‌شوند و در این زمان قابل‌اعتمادترین مقدار برای کمینه تنش افقی به دست می‌آید. در تعدادی از عمق‌های موردنظر، آزمایش نشستی در دسترس نیست بنابراین از نسبت تنش مؤثر (رابطه ۱۱) برای محاسبه کمینه تنش افقی در مخزن و پوش سنگ استفاده می‌شود [۴۶].

$$E_{SR} = \frac{S_{h \min} - P_p}{S_v - P_p} = 0.5 \quad (11)$$

که در آن  $E_{SR}$ : نسبت تنش مؤثر،  $S_{h \min}$ : کمینه تنش افقی (پاسکال)،  $P_p$ : فشار منفذی (پاسکال)،  $S_v$ : تنش عمودی (پاسکال) است.

### ۳- مولفه‌های ژئومکانیکی در مخازن گازی

دانش خواص ژئومکانیکی به تعریف محل آغاز شکاف هیدرولیکی، محل وقوع زلزله‌های کوچک مرتبط با شکاف‌ها و طراحی فاصله و شکاف برای چاه می‌پردازد [۱۱]. ویژگی‌های ژئومکانیکی که با تکنیک‌های تجربی و آزمایشگاهی ارزیابی می‌شوند تحت عنوان ویژگی‌های استاتیک و آن‌هایی که با اندازه‌گیری‌های صوتی ارزیابی می‌شوند تحت عنوان ویژگی‌های دینامیک نام برده می‌شوند [۴۹]. در روش استاتیک از آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و سه محوری استفاده می‌شود. عوامل داخلی و خارجی که روی مقاومت فشاری تک‌محوری اثرگذار هستند شامل تخلخل، ناهمسانگردی و چگالی در راستای عوامل داخلی و ویژگی‌های دستگاه آزمایش در راستای عوامل خارجی هستند. در آزمایش مقاومت تک‌محوری یک نمونه سنگ استوانه‌ای در برابر بارگذاری محوری بین دو صفحه سخت و موازی قرار می‌گیرد تا مؤلفه‌های مدول یانگ و نسبت پواسون اندازه‌گیری شوند [۵۰]. نمونه سنگ معمولاً در راستای محور دچار شکست برشی منفرد یا چندگانه می‌شود. در آزمایش سه‌محوری نمونه با نسبت طول به قطر ۳:۱ یا ۲:۱ با سطوح مسطح (به منظور جلوگیری از خم



در ترکیب با تنش‌های عمودی در اعماق زمین بر مخزن اثر می‌گذارند [۴۹]. تنش‌های اصلی برجا با  $S_v$  (تنش عمودی)،  $S_{h \min}$  (کمینه تنش افقی) و  $S_{H \max}$  (بیشینه تنش افقی) نمایش داده می‌شوند. تنش‌های عمودی از وزن سنگ سازندهای فوقانی و سیالات موجود در آن‌ها ناشی می‌شوند و نسبت پواسون باعث گسترش و انبساط لایه‌های افقی زیرین در جهت عرضی می‌شوند. برای محاسبه‌ی تنش عمودی  $S_v$  از رابطه انتگرالی (۲۰) استفاده می‌شود. اگر محاسبات مربوط به یک سازند در منطقه دریایی باشد آنگاه باید عمق دریا را وارد محاسبات کرد و از رابطه (۲۱) تنش عمودی را محاسبه نمود. در برخی مطالعه‌ها ثابت شده است که با افزایش تنش قائم، فشار شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد [۵۸، ۵۰، ۱۱].

$$S_v = \int_0^z \rho(z)g dz = \rho_{ave}gz \quad (20)$$

$$S_v = \rho_w z_w g + \int_{z_w}^z \rho(z)g dz \quad (21)$$

$$= \rho_w z_w g + \rho_{ave}g(z - z_w)$$

که در آن  $S_v$ : تنش عمودی (پاسکال)،  $\rho$  و  $\rho_{ave}$ : به ترتیب دانسیته میانگین و دانسیته (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $Z_w$ : عمق آب (متر)،  $g$ : شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه) است.

از دو مدل همسانگرد<sup>۳۴</sup> و ناهمسانگرد<sup>۳۵</sup> برای تعیین تنش‌های افقی کمینه و بیشینه استفاده می‌کنند که این تنش‌ها با کمک روابط (۲۲) و (۲۳) و در روابط (۲۴) و (۲۵) به ترتیب برای مدل همسانگرد و ناهمسانگرد به دست می‌آیند [۶۲]. مدل همسانگرد فرض می‌کند که مؤلفه‌های الاستیک سنگ در جهت‌های مختلف در یک سنگ همگن سالم تغییر نمی‌کنند با این حال در مدل ناهمسانگرد فرض می‌شود که مؤلفه‌های الاستیک در جهت‌های مختلف در سنگ‌های ناهمگن مانند گاز شیل‌ها تغییر می‌کنند [۵۹-۶۱].

$$S_{h \min} - \alpha P_p = \frac{v}{1-v}(\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-v^2} \epsilon_h + \frac{Ev}{1-v^2} \epsilon_H \quad (22)$$

$$S_{H \max} - \alpha P_p = \frac{v}{1-v}(\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-v^2} \epsilon_H + \frac{Ev}{1-v^2} \epsilon_h \quad (23)$$

الاستیسیته سنگ‌های همگن به کار می‌روند. از داده‌های دینامیکی نیز مانند سرعت موج‌های برشی و فشاری و چگالی توده که از نمودارهای دوقطبی صوتی و نمودارهای دانسیته به دست می‌آیند می‌توان با استفاده از رابطه‌های ۱۲ - ۱۸ مدول یانگ، نسبت پواسون و فشار منفذی را محاسبه کرد. فشار منفذی از رابطه ایتون نیز به دست می‌آید. در این روش از اشعه‌ی گاما استفاده می‌کنند که رابطه (۱۹) بیانگر آن است. در رابطه (۱۹)  $\Delta T_n$  روند طبیعی گذر صوت و  $\Delta T_{log}$  مقدار مشاهده‌شده از نگار صوتی هستند [۵۴-۵۷].

$$v = \frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{axial}} \quad (12)$$

$$E = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (13)$$

$$K = \frac{\sigma_p}{\epsilon_{vol}} \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{T}{\gamma} \quad (15)$$

$$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (16)$$

$$E_{dyn} = \frac{\rho V_s^2 (V_p^2 - 2V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (17)$$

$$P_p = \frac{TVD \times MW}{144} \quad (18)$$

$$P = \sigma_v - (\sigma_v - P_{hyd}) \left( \frac{\Delta T_n}{\Delta T_{log}} \right)^3 \quad (19)$$

که در آن  $\epsilon_{lateral}$ ،  $\epsilon_{axial}$  و  $\epsilon_{vol}$ : به ترتیب کرنش جانبی، محوری و حجمی،  $V_s$ : سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)،  $V_p$ : سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)،  $\rho$ : چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $TVD$ : عمق عمودی چاه (متر)،  $MW$ : وزن گل (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $\sigma_v$  و  $\sigma_p$ : به ترتیب تنش عمودی و هیدرواستاتیک (پاسکال)،  $P_{hyd}$ : فشار هیدرواستاتیک (پاسکال)،  $T$ : تنش برشی (پاسکال)،  $\gamma$ : کرنش برشی،  $v_{dyn}$  و  $v$ : به ترتیب نسبت پواسون دینامیک و استاتیک،  $E$  و  $E_{dyn}$ : به ترتیب مدول یانگ دینامیک و استاتیک،  $\Delta T_n$ : روند طبیعی گذر صوت،  $\Delta T_{log}$ : مقدار مشاهده شده از نگار صوتی است.

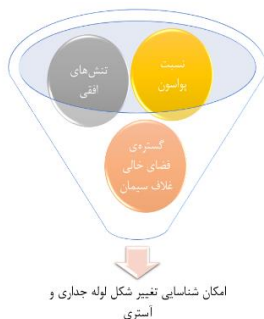
## ۲-۳- تنش‌های اصلی برجا در مخازن گازی

ویژگی‌های الاستیک مانند نسبت پواسون و مدول یانگ مؤلفه‌هایی مهم در تعریف تنش‌های افقی برجا هستند که

شامل حفاری فروتعدالی، حفاری با لوله‌جداری و حفاری با کنترل فشار می‌شوند [۴].

#### ۴-۱- مچاله شدن لوله‌جداری<sup>۳۷</sup>

با راندن لوله‌جداری درون چاه، فضای حلقوی بین لوله‌جداری و سازند را برای جلوگیری از خوردگی و محافظت از لوله‌جداری در برابر جریان سیال سیمان گذاری می‌کنند. با این حال اگر نوع لوله‌جداری و سیمان انتخابی از مواد نامناسب باشد و یا اگر به‌خوبی طراحی و نصب نشود این امکان وجود خواهد داشت که تنش‌های زیرسطحی بر مقاومت سیمان و لوله‌جداری غلبه کنند و باعث مچاله شدن لوله‌جداری شوند [۶۳]. مچالگی لوله‌جداری پدیده‌ای است که به دلیل تنش‌های یکنواخت و غیریکنواخت اعمالی از محیط اطراف بر بدنه آن فرو می‌ریزد. ویژگی‌های سنگ مخزن یکی از مکانیزم‌های مرتبط با مچاله شدن لوله‌جداری است [۵۶، ۴]. برای شناسایی ناحیه‌هایی با خطر بالا در رابطه با مچاله شدن لوله‌جداری می‌توان از پیش‌بینی نسبت پواسون و تنش‌های افقی و عمودی در ناحیه‌های مختلف بهره برد. از دلایل تغییر شکل لوله‌جداری می‌توان به تفاوت زیاد بین بیشینه و کمینه تنش افقی اشاره کرد. این افزایش اختلاف منجر به افزایش شعاع دایره موهر-کلمب و درنهایت تلاقی آن با منحنی شکست می‌شود. شکل ۳ عوامل مؤثر در تغییر شکل لوله‌جداری و آستری را نشان می‌دهد. اگر فرآیند سیمان‌کاری ضعیف باشد می‌تواند به بروز مجراهای حلقوی بسیار کوچک برای عبور جریان منجر شود که درنهایت باعث تغییر شکل لوله‌جداری می‌شوند [۶۳، ۶۴].



