

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



عنوان طرح:

"دستیابی به دانش فنی و اجرایی فناوری شکافت هیدرولیکی"

گزارش فاز اول:

"گردآوری اطلاعات کلی فناوری"

کد طرح:

واحد سازمانی مجری: پژوهشکده علوم پایه کاربردی

گروه پژوهشی: زمین شناسی نفت – توسعه میادین نفت و گاز

مسئول اجرای طرح: دکتر کمال خدایی

دی ۱۴۰۰

مشخصات مسئول و همکاران طرح مطابق پرسشنامه مصوب:

ردیف	نام و نام خانوادگی	مسئولیت در طرح	تخصص	رتبه	جمع کل نفر ساعت همکاری در طرح
۱	کمال خدایی	مجری	زمین شناس	استادیار	۲۰۰
۲	علی یزدانی	ناظر فنی	مهندس مخزن	استادیار	۴۵۰
۳	ابراهیم سفیداری	پتروفیزیت	زمین شناس نفت	استادیار	۴۵۰
۴	میرحسین طاهری	مهندس مخزن	مهندس مخزن	استادیار	۴۵۰
۵	سجاد قره‌چلو	ژئومکانیست	زمین شناس نفت	استادیار	۴۵۰
۶	سپیده یاسمی	ژئوفیزیت	ژئوفیزیک	مربی	۴۵۰
۷	مهران کلهری	ژئومکانیست	مهندس معدن	کارشناس ارشد	۴۵۰
۸	هوشنگ مهرابی	رسوب شناس	رسوب شناس	کارشناس ارشد	۴۵۰
۹	مرضیه قدیمی	مهندس نفت	مهندس نفت	کارشناس ارشد	۴۵۰
۱۰	بتول جانجانه	زمین شناس	زمین شناس	مربی	۴۵۰

پیشگفتار

با توجه به ماهیت طبیعی میادین هیدروکربنی کشور، نیاز به فناوریهای روز دنیا جهت نگهداشت، بهبود و ازدیاد برداشت از ذخائر نفت و گاز، تامین امنیت انرژی نسلهای آینده کشور و همچنین جایگاه استراتژیک ایران به عنوان تامین کننده انرژی منطقه، طرح کلان ملی "دستیابی به دانش فنی-اجرایی فناوری شکافت هیدرولیکی" توسط مجموعه جهاد دانشگاهی به عنوان یک نهاد انقلابی و پیشرو در علم و فناوری کشور با مرکزیت پژوهشکده علوم پایه مستقر در دانشگاه شهید بهشتی تعریف گردید. هدف از این طرح کلان دستیابی به دانش فنی-اجرایی این فناوری و بومی سازی آن در کشور بعنوان یک فناوری پر کاربرد است. در پایان این طرح انتظار می رود که با انتقال دانش مربوطه قابلیت اجرای عملیات در میادین و چاههای منتخب کشور توسط متخصصین داخلی ایجاد گردد.

بدین منظور، این طرح در چهار فاز، (۱) تشکیل تیم های فنی و گردآوری اطلاعات کلی (۲) غربالگری و انتخاب چاه و مخزن (۳) دانش فنی جامع تئوریک و (۴) مهندسی و طراحی موارد کاربردی و تهیه طرح جامع اجرای عملیات اجرایی تعریف گردیده است.

گزارش حاضر به تشریح مطالب مربوط به فعالیت های تعریف شده در فاز یک (۱) این طرح ذیل گرد آوری اطلاعات کلی مربوط به این فناوری می پردازد. این گزارش در قالب هفت (۷) فصل به ترتیب زیر ارائه می گردد:

فصل ۱: مقدمه

فصل ۲: معرفی فناوری

فصل ۳: تاریخچه و سیر تحول فناوری

فصل ۴: داده های آماری فناوری شکافت هیدرولیکی

فصل ۵: کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی

فصل ۶: مفاهیم علمی-مهندسی فناوری شکافت هیدرولیکی

فصل ۷: جایگاه شکافت هیدرولیکی در مقایسه با روش های مرسوم رفع مشکل چاه

فهرست مطالب

۱- مقدمه.....	۱
۲- معرفی فناوری.....	۴
۲-۱- روش‌های فناوری شکافت هیدرولیکی.....	۵
۲-۱-۱- شکافت با پروپانت.....	۵
۲-۱-۲- شکافت هیدرولیکی اسیدی.....	۷
۲-۲- فرآیند عملیات اصلی شکافت هیدرولیکی.....	۸
۲-۳- حوزه‌های درگیر در فناوری.....	۹
۲-۴- مکانیسم عملکرد فناوری.....	۱۰
۳- تاریخچه و سیر تحول فناوری.....	۱۸
۳-۱- مروری بر تاریخچه جهانی.....	۱۸
۳-۲- تاریخچه فناوری در مناطق مختلف.....	۲۵
۴- داده‌های آماری فناوری شکافت هیدرولیکی.....	۳۳
۴-۱- کلیات آماری.....	۳۳
۴-۲- آمار ذخائر نفت و گاز شیل جهان.....	۳۴
۴-۳- آمار مربوط به کشور آمریکا.....	۴۱
۴-۴- آمار مربوط به کشور روسیه.....	۴۹
۴-۴-۱- عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای.....	۵۰
۴-۴-۲- شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای.....	۵۵
۴-۵- آمار مربوط به کشور چین.....	۵۸

- ۵۸-۴-۵-۱- صنعت گاز شیل کشور چین.....
- ۶۰-۴-۵-۲- صنعت نفت شیل کشور چین.....
- ۶۱-۴-۶-۱- آمار مربوط به خاورمیانه.....
- ۶۴-۴-۶-۱- رسوبات شیلی در منطقه خاور میانه.....
- ۶۶-۴-۷-۱- آمار مربوط به کشور ایران.....
- ۶۶-۴-۷-۱- سوابق اجرای فناوری در ایران.....
- ۶۸-۴-۷-۲- ذخایر نفت و گاز شیل ایران.....
- ۶۸-۴-۸-۱- بازار جهانی.....
- ۷۳-۴-۹-۱- چشم انداز فناوری.....
- ۷۳-۴-۹-۱- چشم انداز جهانی.....
- ۷۴-۴-۹-۲- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در آمریکا.....
- ۷۵-۴-۹-۳- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در روسیه.....
- ۷۷-۴-۹-۴- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در چین.....
- ۷۹-۵- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی.....
- ۷۹-۵-۱- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنعت نفت.....
- ۸۰-۵-۱-۱- مخازن نفت و گاز کم تراوی توسعه نیافته بدلیل صرفه اقتصادی.....
- ۸۰-۵-۱-۲- مخازن نفت و گاز نامتعارف شیل.....
- ۸۱-۵-۱-۳- ترمیم آسیبهای سازندی - پشت سر گذاشتن ناحیهی آسیب دیدگی اطراف چاه.....
- ۸۲-۵-۱-۴- کنترل تولید ماسه.....
- ۸۳-۵-۱-۶- کاهش رسوب آسفالتین.....
- ۸۴-۵-۱-۷- افزایش سطح تماس با مخزن.....

- ۵-۲- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنایع غیر نفتی..... ۸۵
- ۵-۲-۱- تعیین وضعیت تنش منطقه..... ۸۶
- ۵-۲-۲- انرژی ژئوترمال..... ۸۷
- ۵-۲-۳- آب زیرزمینی..... ۹۰
- ۵-۲-۳-۱- روش باز کردن و تزریق با فشار سیال..... ۹۱
- ۵-۲-۴- معدنکاری..... ۹۲
- ۵-۲-۵- تزریق پساب صنعتی و هسته‌ای به درون زمین..... ۹۵
- ۵-۳- کاربردها و ضرورت استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی در ایران..... ۹۶
- ۵-۴- محدودیت‌های زیست محیطی..... ۹۷
- ۶- مفاهیم کلی علمی-مهندسی در فناوری شکافت هیدرولیکی..... ۱۰۱
- ۶-۱- مفاهیم زمین شناسی..... ۱۰۱
- ۶-۱-۱- ارزیابی سازند (نمودارگیری)..... ۱۰۳
- ۶-۱-۲- آنالیز مغزه..... ۱۰۵
- ۶-۱-۳- ژئوفیزیک..... ۱۰۶
- ۶-۱-۴- تکتونیک..... ۱۱۰
- ۶-۱-۵- ژئومکانیک..... ۱۱۲
- ۶-۲- سیالات..... ۱۱۵
- ۶-۳- طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی..... ۱۱۸
- ۶-۳-۱- داده های مورد نیاز برای طراحی..... ۱۱۸
- ۶-۳-۲- پارامترهای طراحی..... ۱۲۲
- ۶-۳-۳- مراحل و فرایند طراحی..... ۱۲۵



- ۱۲۶..... ۴-۳-۶- تست‌های قبل از عملیات اصلی
- ۱۲۶..... ۵-۳-۶- آنالیز نتایج پس از عملیات
- ۱۲۷..... ۶-۳-۶- روش‌های پایش
- ۱۲۸..... ۴-۶- تجهیزات سطح الارضی
- ۱۳۹..... ۵-۶- تکمیل چاه و تجهیزات درون چاهی
- ۱۴۳..... خلاصه
- ۱۴۵..... منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- فرایند شکافت هیدرولیکی و نحوه تاثیر آن در افزایش تولید (https://www.texastribune.org)..... ۵
- شکل ۲-۲- باز نگه داشتن شکاف به وسیله ی پروپانت (Zendehboudi and Bahadori, 2017) ۶
- شکل ۳-۲- باز نگه داشتن شکاف به وسیله ی اسیدزنی (Guo et al., 2017)..... ۷
- شکل ۴-۲- مقایسه رژیم جریانی در الف) یک چاه عادی و ب) یک چاه شکافته شده (https://www.testwells.com/) .. ۱۱
- شکل ۵-۲: مقایسه روش های تحریک مخزن و کارایی آنها..... ۱۱
- شکل ۶-۲: تصمیم گیری در مورد انتخاب روش تحریک چاه ۱۱
- شکل ۱-۳- اولین چاه حفاری شده توسط ادوین دریک در اواخر دهه ۱۸۵۰..... ۱۹
- شکل ۲-۳- موقعیت میداین در آفریقا..... ۲۷
- شکل ۱-۴- نقشه توزیع حوضه های هیدروکربنی در دسترس نفت و گاز شیلی (www.eia.gov) ۳۵
- شکل ۲-۴- تولید گاز طبیعی ایالات متحده از چاه های توسعه یافته با فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیارد فوت مکعب بر روز ۴۲
- شکل ۳-۴- گاز طبیعی تولید شده از چاه ها با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون فوت مکعب بر روز ۴۲
- شکل ۴-۴- تولید گاز شیل ایالات متحده به تفکیک میداین گازی بر حسب میلیارد فوت مکعب در روز ۴۳
- شکل ۵-۴- تولید نفت ایالات متحده با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز ۴۴
- شکل ۶-۴- نفت تولید شده از چاه هایی که با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز ۴۴
- شکل ۷-۴- تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته در کشور آمریکا در سال ۲۰۱۹ به تفکیک ماه..... ۴۵
- شکل ۸-۴- تعداد چاه های عمودی و افقی ایالت تگزاس در طی سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰ ۴۶
- شکل ۹-۴- مقایسه تعداد چاه های عمودی و افقی در ایالت تگزاس. نقاط سیاه چاه های عمودی و نقاط قرمز چاه های افقی ۴۷
- شکل ۱۰-۴- میزان تولید، نیاز کشور و واردات نفت در کشور آمریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ ۴۸

- شکل ۴-۱۱- میزان تولید، نیاز کشور و واردات گاز در کشور آمریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ ۴۸
- شکل ۴-۱۲- تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ در روسیه
(<https://www.statista.com/>) ۵۰
- شکل ۴-۱۳- سهم مناطق مختلف در تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای در روسیه در سال ۲۰۱۸ به درصد ۵۲
- شکل ۴-۱۴- عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای انجام گرفته در مناطق مختلف روسیه از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۸ ۵۳
- شکل ۴-۱۵- سهم کمپانی ها در بازار شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای در روسیه در سال ۲۰۱۸ ۵۴
- شکل ۴-۱۶- حجم بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای در روسیه از سال ۲۰۰۶-۲۰۱۸ به میلیارد روبل ۵۵
- شکل ۴-۱۷- عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله ای در روسیه ۲۰۱۱-۲۰۱۸ ۵۷
- شکل ۴-۱۸- (راست) منابع گاز شیل در چین (میلیارد متر مکعب) (چپ) مخازن اثبات شده گاز شیل در چین (تریلیون متر مکعب) ۵۹
- شکل ۴-۱۹- شیل های پالئوژئیک در خاورمیانه ۶۵
- شکل ۴-۲۰- شیل های مزوزوئیک: سنگ های منشا ژوراسیک و کرتاسه خاورمیانه ۶۵
- شکل ۴-۲۱- حجم مارکت صنعت شکافت هیدرولیکی به تفکیک بخش های مختلف تا سال ۲۰۱۶ ۶۹
- شکل ۴-۲۲- مارکت جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک شرکت های انجام دهنده ۷۰
- شکل ۴-۲۳- مارکت جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم کشورها تا سال ۲۰۱۶ ۷۲
- شکل ۴-۲۴- نمودار افزایش هزینه های هر چاه جهت عملیات شکافت هیدرولیکی تا سال ۲۰۱۶ ۷۳
- شکل ۴-۲۵- پیش بینی بازار شکافت هیدرولیکی در سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ ۷۴
- شکل ۴-۲۶- بازار شکافت هیدرولیکی ایالات متحده آمریکا از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۷ (میلیارد دلار) ۷۵
- شکل ۴-۲۷- پیش بینی تولید گاز شیل در چین تحت سه سناریوی مختلف توسعه و قیمت گاز (Caineng et al., 2016) ۷۸
- شکل ۵-۱- برقراری ارتباط بین مخزن و چاه از طریق شکاف و دور زدن ناحیه ی آسیب داده (Montgomery, 2015) .. ۸۱
- شکل ۵-۲- پدیده ی مخروط شدگی آب و گاز (<https://eng-info-tech.blogspot.com>) ۸۳

- شکل ۵-۳ - دسته بندی حفرات سازند. np : حفراتی که هرگز مسدود نمی شوند. عملکرد شکاف هیدرولیکی در این دسته قرار میگیرد. p1. حفرات مسدود شونده ی نوع ۱. p2 : حفرات مسدود شونده ی نوع ۲ (Ghadimi et al., 2020) ۸۴
- شکل ۵-۴ - افزایش دسترسی چاه به نقاط دوردست مخزن بر اثر شکاف زنی (Montgomery, 2015) ۸۵
- شکل ۵-۵ - تنش اصلی درون زمین ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) ۸۷
- شکل ۵-۶ - نمایی از یک سیستم ژئوترمال پیشرفته که چاه تزریق و چاه استخراج توسط شکافت هیدرولیکی برانگیخته شده اند (Moska et al. 2021) ۸۹
- شکل ۵-۷ - نقشه کشورهایی که در سیستم ژئوترمال پیشرفته سرمایه گذاری کرده اند و در چاه های تزریق و استخراج شکافت هیدرولیکی انجام داده اند (Moska et al. 2021) ۹۰
- شکل ۵-۸ - شکافت هیدرولیکی در چاه های آب زیر زمینی ۹۱
- شکل ۵-۹ - استخراج معادن با استفاده از شکافت هیدرولیکی به منظور ایجاد بلوکهای کوچک (Adams J. and Rowe, ۲۰۱۳) ۹۳
- شکل ۵-۱۰ - شکافهای ایجاد شده بر اثر فناوری شکافت هیدرولیکی در یک گمانه کوچک ۹۳
- شکل ۵-۱۱ - پروپانت سبز رنگ که شکاف را پر کرده است ۹۴
- شکل ۵-۱۲ - تزریق پساب صنعتی به درون زمین با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی (Zhang and Hascakir, 2021) ۹۶
- شکل ۵-۱۳ - استخراج آب برای فرایند شکافت هیدرولیکی (Miskimins et al. 2019) ۹۸
- شکل ۵-۱۴ - ترکیب سیال پس از عملیات شکافت (Zhang and Hascakir, 2021) ۹۸
- شکل ۵-۱۵ - مواد آلوده جامد حاصل از شکافت هیدرولیکی شامل گل حفاری آلوده (Zhang and Hascakir, 2021) ۹۹
- شکل ۵-۱۶ - استخراج متان از شیل گازی کم عمق (Zhang and Hascakir, 2021) ۱۰۰
- شکل ۶-۱ - دوباره فعال شدن یا باز شدن شکاف طبیعی در اثر ایجاد شکاف هیدرولیکی (Barree et al. 2014) ۱۰۲
- شکل ۶-۲ - تاثیر شکاف بر تراوایی ماتریکس (Barree et al. 2014) ۱۰۲
- شکل ۶-۳ - لاگ تصویری به منظور شناسایی صفحه شکستگی. خطوط سینوسی نشان دهنده شکستگی ها و سوزن ها شیب و آزمون صفحه شکستگی (Berry and Montgomery, 2015) ۱۰۴
- شکل ۶-۴ - تبدیل خطوط سینوسی شکل به موقعیت صفحه شکستگی در چاه (Berry and Montgomery, 2015) ۱۰۵

- شکل ۵-۶- نمودار تخلخل و تراوایی مغزه که بر اساس توزیع داده ها می توان منافذ نوع شکستگی و ریز تخلخل و سایر انواع منافذ را در نمونه تشخیص داد. ۱۰۶
- شکل ۶-۶- کراس پلات لاند رو-ميو رو حاصل از سرعت موج و چگالی سنگ که برای شناسایی زون های شکل پذیر و شکننده کاربرد دارد (Perez 2013). ۱۰۸
- شکل ۷-۶- یک مقطع از مدول یانگ تخمین زده شده با داده سائزمیک (قره چلو ۱۳۹۹) ۱۰۸
- شکل ۸-۶- نقشه توزیع مدول یانگ در میدان با استفاده از داده لرزه ای ۳D (Gharechelou et al. 2016) ۱۰۹
- شکل ۹-۶- رژیم تنش کششی، امتدادلغز و تراکمی در یک منطقه منفعل کنار قاره ای ۱۱۰
- شکل ۱۰-۶- رژیم تنش فشاری موجب کوهزایی و گسلهای معکوس شده (<https://byjus.com/physics/plate-tectonics/>) ۱۱۱
- شکل ۱۱-۶- نقش تاریخچه تدفین در گسترش شکافهای طبیعی سازند (Lonnee and Machel 2006) ۱۱۲
- شکل ۱۲-۶- مقادیر تنش های افقی و عمودی محاسبه شده از روابط پوروالاستیک در یک چاه مطالعاتی (قره چلو ۱۳۹۹). ۱۱۳
- شکل ۱۳-۶- لاگهای معمولی و سرعت موج S و P به همراه مدولهای الاستیک دینامیکی محاسبه شده از روابط تجربی (قره چلو ۱۳۹۹) ۱۱۴
- شکل ۱۴-۶- تاثیر اندازه ی پروپانت بر میزان بازشدگی شکاف (اعداد مشخص شده، اندازه ی مش هستند) ۱۲۳
- (Lengyel et al., 2021) ۱۲۳
- شکل ۱۵-۶- مراحل طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی ۱۲۵
- شکل ۱۶-۶- نمودار فشار ته چاهی برای شکاف الف) با هدایت پذیری نا محدود و ب) هدایت پذیری محدود (Spivey and Lee, 2013) ۱۲۷
- شکل ۱۷-۶- نمونه پمپهای فشار بالا، مورد استفاده در عملیات شکافت هیدرولیکی ۱۳۰
- شکل ۱۸-۶- سیستم اختلاط مورد استفاده در عملیات شکافت هیدرولیکی ۱۳۱
- شکل ۱۹-۶- تجهیزات کنترل پروپانت ۱۳۲
- شکل ۲۰-۶- واحد مواد شیمیایی ۱۳۳
- شکل ۲۱-۶- ون داده ها و اطلاعات ۱۳۳

- شکل ۶-۲۲- واحد رطوبت دهی..... ۱۳۴
- شکل ۶-۲۳- واحد رطوبت دهی..... ۱۳۴
- شکل ۶-۲۴- میسل تریلر ۱۳۵
- شکل ۶-۲۵- نمونه فرک تانک ۱۳۶
- شکل ۶-۲۶- لوله ها، اتصالات و شیرها (Montgomery, 2015) ۱۳۷
- شکل ۶-۲۷- الف) چگالی سنج رادیواکتیو ب) جریان سنج فشار بالا پ) گیرنده ی فشار ت) گیج فشار ته چاهی (Montgomery, 2015) ۱۳۸
- شکل ۶-۲۸- ابزار ایزوله کردن تجهیزات سر چاهی (Montgomery, 2015) ۱۳۹
- شکل ۶-۲۹- پکر مورد استفاده برای ایزوله کردن بخشی از چاه در عملیات شکاف زنی چند مرحله ای ۱۴۱
- شکل ۶-۳۰- انجام عملیات شکاف چند مرحله ای. الف) plug-and perf ب) frac sleeve ۱۴۲
- شکل ۶-۳۱- نحوه ی عملکرد frac sleeve ۱۴۲
- شکل ۷-۱: مقایسه روش های تحریک مخزن و کارایی آنها..... ۱۴۲

فهرست جداول

- جدول ۴-۱- لیست تعدادی از کشورهای اجرا کننده عملیات شکافت هیدرولیکی ۳۴
- جدول ۴-۲- منابع ارزیابی شده گاز شیل در جهان در سال ۲۰۱۳ (www.eia.gov) ۳۶
- جدول ۴-۳- حجم ذخایر نفت شیل کشورهای مختلف (Dyni, 2010) ۳۸
- جدول ۴-۴- ذخائر حجم در جا و اثبات شده قابل استحصال نفت شیل جهان تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی ۴۰
- جدول ۴-۵- احجام در جا و قابل استحصال چین تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی به تفکیک حوضه های رسوبی و سازندها .. ۶۱
- جدول ۴-۶- ذخایر نفتی و گازی متعارف و نامتعارف برخی از کشورهای خاورمیانه ۶۲
- جدول ۴-۷- آمار مربوط به ذخائر حجم در جا و قابل استحصال بعضی از کشورهای خاور میانه (EIA ۲۰۱۴) ۶۳
- جدول ۴-۸- پروژه های شکافت هیدرولیکی انجام شده در ایران ۶۷
- جدول ۴-۹- لیست شرکت درگیر عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم فعالیت در طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ .. ۷۰
- جدول ۵-۱- کاربردهای غیر نفتی فناوری شکافت هیدرولیکی ۸۶
- جدول ۵-۲- لیست معادنی که تا سال ۲۰۱۲ در آن فناوری شکافت هیدرولیکی انجام شده است. ۹۴
- جدول ۶-۱- داده های مورد نیاز برای مدلسازی شکاف ۱۰۳
- جدول ۶-۲- نمونه های از سیالات شکافنده ۱۱۶
- جدول ۶-۳- افزودنی های رایج سیال شکاف زنی (Speight, 2016) ۱۱۷
- جدول ۶-۴- پارامترهای مخزنی مورد نیاز ۱۱۳
- جدول ۶-۵- داده های چاه ۱۲۰
- جدول ۶-۶- خواص الاستیک سنگ ۱۲۰
- جدول ۶-۷- اطلاعات زمین شناسی ۱۲۱
- جدول ۶-۸- داده های مربوط به سیال شکاف زنی و پروپانت ۱۲۱

۱- مقدمه

با پایان جنگ سرد، تحولات مهمی در ترتیب و اولویت ابزارهای نفوذ جهانی و بین المللی پدید آمد. امروزه مسائل اقتصادی و اقتصاد سیاسی گزاره اول در قدرت نفوذ جهانی به حساب می آید بطوریکه واژه قدرت، بیشتر ناظر بر توان اقتصادی ملت ها است. داشتن اقتصاد قوی منوط بر داشتن ذخیره انرژی است. از طرف دیگر، انرژی به ابزاری نوین جهت تامین منافع و امنیت ملی، رفاه عمومی و توسعه اقتصادی بدل شده است. در مقیاس جهانی، انرژی و راه های دسترسی به آن، منجر به پیوستگی منافع، مقاصد و علایق مشترک بازیگران بین المللی شده است. بر اساس مفهوم وابستگی متقابل، افزایش مبادلات اقتصادی و تجاری احتمال وقوع ناامنی و جنگ را کاهش داده و این شرایط باعث برقراری مناسبات صلح آمیز میان ملت ها می شود. از این روی، هر یک از بازیگران نظام جهانی به دنبال تعریفی معقول از جایگاه انرژی خود در جهان هستند.

رشد روز افزون جمعیت از یک طرف، و پیشرفت فناوری از طرف دیگر، منجر به افزایش تقاضای انرژی جهانی شده است. به نظر می رسد میزان تقاضای انرژی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۰ در حدود ۴۰ درصد افزایش یابد (BP, Statistical Review of World Energy, 2021). این انرژی از منابع مختلفی از قبیل نفت، گاز طبیعی، زغال، انرژی هسته ای، برق آبی و انرژی های تجدید پذیر (بادی، خورشیدی، سوخت های زیستی و غیره) تامین می گردد. با این وجود تا ۲۰۴۰ همچنان نفت به عنوان اولین و مهمترین منبع تامین کننده انرژی جهان به حساب می آید (OPEC, World Oil Outlook, 2018).

همانطور که گفته شد انرژی های فسیلی (به ویژه نفت و گاز) در موازنه انرژی جهانی نقش اصلی را حداقل تا سال ۲۰۴۰ بازی می کنند. بنابراین کشورهای دارای منبع انرژی فسیلی از اهمیت بالایی در نظام جهانی جدید برخوردارند. با نگاهی به تاریخ و داده های آماری، می توان استنباط کرد که بزرگترین کانون های مصرف انرژی

جهان، مناطق توسعه یافته با میزان رشد بالای اقتصادی اند. از این رو صنعت با مواد هیدروکربنی (نفت و گاز) پیوند ناگسسته دارد و اساس قدرت در قرن بیست و یکم را تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، کشورهای در حال توسعه منابع و محل‌های تامین انرژی را جزو منافع و امنیت ملی خود بحساب می‌آورند.

خاورمیانه به عنوان قلب انرژی فسیلی جهان از اهمیت بالایی در بازتعریف روابط جهانی برخوردار است. ایران با واقع شدن در مرکز بیضی استراتژیک انرژی جهان (بیضی خزر - خلیج فارس) و با در اختیار داشتن دومین منبع نفت خام و گاز طبیعی، از جایگاه مهمی در زمینه تحولات انرژی جهانی برخوردار است. این جایگاه را از دو منظر مختلف می‌توان مورد بررسی قرار داد. الف) تامین انرژی کشورهای در حال توسعه (برای مثال چین و هند، اولین و سومین مصرف کننده بزرگ انرژی در جهان) و ب) بروز رسانی و انتقال فناوری از کشورهای توسعه یافته (آمریکا و کشورهای اروپایی).

در مبحث تامین انرژی کشورهای در حال توسعه عجین کردن مقاصد، پیوستگی منافع بین ایران به عنوان تولید کننده انرژی مطرح است و در بحث بروز رسانی و انتقال فناوری نیز کاهش وابستگی و استقلال ملی مطرح خواهد شد. با وجود تحریم‌های ظالمانه صنعت نفت ایران، همچنان نیاز به تامین انرژی فسیلی ایران در عرصه بین المللی احساس می‌گردد و به نظر می‌رسد مصرف کننده‌های بزرگ انرژی دنیا (چین، هند، پاکستان) در آینده نیاز مبرم تری به تامین سوخت های فسیلی خود از ایران پیدا خواهند کرد. منابع کشف شده هیدروکربنی متعارف ایران در میادین نفتی و گازی ایران قرار دارند. با گذشت زمان و تولید از این منابع هیدروکربنی بسیاری از میادین در نیمه دوم یا پایانی عمر خود قرار دارند. از طرف دیگر نیز، بسیاری از میادین به دلیل ماهیت طبیعی مخازن دارای صرفه اقتصادی تولید با استفاده از روش‌های مرسوم نیستند.

بنابراین برای اینکه ایران همچنان به عنوان یک مرکز تامین انرژی در نظام جهانی مطرح باشد باید به فناوری‌های نوین برداشت از مخازن هیدروکربنی (مخازن مخازن کم تراوا، مخازنی که در نیمه دوم و سوم عمر خود هستند و همچنین منابع غیر متعارف هیدروکربنی) دست یابد. دستیابی به فناوری‌های نوین نیازمند

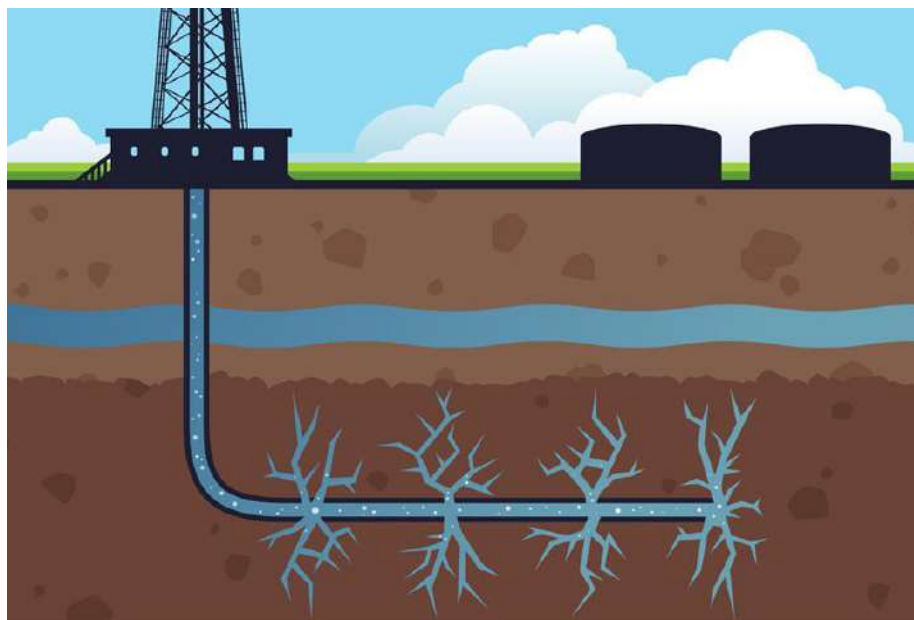
انتقال دانش مربوط به فناوری است تا هم میزان تولید از منابع هیدروکربنی را افزایش دهد، هم وابستگی خارجی را کاهش داده و استقلال ملی بیشتری در زمینه تولید انرژی داشته باشد.

یکی از مهمترین فناوری‌های روز دنیا که منجر به انقلاب در تولید انرژی جهانی گردیده است فناوری شکافت هیدرولیکی است. این فناوری در تامین و افزایش تولید از منابع انرژی، از قبیل انرژی‌های فسیلی، انرژی هیدروترمال، انرژی هسته‌ای، استخراج از معادن و از طرف دیگر، دفن پسماندهای صنعتی و خطرناک بصورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در زمینه کاربرد انرژی‌های حاصل از منابع هیدروکربنی این فناوری در کشورهای پیشرفته به بلوغ کامل رسیده است. برای مثال، ریشه فناوری شکاف هیدرولیکی در آمریکا را می‌توان به دهه ۱۸۶۰ نسبت داد. در حال حاضر، در سایه فناوری شکاف هیدرولیکی کشور آمریکا از یک وارد کننده انرژی نفت و گاز به یک صادر کننده انرژی تبدیل شده است بطوریکه وابستگی خود را به منابع انرژی فسیلی خارجی قطع کرده است (BP, Statistical Review of World Energy, 2019; 2020; 2021). این فناوری در کشورهای دیگری از قبیل روسیه، چین، کانادا، آرژانتین و استرالیا به خوبی گسترش یافته و انقلاب عظیمی در تامین انرژی جهانی از یک طرف و اشتغال زائی و ایجاد بازار کار و گسترش شرکت های مربوط به این فناوری از طرف دیگر ایجاد کرده است. با این وجود، این فناوری به دلایل مختلف هنوز در ایران مورد استفاده قرار نگرفته است.

با توجه به مطالب استراتژیکی، اقتصادی و سیاسی عنوان شده در بالا و با در نظر گرفتن کاربردهای متنوع این فناوری در ایران از قبیل جلوگیری از افت نرخ تولید سریع میادین نفت و گاز قدیمی کشور، توسعه اقتصادی میادین جدید کشور که به علت ضعیف بودن خواص مخزنی تا بحال مورد توجه قرار نگرفته اند و همچنین تولید و استخراج منابع نا متعارف مانند شیل‌های نفتی و گازی بمنظور تامین امنیت انرژی نسل آینده ضرورت دستیابی و بومی سازی این فناوری با اهمیت در کشور امری بدیهی و اجتناب ناپذیر بنظر می‌رسد.

۲- معرفی فناوری

شکافت هیدرولیکی یکی از روشهای تحریک چاه است که در آن، سنگ مخزن با تراوایی کم توسط فشار سیال شکسته می‌شود و به این ترتیب ارتباط مخزن و چاه بهبود یافته و از طریق آن گاز طبیعی و نفت آزادانه تر جریان می‌یابند (شکل ۱-۲). امروزه این روش، نقش مهمی در افزایش و حفظ تولید از چاههای نفت و گاز و همچنین در توسعه ذخائر هیدروکربنی متعارف و غیر متعارف دارد. بطور مثال، ترکیب فناوری چاههای افقی و شکافت هیدرولیکی، باعث افزایش قابل توجه تولید نفت و گاز طبیعی از سازندهای کم تراوای شیل در سراسر جهان به ویژه کشور آمریکا شده است. همانطور که در بخش تاریخچه فناوری این گزارش بدان اشاره خواهد شد، این فناوری مراحل تکامل و بلوغ خود را سپری کرده است بطوریکه به یک فناوری رایج در صنایع نفت و گاز بسیاری از کشورها تبدیل شده است. امروزه اثر بخشی عملیات شکافت هیدرولیکی آشکارا به اثبات رسیده و طراحان و شرکت‌های عملیاتی دنیا در پی بهینه سازی عملیات و تجهیزات مورد استفاده برای رسیدن به بیشینه ی عملکرد با صرف کمترین هزینه هستند. برای مثال، با جست و جوی عبارت "Hydraulic Fracturing optimization" در موتور جستجوگر Google Scholar، ۱۱۵،۰۰۰ عنوان نتیجه یافت می‌شود. با این حال، متأسفانه این فناوری هنوز در کشور ما جایگاهی در صنایع بالادستی نفت و گاز پیدا نکرده است.



شکل ۱-۲- فرایند شکافت هیدرولیکی و نحوه تاثیر آن در افزایش تولید (<https://www.texastribune.org>)

۱-۲- روشهای فناوری شکافت هیدرولیکی

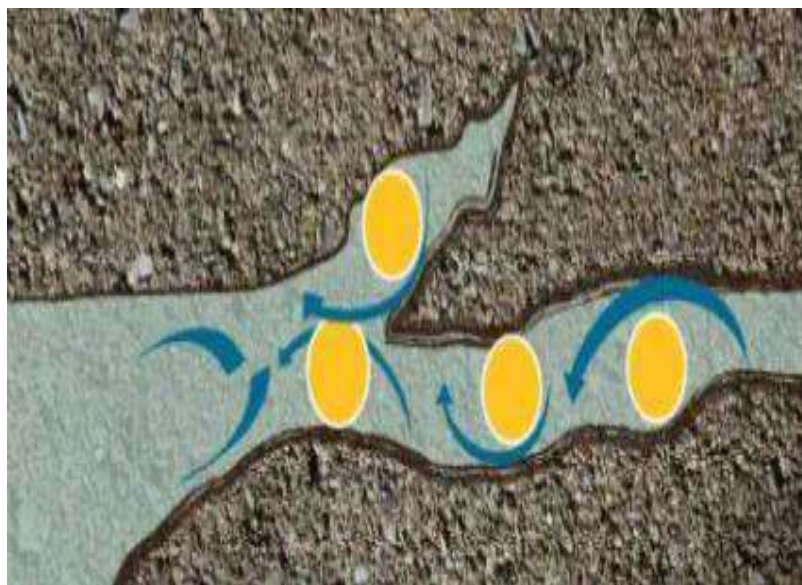
بطور عمومی دو روش کلی در اجرای این فناوری عنوان می‌گردد. تفاوت اصلی این دو روش در نحوه نگهداشت شکافهای ایجاد شده با توجه به جنس سنگ و نوع سیال تزریقی تعریف می‌گردد.

۱-۱-۲- شکافت با پروپانت

در این روش، پس از آن که بر اثر تزریق سیال فشار بالا، شکاف ایجاد شده و توسعه یافت، در مرحله ی بعد ریز دانه‌های ماسه‌ای یا شنی معروف به "پروپانت" به همراه سیال تزریقی به داخل شکاف فرستاده می‌شود تا بعد از پایان تزریق و کاهش فشار، از بسته شدن شکاف یا شکافهای ایجاد شده جلوگیری شود (شکل ۲-۲). پروپانت‌ها دانه‌هایی با استحکام بالا هستند که بتوانند فشار وارده را تحمل کنند بدون آن که خرد و شکسته شوند. انجام عملیات شکافت با پروپانت به سه طریق انجام می‌شود. در نوع اول (هم در مرحله ی ایجاد شکاف و

^۱ Gel fracking

هم در مرحله‌ی بعدی که پروپانت به درون شکاف تزریق می‌شود از یک سیال دارای ویسکوزیته‌ی بالا استفاده می‌شود. این سیال غالباً با اضافه کردن ژل، پلیمر و کراس لینک به سیال پایه ایجاد می‌شود. در نوع دوم اهم برای ایجاد و توسعه‌ی شکاف و هم برای انتقال پروپانت‌ها به درون شکاف از آب استفاده می‌شود. استفاده از آب بدون ژل و پلیمر در ایجاد شکاف نسبت به روش اول باعث ایجاد ساختار شکاف پیچیده تری می‌شود که میزان تولید را افزایش می‌دهد. همچنین به علت پایین بودن ویسکوزیته، فشار پمپاژ مورد نیاز کاهش یافته و می‌توان با نرخ بیشتری تزریق را انجام داد. اما استفاده از آب برای حمل پروپانت‌ها، بدون اضافه کردن پلیمر و ژل، ریسک ته‌نشست پروپانت‌ها را افزایش می‌دهد. زیرا قدرت چسبندگی سیال است که توانایی حمل پروپانت‌ها را افزایش می‌دهد. از این رو امروزه استفاده از روش‌های ترکیبی آرایج شده است. به این صورت که در گروه سوم طراحی عملیات با پروپانت، ایجاد و توسعه‌ی شکاف به وسیله‌ی آب انجام می‌گیرد تا بتوان با صرف انرژی کمتر، شکاف پیچیده‌تر و گسترده‌تری را توسعه داد. اما در مرحله بعد و برای فرستادن پروپانت‌ها به داخل شکاف از مخلوط آب و پلیمر/ژل/کراس لینک استفاده می‌شود (Sharma et al., 2005).



شکل ۲-۲- باز نگه داشتن شکاف به وسیله‌ی پروپانت (Zendehboudi and Bahadori, 2017)

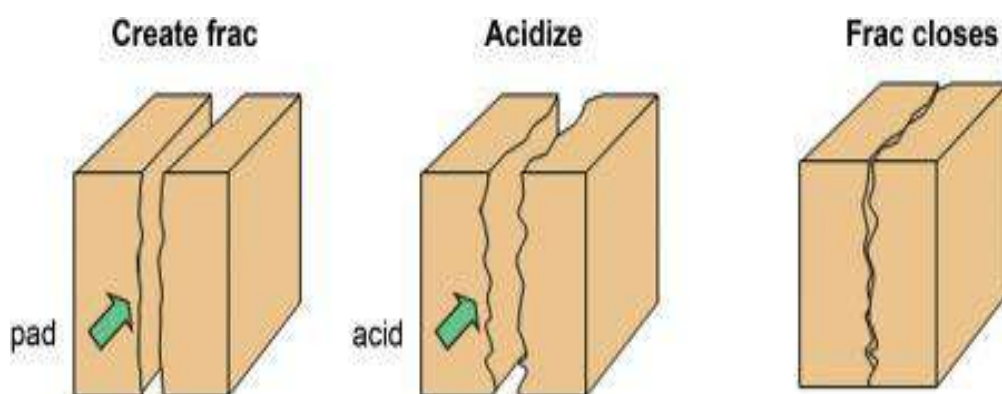
^۱ Water frackin

^۲ Hybrid

۲-۱-۲- شکافت هیدرولیکی اسیدی

در این روش، پس از آنکه با تزریق سیال اولیه، شکافت توسعه یافت، یک سیال اسیدی به درون شکافت تزریق می‌شود. اسید باعث خوردگی دیواره شکافت شده و با ایجاد زبری و دندان در سطوح شکافت (Etching) از بسته شدن مجدد شکافت بعد از برداشتن فشار تزریق جلوگیری می‌کند (شکل ۲-۳). این روش در سازندهای کربناته ی گچی، آهکی و دولومیتی انجام می‌گیرد که در اسید انحلال پذیر هستند. استفاده از اسید به جای پروپانت، باعث کاهش ریسک‌هایی مانند جریان یافتن پروپانت به درون چاه و آسیب رساندن به تجهیزات سطحی و درون چاهی، خرد شدن پروپانت‌ها بر اثر فشار و تولید ذرات ریز، جا گیری نامناسب پروپانت‌ها درون شکافت، تغییر ساختار پک پروپانت به مرور زمان و ... می‌شود. از طرف دیگر، در استفاده از اسیدها، به دلیل خاصیت خوردگی بالا، نیاز به استفاده از ابزارهای مقاوم در برابر خوردگی است و همچنین احتمال بسته شدن شکافت نیز بیشتر می‌باشد.

امروزه در عملیات‌های شکافت هیدرولیکی از ترکیبی از این دو روش استفاده می‌شود تا از مزایای اسید و پروپانت، به صورت همزمان بهره برد (Abass et al., 2006).



شکل ۲-۳- باز نگه داشتن شکافت به وسیله‌ی اسیدزنی (Guo et al., 2017)

۲-۲- فرآیند عملیات اصلی شکافت هیدرولیکی

فرآیند انجام عملیات شکافت هیدرولیکی با دریافت داده‌های مورد نیاز از منابع مختلف (مغزه، چاه آزمایی، چاه نگاری، داده‌های حفاری) آغاز می‌شود. سپس در طول فرآیند طراحی، پارامترهایی مانند نرخ تزریق، ویسکوزیته سیال، پروپانت‌ها و افزودنی‌های شیمیایی مناسب، ابعاد و هندسه‌ی شکاف، میزان هرزروی و ... تعیین می‌شوند. قبل از انجام فرآیند اصلی، یک سری تست‌ها با ماهیتی مشابه فرآیند اصلی اما در مقیاس زمانی و عملیاتی کوچکتر به منظور پیشبرد مدل سازی و طراحی اصلی انجام می‌شود. با استفاده از نمودارهای فشاری ثبت شده، پارامترهایی نظیر فشار شکست تعیین شده و جهت کالیبراسیون و طراحی مدل مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در نهایت نیز عملیات اصلی انجام می‌شود که البته می‌توان همزمان با انجام عملیات و پردازش و تفسیر داده‌های به دست آمده در حین عملیات، مدل و طراحی را به روزرسانی کرد و بر اساس نظریات فرد متخصص تغییراتی در عملیات اعمال کرد.

بطور خلاصه، هر مرحله از فرآیند شکافت هیدرولیکی یک عملیات کوتاه مدت (۳-۵ روز) است که در دو قدم اصلی انجام می‌گیرد. قابل ذکر است با توجه به هدف انجام فرآیند، نوع سازند و نوع چاه طراحی عملیات می‌تواند بصورت یک مرحله‌ای و یا چند مرحله‌ای صورت پذیرد که بالطبع در صورت چند مرحله‌ای بودن عملیات قدمهای تعریف شده در متن زیر در مراحل بعدی نیز تکرار می‌گردند.

در قدم نخست، حجم زیادی سیال با فشاری بیشتر از فشار شکست سازند برای مدت زمان کافی از طریق چاه (محل تزریق می‌تواند از داخل چاه، لوله جداری و یا فضای حلقوی پشت لوله جداری باشد) به داخل سازند تزریق می‌شود. در این مرحله، شکاف یا شبکه شکافی شکل گرفته و توسعه می‌یابد. در حالت طبیعی برداشتن فشار تزریق منجر به بسته شدن مجدد شکاف می‌گردد.

در قدم دوم، بلافاصله سیال حاوی پروپانت (ذرات سرامیکی و یا ماسه ای با استحکام بالا) به منظور جلوگیری از بسته شدن شکاف‌های ایجاد شده به داخل مخزن تزریق می‌شود. نهایتاً با برداشتن فشار و پایان

تزریق، سیال مجدداً به درون چاه بر می‌گردد. اما پروپانت درون شکاف باقی می‌ماند و دهانه‌ی شکاف را باز نگه می‌دارد (شکل ۲-۲). در این مرحله می‌توان به جای سیال حاوی پروپانت، سیال اسیدی تزریق کرد. اسید باعث خوردگی دیواره شکاف شده و با ایجاد زبری و دندان در سطوح شکاف (Etching) از بسته شدن مجدد شکاف بعد از برداشتن فشار تزریق جلوگیری می‌کند (شکل ۲-۳).

قابل ذکر است که در صورت چند مرحله‌ای بودن عملیات نحوه جداسازی مراحل عملیاتی در درون چاه به طرق مختلف و با استفاده از روشهای متنوعی انجام می‌گیرد که بالطبع به طول زمان انجام عملیات می‌افزاید. انتخاب روش مناسب جداسازی مراحل بسته به نوع چاه، هدف عملیات، رشته تکمیلی موجود و ... خواهد بود.

۳-۲- حوزه‌های درگیر در فناوری

برای انجام موفق این عملیات، نیاز به همکاری متخصصان در زمینه‌های مختلف است. گروه زمین شناسی باید وضعیت استرس‌ها و تکتونیک ناحیه را مشخص کند. بخصوص در مخازن شکافدار طبیعی، شناخت بهینه از ساختمان مخزن و شکستگی‌های موجود اهمیت فراوانی در نحوه طراحی و اجرای عملیات خواهند داشت. مهندسان بهره برداری و تکمیل چاه باید تجهیزات سر چاهی و ته چاهی مناسب را طراحی و استفاده نمایند بطوریکه قابلیت اجرای طراحی وجود داشته، رشته تکمیلی چاه توانایی تحمل فشار بالای مورد نیاز در این فرآیند را داشته و سیال حداقل افت فشار ممکن را تجربه کند. خواص مکانیک سنگ که نقش اساسی در تعیین میزان فشار مورد نیاز برای شکست و میزان باز شدگی شکاف دارد، باید از تست‌های آزمایشگاهی و یا داده‌های چاه پیمایی محاسبه گردد. این فعالیتها باید تحت نظر تیم متخصص ژئومکانیک زمین شناسی انجام گیرد. مهندس مخزن باید نقش خود را در زمینه‌ی مدیریت مخزن و تعیین محل چاه‌های بعدی با توجه به گسترش شکاف ایجاد شده، برای رسیدن به حداکثر تولید ایفا کند. جنبه‌های مکانیک سیالات و تغییر رژیم‌های جریان درون مخزن بر اثر ایجاد و گسترش شکاف باید توسط یک مهندس مخزن ارزیابی گردد. همچنین انجام

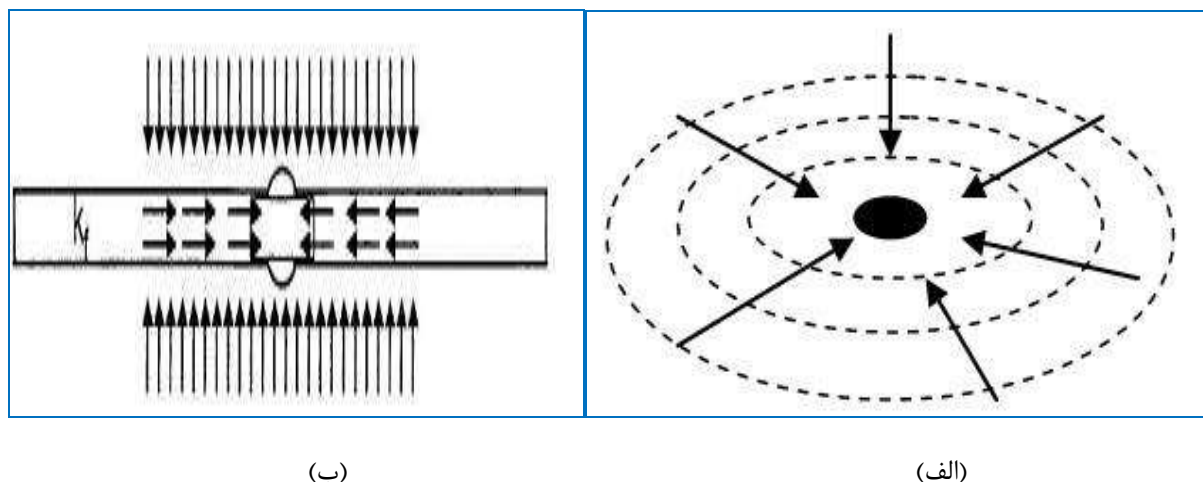
برآوردهای اقتصادی برای بهینه سازی فرآیند و رسیدن به بیشترین تولید با صرف کمترین هزینه، اقدامی ضروری می‌باشد. تعیین افزودنی‌های شیمیایی مورد نیاز برای رسیدن به خواص مطلوب سیال شکاف زنی باید توسط یک تیم شیمیدان متخصص در این زمینه انجام شود. جلوگیری از هرزروی سیال (با ایجاد به موقع فیلتر کیک بر روی سطح شکاف) تنها با یک طراحی مناسب سیال شکاف زنی ممکن خواهد بود. محافظت از تجهیزات در مقابل خوردگی و ... و سازگاری مواد تزریقی و افزودنی‌های متنوع با یکدیگر و همچنین با تجهیزات درون چاهی، مسئولیت تیمی مهندسان مواد، شیمی و تکمیل چاه است. طراحی و انتخاب پمپ‌ها و سایر تجهیزات سطح الارضی مورد استفاده بر عهده‌ی مهندسان مکانیک و بهره برداری متخصص است. هندسه‌ی شکاف ایجاد شده باید شبیه سازی شده و طراحی دقیق کل فرآیند عملیات توسط یک کار تیمی انجام و برنامه ریزی گردد. همچنین با ابزارهایی مانند میکروسایز میک و چاه آزمایی، در حین فرآیند شکاف زنی و پس از آن می‌توان برآوردهای اولیه از شکل شکاف را تصحیح کرد و به درک بهتری رسید. خواص پتروفیزیکی و رفتار فازی سیالات مخزن نیز باید با دقت تعیین شود (Miskimins, 2019). به همین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که به سرانجام رساندن یک عملیات شکاف زنی نیاز به تشکیل یک تیم قوی از گستره‌ی متنوعی از تخصص‌ها دارد.

۲-۴- مکانیسم عملکرد فناوری

اصلی‌ترین مکانیزم عملکرد شکافت هیدرولیکی، فراهم آوردن مسیری با تراوایی زیاد و مقاومت کم و به دنبال آن کاهش افت فشار سیال در طول مسیر است. در یک چاه ایده آل (همگن و همسان گرد بودن سازند و نفوذ کامل چاه در لایه تولیدی) رژیم جریان سیالات به سمت چاه از نوع شعاعی می‌باشد در صورتیکه ایجاد شکاف در مخزن، هندسه‌ی جریان را از حالت شعاعی به حالت خطی تغییر می‌دهد (شکل ۲).

در رژیم جریان شعاعی همانطور که در شکل ۲-۴- الف مشخص است خطوط جریان در راستای شعاع‌های یک استوانه اند اما با ایجاد شکاف هیدرولیک، وقتی که جریان از مخزن وارد شکاف شد در ادامه‌ی مسیر برای

رسیدن به چاه یا افت فشار خیلی ناچیزی را تجربه می‌کند و یا در صورت ایجاد شکاف با گذردهی بالا می‌توان به کلی از افت فشار درون شکاف صرف نظر کرد و چنین فرض کرد که جریان با رسیدن به شکاف، گویی به چاه رسیده است. تغییر هندسه‌ی جریان باعث کاهش افت فشار و افزایش دبی می‌شود و این تغییر رژیم جریان در مراحل بعدی توسعه‌ی مخزن و حفر چاه‌های جدید بسیار تاثیر گذار است (Miskimins, 2019).



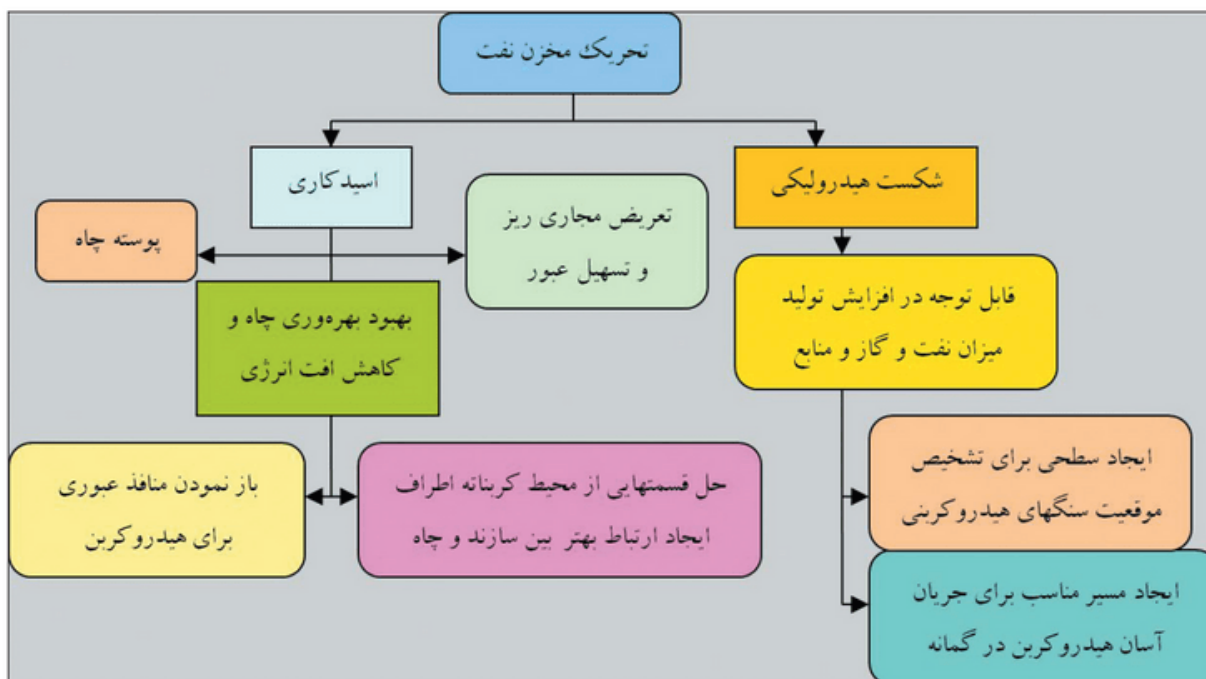
شکل ۲-۴- مقایسه رژیم جریانی در الف) یک چاه عادی و ب) یک چاه شکافته شده (<https://www.testwells.com/>)

سنگ‌های مخزنی و مخازن هیدروکربنی را می‌توان در دو گروه مخازن متعارف و نامتعارف تقسیم بندی کرد. مخازن متعارف به مخازنی گفته می‌شود که دارای تراوایی مناسب برای جریان یافتن سیال به داخل چاه هستند. مخازن نامتعارف مخازنی را شامل می‌گردد که از تراوایی یا سیالیت کافی برای جریان یافتن سیال هیدروکربنی به داخل چاه برخوردار نیستند. از جمله مخازن متعارف می‌توان به مخازن ماسه‌سنگی و کربناته با تخلخل و تراوایی نرمال اشاره کرد. مثال‌هایی از مخازن نامتعارف شامل مخازن نفت فوق سنگین، شیل‌های گازی و نفتی، لنزهای ماسه ایی گیرافتاده بین رسوبات شیلی ریزدانه، ماسه‌های ناتراوا و هیدرات‌های گازی هستند.

مخازن متعارف را می‌توان در دو گروه قرار داد. گروهی که دارای تخلخل و تراوایی حداقلی برای جریان یافتن به داخل چاه هستند ولی با مفروضات قیمت نفت و هزینه‌های عملیات استخراج زمان حال دارای صرفه اقتصادی نیستند. در این گروه از مخازن هیدروکربنی برای این که تولید در مقیاس اقتصادی در چاه صورت گیرد عملیات شکافت هیدرولیکی یک پیشنهاد مناسب است که با ایجاد یک مسیر با هدایت پذیری بالاتر از ماتریکس تولیدی در اطراف چاه و تغییر رژیم جریانی به ازدیاد برداشت و بهبود عملکرد تولید از مخزن کمک کرده و و ناحیه بیشتری از مخزن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در مخازن متعارفی که از تراوایی مناسبی برخوردار هستند، در طول تاریخچه چاه (از زمان حفاری تا بسته شدن چاه)، مشکلات و آسیب‌های فراوانی برای چاه ایجاد میگردد که در دو دسته مشکلات طبیعی و آسیب‌های القایی تقسیم بندی می‌گردند. آسیب‌های طبیعی شامل مهاجرت ذرات، متورم شدن رس‌ها، رسوبات حاصل از آب املاح دار و امولوسیون‌ها هستند. همچنین آسیب‌های القایی شامل مسدود شدن القایی توسط ذرات، تغییر ترشوندگی، واکنش‌های اسید و محصولات جانبی آنها و نهایتاً آسیب‌های ناشی از فعالیت‌های باکتریایی است.

روش‌های مختلفی برای رفع مشکلات پیش آمده در مخازن هیدروکربنی متعارف پیشنهاد گردیده است که از این میان می‌توان به اسیدکاری، و روش‌های جدیدتر از قبیل پالس التراسونیک، پالس پلاسمایی، حفاری‌های جهت دار برای رفع مشکل پوسته و حفاری‌های مدل استخوان ماهی اشاره کرد. هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای محدودیت‌های خاصی از قبیل توسعه یافتگی فناوری، عمق تاثیر محدود و زمان اثر کم هستند. هزینه‌های این روش‌ها به تناسب کاربرد و عملکرد آنها معمولاً و طبیعتاً کمتر از هزینه‌های عملیاتی بمانند فناوری شکافت هیدرولیکی میباشد. از میان روش‌های ذکر شده روش اسیدکاری یک روش معمول و رایج است که در اکثر میادین هیدروکربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵: مقایسه روش‌های تحریک مخزن و کارایی آنها

عملیات اسیدکاری به صورت معمول جهت کاهش ضریب پوسته اطراف چاه ناشی از عملیات های حفاری و تکمیل چاه به عنوان یک عملیات جهت راه اندازی اولیه چاه در نظر گرفته می شود. این عملیات جهت ایجاد یا بهبود یک مسیر ارتباطی مناسب درون ناحیه تولیدی اطراف چاه در نظر گرفته می شود. در مخازنی با میانگین تراوایی پایین، در صورت وجود مکانیسم رانش طبیعی بدون آبدۀ موثر یا دیگر مکانیسم های تولید، با گذشت زمان افت فشار ناشی از تولید در مخزن زیاد بوده و ثابت نگهداشتن تولید با چالش های عملیاتی همراه می باشد. عملیات اسیدکاری گسترده با تزریق اسید منجر به ایجاد یک مسیر با هدایت پذیری بیشتر در ناحیه مخزنی اطراف چاه می شود. در صورت فشار تزریق مناسب (وابسته به تراوایی ذاتی سنگ مخزن اطراف چاه) اسید تزریقی ناحیه بیشتری از اطراف چاه را تحت تاثیر قرار داده و منجر به نفوذ و خوردگی ناهمگون سنگ مخزن در نواحی تحت تزریق شده و یک مسیر با هدایت پذیری بالاتری ایجاد می کند. در صورت غالب بودن

مکانیسم تولید طبیعی به عنوان مکانیسم غالب تولید از مخزن، عملیات اسیدکاری گسترده به صورت موقتی منجر به بهبود تولید شده ولی با گذشت زمانی کوتاه بعد از عملیات اسیدکاری گسترده به علت ماهیت ذاتی بهره دهی پایین ماتریکس تولیدی، نیاز به تکرار این عملیات در طول تولید از چاه جهت نگهداشت تولید از مخزن می باشد.

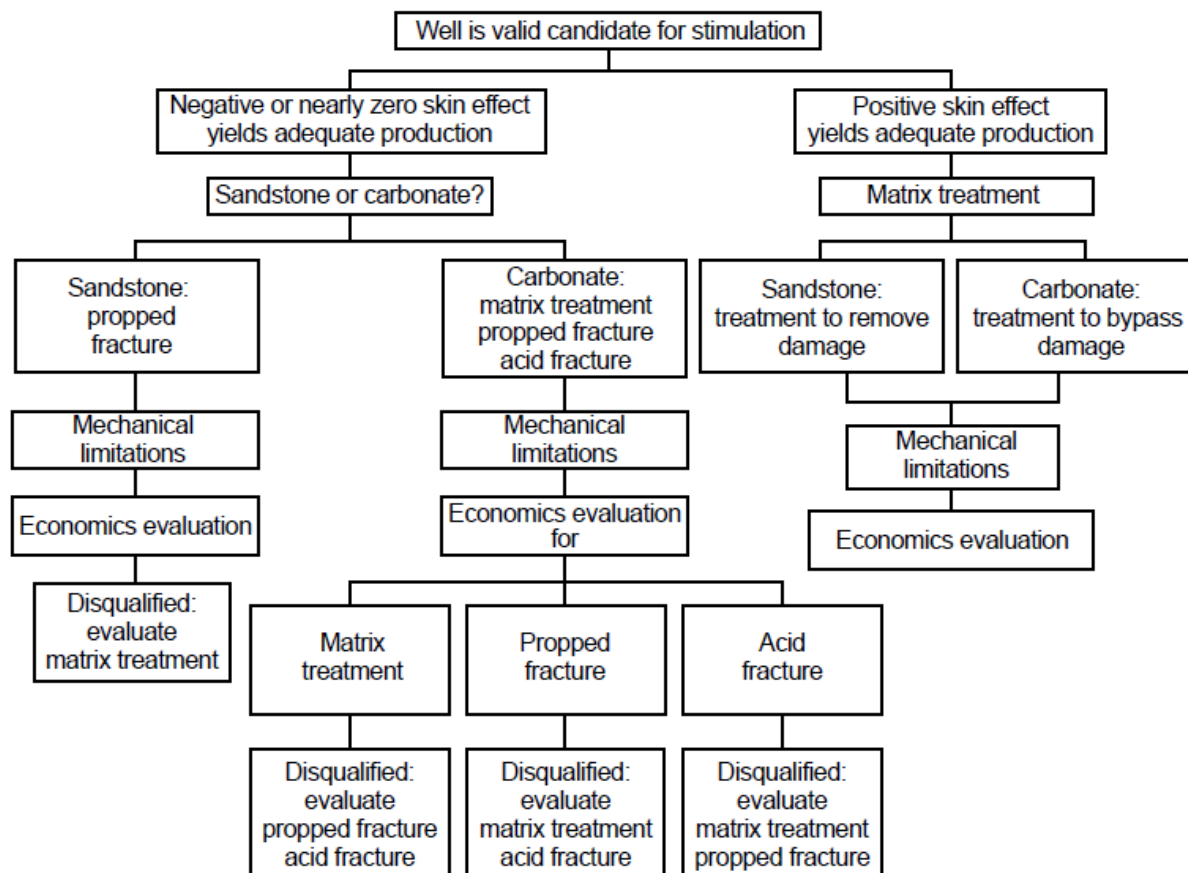
همانطور که اشاره شد عملیات اسیدکاری گسترده در اینگونه از مخازن تا شعاع خاصی مخزن را تحت تاثیر گذاشته و به علت افت طبیعی فشار متعاقبا تولید از ناحیه مخزنی کاهش می یابد. بدین منظور عملیات شکافت هیدرولیکی با هدف نهایی ایجاد یک مسیر با هدایت پذیری بالاتر از ماتریکس تولیدی در اطراف چاه و تغییر رژیم جریانی و کاهش فشار ناشی از تولید به عنوان یکی از روش های بهبود عملکرد تولید از اینگونه مخازن در نظر گرفته می شود. این عملیات همچنین با عبور از ناحیه آسیب دیده اطراف چاه، متعاقبا ضریب پوسته های ناشی از حفاری و تکمیل چاه را کاهش داده و ناحیه بیشتری از مخزن را تحت تاثیر قرار می دهد.

بعد از این که یک چاه در رده چاه غیر تولیدی یا مرده قرار گرفت ارزش مالی بهبود تولید از چاه و علت یا علت های آسیب سازندی مشخص می گردد. بر اساس این پارمترها مهندس مخزن اقدام لازم جهت بازگشت چاه به چرخه تولید را مشخص خواهد کرد.

در کل سیستم تولید باید این تصمیم گیری در نظر گرفته شود. اگر مشکل در طراحی یا عملیات چاه (اندازه تیوبینگ یا فرازآوری مصنوعی) باشد پس تحریک چاه مورد نیاز نیست و باید ابزارها بهبود یابد یا تعمیر گردند. هدف بهبود چاه باید متعادل باشد برای مثال نیازی به تولید بیش از ظرفیت تیوبینگ یا بیش از توان تجهیزات سرچاهی نیست. شکل ۲-۶ درخت تصمیم گیری برای کمک به فرآیند انتخاب یا تکنیک تحریک چاه را نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است، هدف بهره وری تکنیک یا روش تحریک چاه را مشخص خواهد کرد.

اگر بتوان به هدف بهره‌وری با اثر اسکین ۱۰٪ از آسیب اولیه اسکین در ماسه‌سنگ‌ها و ۲- تا ۳- در کربنات‌ها دست یافت، تحریک ماتریکس کافی و احتمالاً مقرون به صرفه خواهد بود. در مخازن ماسه سنگی تنها جایگزین تحریک روش شکافت هیدرولیکی است. در مخازن کربناته (آهک و دولومیت‌ها) شکاف اسیدی می‌تواند راه مقرون بصرفه در افزایش تولید باشد. در هر دو مورد، شکستگی هیدرولیکی در مخزن ایجاد می‌شود. در شکستگی معمولی، رسانایی شکستگی با نگه داشتن آن توسط مواد با نفوذپذیری بالا حفظ می‌شود. در شکست اسیدی، رسانایی با سطح دندان‌دانه سنگ (غیر یکنواخت) ایجاد می‌شود.

عوامل دیگری ممکن است بر انتخاب تکنیک تحریک چاه تأثیر بگذارند. در ماسه‌های تثبیت نشده یا شکننده، توصیه می‌شود که حداکثر کاهش فشار مجاز قبل از تولید (ماسه) بررسی شود. این محدودیت کاهش ممکن است به انتخاب تحریک شکستگی منجر شود تا امکان دستیابی به نرخ‌های هدف در کاهش پایین‌تر را فراهم کند. از سوی دیگر، نگرانی در مورد جداسازی ناحیه‌ای ممکن است از تحریک شکستگی جلوگیری کند. اگر رشد شکستگی عمودی به داخل آبخوان یا کلاhek گاز قابل کنترل نیست، تحریک ماتریکس ممکن است پیشنهاد شود.



شکل ۲-۶: تصمیم گیری در مورد انتخاب روش تحریک چاه

بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به منظور رفع مشکلات ثانویه اطراف چاه می‌توان از روش‌های اسیدکاری، یا دیگر روش‌های مذکور از قبیل پالس پلاسمایی، پالس التراسونیک یا حفاری جهت دار جهت عبور از اسکین اطراف چاه استفاده کرد. ولی باید در نظر داشت که تمامی این روش‌ها در محدوده‌های عمق تاثیر کوتاه در اطراف چاه می‌توانند تاثیر گذار باشند و در بازه زمانی محدود (حدود ۶ ماه) تاثیر آنها از بین خواهد رفت. کاربرد فناوری شکافت هیدرولیکی در مقایسه با عملیات های دیگر بهبود بهره وری چاه در مقیاس بزرگتر فراتر از ناحیه چند فوتی اطراف چاه و دارای اثرات طولانی مدت تری میباشد. شکافت هیدرولیکی با هدف نهایی ایجاد یک مسیر با هدایت پذیری بالاتر از ماتریکس تولیدی در اطراف چاه و تغییر رژیم جریان و کاهش فشار



ناشی از تولید با عبور از ناحیه آسیب دیده اطراف چاه، متعاقبا ضریب پوسته های ناشی از حفاری و تکمیل چاه را کاهش داده و ناحیه بیشتری از مخزن را تحت تاثیر قرار می دهد. فلذا هزینه های بیشتر اجرای این فناوری میتواند دارای توجیهات اقتصادی باشد.

۳- تاریخچه و سیر تحول فناوری

۳-۱- مروری بر تاریخچه جهانی

تاریخچه فناوری شکافت هیدرولیکی را می‌توان به چهار دوران ذیل تقسیم بندی نمود که در این فصل قصد داریم به تفصیل به آنها بپردازیم.

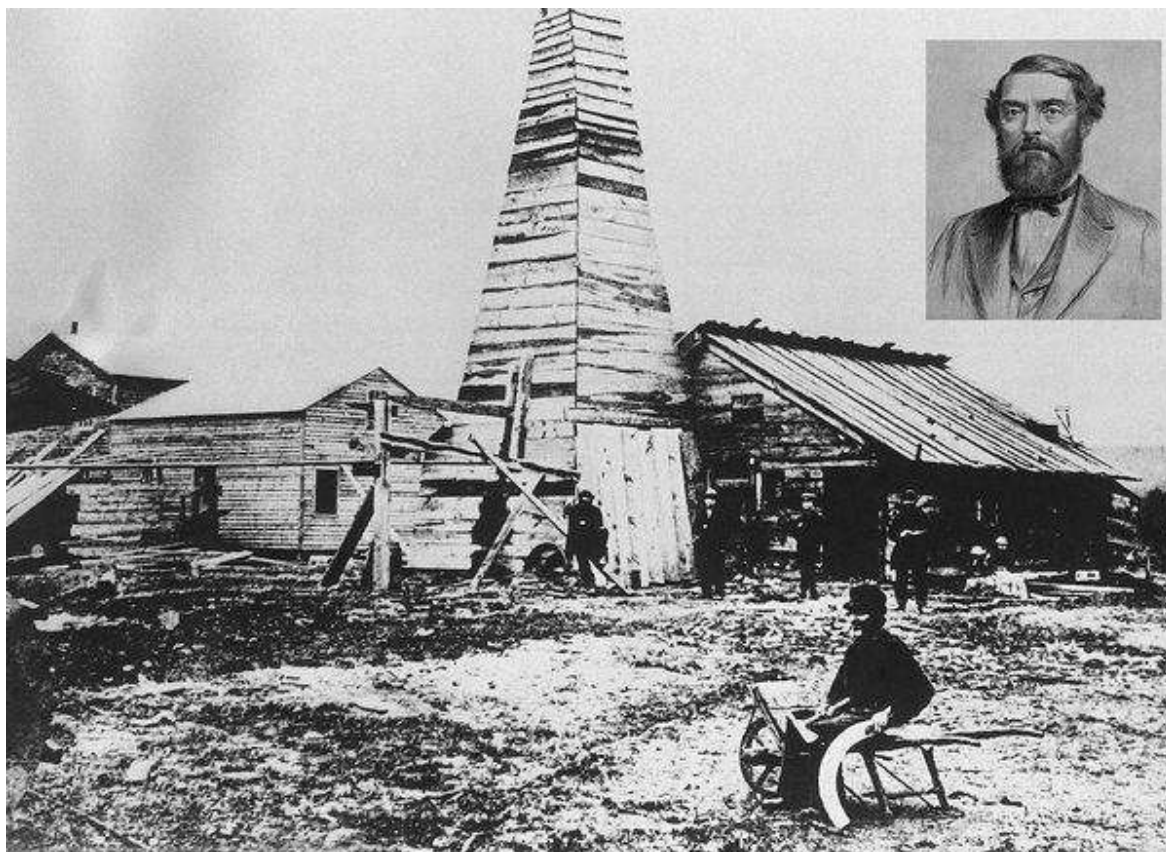
- دوران پیش از شکافت هیدرولیکی (دهه میلادی ۱۹۴۰-۱۸۵۰)
- دوران شکافت هیدرولیکی اولیه (دهه میلادی ۱۹۸۰-۱۹۴۰)
- دوران شکافت هیدرولیکی مدرن (دهه میلادی ۲۰۰۰-۱۹۸۰)
- شکافت هیدرولیکی در قرن بیست و یکم

الف- دوران پیش از شکافت هیدرولیکی (دهه ۱۹۴۰-۱۸۵۰)

با توجه به اهمیت دسترسی و استخراج نفت از زیر زمین، شرکت نفت آمریکایی سینیکا در دهه ۱۸۵۰، یکی از مدیران خود با نام ادوین دریک^۱ را برای این کار مامور نمود. با همت این شخص، نخستین چاه تجاری نفت در اواخر این دهه در شهر پنسیلوانیا^۲ در آمریکا حفر شد. پس از آن در کمترین زمان ممکن، پنسیلوانیا محلی مهم برای جویندگان نفت به شمار آمد و دیری نپایید که این منطقه پر از دکل‌های حفاری نفت شد. اکنون این محل به موزه تبدیل شده و مورد بازدید گردشگران قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۱، تصویر محل این چاه به همراه ادوین دریک آورده شده است.

^۱ Edwin Drake

^۲ Pennsylvania



شکل ۳-۱- اولین چاه حفاری شده توسط ادوین دریک در اواخر دهه ۱۸۵۰

ریشه فناوری شکافت هیدرولیکی را می‌توان به دهه ۱۸۶۰ نسبت داد چرا که در آن زمان، نیتروگلیسرین برای تحریک چاه‌های کم عمق در سنگ‌های سخت پنسیلوانیا، نیویورک، کنتاکی و ویرجینیای غربی مورد استفاده قرار می‌گرفت. این ماده با وجود اینکه بسیار سمی است و در برخی مواقع استفاده از آن غیرقانونی می‌باشد ولی در مشبک‌کاری دیواره چاه‌های نفت و سرعت بخشیدن به جریان سیال و در نتیجه افزایش بازیافت نفت بسیار موفق بود به طوریکه در آن دوران به سرعت در چاه‌های آب و گاز نیز مورد استفاده قرار گرفت. در واقع، ایده استفاده از نیترو گلیسرین و ایجاد شبکه‌های ارتباطی جهت سهولت جریان سیال زیر بنای مفهومی فناوری شکافت هیدرولیکی بوده است.

در دهه ۱۹۳۰، ایده استفاده از اسید (HF یا HCL) به جای نیتروگلیسیرین به عنوان یک جایگزین غیر قابل انفجار با هدف تحریک چاه مورد استفاده قرار گرفت که در نتیجه آن کانالهایی جهت جریان سیال به داخل چاه ایجاد می شدند که این کانالها در برابر بسته شدن مجدد مقاومت بیشتری پیدا می کردند و باعث افزایش بهره‌وری می شدند.

ب- دوران شکافت هیدرولیکی اولیه (دهه ۱۹۸۰-۱۹۴۰)

پس از مطرح شدن ایده استفاده از اسید برای تحریک چاه، فلویید فریس^۱ از شرکت نفت و گاز استانولینداویل^۲ شروع به تحقیق بر روی رابطه بازدهی چاه و بهبود فشار در اثر اسیدزنی و تزریق سیمان پرفشار نمود و پس از آن در دهه ۱۹۴۰، وی ایده ایجاد شکاف در سازند برای افزایش تولید نفت و گاز را ارائه نمود.

بدین ترتیب در سال ۱۹۴۷، شرکت استانولینداویل برای اولین بار در میدان گازی هوگوتان^۳ در ایالت کانزاس^۴ روش ایجاد شکاف را به کار برد و طی آن در حدود ۱۰۰۰ گالن اسید نفتیک و گازوئیل غلیظ شده با ناپالم (نوعی ماده آتش زا متشکل از بنزین یا پلی استیرن یا نفت، به همراه موادی که به آن ویژگی ژله‌ای و چسبندگی می دهند) به سازند آهکی حاوی گاز در عمق ۲۴۰۰ فوتی تزریق شد. اگرچه این تجربه ناموفق بود و بازدهی چاه در این مورد به میزان قابل توجهی تغییر نکرد ولی این عملیات را می توان نقطه شروع فناوری شکافت هیدرولیکی نامید چرا که پس از آن در سال ۱۹۴۸، با انتشار مقاله ای توسط جی.بی.کلارک^۵ از شرکت استانولینداویل عملیات ایجاد شکاف به طور مبسوط تری به صنعت معرفی شد و پس از آن با اعطای امتیاز تزریق سیال به شرکت سیمانکاری چاه‌های نفت هالیبرتون^۶ در حقیقت فناوری شکافت هیدرولیکی پا به عرصه صنعت نهاد. در اواخر دهه ۱۹۴۰، شرکت هالیبرتون برای اولین بار به صورت تجاری، دو عملیات شکافت هیدرولیکی

^۱ Floyd Farris

^۲ Stanolind Oil

^۳ Hugoton Gas Field

^۴ Kansas

^۵ J.B.Clark

^۶ Halliburton Oil Well Cementing Company (Howco)

موفق با مخلوط نفت خام و گازوئیل و ۱۵۰ پوند ماسه را در اکلاهما^۱ و میدان آرکر^۲ در تگزاس انجام داد (Kathryn A. Susko, 2015). پس از این موفقیت، تکنیک شکافت هیدرولیکی به سرعت توسط شرکت Pan American Petroleum برای افزایش تولید در اکلاهما استفاده شد (Susko, 2017). در دهه ۱۹۵۰، جهش قابل توجهی در فناوری شکافت هیدرولیکی رخ داد و استفاده از آب و ژل در تزریق، جایگزین ناپالم و سایر فراورده‌های نفتی شد. قابل توجه است که اولین تجربه شکافت هیدرولیکی میدان نفتی یومن^۳ در چین نیز در این دهه اتفاق افتاده است (Cai et al., 2014).

در دهه ۱۹۶۰ مهمترین رویدادی که اتفاق افتاده است، معرفی شکافت هیدرولیکی گسترده^۴ برای عملیات شکافت در سازندهای عمیق با دمای بالاتر است که عبارتست از تزریق حجم بالایی از مایعات و مواد به داخل چاه (Jacobs and Testa, 2019). این روش در آن دهه در اکلاهما توسط Pan American Petroleum انجام شده است. همچنین این دهه آغاز آزمایشات امکان سنجی استفاده از انفجارهای هسته‌ای برای شکستگی توسط کمیسیون انرژی اتمی بوده است.

در دهه ۱۹۷۰ فناوری شکست هیدرولیکی در میادین نفت و گاز دریای شمال گسترش یافت. اهمیت موضوع به این دلیل است که در آن زمان، بهره برداری از ذخایر به طور فزاینده‌ای چالش برانگیز شده بود. در اواخر این دهه شکافت هیدرولیکی گسترده به ایالات کانادای غربی نیز گسترش یافته است.

ج- دوران شکافت هیدرولیکی مدرن (دهه ۱۹۸۰-۲۰۰۰)

دهه ۱۹۸۰ سرآغاز حفاری افقی در تگزاس بود چرا که قبل آن چاه‌های افقی نفت و گاز تا حدودی نا شناخته بودند (Paul Yale, et al., ۲۰۱۸). همچنین در این دهه استفاده از شکستگی هیدرولیکی در خشکی معمول شد و حدود ۲۰۰ عملیات در انگلستان با این فناوری انجام شد. علاوه بر این، در این دهه، استفاده از پایش

^۱ Oklahoma

^۲ Archer

^۳ Yumen

^۴ Massive Hydraulic Fracturing

میکروسایزمیک^۱ در این صنعت برای اولین بار توسط آزمایشگاه Sandia معرفی شد. با استفاده از این روش پایش می‌توان اطلاعاتی از قبیل طول، ارتفاع، آزمون و موقعیت شکستگی در اطراف چاه به دست آورد. می‌توان اظهار نمود، دهه ۲۰۰۰-۱۹۸۰، دوران، سرآغاز عصر مدرن فناوری شکافت هیدرولیکی است، زیرا علاوه بر ترکیب تکنیک حفاری افقی با فناوری شکافت هیدرولیکی در این دهه، استفاده از پایش میکروسایزمیک نیز در این دهه افزایش یافته است. همچنین در این دهه جورج.پی.میچل^۲ (بنیانگذار شرکت میچل انرژی) در شرکت خود گامی در جهت شکافت هیدرولیکی شیل‌ها در مقیاسی برداشت که تا کنون انجام نشده بود و در پی این اقدام به پاس تلاش وی در دهه ۱۹۹۰ عنوان "پدر شکافت هیدرولیکی مدرن" به وی اعطا شد (Susko, 2017).

د- فناوری شکافت هیدرولیکی در قرن بیست و یکم

اوایل دهه ۲۰۰۰ در واقع آغاز قرن بیست و یکم شکافت هیدرولیکی بود که امروزه می‌شناسیم. در این دهه ترکیب تکنیک‌های حفاری افقی، پایش میکروسایزمیک و عملیات‌های شکافت هیدرولیکی با Slick Water رخ داد.

سال ۲۰۰۳ نقطه‌ای بود که بسیاری از مورخان و تحلیل‌گران صنعت معتقدند انقلاب شیل آغاز شد. در این زمان جورج.پی.میچل با شکافت هیدرولیکی، روشی اقتصادی را برای استخراج گاز از شیل پیشنهاد داد. انتشار خبر انقلاب شیل در زمان خود خبری امیدبخش در حوزه انرژی بود. پس از آن در سال ۲۰۱۲ در حدود ۲/۵ میلیون عملیات شکافت هیدرولیکی در جهان انجام شد که بیش از ۱ میلیون عملیات مربوط به ایالات متحده آمریکا است.

^۱ Microseismic

^۲ George.P.Mitchell

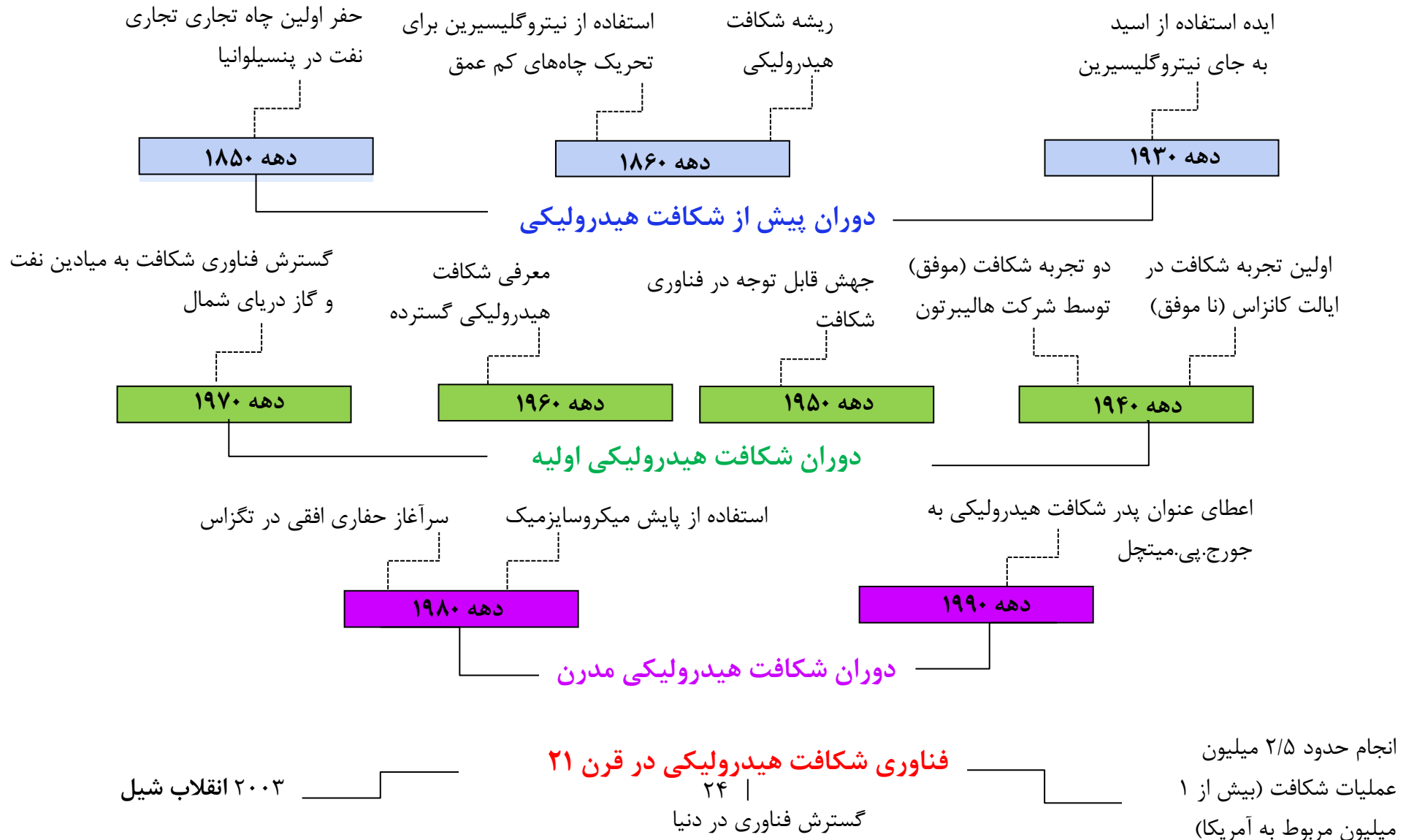
^۳ سیالی است که در شکافزنی هیدرولیکی استفاده شده و قسمت عمده آن (۹۸ درصد) آب بوده و باقی آن افزودنی‌هایی که باعث افزایش سرعت جریان سیال و انتقال ماسه از طریق چاه و درون سازند می‌شوند، می‌باشد.

روند استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به نحوی پیش رفت که در سال ۲۰۱۶ بیش از ۵۰ درصد تولید نفت آمریکا با استفاده از این روش انجام شد. این موفقیت آنقدر چشمگیر بود که انگلستان را ترغیب به تقلید از ایالات متحده در صنعت شکافت هیدرولیکی نمود. در آن زمان این عملیات در ناتینگهام، لنکاوی و یورکشایر انجام شد. بدین ترتیب در سال ۲۰۱۹ تولید نفت شیل ایالات متحده به حدود ۸ میلیون بشکه در روز رسید و همچنین موفق به تولید ۹۰ درصد گاز طبیعی مورد نیاز خود در داخل شد. همه این مسائل باعث شد که فناوری شکافت هیدرولیکی به سایر کشورهای جهان نیز گسترش یابد. در این سال آژانس بین المللی انرژی به ایالات متحده پیشنهاد داد تا سال ۲۰۲۰ تولید نفت خود را به ۹ الی ۱۰ میلیون بشکه در روز افزایش دهد که البته شواهد این طور نشان می‌دهد که این پیشنهاد تحقق یافته است. در حال حاضر نیز این فناوری بطور گسترده‌ای در مناطق مختلف جهان نه تنها در صنعت نفت و گاز بلکه در صنایع دیگر تحت الارضی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خلاصه تاریخچه فناوری شکافت هیدرولیکی در دیاگرام زیرنمایش داده شده است.



تاریخچه فناوری شکافت هیدرولیکی در یک نگاه



۳-۲- تاریخچه فناوری در مناطق مختلف

- ایالات متحده آمریکا

همانگونه که قبلا نیز بدان اشاره شد، اولین عملیات شکافت هیدرولیکی در ایالات متحده آمریکا در دهه ۱۹۴۰ انجام شد و تا سال ۲۰۱۶ بیش از ۵۰ درصد تولید نفت آمریکا با این روش انجام شده و تا کنون این مقادیر رو به افزایش است. می توان مهد شکوفایی این فناوری را آمریکا دانست و بنابراین بیشترین مطالبی که در قسمت قبل تحت عنوان تاریخچه جهانی به آن پرداختیم مربوط به آن می باشد. لذا به منظور جلوگیری از تکرار مطالب عنوان شده، در این قسمت فقط به سیر تحول سیالات بکار رفته در اجرای این فناوری در کشور آمریکا می پردازیم.

سیالات استفاده شده برای عملیات شکافت هیدرولیکی در ایالات متحده آمریکا تا قبل از سال ۱۹۵۳ برای حدود ۹۲ درصد عملیات ها نامشخص بوده اند و از ۸ درصد عملیات باقیمانده، ۳۲ درصد پایه آبی و ۳۰ درصد پایه نفتی گزارش گردیده اند. این مقادیر نشان دهنده این واقعیت است که به تدریج محلول های آبی و نفتی جایگزین استفاده از اسید در شکافت هیدرولیکی شده اند و در سال ۱۹۵۳، آب به عنوان یک سیال ایجاد کننده شکاف مطرح شده و همچنین پروپانت و ماسه نیز به عنوان مهمترین ماده برای باز نگهداشتن شکاف ها استفاده شدند. در اواخر دهه ۱۹۷۰، اکثر سیالات مورد استفاده برای تحریک نواحی کم عمق پایه کفی (foam) (با استفاده از نیتروژن و کربن دی اکسید تحت فشار بالا) بودند. در دهه ۱۹۸۰، از مواد افزودنی ژل های حساس به دما مانند هیدروکسی اتیل سلولوز^۹ استفاده شدند (Montgomery and Smith, 2010).

در دهه ۲۰۰۰، تغییرات وسیعی در سیال استفاده شده و نیز افزودنی ها در عملیات ایجاد شد. در اواسط این دهه بود که افزایش شدیدی در تعداد عملیات شکافزنی با Slick Water که قبلا توضیح داده شد رخ داده است. قسمت عمده Slick Water (۹۸ درصد) آب بوده و باقی آن افزودنی هایی (شامل کاهنده های اصطکاک، فعال

^۹ Hydroxyethylcellulose

کننده‌های سطحی، بیوسایدها، الکترولیتها و بازدارنده‌های تشکیل رسوب) هستند که باعث افزایش سرعت جریان سیال و انتقال ماسه از طریق چاه و درون سازند می‌شوند (Gandossi and Von Estorff, 2013). بیش از ۳۰ درصد از روشهای تحریکی در سال ۲۰۰۴ در آمریکای شمالی، با این سیال بوده است. در این دهه از اسیدها به خاطر بازیابی تراوایی از دست رفته حین حفاری نیز به مقدار زیادی در عملیات‌ها استفاده شده است.

- آفریقا

یکی از مناطقی که بیشترین ذخایر گاز شیل جهان را به خود اختصاص داده است آفریقای جنوبی است و فناوری شکافت هیدرولیکی در این منطقه شناخته شده است.

در شمال آفریقا نیز می‌توان به کشور الجزایر اشاره نمود که عملیات شکافزنی هیدرولیکی را تجربه نموده است. بطور مثال این فناوری در میدان Hassi Messaoud که یکی از میادین بزرگ دنیا است و در شمال شرقی بخش مرکزی این کشور واقع شده است در اوایل دهه ۱۹۹۰ استفاده شده است. مخزن میدان فوق ماسه سنگی ضخیم به شکل طاق‌دیسی همراه با گسل می‌باشد (Shaoul et al., 2008).