شکل ۳: عوامل مؤثر برای پیش‌بینی و شناسایی تغییر شکل لوله‌جداری و آستری

$$S_{H \min} - \alpha P_p = \frac{E_{hor} \nu_{ver}}{E_{ver}(1-\nu_{hor})} (\sigma_v - \alpha(1-\xi)P_p) + \frac{E_{hor}}{1-\nu_{hor}^2} \varepsilon_h + \frac{E_{hor}\nu_{hor}}{1-\nu_{hor}^2} \varepsilon_H \quad (24)$$

$$S_{H \max} - \alpha P_p = \frac{E_{hor} \nu_{ver}}{E_{ver}(1-\nu_{hor})} (\sigma_v - \alpha(1-\xi)P_p) + \frac{E_{hor}}{1-\nu_{hor}^2} \varepsilon_H + \frac{E_{hor}\nu_{hor}}{1-\nu_{hor}^2} \varepsilon_h \quad (25)$$

که در آن  $S_{H \min}$ : کمینه تنش افقی (پاسکال)،  $S_{H \max}$ : بیشینه تنش افقی (پاسکال)،  $E$  و  $\nu$  و  $\alpha$ : به ترتیب مدول یانگ، نسبت پواسون و ثابت بایوت،  $P_p$ : فشار منفذی (پاسکال)،  $\xi$ : ثابت پروالاستیک،  $E_{hor}$  و  $E_{ver}$ : به ترتیب مدول یانگ افقی و عمودی،  $\nu_{hor}$  و  $\nu_{ver}$ : نسبت پواسون افقی و عمودی است.

تنش‌های درجا مولفه‌هایی بسیار مهم برای بررسی فرآیند شکاف هیدرولیکی هستند که شامل سه تنش مستقل از هم همچون تنش عمودی، کمینه تنش افقی و بیشینه تنش افقی می‌شوند [۵]. اندازه تنش‌های اصلی و رژیم‌های تنشی بر جهت انتشار شکاف هیدرولیکی و نحوه انتشار آن‌ها اثرگذار هستند. براساس بزرگی و اندازه این تنش‌ها می‌توان سه رژیم تنشی را متصور شد که عبارت‌اند از:

الف- تنش گسلی نرمال ( $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ )

ب- تنش گسلی امتداد لغز ( $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ )

ج- تنش گسلی معکوس ( $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ ) [۲۰].

#### ۴- چالش‌های حفاری چاه‌های گازی از دیدگاه ژئومکانیکی

در حفاری مخازن متراکم گازی چالش‌های زیادی مانند هرزروی گل به دلیل شکستگی‌های طبیعی یا فشار پایین، لغزش در لایه‌های شیلی، آسیب سازند و سایش مته در برابر صنعت است. برای جلوگیری از آسیب و انسداد شکستگی‌های طبیعی در حین عملیات حفاری و کسب اطمینان از حفظ بهره‌وری مخزن، از روش حفاری فروتعدالی<sup>۳۶</sup> استفاده می‌کنند [۲۶]. در حین عملیات حفاری فروتعدالی توجه به ناپایداری دیواره چاه نکته‌ای بسیار مهم است. روش متداول برای حل این مشکل، اتصال شکستگی‌های طبیعی با شکاف هیدرولیکی است که به این ترتیب می‌توان از آسیب سازند در نواحی اطراف چاه عبور کرد [۶۲]. روش‌های حفاری برای توسعه این میدان‌ها

۲-۴- تغییر شکل لوله آستری<sup>۳۸</sup>

یکی از مشکل‌های چالش‌برانگیز در چاه‌های عمیق گازی تغییر شکل لوله آستری است. معمولاً این اتفاق در طی فرآیند شکاف هیدرولیکی و زمانی که مقاومت کششی سیمان اطراف آن دچار تغییر می‌شود، رخ می‌دهد. فضای خالی درون غلاف سیمان از دلایل این اتفاق به‌شمار می‌رود [۸]. معمولاً در طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی ارزیابی سیمان و واکنش متقابل آن با سازند و لوله آستری برای تشخیص یکپارچگی مکانیکی لوله آستری نادیده گرفته می‌شوند. گروهی از محققان سه نوع مدل مطالعاتی مبنی بر گستره فضای خالی در ناحیه سیمان شده ارائه داده‌اند. شبیه‌سازی هیدرومکانیکی برای هر سه مدل به‌طور مشابه انجام می‌شود. در همین راستا پس از رسیدن مدل‌ها به حالت تعادل، فشار منفذی در نواحی اطراف چاه تا حدود ۱۳۸ مگا پاسکال افزایش یافت. برای شبیه‌سازی شرایط عملیاتی، فشار درون چاه فوراً به فشار هیدرولیکی افزوده می‌شود درحالی‌که فشار در ناحیه سیمان شده با گستره فضای خالی به تدریج افزوده می‌شود. در مدل اول، ۵۰ درصد غلاف سیمان را اندازه گستره فضای خالی تشکیل می‌دهد. بر پایه گزارش‌ها تنش‌های شعاعی و مماسی به دلیل وجود فضای خالی بزرگ در غلاف سیمان به شدت مختل شده‌اند. در مدل دوم، گستره فضای خالی به ۲۵ درصد کاهش می‌یابد که این فضا یک‌چهارم کل فضای غلاف سیمان اطراف لوله آستری است. در این حالت لوله آستری به بیشینه مقاومت تسلیم می‌رسد و قبل از رسیدن به فشار ۱۳۸ مگا پاسکال شروع به تغییر شکل می‌کند. با افزایش فشار منفذی لوله آستری تحت تنش و کشش قرار می‌گیرد. تغییر شکل لوله آستری به صورت یک نیمه بیضوی به سمت سازند رخ می‌دهد. لوله آستری با رسیدن فشار منفذی به ۱۳۸ مگا پاسکال یکپارچگی مکانیکی خود را کاملاً از دست می‌دهد. در مدل سوم، گستره فضای خالی به ۱۲/۵ درصد غلاف سیمان می‌رسد. ناحیه‌ی سمت راست لوله آستری تحت فشار قرار می‌گیرد درحالی‌که ناحیه سمت چپ به دلیل وجود فضای خالی تحت کشش و فشردگی قرار دارد. با توجه به این‌که فشار درون چاه بسیار بالاتر از فشار ناحیه سیمان شده همراه با فضای خالی است، در ابتدا تحریک با شکاف هیدرولیکی است. تغییر شکل لوله آستری به صورت زاویه‌ای خارجی با اندازه‌ای برابر گستره فضای

خالی در غلاف سیمان است. بر پایه این سه مدل هرچه گستره فضای خالی در غلاف سیمان بیشتر باشد لوله آستری یکپارچگی خود را سریع‌تر از دست می‌دهد و تغییر شکل لوله آستری ارتباطی مستقیم با اندازه‌ی فضای خالی موجود در غلاف سیمان دارد [۶۵].

## ۵- معیارهای شکست در مخازن گازی

از متداول‌ترین مکانیزم‌هایی که باعث ناپایداری در چاه می‌شوند می‌توان به شکست‌های کششی، برشی و فشاری اشاره کرد [۱۱]. به‌طور مثال اگر تنش‌های اعمالی بر توده‌ی سنگ بیش از مقاومت فشاری آن باشد شکست فشاری بزرگی رخ می‌دهد اما اگر توده‌ی سنگ شکل‌پذیر باشد این شکست تدریجی رخ می‌دهد [۱۱]. استحکام توده‌ی سنگ به دو جز استحکام ماتریس سنگ و استحکام ناپیوستگی‌های سنگ بستگی دارد. با توجه به شرایط دما حالت تنش و نرخ بارگذاری رفتار مواد در هنگام شکست می‌تواند به صورت شکننده یا شکل‌پذیر باشد [۵۹، ۱۱]. معیارهای شکست مختلفی همچون معیار هوک-براون، موهر-کلمب و اصلاح‌شده لید برای تعیین مقاومت سنگ‌های همگن سالم وجود دارند. معیارهای شکست موهر-کلمب و هوک-براون<sup>۳۹</sup> به ترتیب مطابق با رابطه‌های (۲۶) و (۲۷) هستند. در رابطه (۲۷)،  $C$  تقاطع پوش شکست با محور مقاومت برشی است که از آن به نام چسبندگی<sup>۴۰</sup> یاد می‌شود [۶۶-۶۸، ۵۹].

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (26)$$

$$\tau = \sigma \tan \theta + C \quad (27)$$

که در آن  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ : به ترتیب بیشینه و کمینه تنش اصلی (پاسکال)،  $S$ ، و  $m$ : ثابت مواد،  $\sigma_{ci}$ : مقاومت فشاری تک‌محوری،  $\tau$ : مقاومت برشی (پاسکال)،  $C$ : چسبندگی،  $\theta$ : زاویه‌ی اصطکاک (درجه) است.

شکل ۴ پوش شکست معیارهای مختلف در یک فضای تنش سه بعدی را نشان داده است. حالت‌های تنشی که نقطه شکست سنگ را توصیف می‌کنند پوش شکست را لمس کرده و حالت‌هایی که از خط شکست بیشتر می‌شوند نشان‌دهنده شکست سنگ در گذشته است [۱۱].

روندی کاهش و نسبت پواسون روندی افزایشی دارند. نسبت پواسون و مدول یانگ بر شکنندگی شیل‌ها در مخازن غیرمتعارف اثرگذار هستند و تغییر در آن‌ها می‌تواند سازند را به گزینه مناسبی برای عملیات شکاف هیدرولیکی تبدیل نماید. مطالعات بیانگر آن هستند که سازندی با نسبت پواسون بیشتر سخت‌تر شکسته می‌شود از همین‌رو سازند مارسلوس به سبب نسبت پواسون کمتر در مقایسه با سازند لانگ مکی گزینه مناسب‌تری برای عملیات شکاف هیدرولیکی تلقی می‌شود. در خصوص معیار شکست، نمونه‌های شیل مورد مطالعه توسط محققان در دمای پایین (۲۵ درجه سانتی‌گراد) از شکست کششی و در دمای بالا (۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) از شکست برشی یا ترکیبی از هردوی آن‌ها رنج می‌برند [۷۱-۷۳].

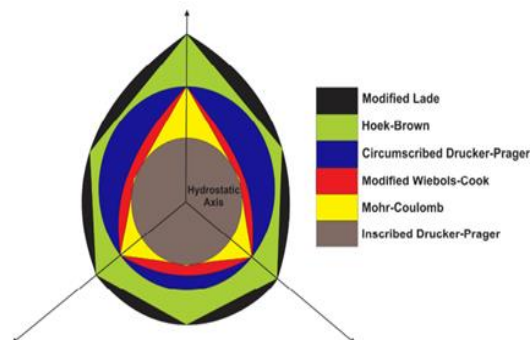
## ۶-۲- مطالعات ژئومکانیکی در میدان‌های گازی روزنیت<sup>۴۶</sup> و مورتری<sup>۴۷</sup>

سازندهای روزنیت و مورتری در حوضه کوپر کشور استرالیا واقع شده‌اند. آمر و همکارانش پنج چاه در یک میدان این حوضه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این سازندها دارای مقدار زیادی شیل با بسترهای لای سنگی<sup>۴۸</sup> دارای کوارتز، رس، مواد معدنی بسیار و کربنات‌ها هستند [۵۵].

### ۶-۲-۱- بررسی شکاف هیدرولیکی در میدان‌های روزنیت و مورتری

یکی از دلایل مهم بررسی مدل‌های ژئومکانیکی، طراحی و اجرای عملیات شکاف هیدرولیکی به بهترین شکل ممکن است. شکاف هیدرولیکی روشی برای بهره‌برداری بیشتر از مخازن هیدروکربنی است. در طراحی و انجام عملیات شکاف هیدرولیکی ویژگی‌های مختلف لایه‌های زیرزمینی، رئولوژی سیال، تنش‌های برجا و دبی سیال مورد توجه قرار می‌گیرند [۵۵]. زیرا هر یک از این لایه‌ها دارای ویژگی‌های الاستیک منحصربه‌فرد می‌باشند. به‌طور کلی سه نوع فرآیند در زمان عملیات شکاف هیدرولیکی برای تحریک شکستگی‌ها صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از [۷۴، ۵۵]:

۱. فعال‌سازی شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند Popen (رابطه ۲۸)
۲. بازگشایی مجدد شکاف‌های بسته Pclose (رابطه ۲۹)
۳. شکستن سنگ سالم برای ایجاد شکافی جدید Pb



شکل ۴: پوش معیارهای مختلف شکست [۱۱]

## ۶- مطالعات موردی موفق در زمینه مطالعات ژئومکانیکی در مخازن گازی غیرمتعارف

### ۶-۱- مطالعات ژئومکانیکی در میدان‌های گازی مارسلوس<sup>۴۱</sup> و لانگ مکی<sup>۴۲</sup>

سازند لانگ مکی در غرب استان هونان<sup>۴۳</sup> کشور چین واقع شده است. ضخامت زیاد لایه‌های شیلی یکی از ویژگی‌های شایان توجه در راستای شناخت بیشتر این مخازن قلمداد می‌شود که منجر به حفر چاه‌های اکتشافی بیشتر گردیده است. برای محاسبه پارامترهای دینامیک و استاتیک از هشت نمونه مغزه فشرده شیلی و چهار نمونه مغزه آهکی متعلق به دوره اردوسین<sup>۴۴</sup> در مطالعه ویهوا و همکارانش استفاده شده است. سازند شیلی مارسلوس متعلق به دوره میانی دونین است که در شمال شرقی آمریکا واقع شده است و توزیع آن به‌طور گسترده در حوضه آپالاش<sup>۴۵</sup> می‌باشد [۷۰، ۶۹].

### ۶-۱-۱- بررسی اثر محدود کردن فشار بر مدول یانگ، نسبت پواسون و عملیات شکاف هیدرولیکی

شیل لانگ مکی مدول یانگ بیشتری نسبت به سازند شیلی مارسلوس دارد و افزایش فشارهای محدودکننده باعث افزایش نسبت پواسون می‌شوند [۱۱]. بر پایه مطالعه‌های بینگ‌هو ویژگی‌های مکانیکی گاز شیل‌ها در شرایط دمایی بالا تغییر می‌کنند. با افزایش فشارهای محدودکننده استحکام شیل ابتدا افزایشی و سپس نزولی می‌شود و نسبت پواسون نیز به تدریج افزایش می‌یابد. دما تأثیر زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها دارد به‌این ترتیب که در دمای پایین، استحکام و مدول‌های الاستیسیته روندی افزایشی داشته و نسبت پواسون کاهش می‌یابد. در دمای بالا، استحکام و مدول‌های الاستیسیته

$$M = \frac{\alpha \rho_b}{(\Delta t_c)^2} \quad (31)$$

$$G = \frac{\alpha \rho_b}{(\Delta t_s)^2} \quad (32)$$

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (33)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (34)$$

که در آن  $\Delta t_c$ : زمان گذر موج فشار،  $\rho_b$ : چگالی توده،  $M$ : مدول فشاری،  $G$ : مدول برشی،  $E$ : مدول یانگ،  $\nu$ : نسبت پواسون است.

با توجه به مطالب بیان‌شده، حفاری چاه افقی به‌واسطه ایجاد سطح تماس بیشتر میان چاه و مخزن و عملیات شکاف هیدرولیکی بهترین روش تحریک مخزن در مخازن غیرمتعارف محسوب می‌شوند. از همین رو ارزیابی ویژگی‌های ژئومکانیکی برای افزایش ضریب بازیابی مخازن غیرمتعارف هیدروکربنی اقدامی لازم و ضروری به‌شمار می‌رود. با توجه به وجود لایه‌های شیلی به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین اجزاء سازنده مخازن غیرمتعارف، پیش‌بینی نسبت پواسون و مدول یانگ برای تعریف شاخص شکاف‌پذیری و تأثیر آن‌ها بر شکنندگی شیل‌ها از جمله اقدامات مؤثر در راستای طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی بهینه تلقی می‌شوند بنابراین با استفاده از مدول یانگ، نسبت پواسون و بهره‌گیری از رابطه (۳۵) تحت عنوان شاخص شکاف‌پذیری می‌توان میزان تأثیر عملیات شکاف هیدرولیکی بر سازند را بررسی نمود. برپایه تعریف شاخص شکاف‌پذیری بر اساس رابطه (۳۵) سازندی با شاخص شکاف‌پذیری برابر با ۱ مناسب‌ترین سازند و سازندی با شاخص شکاف‌پذیری برابر با ۰ بدترین سازند برای تحریک به‌وسیله شکاف هیدرولیکی تلقی می‌شوند [۷۷، ۷۶].

$$FI = \frac{B_n - E_n}{2} \quad (35)$$

که در آن  $B_n$ : شاخص شکنندگی نرمال‌شده و  $E_n$ : مدول یانگ نرمال‌شده است.

#### ۴-۶- مطالعات ژئومکانیکی در سازند کوپیاگوا<sup>۵۰</sup> کلمبیا

میدان‌های نفت و گاز کوپیاگوا در کوهپایه‌های لیانوس<sup>۵۱</sup> کشور کلمبیا واقع شده‌است. رانشی مایل میداین

همان‌طور که در رابطه (۳۰) مشاهده می‌شود فشار شکست سازند به رفتار تنش‌ها و ارتباط آن‌ها با سنگ‌شناسی مرتبط است و به‌این‌ترتیب فرآیند شکاف هیدرولیکی را کنترل می‌کند. برای سنگ مخزنی با تنش افقی پایین همچون مخزن ماسه سنگی، فشار شکست سازند به مراتب پایین‌تر است حال آن‌که مخزن شیلی با تنش افقی بیشتر دارای فشار شکست بیشتری است برای همین این سازند از گسترش شکاف‌ها جلوگیری می‌کند. توزیع غیریکپارچه شکاف‌های القایی یکی از مشکلات متداول در مخازن گاز شیل به‌شمار می‌روند که ناشی از ناهمگونی مخزن و عملیات شکاف هیدرولیکی با بازدهی پایین هستند [۵۸، ۲۰].

$$P_{open} = \sigma_{h \min} \quad (28)$$

$$P_{close} = 3\sigma_{h \min} - \sigma_{H \max} - P_p \quad (29)$$

$$P_b = 3\sigma_{h \min} - \sigma_{H \max} - P_p + T_0 \quad (30)$$

که در آن  $\sigma_{h \min}$ : کمینه تنش افقی (پاسکال)،  $\sigma_{H \max}$ : بیشینه تنش افقی (پاسکال)،  $P_{open}$ : فشار فعال‌شدن شکاف‌ها (پاسکال)،  $P_{close}$ : فشار بازگشایی مجدد شکاف‌ها (پاسکال)،  $P_b$ : فشار شکست سازند (پاسکال)،  $P_p$ : فشار منفذی (پاسکال)،  $T_0$ : تنش کششی (پاسکال) است.

#### ۳-۶- مطالعات ژئومکانیکی در سازند مونتنی<sup>۴۹</sup> کانادا

عملیات شکاف هیدرولیکی برای اولین بار در کشور کانادا برای افزایش ضریب بازیابی هیدروکربن مورد استفاده قرار گرفته است. سازند مونتنی یک واحد چینه‌شناسی از دوران تریاس در نواحی غرب کشور کانادا مانند آلبرتا و بریتیش کلمبیا واقع شده است. این سازند از شیل‌های خاکستری تیره همراه با سیلت‌های دولومیتی تشکیل شده است [۷۵].

#### ۱-۳-۶- ویژگی‌های ژئومکانیکی و عملیات شکاف هیدرولیکی در سازند مونتنی

نسبت پواسون و مدول یانگ از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های ژئومکانیکی در مخازن غیرمتعارف تلقی می‌شوند. با استفاده از زمان گذر امواج برشی و فشاری می‌توان ویژگی‌های ژئومکانیکی را ارزیابی نمود. در همین راستا از رابطه‌های (۳۱) الی (۳۴) به‌منظور پیش‌بینی این ویژگی‌ها استفاده می‌شود [۷۶].

$$P_b = 3\sigma_H - \sigma_V \quad (36)$$

$$P_b = \frac{3}{2}\sigma_l - \sigma_L + \frac{1}{2}\sigma_c \quad (37)$$

که در آن  $P_b$ : فشار شکست سازند (پاسکال)،  $\sigma_c$ : مقاومت کششی (پاسکال)،  $\sigma_H$ : بیشینه تنش افقی (پاسکال) و  $\sigma_V$ : تنش عمودی (پاسکال) است.