یکی دیگر از میادین مهم آفریقا، میدان El-Agreb در کشور الجزایر است که در ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی میدان Hassi Messaoud است و در اواسط دهه ۱۹۹۰ عملیات شکافزنی در غرب این میدان انجام شده و با موفقیت همراه بوده است (Shaoul et al., 2008).

همچنین عنوان شده است که منطقه‌ای به نام کارو در آفریقای جنوبی، کانون شکافت هیدرولیکی آفریقا در آینده خواهد بود.

موقعیت این دو میدان در شکل ۳-۲، مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳- موقعیت میادین در آفریقا

- کانادا

فناوری شکافت هیدرولیکی برای اولین بار در کانادا در نزدیکی ویردن، مانیتوبا در سال ۱۹۵۱ مورد استفاده قرار گرفت. در آلبرتا، از این تکنیک برای استخراج هیدروکربن‌ها از میدان نفتی پمبینا در سال ۱۹۵۳ استفاده شد و از اواسط دهه ۱۹۶۰ توسط صنعت نفت کانادا رایج شده است. همچنین شکافت هیدرولیکی گسترده از اواخر دهه ۱۹۷۰ در آلبرتا برای بازیابی گاز استفاده شد. تکامل تدریجی این تکنیک، پتانسیل گسترش توسعه منابع در سایر استان‌های کانادا را افزایش داده است به طوری‌که امروزه برای تولید نفت و گاز طبیعی در ایالت‌های بریتیش کلمبیا، آلبرتا، ساسکاچوان و مانیتوبا و بخصوص برای استخراج منابع نفت شیل و سازندهای با تراوایی پایین گاز از این تکنیک استفاده می‌شود قابل ذکر است که از حدود سال ۲۰۱۱ در برخی مناطق کانادا استفاده از این تکنیک به دلایل زیست محیطی ممنوع و یا به تعلیق درآمده است.

در کانادا، بیش از ۲۰۰،۰۰۰ چاه به طور افقی برای گاز یا نفت شیل، عمدتاً در استان‌های غربی مورد شکافزنی قرار گرفته است. اکنون تخمین زده می‌شود که ۸۰ درصد از چاه‌های نفت و گاز جدید در کانادا تحت عملیات شکافزنی هیدرولیکی قرار گرفته‌اند.

- ایران و سایر کشورهای خاور میانه

در نگاه اول به نظر می‌رسد خاورمیانه منطقه‌ای است که از توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی در آمریکا و افزایش تولیدات نفت و گاز این کشور، از این فناوری صدمه دیده است، اما با افزایش تقاضای داخلی در کشورهای این منطقه، استفاده از این فناوری جهت بهبود عملکرد چاهها بطور چشمگیری رواج یافته است بطوریکه بسیاری از پیمانکاران اجرایی این عملیات تجهیزات تخصصی فراوانی را در کشورهای منطقه مستقر نموده‌اند. رواج گسترده این فناوری در منطقه خاورمیانه همچنین باعث گردیده است که کشورهای منطقه از جمله عربستان، عمان، امارات، کویت و ... بطور بسیار جدی و بمنظور تامین انرژی آینده خود به سمت سرمایه گذاری در اکتشاف و استخراج نفت و گاز شیل و توسعه میداین با صرفه اقتصادی پایینتر خود حرکت نمایند. در سال ۲۰۱۴، آرامکو عربستان کارگاهی را در مورد شکافت هیدرولیکی در مرکز تحقیقات آرامکو واقع در هیوستون برگزار کرد. در آن زمان، عربستان سعودی آرامکو در حال کاوش و مطالعه چندین منطقه در عربستان سعودی برای پتانسیل شکافت آنها بود. چهار سال بعد، در سال ۲۰۱۸، آرامکو کشف میداین نفت شیل خود را اعلام کرد.

در ایران، اولین بار در سال ۱۳۷۴ شرکت نفت فلات قاره در مخزن ایلام میدان الوند این فناوری را با روش اسیدی برای ۳ چاه به کار برد که در یکی از چاه‌ها عملیات با موفقیت انجام شده است ولی متأسفانه بیش از این اطلاعاتی در دسترس نیست.

همچنین اقدام به اجرای این فناوری در میدان سیری نیز بطور غیر رسمی گزارش گردیده است که متأسفانه از جزئیات آن اطلاعاتی در دسترس نمی‌باشد.

بعد از گذشت بیش از ۲۰ سال از انجام این عملیات در میدان الوند، در سال ۱۳۹۶ در میدان نفتی آذر که یکی از پرچالش‌ترین میدانهای ایران از نظر حفاری است، نیاز به عملیات شکافت هیدرولیکی مشاهده شد. این در حالی بود که سابقه اجرای موفق عملیات شکافت اسیدی در ابعاد میدانی در کشور وجود نداشت و این میدان نخستین میدانی بود که این عملیات در بعضی چاه‌های آن اجرایی شد. برای اجرای این عملیات، پنج حلقه چاه در نظر گرفته شده بود و قرار بود پس از اجرای عملیات در این پنج چاه، درباره تداوم این روند تصمیم‌گیری شود، اما پس از اجرای عملیات در سه حلقه چاه، به دلیل بروز برخی مشکلات در مدیریت بهینه چاه تصمیم بر این شد که در ادامه، اسیدزنی در حجم بالا جایگزین شود. نتایج تست های پس از عملیات نشان از افزایش قابل توجه میزان تولید و موفقیت عملیات شکافت اسیدی داشته است.

طبیعی است که برای اولین تجربه در مقیاسی که گفته شد، ضعف‌هایی هم وجود داشته باشد ولی می‌توان با استفاده از تجارب ارزشمندی که در عملیات شکافت اسیدی طرح آذر به دست آمده و با بهبود روش‌ها و عملکردها، این فرآیند را نه تنها در میدان آذر، بلکه در دیگر میدان‌های کربناته‌ای ایران که با خواص سنگ مخزن ضعیف روبه‌رو هستند اجرا نمود.

- چین

همانطور که قبلاً اشاره شد، اولین تجربه شکافت هیدرولیکی میدان نفتی یومن^۲ در چین در دهه ۱۹۵۰ اتفاق افتاده است. ولی به طور کلی، اکتشاف گاز شیل و توسعه آن در این کشور در سال ۲۰۰۵ آغاز شد. اکنون در چین، اکتشاف و توسعه گاز شیل به سمت بهره برداری در مقیاس بزرگ گاز شیل دریایی در حال پیشرفت است (Caineng et al., 2016).

با این حال اولین عملیات تولید تجاری گاز شیل چین در مقیاس بزرگ در مارس ۲۰۱۴ آغاز شد. چین اولین چاه گاز شیل افقی خود را در سال ۲۰۱۱ آغاز و تا سال ۲۰۱۴ تکمیل کرد. طی یک مطالعه جهانی گاز شیل توسط اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، مشخص شده که ذخایر گاز شیل چین که از نظر فنی قابل بازیافت

^۲ Yumen

هستند تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از ذخایر گاز شیل در ایالات متحده است. در حال حاضر چین در کنار ایالات متحده، کانادا و آرژانتین حجم کافی از گاز شیل و نفت شیل را برای عرضه به بازار استخراج می‌کند. شرکت ملی نفت چین به تنهایی ۴ میلیارد دلار در گاز شیل در حوزه سیچوان در دهه گذشته سرمایه گذاری کرده است.

- روسیه

نظریه شکست در ابتدا توسط S.A. Khristianovich و J.P. Zheltov نظریه پردازان روسی در پایان دهه ۱۹۶۰ توسعه یافت. دانشمندان روسی به طور نظری انتشار شکستگی عمودی را به عنوان یک مدل ریاضی توصیف کرده اند.

هنگامی که شرکت‌های خدمات غربی برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ در روسیه شروع به کار کردند، هدف اصلی عملیات شکافت هیدرولیکی جلوگیری از آسیب‌های نزدیک چاه بود.

نتایج اولین روش‌های بهبود پایین‌تر از حد انتظار بود و توسعه فناوری بیشتر را برای سال‌ها به تعویق انداخت. اما در نهایت در سال ۲۰۰۴ فناوری‌ای که همراه با حفاری چاه افقی بیشترین تأثیر را بر افزایش تولید داشت، شکافت هیدرولیکی است که با موفقیت هم برای چاه‌های قدیمی و هم برای چاه‌های تازه حفر شده اجرا شده است (Igor Kuvshinov, et al., 2008). استفاده از این فناوری در این کشور بطور گسترده‌ای رواج یافته است بطوریکه شرکت‌های روسی در توسعه و ساخت تجهیزات مختلف و متدولوژی‌های اجرا مستقل گشته و در حال صادر کردن فناوری‌های خود به دیگر نقاط جهان می‌باشند.

- اروپا

اوکراین سابقه طولانی در شکافت هیدرولیکی دارد، زیرا از دهه ۱۹۵۰ در آنجا مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین اخیراً علاقه شدیدی به صنعت شکستگی هیدرولیکی در اوکراین وجود داشته است. طبق گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، اوکراین سومین ذخایر بزرگ گاز شیل در اروپا را دارد و از سال ۲۰۱۱، تقریباً ۲۲ شرکت داخلی و خارجی در بخش شکافت هیدرولیکی در اوکراین مشغول به کار هستند.

اگرچه شکافت هیدرولیکی در بریتانیا از اواخر دهه ۱۹۷۰ در میادین نفت و گاز دریای شمال رایج بوده است و از اوایل دهه ۱۹۸۰ در حدود ۲۰۰ چاه نفت و گاز خشکی در این منطقه استفاده شده است ولی این تکنیک، توجه عمومی را در بریتانیا به خود جلب نکرد تا زمانی که استفاده از آن برای چاه‌های گاز شیل خشکی در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد شد. از ژانویه ۲۰۱۴، تنها کار شکافت هیدرولیکی که برای گاز شیل در بریتانیا انجام شده است توسط Cuadrilla Resources انجام شده است. این روند به طور غیررسمی برای تقریباً یک سال در بریتانیا از ژوئن ۲۰۱۱ پس از بروز نگرانی‌های ایمنی ناشی از وقوع دو زمین لرزه کوچک به حالت تعلیق درآمد، اما گزارش کارشناسی در آوریل ۲۰۱۲ به این نتیجه رسید که این عمل می‌تواند تحت نظارت دقیق‌تر ادامه یابد. در سال ۲۰۱۸، لندن برنامه‌ای را برای تسریع پیشرفت‌های شکافت اعلام کرد. بر اساس یک مطالعه، بیش از ۶۰۰۰ حلقه چاه هیدرولیک برای کاهش واردات گاز از بریتانیا به نصف نیاز است.

در هلند از سال ۱۹۵۴، ۲۴۲ حلقه چاه تحت عملیات شکافت هیدرولیکی قرار گرفته‌اند. این کشور در سال ۲۰۱۵ یک دوره پنج ساله استراحت برای حفاری گاز شیل قرار داد و از تمدید مجوزهای اکتشاف گاز شیل از آن نقطه به بعد خودداری کرد و این قانون را تا سال ۲۰۲۰ منقضی کرد.

ایرلند از کشورهای عضو اتحادیه اروپا، فرانسه، آلمان و بلغارستان در ممنوعیت شکافت پیروی کرده است. فرانسه اولین کشور اروپایی بود که در سال ۲۰۱۱ این ممنوعیت را اعمال کرد. بلغارستان تنها یک سال بعد از فرانسه پیروی کرد و در سال ۲۰۱۲ شکافت را ممنوع کرد. قانون ضد شکستگی که روش استخراج را ممنوع می‌کرد در سال ۲۰۱۶ به کتاب قانون آلمان راه یافت. با این حال، در آلمان، این قانون کمتر رادیکال است و فقط استفاده از آب، ماسه و مواد شیمیایی در استخراج ممنوع است.

در حال حاضر کلمبیا و مکزیک در حال تلاش برای استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی هستند. لهستان عملیات شکافنی هیدرولیکی را آغاز کرده است، اما هنوز اطلاعات جزئی در مورد عملیات‌ها در این کشور منتشر نشده است (Lorenzo Cremonese, et al., 2015).



شکافت هیدرولیکی یک فناوری جدید در هند است و اجرای این عملیات در میادین نفت و گاز این کشور بطور گسترده ای رواج یافته است. حضور پیمانکارهای بزرگ بین المللی در این کشور جهت اجرا و انتقال دانش فنی- اجرایی این فناوری بطور مستمر در حال افزایش است.

۴- داده های آماری فناوری شکافت هیدرولیکی

۴-۱- کلیات آماری

بر اساس آمارهای بین المللی منتشر شده، شروع صنعت شکافت هیدرولیکی، صنعت نفت و گاز را متحول کرده است. هم اکنون، شکافت هیدرولیکی یکی از موثرترین روش های افزایش تولید در میادین متعارف و غیر متعارف است. برای درک بهتر تأثیر این فرایند، نیاز است که فواید و مضرات این روش از نگاه آماری مورد بررسی قرار بگیرد. طبق گزارشات از زمانی که شکافت هیدرولیکی در ایالات متحده در اواخر دهه ۱۹۴۰ شروع شد، تا سال ۲۰۲۱ حدود ۱,۷ میلیون چاه توسط این روش به بهره برداری رسیده اند که نشان دهنده توجه ویژه به این فناوری در فرایند تولید و ازدیاد برداشت نفت و گاز می باشد. بر اساس آمار تولید شکافت هیدرولیکی، این عدد می تواند تا ۶۰۰ تریلیون فوت مکعب گاز طبیعی و همچنین بیش از هفت میلیارد بشکه نفت تولید کند.

آمارهای شکافت هیدرولیکی نشان می دهد که تولید نفت خام آمریکا طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ تقریباً سه برابر شده است. این امر باعث شده که این کشور را از یک کشور وارد کننده نفت خام به یک کشور صادر کننده تبدیل شده و بالطبع معادلات سیاسی-اقتصادی کل جهان تحت الشعاع قرار گرفته است. بنابراین با تمام مشکلاتی که در جلوی راه این صنعت قرار دارد، این صنعت سهم زیادی در رشد اقتصادی-اجتماعی کشورهایی که از آن استفاده می کنند به خود اختصاص داده است.

بعلت مزایای قابل توجه و مقیاس بازار حاصله، طبق اطلاعات در دسترس کشورهای زیادی به استفاده از این عملیات سوق پیدا کرده اند که در زیر تعدادی از آن ها لیست شده است (جدول ۴-۱).

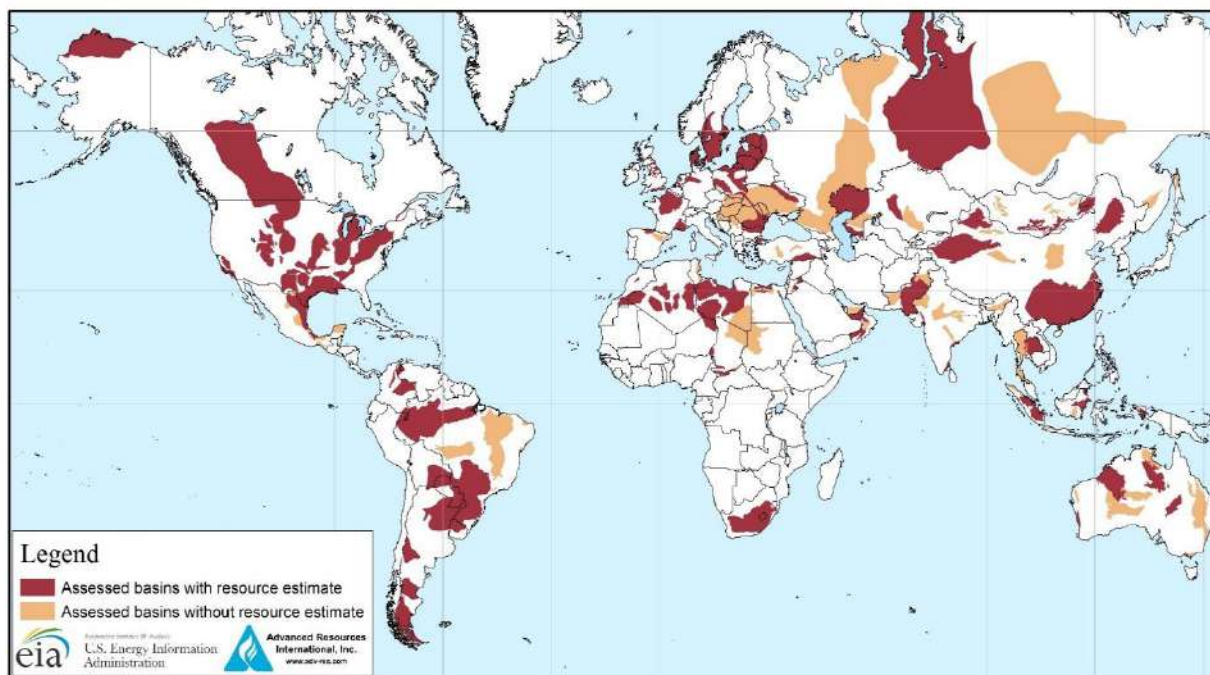
جدول ۴-۱- لیست تعدادی از کشورهای اجرا کننده عملیات شکافت هیدرولیکی

ردیف	کشور	ردیف	کشور	ردیف	کشور
۱	ایالات متحده آمریکا	۶	فرانسه	۱۱	اوکراین
۲	کانادا	۷	ایرلند	۱۲	رومانی
۳	روسیه	۸	آلمان	۱۳	آفریقای جنوبی
۴	چین	۹	نیوزیلند	۱۴	عربستان
۵	استرالیا	۱۰	هلند	۱۵	هند

بیشترین آماری که از این عملیات در دسترس است مربوط به تولید از نفت-شیل ها (Shale oil) و گاز-شیل-ها (Tight gas) می باشد. این امر به این علت است که استفاده از این منابع عظیم تا سالیان زیادی عملاً غیرممکن بوده و صنعت شکافت هیدرولیکی باعث شد که تولید از این منابع عظیم هیدروکربوری نیز اقتصادی شود. بنابراین بیشترین آمار و گزارشات بین المللی موجود مربوط به استفاده از شکافت هیدرولیکی در ذخائر هیدروکربنی شیل و گاز می باشد در حالیکه استفاده از این فناوری در مخازن متعارف از روش های متداول تحریک و بهبود بهره وری چاه های نفت و گاز در اکثر کشورهای جهان می باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده در ادامه این گزارش آمار ارائه شده بیشتر برگرفته از منابع موجود می باشد.

۴-۲- آمار ذخائر نفت و گاز شیل جهان

شکل ۴-۱ به بررسی توزیع منابع هیدروکربوری شیل که مستقیماً معرف استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی می باشد می پردازد.



شکل ۴-۱- نقشه توزیع حوضه های هیدروکربنی در دسترس نفت و گاز شیلی (www.eia.gov)

نقشه نشان داده شده در شکل ۴-۱، بر اساس آمار معرفی شده در سال های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ می باشد. بر اساس این نقشه در کشورهای زیادی منابع هیدروکربنی شیل نسبتاً بالایی وجود دارد که می توان با استفاده از عملیات شکافت هیدرولیکی به بهره برداری برسند. از مهم ترین کشورهایی که هم دارای منابع زیادی بوده و هم در حال فعالیت جدی در این زمینه هستند می توان به کشورهای امریکا، کانادا، روسیه و چین اشاره کرد. در جدول ۴-۲ لیستی از حجم قابل برداشت ذخایر گاز شیل در کشورهای مختلف ارائه شده است. طبق این جدول کشور چین با ذخیره ۱۰،۱۱۵ تریلیون فوت مکعب، بیشترین حجم را به خود اختصاص داده است. ناگفته نماند که بیشترین فعالیت های مربوط به عملیات شکافت هیدرولیکی در آمریکا به عنوان پیشتاز در این صنعت در حال انجام می باشد.

جدول ۴-۲- منابع ارزیابی شده گاز شیل در جهان در سال ۲۰۱۳ (www.eia.gov)

Estimated recoverable resources (trillion cubic feet)	
Country	Reserves
World	۷,۵۷۷
China	۱,۱۱۵
Argentina	۸۰۲
Algeria	۷۰۷
United States	۶۶۵
Canada	۵۷۳
Mexico	۵۴۵
Australia	۴۳۰
South Africa	۳۹۰
Russia	۲۸۵

بر طبق آمار ارائه شده موارد زیر قابل تامل می باشد:

- ذخائر گاز شیل قابل استحصال جهان تا سال (تا سال ۲۰۱۴) ۵۰٪ کل ذخائر متعارف گاز جهان می باشد.
- ذخائر گاز شیل کشور چین حدود ۱۲ برابر ذخائر متعارف این کشور است.
- ذخائر گاز شیل اروپا حدود ۳,۵ برابر ذخائر متعارف این قاره است.
- ذخائر گاز شیل آمریکای شمالی حدود ۵,۶ برابر ذخائر متعارف این منطقه است.

حجم منابع نفت شیل به حد برش^۱ مورد استفاده بستگی دارد (World Energy Resources, 2016). برآوردی که در سال ۲۰۰۸ انجام شد (Dyni, 2010)، کل منابع جهانی نفت شیل را ۶۸۹ گیگاتن تعیین کرد که حدود ۴,۸ تریلیون بشکه (۷۶۰ میلیارد متر مکعب) نفت شیل است. بزرگترین ذخایر در ایالات متحده قرار دارند به صورتی که تصور می شود این مقدار برابر با ۳,۷ تریلیون بشکه باشد (۵۹۰ میلیارد متر مکعب) که تنها بخش کوچکی از آن قابل استحصال است (Dyni, 2010). بر اساس چشم انداز جهانی انرژی در سال ۲۰۱۰ توسط آژانس بین المللی انرژی، منابع شیل نفت جهان ممکن است معادل بیش از ۵ تریلیون بشکه (۷۹۰ میلیارد متر مکعب) باشد که نفت در جای آن بیش از ۱ تریلیون بشکه (۱۶۰ میلیارد متر مکعب) است هرچند این مقادیر ممکن است از نظر فنی قابل بازیابی نباشند (World Energy Outlook, 2010).

برآورد شورای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۶، کل منابع جهانی نفت شیل را معادل ۶,۰۵ تریلیون بشکه (۹۶۲ میلیارد متر مکعب) تعیین کرد (World Energy Resources, 2016). برای مقایسه، در همان زمان، ذخایر اثبات شده قابل استحصال نفت جهان ۱,۷ تریلیون بشکه (۲۶۹,۹۰ میلیارد متر مکعب) تخمین زده می شود (World Energy Resources, 2016).

در جدول ۳-۴ لیست کشورها به تفکیک مناطق شیل نفتی و حجم ذخایر شیل-نفت آورده شده است (Dyni, 2006, 2010).

^۲ Cut off

جدول ۴-۳- حجم ذخایر نفت شیل کشورهای مختلف (Dyni, 2010)

Region	In-place shale oil resources (million barrels)
Africa	159,243
Democratic Republic of the Congo	100,000
Morocco	53,381
Asia	613,145
China	354,430
Pakistan	91,000
Russia	167,715
Europe	368,156
Russia	247,883
Italy	73,000
Estonia	16,286
Middle East	38,172
Jordan	34,172
North America	3,722,066
United States	3,706,228
Canada	15,241
Oceania	31,748
Australia	31,729
South America	82,421
Brazil	82,000
World total	4,786,131

تخمین ذخائر قابل استحصال از حجم نفت شیل ذکر شده در بالا برآحتی امکان پذیر نیست. از آنجائیکه اقتصادی بودن و به تبع آن قابل استحصال بودن این ذخائر رابطه مستقیمی با قیمت جهانی نفت دارد، لذا تخمین ذخائر اثبات شده قابل استحصال در منابع و در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت ارائه گردیده است. جدول زیر که بر طبق آخرین بروزرسانی EIA ارائه گردیده است مجموع ذخائر اثبات شده شیل نفت جهان تا انتهای سال ۲۰۱۴ را حدود ۳۴۰ میلیارد بشکه تخمین می‌زند. بر طبق این آمار ذخائر نفت شیل قابل استحصال جهان تا سال ۲۰۱۴، ۱۷٪ کل ذخائر متعارف نفت جهان می‌باشد.

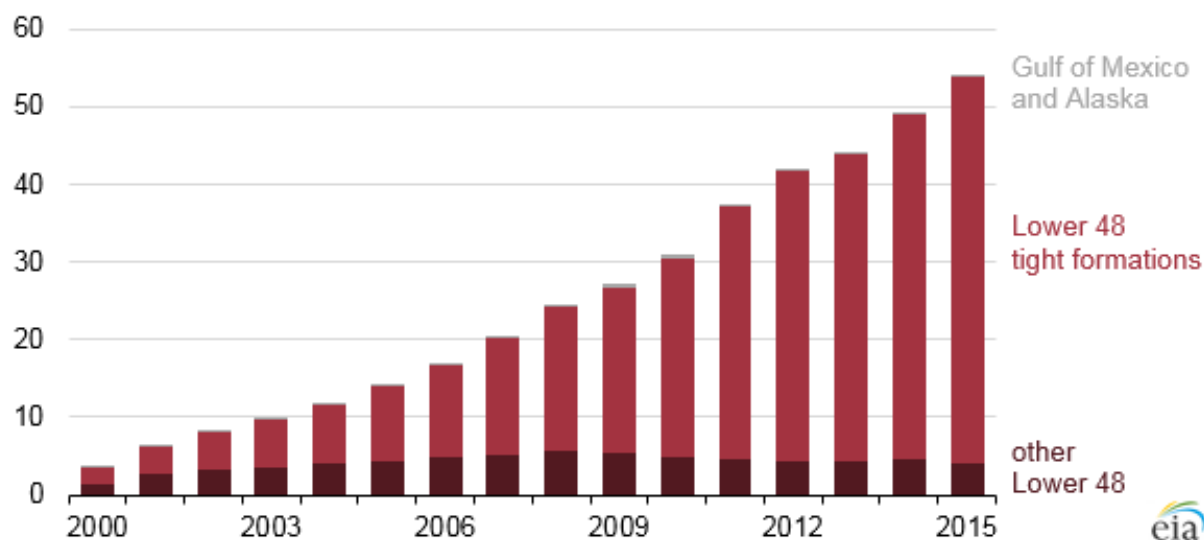
قابل ذکر است که یکی از اکتشافات مهم بعد از این گزارش در کشور بحرین در منطقه خاورمیانه به مقدار ۸۰ میلیارد بشکه نفت شیل قابل استحصال بوده است که بدین ترتیب حجم مجموع نفت شیل جهانی را تا رقم ۴۲۰ میلیارد بشکه افزایش می‌دهد.

Total World	۶,۸۶۷	۳۴۰.۶
-------------	-------	-------

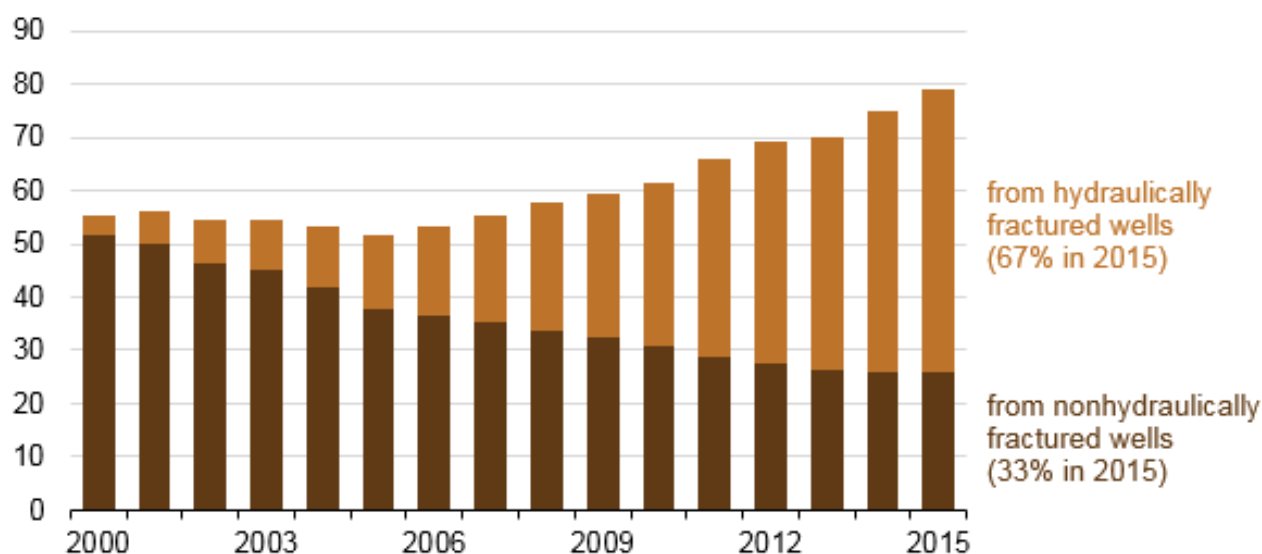
۴-۳- آمار مربوط به کشور آمریکا

کشور آمریکا یکی از بزرگترین تولیدکنندگان نفت و گاز به وسیله فناوری شکافت هیدرولیکی است. بر طبق گزارش مدیریت اطلاعات انرژی ایالات متحده^۲ در سال ۲۰۰۰ تقریباً ۲۶,۰۰۰ حلقه چاه گازی با فناوری شکافت هیدرولیکی به تولید رسیده است که ۳,۶ میلیارد فوت مکعب (حدود ۱۰۲ میلیون متر مکعب) در روز که کمتر از ۷٪ تولید کلی بوده است، از این چاه‌ها تولید می‌شده است. تا سال ۲۰۱۵ تعداد چاه‌هایی که با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی توسعه یافته‌اند به ۳۰۰,۰۰۰ حلقه چاه رسیده است و تولید از این چاه‌ها به بیش از ۵۳ میلیارد فوت مکعب (۱,۵ میلیارد متر مکعب) در روز رسیده که ۶۷٪ از کل گاز تولیدی ایالات متحده را تشکیل می‌دهد. ایالت‌های تگزاس و پنسیلوانیا دارای بیشترین تولید مقدار گاز طبیعی خشک می‌باشند و همچنین سهم زیادی از تولید آمریکا را به خود اختصاص داده‌اند. هر کدام از این ایالت‌های نامبرده بیش از ۷ میلیون فوت مکعب تولید گاز طبیعی خشک دارا می‌باشند. شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ تولید گاز بر حسب میلیارد فوت مکعب در روز را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ در ایالت‌های ۴۸ گانه نشان داده است. این نمودارها نشان می‌دهند که با توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی در این بازه ۱۵ ساله میزان گاز تولیدی با این فرآیند ۱۴ برابر شده است. همچنین نمودارها نشان‌دهنده افزایش تدریجی چاه‌های شکافته شده در طی این سالها می‌باشد بطوریکه در سال ۲۰۱۵ ۶۷٪ کل چاه‌های گازی با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی تکمیل شده‌اند. میزان تولید گاز آمریکا برای سال ۲۰۲۱ به رقم ۷۵ میلیارد فوت مکعب در روز رسیده است (شکل ۴-۴).

^۲ Energy Information Administration



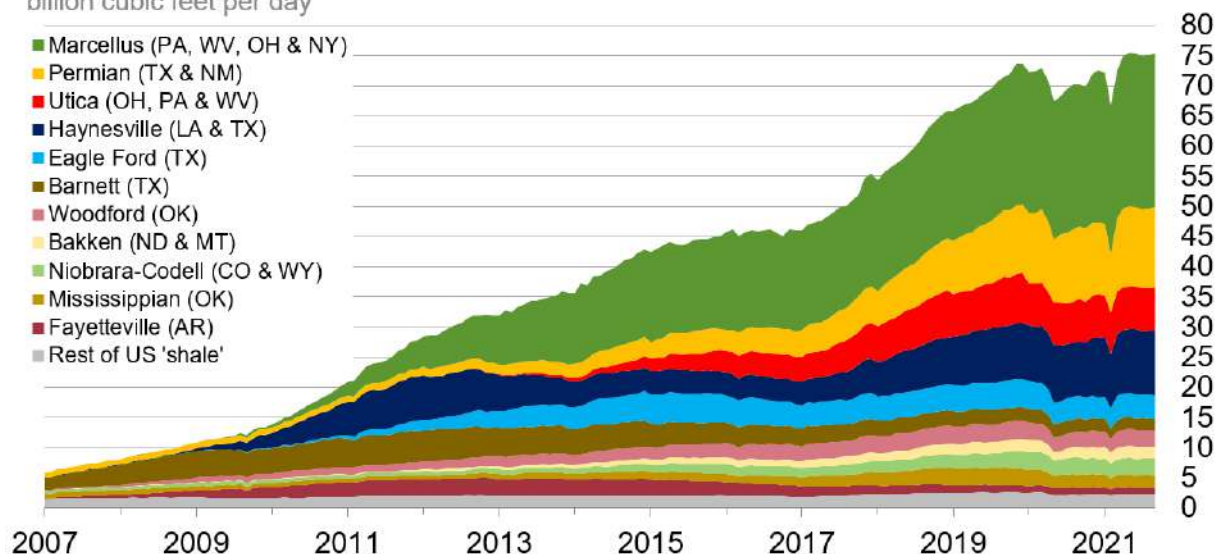
شکل ۴-۲- تولید گاز طبیعی ایالات متحده از چاه‌های توسعه یافته با فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیارد فوت مکعب بر روز



شکل ۴-۳- گاز طبیعی تولید شده از چاه‌ها با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون فوت مکعب بر روز

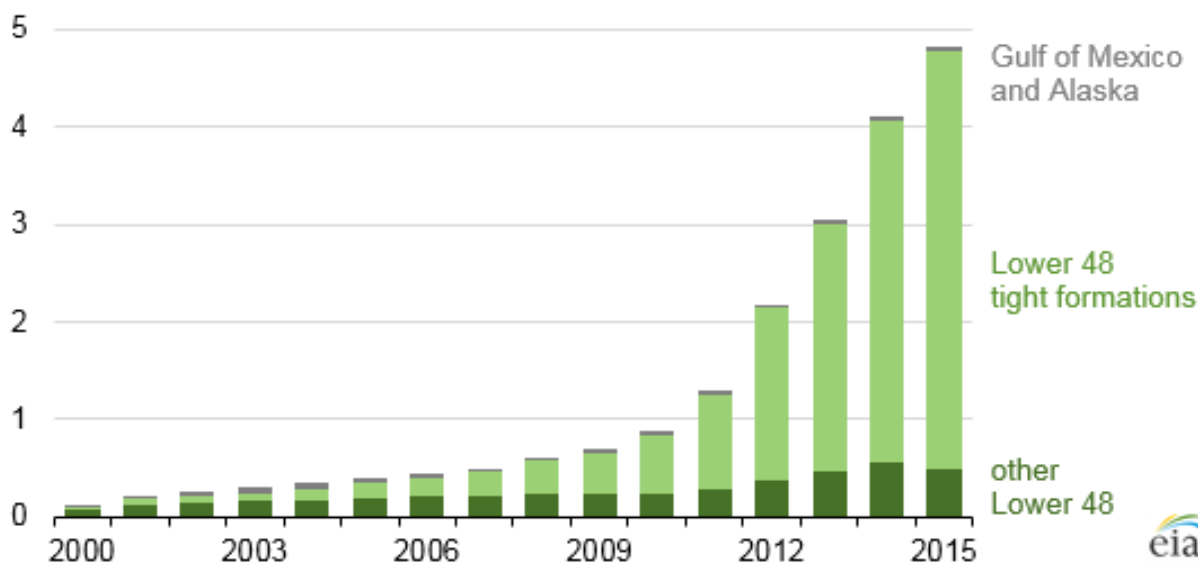
Monthly dry shale gas production

billion cubic feet per day

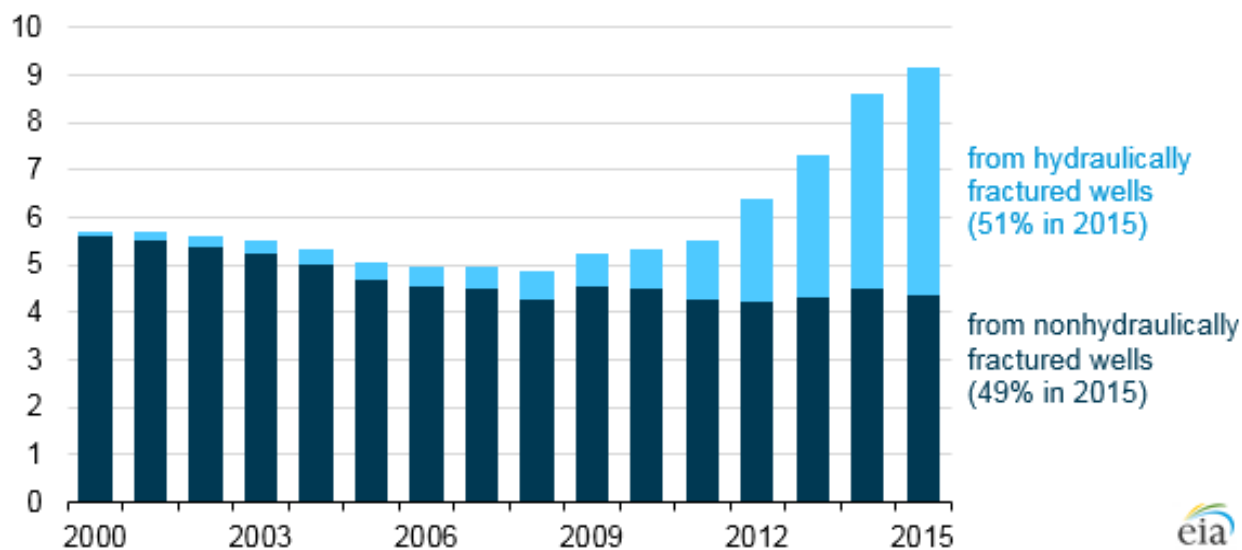


شکل ۴-۴- تولید گاز شیل ایالات متحده به تفکیک میدین گازی بر حسب میلیارد فوت مکعب در روز

همانگونه که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود میزان تولید نفت در سال ۲۰۱۰ با پیشرفت این فناوری و همچنین شروع برداشت از مخازن نامتعارف، سرعت بسیار بیشتری گرفته و با شیب بیشتری حجم زیادی از تولید نفت آمریکا را به خود اختصاص داده است. بر طبق گزارش مدیریت اطلاعات انرژی ایالات متحده، در سال ۲۰۰۰ از ۲۳,۰۰۰ حلقه چاهی که با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی توسعه یافته‌اند ۱۰۰ هزار بشکه نفت در روز تولید داشته‌اند که کمتر از ۲٪ از نفت تولیدی آمریکا را تشکیل می‌داده است. این رقم تا سال ۲۰۱۵ به ۳۰۰,۰۰۰ حلقه چاه رسیده است که تولید از این چاه‌ها به ۴,۳ میلیون بشکه در روز برای سال ۲۰۱۵ رسیده است که ۵۰٪ از نفت تولیدی ایالات متحده را تشکیل می‌داده است (شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶).



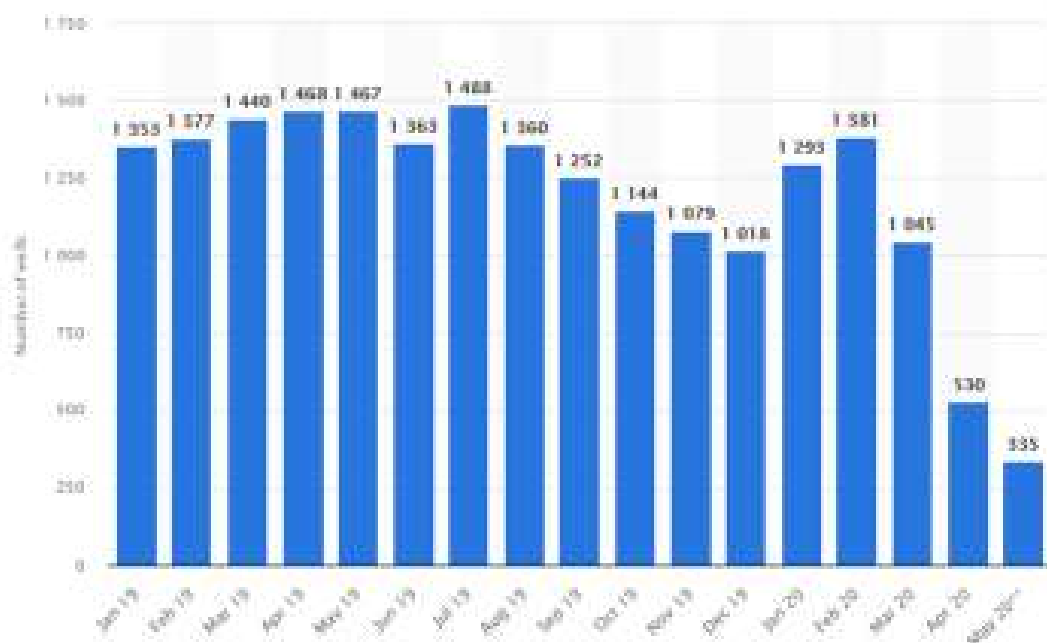
شکل ۴-۵- تولید نفت ایالات متحده با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز



شکل ۴-۶- نفت تولید شده از چاههایی که با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون

بشکه در روز

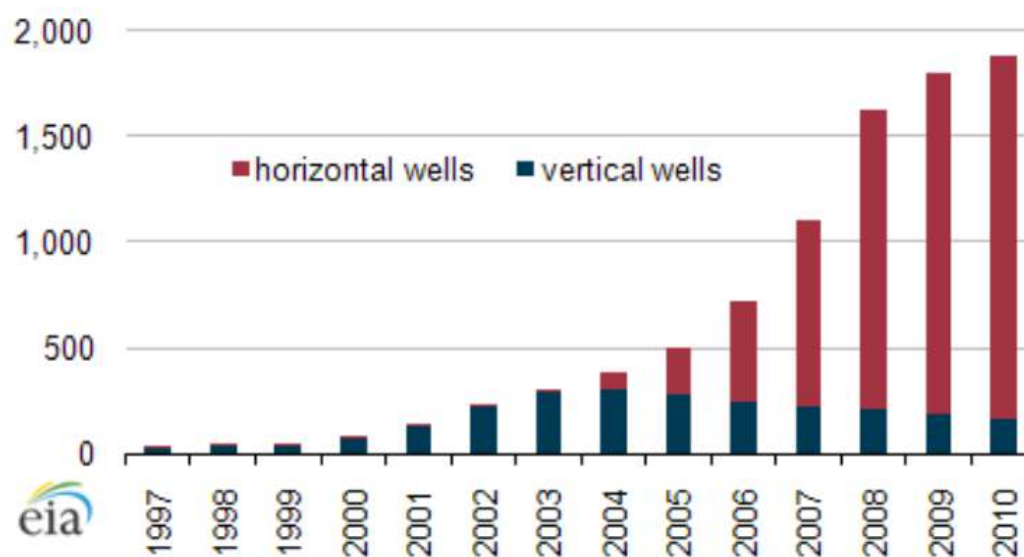
جزئیات آمار مربوط به عملیات شکاف هیدرولیکی به تفکیک ماه از ژانویه ۲۰۱۹ تا ماه می ۲۰۲۰ به تفکیک در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. تا پیش از شیوع پاندمی در آمریکا به طور میانگین حدوداً ۱۴۰۰ عملیات شکافت هیدرولیکی در آمریکا در هر ماه انجام گرفته است. تعداد کل عملیات انجام گرفته برای یک سال از ژانویه ۲۰۱۹ تا دسامبر ۲۰۱۹، ۱۵,۸۰۰ عملیات بوده است که به طور میانگین ۴۳ عملیات شکافت هیدرولیکی در هر روز انجام گرفته است.



شکل ۴-۷- تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته در کشور آمریکا در سال ۲۰۱۹ به تفکیک ماه

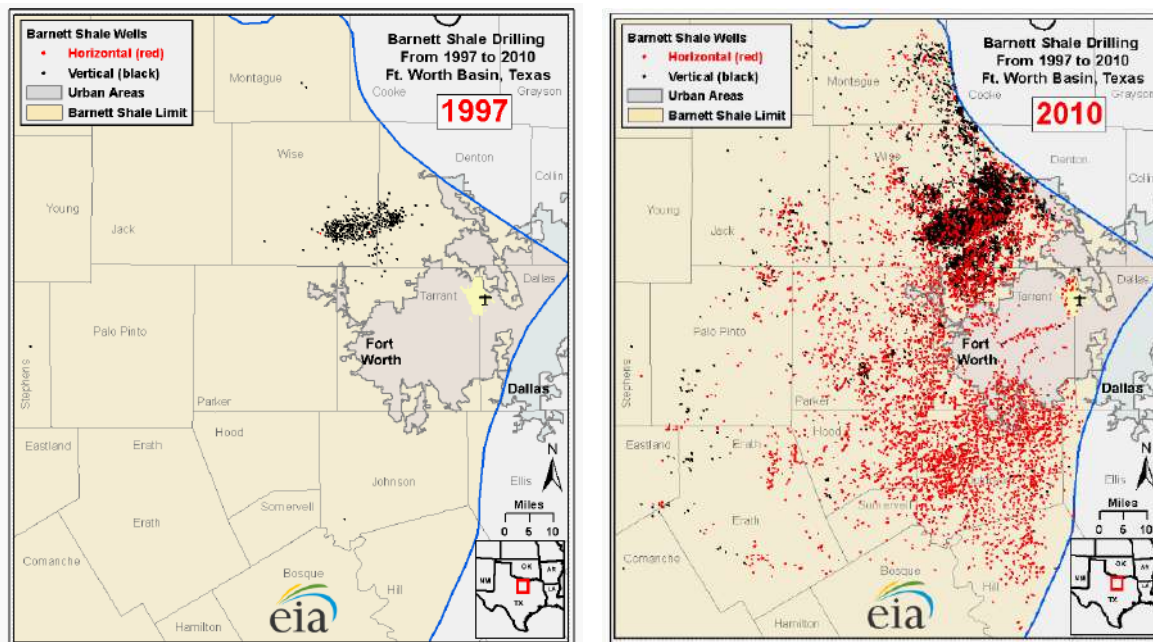
با توجه به اینکه گسترش فناوری شکافت هیدرولیکی با گسترش حفاری‌های افقی عجین بوده است تعداد و گسترش چاه‌های افقی در مقایسه با چاه‌های عمودی در ایالت تگزاس به عنوان بزرگترین ایالت تولید کننده در آمریکا در شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ نشان داده شده است. افزایش تعداد چاه‌های افقی از سال ۲۰۰۰ شروع شده

و با سرعت زیادی رو به رشد بوده به صورتی که در سال ۲۰۱۰ بیش از ۹۰ درصد چاه‌های حفاری شده مربوط به چاه‌های افقی و به هدف عملیات شکافت هیدرولیکی بوده است.



Source: U.S. Energy Information Administration based on HPDI, LLC

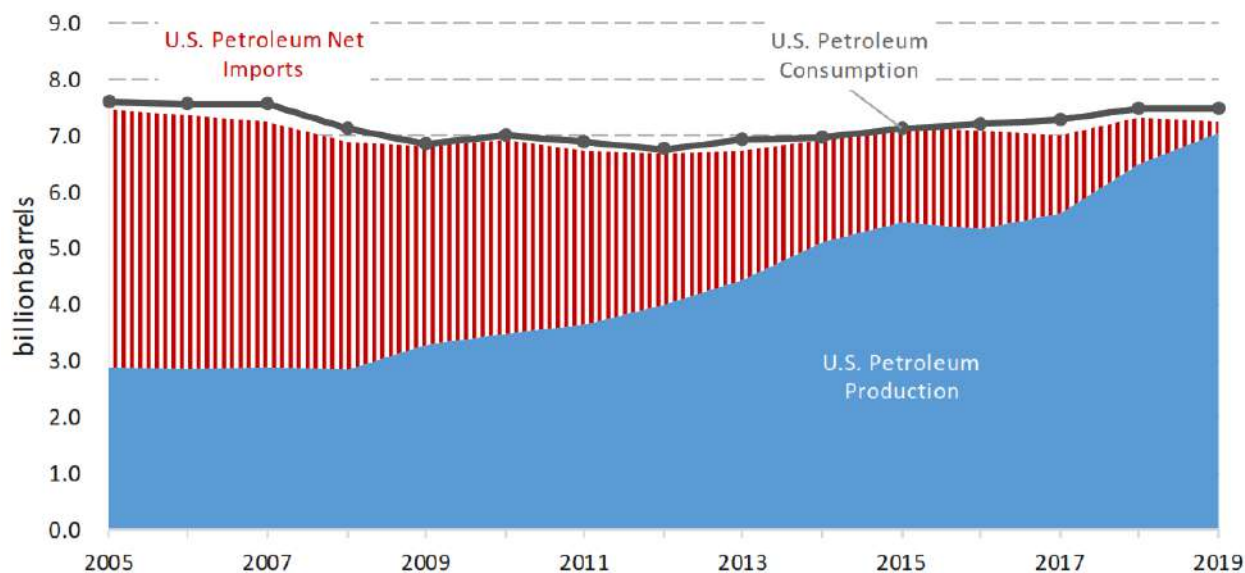
شکل ۴-۸- تعداد چاه‌های عمودی و افقی ایالت تگزاس در طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰



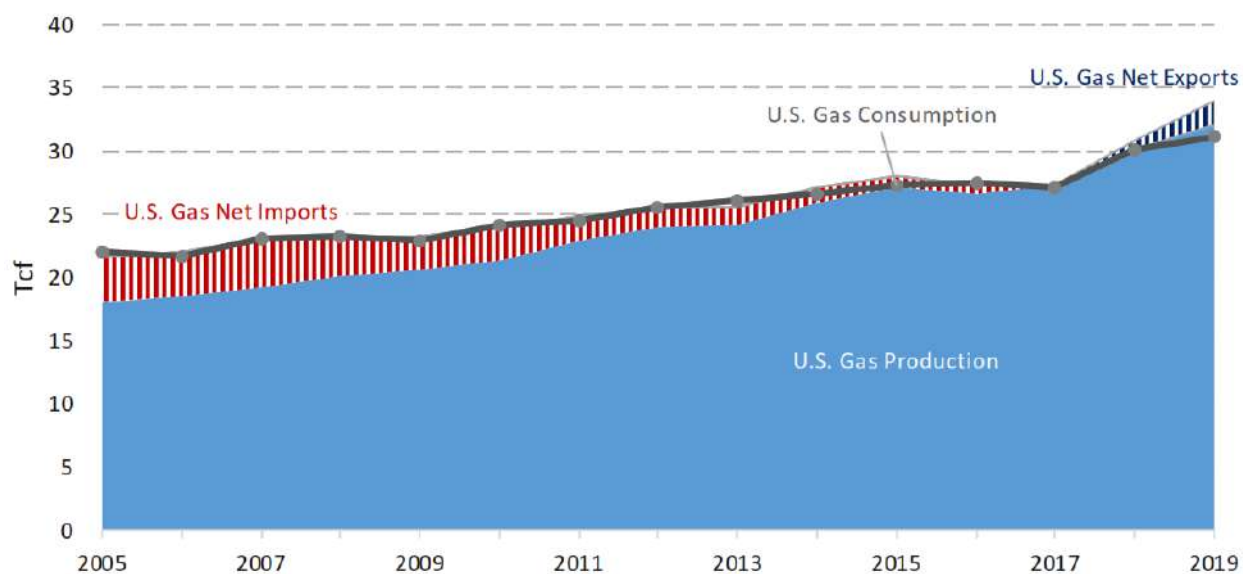
شکل ۴-۹- مقایسه تعداد چاه‌های عمودی و افقی در ایالت تگزاس. نقاط سیاه چاه‌های عمودی و نقاط قرمز چاه‌های افقی

با توجه به داده‌های منتشر شده، نیاز مصرف داخلی کشور آمریکا حدود ۷,۵ میلیون بشکه در روز می‌باشد که در سال ۲۰۰۵ تنها حدود ۳ میلیون بشکه در روز بصورت تولید داخلی و مابقی بصورت واردات بوده است. این در حالیست که در سال ۲۰۱۹ در کمتر از ۱۵ سال و به لطف ذخائر شیل و توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی نیاز این کشور به واردات از بین رفته (شکل ۴-۱۰) و با توجه به داده‌های منتشر شده در سال‌های اخیر، این کشور از ۱۱ میلیون بشکه در روز نیز فراتر رفته است. با ادامه این روند پیش بینی‌ها حاکی از این است که صادرات نفت آمریکا تا سال ۲۰۲۴ به ۹ میلیون بشکه در روز برسد و با شکستن رکورد صادرات عربستان سعودی، آمریکا به بزرگترین صادر کننده نفت دنیا تبدیل شود. همچنین از نقطه نظر تولید گاز، کشور آمریکا با یک روند نسبتاً ثابت از حدود ۲۲ میلیارد فوت مکعب در سال ۲۰۰۵ به حدود ۳۱ میلیارد فوت مکعب رسیده است (شکل ۴-۱۱). این درحالی است که در سال ۲۰۰۵ حدود ۵ میلیارد فوت مکعب واردات گاز داشته

که این مقدار در بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ به صفر رسیده و در ادامه کشور آمریکا از سال ۲۰۱۷ به بعد به یک کشور صادر کننده گاز تبدیل شد (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۱۰- میزان تولید، نیاز کشور و واردات نفت در کشور آمریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹



شکل ۴-۱۱- میزان تولید، نیاز کشور و واردات گاز در کشور آمریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹

۴-۴- آمار مربوط به کشور روسیه

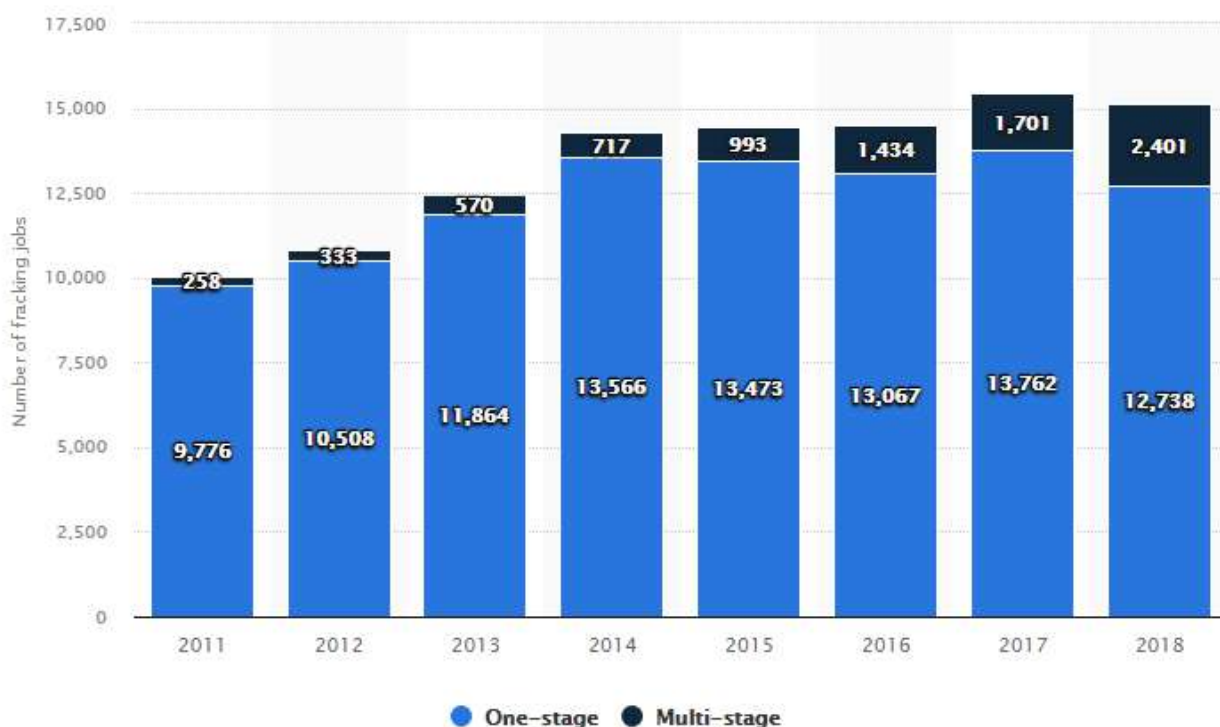
در حال حاضر، تجهیزات شکافت هیدرولیکی حیاتی‌ترین فناوری برای حفظ تولید نفت روسیه و کشورهای همسایه آن مانند اوکراین، قزاقستان، ازبکستان، تاجیکستان، آذربایجان و غیره است. این موضوع می‌تواند به حفظ تولید در میادین موجود و رشد تولید در ذخایر نفتی غیر متعارف احتمالی کمک کند. در شرایط فعلی، ساخت داخلی تجهیزات شکافت هیدرولیکی و آموزش پرسنل به یک اولویت فناوری برای شرکت‌های نفتی روسی تبدیل شده است.

آمار عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته در چاه‌ها عمدتاً در دو دسته عملیات تک مرحله‌ای و عملیات‌های چند مرحله‌ای گزارش شده است. بخش عمده اطلاعات این بخش از RPI^{۲۳} که در وبسایت مجله فناوری نفت و گاز روسی^{۲۴} آورده شده، جمع‌آوری شده است.

تعداد عملیات تک مرحله‌ای گزارش شده در سال ۲۰۱۸، برابر ۱۲،۷۳۸ مورد و برای عملیات چند مرحله‌ای برابر ۲،۴۰۱ مورد بوده است (شکل ۴-). در این منبع اطلاعاتی، روند افزایشی آمار سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ نشان داده شده بطوریکه تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی بطور قابل ملاحظه‌ای از حدود ۱۰،۰۰۰ تا ۱۵،۰۰۰ مورد افزایش یافته است. همچنین آمار ارائه شده نشانگر افزایش نسبت عملیات چند مرحله‌ای به تک مرحله است که حاکی از پیشرفت و توسعه فناوری شرکت‌های روسی در سال‌های مذکور است.

^۲ Leading research and consulting firm specializing in the energy industry of Russia, the Caspian region, Eastern and Central Europe.

^۲ Rogtecmagazine



شکل ۴-۱۲- تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ در روسیه (<https://www.statista.com/>)

۴-۱-۴- عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای

الف) سیر تحول فناوری در بازه‌های مختلف زمانی و مناطق عملیاتی

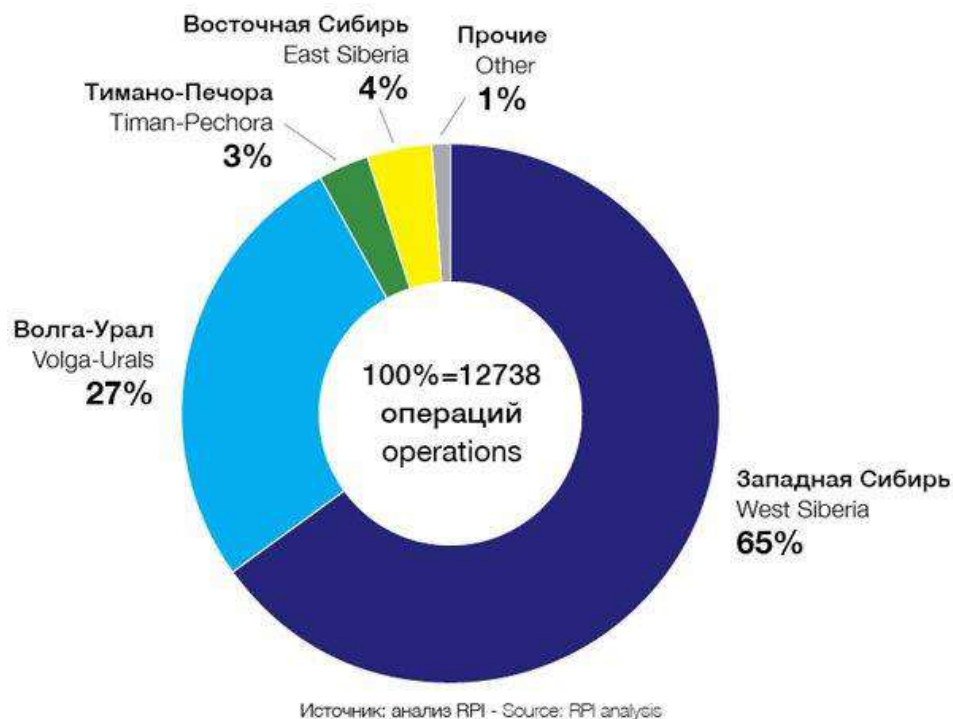
رویداد مهمی در صنعت نفت و گاز روسیه در سال ۲۰۱۸ رخ داده است. شاخص چاه‌های افقی که از نظر فناوری پیچیده‌تر هستند به رشد خود ادامه داده نزدیک به ۲۱ درصد افزایش یافته‌اند. گزارش‌های موجود حاکی از افزایش این تعداد از ۲,۹۷۴ چاه در سال ۲۰۱۷ به ۳,۵۸۷ چاه در سال ۲۰۱۸ است. بازار شکافت هیدرولیکی با پیروی از همان الگوی سال‌های قبل‌تر در حال توسعه بوده است. تعداد عملیات کم هزینه‌تر شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای نسبت به سال قبل ۷,۵٪ کاهش یافته است، در حالی که تعداد عملیات پر هزینه‌تر چند مرحله‌ای شکافت هیدرولیکی به ۴۱٪ افزایش یافته است. روند جایگزینی فناوری‌های کم‌هزینه و کم

کارآمد با فناوری‌های پرهزینه‌تر و کارآمدتر ممکن است به یک روند بلند مدت در بازار شرکت‌های نفتی روسیه تبدیل شود. یکی از دلایل اصلی تقاضا برای شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در چاه‌های توسعه‌ای جدید این است که تعداد زیادی از آنها در مخازن نفتی جدید حفاری می‌شوند که در آن روش‌های سنتی بازیافت نفت به دلیل نرخ جریان پایین نفت غیراقتصادی هستند. بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ یک استثنا از این قاعده وجود داشت، زیرا به دلیل کاهش سرمایه‌گذاری در صنعت نفت و گاز که ناشی از بحران اقتصادی و فروپاشی بازار جهانی نفت بود، تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای کاهش یافت.

بین سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۶، تقاضای منطقه‌ای برای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای چاه‌های جدید به طور کلی با الگوی چاه‌های جدید راه‌اندازی شده در سراسر مناطق کشور مطابقت داشته است.

بیشترین تعداد عملیات در سیبری غربی انجام شده است تقاضای بالای عملیات در سیبری غربی نتیجه این است که شرکت‌های نفتی باید از مخازن هیدروکربنی تخلیه شده با نفوذپذیری کمتر تولید کنند. این منطقه حفاری‌های جدید گسترده‌ای دارد تا به حفظ سطح تولید کمک کند. در خارج از سیبری غربی، سهم قابل توجهی از بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در منطقه نفت و گاز ولگا-اورال است، با این حال، در مقایسه با سیبری غربی، عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در این منطقه کمتر رایج است.

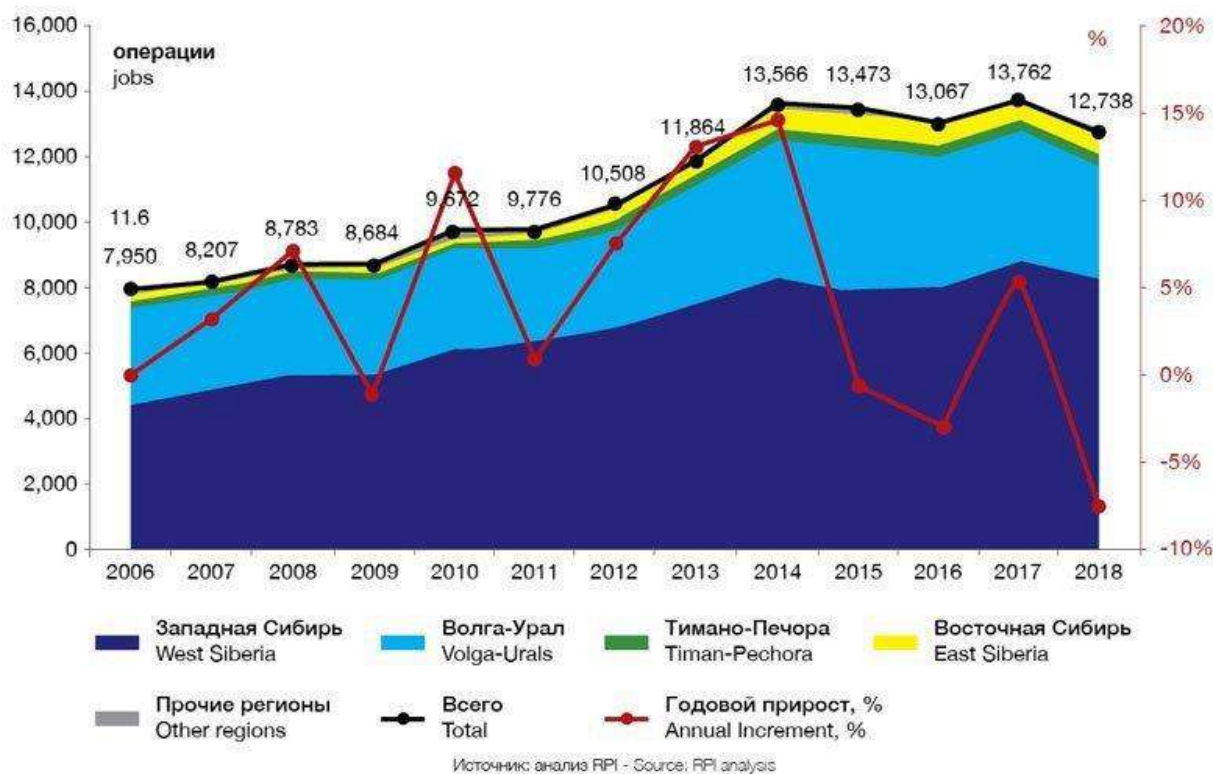
تقاضای منطقه‌ای برای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای منعکس کننده الگوی ذخایر نفتی در روسیه است. حداکثر تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در سیبری غربی (۶۵٪) و ولگا-اورال (۲۷٪) است (شکل ۴-۱۳). این مناطق دارای بزرگترین و قدیمی ترین ذخایر چاه‌های تولیدی هستند و حداکثر حفاری چاه‌های جدید در اینجا انجام می‌شود.



شکل ۴-۱۳- سهم مناطق مختلف در تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای در روسیه در سال ۲۰۱۸ به درصد

در شکل ۴-۱۴ نمودار تغییرات تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای به تفکیک سال و مناطق عملیاتی مختلف، میان سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ نشان داده شده است. تعداد کل عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای انجام شده در سال ۲۰۱۸، یعنی در چاه‌های جدید و چاه‌های با افت تولید فعلی، کاهش نسبی نشان می‌دهد (شکل ۴-۱۴). این روند با عوامل زیر مرتبط است:

- کاهش اثربخشی ویژه عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای انجام شده در چاه‌های با افت تولید
- کاهش تعداد چاه‌های کاندید برای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای
- تغییر تقاضا به سمت بخش عملیات چند مرحله‌ای MSF
- امکان بکارگیری روش‌های جایگزین برای حفظ حجم تولید



شکل ۴-۱- عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای انجام گرفته در مناطق مختلف روسیه از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۸

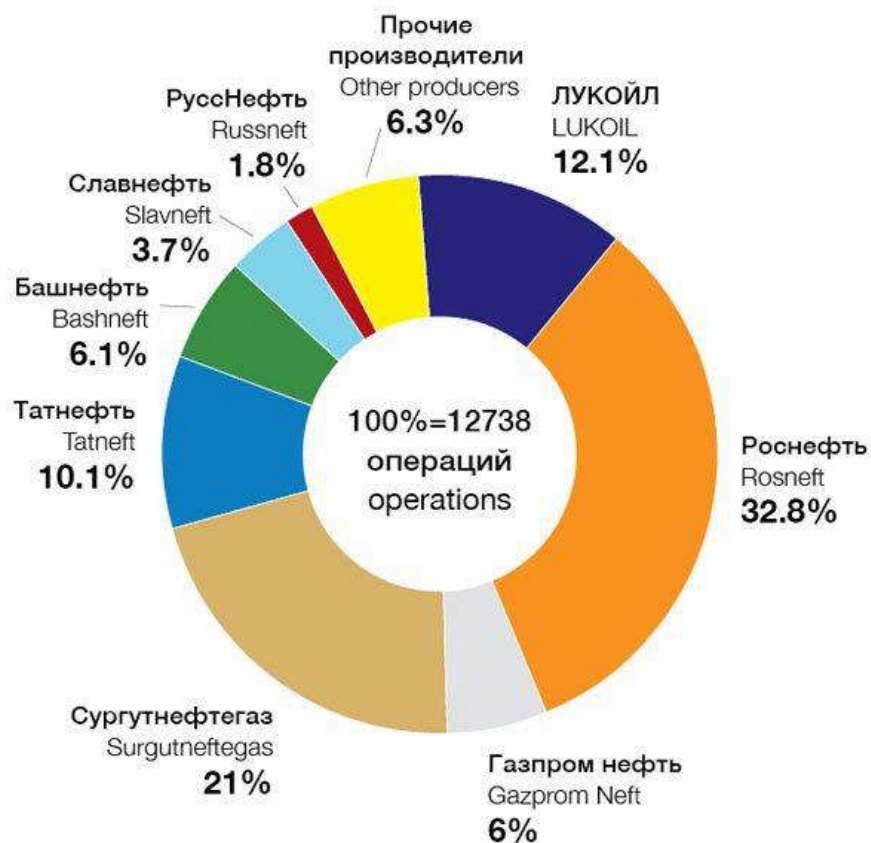
ب) تکامل شرکت‌های روسی

اصلی‌ترین سهم بازار عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای که در سال ۲۰۱۸ گزارش شده است مربوط به شرکت‌های زیر می‌باشد (شکل ۴-۱):

• Rosneft ۳۲,۸٪

• Surgutneftegas ۲۱٪

• LUKOIL ۱۲,۱٪



شکل ۴-۱۵- سهم کمپانی‌ها در بازار شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای در روسیه در سال ۲۰۱۸

رشد کلی در سهم بازار که در سال ۲۰۱۸ اتفاق افتاد، در «RussNeft» (۵۳٫۶٪)، «Slavneft» (۱۷٫۲٪)، «Tatneft» (۶٫۵٪) و «Surgutneftgas» (۵٫۸٪) مشاهده شد. این امر به دلیل وجود تعداد کافی چاه‌های کاندید، داشتن پتانسیل اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای و همچنین به دلیل استفاده از فناوری‌های نوین در شکافت هیدرولیکی است که می‌تواند کارایی عملیات را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

ج) حجم بازار روسیه

بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ رشد متوسط سالانه ۱۵٫۲ درصدی را نشان داد. این روند به افزایش تعداد عملیات و هزینه خدمات مرتبط است. از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ افزایش هزینه

قطعات و اقلام مصرفی مورد نیاز برای یک عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای نیز افزایش یافته و باعث افزایش هزینه خدمات شده است. حجم بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای، در سال ۲۰۱۸، حدود ۹۳ میلیون دلار برآورد شد (شکل ۴-۱۶)



شکل ۴-۱۶ - حجم بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در روسیه از سال ۲۰۰۶-۲۰۱۸ به میلیارد روبل

۴-۲-۴ - شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای^{۲۵}

الف) سیر تحولی فناوری در بازه‌های مختلف زمانی و مناطق عملیاتی

^۲ Multi-stage hydraulic fracturing

شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای (MSF) یک فناوری نسبتاً جدید و با رشد سریع در بازار شکافت هیدرولیکی است. استفاده گسترده از عملیات MSF از سال ۲۰۱۱ در حال انجام است. تعداد MSF های انجام شده در روسیه در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ به طور مداوم به میزان ۳۷,۵٪ در سال به طور متوسط افزایش یافته است بطوریکه تعداد ۲۴۰۱ عملیات در سال ۲۰۱۸ گزارش می‌گردد. (شکل ۴-). این روند به افزایش تعداد چاه‌های افقی راه اندازی شده و فرعی افقی مربوط می‌شود.

شکافت هیدرولیکی به روش زیپر (Zipper Frac) نیز به عنوان روشی برای بهبود عملکرد تولید در چاه‌ها پیشنهاد شده است. به طور خاص، این روش به شکستن دو یا چند چاه افقی موازی اشاره دارد. روش بهبود شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای به طور متناوب در امتداد دو چاه انجام می‌شود. امروزه، یک رویکرد رایج برای شکافت غیر هیدرولیکی (Alternate Frac) شامل استفاده از گاز طبیعی به عنوان ماده شکافنده است. این روش به جای تزریق سیالات شکافنده و آب به داخل چاه، شامل فشرده سازی گاز طبیعی در محل حفاری و سپس تزریق آن گاز فشرده به چاه برای شکستن سازندهای سنگی است.

MSF یک فناوری پیچیده‌ی رو به بهبود است. در حال حاضر میانگین وزنی تعداد مراحل ۶ است. اما میانگین تعداد مراحل در عملیات انجام شده در چاه‌های افقی و فرعی افقی متفاوت بوده و به ترتیب هفت و سه مرحله را تشکیل می‌دهد. پیش بینی می‌گردد سهم عملیات پرهزینه MSF، با ۸ تا ۱۳ مرحله، بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۰ افزایش یابد. زمینه اصلی این رشد به دلیل افزایش طول چاه‌های افقی و مسیرهای فرعی افقی و افزایش تولید از ذخایر با برداشت دشوار است.

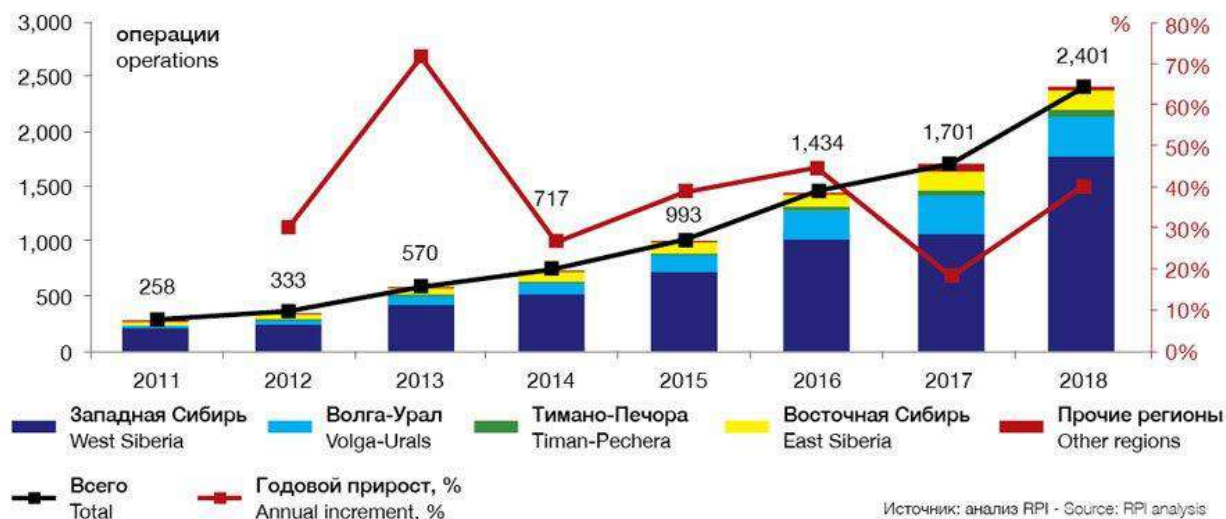


Диаграмма 5: Динамика операций МГРП в России в 2011-2018 гг., ед.
Diagram 5: Dynamics of MSF jobs in Russia in the period of 2011-2018, job units

شکل ۴-۱۷- عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای در روسیه ۲۰۱۱-۲۰۱۸

ب) تکامل شرکت‌های روسی

بیشترین سهم بازار عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای توسط شرکت Rosneft به میزان ۴۵,۲٪ از تعداد کل عملیات‌ها در سراسر روسیه گزارش شده است. این شرکت در استفاده از راه‌حل‌های فناوری جدید هنگام اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای فعال است، به عنوان مثال، عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای که با استفاده از گوی‌های کاملاً حل شونده فرک انجام می‌شود، که اجازه می‌دهد تا آسیاب کردن توپ‌ها را حذف و راه اندازی را تسریع کند. این فناوری امکان می‌دهد زمان تکمیل هر چاه پس از انجام عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای بر روی آن از ۱۸ به ۸ روز کاهش یابد، و بنابراین، سرعت بخشیدن به تولید چاه را افزایش می‌دهد.

ج) حجم بازار

اندازه بازار MSF با میانگین سالانه ۴۹,۲ درصد در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ در حال رشد و تا سال ۲۰۱۸، ۶۳,۷ میلیارد روبل رسیده است. رشد اندازه بازار شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای به دلیل افزایش تعداد عملیات و همچنین افزایش میانگین وزنی مراحل بود. در نتیجه، بخش بازار عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای به ۴۷,۹٪ از کل اندازه بازار عملیات شکافت هیدرولیکی رسیده است.

۴-۵- آمار مربوط به کشور چین

دسترسی به داده‌هایی که به طور مستقیم آمار شکافت هیدرولیکی در این کشور ارائه دهد میسر نیست. این در حالیکه این کشور در حال حاضر از لحاظ دارا بودن شرکت‌های دارای فناوری ارائه دهنده سرویس‌های عملیات شکافت هیدرولیکی و همچنین تولید کننده‌های مواد تزریقی از پیشروترین کشورهای جهان می‌باشد. این واقعیت نشان‌دهنده توسعه روزافزون این فناوری در چین است که نقش بسزایی در صنعت داخلی شکافت هیدرولیکی و صنعت نفت و گاز و نیز در ارائه سرویس و کالا در سطح بین‌المللی ایفا می‌کند.

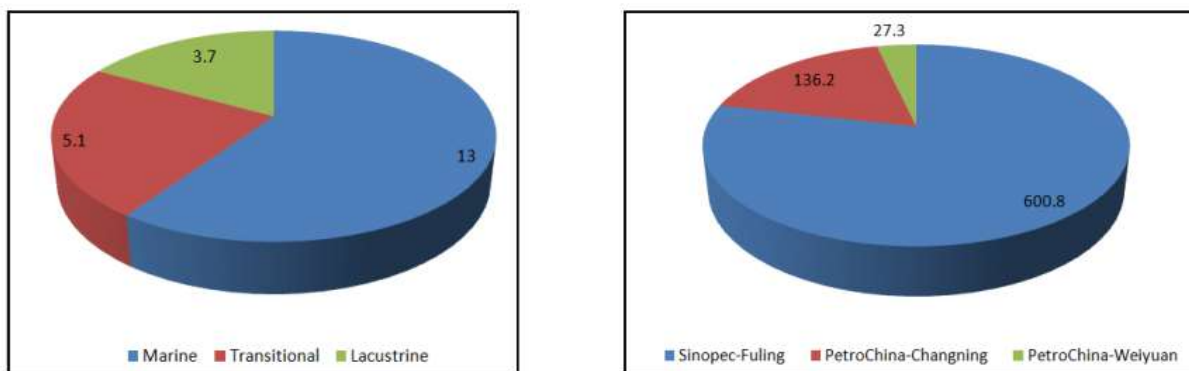
با این حال، بطور غیر مستقیم و با استفاده از آمار تولید نفت و گاز شیل در این کشور می‌توان به توسعه و بومی سازی فناوری شکافت هیدرولیکی در این کشور پی برد.

۴-۵-۱- صنعت گاز شیل کشور چین

امنیت انرژی یکی از مهمترین محرک‌های اصلی توسعه گاز شیل در چین است. اهمیت کاهش واردات گاز نیز بر توسعه گاز شیل این کشور تاثیر بسزایی داشته است. محدودیت‌های زیست محیطی (مثلاً سیاست «آسمان آبی» و تغییر از زغال‌سنگ به گاز برای تولید برق) و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای (گاز گلخانه‌ای) (تعهد به پروتکل پاریس COP21) دو عامل دیگر هستند که تقاضای فزاینده این منبع را در آینده پراهمیت نشان می‌دهند.

توسعه گاز شیل در چین در مقایسه با رویه آمریکای شمالی هنوز در مراحل اولیه است، اما تحت فشار دولت مرکزی با سرعتی سریع در حال پیشرفت است.

بر اساس نتایج بررسی منابع MLR (وزارت منابع زمینی) در سال ۲۰۱۵ (منتشر شده در ژوئن ۲۰۱۶)، چین دارای ۲۱,۸ تریلیون متر مکعب گاز شیل قابل بازیافت است که در این میان ۱۳ تریلیون مترمکعب (۶۰ درصد) در رخساره‌های دریایی است، ۵,۱ (۲۳٪) تریلیون مترمکعب در رخساره‌های انتقالی و ۳,۷ (۱۷٪) تریلیون مترمکعب در رخساره‌های دریاچه‌ای قرار دارد. با توجه به اطلاعات منتشر شده از مرکز بررسی مخزن MLR Oil & Gas، تا ژوئیه ۲۰۱۷، چین ۷۶۴,۳ میلیارد مترمکعب ذخایر اثبات شده، ثبت کرده است که از این میان، ۶۰۰,۸ میلیارد مترمکعب (۷۰ درصد) توسط Sinopec برای میدان گازی شیل Fuling، ۱۶۳,۵ میلیارد مترمکعب (۳۰ درصد) از ذخایر توسط PetroChina برای میدان Weiyuan (۲۷,۳ میلیارد متر مکعب) و پیلوت میدان Changning (۱۳۶,۲ میلیارد متر مکعب) ثبت شده است (شکل ۴-).



شکل ۴-۱۸ - راست) منابع گاز شیل در چین (میلیارد متر مکعب) چپ) مخازن اثبات شده گاز شیل در چین (تریلیون مترمکعب)

فناوری مهندسی در توسعه گاز شیل (مربوط به فناوری شکافت هیدرولیکی) کمتر از ۳۵۰۰ متر در حال رشد است و هزینه آن کاهش یافته است، در حالی که تمرکز بعدی پیشرفت فناوری (مربوط به فناوری شکافت

هیدرولیکی) برای توسعه گاز شیل عمیق‌تر از ۳۵۰۰ متر و در شیل کامبرین "قدیمی‌تر" خواهد بود. کاهش کلی هزینه و بهبود شرایط بازاریابی گاز، عوامل کلیدی برای موفقیت آینده توسعه گاز شیل در چین خواهد بود (Chen, 2018).

در مجموع ۵۴ بلوک گاز شیل تا به امروز در چین اکتشاف شده است که مساحتی در حدود 104×17 کیلومتر مربع دارند. اکتشاف و توسعه گاز شیل در پنج حوضه رسوبی (منطقه) از ۱۱ استان چین توسط بیش از ۲۰ شرکت داخلی و خارجی انجام شده است.

در مجموع $104 \times 2,2$ کیلومتر برداشت لرزه‌ای ۲ بعدی و ۲۱۳۴ کیلومتر مربع برداشت لرزه‌ای ۳ بعدی انجام شده و بیش از ۸۰۰ حلقه چاه حفر شده است که در بیش از ۲۰۰ حلقه چاه پس از انجام شکافت هیدرولیکی، جریان گاز شیل را به دست آمده است.

پس از چندین سال پژوهش فشرده و تست‌های پایلوت اکتشاف و توسعه گاز شیل، فناوری‌های کلیدی اکتشاف و توسعه گاز شیل، مانند بررسی لرزه‌ای سه بعدی، پایش ریز لرزه‌ای شکاف، حفاری و تکمیل چاه افقی، شکافت هیدرولیکی مخزن و پد چاه، ابزار و تجهیزات مهمی مانند bridge plug حفاری و سیستم ارزیابی عمده زمین شناسی برای مناطق هدف با عمق کمتر از ۳۵۰۰ متر بومی سازی شده و در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Caineng et al., 2016).

۴-۵-۲- صنعت نفت شیل کشور چین

شیل نفتی در چین منبع مهم نفت نامتعارف است. مجموع منابع شیل نفت چین ۷۲۰ میلیارد تن است که در ۸۰ نهشته و از ۴۷ حوضه نفتی شیل قرار دارد. در عین حال، گمانه زنی‌هایی مبنی بر اینکه منابع واقعی ممکن است حتی از منابع نفت شیل ایالات متحده نیز فراتر رود، وجود دارد. ذخایر اصلی چین با اهمیت تجاری

در Fushun (Liaoning)، Maoming (Guangdong)، Huadian و Nong'an (Jilin) و Longkou (Shandong) قرار دارند. کانسار Longkou دارای بالاترین محتوای نفت (حدود ۱۴٪) است.

منبع EIA در گزارش منتشر شده خود تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی ذخائر نفت در جا و حجم اثبات شده قابل استحصال شیل نفتی کشور چین را به ترتیب به میزان ۶۴۴ میلیارد بشکه و ۳۲ میلیارد بشکه گزارش می-کند. در جدول زیر احجام در جا و احجام قابل استحصال این گزارش به تفکیک حوضه‌های نفتی مهم و سازندهای مربوطه ارائه می‌شود.

جدول ۴-۵- احجام درجا و قابل استحصال چین تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی به تفکیک حوضه‌های رسوبی و سازندها

Country	Basin	Formation	Risked Oil In-Place (Billion bbl)	Technically Recoverable (Billion bbl)	Risked Oil In-Place (Billion bbl)	Technically Recoverable (Billion bbl)
China	Sichuan Basin	Qiongzhusi	0	0.0	644	32
		Longmaxi	0	0.0		
		Permian	0	0.0		
	Yangtze Platform	L. Cambrian	0	0.0		
		L. Silurian	0	0.0		
	Jiangnan Basin	Niutitang/Shuijintuo	0	0.0		
		Longmaxi	1	0.0		
		Qixia/Maokou	5	0.2		
	Greater Subei	Mufushan	0	0.0		
		Wufeng/Gaobajian	5	0.2		
		U. Permian	1	0.1		
	Tarim Basin	L. Cambrian	0	0.0		
		L. Ordovician	0	0.0		
		M.-U. Ordovician	31	1.6		
		Ketuer	129	6.5		
	Junggar Basin	Pingdiqian/Lucaogou	109	5.4		
		Triassic	134	6.7		
	Songliao Basin	Qingshankou	229	11.5		

۴-۶- آمار مربوط به خاورمیانه

در نگاه اول به نظر می‌رسد خاورمیانه منطقه‌ای است که از توسعه صنعت نفت و گاز شیل و به تبع آن از توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی در آمریکا و دیگر نقاط جهان و افزایش تولیدات نفت و گاز این کشورها صدمه دیده است، اما با افزایش تقاضای داخلی در کشورهای این منطقه و همچنین با در نظر گرفتن مقوله امنیت و تأمین انرژی نسل‌های آینده، صنعت شکافت هیدرولیکی بعنوان یک تکنیک بهبود عملکرد چاه‌های نفت و گاز

بطور عام و روش انحصاری استخراج ذخائر نفت و گاز شیل بطور خاص در این منطقه از جهان نیز توجهات را بسمت خود جلب نموده است.

در جداول ۴-۶ و ۴-۷ میزان ذخایر قابل استحصال نفتی و گازی متعارف و نامتعارف (که بیشتر مربوط به ذخائر شیل می باشد) برخی از کشورهای خاورمیانه به تفکیک آورده شده است. این آمار نشان دهنده میزان قابل توجه ذخایر نامتعارف به خصوص در مورد ذخایر گازی است. از آنجایی که تولید ذخایر متعارف با سهولت بیشتری در این کشورها در حال انجام است مطالعات جامعی در مورد ذخایر نفتی نامتعارف انجام نگرفته است یا در صورتی که انجام گرفته باشد به صورت عمومی در دسترس قرار نگرفته است.

جدول ۴-۶- ذخایر نفتی و گازی متعارف و نامتعارف برخی از کشورهای خاورمیانه

نام کشور	میزان ذخایر نفت (میلیارد بشکه)	ذخایر نفت نامتعارف	ذخایر گاز طبیعی (تریلیون فوت مکعب)	ذخایر گازی نامتعارف (تریلیون فوت مکعب)
ایران	۱۵۸,۴		۱,۲۰۱	
عربستان سعودی	۲۵۹		۳۳۳	۶۰۰
کویت	۱۰۱,۵		۶۳,۵	
امارات متحده عربی	۹۷,۸	۲۲,۶	۲۷۳	۲۰۵,۳
قطر	۲۵,۲		۸۷۲	
عمان	۵,۳	۶,۲	۲۴,۹	۴۸,۳
عراق	۱۴۲,۵		۱۱۱,۵	

جدول ۴-۷- آمار مربوط به ذخائر حجم در جا و قابل استحصال بعضی از کشورهای خاور میانه (۲۰۱۴ EIA)

Region	Country	Basin	Formation	Risked Gas In-Place (Tcf)	Technically Recoverable (Tcf)	Risked Oil In-Place (Billion bbl)	Technically Recoverable (Billion bbl)
Middle East	Jordan	Hamad	Batra	33	7	0	0.0
		Wadi Sirhan	Batra	2	0	4	0.1
	Oman	S. Oman Salt	Thuleilat Shale	31	2	11	0.4
			Athel	127	18	41	2.9
			U Shale	22	2	7	0.3
		N. Oman Foreland	Natih	8	1	24	0.9
		Rub' Al-Khali	Sahmah Shale	128	26	33	1.7
	United Arab Emirates	Rub' Al-Khali	Qusaiba	248	62	0	0.0
			Diyab	423	124	9	0.5
			Shilaif	157	19	367	22.0

چشم انداز تولید گاز شیل شده از ذخائر کشف شده جهت تامین نیاز برق و استفاده گاز مصرفی مسکونی برای کشورهای عربستان سعودی و امارات متحده عربی بسیار جذاب بنظر می‌رسد. همچنین در گزارش‌های فراوانی به سرمایه گذاری کشور عمان برای توسعه منابع شیلی خود اشاره شده است. شرکت‌های ملی نفت عربستان سعودی، عمان، بحرین و کویت به طور جدی در حال بررسی چگونگی توسعه منابع گاز شیل خود هستند.

عربستان سعودی اولین تولید تجاری گاز شیل خود را از میدان عربی شمالی در ماه می ۲۰۱۸ آغاز کرد و ۵۵ میلیون فوت مکعب در روز (حدود ۱,۶ میلیون مترمکعب در روز) را به یک نیروگاه در وادی الشمال در شمال این کشور عرضه کرده است. ذخایر گاز شیل در عربستان سعودی بیش از ۶۰۰ تریلیون فوت مکعب (حدود ۱۷ تریلیون متر مکعب) تخمین زده می‌شود که دو برابر میزان گاز طبیعی متعارف در این کشور است.

شرکت آرامکو عربستان بر روی سه حوزه خاص برای توسعه گاز شیل تمرکز کرده است. این موارد شامل میدان غوار که بزرگترین میدان نفتی جهان است، حوضه جفوره، واقع در نزدیکی غوار و انتظار می‌رود گستردگی این پروژه در مقیاس توسعه منطقه ایگل فورد کشور آمریکا باشد، و همچنین حوضه وسیع رب الخالی در جنوب این کشور است. توسعه گاز شیل به این کشور کمک می‌کند تا به طور متوسط ۸۰۰ هزار بشکه در روز سوزاندن

نفت خام و سوخت برای برق را کاهش دهد. این کشور با استفاده از فناوری آمریکایی و با سرمایه گذاری ۱۱۰ میلیارد دلاری در حال توسعه میدان گازی شیل جفوره است. در صورتیکه آرامکو به اهداف خود برای توسعه این میدان دست یابد، عربستان سعودی تا سال ۲۰۳۰ به سومین تولیدکننده بزرگ گاز جهان تبدیل خواهد شد. دو تولیدکننده بزرگ گاز جهان آمریکا و روسیه هستند.