#### ۷- بحث و بررسی

علم ژئومکانیک تأثیر زیادی در مدیریت عملیات حفاری، بهبود بهره‌برداری و طراحی شکاف هیدرولیکی در مخازن غیرمتعارف گازی دارد. از روش‌های استاتیک و دینامیک مختلف برای بررسی و تعیین ویژگی‌های الاستیک لایه‌های متفاوت استفاده می‌شود. در این میان روش‌های دینامیک دارای برتری نسبی نسبت به روش‌های استاتیک در زمینه صرفه‌جویی در هزینه و زمان بوده و در عین حال از دقت پایین‌تری نسبت به روش‌های استاتیک برخوردار هستند. از جمله روش‌های دینامیک می‌توان به استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی مانند گاما، تخلخل و قطر سنج<sup>۵۲</sup> اشاره کرد [۷۹]. لاگ قطر سنج با استفاده از بازوهای تشکیل‌دهنده خود قطر چاه را اندازه‌گیری می‌کند و در قیاس با قطر مته حفاری نواحی مستعد فروریختگی را شناسایی می‌کند. در آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و سه محوری به نمونه مغزه نیاز است البته لازم به ذکر است که در مواردی ویژه با برخی رابطه‌های تجربی می‌توان ویژگی‌های مختلف را به دست آورد. آزمایش فشرده‌سازی سه محوری به واسطه به وجود آوردن شرایطی مشابه با شرایط مخزن از اهمیت زیادی برخوردار است، در شکل ۵ نمایی از این آزمایش مشاهده می‌شود. ناهمگنی توزیع تنش در زمان آزمایش فشرده‌سازی تک‌محوری به دلیل نیروی اصطکاک اعمالی میان صفحات باعث می‌شود تا این آزمایش برآورد درستی از ویژگی‌های سنگ در شرایط برجا نداشته باشد. در همین راستا برای تهیه نمونه نیاز به انجام عملیات مغزه‌گیری است. در این عملیات ممکن است که در زمان مغزه‌گیری، حمل و نقل از ته چاه به سطح زمین یا انتقال به آزمایشگاه ویژگی‌هایی مانند تخلخل، اشباع و نفوذپذیری نمونه‌های تهیه‌شده در اثر تماس با سیال حفاری یا تنش‌ها و کشش‌های اعمالی بر آن در مسیر انتقال دچار تغییرات شوند که همین موضوع باعث نامطمئن شدن داده‌های به دست آمده می‌شود. از سوی

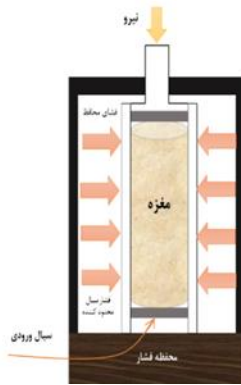
کوپلیاگا و کوزیانا را به صورت جانبی و عمودی از هم جدا نموده‌است. ساختار این سازند به صورت یک گسل است. این مخازن حاوی نفت سبک همراه با گاز هستند در همین راستا یکی از روش‌های مناسب در خصوص افزایش بهره‌وری مخزن عملیات شکاف هیدرولیکی است که به طور گسترده در این میادین به کار گرفته شده‌است [۷۸].

#### ۱-۴-۶- تأثیر نوع رخداد شکست بر عملیات شکاف هیدرولیکی

شناسایی و پیش‌بینی عوامل موثر بر عملیات شکاف هیدرولیکی به منظور بهینه نمودن آن فرآیندی مهم تلقی می‌شود. نوع شکست، ناهمسانگردی تنش و ویژگی‌های ژئومکانیکی از جمله عوامل تأثیرگذار بر عملیات شکاف هیدرولیکی به شمار می‌روند. در این میان نوع رخداد شکست و جهت تنش‌ها در چاه مهم‌ترین عوامل در راستای شکاف هیدرولیکی محسوب می‌شوند. مطالعات محققان در میادین کوپیاگوا نشان دهنده آن است که در سازندهایی که شکست برشی قبل از شکست کششی رخ می‌دهد عملیات شکاف هیدرولیکی با شکست مواجهه می‌شود زیرا در این نواحی انرژی شکست بیشتر از آن که در جهت بشینه تنش افقی صرف شود در جهت ایجاد شکستگی‌های برشی پیاپی در دهانه چاه صرف می‌شود [۷۸].

#### ۵-۶- مقایسه نتایج بررسی از مطالعات موردی در میادین مختلف

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در میادین مختلف کشورهای چین، آمریکا، استرالیا، کانادا و کلمبیا می‌توان این گونه بیان نمود که عملیات شکاف هیدرولیکی یکی از مناسب‌ترین روش‌های تحریک مخزن در مخازن غیرمتعارف تلقی می‌شود. در همین راستا می‌توان فشار شکست سازند در طی این عملیات را برای چاه عمودی از معیار هوبرت-ویلس (رابطه ۳۶) و برای چاه‌های افقی از معیار هوک-براون (رابطه ۳۷) ارزیابی نمود. از سوی دیگر بررسی شیل‌های لانگ مکسی و مارسلوس نشان می‌دهد که مدول یانگ و نسبت پواسون تأثیر بسزایی در شاخص شکنندگی شیل‌ها و شکاف‌پذیری مخازن دارند و این به وضوح بیانگر تأثیر شناسایی ویژگی‌های ژئومکانیکی در راستای افزایش ضریب بازیابی از مخازن غیرمتعارف هیدروکربنی می‌باشد [۷۸-۷۶].



شکل ۵: نمای آزمایش سه محوری

دیگر مغزه‌گیری نه تنها ویژگی‌های متوسط مخزن را بلکه اطلاعات محلی و منطقه‌ای کوچک از آن را در اختیار مهندسان قرار می‌دهند، جدول ۱ مزایا و معایب روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه‌ی روش‌های تعیین ویژگی‌های الاستیک

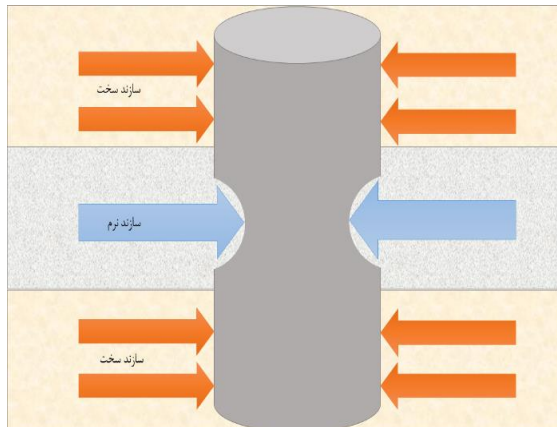
معایب	مزایا	روش‌ها	
عدم تجانس توزیع تنش در طول آزمایش به دلیل قرارگرفتن نمونه‌ها تحت تنش تک‌محوری، ممکن است UCS به‌خوبی تخمین زده نشود محدودیت‌های مربوط به عملیات مغزه‌گیری	اندازه‌گیری مقاومت سنگ به‌صورت مستقیم فراهم کردن داده‌های آزمایش UCS برای تحلیل پایداری چاه	آزمایش تک‌محوری	استاتیک
مقدار زیادی از نمونه موردنیاز است محدودیت‌های مربوط به عملیات مغزه‌گیری با فشرده‌سازی نمونه، حجم موردنیاز برای محدود کردن سیال را کاهش می‌دهد و به دنبال آن کنترل فشار سیال سخت می‌شود	مدول الاستیک و دیگر پارامترهای شکست در شرایط تنشی و فشاری شبیه‌سازی شده مانند مخزن تعیین می‌شوند جهت لایه‌های زیرین را در ارزیابی مقاومت سنگ‌های ناهمسانگرد در الویت قرار می‌دهد	آزمایش سه‌محوری	
دقت پایین‌تر	هزینه و زمان کمتر	دینامیک	

استفاده از نمودارهای مربوط به چاه به دست می‌آیند و رابطه‌ای دقیق‌تر به‌شمار می‌رود. در تعیین تنش‌های افقی می‌توان از مدل‌های همسانگرد و ناهمسانگرد استفاده کرد. در لایه‌های افقی شیل پیشنهاد می‌شود که این تنش‌ها را با استفاده از مدل همسانگرد مدل‌سازی نمود زیرا ویژگی‌های الاستیک در جهت‌های مختلف برای این مخازن تغییر نمی‌کنند.

نکته مهم در حوزه بهره‌برداری در صنعت نفت توجه به همبستگی جریان سیال و ژئومکانیک و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر است. به‌این ترتیب که تزریق یا تولید از مخزن منجر به ایجاد تغییرات در فشار مخزن و به دنبال آن تنش‌های اعمالی بر آن می‌شود. عدم توجه به این همبستگی می‌تواند منجر به بروز برآوردهایی نادرست از عملکرد مخزن شود. همبستگی جریان سیال و ویژگی‌های ژئومکانیکی نقش بسیار مهمی را در ازدیاد برداشت نفت و پایداری چاه ایفا می‌کنند. امروزه مدل‌هایی در این باره گسترش یافته‌اند که می‌توان از جمله‌ی آن‌ها به مدل‌های

به دلیل پایین بودن تراوایی و تخلخل در مخازن غیرمتعارف گازی باید از عملیات شکاف هیدرولیکی برای تحریک مخازن و افزایش بهره‌وری آن‌ها استفاده کرد [۵]. در همین راستا پیشنهاد می‌شود که از چاه‌های افقی برای ایجاد نفوذپذیری بیشتر و سطوح بزرگ‌تر زهکشی استفاده شود. از مدل‌های ژئومکانیکی برای ایجاد ارتباط میان ویژگی‌های دینامیک و استاتیک سازند استفاده می‌کنند که این توابع به نوع سازند و ویژگی‌های مختلف لایه‌ها مربوط می‌شوند. روش‌های زیادی برای بررسی تنش‌های اعمالی بر مخزن موردبررسی قرار گرفتند. با افزایش روند تولید و به دنبال آن کاهش فشار منفذی و جابه‌جایی سیالات موجود در مخزن احتمال شکست برشی و کششی افزایش می‌یابد؛ بنابراین پیش‌بینی و مدل‌سازی روند کاهش یا افزایش فشار منفذی از اهمیت زیادی برخوردار است. در همین راستا با توجه به دو رابطه (۱۸) و (۱۹) که در این مقاله ارائه شده‌اند، می‌توان به رابطه ایتون (رابطه ۱۹) به‌عنوان رابطه‌ای با صحت مناسب تکیه کرد زیرا داده‌های آن با

بروز گیرلوله چاره‌ساز باشند [۸۰]. در حفاری سازندهای گاز شیل نیز می‌توان از سیالات حفاری پایه روغنی استفاده نمود زیرا در صورت استفاده از سیالات پایه آبی مشکلات مربوط به تورم رس و شیل پیش می‌آید که باعث ایجاد حلقه گل و به دنبال آن گیرلوله حفاری می‌شود. البته لازم به ذکر است که سیال حفاری سلیکاتی نیز به سبب وجود نمک‌های سلیکاتی به عنوان مواد بازدارنده می‌تواند گزینه‌ای مناسب در حفاری این نوع مخازن باشد.