از آنجایی که این میدان در نزدیکی خلیج فارس قرار دارد عربستان برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی و توسعه این میدان از آب دریا استفاده می کند. همچنین منابع شن محلی مناسب برای تزریق در چاهها شناسایی شده است. گروه نفت دولتی عربستان سعودی با شرکت های خدمات نفتی بین المللی مانند شلومبرژه مستقر در ایالات متحده، شرکت هالبرتون و بیکرهیوس در توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی همکاری می کند. همچنین عربستان سعی دارد از گاز تولیدی از این میدان به کشورهای همجوار صادر کند. صادرات گاز عربستان وابستگی واردات کشورهای همسایه از قطر را کاهش می دهد و از نظر سیاسی نیز برای این کشور پراهمیت است. آرامکو بیش از ۱۵۰ چاه در این میدان از سال ۲۰۱۳ حفر کرده است.

۴-۶-۱- رسوبات شیلی در منطقه خاور میانه

رسوبات پالئوزوئیک تا سنوزوئیک حجمی به ضخامت ۱۲ کیلومتر از رسوبات را در پلتفرم عربی و حوضه زاگرس تشکیل می دهند و تقریباً هر دوره چینه شناسی شامل حداقل یک سازند شیل به ضخامت بیش از صد متر است که در منطقه پراکنده شده یا در کشورهای خاص متمرکز شده است. پراکندگی این سازندها در کشورهای مختلف و در با سنین زمین شناسی در شکل ۴- و شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است.

	SE TURKEY	SYRIA	IRAQ	SAUDI ARABIA	KUWAIT	SW IRAN	QATAR	UAE	OMAN
PERMIAN	Gomani- ibrik Harzo			Khuf	Khuf	Dalan	Khuf	Khuf	Khuf
CARBONIFEROUS		Sawanet							
DEVONIAN	Koprulu			Jauf					Misfar
SILURIAN	Handof Dadas	Tanf	Mudaw- wara	Qusaiba		Gahkum	Shawara		Safiq
ORDOVICIAN	Bedinan	Sawab		Hanadir					Safiq
CAMBRIAN	Sosnik			Pre-Saq					Miqrat
INFRACAMBRIAN									Ara Shuram

شکل ۴-۱۹- شیل‌های پالئوزئیک در خاورمیانه

	SE TURKEY	SYRIA	IRAQ	SAUDI ARABIA	KUWAIT	SW IRAN	QATAR	UAE	OMAN
EOCENE		Jaddala	Jaddala			Pabdeh			Andhur
PALEOCENE	Sinan	Aaliji	Aaliji			Pabdeh			
UPPER CRETACEOUS	Kastel- Germav Kiradag	Shiranish Soukhne	Shiranish Sarmord		Mishfir Mauddud Burgan	Gupi Ilam Sarvak	Mishfir Khatiyah Mauddud	Khatiyah Mauddud	Natih
LOWER CRETACEOUS	Karababa Derdere	Qam- chuaqa Rubtah	Zubair Ratawi Garau	Sulaiy	Zubair Ratawi Minagish	Kazhdumi Gadvan	Shuaiba Ratawi	Shuaiba	Shuaiba
UPPER JURASSIC			Chia Gara Naokele- kan	Hanifa Twaiq	Najmah		Hanifa	Dukhan	Diyab
LOWER-MIDDLE JURASSIC		Sargelu	Sargelu	Dhurma Marrat	Sargelu Marrat	Surmeh	Izhara		
TRIASSIC	Aril?	Kurra Chine Amanus	Kurra Chine Beduah	Minjur Jilh					Jilh

شکل ۴-۲۰- شیل‌های مزوزئیک: سنگ‌های منشا ژوراسیک و کرتاسه خاورمیانه

۴-۷- آمار مربوط به کشور ایران

۴-۷-۱- سوابق اجرای فناوری در ایران

متأسفانه با وجود نیاز فراوان به فناوری شکافت هیدرولیکی در کشور جهت بهبود و ترمیم وضعیت تولید چاه‌های در حال تولید و همچنین توسعه میادینی که به علت نبود فناوری مناسب هم اکنون دارای توجیه اقتصادی بالایی نیستند، ورود و توسعه این فناوری همانند فناوری‌های دیگر بالادستی در صنعت نفت و گاز کشور مورد غفلت واقع شده است. مسائل دیگر سیاسی از جمله تحریم‌های بین المللی نیز عامل مهم دیگری است که موجب عدم حضور شرکت‌های ارائه دهنده خدمات این فناوری به کشور گشته و صنعت نفت کشور از مزایای این فناوری اثبات شده بی‌نصیب مانده است.

با وجود اینکه هیچ گونه اطلاعات مستند در مورد سابقه انجام عملیات شکافت هیدرولیکی در ایران در منابع در دسترس عموم وجود ندارد، ولیکن از طریق کارشناسان شرکت‌های مختلف نفت، انجام چند مورد محدود عملیات شکافت هیدرولیکی در ایران در سال‌های گذشته بر روی مخازن نفتی متعارف گزارش شده است (جدول ۴-۶).

همانطور که در جدول ۴-۸ ارائه گردیده است ظاهراً اولین عملیات بعد از انقلاب در سال ۱۳۷۴ در ۳ حلقه چاه میدان الوند که یک میدان دریایی می‌باشد توسط یکی از پیمانکاران خارجی انجام گرفته است که متأسفانه از نتایج دقیق آن اطلاعات مدون و مستندی در دسترس نیست. همینطور اقدام به اجرای این عملیات در میدان سیری نیز گزارش گردیده است که ظاهراً بعلت عدم نتیجه‌گیری در مرحله تست پیش از عملیات اصلی متوقف گردیده است. شایان ذکر است که در میدان سیری از پروپانت برای باز نگه داشتن دهانه شکاف استفاده شده است. در سال‌های اخیر اولین مورد اجرای این عملیات در ۳ حلقه چاه از میدان خشکی آذر گزارش گردیده است که با وجود نتایج نسبتاً موفق عملیات شکافت هیدرولیکی بعلت مشکلات عدیده عملیاتی دیگر و ریسک-

های موجود از ادامه این عملیات صرف نظر شده است. همچنان اطلاعات مستندی در رابطه با نتایج این پروژه در دسترس عموم قرار نگرفته است.

جدول ۴-۸- پروژه‌های شکافت هیدرولیکی انجام شده در ایران

پروژه	سال	تعداد	روش	نتایج	توضیحات
مخزن ایلام میدان الوند شرکت فلات قاره	۱۳۷۴	۳	اسید فرک	۱ چاه نسبتاً موفق	عدم وجود اطلاعات و گزارش‌ها
میدان سیری شرکت فلات قاره	؟	۱	پروپانت فرک	ناموفق در مرحله تست	عدم وجود اطلاعات و گزارش‌ها
میدان آذر شرکت سروک آذر	۱۳۹۶	۳	اسید فرک	۴ عملیات نسبتاً موفق با مشکلات عدیده جانبی	عدم وجود اطلاعات

۴-۷-۲- ذخایر نفت و گاز شیل ایران

چنانچه در جای جای این گزارش بدان اشاره گردید، از اصلی ترین کاربردهای این فناوری قابلیت توسعه ذخائر نفت و گاز شیل است. در کشور ما متأسفانه تا کنون برای مخازن نفت و گازی نامتعارف مطالعه تفصیلی جامعی انجام نگرفته و یا گزارش نگردیده است.

با این وجود خبرها حاکی از آن است که در سال ۱۳۹۰ مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران پی جویی مقدماتی منابع شیل گازی در حوضه های رسوبی زاگرس، کپه داغ و ایران مرکزی را به اتمام رسانده است. همچنین پژوهشگاه صنعت نفت، مطالعه شیل های گازی سازندهای سرگلو و گرو به سن ژوراسیک میانی و کرتاسه زیرین در ناحیه لرستان از حوضه رسوبی زاگرس را با همکاری مدیریت اکتشاف صنعت نفت در دستور کار قرار داده است.

از سوی دیگر نتایج مطالعات انجام شده در معدن شیل نفتی با انستیتو نفت دانشگاه تهران در قالی کوه استان لرستان دو میلیارد بشکه نفت درجا از نوع سبک کشف شده است.

از آنجاییکه در توسعه این ذخائر نیاز به توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی می باشد، با در نظر گرفتن واقعیت های موجود صنعت نفت و گاز و نیازمندی های کشور در رابطه با مقوله امنیت انرژی اهمیت انتقال دانش و بومی سازی این فناوری در کشور دو چندان بنظر می رسد.

۴-۸- بازار جهانی

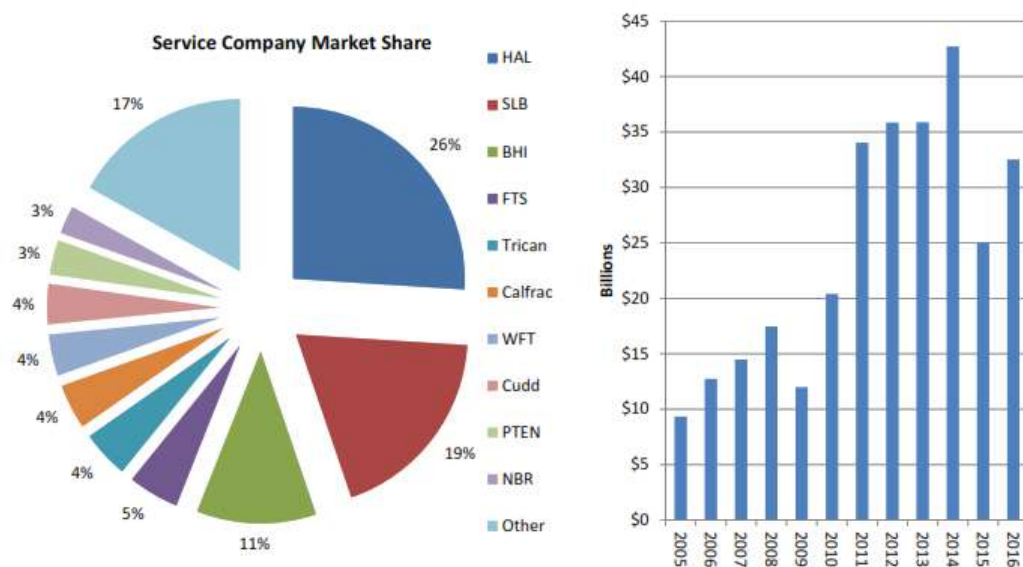
با توجه به دسترسی محدود به اطلاعات به روز حجم بازار شکافت هیدرولیکی، در این بخش بیشترین اطلاعات مربوط به مارکت این صنعت در طی سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ می باشد. بر این اساس با توجه به اطلاعات موجود، حجم بازار این صنعت در حال افزایش می باشد، به صورتی که حجم بازار گزارش شده از حدود ۹ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۵ به حدود ۳۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۶ رسیده است (شکل ۴-۲۱). شکل ۴-۲۱

علاوه بر نشان دادن حجم بازار کلی این صنعت در طی دوره مشخص، به تفکیک حجم بازار زیر بخش‌های آن مانند تجهیزات، پروپانت و مواد شیمیایی را نیز نشان داده است (Spears, Richard. 2016).



شکل ۴-۲۱- حجم مارکت صنعت شکافت هیدرولیکی به تفکیک بخش‌های مختلف تا سال ۲۰۱۶

شرکت‌های اصلی ارائه دهنده خدمات بالادستی نفتی دنیا شامل شرکت های هالبرتون (HAL)، شلومبرژه (SLB)، بیکر هیوس (BHI) و Trican سهم عمده‌ای از این بازار را در اختیار داشته‌اند (شکل ۴-۲۲). بطوریکه این چهار شرکت به تنهایی ۷۳ درصد از بازار این صنعت را در سال ۲۰۱۶ به خود اختصاص داده‌اند. عمده فعالیت این شرکت‌ها در کشورهای آمریکا و کانادا می‌باشد. البته در طی سالهای بعد کشورها و شرکت های زیادی وارد این بازار شده‌اند. در طی سال‌های بعد از ۲۰۱۶ کشورهایی مانند چین و روسیه با سرعت زیادی در حال افزایش سهم خود در این بازار می‌باشند. در جدول ۴-۹ لیست شرکت‌هایی که عملیات شکافت هیدرولیکی انجام می‌دهند به تفکیک سهم فعالیت در طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ آورده شده است.

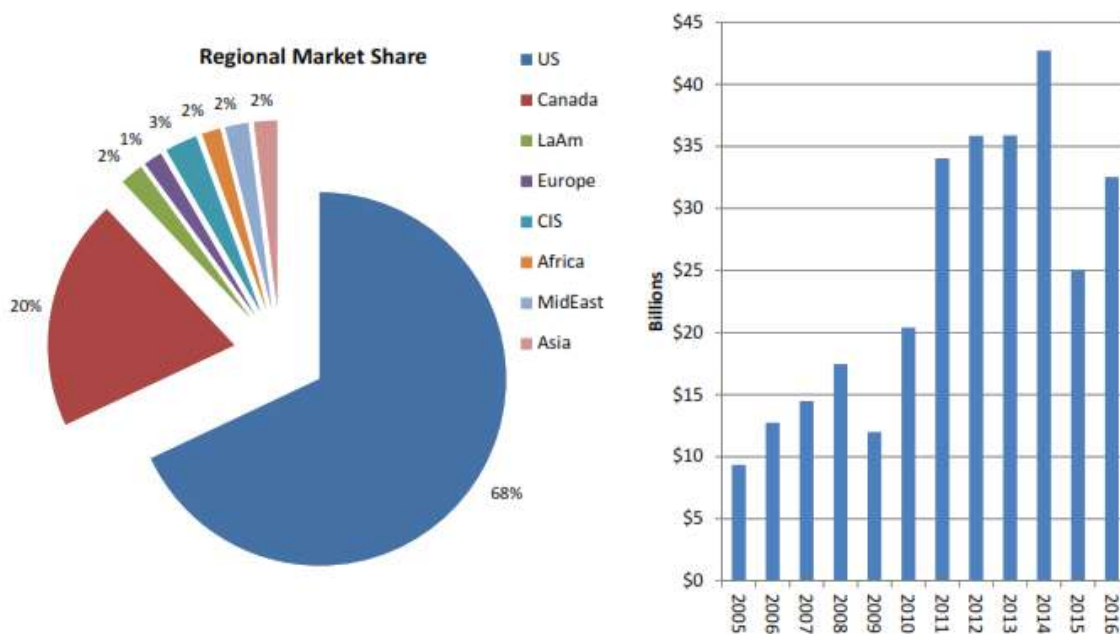


شکل ۴-۲۲- مارکت جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک شرکت‌های انجام دهنده

جدول ۴-۹- لیست شرکت درگیر عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم فعالیت در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵

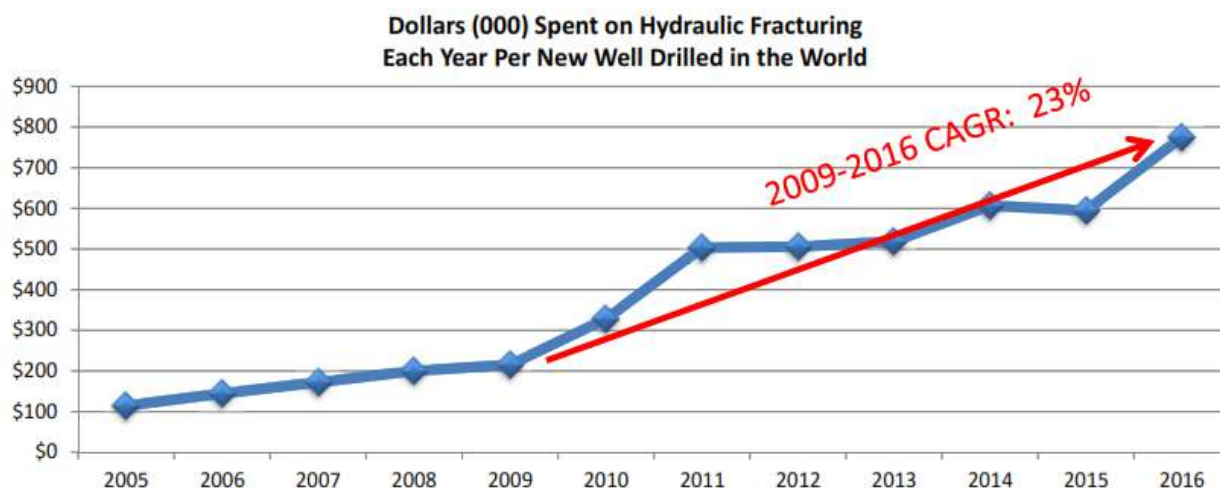
	Millions											
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Halliburton	\$2,810	\$3,725	\$4,180	\$4,950	\$3,625	\$5,230	\$8,600	\$9,200	\$9,100	\$10,325	\$6,500	
Schlumberger	\$2,300	\$2,800	\$3,200	\$3,950	\$3,050	\$4,200	\$6,525	\$6,725	\$6,800	\$7,750	\$4,695	
Baker Hughes	\$1,800	\$2,447	\$2,480	\$2,723	\$1,492	\$2,850	\$4,600	\$4,500	\$4,300	\$4,750	\$2,820	
Calfrac Well Services Ltd.	\$233	\$428	\$588	\$693	\$443	\$805	\$1,429	\$1,537	\$1,580	\$2,085	\$1,200	
FTS International	\$100	\$250	\$362	\$574	\$389	\$1,287	\$2,339	\$1,918	\$1,800	\$2,300	\$1,140	
C&J Energy Services	\$116	\$206	\$379	\$589	\$334	\$854	\$1,729	\$1,978	\$1,501	\$1,980	\$1,120	
Weatherford	\$180	\$260	\$345	\$480	\$380	\$790	\$1,500	\$1,800	\$1,275	\$1,600	\$970	
Trican	\$420	\$639	\$648	\$749	\$563	\$1,155	\$1,830	\$1,750	\$1,800	\$1,950	\$945	
Patterson-UTI Energy, Inc.	\$217	\$351	\$448	\$507	\$285	\$486	\$761	\$758	\$880	\$1,173	\$810	
Cudd Pumping	\$192	\$273	\$320	\$421	\$300	\$601	\$1,090	\$1,165	\$1,100	\$1,455	\$655	
Seventy Seven Energy	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$50	\$200	\$415	\$898	\$886	\$550	
Sanjel Corporation	\$180	\$225	\$180	\$200	\$150	\$270	\$600	\$700	\$850	\$1,000	\$515	
ProPetro	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$15	\$100	\$185	\$290	\$550	\$330	
Canyon Services Group, Inc.	\$0	\$27	\$32	\$35	\$30	\$171	\$318	\$285	\$215	\$415	\$310	
Basic Energy Services	\$131	\$192	\$191	\$214	\$97	\$237	\$300	\$324	\$265	\$430	\$285	
Superior Energy Services, Inc.	\$45	\$88	\$132	\$162	\$89	\$237	\$467	\$470	\$400	\$500	\$275	
RockPile Energy Services	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$40	\$175	\$365	\$250	
U.S. Well Services	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$52	\$174	\$280	\$155	
Archer	\$0	\$0	\$20	\$45	\$30	\$60	\$200	\$175	\$185	\$270	\$145	
C.A.T. oil AG	\$162	\$200	\$240	\$280	\$225	\$235	\$250	\$225	\$250	\$225	\$140	
Keane Group	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$25	\$50	\$100	\$150	\$175	\$95	
Advanced Stimulation Technologie	\$0	\$0	\$0	\$10	\$5	\$15	\$35	\$70	\$100	\$125	\$70	
San Antonio	\$35	\$38	\$39	\$42	\$38	\$34	\$38	\$43	\$46	\$50	\$45	
Anton Oilfield Services Group	\$0	\$0	\$9	\$16	\$9	\$33	\$42	\$70	\$78	\$46	\$30	
Cimarron Acid & Frac	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$10	\$20	\$35	\$60	\$30	
Producers Service Corporation	\$15	\$18	\$21	\$25	\$17	\$23	\$30	\$33	\$35	\$40	\$30	
Petroplex Acidizing Inc.	\$15	\$20	\$23	\$25	\$15	\$30	\$45	\$60	\$65	\$75	\$26	
Consolidated Services	\$22	\$39	\$40	\$39	\$25	\$35	\$45	\$55	\$45	\$55	\$21	
Torqued-Up Energy Services	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$25	\$30	\$35	\$15	
Franklin Well Services	\$6	\$6	\$7	\$7	\$5	\$7	\$9	\$12	\$12	\$15	\$8	
Gasfrac Energy Services, Inc.	\$0	\$0	\$0	\$23	\$27	\$94	\$162	\$150	\$125	\$40	\$0	
Others	\$350	\$500	\$600	\$700	\$350	\$550	\$725	\$1,000	\$1,300	\$1,750	\$965	
Total Market	\$9,330	\$12,731	\$14,484	\$17,458	\$11,972	\$20,379	\$34,029	\$35,839	\$35,859	\$42,755	\$25,145	\$32,689
Annual Market Change		36%	14%	21%	-31%	70%	67%	5%	0%	19%	-41%	30%

همچنین طبق گزارشات موجود (تا سال ۲۰۱۶) بیشترین حجم بازار به تفکیک کشور نیز متعلق به کشور های آمریکا و کانادا می باشد (شکل ۴-۲۳). بر اساس شکل ۴-۲۳، این دو کشور به تنهایی حدود ۸۸ درصد کل بازار شکافت هیدرولیکی را به خود اختصاص داده اند. با این وجود، این عملیات در تمامی بخش های مختلف مانند اروپا، آفریقا، آسیا، خاورمیانه و ... در حال انجام بوده است. با توجه به تمایل کشورهای دیگر (مانند روسیه، چین و عربستان) به این عملیات، سهم بازار در سالهای بعد از انتشار این گزارش (سال ۲۰۱۶) مسلماً تغییر کرده است.



شکل ۴-۲۳- مارکت جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم کشورها تا سال ۲۰۱۶

در نمودار زیر هزینه حفر چاه جهت عملیات شکافت هیدرولیکی نمایش داده شده است. این نمودار با تقسیم بازار جهانی شکافت هیدرولیکی بر کل چاه‌های حفاری شده به دست آمده است (شکل ۴-۲۴). بر اساس این نمودار در سال ۲۰۰۵، اندکی بیش از ۱۰۰،۰۰۰ دلار در عملیات شکافت هیدرولیکی به ازای هر چاه جدید حفر شده در دنیا هزینه شده است. این مقدار در سال ۲۰۰۹ که ایالات متحده به توسعه جدی شیل‌های گازی غیرمتعارف رو آورد حدود دو برابر گزارش می‌گردد. سپس، حفاری چاه‌های افقی افزایش پیدا کرده و این نسبت مجدداً بیش از دو برابر شده و به ۵۰۰،۰۰۰ دلار در هر چاه جدید رسید. همچنین در ادامه، هزینه‌ها به دلیل افزایش قیمت‌ها و هم‌چنین تکمیل چاه‌های قبلی و عملیات‌های چند مرحله‌ای بالا رفت و در سال ۲۰۱۶ به حدود ۸۰۰ هزار دلار برای هر چاه رسید.



شکل ۴-۲۴- نمودار افزایش هزینه‌های هر چاه جهت عملیات شکافت هیدرولیکی تا سال ۲۰۱۶

۹-۴- چشم انداز فناوری

در این بخش به بررسی کلی از چشم انداز جهانی و بخصوص کشورهای مهمی مانند آمریکا، روسیه و چین که در عملیات شکافت هیدرولیکی پیشتاز هستند پرداخته می‌شود.

۹-۴-۱- چشم انداز جهانی

انتظار می‌رود بازار جهانی فناوری شکافت هیدرولیکی با نرخ ثابتی در آینده رشد کند. بازار جهانی فناوری شکافت هیدرولیکی توسط افزایش فعالیت‌های اکتشاف و تولید هدایت می‌شود. علاوه بر این، انتظار می‌رود که کاهش منابع متعارف همراه با افزایش تعداد حفاری‌های جدید نفت، بازار را تقویت کند. تحولات استخراج انرژی از نفت و گاز شیل در اقتصادهای توسعه یافته رشد قابل توجهی پیدا کرده است. با توجه به آمار و اطلاعات ارائه شده در وبسایت dataintelو، ارزش بازار جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی در سال ۲۰۱۸ به ۳۵,۲۰ میلیارد

دلار رسید و انتظار می‌رود در دوره پیش بینی ۲۰۲۰-۲۰۲۶ افزایش ۱۲,۲ درصد در نرخ رشد ترکیبی سالانه^{۲۶} (CAGR) اتفاق افتد (شکل ۴-۲۵).

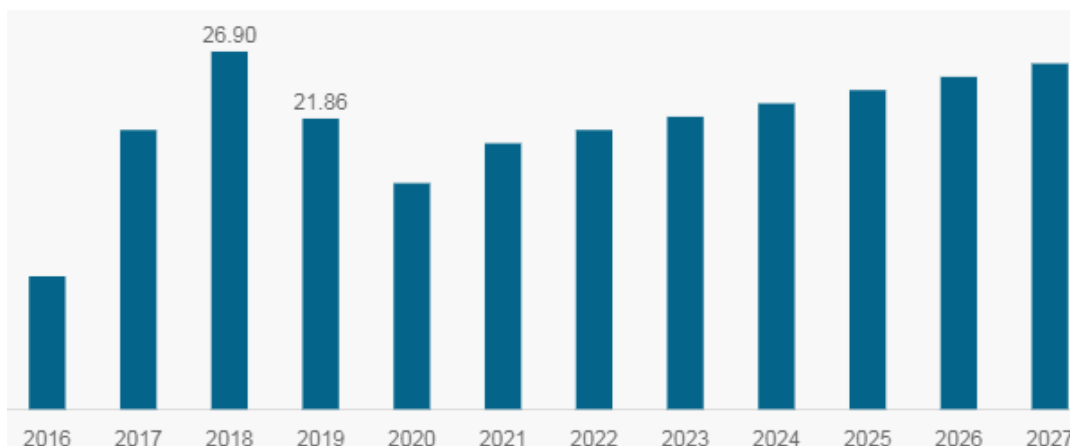


شکل ۴-۲۵- پیش بینی بازار شکافت هیدرولیکی در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶

۴-۹-۲- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در آمریکا

با توجه به آمار و اطلاعات ارائه شده در وبسایت fortunebusinessinsights، ارزش بازار جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی در کشور آمریکا طی سالیان گذشته و همچنین پیش بینی رشد تا سال ۲۰۲۷ گزارش شده است (شکل ۴-۲۶). بر اساس شکل ۴-۲۲ بازار عملیات شکافت هیدرولیکی در طی سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ روند کاهشی داشته است اما بعد از سال ۲۰۲۰ با روند ثابتی بازار در حال رشد پیش بینی شده است.

^۲ compound annual growth rate



شکل ۴-۲۶- بازار شکافت هیدرولیکی ایالات متحده آمریکا از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۷ (میلیارد دلار)

۴-۹-۳- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در روسیه

در بررسی‌ها و مطالعات چشم انداز و پیش بینی از بازار شکافت هیدرولیکی، به شاخص‌های زیر توجه می‌شود:

- پیش بینی حجم تولید نفت
- برنامه‌های اعلام شده توسط شرکت‌ها برای توسعه میادین و راه اندازی چاه‌های جدید
- پویایی مورد انتظار برای سهم چاه‌های جدید مورد نظر برای شکافت هیدرولیکی
- پویایی ذخایر چاه تولیدی و پویایی گذشته نگر تعداد عملیات انجام شده در چاه‌های مواجه با کاهش تولید
- تأثیر روندهای فناوری بر بازار شکافت هیدرولیکی

با توجه به پارامترهای بالا، پیش بینی‌ها در این کشور به این گونه است که پویایی مثبت تعداد سالانه عملیات تک مرحله‌ای در چاه‌های جدید در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۵ با میانگین نرخ افزایش سالانه ۱,۶ درصد همراه خواهد شد و این پارامتر به سطح ۵,۹ هزار عملیات در سال ۲۰۲۵ خواهد رسید. با این حال، پس از سال ۲۰۲۶، انتظار می‌رود که تعداد عملیات یک مرحله‌ای شکافت هیدرولیکی که در چاه‌های جدید انجام می‌شود با

نرخ متوسط سالانه ۰,۷ درصد به دلیل تقاضای فشرده‌تر کاهش یابد. برای عملیات چند مرحله‌ای MSF تقاضا بیشتر خواهد شد و تا سال ۲۰۳۰ تقاضای بازار پیش بینی شده ۵۷۰۰ عملیات خواهد بود. انتظار می‌رود از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۰ رشد سالانه شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در چاه‌های جدید با نرخ متوسط سالانه ۰,۷٪ باشد. این امر در درجه اول به دلیل افزایش چنین نوع عملیاتی است که در چاه‌های افقی جدید انجام می‌شود و همچنین افزایش سهم عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای انجام شده در چاه‌های جهت‌دار کنترل شده به میزان ۹۰ درصد است. افزایش سهم عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای که در چاه‌های جهت‌دار کنترل شده انجام می‌شود، ناشی از افزایش سهم ذخایر با بازیابی دشوار است. حجم کارهای شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای انجام شده در چاه‌های در حال تخلیه فعلی در دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۰ با پویایی منفی با کاهش میانگین سالانه ۱,۴٪ مشخص خواهد شد و تا سال ۲۰۳۰ به ۶۴۰۰ عملیات خواهد رسید. کاهش تعداد عملیات مربوط به کاهش اثربخشی عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای است که به دلیل کاهش تعداد چاه‌های کاندید برای عملیات یک مرحله‌ای شکستگی و افزایش تعداد عملیات‌های مجدد ایجاد شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای است که منجر به افزایش برش آب^۷ می‌شود. در چشم انداز میان مدت، کاهش تعداد عملیات یکسان به نظر نمی‌رسد. رشد عملیات یک مرحله‌ای پس از سال ۲۰۲۹ پیش بینی می‌شود، که مربوط به افزایش تعداد عملیات یک مرحله‌ای موفق در نتیجه معرفی فناوری‌های نوین برای تولید است که می‌تواند کارایی عملیات انجام شده را افزایش دهد (مثلاً روش‌های جدید شبیه سازی شکافت هیدرولیکی). تا سال ۲۰۳۰، اندازه بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای به سطح ۱۰۷,۴ میلیارد روبل خواهد رسید. متوسط رشد سالانه اندازه بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۰ به ۳,۷ درصد می‌رسد.

راه اندازی چاه‌های افقی و مسیرهای فرعی افقی محرک‌های توسعه بخش عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۰ خواهد بود. در چشم انداز بلند مدت دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۰، رشد عملیات

^۷ Water cut

شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای با میانگین نرخ سالانه ۱۰,۷ درصد پیش بینی می‌شود و تا سال ۲۰۳۰ این میزان به تعداد ۸۲۰۰ عملیات برسد. افزایش اندازه بازار عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای، در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۰ با میانگین سالانه ۱۸,۱ درصد پیش بینی می‌شود و اندازه آن تا سال ۲۰۳۰ به ۴۶۹,۹ میلیارد روبل خواهد رسید.

برای کل روسیه، در چشم انداز بلندمدت تا سال ۲۰۳۰، افزایش تعداد انواع عملیات شکافت هیدرولیکی با میانگین نرخ سالانه ۲,۴٪ انتظار می‌رود که بالغ بر ۲۰,۲ هزار عملیات تا سال ۲۰۳۰، به صورت مطلق خواهد بود. این روند مشروط به افزایش تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای خواهد بود که سهم آن از ۱۶٪ فعلی به ۴۰٪ تا سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. روند کلیدی بازار با تمرکز مجدد مشتریان به سمت عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای به عنوان مؤثرترین عملیات از نظر افزایش بازافت نفت خواهد بود. به طور خلاصه، حجم کل بازار عملیات شکافت هیدرولیکی از نظر پولی به ۵۷۷,۳ میلیارد روبل (حدود ۷,۸ میلیارد دلار) تا سال ۲۰۳۰ خواهد رسید، و سهم عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای ۸۱,۴٪ خواهد بود.

۴-۹-۴- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در چین

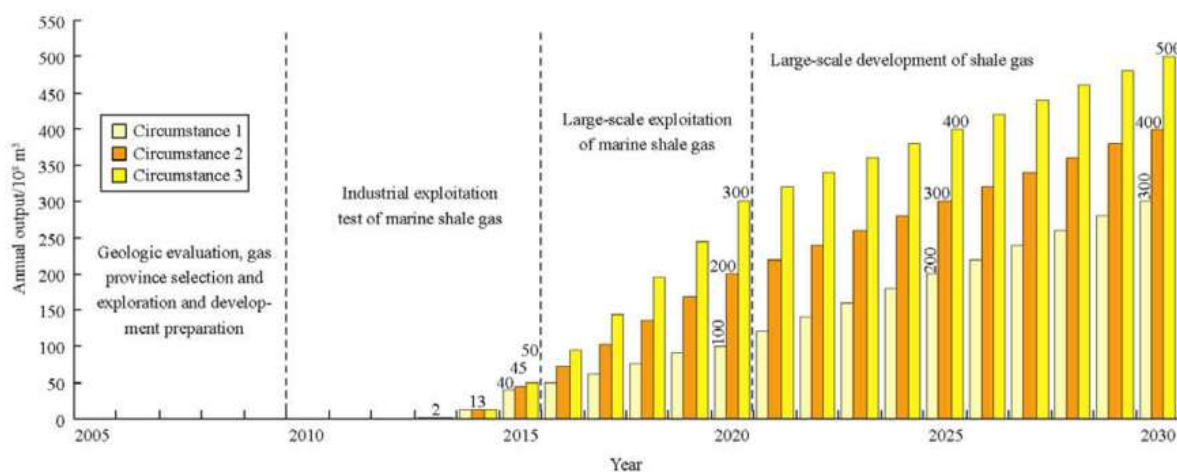
به طور خلاصه، چشم انداز گاز شیل در چین می‌تواند سه سناریوی قوی، متوسط و ضعیف داشته باشد.

سناریوی ضعیف یا ۱: فناوری‌ها و تجهیزات کلیدی برای اکتشاف و توسعه گاز شیل توسعه می‌یابند در حالی که قیمت گاز ثابت نگه داشته شده است، یارانه بازار و سیاست تا حدی اعمال می‌شود، و ساخت تأسیسات سطحی تا حدی انجام می‌شود.

سناریوی متوسط یا ۲: فناوری‌ها و تجهیزات کلیدی برای اکتشاف و توسعه گاز شیل پیشرفت‌های بزرگی دارند، قیمت گاز به طور پیوسته افزایش می‌یابد، بازار نسبتاً توسعه یافته است، یارانه اساساً اعمال شده است، و ساخت تأسیسات سطحی اساساً کامل شده است.

سناریوی قوی یا ۳: فن‌آوری‌ها و تجهیزات کلیدی برای اکتشاف و توسعه گاز شیل پیشرفت‌های همه جانبه‌ای دارند، قیمت گاز همچنان در حال افزایش است، سیاست‌های حمایتی به طور کامل اعمال می‌شود، و ساخت تاسیسات سطحی انجام می‌شود.

برای این سه سناریوی متفاوت میزان گاز شیل تولیدی چین برای سال‌های آینده در یک نمودار ارائه شده است (شکل ۴-۲۷). بر طبق این نمودار در صورت وقوع سناریوی قوی ۳ میزان گاز شیل تولیدی در سال ۲۰۳۰ برابر ۵۰ میلیارد متر مکعب است که این میزان برای سناریوی ۲ و ۱ به ترتیب برابر ۴۰ میلیارد و ۳۰ میلیارد متر مکعب خواهد بود. از آنجایی که این مطالعه در سال ۲۰۱۶ انجام گرفته است با مراجعه به آمار گاز شیل تولیدی چین در سال ۲۰۲۰ که برابر ۲۰ میلیارد متر مکعب بوده است می‌توان نتیجه گرفت که پیش بینی انجام گرفته برای این سال در شرایط متوسط یا شرایط ۲ رخ داده است.



شکل ۴-۲۷- پیش بینی تولید گاز شیل در چین تحت سه سناریوی مختلف توسعه و قیمت گاز (Caineng et al., 2016)

۵- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی

از آنجاییکه کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در جهان امروز مختص به صنعت نفت و گاز نمی‌باشد، در این گزارش، به منظور آشنایی و نشان دادن اهمیت دستیابی به این فناوری در دو زیر بخش شامل کاربردها در صنعت نفت و کاربردها در صنایع دیگر به بحث در این زمینه خواهیم پرداخت:

۵-۱- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنعت نفت

کاربردهای شکافت هیدرولیکی را می‌توان از منظر مفهومی و تعاریف شناخته شده مهندسی مخزن در دو دسته (۱) ازدیاد برداشت (۲) بهبود برداشت گنجانید.

در دسته‌ی اول، هدف بطور کلی افزایش ضریب برداشت مخزن و دسترسی به ذخائر جدید هیدروکربنی می‌باشد. حال این افزایش ضریب می‌تواند در مخازنی باشد که قبل از انجام فناوری شکافت هیدرولیکی دارای تولید اولیه یا ثانویه بوده‌اند و یا اینکه پیش از انجام فرآیند شکافت هیدرولیکی به کلی قادر به تولید و استحصال از ذخائر ثبات شده مخزن نبوده‌ایم. در هر دو حالت ذکر شده فوق فرآیند شکافت هیدرولیکی باعث افزایش ضریب برداشت ذخائر هیدروکربنی (شروع برداشت در حالت دوم) می‌شود.

در دسته‌ی دوم، مخزن نفتی پیش از اجرای این فرآیند در حال تولید بوده است و هدف اصلی از اعمال این فناوری بهبود شرایط تولیدی و یا جبران (ترمیم) شرایط تولیدی می‌باشد. در این دسته، الزاما ازدیاد ضریب برداشت اتفاق نخواهد افتاد و دسترسی به ذخائر هیدروکربنی جدید قابل استحصال مد نظر نخواهد بود. در حقیقت، هدف اصلی در این نوع کاربردها تسریع زمان دسترسی به ذخائر قابل استحصال قبلی می‌باشد.

قابل ذکر است که در اجرای برخی از کاربردهای فناوری که در بخشهای زیر تشریح خواهند شد، امکان دستیابی همزمان به هر دو هدف ذکر شده فوق وجود دارد به نحوی که هم هدف بهبود و هم هدف ازدیاد برداشت محقق گردند. البته، بدیهی است که تشخیص و تفکیک اثر این دو هدف به آسانی انجام نخواهد گرفت. با توجه به تعریفها و دسته‌بندی کلی ارائه شده فوق، در ادامه نمونه‌هایی از کاربردهای مختلفی از اجرای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنعت نفت و گاز ذکر می‌گردد (Montgomery, 2015).

۵-۱-۱- مخازن نفت و گاز کم تراوای توسعه نیافته بدلیل صرفه اقتصادی

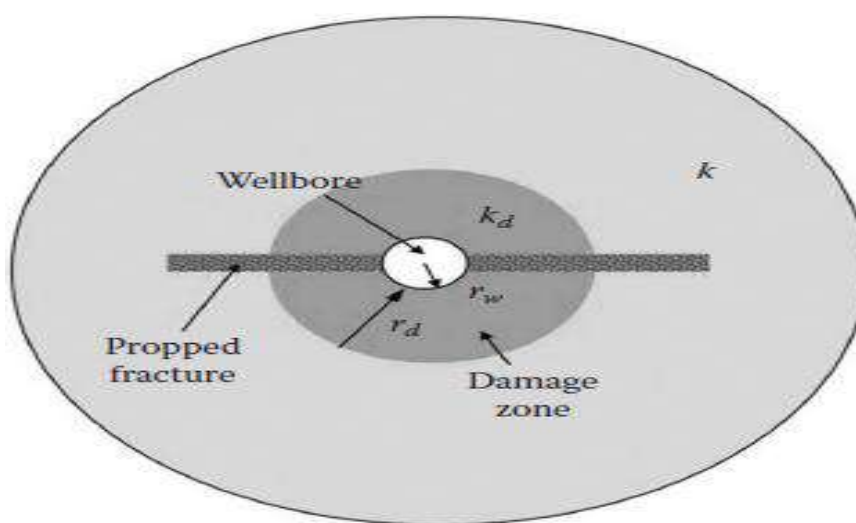
در این دسته از مخازن نفت و گاز، سازندهای مخزنی دارای خصوصیات ضعیف سنگی می‌باشند. در عین حال تولید اولیه و ثانویه از این ذخائر قابل انجام بوده و لیکن این تولید بعلت میزان و سرعت تخلیه مخزن صرفه اقتصادی ندارد. بدیهی است تعیین به صرفه بودن اقتصادی این مخازن بشدت بسته به پارامترهای اقتصادی در زمان تصمیم‌گیری دارد. به هر دلیل، در صورتیکه با اعمال فناوری شکافت هیدرولیکی توسعه مخزنی از نظر اقتصادی توجیه یابد، این دسترسی به ذخائر هیدروکربنی در قالب مفاهیم ازدیاد برداشت و تولید ثالثیه تعریف می‌گردند. بعنوان نمونه، مخازن سازند ایلام کشور در بعضی میادین در حال حاضر ذخائر اثبات شده‌ای می‌باشند که بعلت به صرفه نبودن از لحاظ اقتصادی قابل استحصال نیستند چنانچه با استفاده از این فناوری بعنوان یک روش ازدیاد برداشت می‌توانند قابلیت تولید پیدا کنند (Speight, 2016).

۵-۱-۲- مخازن نفت و گاز نامتعارف شیل

استحصال از ذخائر نفت و گاز شیل (Tight gas and Oil Shale) و انقلاب ایجاد شده در این زمینه در کشور های مختلف دنیا با استفاده از این فناوری، به وقوع پیوسته است. اکتشافات این ذخائر عظیم بدون اعمال این فناوری ناممکن بوده و ذخائر اکتشافی قبلا در دسته ذخائر قابل استحصال قرار نمی‌گرفتند. بدین ترتیب کاربرد این فناوری در مخازن شیلی بطور یقین با هدف ازدیاد برداشت و دسترسی به ذخائر جدید صورت می‌گیرد.

۵-۱-۳- ترمیم آسیب‌های سازندی - پشت سر گذاشتن ناحیه‌ی آسیب دیده‌ی اطراف چاه^{۲۸}

با گذشت زمان و تولید از مخازن هیدروکربنی، ناحیه‌ی اطراف چاه آسیب دیده و تراوایی آن نسبت به نواحی دور از چاه، کاهش می‌یابد. آسیب ناشی از نفوذ سیالات حفاری و تکمیل چاه، به درون سازند در محدوده اطراف چاه، ساده ترین عامل ایجاد آسیب است. سیالات حفاری، حامل ذرات و مواد جامدی هستند که می‌توانند باعث انسداد حفرات سنگ مخزن گردند. از طرف دیگر این سیالات به دلیل تفاوت و ناسازگاری که با سیالات درجای مخزن دارند، تعادل ترمودینامیکی مخزن را مختل می‌نمایند. از بین رفتن تعادل مخزن واکنش‌های شیمیایی را باعث خواهد شد که منجر به تشکیل رسوب‌های آلی و معدنی در حفرات سنگ می‌شوند. از دیگر دلایل آسیب سازند در نواحی اطراف چاه را می‌توان رسوب آسفالتین ناشی از افت فشار اطراف چاه و همچنین دو فازی شدن سیال در این نواحی ذکر کرد. اگر یک شکاف هیدرولیکی با طول بلند ایجاد شود به طوری که سیال برای رسیدن به چاه، نیاز به گذر از آن ناحیه‌ی آسیب دیده را نداشته باشد و از طریق شکاف ها به چاه برسد می‌توان تا حد زیادی تولید را سرعت بخشید. شکافت هیدرولیکی با این هدف، علاوه بر مخازن با تراوایی کم، در مخازن با تراوایی زیاد و با هدف بهبود برداشت نیز انجام می‌شود.



شکل ۵-۱- برقراری ارتباط بین مخزن و چاه از طریق شکاف و دور زدن ناحیه‌ی آسیب داده (Montgomery, 2015)

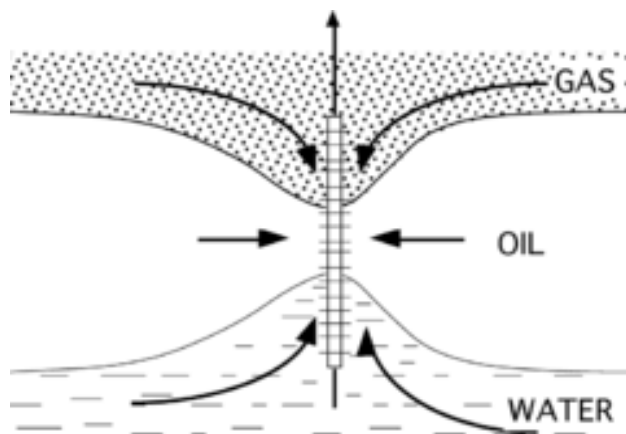
^۲ Damage Bypass

۵-۱-۴- کنترل تولید ماسه

بیشترین افت فشار مخزن، در ناحیه‌ی اطراف چاه اتفاق می‌افتد. چنانچه سازند از تراوایی بالایی برخوردار بوده و دانه‌های آن، به خوبی سیمانی نشده باشد، بر اثر نیروی برشی وارده از طرف سیال، دانه‌های شن از سازند جدا می‌شوند و باعث مسدود شدن گلوگاه‌ها و آسیب تجهیزات سطحی و ته چاهی می‌گردند. شکافت هیدرولیکی با ایجاد مسیرهای با تراوایی بالا و پشت سر گذاردن محدوده اطراف چاه، مقاومت در برابر حرکت سیال را کاهش می‌دهد و در نتیجه افت فشار کمتر و سرعت کمتری در این ناحیه خواهیم داشت و مشکل جدا شدن و جریان یافتن دانه‌های شن تا حد زیادی حل می‌شود. از این رو استفاده از گراول پک به همراه ایجاد شکاف هیدرولیکی باعث بهبود برداشت از مخازن با مشکل تولید دانه‌های شن می‌شود.