شکل ۶: روند اعمال تنش در سازندهای سخت و نرم و تغییر شکل لوله‌جداری

در حفاری مخازن ماسه‌ای متراکم گازی استفاده از روش حفاری فروتعدالی به دلیل استحکام پایین سازند و امکان وقوع هرزروی گل و در نتیجه کاهش بهره‌وری مخزن بهتر است. استفاده از سیالات حفاری پایه گازی به منظور افزایش سرعت حفاری می‌تواند گزینه‌ای مناسب باشد البته لازم به ذکر است که گازی مانند اکسیژن می‌تواند باعث آتش‌سوزی در چاه شود اما نیتروژن و فوم گزینه‌هایی عالی در این باره هستند، در جدول ۲ مقایسه‌ای از انواع روش‌های حفاری ارائه شده است. از سوی دیگر توجه به امکان فروپاشی دیواره چاه در این روش نیز نکته‌ای مهم است که برای حل این مشکل از عملیات شکاف هیدرولیکی برای اتصال شکستگی‌ها به یکدیگر برای عبور از ناحیه آسیب‌دیده استفاده می‌شود. در زمان عملیات حفاری و تکمیل چاه باید به نوع لوله‌جداری و سیمان انتخابی توجه ویژه نمود؛ زیرا در صورت انتخاب نامناسب، تنش‌ها بر مقاومت سیمان غلبه کرده و باعث مچاله شدن لوله‌جداری می‌شوند.

یک‌طرفه و دوطرفه اشاره کرد. در مدل‌سازی همبستگی یک‌طرفه، محاسبات مربوط به هر شبیه‌ساز به‌طور جداگانه و در یک بازه زمانی معین انجام می‌شود. در این مدل داده‌های مربوط به جریان سیال در محیط متخلخل به شکل یک‌جانبه بر داده‌های ژئومکانیکی تأثیر می‌گذارند به این مفهوم که تغییرات فشار منفذی منجر به بروز تغییراتی در کرنش و تنش می‌شوند اما عکس این موضوع صادق نیست. از جمله مزایای این مدل‌سازی می‌توان به هزینه کمتر و از معایب آن می‌توان به دقت پایین‌تر آن اشاره کرد. در همبستگی دوطرفه شبیه‌سازی‌ها به صورت متوالی و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر بررسی می‌شوند. همبستگی دوطرفه برای پیش‌بینی رفتار جریان سیال در مخازن شکافدار مناسب است.

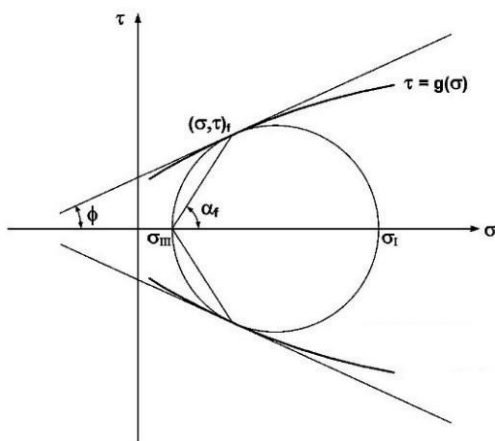
قبل از انجام عملیات حفاری مخزن در حال تعادل است و تنش خاصی که باعث شکست و گسیختگی مخزن شود به آن وارد نمی‌شود اما پس از انجام عملیات حفاری تنش‌هایی تحت عنوان تنش‌های القایی به مخزن اعمال می‌شوند که باعث از بین رفتن تعادل و بروز ناپایداری در دیواره چاه می‌شوند. در همین راستا هر چه فاصله از مرکز چاه بیشتر باشد تنش‌ها کاهش می‌یابند. آگاهی یافتن از راستای تنش‌های افقی کمینه و بیشینه مهندسان را در پیش‌بینی امکان مچاله شدن لوله‌جداری یاری می‌کند. شکل ۶ اعمال تنش در سازندهای مختلف و مچاله شدن لوله‌جداری در اثر این تنش‌ها را نشان می‌دهد. از نقطه نظر جنبه‌های ژئومکانیکی مخازن هیدرات گازی، وجود تراکم پایین و دانه ریز بودن ذرات، تولید ماسه و مسدود شدن چاه از مشکل‌های مهم مربوط به آن‌ها است بنابراین پیشنهاد می‌شود در حفاری این نوع مخازن از روش حفاری کنترل فشار و در تکمیل آن‌ها از فیلترهای شنی استفاده شود. از جمله دیگر مواردی که باعث بروز ناپایداری چاه در این مخازن می‌شود، افزایش دما است که باید با استفاده از سیال حفاری مناسب دمای درون چاهی را مدیریت کرد. استفاده از سیالات حفاری پایه روغنی می‌تواند گزینه‌ای مناسب در این ارتباط باشد زیرا در دمای بالا ویژگی‌های رئولوژی مناسبی از خود نشان می‌دهند. از سوی دیگر ویژگی روان‌کنندگی بالایی دارند که می‌توانند در هنگام



جدول ۲: مقایسه انواع روش‌های حفاری در میدان‌های نفت و گازی

روش‌ها	مزایا	محدودیت‌ها
حفاری افقی	افزایش سطح تماس چاه و مخزن تخلیه سازندهایی با نفوذپذیری پایین (مخازن غیرمتعارف)	سرعت کمتر در مقایسه با حفاری عمودی تولید شن و ماسه و بروز ناپایداری در دهانه چاه
حفاری فروتعدالی	کاهش آسیب‌دیدگی سازند افزایش سرعت حفاری کاهش هرزروی سیال حفاری	هزینه بیشتر محدودیت‌های فشاری زیاد
حفاری فرتعادلی	محدودیت‌های فشاری کمتر جلوگیری نسبی از وقوع فوران چاه	در صورت کنترل نکردن دمای سیال حفاری امکان تجزیه هیدرات‌ها در مخازن هیدرات‌گازی افزایش آسیب‌دیدگی سازند ایجاد جریان چند فازی به‌واسطه هجوم سیال به سازند و ناپایداری چاه

در مقوله معیارهای شکست، محققان معیارهای شکست مختلفی را ارائه کرده‌اند. در همین راستا معیار شکست موهر - کلمب یک معیار کاملاً خطی است. این درحالی است که پوش مقاومت سه‌محوری سنگ‌ها اغلب به‌صورت غیرخطی است بنابراین این معیار شکست از دقت بالایی برخوردار نیست. از دیگر نقطه‌ضعف‌های این معیار می‌توان به دست نیامدن مقاومت کششی از تقاطع پوش مقاومت با محور منفی اشاره کرد. وضعیت تنش‌ها به‌صورت دایره‌ای با قطر  $\sigma_I - \sigma_{III}$  در شکل ۹ قابل مشاهده است.  $\sigma_I$  و  $\sigma_{III}$  تنش‌های مماسی و شعاعی نواحی اطراف چاه ناشی از عملیات حفاری هستند و بیشینه تنش برشی اعمالی بر سنگ برابر با شعاع دایره است. در چنین شرایطی اگر نقطه حداکثر تنش برشی منحنی شکست سنگ را لمس کند، سنگ در معرض تنش کافی برای شکست قرار می‌گیرد. این موضوع بیانگر آن است که هرچه ناهمسانگردی تنش بیشتر باشد سنگ بیشتر مستعد شکست است. از سوی دیگر معیار هوک - براون معیاری مناسب در سازندهای نرم و تحکیم نیافته به‌شمار می‌رود.

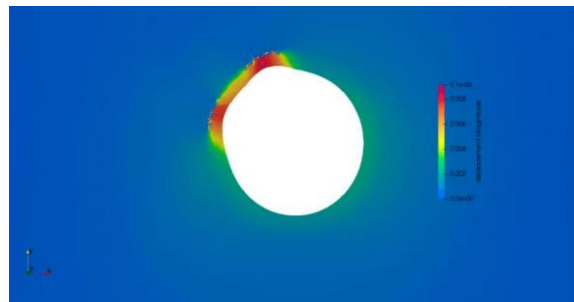


شکل ۱: پوش شکست و معیار موهر - کلمب.

در بخش لوله آستری و غلاف سیمانی مربوط به آن اگر غلاف سیمان به‌خوبی بین لوله آستری و سازند قرار گیرد، لوله آستری این توانایی را خواهد داشت که در طی فرآیند شکاف هیدرولیکی یکپارچگی مکانیکی خود را حفظ نماید. برای همین بر اساس سه مدل مورد مطالعه، هرچه گستره فضای خالی در غلاف سیمان بیشتر باشد لوله آستری یکپارچگی خود را سریع‌تر از دست می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود تغییر شکل لوله آستری ارتباطی مستقیم با اندازه فضای خالی موجود در غلاف سیمان دارد.



شکل ۷: گستره فضای خالی بین سیمان و لوله آستری (۲۵ درصد فضای کلی).



شکل ۸: شکل دوبعدی از مقدار جابه‌جایی لوله آستری با گستره فضای خالی ۲۵ درصدی در غلاف سیمان و فشار منفذی ۱۳۸ مگا پاسکالی [۶۸].