۵-۱-۱-۵- کاهش پدیده‌ی مخروطی شدن

با گذشت زمان و تولید از مخزن، افت فشار ایجاد شده در ناحیه‌ی اطراف چاه باعث ایجاد یک مکش شده و گاز و آب لایه‌های بالا و پایین را به سمت چاه تولیدی می‌کشاند. شکل ۵-۲ این پدیده را نشان می‌دهد. وارد شدن آب و گاز به چاه تولیدی، مشکلات فراوانی را در زمینه‌ی جداسازی و تفکیک سیالات تولید شده ایجاد می‌کند. با ایجاد شکاف هیدرولیکی و افزایش تراوایی در ناحیه‌ی اطراف چاه، افت فشار کاهش می‌یابد و این پدیده‌ی مخروطی شدن به تعویق می‌افتد. البته باید به این نکته توجه داشت که اگر لایه‌ی نفتی محصور بین لایه‌های آب و گاز ضخامت کمی داشته باشد و عملیات شکافت هیدرولیکی به صورت کنترل شده انجام نشود، شکاف هیدرولیکی ممکن است به ناحیه‌ی آبی یا گازی وارد شود و مستقیماً آب و گاز را وارد تولید کند. بنابراین استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی در این مورد باید با دقت و احتیاط انجام گیرد.

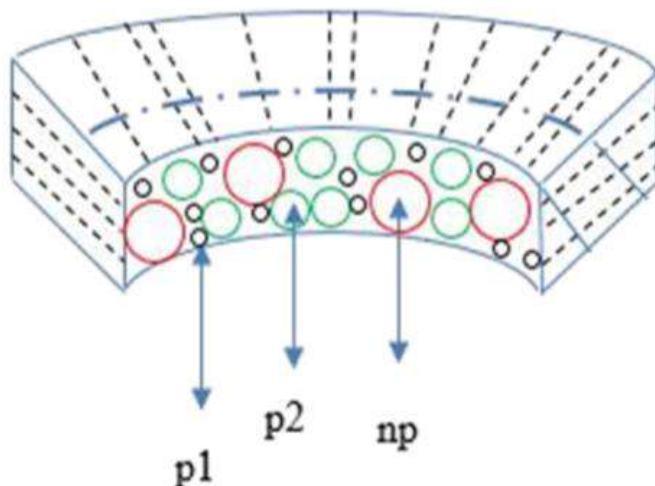


شکل ۵-۲- پدیده‌ی مخروط شدگی آب و گاز (https://eng-info-tech.blogspot.com)

۵-۱-۶- کاهش رسوب آسفالتین

آسفالتین‌ها مولکول‌هایی با اندازه‌ی بزرگ هستند که اگر از فاز نفت جدا شده و رسوب کنند، باعث بسته شدن گلوگاه‌ها و حفرات سنگ می‌شوند. در دمای مخزن، معمولاً فشار اولیه‌ی مخزن بالاتر از حد بالایی فشار برای رسوب آسفالتین است و بنابراین مشکل جدا شدن آسفالتین‌ها از فاز نفت اتفاق نمی‌افتد اما بر اثر افت فشار، مخزن از نظر فشاری وارد ناحیه‌ی ناپایداری ذرات آسفالتین و جدا شدن آن‌ها از فاز نفت می‌شود. با ایجاد شکاف هیدرولیکی و کنترل افت فشار می‌توان زمان ورود به ناحیه‌ی رسوب آسفالتین را برای مخزن به تعویق انداخت. از جنبه‌ی دیگر نیز ایجاد شکاف هیدرولیکی در مسئله‌ی آسفالتین کمک کننده است. باید ذکر کرد که ناپایداری آسفالتین‌ها و جدا شدن آن‌ها از فاز نفت تا زمانی که این ذرات به همراه نفت حمل می‌شوند مشکل ساز نیست. حفره‌های سنگ را می‌توان در مسئله‌ی رسوب ذرات جامد به سه دسته تقسیم کرد: (۱) حفراتی که سایز آن‌ها از سایز ذرات جامد کوچکتر است و بلافاصله مسدود می‌شوند ($p1$) (۲) حفراتی که نسبت اندازه‌ی آن‌ها به اندازه‌ی ذرات ۲-۳ برابر می‌باشد. ذرات با پل زدن در این حفرات باعث مسدود شدن آن‌ها می‌شوند ($p2$). (۳) حفراتی که اندازه‌ی آن‌ها ۶-۸ برابر اندازه‌ی ذرات جامد است. این حفرات هرگز مسدود نمی‌شوند و ذراتی که بر سطح این حفرات می‌نشینند بر اثر ایجاد نیروی برشی ناشی از سرعت، جدا می‌شوند (np)

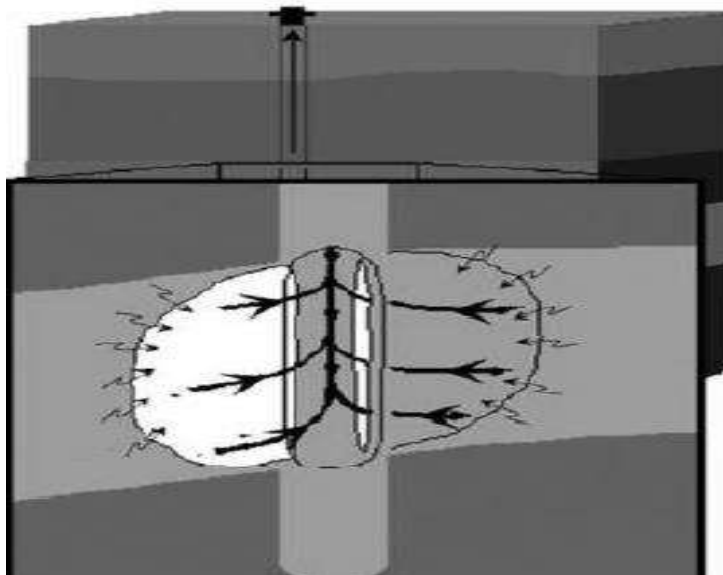
(شکل ۵-۳). شکاف‌ها از دسته‌ی این نوع مسیرها هستند و بنابراین بر اثر رسوب آسفالتین مسدود نمی‌شوند و از این نظر به رفع مشکل آسفالتین مخازن کمک می‌کنند. بنابراین عملیات شکافت هیدرولیکی با این هدف، یک عملیات بهبود برداشت به حساب می‌آید.



شکل ۵-۳ - دسته بندی حفرات سازند. np: حفراتی که هرگز مسدود نمی‌شوند. عملکرد شکاف هیدرولیکی در این دسته قرار می‌گیرد. p1: حفرات مسدود شونده‌ی نوع ۱. p2: حفرات مسدود شونده‌ی نوع ۲ (Ghadimi et al., 2020)

۵-۱-۷- افزایش سطح تماس با مخزن

در مخازن با تراوایی کم، معمولاً ناحیه‌ی خیلی کوچکی در اطراف چاه تحت تاثیر قرار می‌گیرد و وارد تولید می‌شود. برای اینکه بتوانیم از نواحی دورتر از چاه نیز تولید کنیم، باید سطح تماس با مخزن را افزایش دهیم (شکل ۵-۴). نقش شکاف‌ها در این نوع مخازن، ایجاد دسترسی به نواحی و ذخایر دورتر مخزن است. شکافت هیدرولیکی در این مخازن، می‌تواند یک عملیات ازدیاد برداشت محسوب گردد.



شکل ۵-۴- افزایش دسترسی چاه به نقاط دوردست مخزن بر اثر شکاف زنی (Montgomery, 2015)

۵-۲- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنایع غیر نفتی

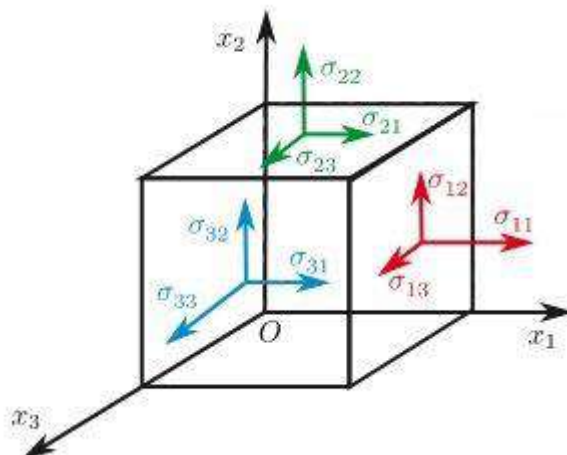
اگرچه مهمترین کاربرد فناوری شکافت هیدرولیکی در صنایع نفت و گاز می‌باشد و بیشترین پیشرفت صنعت شکافت هیدرولیکی در زمینه استحصال هیدروکربن بوده اما در سایر زمینه‌ها و صنایع دیگر نیز کاربرد دارد. امروزه انسان به دنبال استخراج منابع و استفاده از منابع زمین بوده و لذا هر روشی که با کمترین هزینه او را به این هدف نزدیک کند استفاده خواهد شد. جدول ۵-۱ خلاصه ای از کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنایع غیر از نفت و گاز را نشان می‌دهد. در انرژی ژئوترمال، آبهای زیرزمینی و معدنکاری از شکافت هیدرولیکی استفاده می‌شود. همچنین برای تزریق پساب‌های صنعتی و هسته‌ای یا مطالعات زلزله از داده‌های شکافت هیدرولیکی استفاده می‌شود. در زیر شرح مختصری از این کاربردها آورده شده است:

جدول ۵-۱- کاربردهای غیر نفتی فناوری شکافت هیدرولیکی.

نوع کاربری	حجم تزریق (لیتر)	فشار	ایجاد ترک	گسترش ترک	پروپانت	افزودنی
تعیین تنش زمین	< 107	$> 15 \text{ Ksi}$	دارد	محدود	ندارد	ندارد
چاه های آب	< 103	$\text{Psi } 3000 >$	به ندرت	دارد	گاهی اوقات	ندارد
معدنکاری	۱۰۶	$> 10 \text{ Ksi}$	دارد	$> 1000 \text{ m}$	گاهی اوقات	ندارد
ژئوترمال	۱۰۷	$15 \text{ Ksi} <$	دارد	دارد	دارد	دارد
تزریق پساب صنعتی و هسته ای	۱۰۶	$> 5 \text{ Ksi}$	دارد	دارد	گاهی اوقات	گاهی اوقات

۵-۲-۱- تعیین وضعیت تنش منطقه

تعیین وضعیت تنش در یک منطقه برای مطالعات زلزله و گسل، ساخت سازه های مهم (مانند تاسیسات هسته ای)، حفر چاه در زمین یا بطور کلی هر گونه برداشت، تزریق، جابجایی در پوسته زمین که موجب تغییر در تعادل تنش زمین می شود، صورت می گیرد. تعریف تنش نیرو بخش بر واحد سطح است که کمیتی تانسوری می باشد. درون پوسته زمین سه تنش اصلی داریم که به صورت $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ هستند. (شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵- تنش اصلی درون زمین ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

چگونگی وضعیت تنش موجود در توده سنگ، قبل و بعد از حفر سازه‌های زیر زمینی، به حالت و چگونگی تنش برجای اولیه مربوط می‌شود که برای اندازه‌گیری آن روش‌هایی ارائه شده است و در حالت کلی به دو روش تئوری (روابط تخمینی) و مستقیم (عملی) تقسیم بندی می‌شوند. در اکثر موارد، تنش برجای قائم از روابط تئوری قابل محاسبه است، اما این روش‌ها برای تخمین تنش‌های برجای افقی مقبولیت چندانی ندارد و در موارد مهم و تاسیساتی، از روش‌های مستقیم برای تخمین تنش‌های برجای افقی استفاده می‌شود. از میان روش‌های مستقیم، روش شکافت هیدرولیکی مطمئن‌ترین روش برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا در اعماق زیاد می‌باشد. این روش از لحاظ مبانی تئوری و انطباق با نتایج آزمایشگاهی و عاری بودن از مشکلات مرتبط با روش‌های مغزه‌گیری، نسبت به روش‌های دیگر دارای امتیاز است و بطور گسترده‌ای در حوزه‌های علوم زمین به کار برده می‌شود.

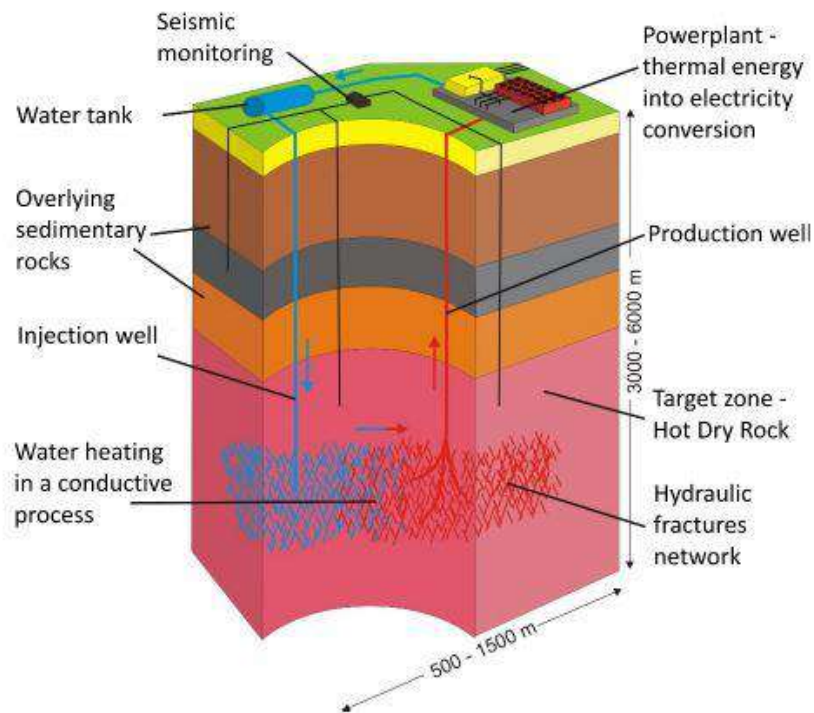
۵-۲-۲- انرژی ژئوترمال

انرژی زمین گرمایی یک منبع انرژی تجدید پذیر است و همچنین به عنوان منبع انرژی پاک شناخته می‌شود، زیرا گازهای گلخانه‌ای را که به انسان‌ها و محیط زیست آسیب می‌رسانند، تولید نمی‌کند. در این انرژی،

گرما از نقاط کم عمق و عمیق و از سنگ‌ها و سیالات گداخته (ماگما) که دمای بسیار زیادی دارند و کیلومترها زیر زمین هستند نشأت می‌گیرد. انرژی زمین گرمایی بر خلاف سایر انرژی‌های تجدید پذیر محدود به فصل، زمان و شرایط خاصی نبوده و بدون وقفه قابل بهره برداری می‌باشد.

برای استحصال انرژی ژئوترمال با حفر چاه در بعضی از مناطق خاص زمین می‌توان آب گرم از زمین استخراج کرد. در سیستم‌های ساده ژئوترمال، آبهای سطحی با نفوذ به درون زمین پس از تماس با سنگهای گرم دمای آن افزایش یافته و سپس بسمت چاه تولیدی جریان پیدا می‌کنند. البته بعضی از این چاه‌ها دارای بخار آب نیز می‌باشند که در تولید برق از آن استفاده می‌شود. اما سیستم انرژی‌های ژئوترمال پیشرفته^۹ (EGS) به این صورت می‌باشد که آب با دمای پایین از یک چاه تزریق شده پس از عبور از میان سنگهای دما بالا به چاه دیگری می‌رسند که آب با دمای بالا از آن استخراج می‌شوند. لذا برای عبور آب از چاه تزریق تا رسیدن به چاه استخراج نیاز به یک شبکه متخلخل و تراوا می‌باشیم. به همین منظور یک شبکه شکستگی در بین دو چاه برای ایجاد تراوایی لازم و بسیار کارآمد می‌باشد. در نتیجه فناوری شکافت هیدرولیکی درون چاه بمنظور ایجاد جریان کنترل شده بین دو چاه لازم و ضروری است. با انجام شکافت هیدرولیکی در هر دو چاه می‌توان تراوایی قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کرد که آب در فاصله بین دو چاه در زمانی مناسب به دمای مورد نظر برسد (شکل ۵-۶).

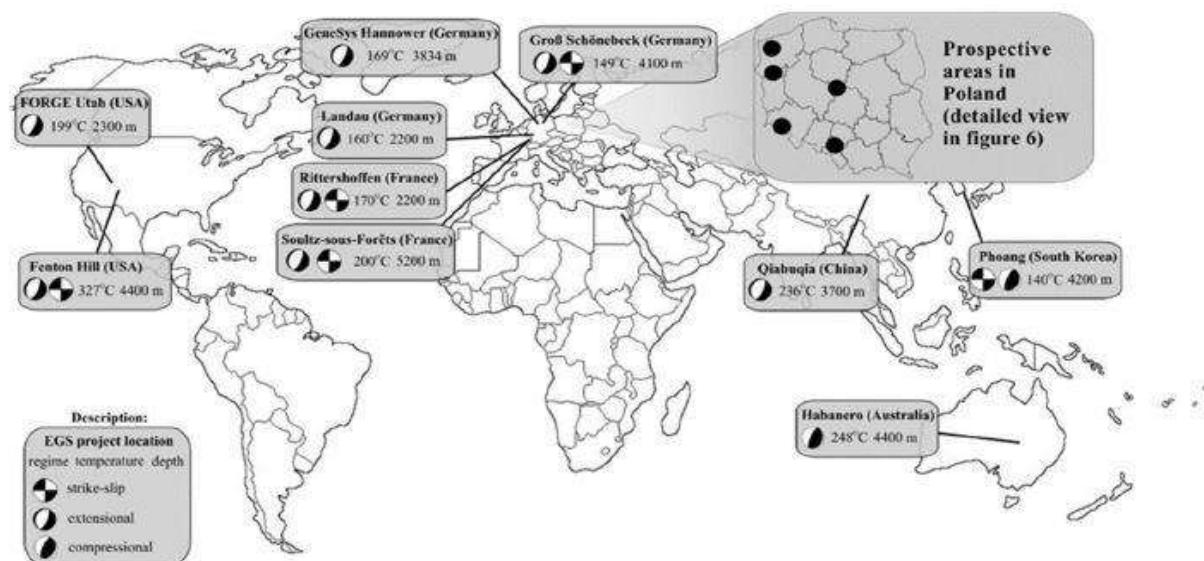
^۹ Enhanced Geothermal System



شکل ۵-۶- نمایی از یک سیستم ژئوترمال پیشرفته که چاه تزریق و چاه استخراج توسط شکافت هیدرولیکی برانگیخته شده

اند (Moska et al. 2021).

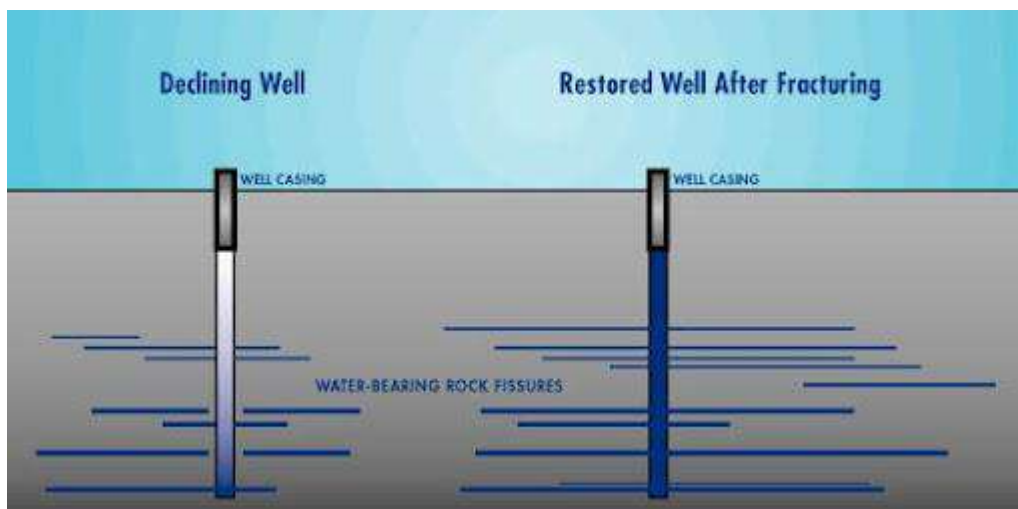
این سیستم روز به روز در دنیا در حال گسترش می‌باشد در حالی که کشورهای شمال اروپا بیشترین سرمایه گذاری را داشته‌اند (شکل ۵-۷).



شکل ۵-۷- نقشه کشورهایی که در سیستم ژئوترمال پیشرفته سرمایه گذاری کرده اند و در چاه‌های تزریق و استخراج شکافت هیدرولیکی انجام داده‌اند (Moska et al. 2021).

۵-۲-۳- آب زیرزمینی

برداشت سیالات از سنگ‌های رسوبی ملزم به وجود تخلخل و تراوایی در سنگ است. برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی نیازمند تراوایی در سنگ مخزن سفره آب زیر زمینی است که در نتیجه آب بسمت چاه تولیدی حرکت کند. یکی از روشهایی که می توان تراوایی سنگ را افزایش داد ایجاد شکاف هیدرولیکی در آن می‌باشد (شکل ۵-۸). فناوری شکافت هیدرولیکی در سفره های آب زیرزمینی معمولاً به سه روش انجام می‌گیرند:



شکل ۵-۸- شکافت هیدرولیکی در چاه های آب زیر زمینی

۵-۲-۳-۱- روش باز کردن و تزریق با فشار سیال^{۲۰}

یک روش رایج در چاه های آب زیر زمینی می باشد که در سازندهای دارای شکستگی طبیعی با استفاده از فشار سیال شکستگی های طبیعی سازند باز خواهند شد. پس از اینکه شکستگی با فشار سیال باز شد رسوبات (ماسه) همراه با سیال وارد شکستگی شده تا پس از افت فشار شکستگی مجددا بسته نشوند. این روش معمولا در سنگهای آهکی کریستالین و دولومیت های شکسته انجام می شود. فشار سیال در این حالت باید به اندازه ای باشد تا بر فشار لیتواستاتیک غلبه کند. از آنجایی که سنگ دارای شکستگی قبلی می باشد نیاز به غلبه بر مقاومت کششی سنگ نیست.

۵-۲-۳-۲- روش باز کردن و تزریق با فشار سیال و پروپانت^{۲۱}

این روش در سنگهای رسوبی درز و شکاف دار، اجزای سنگ بصورت دانه های بزرگ و سیمان شدگی کم کاربرد دارد. فشار سیال تزریقی باید در حدی باشد که بر فشار لیتواستاتیک غلبه کرده اما سنگ فاقد مقاومت

^{۲۰} Jack and Flush

^{۲۱} Jack and Prop

کششی باشد. با اعمال فشار سیال درز و شکافها و قطعات سیمانی شده سنگ باز شده سپس پروپانت همراه با سیال وارد فضاهای خالی شده تا پس از افت فشار مانع بسته شدن درز و شکافها شوند. در این روش سیال تزریقی برای حمل پروپانت شبیه سیال تزریقی در چاههای نفتی می‌باشد. ولی در روش قبلی ترکیب سیال به ترکیب آب شبیه‌تر بود است (چگالی کمتر).

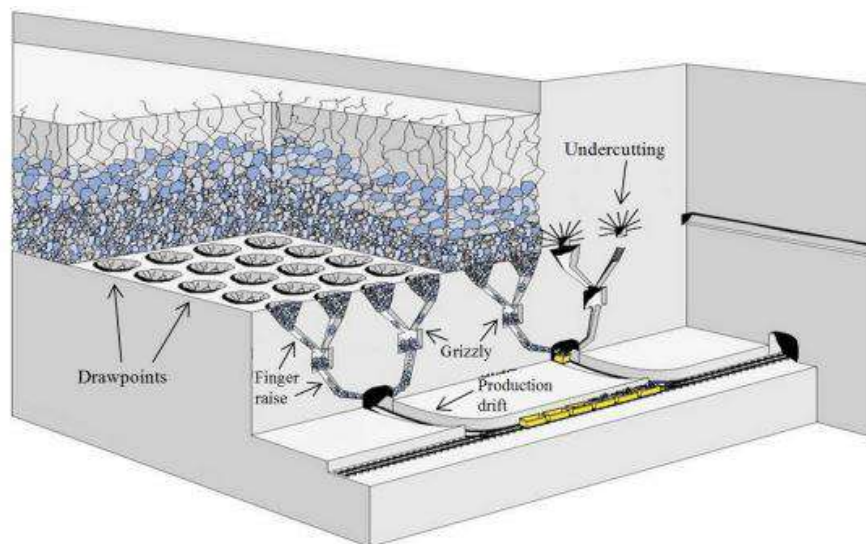
۵-۲-۳- روش ایجاد شکاف و تزریق پروپانت^{۲۲}

این روش کاملاً شبیه اجرای طرح شکافت هیدرولیکی در میدین هیدروکربنی می‌باشد. در این روش با استفاده از فشار سیال در سنگ شکستگی ایجاد می‌شود. فشار سیال باید در حدی باشد تا بر فشار لیتواستاتیک و مقاومت کششی سنگ غلبه کند. سپس پروپانت با سیالی که گرانروی خاصی دارد به درون سازند تزریق می‌شود. از این روش معمولاً در سنگهای رسوبی دانه ریز (مادستون) با تراوایی کم استفاده می‌شود.

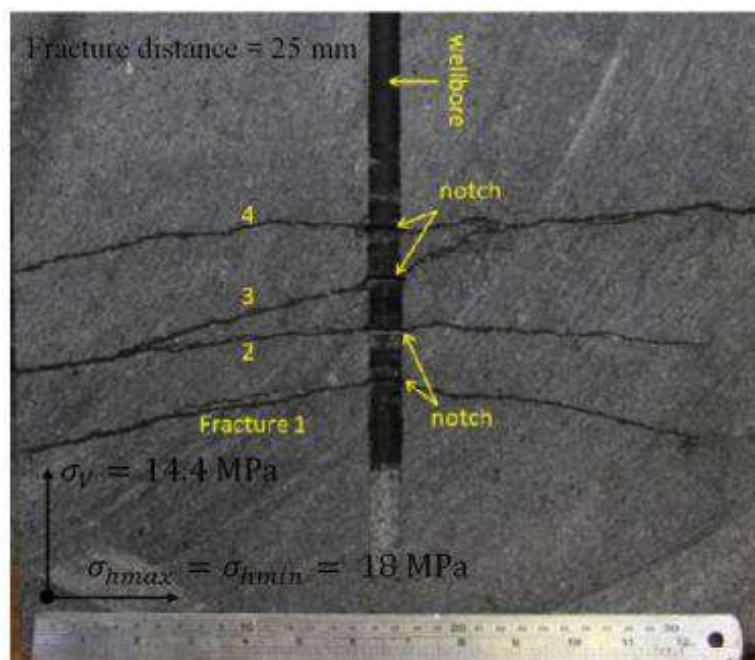
۵-۲-۴- معدنکاری

یکی از روش‌های استخراج معادن زغال سنگ، سنگهای فلزی و کانی‌های سخت استفاده از ایجاد شکست درون سنگ به منظور ایجاد بلوک در معادن می‌باشد. به همین منظور گمانه‌هایی در معادن حفر کرده و سپس فرایند شکافت هیدرولیکی باعث گسترش شکستگی در سنگ می‌شود. پس از ایجاد شکست در سنگ، بلوکها از طریق حفره‌های قیفی شکل توسط نیرو جاذبه بسمت ریل‌های استخراج انتقال می‌یابند (شکل ۵-۹). این روش معدن کاری یک روش تولید پیوسته، با نرخ تولید بالا و هزینه کم است. در این روش گرچه گمانه قطر کمی دارد (شکل ۵-۱۰) اما از پروپانت‌های بزرگ برای جدایش بلوکها استفاده می‌شود (شکل ۵-۱۱). معادن زیادی در دنیا با استفاده از شکافت هیدرولیکی استخراج می‌شوند که لیست آن تا سال ۲۰۱۲ در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

^{۲۲} Fracture and Prop



شکل ۵-۹- استخراج معادن با استفاده از شکافت هیدرولیکی به منظور ایجاد بلوکهای کوچک (Adams J. and Rowe, 2013).



شکل ۵-۱۰- شکافهای ایجاد شده بر اثر فناوری شکافت هیدرولیکی در یک گمانه کوچک.



شکل ۵-۱۱- پروپانت سبز رنگ که شکاف را پر کرده است.

جدول ۵-۲- لیست معادنی که تا سال ۲۰۱۲ در آن فناوری شکافت هیدرولیکی انجام شده است.

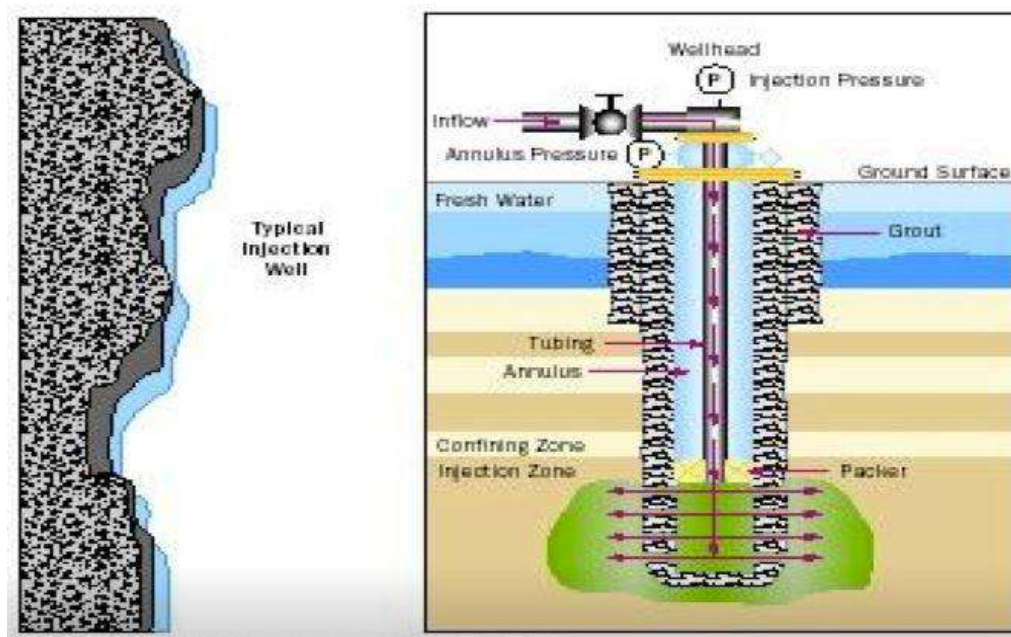
by (Hem and Caldwell, 2012).

Mine site	Location	Commodity
Argyle	Australia	Diamond
Cadia East	Australia	Copper & gold
Mount Keith	Australia	Nickel
Mount Lyell	Australia	Copper
Northparkes	Australia	Copper & gold
Telfer	Australia	Gold
Debswana	Botswana	Diamond
New Afton	Canada	Gold
Andina	Chile	Copper
Chuquibambilla	Chile	Copper
El Teniente	Chile	Copper
El Salvador	Chile	Copper
Tongkuangyu	China	Copper
Freeport DOZ	Indonesia	Copper
Grasberg	Indonesia	Copper
Oyu Tolgoi	Mongolia	Copper & gold
Didipio	Philippines	Copper & gold
Santo Tomas II	Philippines	Copper & gold
Cullinan	South Africa	Diamond
Finsch	South Africa	Diamond
Kimberley	South Africa	Diamond
Koffiefontein	South Africa	Diamond
Palabora	South Africa	Copper
Bingham Canyon	USA	Copper
Climax	USA	Molybdenum
Henderson	USA	Molybdenum
Resoluton	USA	Copper & Molybdenum
Questa	USA	Molybdenum
San Manuel	USA	Copper
King	Zimbabwe	Asbestos
Shabani	Zimbabwe	Asbestos

۵-۲-۵- تزریق پساب صنعتی و هسته‌ای به درون زمین

فاضلاب هسته‌ای سطح بالا عموماً به صورت محلول‌های اسیدی حاصل از پردازش شیمیایی سوخت مصرف شده در فعالیت‌های هسته‌ای هستند. در سال‌های اولیه توسعه‌ی صنایع هسته‌ای، با تبخیر این فاضلاب، حجم آن را کاهش داده و سپس در مخازن زیر زمینی انبار می‌کردند. مسئله انبار کردن فاضلاب‌های سطح بالا به خاطر بالا بودن تولید گرمای واپاشی مشکلات پیچیده‌ای در صنعت هسته‌ای ایجاد کرده بود. همچنین پساب‌های صنعتی که آلوده به عناصر سمی و سرطان‌زا می‌باشند را نمی‌توان در محیط رها کرد. لذا بطور کلی پساب‌های صنعتی و هسته‌ای را که بشدت بر سلامت انسان و محیط زیست خطرناک هستند به درون زمین تزریق می‌کنند. چاه تزریقی این پساب، آبهای عمیق بوده تا به چرخه سفره‌های زیر زمینی برنگردند (شکل ۵-۱۲). لذا محدوده تزریق این فاضلابها مشابه چاه‌های نفتی می‌باشد. برای تزریق این پسابها در چاه بمنظور ایجاد تراوایی در سنگ از فناوری شکافت هیدرولیکی استفاده می‌کنند. پس از حفر چاه توسط ایجاد شکافت هیدرولیکی تراوایی را در محدوده خاصی از چاه افزایش داده سپس تزریق انجام می‌شود. فناوری شکافت هیدرولیکی ممکن است چندین بار در طول تزریق انجام شود.

DIAGRAM OF INJECTION WELL



شکل ۵-۱۲- تزریق پساب صنعتی به درون زمین با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی (Zhang and Hascakir, 2021).

۵-۳- کاربردها و ضرورت استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی در ایران

چنانکه در قسمتهای قبلی کاربردهای متنوع فناوری شکافت هیدرولیکی بیان شدند مشخص گردید که فناوری شکافت هیدرولیکی قابلیت بهبود و ازدیاد برداشت از مخازن هیدروکربنی متعارف و نامتعارف را داراست. به ادعان متخصصین امر، فناوری شکافت هیدرولیکی به بلوغ کافی رسیده و موثر بودن آن در مقایسه با بسیاری از روشهای دیگر ازدیاد/ بهبود برداشت محل بحث و مناقشه نیست. این روش بر خلاف تکنیکهای ازدیاد برداشت فرآیندی زود بازده است که به سرعت نقش خود را در افزایش برداشت از مخزن ایفا می‌کند.

از طرفی، این حقیقت که غالب مخازن ایران وارد نیمه‌ی دوم عمر خود شده و شاهد کاهش تولید و افت فشار قابل ملاحظه در آن‌ها هستیم قابل کتمان نمی‌باشد. از این رو، دیگر نمی‌توان با اتکا به مکانیزمهای تولید اولیه، تولید از این مخازن را ادامه داد. همچنین تعداد قابل توجهی از چاههای کشور دارای مشکلات درون چاهی

مانند انواع آسیبهای سازندی، تولید شن، تولید آب و ... هستند. همچنین واقعیتها و محدودیتهای مالی موجود در کشور باعث گردیده است که توسعه مخازن جدید کشور و جایگزینی مخازن قدیمی به کندی انجام گیرد. وجود میادین و مخازن توسعه نیافته بسیار در کشور بدلیل صرفه اقتصادی پایین با استفاده از روشهای متداول توسعه و همچنین مسئله امنیت انرژی برای نسلهای آینده کشور لزوم دستیابی به فناوری شکافت هیدرولیکی را دو چندان مینماید.

۵-۴- محدودیت های زیست محیطی

در فرایند شکافت هیدرولیکی چاههای نفت و گاز مقدار زیادی آب و مواد آلوده به نفت تولید می شوند. این مواد شامل قطعات سنگ، روان کننده های باقی مانده از حفاری، آب و ذرات جامد ماسه حاصل از فرایند شکافت هیدرولیکی می باشند. آلودگی های شکافت هیدرولیکی می توانند حاوی مواد شیمیایی، فلزی و بنزن، اتیلن گلیکل، سولفوریک اسید، نفتالن، یا گاهی مواد رادیواکتیو هم باشند.

بطور کلی انواع آلودگی فناوری شکافت هیدرولیکی به ۳ گروه تقسیم می شوند:

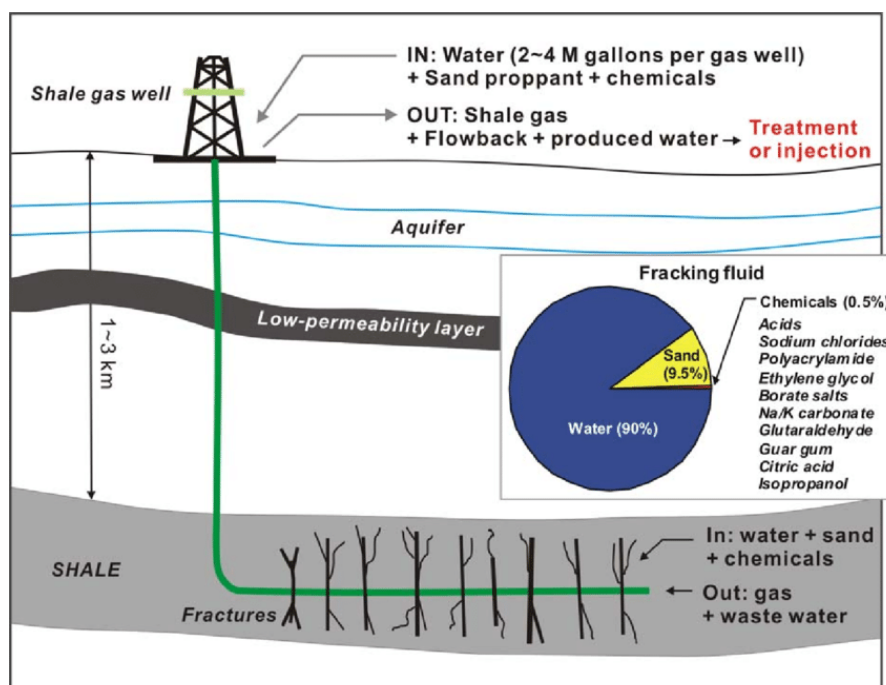
۱- آب برگشتی: از آنجایی که فرایند شکست سنگ با سیال انجام می شود آب برگشتی حاوی مقداری از انواع هیدروکربن های مخزن، سیالات شیمیایی محلول در آب و مواد شیمیایی می باشد (شکل ۵-۱۳ و شکل ۵-۱۴).

۲- آب شور سازند: در اکثر مخازن هیدروکربنی حاوی آب شور هستند که در طی فرایند شکافت هیدرولیکی مقداری از آن خارج می شود.

۳- مواد جامد: ذرات جامدی که همراه با آب پس از عملیات شکافت هیدرولیکی خارج می شوند شامل خرده سنگ، گل حفاری، انواع پروپانت هاست (شکل ۵-۱۵).



شکل ۵-۱۳- استخراج آب برای فرایند شکافت هیدرولیکی (Miskimins et al. 2019)

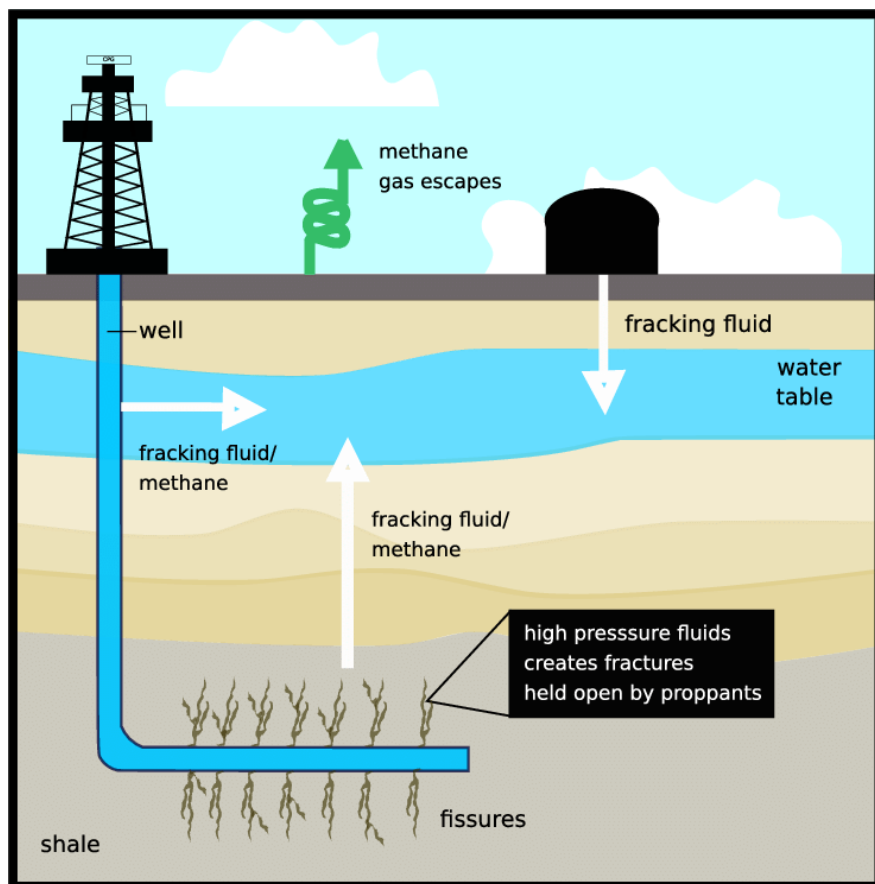


شکل ۵-۱۴- ترکیب سیال پس از عملیات شکافت (Zhang and Hascakir, 2021)



شکل ۵-۱۵- مواد آلوده جامد حاصل از شکافت هیدرولیکی شامل گل حفاری آلوده (Zhang and Hascakir, 2021).

لایه‌های شیلی که حاوی گاز متان هستند و در عمق کم زمین قرار دارند ممکن است در آلودگی آبهای زیر زمینی نقش داشته باشند. چنانچه در عمق کم و در مجاورت لایه شیلی مورد نظر یک لایه آبخوان شیرین وجود داشته باشد احتمال نشت متان از لایه شیلی به آبخوان زیاد می‌باشد. همچنین ممکن است از مخازن سطحی که سیال را در خود نگه می‌دارند به درون زمین نفوذ کرده و موجب آلودگی سفره آب زیر زمینی شود (شکل ۵-۱۶) یا حتی از جداره چاه ممکن است به درون سفره آب زیرزمینی نشت کنند.



شکل ۵-۱۶- استخراج متان از شیل گازی کم عمق (Zhang and Hascakir, 2021).

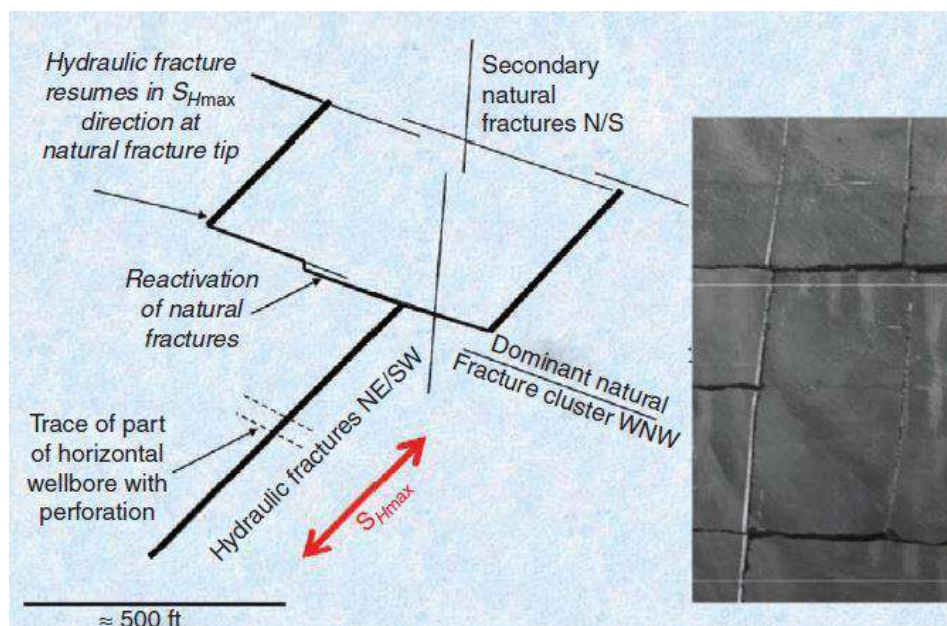
با این وجود اجرای هر طرحی بر روی زمین با آلودگی زیست محیطی همراه می‌باشد ولی راهکارهایی نیز برای کنترل این آلودگی‌ها در محیط زیست وجود دارد که در اجرای عملیات بایستی مورد بحث، بررسی و برنامه ریزی قرار گیرد.

۶- مفاهیم کلی علمی-مهندسی در فناوری شکافت هیدرولیکی

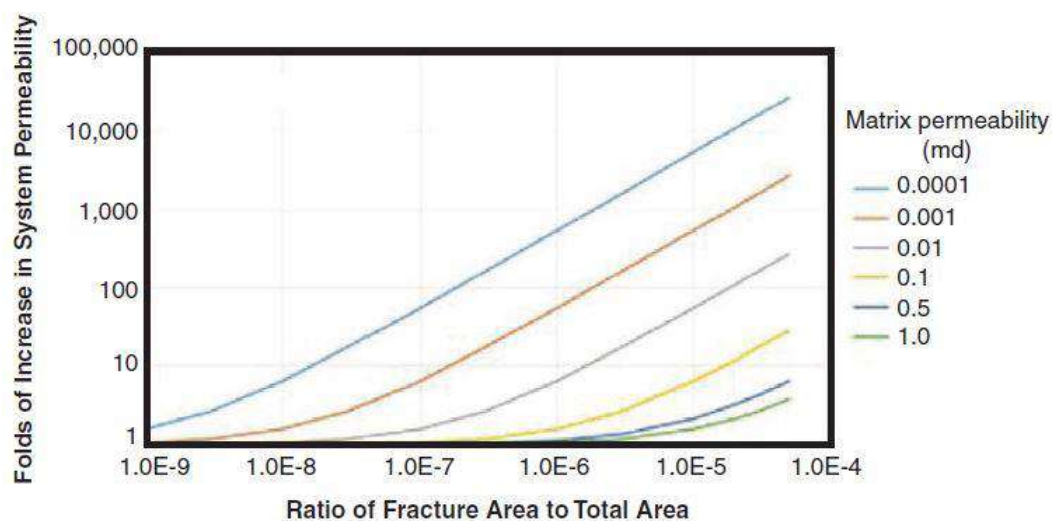
در این بخش از گزارش به ارائه خلاصه‌ای از مفاهیم کلی علمی-مهندسی که در شاخه‌های مختلف علوم زمین و مهندسی درگیر در فناوری شکافت هیدرولیکی مورد نیاز و استفاده قرار خواهند گرفت، صرفاً جهت آشنایی خواننده، می‌پردازیم. لازم به ذکر است که این مفاهیم به تفصیل در فازهای بعدی این طرح و در جهت دستیابی به دانش فنی-اجرایی این فناوری مورد واکاوی و بررسی قرار خواهند گرفت.

۶-۱- مفاهیم زمین شناسی

شکافهای طبیعی سنگ در اثر تنش‌های بزرگ مانند جابجایی پوسته زمین، حرکت گسلها و بالا آمدن پوسته زمین در طول دوران زمان زمین شناسی بوجود می‌آیند. در حالیکه شکاف هیدرولیکی یک تغییر محدود در سنگ است که معمولاً کمتر از ۰/۱ درصد توده سنگ در اطراف چاه را در بر می‌گیرد (Berry and Montgomery, 2015). در این عملیات معمولاً زمین لرزه‌های کمتر از ۳ ریشتر رخ می‌دهد که محسوس نمی‌باشد. تغییرات جزئی در سنگ اغلب موجب باز یا گسترده شدن شکافهای طبیعی یا ایجاد شکاف به منظور ایجاد مسیری برای جریان و افزایش تراوایی سنگ می‌شوند. بطور کلی ایجاد شکاف هیدرولیکی موجب دوباره فعال شدن شکاف طبیعی یا باز شدن شکاف های طبیعی خواهد شد (شکل ۶-۱). شکل ۶-۱ نشان می‌دهد که در اثر شکافت هیدرولیکی در سنگ تعدادی از شکاف طبیعی هم فعال و باز می‌شود. شکل ۶-۲ نشان می‌دهد هر چقدر تراوایی ماتریکس اولیه کمتر باشد فولد افزایش بیشتر است. محور عمودی فولد افزایش را نشان می‌دهد. این فرایند موجب افزایش تراوایی (شکل ۶-۲) و اقتصادی شدن مخازن کم تراوا شده که قبلاً قادر به تولید نبودند.



شکل ۶-۱- دوباره فعال شدن یا باز شدن شکاف طبیعی در اثر ایجاد شکاف هیدرولیکی (Barree et al. 2014).



شکل ۶-۲- تاثیر شکاف بر تراوایی ماتریکس (Barree et al. 2014).

لذا به منظور بهره‌وری حداکثری از فرایند شکافت هیدرولیکی در مخزن ابتدا باید خصوصیات زمین شناسی سازند به درستی شناخته شوند. شناسایی و درک پارامترهای زمین شناسی مانند ارزیابی سازند، مطالعه

ژئومکانیکی، تکتونیک منطقه و فیزیک سنگ اهمیت دارند. بطور کلی داده های مهمی که در مدلسازی فرایند شکافت هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرند در جدول زیر لیست شده اند (جدول ۶-۱).

جدول ۶-۱- داده های مورد نیاز برای مدلسازی شکاف

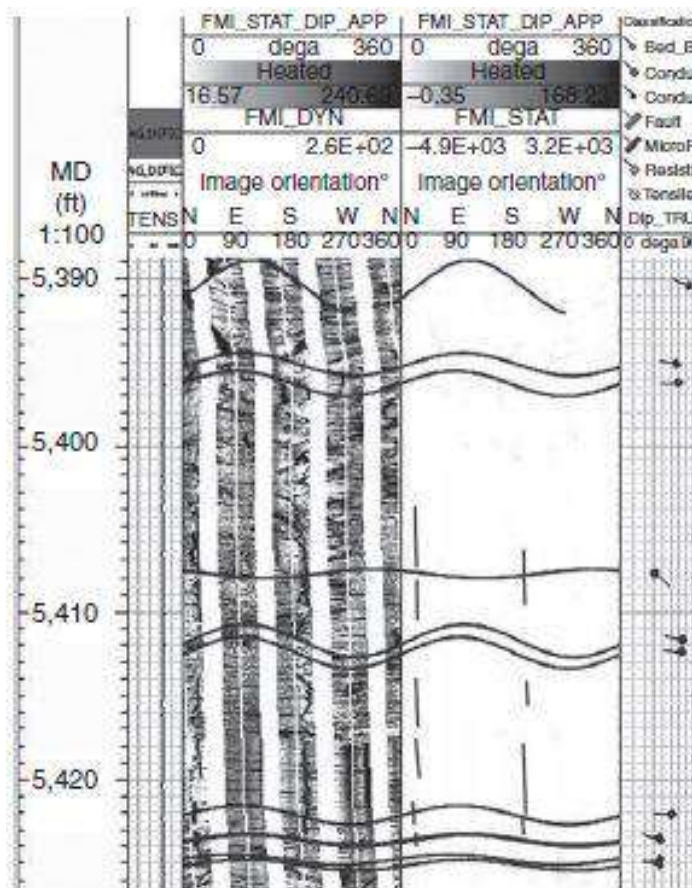
نوع داده	روش های تعیین مقدار داده
مدول های الاستیک سنگ	لاگها (روابط تجربی) و آزمایشات مکانیک سنگ
تنش های درجا	لاگها (روابط تجربی)، آزمایشات درون چاهی، آنالیز موج، گزارش حفاری و تکمیل چاه
اندیس رفتار جریان	گزارش شرکت خدمات دهی
پارامتر هرزروی سیال	تخلخل، تراوایی، آب اشباع شدگی، گزارش شرکت خدمات دهی
خصوصیات پروپانت	گزارش شرکت خدمات دهی
داده مسیر حفاری چاه	برنامه تکمیل چاه
داده های تکمیل چاه	گزارشات تکمیل چاه
شیب و جهت شکستگی های طبیعی	لاگهای تصویری و داده سایزمیک، گزارش حفاری

۶-۱-۱- ارزیابی سازند (نمودارگیری)

نمودارها از نظر کاربردی به دو دسته معمولی و اختصاصی تقسیم می شوند. نمودارهای معمولی شامل نمودارهای گاما، نوترون، چگالی، کالیپر، سرعت موج و نمودارهای تخصصی شامل نمودار 3DSI و NMR و نمودارهای تصویری می باشند. با استفاده از نمودارها بسیاری از خواص مکانیک سنگی مانند مدول یانگ و پوواسون، اندیس شکستگی و چگالی شکستگی را می توان در امتداد چاه با استفاده از نمودارهای معمولی بدست

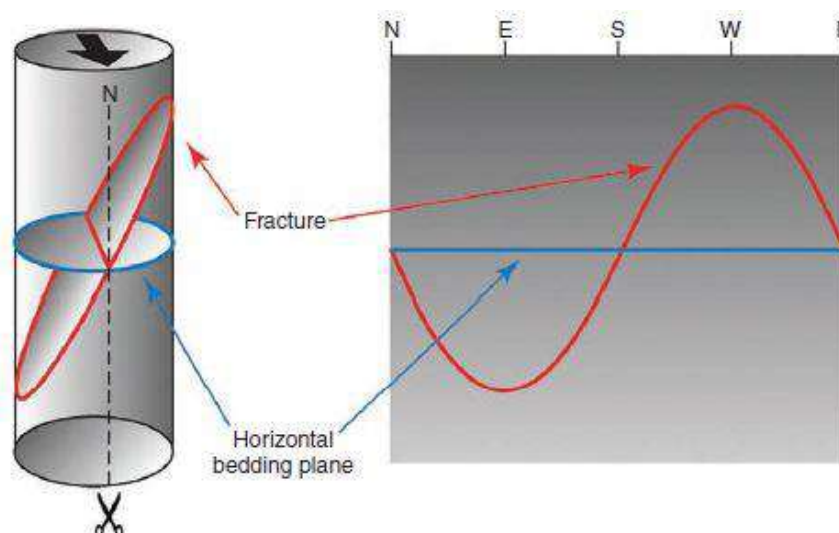
^۳ Nuclear Magnetic Resonance

آورد. نمودار قطر سنج یا کالیپر نیز محل و جهت ریختگی‌های دیواره چاه را نشان می‌دهد که در تعیین جهت تنش در اطراف چاه کاربرد دارد. همچنین با استفاده از نمودار تصویری می‌توان موقعیت شکستگی در چاه، شیب و جهت شکستگی، باز شدگی و درصد تخلخل شکستگی را بدست آورد. برای نمونه در شکل ۳-۶ شکستگی‌ها در امتداد چاه بر روی نمودار تصویری بصورت سینوسی شکل نشان داده شده است. نمودار تصویری با استفاده از ریز مقاومت‌ها موقعیت شکستگی در دیواره چاه را شناسایی کرده سپس صفحه شکستگی را بازسازی می‌کند (شکل ۴-۶).



شکل ۳-۶- لاگ تصویری به منظور شناسایی صفحه شکستگی. خطوط سینوسی نشان دهنده شکستگی‌ها و سوزن‌ها شیب و

آزیموت صفحه شکستگی (Berry and Montgomery, 2015)

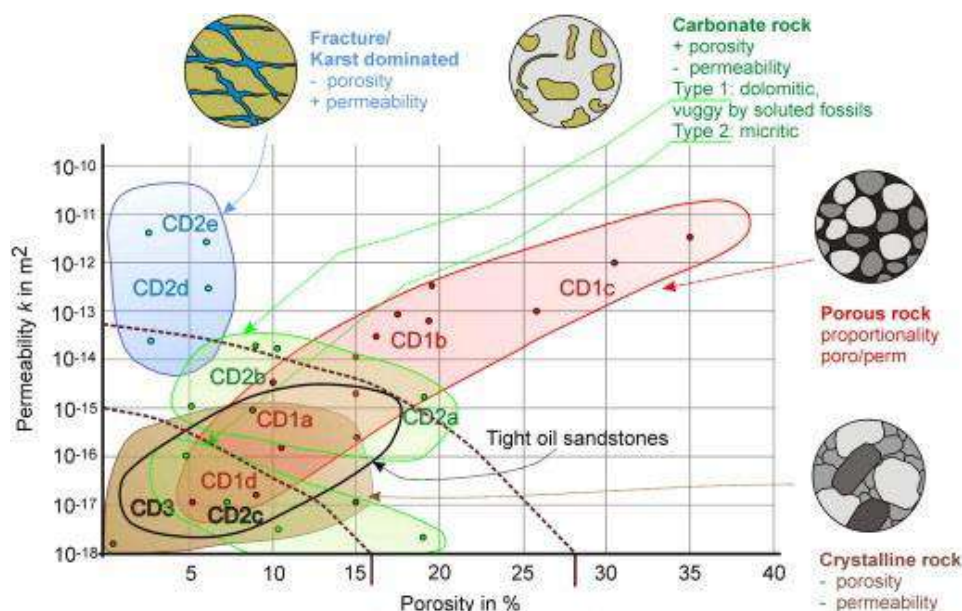


شکل ۴-۶- تبدیل خطوط سینوسی شکل به موقعیت صفحه شکستگی در چاه (Berry and Montgomery, 2015).

شاید بتوان گفت مهمترین کاربرد نمودارهای ذکر شده تشخیص شکستگی‌های طبیعی و خصوصیات آن در چاه باشد. با استفاده از لاگهای الکتریکی، صوتی، چگالی و نوترون نیز می‌توان شکستگی‌های طبیعی سازند را تشخیص داد. همچنین می‌توان بعد از عملیات شکافت هیدرولیکی از چاه نمودارگیری کرد و تغییرات قبل و بعد از عملیات را شناسایی کرد. همین طور نمودار دما یکی از مهمترین نمودارهایی می‌باشد که قبل و بعد از عملیات در چاه برداشت می‌شود.

۶-۱-۲- آنالیز مغزه

یکی از روش‌های شناسایی شکستگی‌های طبیعی در مخزن با استفاده از داده‌های آنالیز مغزه می‌باشد. در آنالیز مغزه داده تخلخل و تراوایی بدست می‌آیند که با استفاده از کراس پلات تخلخل و تراوایی می‌توان نمونه‌ها و زون‌های دارای شکستگی طبیعی را شناسایی کرد (شکل ۶-۵). شکل ۶-۵ انواع منافذ سنگ مخزن را با استفاده از داده آنالیز مغزه نشان می‌دهد. چنانچه زونی در مخزن منافذ نوع ریز تخلخل (microporosity) داشته باشد یک زون کاندید برای عملیات شکافت هیدرولیکی می‌باشد.



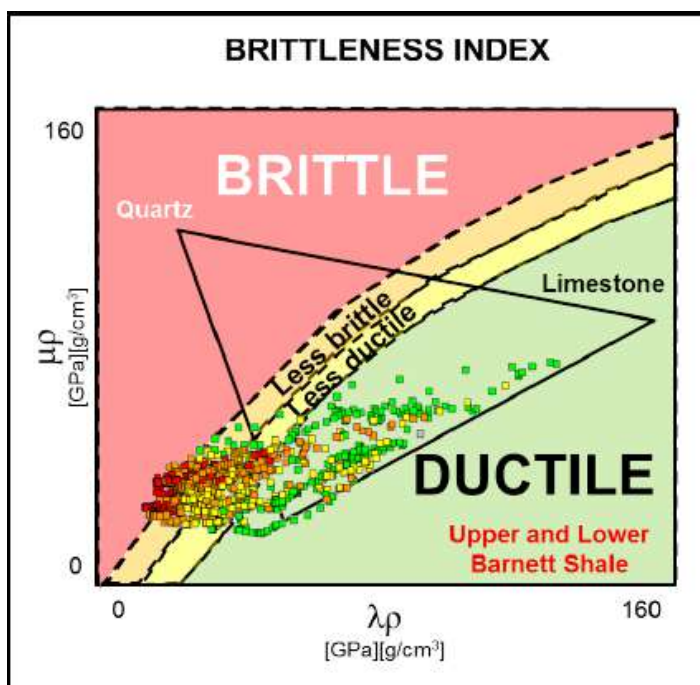
شکل ۵-۶- نمودار تخلخل و تراوایی مغزه که بر اساس توزیع داده‌ها می‌توان منافذ نوع شکستگی و ریز تخلخل و سایر انواع منافذ را در نمونه تشخیص داد.

۳-۱-۶- ژئوفیزیک

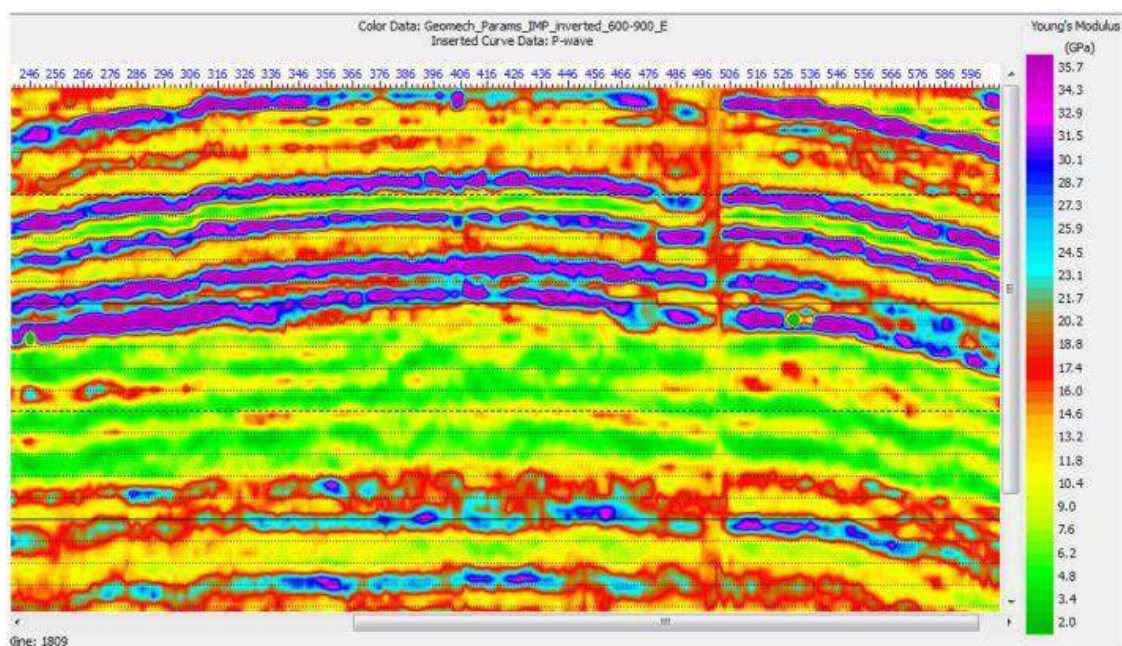
هدف اصلی بررسی‌های ژئوفیزیکی و میکروسایزیمیک، تعیین محل ساختارهای زمین‌شناسی و در صورت امکان اندازه‌گیری ابعاد و ویژگی‌های فیزیکی یا تغییرات فیزیکی آنها قبل و بعد از عملیات شکاف هیدرولیکی می‌باشد. روش‌های ژئوفیزیکی به صورت گسترده‌ای در اکتشاف نفت استفاده می‌شوند. پیشرفت‌های این روش‌ها در اثر گسترش ابزارهای دقیق‌تر و پیچیده‌تر برای کسب اطلاعات و هم‌چنین ظهور کامپیوترهای بسیار سریع برای پردازش داده‌ها حاصل شده است. در واقع داده‌های لرزه‌ای تصاویری از شرایط زیر سطح فراهم می‌کند که در اجرای دقیق‌تر عملیات شکافت هیدرولیکی کمک خواهد کرد. روش‌های مختلف اکتشاف ژئوفیزیکی وجود دارد که در این بخش از روش لرزه‌ای (سایزیمیک) استفاده می‌شود.

با استفاده از عبور موج از درون سنگ و تعیین سرعت موج S و P می توان خصوصیات مکانیک سنگی را تخمین زد. یکسری از روابط فیزیک سنگ تعریف شده‌اند (Perez 2013) که این روابط با استفاده از سرعت موج و چگالی شکننده یا شکل پذیر بودن سنگ را مشخص می‌کنند (شکل ۶-۶). این نمودار برای شیل‌ها استفاده می‌شود. چنانچه نمونه‌های یک زون در محدوده شکل پذیر قرار گیرد کاندید مناسبی برای عملیات شکافت هیدرولیکی نیست. اما اگر نمونه‌های یک زون در محدوده شکننده قرار گیرند کاندید مناسبی برای عملیات شکافت هیدرولیکی در آن لایه شیلی می‌باشد. در واقع روابط تجربی پوروالاستیکی وجود دارد که با استفاده از این روابط می‌توان خصوصیات مکانیک سنگی را تخمین زد. بر همین اساس با استفاده از سکشن‌های سائز میک ۲۰ و ۳۰ در میدان می‌توان زون‌های شکننده و شکل‌پذیر را شناسایی کرد (شکل ۶-۷ و شکل ۶-۸). همچنین با استفاده از داده‌های سائز میک می‌توان در مقیاس میدانی مدول‌های یانگ و پواسون را تخمین زد که اطلاعات ارزشمندی از خصوصیات مکانیک سنگی در مقیاس میدان ارائه می‌دهند. در نتیجه به کمک داده لرزه‌ای می‌توان زون‌های کاندید برای شکافت هیدرولیکی در امتداد چاه و همین‌طور در مقیاس میدانی را شناسایی کرد.

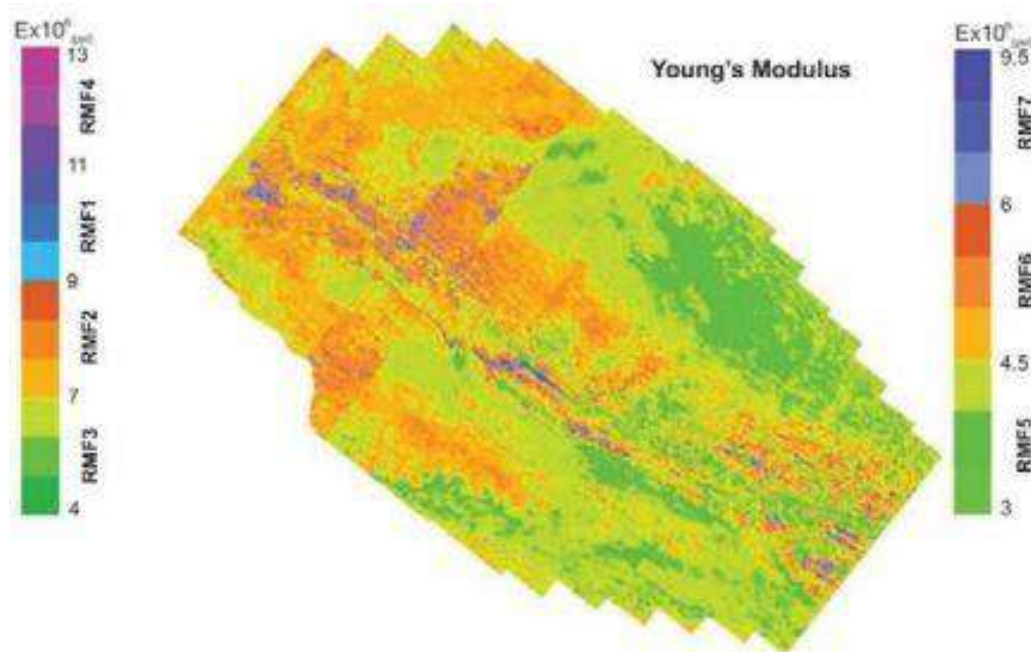
یکی دیگر از کاربردهای ژئوفیزیک در اجرای یک پروژه شکافت هیدرولیکی به عملیات بعد از شکافت برمی‌گردد. بعد از این که عملیات شکافت مخزن اجرا گردید باید با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک بالا (میکروسائز میک) شکاف‌های ایجاد شده در سازند را رصد و پیگیری کرد. در این مرحله نیز ژئوفیزیک در شناسایی شکاف‌های ایجاد شده در مخزن و میزان گسترش آن در جهات جانبی کمک کننده خواهد بود.



شکل ۶-۶- کراس پلات لاندرو-میو رو حاصل از سرعت موج و چگالی سنگ که برای شناسایی زونهای شکل پذیر و شکننده کاربرد دارد (Perez 2013).



شکل ۶-۷- یک مقطع از مدول یانگ تخمین زده شده با داده سائزیمیک (قره چلو ۱۳۹۹)



شکل ۶-۸- نقشه توزیع مدول یانگ در میدان با استفاده از داده لرزه ای ۳D (Gharechelou et al. 2016)

۶-۱-۳-۲ میکروسایز میک

در طی یک عملیات شکافت هیدرولیکی، از تزریق فشار زیاد مایعات به سطح زیرین زمین لرزه‌های بسیار کوچک یا رویدادهای ریزلرزه ای ایجاد می‌شوند. تصور می‌شود که این زمین لرزه‌های کوچک، ناشی از افزایش فشار منفذی ناشی به سنگ‌های اطراف شکافت هیدرولیکی باشد. ضبط و تجزیه و تحلیل مکان از ریزلرزه به تجهیزات تخصصی سنجش لرزه‌ای و الگوریتم‌های پردازش نیاز دارد. تعیین محل و اندازه این ریزلرزه برای تعیین هندسه شکافت هیدرولیکی در سازند استفاده می‌شود. در واقع با استفاده از روش پایش میکروسایز میک می‌توان اطلاعاتی از قبیل طول، ارتفاع، آزمون و موقعیت شکستگی در اطراف چاه به دست آورد. به طور کلی در یک جمله می‌توان گفت پایش عملیات با این روش شامل تصویر برداری دقیق از هندسه مجموعه شکافت‌های هیدرولیکی است که نمای ۴ بعدی شبکه جریان مخزن را فراهم می‌نماید. مزیت این روش در تعیین دقیق

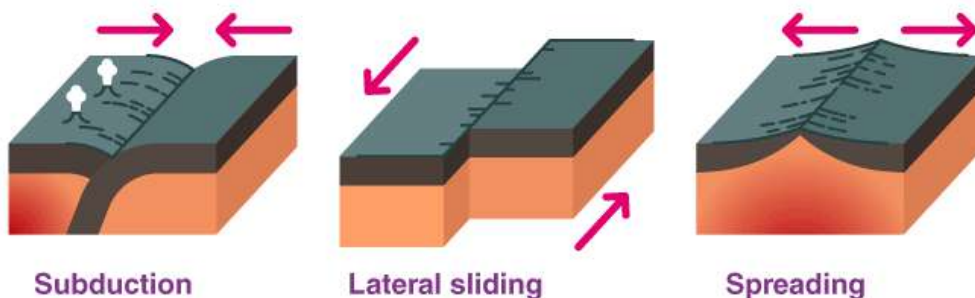
هندسۀ شکستگی در محلی دورتر از چاه است، بنابراین با تغییر در عملیات، پیچیدگی شکستگی میدان در دوردست را می‌توان کنترل و مانیتور کرد.

۶-۱-۴- تکتونیک

تکتونیک منطقه یکی از کنترل‌کننده‌های اصلی پیچیدگی ایجاد شکاف در چاه هدف می‌باشد. تکتونیک پیچیده منطقه و تاریخچه تدفین منجر به ایجاد شکافهای طبیعی در مخزن می‌گردد که این شکافهای طبیعی با شکافهای هیدرولیکی تداخل داشته و پیچیدگی شکاف هیدرولیکی در مخزن را بیشتر خواهد کرد. همچنین تکتونیک کنترل‌کننده مقدار و جهت تنش در میدان می‌باشد. لذا از نظر تکتونیکی سه رژیم تنش (کششی، تراکمی و امتداد لغز) داریم که هر یک سناریوهای متفاوتی در یک میدان دارند.

برای مثال در یک حاشیه منفعل کنار قاره‌ای در اثر جریان ماگمای زیر پوسته، عامل ایجاد کشش در پوسته زمین ایجاد می‌شود (شکل ۶-۹). این کشش در پوسته یک رژیم تنش کششی یا نرمال ایجاد کرده که گسلهای نرمال در آن منطقه گسترش پیدا خواهند کرد. رژیم تنش نرمال همراه با وجود گسلهای نرمال در یک میدان بر نحوه گسترش شکاف هیدرولیکی در چاه مورد نظر تاثیر خواهند داشت.

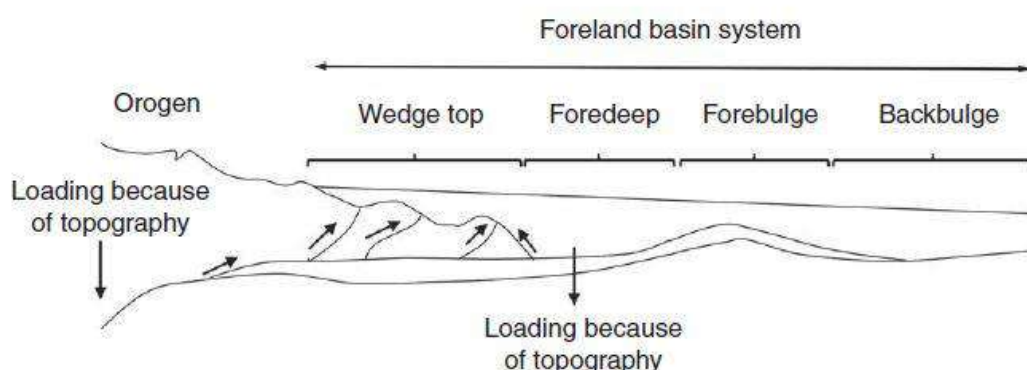
PLATE TECTONICS



شکل ۶-۹- رژیم تنش کششی، امتداد لغز و تراکمی در یک منطقه منفعل کنار قاره‌ای (<https://byjus.com/physics/plate-tectonics>)

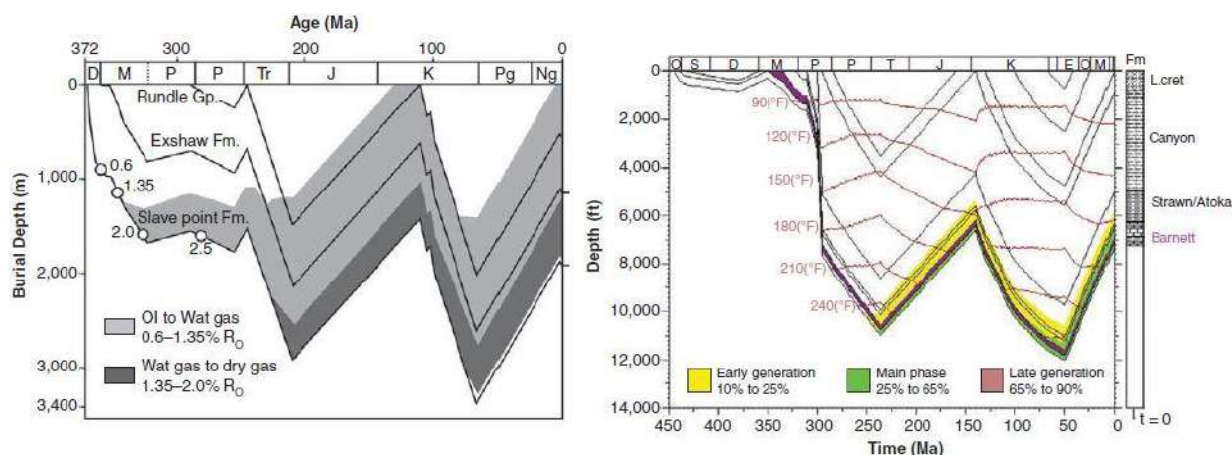
(tectonics)

در یک حوضه پیش بوم که در اثر برخورد صفحات زمین کوهزایی رخ داده (شکل ۶-۱۰) و سپس بر اثر فرسایش کوهها رسوبات وارد حوضه رسوبی شده ممکن است در طول زمان بارها بالا آمدگی یا تدفین شده باشند. این فرایندها موجب گسترش پیچیده شکافتهای طبیعی در سازند خواهد شد. همچنین توزیع تنش و فشار منفذی مخزن نیز تغییر خواهد کرد. در واقع رژیم تنش بر فشار مخزن موثر خواهد بود که بر همین اساس در انتخاب نوع سیال، پروپانت و فشار سیال برای ایجاد شکاف هیدرولیکی تصمیم گیری خواهد شد.



شکل ۶-۱۰- رژیم تنش فشاری موجب کوهزایی و گسلهای معکوس شده (<https://byjus.com/physics/plate-tectonics/>)

همچنین نمودار تاریخچه تدفین یک سازند مخزنی می تواند در گسترش شکستگی های طبیعی در مخزن یا سیمان شدگی شکستگی ها در مخزن اطلاعات مفیدی ارائه دهد. هر چقدر سازند تاریخچه تدفین پیچیده تری داشته باشد یا بعبارتی در طول زمان زمین شناسی بارها بالا آمدگی و یا تدفین شده باشد یا نرخ بالا آمدگی و تدفین شدیدی داشته باشد در ایجاد شکستگی در سازند نقش دارند. همچنین بالا آمدگی های گوناگون سازند در طول زمان زمین شناسی در نرخ سیمانی شدن شکستگی تاثیر گذار است (۱۱-۶). برای مثال اگر یک سازند با نرخ ثابت و آرام تدفین شده باشد با سازندی که بارها در طول زمان زمین شناسی چرخه تدفین و بالا آمدگی را تکرار کرده باشد گسترش شکستگی و نرخ سیمانی شدن متفاوتی خواهند داشت.



شکل ۱۱-۶- نقش تاریخیچه تدفین در گسترش شکافهای طبیعی سازند (Lonnee and Machel 2006)

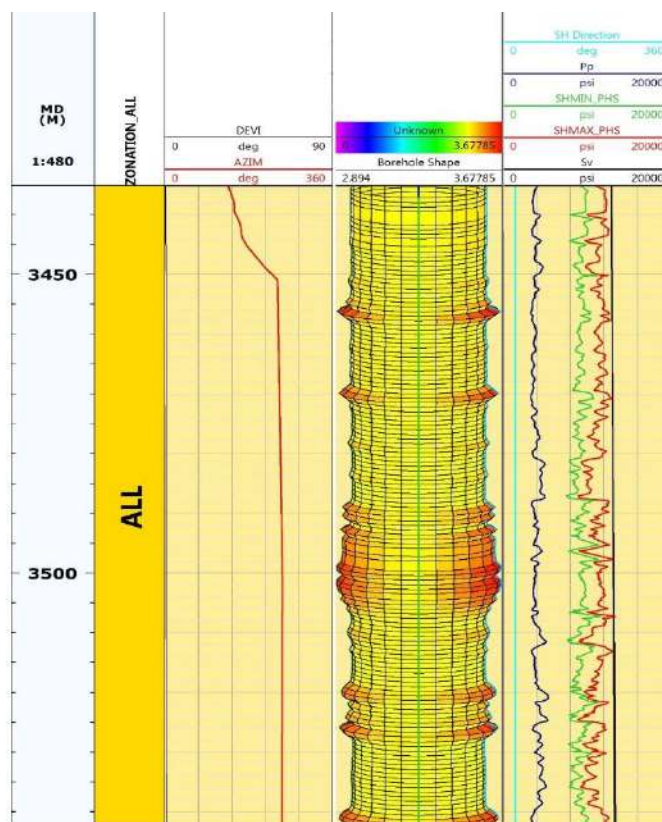
بطور کلی رژیم تنش در یک میدان بر توزیع گسلها و شکستگی طبیعی میدان تاثیر گذار است. لذا مطالعه دقیق و شناسایی رژیم تنش و تکتونیک میدان در طرح ریزی انجام عملیات شکافت هیدرولیکی بسیار اهمیت دارد.

۶-۱-۵- ژئومکانیک

یکی از مهمترین کاربردهای مدلسازی ژئومکانیکی در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی، انتخاب چاه و لایه کاندید برای این عملیات می باشد. برای مدلسازی ژئومکانیکی با آگاهی از عوامل تأثیرگذار بر طراحی شکافت هیدرولیکی، مدل ساخته می شود. در واقع اطلاعات پایه ای مکانیک سنگ برای هر لایه لازم می باشد تا فرایند طراحی شکافت در چاه با دقت بالاتری انجام شود. بنابراین تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ از قبیل تنش های اصلی، مقاومت سنگ، فشار منفذی و ضرایب الاستیک سنگ برای طراحی شکافت هیدرولیکی امری ضروری است.

اندازه گیری و تخمین انواع تنش های اطراف چاه جزء اولین الزامات ساخت مدل ژئومکانیکی در چاه می باشد. برای تخمین تنش ها در یک چاه معمولاً از داده لاگها استفاده می شود (شکل ۶-۱۲). عبارت دیگر تنش های

درجا در هر لایه نشان می دهند که چه مقدار فشار برای انتشار شکست در لایه لازم است. اگر فشار درون شکاف بیشتر از تنش ماکزیمم افقی یا قائم باشد شکاف باز خواهد شد در غیر اینصورت شکاف باز نخواهد شد. بطور کلی تعیین مقادیر تنش اطراف چاه در بهینه سازی تکمیل چاه موثر می باشد.

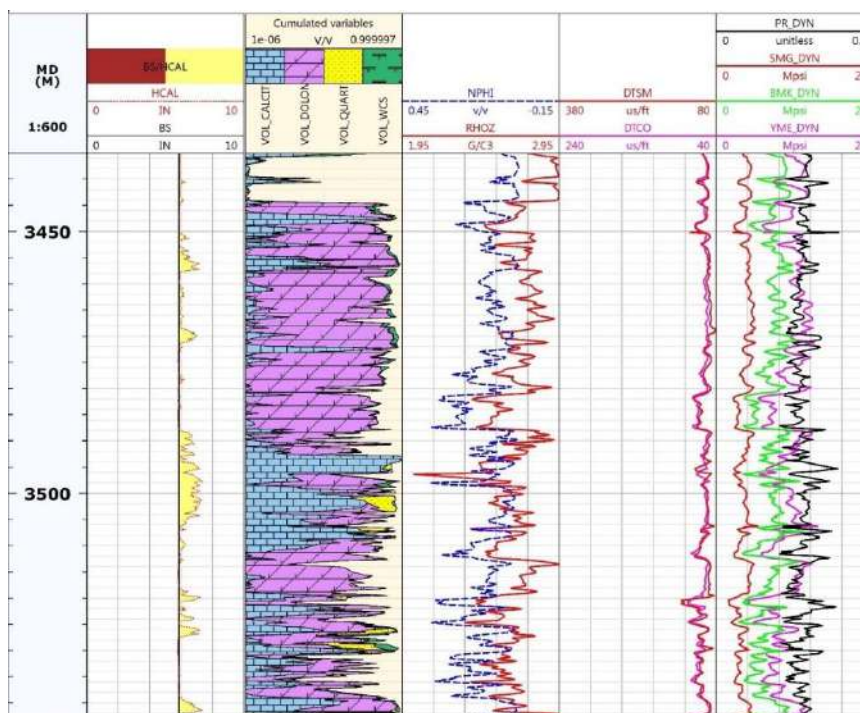


شکل ۶-۱۲- مقادیر تنش های افقی و عمودی محاسبه شده از روابط پوروالاستیک در یک چاه مطالعاتی (قره چلو ۱۳۹۹).

مهمترین ضرایب الاستیکی که در مدلسازی ژئومکانیک کاربرد دارد ضرایب یانگ، پوواسون، برشی و بالک می باشد. به منظور محاسبه ضرایب یانگ، برشی، حجمی و نسبت پوآسون از لاگهای معمولی و لاگ DSI که سرعت موج S و P را اندازه گیری می کنند و همچنین روابط تجربی استفاده می شود (شکل ۶-۱۳). برای مثال

^۳ Dipole Sonic Imager

ضریب الاستیک یانگ مرتبط با سفتی سنگ می باشد که در عملیات شکاف هیدرولیکی بر اندازه بازشدگی شکاف تاثیرگذار است. همچنین مقدار ضریب پوواسون مقدار تغییر شکل سنگ در زمان اعمال استرس را نشان می دهد که در فرمولهای طراحی فرایند شکاف هیدرولیکی از آن استفاده می شود.



شکل ۱۳-۶- لاگهای معمولی و سرعت موج s و p به همراه مدولهای الاستیک دینامیکی محاسبه شده از روابط تجربی (قره

چلو ۱۳۹۹)

یکی دیگر از خروجی های مهم مدلسازی ژئومکانیکی مسیر بهینه حفاری چاه می باشد. در واقع شیب و آزمونوت چاه در تعیین فشار شکست سازند موثر است، لذا چنانچه قبل از حفاری یک چاه بدانند که اجرای طرح شکافت هیدرولیکی در آن چاه الزامی هست با استفاده از مدل ژئومکانیکی می توان بهینه ترین مسیر حفاری را پیدا کرده که با کمترین فشار شکست بتوان در دیواره چاه شکاف ایجاد کرد.

۶-۲- سیالات

بخش مهمی از دانش فنی این فناوری مربوط به علم سیالات و مواد تزریق شونده در فرایند اجرای عملیات می‌باشد. بطور کلی، سیالات مورد استفاده در این فناوری شامل سیالات تزریقی با هدف ایجاد شکافت، نگه داری شکافهای ایجاد شده و افزودنیهای جانبی می‌باشد. قابل ذکر است که ترکیب و حجم دقیق این مواد بسته به نوع طراحی و شرح کار دقیق عملیات معین و نهایی می‌گردند.

سیال شکافنده جزء مهمی در عملیات شکافت هیدرولیکی است که وظیفه اصلی آن بازکردن شکاف و انتقال عامل پشتیبانی کننده در طول شکاف است. معمولاً خواص چسبندگی سیال مهمترین پارامتر در نظر گرفته می‌شود. با این حال، علاوه بر ارائه ویسکوزیته مناسب در شکاف، آنها باید پس از اتمام عملیات به سرعت شکسته و پاکسازی شوند، کنترل خوبی بر اتلاف سیالات ایجاد کنند، در هنگام پمپاژ فشار اصطکاک کمی نشان دهند و در عین کاربندی بودن اقتصادی هم باشند. به دلیل هزینه کم، کارایی بالا و سهولت کار، سیالات پایه آبی، پرکاربردترین سیالات شکافت هستند. برای تهیه یک محلول ویسکوز که قابلیت تعلیق پروپانت در دمای محیط را داشته باشد می‌توان بسیاری از پلیمرهای محلول در آب را استفاده کرد. اما این محلول‌ها با افزایش دما به طور قابل توجهی رقیق می‌شوند. برای جبران اثرات حرارتی می‌توان غلظت بارگذاری پلیمر را افزایش داد ولی این روش گران است. در سازندهایی که به شدت حساس به آب شناخته شده‌اند، از نفت‌های سنگین به عنوان سیالات شکافت استفاده می‌شد زیرا در مقایسه با سیالات پایه آبی، آسیب کمتری به سازند وارد می‌کردند. اگر چه ویسکوزیته ذاتی آنها باعث جذابیت بیشتر از آب می‌شود ولی گران بودن و دشوار بودن انجام عملیات با آن‌ها، استفاده از آنها را محدود به شرایط خاصی می‌کند. سیالات چند فازي نیز، نوع دیگری از سیالات شکاف زنی هستند که با قرار دادن فاز دوم در سیال، می‌توان خواص سیالات پایه آبی، پایه روغنی یا پایه اسیدی را بهینه کرد. فوم یکی از انواع سیالات چند فازي است که از افزودن گاز به سیال ایجاد می‌شود. برای ایجاد ثبات در مخلوط، یک ماده فعال کننده سطح (سورفاکتانت) بکار میرود که کشش سطحی را در سطح مشترک گاز / مایع

کاهش می‌دهد. فوم‌ها بازیابی سیال از شکاف را تسریع می‌کنند، پس سیالات بسیار خوبی برای استفاده در مخازن کم فشار هستند. استفاده از امولسیون‌ها نیز به عنوان سیال شکاف رایج است. امولسیون از پراکندگی دو فاز غیرقابل اختلاط مانند روغن در آب یا آب در روغن تثبیت شده با سورفاکتانت ایجاد می‌شود. سیالات شکافت برپایه امولسیون، محلولهای بسیار ویسکوز با خواص حمل و انتقال خوب هستند. هرچه درصد فاز داخلی بیشتر باشد، مقاومت بیشتری در برابر حرکت و در نتیجه ویسکوزیته بالاتری ایجاد می‌شود. پلی امولسیون علیرغم ایجاد آسیب کمتر در سازند و پاکسازی سریع، فشار اصطکاک زیاد و هزینه بالایی دارد و با افزایش دما نیز رقیق می‌شود. در جدول زیر خلاصه ای از گزینه‌های موجود سیالات ایجاد شکافت که بر اساس نوع پایه سیال تقسیم بندی می‌گردند ارائه گردیده است:

جدول ۶-۲- نمونه‌هایی از سیالات شکافنده

Base Fluid	Fluid Type	Main Composition	Used For
Water	Linear	Guar, HPG, HEC, CMHPG	Short fractures, low temperature
	Crosslinked	Crosslinker + Guar, HPG, CMHPG or CMHEC	Long fractures, high temperature
	Micellar	Electrolite + Surfactant	Moderate length fractures, moderate temperature
Foam	Water based	Foamer + N ₂ or CO ₂	Low-pressure formations
	Acid based	Foamer + N ₂	Low-pressure, carbonate formations
	Alcohol based	Methonal + Foamer + N ₂	Low-pressure, water-sensitive formations
Oil	Linear	Gelling agent	Short fractures, water-sensitive formations
	Crosslinked	Gelling agent + Crosslinker	Long fractures, water-sensitive formations
	Water emulsion	Water + Oil + Emulsifier	Moderate length fractures, good fluid loss control
Acid	Linear	Guar or HPG	Short fractures, carbonate formations
	Crosslinked	Crosslinker + Guar or HPG	Longer, wider fractures, carbonate formations
	Oil emulsion	Acid + Oil + Emulsifier	Moderate length fractures, carbonate formations

پس از متوقف شدن پمپاژ و نشت سیال شکافت، معمولاً از پروپانت (ریز دانه های ماسه یا شن) برای نگه داشتن دیواره های شکاف استفاده می شود تا مسیر رسانایی به چاه ایجاد شود.

سیال شکاف زنی معمولاً در بردارنده های افزایشده هایی برای شکستن سیال پس از پایان کار، کنترل اتلاف سیال، به حداقل رساندن آسیب سازند، تنظیم pH، کنترل باکتریها یا بهبود پایداری در دمای بالا است. نمونه هایی از افزودنی هایی مورد استفاده در جدول ۳-۶ آمده اند.