استاتیک و دینامیک و نیز طراحی شکاف هیدرولیکی مخازن گازی شیلی حائز اهمیت است. برای افزایش ضریب بازیابی از مخازن غیرمتعارف می‌توان حفر چاه‌های افقی و استفاده از عملیات شکاف هیدرولیکی را پیشنهادی مناسب تلقی کرد. نکته‌ای قابل توجه در راستای حفر چاه‌های افقی توجه به تعیین وزن گل مناسب مطابق با پنجره ایمن گل و انحراف آزمون حفاری چاه افقی از جهت تنش افقی است که بر انتشار شکاف هیدرولیکی اثرگذار خواهد بود به این صورت که با افزایش انحراف بهره‌وری چاه کاهش می‌یابد، این روند کاهش ناشی از تنش‌های برشی در اطراف دهانه چاه است. انتشار شکاف هیدرولیکی در جهت عمودی به اختلاف کمینه تنش افقی بین لایه‌های مرزی و تولیدی بستگی دارد. درعین حال نحوه انتشار شکاف در سازند به دیگر ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند مانند چقرمگی شکست نیز وابسته است. شکست برشی زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های برشی القایی در اطراف دهانه چاه از مقاومت برشی سازند بیشتر شوند از همین رو برای جلوگیری از آسیب چاه فشار ته‌چاهی همواره باید بالاتر از فشاری باشد که در آن شکست برشی در دیواره چاه می‌تواند شروع به انتشار نماید. برای توصیف این رفتار در چاه می‌توان از معیارهای شکستی همچون موهر - کلمب بهره برد.

با توجه به تراوایی پایین مخازن غیرمتعارف گازی برای دستیابی به نرخ تولید مطلوب از این منابع، مؤلفه‌های ژئومکانیکی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند. در راستای افزایش تولید از این منابع یکی از عملیاتی که به‌طور گسترده در سطح جهان مورداستفاده قرار می‌گیرد شکاف هیدرولیکی است. یکی از مؤلفه‌های مهم در بررسی انتشار شکاف هیدرولیکی، اختلاف تنش‌های افقی است. مطابق آنچه برپایه مطالعات ژئومکانیکی در سازندهای روزنیت مورتری به دست آمده است برای سنگ مخزنی با تنش افقی پایین مثل مخزن ماسه‌سنگی، فشار شکست سازند به‌مراتب پایین‌تر است حال آن‌که مخزن شیلی با تنش افقی بیشتر دارای فشار شکست بیشتری است و در آن شکاف‌ها گسترش کمتری دارند. از سوی دیگر مطالعات در سازند مونتنی بیانگر آن هستند که نسبت پواسون و مدول یانگ بر ویژگی شیل‌ها مانند شکنندگی آن‌ها تأثیرگذار می‌باشند. در همین باب سازندی با مدول یانگ کمتر سخت‌تر شکسته می‌شود و گزینه مناسبی برای عملیات شکاف

تنش‌های اعمالی در اطراف چاه تابعی از فشار چاه هستند. در واقع وزن گل می‌تواند مقدار تنش‌های مماسی و شعاعی را در جهت‌های مختلف کنترل کند؛ بنابراین انتخاب وزن گل نامناسب می‌تواند منجر به ناپایداری سازند شود. در همین راستا با در اختیار داشتن فشار منفذی و کمینه تنش افقی، می‌توان پنجره‌ی گل مناسب را طراحی کرد. همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است پنجره‌ی ایمن گل در محدوده کمترین وزن گل حفاری و کمینه تنش افقی است. در همین خصوص اگر فشار سیال حفاری از کمینه تنش افقی بیشتر شود هرزروی گل رخ می‌دهد و به دنبال آن شکاف‌هایی در سازند ایجاد می‌شود. حال آن‌که اگر فشار سیال موجود در سازند از فشار سیال حفاری تجاوز نماید، امکان ایجاد فوران در چاه افزایش می‌یابد. انتخاب فشار مناسب برای سیال حفاری و تعیین پنجره ایمن گل چاه را از شکست‌های برشی و کششی در امان نگه می‌دارد. با افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سازند مقاوم‌تر خواهد بود بنابراین وزن سیال حفاری با این دو مولفه نسبت معکوس دارد.



شکل ۱۰: پنجره‌ی ایمن گل.

## ۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش جنبه‌های ژئومکانیکی مخازن گازی غیرمتعارف شامل مخازن گاز شیلی، مخازن ماسه‌ای متراکم گازی، مخازن هیدرات گازی و مخازن تزریقی دی‌اکسیدکربن و چالش‌های حفاری و شکاف هیدرولیکی آن‌ها از جمله پایداری دیواره چاه برای جلوگیری از گیر لوله‌ها و نیز مچاله شدن لوله جداری و آستری را از دیدگاه ژئومکانیکی به‌طور جامع موردبحث و بررسی قرار گرفت. سپس از آنجاکه در مطالعه موردی تمام واقعیات پژوهش شناسایی می‌گردد، در این مقاله همچنین مطالعات موردی موفق در بررسی ژئومکانیکی میدان‌های گازی مارسلوس، لانگ مکی، روزنیت، مورتری، مونتنی و کوپیاگو در کشورهای آمریکا، چین، استرالیا، کانادا و کلمبیا موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن در تخمین پارامترهای

بررسی‌ها در مخازن هیدروکربنی کلمبیا نشان می‌دهند که تقدم نوع رخداد شکست عاملی مهم در موفقیت و عدم موفقیت عملیات شکاف هیدرولیکی محسوب می‌شود. به این ترتیب که اگر شکست برشی قبل از شکست کششی رخ دهد عملیات با شکست مواجه خواهد شد چون در این نواحی انرژی شکست بیشتر از آن که در جهت بیشینه تنش افقی صرف شود در جهت ایجاد شکستگی‌های برشی پیاپی در دهانه چاه صرف می‌شود.

هیدرولیکی محسوب نمی‌شود. در همین راستا سازندی با شاخص شکاف‌پذیری برابر با ۱ مناسب‌ترین نوع سازند برای عملیات شکاف هیدرولیکی محسوب می‌شود. این موضوع بیانگر اهمیت ارزیابی ویژگی‌های ژئومکانیکی در طراحی مناسب عملیات شکاف هیدرولیکی برای دستیابی به نرخ تولید مطلوب از مخزن تلقی می‌شود. جدول ۳ مقایسه‌ای از عوامل مؤثر در طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی و افزایش بهره‌وری از مخازن غیرمتعارف را نشان می‌دهد. دیگر

جدول ۳: تأثیر عوامل مختلف و نتیجه آن‌ها بر عملیات شکاف هیدرولیکی.

عوامل مؤثر بر عملیات شکاف هیدرولیکی	نوع اثر	نتیجه
مدول یانگ	سازندی با مدول یانگ بیشتر، آسان‌تر شکسته می‌شود.	افزایش شاخص شکنندگی و شکاف‌پذیری - سازندی مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی تلقی می‌شود.
نسبت پواسون	سازندی با نسبت پواسون بیشتر، سخت‌تر شکسته می‌شود.	کاهش شاخص شکنندگی شیل‌ها و شکاف‌پذیری - سازندی مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی تلقی نمی‌شود.
تقدم نوع رخداد شکست	شکست برشی قبل از شکست کششی رخ دهد	عملیات شکاف هیدرولیکی با شکست مواجهه می‌شود

گستره فضای خالی ۱۲/۵ درصد کمترین تغییر شکل را نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان می‌دهد. فشار چاه بر تنش‌های اعمالی اطراف آن تأثیرگذار است. در همین راستا با انتخاب وزن گل مناسب می‌توان تنش‌های وارد بر سازند را کنترل کرد. فشار منفذی و کمینه تنش افقی در طراحی و انتخاب پنجره ایمن گل دخیل هستند به این صورت که این پنجره ایمن در محدوده کمترین وزن گل حفاری و کمینه تنش افقی قرار می‌گیرد. جنبه‌های ژئومکانیکی مخازن غیرمتعارف گازی در طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی مناسب برای دستیابی به تولیدی بهینه نیز اهمیت بالایی دارد. در همین راستا طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی بهینه می‌تواند هدفی مناسب در پژوهش‌های آینده باشد.

در مخازن گازی غیرمتعارف دمای سیال حفاری نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. در مخازن هیدرات گازی با افزایش دما تجزیه هیدرات‌ها رخ می‌دهد و سبب ایجاد جریان چندفازی در مخزن می‌شود در همین راستا ویژگی‌های فیزیکی این مخازن در طی فرآیند انتقال فاز تغییر می‌کند و سختی و استحکام مخزن به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد؛ بنابراین استفاده از پیش‌خنک‌کننده‌ها برای کنترل دمای سیال حفاری فرآیندی مهم در حفاری این مخازن به‌شمار می‌رود.

راندن لوله‌جداری در هنگام حفاری چاه‌های مختلف دارای مزایای بسیاری است. توجه به تنش‌های وارد بر لوله‌جداری برای جلوگیری از پدیده‌های مچالگی و ترکیدگی آن از جمله اقدامات مهم در حفاری به‌شمار می‌رود که برای شناسایی این ناحیه‌های پرخطر می‌توان از پیش‌بینی نسبت پواسون و تنش‌های افقی و عمودی بهره برد. وجود فضای خالی در غلاف سیمان منجر به عبور جریان سیال و به‌دنبال آن تغییر شکل در لوله آستری می‌شود. انتخاب نوع سیمان و گستره فضای خالی در غلاف سیمان نکته‌ای مهم در طراحی عملیات حفاری است، بر اساس مطالعات صورت گرفته هر چه گستره فضای خالی بیشتر باشد لوله آستری یکپارچگی خود را سریع‌تر از دست می‌دهد به‌طوری‌که در مدل‌های موردبررسی، مدلی با

## مراجع

- [1] Palmatier, Robert W., Mark B. Houston, and John Hulland. 2018. "Review articles: purpose, process, and structure." *Journal of the Academy of Marketing Science* 46 (1):1-5. doi: 10.1007/s11747-017-0563-4.
- [2] Wright, Rick W, Richard A Brand, Warren Dunn, and Kurt P Spindler. 2007. "How to Write a Systematic Review." *Clinical Orthopaedics and Related Research* 455:23-29. doi: 10.1097/BLO.0b013e31802c9098.
- [3] Dong, Z., S.A. A. Holditch, and D.A. A. McVay. 2013. "Resource Evaluation for Shale Gas Reservoirs." *SPE Economics & Management* 5 (01):5-16. doi: 10.2118/152066-pa.

central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment." AAPG bulletin 91 (4):475-499.

[18] Uribe-Patiño, J. A., G. A. Alzate-Espinosa, and A. Arbeláez-Londoño. 2017. "Geomechanical aspects of reservoir thermal alteration: A literature review." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 152:250-266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.03.012>.

[19] Rafieepour, S., C. Ghotbi, and M. R. Pishvaie. 2015. "The Effects of Various Parameters on Wellbore Stability During Drilling Through Shale Formations." *Petroleum Science and Technology* 33 (12):1275-1285. doi: 10.1080/10916466.2011.606253.

[20] Zheng, Herong, Jincai Zhang, and Yuanchang Qi. 2020. "Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development." *Energy Geoscience* 1 (1-2):36-46.

[21] Kok, M. V., and S. Merey. 2014. "Shale Gas: Current Perspectives and Future Prospects in Turkey and the World." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 36 (22):2492-2501. doi: 10.1080/15567036.2014.943854.

[22] Zoback, Mark D. 2007. "Reservoir geomechanics: Earth stress and rock mechanics applied to exploration." *Production and wellbore stability*:449.

[23] Maurer, W.C. 1995. "Recent Advances In Horizontal Drilling." *Journal of Canadian Petroleum Technology* 34 (09). doi: 10.2118/95-09-02.

[24] Soliman, Mohamed Y, Loyd East, and David Adams. 2004. "Geomechanics aspects of multiple fracturing of horizontal and vertical wells." *SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting*.

[25] Holditch, Stephen A. 2006. "Tight Gas Sands." *Journal of Petroleum Technology* 58 (06):86-93. doi: 10.2118/103356-jpt.

[26] Zhang, Hui, Kaibin Qiu, John Fuller, Guoqing Yin, Fang Yuan, and Sheng Chen. 2014. "Geomechanical Evaluation Enabled Successful Stimulation of a HPHT Tight Gas Reservoir in Western China."

[27] Moghaddam, Rasoul Nazari, Shokoufeh Aghabozorgi, and Jalal Foroozesh. 2015. "Numerical Simulation of Gas Production From Tight, Ultratight and Shale Gas Reservoirs: Flow Regimes and Geomechanical Effects."

[28] Clarkson, C. R. R., M. Nobakht, D. Kaviani, and T. Ertekin. 2012. "Production Analysis of Tight-Gas and Shale-Gas Reservoirs Using the Dynamic-Slippage Concept." *SPE Journal* 17 (01):230-242. doi: 10.2118/144317-PA.

[29] Cooke, Dennis. 2012. "A brief review of geoscience issues associated with shale gas development in Australia." *University of Adelaide/Australian School of Petroleum, and ZDAC Geophysical Technologies, Australia*.

[30] Liu, Liping, Zhilei Sun, Lei Zhang, Nengyou WU, Qin Yichao, Zuzhou JIANG, Wei Geng, Hong Cao, Xilin ZHANG, and Bin Zhai. 2019. "Progress in global gas hydrate development and production as a new energy

[4] Ma, Y. Zee, W. R. Moore, E. Gomez, W. J. Clark, and Y. Zhang. 2016. "Chapter 14 - Tight Gas Sandstone Reservoirs, Part 1: Overview and Lithofacies." In *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook*, edited by Y. Zee Ma and Stephen A. Holditch, 405-427. Boston: Gulf Professional Publishing.

[5] Kissinger, Alexander, Rainer Helmig, Anozie Ebigbo, Holger Class, Torsten Lange, Martin Sauter, Michael Heitfeld, Johannes Klünker, and Wiebke Jahnke. 2013. "Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system, part 2." *Environmental earth sciences* 70 (8):3855-3873.

[6] Law, B. E., and J. B. Curtis. 2002. "Introduction to Unconventional Petroleum Systems." *AAPG Bulletin* 86 (11):1851-1852. doi: 10.1306/61eedda0-173e-11d7-8645000102c1865d.

[7] McGlade, Christophe, Jamie Speirs, and Steve Sorrell. 2013. "Unconventional gas – A review of regional and global resource estimates." *Energy* 55:571-584. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.048>.

[8] Sayers, Colin M., and Peter M. T. M. Schutjens. 2007. "An introduction to reservoir geomechanics." *The Leading Edge* 26 (5):597-601. doi: 10.1190/1.2737100.

[9] Hamid, Osman, Ahmed Omair, and Pablo Guizada. 2017. "Reservoir Geomechanics in Carbonates." *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*.

[10] B.Nagel, Dr.Neal. 2019. "Geomechanics for unconventional." *OilfieldGeomechanics*.

[11] Iferobia, Cajetan C., and Maqsood Ahmad. 2020. "A review on the experimental techniques and applications in the geomechanical evaluation of shale gas reservoirs." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 74:103090. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103090>.

[12] Fjar, Erling, Rachel M Holt, AM Raaen, and P Horsrud. 2008. *Petroleum related rock mechanics*: Elsevier.

[13] Can, Chen, Dong Chenghe, and Lu Guang. 2013. "The World's Present Research Situation of Shale Gas." *World* 8 (8):62-65.

[14] Morley, C. K., C. von Hagke, R. L. Hansberry, A. S. Collins, W. Kanitpanyacharoen, and R. King. 2017. "Review of major shale-dominated detachment and thrust characteristics in the diagenetic zone: Part I, meso- and macro-scopic scale." *Earth-Science Reviews* 173:168-228. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.019>.

[15] Zhang, Shuwen, Xuefu Xian, Junping Zhou, and Liang Zhang. 2017. "Mechanical behaviour of Longmaxi black shale saturated with different fluids: an experimental study." *RSC Advances* 7 (68):42946-42955. doi: 10.1039/C7RA07179E.

[16] Chopra, Satinder, Ritesh K Sharma, James Key, and Kurt J Marfurt. 2012. "Shale gas reservoir characterization workflows." In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, 1-5. Society of Exploration Geophysicists.

[17] Jarvie, Daniel M, Ronald J Hill, Tim E Ruble, and Richard M Pollastro. 2007. "Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-

- (10):1918-1928. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.024>.
- [43] Pan, Pengzhi, Zhenhua Wu, Xiating Feng ,and Fei Yan. 2016. "Geomechanical modeling of CO2 geological storage: A review." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (6):936-947.
- [44] Rutqvist, Jonny. 2012. "The geomechanics of CO2 storage in deep sedimentary formations." *Geotechnical and Geological Engineering* 30 (3):525-551.
- [45] Orlic, Bogdan. 2016. "Geomechanical effects of CO2 storage in depleted gas reservoirs in the Netherlands: Inferences from feasibility studies and comparison with aquifer storage." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (6):846-859. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.07.003>.
- [46] Saffou, Eric, Arshad Raza, Raof Gholami, Leon Croukamp, Walter Romaric Elingou, Jan van Bever Donker, Mimonitu Opuwari, Musa S. D. Manzi ,and Raymond J. Durrheim. 2020. "Geomechanical characterization of CO2 storage sites: A case study from a nearly depleted gas field in the Bredasdorp Basin, South Africa." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 81:103446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103446>.
- [47] Shi, Ji-Quan ,and Sevket Durucan. 2009. "A coupled reservoir-geomechanical simulation study of CO2 storage in a nearly depleted natural gas reservoir." *Energy Procedia* 1 (1):3039-3046. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.082>.
- [48] White, Adrian J, Martin O Traugott ,and Richard E Swarbrick. 2002. "The use of leak-off tests as means of predicting minimum in-situ stress." *Petroleum Geoscience* 8 (2):189-193.
- [49] Martínez-Martínez, J., D. Benavente ,and M. A. García-del-Cura. 2012. "Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 71 (2):263-268. doi: 10.1007/s10064-011-0399-y.
- [50] Zoback, MD, CA Barton, M Brudy, DA Castillo, Thomas Finkbeiner, BR Grollimund, DB Moos, PI Peska, CD Ward ,and DJ Wiprut. 2003. "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40 (7-8):1049-1076.
- [51] Jaeger, John Conrad, Neville GW Cook ,and Robert Zimmerman. 2009. *Fundamentals of rock mechanics*: John Wiley & Sons.
- [52] Lazemi, Hossein Ali ,and Mohammad Reza Eskandari. 2012. "Determining the relationship between uniaxial compressive strength and parameters of point load index, specific gravity and porosity of rock mass by neural network method " *Journal of Analytical & Numerical Methods in Mining Engineering* 2 (3):70-75 . [ In Persian].
- [53] Jin, Guodong, Syed Shujath Ali ,and Ali Abdullah Dhamen. 2016. "Mechanical Anisotropy of Unconventional Shale – Build the Correct Relationship between Static and Dynamic Properties." *resource.* *Acta Geologica Sinica-English Edition* 93 (3):731-755.
- [31] Lee, Joo Yong, Byung Jae Ryu, Tae Sup Yun, Jaehyung Lee ,and Gye-Chun Cho. 2011. "Review on the gas hydrate development and production as a new energy resource." *KSCE journal of civil engineering* 15 (4):689-696.
- [32] Liu, Zhiqiang, Yunxiao Lu, Jiuhui Cheng, Qiang Han, Zunjing Hu ,and Linlin Wang. 2019. "Geomechanics involved in gas hydrate recovery." *Chinese Journal of Chemical Engineering* 27 (9):2099-2106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.02.015>.
- [33] Dvorkin, Jack, Michael B. Helgerud, William F. Waite, Stephen H. Kirby ,and Amos Nur. 2003. "Introduction to Physical Properties and Elasticity Models." In *Natural Gas Hydrate: In Oceanic and Permafrost Environments*, edited by Michael D. Max, 245-260. Dordrecht: Springer Netherlands.
- [34] Lijith, KP, Bhini RC Malagar ,and Devendra Narain Singh. 2019. "A comprehensive review on the geomechanical properties of gas hydrate bearing sediments." *Marine and Petroleum Geology* 104:270-285.
- [35] Vares, Motahareh, Arash Kamran ,and Amirhossein Mohammadi. 2014. "Investigating Natural Gas Production Methods of Gas Hydrate Reservoirs."
- [36] Yan, Chuanliang, Xu Ren, Yuanfang Cheng, Benjian Song, Yang Li ,and Wanqing Tian. 2020. "Geomechanical issues in the exploitation of natural gas hydrate." *Gondwana Research* 81:403-422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.11.014>.
- [37] Zhou, Mingliang, Kenichi Soga, Koji Yamamoto ,and Hongwei Huang. 2020. "Geomechanical responses during depressurization of hydrate-bearing sediment formation over a long methane gas production period." *Geomechanics for Energy and the Environment* 23:100111.
- [38] Gutierrez, M ,and RW Lewis. 1998. "The role of geomechanics in reservoir simulation." *SPE/ISRM rock mechanics in petroleum engineering*.
- [39] Seol, Jiwoong ,and Huen Lee. 2013. "Natural gas hydrate as a potential energy resource: From occurrence to production." *Korean journal of chemical engineering* 30 (4):771-786.
- [40] Wang, Lei, Jiafei Zhao, Xiang Sun, Peng Wu, Shi Shen, Tao Liu ,and Yanghui Li. 2021. "Comprehensive review of geomechanical constitutive models of gas hydrate-bearing sediments." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 88:103755. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103755>.
- [41] Aruffo, C. M., A. Rodriguez-herrera, E. Tenthorey, F. Krzikalla, J. Minton ,and A. Henk. 2014. "Geomechanical modelling to assess fault integrity at the CO2CRC Otway Project, Australia." *Australian Journal of Earth Sciences* 61 (7):987-1001. doi: 10.1080/08120099.2014.958876.
- [42] Ferronato, Massimiliano, Giuseppe Gambolati, Carlo Janna ,and Pietro Teatini. 2010. "Geomechanical issues of anthropogenic CO2 sequestration in exploited gas fields." *Energy Conversion and Management* 51



- [67] Mohammadi, Mehdi, and Hossein Tavakoli. 2013. "Evaluation of the performance of Hook and Brown criteria in predicting fracture stresses." *Journal of Analytical & Numerical Methods in Mining Engineering* 2 (4):71-78. [ In Persian].
- [68] Labuz, Joseph, and Arno Zang. 2012. "Mohr–Coulomb Failure Criterion." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45. doi: 10.1007/s00603-012-0281-7.
- [69] Kamali-Asl, Arash, Ehsan Ghazanfari, Ahmadreza Hedayat, and Louisa Deering. 2018. "Investigation of static/dynamic moduli and plastic response of shale specimens." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 110:231-245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.08.008>.
- [70] Villamor Lora, Rafael, Ehsan Ghazanfari, and Enrique Asanza Izquierdo. 2016. "Geomechanical Characterization of Marcellus Shale." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49 (9):3403-3424. doi: 10.1007/s00603-016-0955-7.
- [71] Gui, Feng, Shanshan Wang, Sanjeev Bordoloi, and See Hong Ong. 2019. "Understanding the Geomechanical Challenges and Risk Mitigation in Sichuan Shale Gas Drilling, China." *International Petroleum Technology Conference*.
- [72] Gui, Junchuan, Tianshou Ma, Ping Chen, Heyi Yuan, and Zhaoxue Guo. 2018. "Anisotropic Damage to Hard Brittle Shale with Stress and Hydration Coupling." *Energies* 11 (4). doi: 10.3390/en11040926.
- [73] Hou, Bing, Ce Diao, and Dandan Li. 2017. "An experimental investigation of geomechanical properties of deep tight gas reservoirs." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 47:22-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.09.004>.
- [74] Behnia, Mahmoud, Kamran Gashtasbi, Mohammad Fatehi, and Aliakbar Golshani. 2012. "The effect of elastic parameters of layers on how to propagate hydraulic fracturing by using discontinuity-displacement method." *Journal of Analytical & Numerical Methods in Mining Engineering* 2 (3):1-13. [ In Persian].
- [75] Speight, James. 2020. "Chapter 3 - Reservoirs and reservoir fluids." In *Shale Oil and Gas Production Processes*, edited by James Speight, 139-220. Gulf Professional Publishing.
- [76] Vishkai, Mahta, Jingyi Wang, Ron CK Wong, Christopher R Clarkson, and Ian D Gates. 2017. "Modeling geomechanical properties in the montney formation, Alberta, Canada." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 96:94-105.
- [77] Jin, Xiaochun, Subhash N Shah, Jean-Claude Roegiers, and Bo Zhang. 2014. "Fracability evaluation in shale reservoirs-an integrated petrophysics and geomechanics approach." *SPE hydraulic fracturing technology conference*.
- [78] Osorio, Gildardo, and Cesar Fabian Lopez. 2009. "Geomechanical factors affecting the hydraulic fracturing performance in a geomechanically complex, tectonically active area in Colombia." *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*.
- [79] farzi, Reza, Shahin parchekhari, Vahid Bolandi, and Habib Porfaraj. 2018. "Study of the stability of the
- [54] Eaton, Ben A. 1972. "The effect of overburden stress on geopressure prediction from well logs." *Journal of Petroleum Technology* 24 (08):929-934.
- [55] Iqbal, Omer, Maqsood Ahmad, and Askury abd Kadir. 2018. "Effective evaluation of shale gas reservoirs by means of an integrated approach to petrophysics and geomechanics for the optimization of hydraulic fracturing: A case study of the Permian Roseneath and Murteree Shale Gas reservoirs, Cooper Basin, Australia." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 58:34-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.07.017>.
- [56] Mohamadian, Nima, Hamzeh Ghorbani, David A. Wood, Mohammad Mehrad, Shadfar Davoodi, Sina Rashidi, Alireza Soleimani, and Amirafzal Kiani Shahvand. 2021. "A geomechanical approach to casing collapse prediction in oil and gas wells aided by machine learning." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 196:107811. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107811>.
- [57] Rashidi, Sina, Nima Mohamadian, Hamzeh Ghorbani, David A Wood, Khalil Shahbazi, and Mehdi Ahmadi Alvar. 2020. "Shear modulus prediction of embedded pressurized salt layers and pinpointing zones at risk of casing collapse in oil and gas wells." *Journal of Applied Geophysics* 183:104205.
- [58] Darbar, Mohammad, Hadi Shakeri, and Lohrasb Faramarzi. "Laboratory study of the effect of perforation on hydraulic fracturing under triaxial stress conditions by using physical modeling." *Journal of Analytical & Numerical Methods in Mining Engineering* 9 (20):89-104. [ In Persian]. doi: 10.29252/anm.2019.10976.1369.
- [59] Aadnoy, Bernt, and Reza Looyeh. 2019. *Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design*: Gulf Professional Publishing.
- [60] Ostadhassan, MM. 2013. "Geomechanics and elastic anisotropy of the Bakken Formation." *Williston Basin*: University of North Dakota:1-185.
- [61] Rasouli, Vamegh. 2015. "Geomechanics of Gas Shales." In *Fundamentals of Gas Shale Reservoirs*, 169-190.
- [62] Luo, Shu, and Mohan Kelkar. 2012. "Infill-Drilling Potential in Tight Gas Reservoirs." *Journal of Energy Resources Technology* 135 (1). doi: 10.1115/1.4007662.
- [63] Abdideh, Mohammad, and Soheila Hedayati Khah. 2018. "Analytical and numerical study of casing collapse in Iranian oil field." *Geotechnical and Geological Engineering* 36 (3):1723-1734.
- [64] Ashtiyani, Hadi, and Hassan Amiri Bakhtiyar. 2011. "Prediction and control of casing collapse phenomenon by using geomechanical analysis of formations in one of Iran's oil fields." *Scientific journal of Exploration & Production Oil & Gas* 74 (74):53. [ In Persian].
- [65] Alruwaili, Khalid, Yanhui Han, Khaqan Khan, and Abdullah Alyami. 2020. "Geomechanical Analysis of Liner Deformation in Deep Gas Wells."
- [66] Hoek, Evert, Carlos Carranza-Torres, and Brent Corkum. 2002. "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition." *Proceedings of NARMS-Tac* 1 (1):267-273.

"Study on the performance of new ultra-high temperature high density oil base mud thinners." 钻井液与完井液 35 (2):35-3.

well wall with geomechanical data by continuous wavelet transform method." Scientific journal of Exploration & Production Oil & Gas 153 (153):42-48 [ In Persian].

[80] Zhenzhou, YANG, LIU Fuchen, ZHOU Chun, LI Jiancheng, YANG Peng ,and YAN Songbing. 2018.

---

<sup>۳۷</sup> Poisson's ratio

<sup>۳۸</sup> Leak-off test

<sup>۳۹</sup> Casing shoe

<sup>۴۰</sup> Closure pressure

<sup>۴۱</sup> Single stage triaxial (SST)

<sup>۴۲</sup> Multi stage triaxial (MST)

<sup>۴۳</sup> Yield poin

<sup>۴۴</sup> Isotropic

<sup>۴۵</sup> Anisotropic

<sup>۴۶</sup> Underbalanced drilling (UBD)

<sup>۴۷</sup> Casing collapse

<sup>۴۸</sup> Liner

<sup>۴۹</sup> Hoek-Brown

<sup>۵۰</sup> Cohesion

<sup>۵۱</sup> Marcellus

<sup>۵۲</sup> Long maxi

<sup>۵۳</sup> Hunan

<sup>۵۴</sup> Ordovician

<sup>۵۵</sup> Appalachian

<sup>۵۶</sup> Roseneath

<sup>۵۷</sup> Murteree

<sup>۵۸</sup> Siltstone

<sup>۵۹</sup> Montney

<sup>۶۰</sup> Cupiagua

<sup>۶۱</sup> Llanos

<sup>۶۲</sup> Caliper log

---

<sup>۱</sup> Systematic review

<sup>۲</sup> Case studies

<sup>۳</sup> Unconventional gas reservoirs

<sup>۴</sup> Gas shale reservoirs

<sup>۵</sup> Tight gas sandstone reservoirs

<sup>۶</sup> Gas hydrate reservoirs

<sup>۷</sup> Uniaxial compression testing

<sup>۸</sup> Triaxial compression testing

<sup>۹</sup> Pressure wave (P wave)

<sup>۱۰</sup> Shear wave (S wave)

<sup>۱۱</sup> Ultrasonic testing

<sup>۱۲</sup> Toc

<sup>۱۳</sup> Brittle

<sup>۱۴</sup> Radius of curvature

<sup>۱۵</sup> Stacked sandstone

<sup>۱۶</sup> Blanket sandstone

<sup>۱۷</sup> In-situ tension

<sup>۱۸</sup> Overburden pressure

<sup>۱۹</sup> Pore volume compressibility (PVC)

<sup>۲۰</sup> Young's modulus

<sup>۲۱</sup> Bulk modulus

<sup>۲۲</sup> Shear modulus

<sup>۲۳</sup> Creep

<sup>۲۴</sup> Osmotic coefficient

<sup>۲۵</sup> Mohr-Coulomb

<sup>۲۶</sup> Enhanced oil recovery (EOR)