جدول ۳-۶- افزودنی های رایج سیال شکاف زنی (Speight, 2016)

اسید	حل کردن کانی ها و رس ها برای باز کردن مسیرها و جلوگیری از انسداد
سورفکتانت	کاهش کشش سطحی
آفت کش	جلوگیری از رشد باکتری ها که باعث مسدود کردن مسیرها، تولید گازها و محصولات جانبی مزاحم و ایجاد خوردگی می شوند
کراسلینکر ^{۳۶}	غلظت و سفت کردن سیال برای حمل پروپانت
ژلاتین	افزایش گرانروی سیال برای معلق نگه داشتن پروپانت در طول مسیر
شکننده ^{۳۷}	شکستن ژل ها در پایان عملیات به منظور تسریع و تسهیل برگشت جریان سیال به چاه پس از انجام عملیات
پایدارکننده ی رس	جلوگیری از جداسازی رس ها از سطح سنگ
کف ساز ^{۳۸}	افزایش ظرفیت حمل پروپانت توسط سیال و کاهش حجم سیال مورد نظر
کف شکن ^{۳۹}	شکستن کف در هنگامی که دیگر به آن نیازی نیست
بازدارنده ی رسوب	جلوگیری از تشکیل رسوب های معدنی
کاهنده های اصطکاک	افزایش نرخ و بازده جابه جایی سیال شکاف زنی از طریق کاهش اصطکاک بین سیال و سطح شکاف
بافر	کنترل PH
عامل منحرف کننده جریان	مسدود کردن موقتی بعضی مسیرها و منحرف کردن جهت جریان برای دستیابی یک نواخت سیال شکاف به مخزن
بازدارنده ی هرزروی سیال	افزایش بازده سیال با نگه داشتن سیال درون شکاف و جلوگیری از نفوذ و هدر رفت آن به خمیره ی ^{۴۱} سنگ از سطوح شکاف

- ^۳ Crosslinker
^۳ Breaker
^۳ Foamer
^۳ Defoamer
^۴ Diverting agent
^۴ matrix

۶-۳- طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی

مباحث عنوان شده در بخشهای پیشین این گزارش در طراحی فرآیند عملیات این فناوری بکار گرفته می-شود. مباحث تئوری به همراه استفاده از قابلیت‌های نرم افزارهای تجاری موجود، توانایی طراحی و بهینه سازی فرایند عملیات را ایجاد خواهد نمود. یکی از مهمترین بخشهای طراحی شکاف مدلسازی هندسه شکاف است. طراحی به مهندس طراح اجازه می‌دهد که سیال عملیات، حجم پروپانت و یا اسید، را برآورد کند و برنامه تزریق سیال را مشخص کند. انتخاب مدل طراحی یکی از مراحل مهم طراحی فرآیند عملیات است. معمولاً در انتخاب مدل بایستی، کاربرد برای موارد ویژه، کمیت و کیفیت داده، زمان اختصاص یافته برای طراحی عملیات و خروجی مورد نیاز را مورد نظر قرار داد. هدف طراحی عملیات فراهم سازی برنامه‌ای برای تزریق سیال و پروپانت و یا اسید است که با وارد کردن داده‌ها و انجام طراحی و بهینه سازی آن در نرم افزار مورد نظر قابل دستیابی است.

خلاصه ای از مراحل و نحوه انجام آنها در زیر بخشهای ذیل شرح داده می‌شود.

۶-۳-۱- داده های مورد نیاز برای طراحی

داده‌های مورد نیاز به همراه کاربرد آنها در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی و همچنین روش به دست آوردن آنها در جداولی آمده است. داده‌های مورد نیاز در پنج گروه شامل پارامترهای مخزنی مورد نیاز، داده های چاه، خواص الاستیک سنگ، اطلاعات زمین شناسی و داده‌های مربوط به سیال شکافزنی و پروپانت دسته بندی شده و هر گروه در جداول مجزا آمده است (Montgomery, 2015).

جدول ۴-۶- پارامترهای مخزنی مورد نیاز

داده ی مورد نیاز	کاربرد	روش به دست آوردن داده
تراوایی	تاثیر بر طراحی طول شکاف برای رسیدن به عبور دهی مورد نظر شکاف/ تاثیر بر میزان هدررفت سیال شکاف زنی	چاه آزمایی / لاگ / آنالیز مغزه
فشار منفذی سیال مخزن	تعیین تنش های در جا/ تاثیر بر پاک سازی شکاف از سیال شکاف پس از پایان عملیات	داده های RFT/ داده های حفاری (وزن گل، میزان نفوذ سیال مخزن به چاه و ...)/ روندهای فشاری منطقه/ تست های قبل از شکاف
دما	پارامتر اساسی در تعیین پایداری افزودنی های سیال شکاف و انتخاب سیال و افزودنی های مناسب	لاگ های هنگام حفاری
رفتار فازی سیال مخزن	میزان تولید پس از اتمام فرآیند شکاف زنی/ میزان هدر رفت سیال شکاف زنی	تست های PVT [*]
ضخامت سازند	میزان انتشار و توسعه ی شکاف	لاگ گاما
آنالیز حساسیت سیال های مخزن	بررسی امکان تشکیل رسوب های آلی و معدنی بر اثر تماس سیال مخزن با سیال شکاف	تست های آزمایشگاهی
تخلخل	برآورد میزان نفت و گاز در جا و کیفیت مخزن	لاگ نوترون و چگالی

* Pressure, Volume, Temperature test

جدول ۶-۵- داده‌های چاه

کاربرد	داده
تأثیر قوی بر ارتباط بین چاه و سازند	میزان انحراف چاه
تعیین میزان افت فشار سیال به هنگام عبور از سوراخ‌ها/ توانایی عبور دهی پروپانت‌ها	داده های سوراخ شدگی ^{۴۳} شامل چگالی سوراخ شدگی (shot/feet)، زاویه ی بین سوراخ‌ها، ^{۴۴} قطر سوراخ‌ها ^{۴۵}
محدود کردن فشار تزریق در حین طراحی عملیات	اطلاعات مربوط به پیکربندی چاه ^{۴۶} شامل قطر چاه و لوله جداری، حد فشار تحملی پکرها، حد تحمل فشار و دبی ابزارهای ته چاهی، حد تحمل فشار سر چاهی
فشار تولیدی برنامه ریزی شده، دما و فشار	شرایط تولیدی پس از شکاف

جدول ۶-۶- خواص الاستیک سنگ

منبع	کاربرد	داده
تست مقاومت تک محوری	تعیین فشار لازم برای شکست و میزان بازشدگی شکاف	ماحول یانگ و نسبت پواسون
تست مقاومت کششی	فشار لازم برای شکست سنگ	مقاومت کششی
تست سه محوره ی چند مرحله ای	فشار لازم برای شکست سنگ	زاویه ی اصطکاک و مقاومت چسبندگی ^{۴۷}
تست های حرارتی پوروالاستیک ^{۴۹}	تعیین فشار موثر/ تغییر ساختار سنگ بر اثر تغییر فشار در طول زمان	ضریب بایوت ^{۴۸} تراکم پذیری سنگ و خواص پوروالاستیک
لاگ صوتی	جایگزین خواص الاستیک استاتیک در موارد عدم دسترسی	خواص الاستیک داینامیک

- ^۴ perforation ۳
^۴ phasing ۴
^۴ Hole diameter ۵
^۴ Wellbore configuration ۶
^۴ Cohesion Strength ۷
^۴ Biot's coefficient ۸
^۴ Thermo- poro elastic test ۹

جدول ۶-۷- اطلاعات زمین شناسی

داده	کاربرد	منبع
وضعیت شکاف های طبیعی	متاثر شدن رژیم های جریانی از برهم کنش شکاف هیدرولیک با شکاف های طبیعی موجود در مخزن/ تغییر در جهت گیری شکاف هیدرولیک تحت تاثیر شکاف های طبیعی مخزن/ باز شدن شکاف های طبیعی مسدود شده بر اثر سیمانی شدن توسط کانی های سازند	لاگ تصویری/ سائز میک
جهت استرس های اصلی	کنترل جهت شکاف هیدرولیک ایجاد شده/ تعیین فاصله ی چاه ها/ تعیین تعداد و فاصله ی شکاف ها در چاه افقی/ تعیین محل چاه ها برای فرآیندهایی مانند تزریق آب	نقشه ی استرس جهانی ^۵ لاگ تصویری ^{۵۱} صوتی ^{۵۲}
کانی شناسی	تعیین برهم کنش کانی های مختلف با سیال شکاف و آنالیز حساسیت کانی ها به سیال/ خواص مکانیکی کانی های سازنده	لاگ گاما

جدول ۶-۸- داده های مربوط به سیال شکاف زنی و پروپانت

داده	کاربرد	منبع
داده های رئولوژی	تعیین تغییرات گرانروی بر حسب زمان و دما برای طراحی عملیات	تست های آزمایشگاهی
اصطکاک لوله	تعیین فشار تزریق	هندبوکهای سرویس کمپانی ها
سازگاری سیالات شکاف زنی با سیالات مخزن	بررسی تشکیل رسوبات آلی و معدنی و آسیب سازند	تست های آزمایشگاهی
سازگاری سیالات شکاف زنی با سازند مخزنی	بررسی تشکیل رسوبات آلی و معدنی و آسیب سازند	تست های آزمایشگاهی
داده های پروپانت	میزان تحمل فشار پروپانت و میزان باز شدگی شکاف پس از برداشته شدن فشار تزریق	تست های آزمایشگاهی

^۵ Worldwide stress map developed by the earth system management

^{۵۱} oriented fracture microimaging log

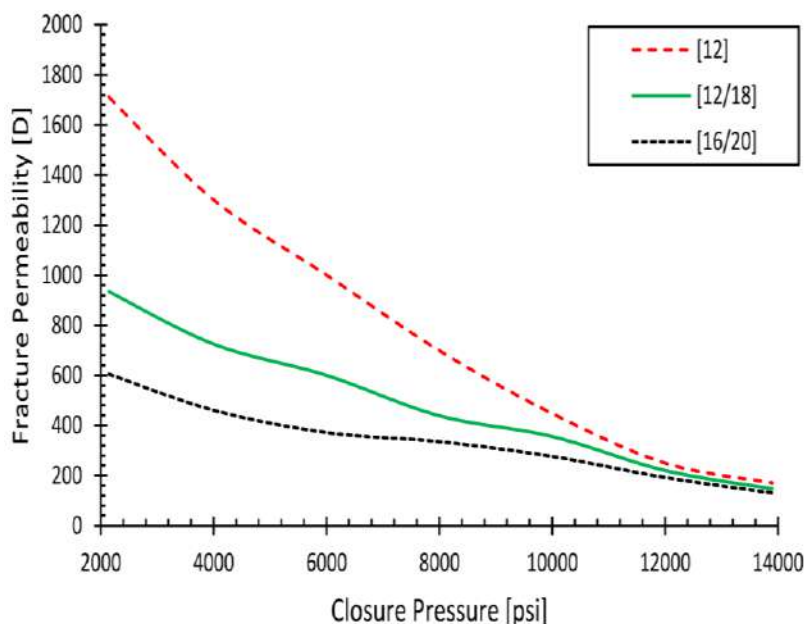
^{۵۲} oriented circumferential acoustic log

۶-۳-۲- پارامترهای طراحی

برخی از پارامترهای غالب و تاثیرگذار بر نتیجه عملیات شکافت هیدرولیکی که در طراحی این عملیات بایستی با حساسیت بالایی مد نظر قرار گیرند بطور خلاصه در این قسمت از گزارش شرح داده می‌شوند.

۶-۳-۲-۱- غلظت، نوع و اندازه‌ی پروپانت

همانطور که در شکل ۶-۱۴ مشخص است هر چه اندازه‌ی پروپانت‌ها بزرگتر باشد میزان بازشدگی شکاف و در نتیجه تراوایی آن بیشتر خواهد بود. اما باید به این نکته اشاره کرد که از آنجائیکه پروپانت‌های بزرگ مقاومت کمتری در برابر فشار دارند و سریعتر خرد و شکسته می‌شوند پس با افزایش فشار بسته شدگی شکاف (فشار وارد بر پروپانت‌ها در پایان تزریق و هنگام بسته شدن شکاف) به دلیل همین ناپایدار بودن پروپانت‌های درشت تر، میزان باز شدگی شکاف به ازای پروپانت‌های درشت تقریباً به اندازه‌ی پروپانت‌های کوچک خواهد بود. نوع پروپانت نیز بسیار مهم است. به طوری که در مواردی که فشار بسته شدگی شکاف کم است، می‌توان از دانه‌های ماسه نیز به عنوان پروپانت استفاده کرد ولی اگر فشاری که پروپانت باید تحمل کند مقدار زیادی باشد، نیاز به انتخاب پروپانت‌ها از مواد با مقاومت بسیار بالا است.



شکل ۶-۱۴- تاثیر اندازه‌ی پروپانت بر میزان بازشدگی شکاف (اعداد مشخص شده، اندازه‌ی مش هستند)

(Lengyel et al., 2021)

درباره غلظت پروپانت نیز همانگونه که انتظار می‌رود، افزایش غلظت پروپانت به معنی بازشدگی بیشتر شکاف خواهد بود ولی به دو دلیل با این امر، افزایش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت. اولی مربوط به هزینه‌ی خود پروپانت است و دومی مربوط به افزایش هزینه‌ی پمپ کردن با افزایش غلظت پروپانت و همچنین نیاز به افزایش توانایی سیال برای حمل پروپانت‌ها در غلظت بالاتر است.

۶-۳-۲-۲- گرانروی سیال شکافت

گرانروی سیال نقش عمده‌ای را در توانایی حمل پروپانت‌ها ایفا می‌کند. سیال با گرانروی کم توانایی نگه داری پروپانت‌ها و حمل آن‌ها را تا انتهای شکاف را ندارد. از طرف دیگر اضافه کردن پلیمرها به سیال شکاف و افزایش گرانروی آن، منجر به کاهش میزان هدر رفت سیال شکاف از دیواره‌های شکاف می‌شود. گرانروی سیال، همچنین بر روی میزان فشار شکست نیز اثر می‌گذارد. البته واضح است که هزینه پمپ کردن سیال، با افزایش گرانروی آن افزایش می‌یابد.

۶-۳-۲-۳- نرخ پمپاژ

افزایش نرخ پمپ کردن باعث می‌شود شکاف به اندازه‌ی کافی باز شود تا پروپانت‌ها بتوانند به راحتی به آن وارد شوند. همچنین حمل پروپانت‌ها به همراه سیال، با افزایش نرخ پمپاژ، آسانتر می‌شود. از آنجایی که هدر رفت سیال درون شکاف با زمان رابطه‌ی مستقیم دارد، پس از افزایش نرخ پمپاژ و به دنبال آن کاهش زمان عملیات باعث می‌شود هدر رفت سیال کاهش یابد. البته افزایش نرخ پمپاژ به معنی افزایش فشار سطحی و افزایش هزینه هاست.

۶-۳-۲-۴- فشار سر چاهی و ته چاهی

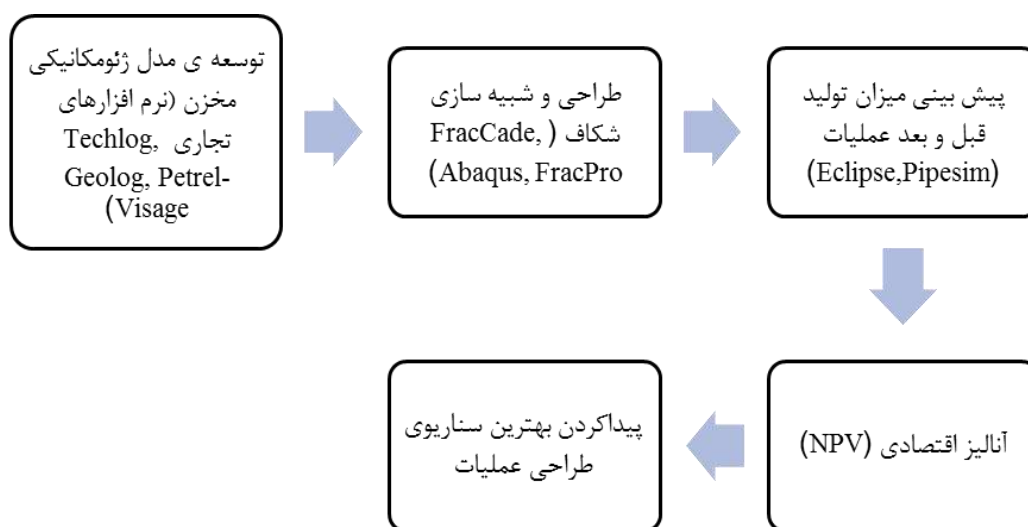
با دانستن مقدار تنش‌های موثر سازند و مقاومت کششی سنگ، می‌توان فشار لازم برای شکست سازند را محاسبه کرد که در حقیقت فشار در دهانه شکاف است. بنابراین این فشار، یک پارامتر طراحی نبوده و وابسته به مشخصات سازند است. مقدار این فشار از فشار سر چاهی و بر اساس افت فشارهایی که سیال درون چاه (افت فشار اصطکاکی و هیدروستاتیک) و سوراخ شدگی تجربه می‌کند به دست می‌آید. در طراحی فشار سر چاهی همواره باید به حد بالای تحمل فشار تجهیزات سر چاهی توجه کرد.

۶-۳-۲-۵- اندازه، عمق نفوذ و تعداد سوراخ شدگی‌ها

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد افت فشار درون چاه که از نوع هیدروستاتیک و اصطکاکی است وابسته به مشخصات سیال است. اما اندازه، عمق نفوذ و تعداد سوراخ شدگی‌ها تاثیر قابل توجهی بر میزان افت فشار و همچنین توانایی عبور دهی پروپانت‌ها دارد (به طوری که پروپانت‌ها، سوراخ‌ها را مسدود نکنند). بنابراین طراحی مناسب سوراخ شدگی‌ها و تکمیل چاه، همواره مسئله‌ی بسیار مهمی در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی می‌باشد.

۶-۳-۳- مراحل و فرایند طراحی

طراحی عملیات اصلی نیازمند توجه ویژه به اجرای عملیات است که شامل تکمیل چاه بهینه سازی شده، استراتژی‌های مشبک کاری، طراحی بهینه عملیات، کنترل و پایش نرخ و فشار سیال، و مشخصات سیال است. طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی به این معنی است که با بدست آوردن داده‌های مورد نیاز، مقدار مناسب پارامترهایی که در قسمت‌های قبل ذکر شد تعیین گردند. روش و مراحل این کار در شکل ۶- نشان داده شده است. در ابتدا با استفاده از نرم افزارهای تجاری مانند Techlog, Geolog, Petrel-Visage مدل ژئومکانیکی مخزن ساخته می‌شود. سپس با انتخاب پارامترهای طراحی در نرم افزارهایی مانند FracCade, Abaqus, شکاف را طراحی کرده و ابعاد و جهت گیری آن به دست خواهد آمد. سپس شکاف توسعه یافته را با مشخصات آن به نرم افزار شبیه سازی جریان در چاه و مخزن مانند Eclipse, Pipesim وارد خواهند کرد. در این حالت می‌توان ارزش افزوده‌ای که ایجاد این شکاف به ارمغان می‌آورد با محاسبه‌ی هزینه‌های عملیات و مقایسه‌ی میزان تولید نفت، قبل و بعد از انجام عملیات (NPV) محاسبه کرد و فرایند بهینه سازی را آغاز کرد. هر بار با تغییر پارامترهای طراحی مقدار NPV را محاسبه کرده تا در نهایت بهترین روش طراحی عملیات برای رسیدن به بیشترین NPV بدست بیاید.



شکل ۶-۱۵- مراحل طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی

۶-۳-۴- تست‌های قبل از عملیات اصلی

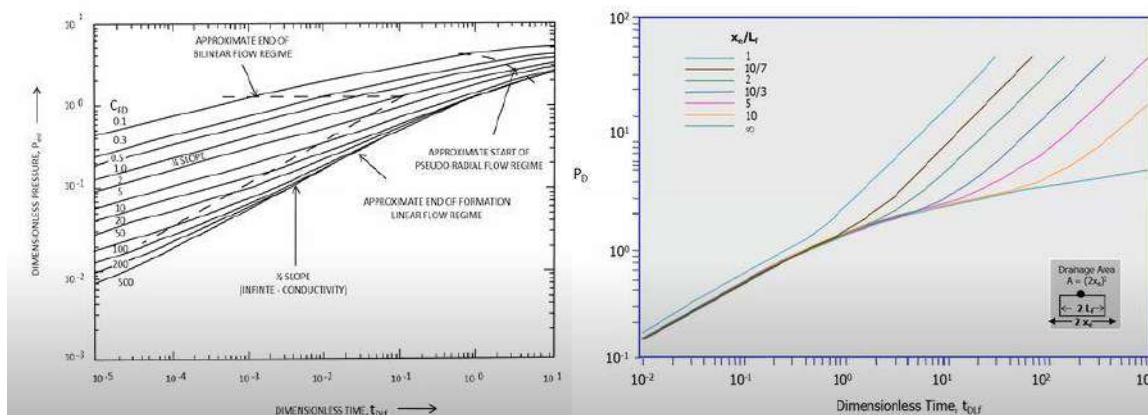
قبل از انجام عملیات اصلی، معمولاً یکسری تست‌های عملیاتی بمنظور تایید مفروضات و ورودی‌هایی که در طراحی بکار رفته اند انجام می‌گیرند که خود این تست‌ها نیاز به طراحی در نرم افزارهای موجود می‌باشد. پس از انجام تست‌های قبل از عملیات اصلی بعضی از پارامترها مانند استرس‌های برجا با دقت بالا تعیین می‌شوند (Montgomery, 2015). تست‌های قبل از عملیات شامل ... step rate, minifrac, flow back, ... می‌باشد که در فاز سوم توضیح داده خواهد شد.

۶-۳-۵- آنالیز نتایج پس از عملیات

با توجه به داده‌هایی که بعد از عملیات به دست می‌آید، شرایط مخزن و عملیات انجام شده، آنالیز و بازسازی مجدد می‌شود. تجزیه و تحلیل داده‌های فشار و تزریق جهت ارزیابی بعد از عملیات برای بررسی میزان گسترش شکستگی در مخزن و افزایش کارایی مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با بررسی پارامترهای مخزنی، هندسه شکستگی‌های ایجاد شده می‌توان سیستم تولیدی مخزن را تجزیه و تحلیل کرد. با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز عملیات به انطباق تاریخچه پرداخته و مدل‌هایی که برای طراحی عملیات ایجاد شده بود بهینه سازی می‌شود. آنالیز داده‌ها بعد از عملیات اولیه کمک بسیار زیادی برای اصلاح شبیه سازی عملکرد عملیات در مخزن می‌کند.

اولین بررسی پس از انجام فرآیند شکافت هیدرولیکی، آنالیز رفتار فشاری مخزن است. رسم نمودار فشار ته چاهی بر حسب زمان در مقیاس لگاریتمی و مقایسه‌ی آن با معادلات تحلیلی به دست آمده به طور غیر مستقیم هندسه‌ی شکاف ایجاد شده را آشکار خواهد کرد. بطور مثال، در شکل ۶-۱۶ (الف) و ۶-۱۶ (ب) رفتار فشاری مخزن در دو حالتی که شکاف با هدایت پذیری نا محدود و شکاف با هدایت پذیری محدود ایجاد شده است

نشان داده شده است. خط با شیب ۰,۵ در زمان‌های اولیه معرف وجود شکاف با هدایت پذیری نامحدود و خط با شیب ۰,۲۵ بیانگر شکاف با هدایت پذیری محدود می‌باشد.



(ب)

(الف)

شکل ۶-۱۶- نمودارهای تفسیر ته چاهی که در مقیاس لگاریتم فشار بدون بعد و زمان بدون بعد را نشان می‌دهد. الف) نمودارهای مشتق فشار-زمان گویای این مطلب است که شکاف‌های با نسبت ۱ (طول موثر در تولید به طول شکاف ایجاد شده) هدایت پذیری نامحدود دارد و هر چقدر که این نسبت بیشتر شود به سمت هدایت پذیری محدود شکاف می‌رود. ب) با شروع تولید از شکاف هدایت پذیری شکاف (C_{FD}) کاهش پیدا کرده و متعاقباً رژیم جریان تغییر کرده است. برای مثال در هدایت پذیری ۵۰۰ شیب نمودار ۰/۵ حاکی از شکافی با هدایت پذیری نامحدود و با گذشت زمان و کاهش هدایت پذیری شیب نمودارهای مشتق فشار در برابر زمان رو به کاهش بوده و این شیب به میزان ۰/۲۵ گویای شکافی با هدایت پذیری محدود می‌باشد (Spivey and Lee, 2013)

۶-۳-۶- روشهای پایش

علاوه بر آنالیز فشار، روش‌های پایشی نیز وجود دارد که ابعاد و جهت‌گیری شکاف را به صورت مستقیم مشخص می‌کنند (Montgomery, 2015):

۱- لاگ‌های دمایی: در محلی که شکاف ایجاد شده است، گرادیان دما نسبت به نواحی مجاور متفاوت است.

۲- ردیاب‌های رادیواکتیو: این ردیاب‌ها به همراه سیال به درون مخزن فرستاده می‌شوند و اشعه‌ی گامایی که از آن‌ها ساطع می‌شود توسط یک گیرنده ثبت می‌شود.

۳- ردیاب‌های شیمیایی: این ردیاب‌ها نیز مشابه ردیاب‌های رادیواکتیو به همراه سیال به درون مخزن فرستاده می‌شوند و بر اساس غلظت خروجی مشاهده شده و انجام محاسبات موازنه‌ی جرم می‌توان میزان نفوذ و جذب آن‌ها را مشخص کرد.

۴- میکروسایز میک: بر اثر عملیات شکافت هیدرولیک، زلزله‌های کوچی ایجاد می‌شود که با ثبت و تفسیر آنها می‌توان درباره‌ی شکل شکاف نتیجه گیری کرد.

۵- شیب سنج: ایجاد شکاف، باعث تغییراتی در شکل زمین اطراف چاه می‌شود که توسط گیرنده های خاصی که آنجا کار گذاشته شده‌اند، ثبت و تفسیر می‌شوند.

۴-۶- تجهیزات سطح الارضی

تجهیزات سطح الارضی یکی از مهمترین نیازمندیهای اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی می‌باشد. با توسعه این فناوری این تجهیزات نیز روز به روز پیشرفته‌تر شده و برای تنوع عملیات سفارشی سازی می‌گردند. تامین فشار و نرخ تزریق بالا بطوریکه قابلیت اجرای طراحی مورد نظر فراهم شود، تامین شرایط بهینه تهیه مواد تزریقی و افزودن و مخلوط کردن افزایه ها در مکان و زمان مناسب و همچنین اتصالات و جانمایی بهینه در مکان چاه نیاز به تجهیزات مناسب و پیشرفته‌ای داشته و از نکات مهمی است که در طراحی عملیات توسط متخصصین بایستی در نظر گرفته شود. در این قسمت مهمترین اجزا و سخت افزارها به اختصار شرح داده می‌شود:

پمپ‌های فشار قوی

برای انجام فرآیند شکافت هیدرولیکی، اولین بار از پمپ‌های معمولی که در تزریق سیمان و یا اسید کاربرد داشتند، استفاده شد (۱۲۵-۷۵ اسب بخار). اما با افزایش حجم و نرخ مورد نیاز تزریق برای شکافت، پمپ‌هایی مخصوص این فناوری ساخته شدند که قابلیت تزریق مواد در دبی‌ها و فشارهای بالا را دارند. شکل ۶-۱۷ پیکربندی یک پمپ فشار بالا را نشان می‌دهد که تا ۲،۴۰۰ اسب بخار توان دارند. انرژی این پمپ‌ها معمولاً از موتورهای دیزلی تامین می‌شود. البته با پیشرفت در فناوری توربین‌ها، امروزه پمپ‌هایی با همین ساینز اما دارای توان ۵،۰۰۰ اسب بخار نیز ساخته شده‌اند. کنترل این پمپ‌ها به صورت اتوماتیک و از راه دور انجام می‌شود.



شکل ۶-۱۷- نمونه پمپ‌های فشار بالا، مورد استفاده در عملیات شکافت هیدرولیکی (<https://www.global.weir>)

سیستم اختلاط

وظیفه‌ی سیستم اختلاط این است که سیال را از مخزن ذخیره از طریق یک منیفولد بیرون بکشد و با پروپانت و سایر افزودنی‌های شیمیایی مخلوط کند و با فشار مورد نیاز تحویل دهد (شکل ۶-۱۸).



شکل ۶-۱۸ - سیستم اختلاط مورد استفاده در عملیات شکافت هیدرولیکی (<https://www.nov.com/products/frac-blenders>)

تجهیزات کنترل پروپانت

از آنجاییکه با حجم زیادی از پروپانت سر و کار داریم، پروپانت‌ها باید با نرخ مناسب وارد سیستم اختلاط شوند. این وسیله بر روی سیستم اختلاط قرار می‌گیرد و ورود آن را به سیستم اختلاط، کنترل می‌کند (شکل

۱۹-۶).



شکل ۶-۱۹- تجهیزات کنترل پروپانت (<https://www.conveyorsetc.com>)

واحد مواد شیمیایی (Chemical Unit)



شکل ۶-۲۰- واحد مواد شیمیایی

ون داده‌ها و اطلاعات (Data Van)



شکل ۶-۲۱- ون داده‌ها و اطلاعات

واحد رطوبت‌دهی (Hydration Unit)



شکل ۶-۲۲- واحد رطوبت‌دهی

واحد گرمادهی آب فرک (Frac Water Heating)



شکل ۶-۲۳- واحد رطوبت‌دهی

میسایل تریلر^{۵۳}

یک منیفولد است که سیال کم فشار را از سیستم اختلاط گرفته و بین پمپ‌های فشار بالا توزیع می‌کند. وقتی که فشار سیال افزایش یافت، این سیالات دوباره به میسایل بر می‌گردند و میسایل آن‌ها را به صورت یک جریان واحد پر فشار تحویل می‌دهد (شکل ۶-۲۴).



شکل ۶-۲۴ - میسایل تریلر (<https://app.emaze.com>)

فرک تانک^{۵۴}

سیالات شکاف زنی در این محفظه‌ها نگه داری می‌شوند. این تانکها در مقابل خواص سیالات دارای مقاومت هستند (شکل ۶-۲۵).

^{۵۳} Missile Trailer

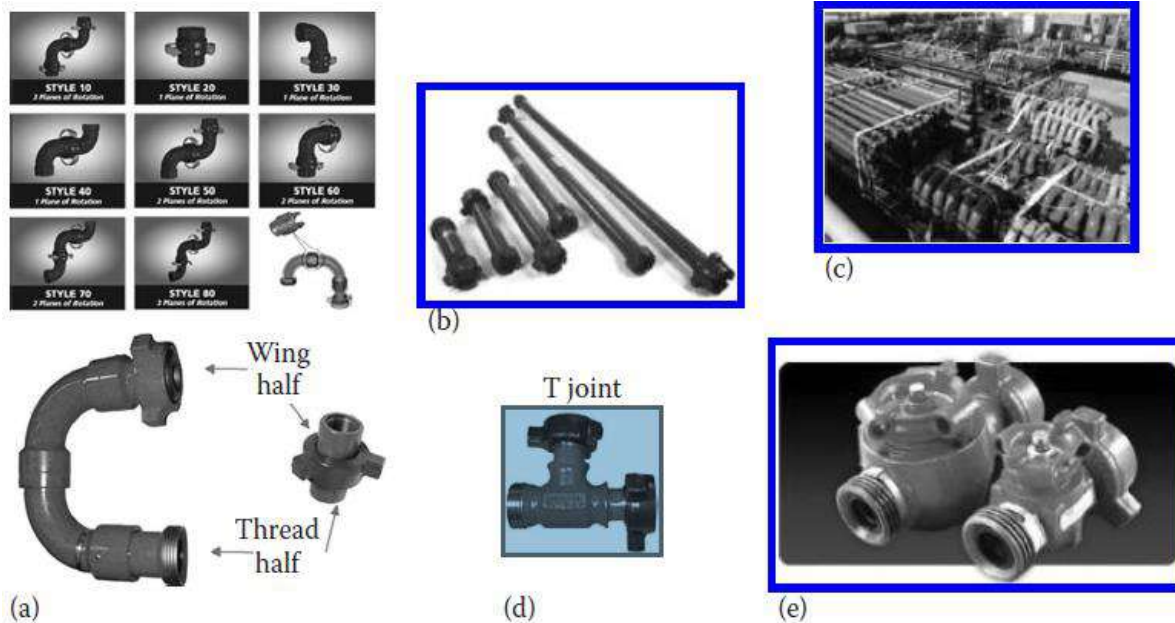
^{۵۴} Frac tank



شکل ۶-۲۵- نمونه فرک تانک (<https://www.kwipped.com>)

لوله ها، اتصالات و شیرها

لوله‌های حامل سیال پر فشار تزریقی، اتصالات و شیرهایی خاص برای فرآیند شکافت هیدرولیکی طراحی شده‌اند که از نظر جنس و طراحی منحصر به فرد هستند (شکل ۶-۲۶). شکل زیر نمونه ای از این ادوات را نشان می‌دهد.

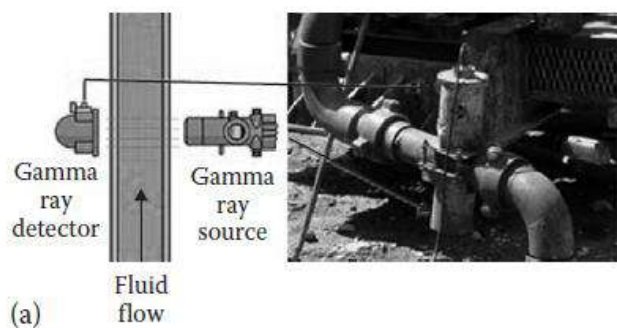


شکل ۶-۲۶- لوله‌ها، اتصالات و شیرها (Montgomery, 2015)

سنسورها^{۵۵}

برای تعیین چگالی سیال تزریقی یک حسگر رادیواکتیو در طول خط تزریق قرار داده می‌شود (densitometer). برای اینکه تغییرات چگالی ناشی از تغییر غلظت پروپانت ثبت شوند، باید حداقل یک دستگاه اندازه‌گیری چگالی در نزدیک‌ترین فاصله‌ی ممکن از سر چاه قرار بگیرد. فشارسنج و جریان سنج نیز از اصلی‌ترین ابزار جمع‌آوری داده هستند.

^۵ sensor



شکل ۶-۲۷- الف) چگالی سنج رادیواکتیو ب) جریان سنج فشار بالا پ) گیرنده‌ی فشار ت) گیج فشار ته چاهی

(Montgomery, 2015)

ابزار ایزوله کردن تجهیزات سر چاهی^{۵۶}

به منظور محافظت از تجهیزات سطحی در مقابل سیال فشار بالای تزریقی که به دلیل دارا بودن ترکیبات اسیدی و حمل پروپانت‌ها با خود، خاصیت تخریبی و خوردگی دارد در هنگام عملیات شکافت هیدرولیکی تجهیزات سر چاهی موقتاً کنار گذاشته می‌شوند و یک سری شیر موقتاً جایگزین شیرهای کنترلی حاضر بر سر چاه می‌شوند (شکل ۶-۲۸).

^{۵۶} Wellhead Isolation Tools



شکل ۶-۲۸- ابزار ایزوله کردن تجهیزات سر چاهی (Montgomery, 2015)

۵-۶- تکمیل چاه و تجهیزات درون چاهی

مطالعات تکمیل چاه از اجزا لاینفک دانش فنی و اجرایی فناوری شکافت هیدرولیکی می‌باشد. از آنجائیکه ابزار و روشهای تکمیل چاه همراه با پیشرفت کلی صنعت نفت دچار تغییر و تحول گسترده‌ای شده است، صنعت شکافت هیدرولیکی را نیز دچار تحول و پیشرفت قابل ملاحظه‌ای نموده است. تحقق اهداف اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی نیازمند توجه به استراتژیهای بهینه سازی تکمیل و مشبک‌کاری، طراحی روش مناسب، کنترل دبی، و خصوصیات فشار و سیال است. بطور مثال انتخاب روش مناسب تکمیل و جنس رشته تکمیلی چاه می‌تواند متاثر از نوع چاه حفر شده از قبیل چاه عمودی، انحرافی و یا افقی متغیر باشد.

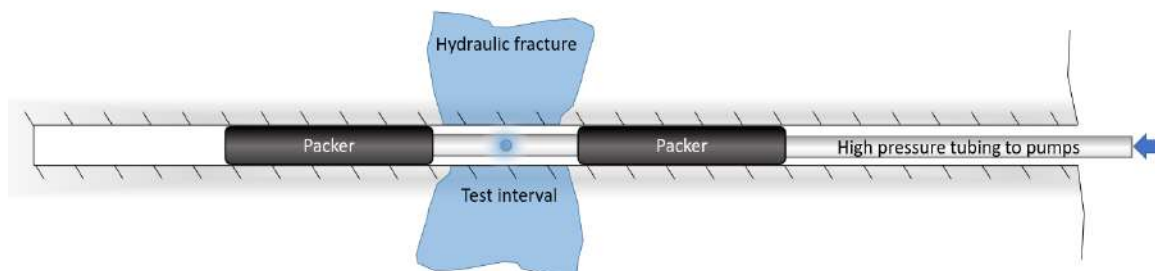
به طور کلی عملیات شکافت هیدرلیکی هم در چاه‌های حفره باز و هم در چاه‌های دارای لوله جداری سیمانی شده، انجام می‌گیرد. روش تکمیل و اجرای عملیات بسته به هدف‌های انجام عملیات که می‌تواند بصورت تک مرحله‌ای و یا چند مرحله‌ای تعریف گردد، انتخاب می‌شود.

در عملیات‌های تک مرحله‌ای معمولاً اجرای عملیات بسیار ساده‌تر می‌باشد. بسته به حفره باز و یا لوله جداری بودن ناحیه مخزنی می‌توان از طریق رشته تکمیلی موقت (Frac String) و یا رشته تکمیلی دائم عملیات را اجرا نمود. در مواقعی که تصمیم بر استفاده از تزریق مستقیم از طریق رشته تکمیل دائم است نیازی به حضور دکل حفاری نمی‌باشد و عملیات بدون دکل انجام می‌شود. در استفاده از رشته تکمیلی موقت احتمال آسیب دیدن شکاف ایجاد شده در اثر کشتن چاه پس از اجرای این عملیات وجود دارد. در طراحی رشته تکمیلی تمام ملاحظات فشاری، دبی و سازگاری جهت انتخاب جنس مناسب برای کل رشته شامل تاج سر چاهی بایستی لحاظ گردد.

در مواردی که هدف اجرای عملیات چند مرحله‌ای می‌باشد، چنانچه امروزه بسیار متداول می‌باشد، انتخاب روش اجرا و نوع رشته تکمیلی اهمیت دوچندان و ویژه‌ای پیدا می‌کند. معمولاً در چنین عملیاتی پیچیدگی اصلی مربوط به نحوه ایزوله کردن ناحیه‌ها از همدیگر می‌باشد.

دو روش معمول در عملیات چند مرحله‌ای عبارتند از روش پلاگ-پرف (Plug-and Perf) و روش (Frac Sleeve). در چاه‌هایی که دارای لوله جداری سیمانی شده هستند از پکرها در عملیات‌های شکافت چند مرحله‌ای برای جدا کردن محل انجام فرآیند از سایر بخش‌های چاه استفاده می‌شود (شکل ۶-۲۹). در فاصله‌ی بین دو پکر مشبک کاری انجام می‌شود و سپس سیال در فاصله‌ی بین دو پکر تزریق می‌گردد و فشار افزایشی تا مرحله‌ی شکسته شدن سنگ انجام می‌گیرد. پکرها باید فشار بیشتری از فشار سیال در قسمت ایزوله شده را تحمل کنند تا از نفوذ و هدررفت سیال در پکر اطمینان حاصل شود. بعد از انجام عملیات در یک قسمت چاه،

قسمت بعدی توسط پکرها ایزوله می‌شود و عملیات در آن انجام می‌گیرد. در صنعت شکافت هیدرولیکی این عملیات Plug-and Perf نامیده می‌شود (شکل ۶-۳۰ الف).

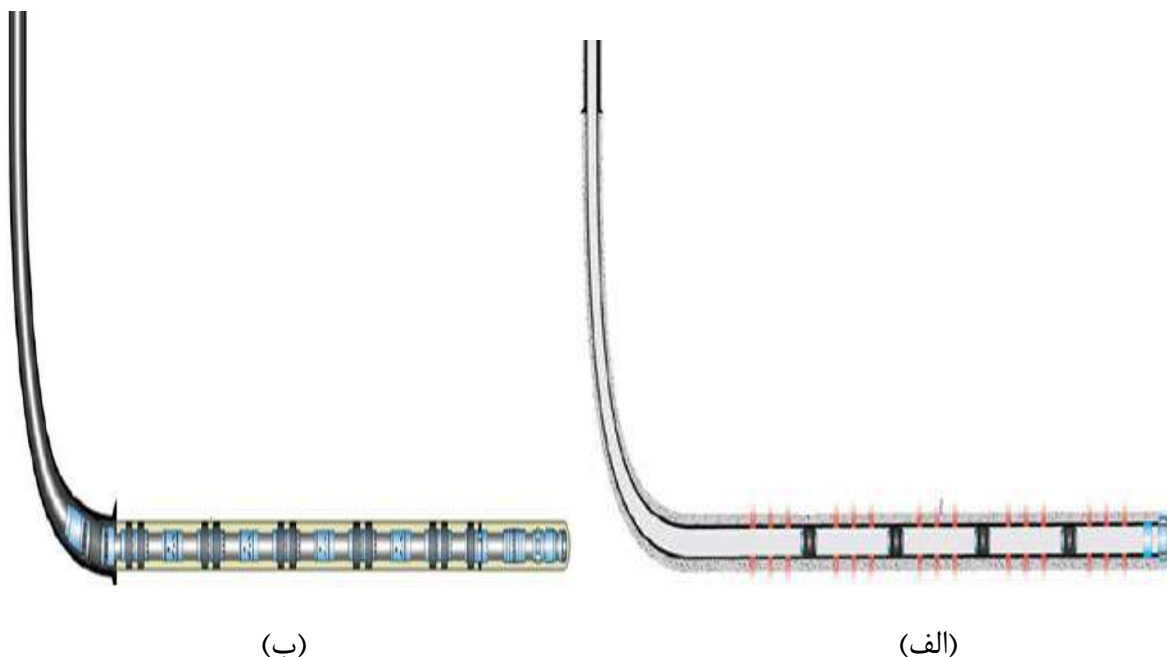


شکل ۶-۲۹- پکر مورد استفاده برای ایزوله کردن بخشی از چاه در عملیات شکاف زنی چند مرحله‌ای

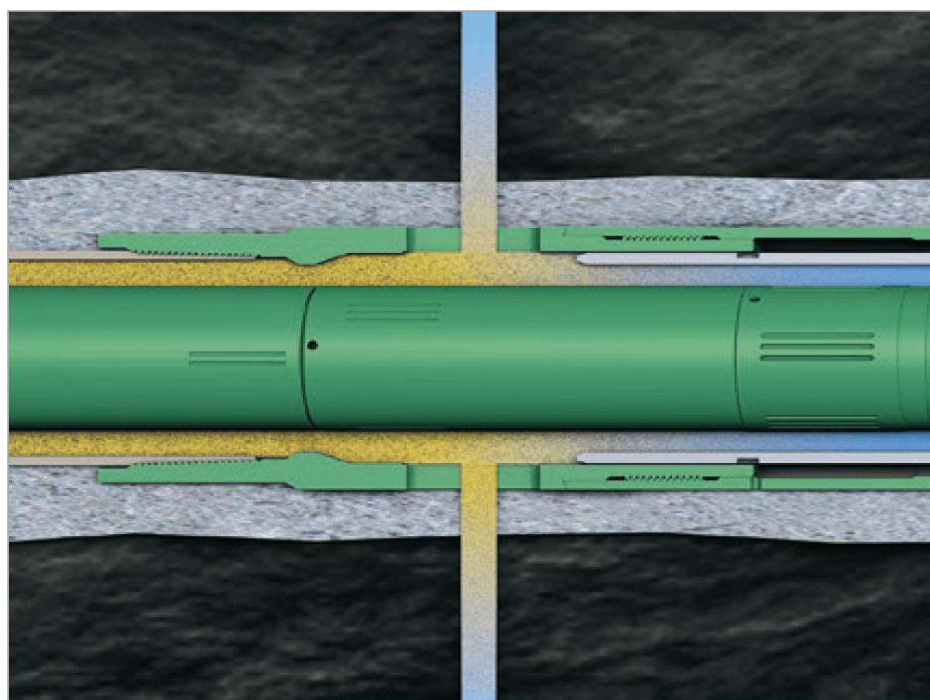
<https://www.smcog.fi/knowledge/hydraulic-fracturing/>

در چاه‌هایی که حفره باز هستند دیگر نیازی به انجام عملیات مشبک کاری نیست، در این چاه‌ها می‌توان از فناوری راندن رشته فرک اسلیو (Frac Sleeve) در فاصله‌ی بین دو پکر استفاده کرد (شکل ۶-۳۰ ب). اسلیو یک حالت کشویی دارد و با تزریق سیال، این کشو جا به جا شده و سیال می‌تواند وارد سازند شود و در نقاط ضعیف سازند، باعث ایجاد شکستگی شود (شکل ۶-۳۱).

بمانند عملیات تک مرحله‌ای، در عملیات چند مرحله‌ای نیز می‌توان از رشته تکمیلی دائم یا موقت استفاده نمود. همچنین بسته به طراحی عملیات، جهت راندن رشته تکمیلی از دستگاه لوله مغزی سیار نیز استفاده شده است. امروزه فناوریهای متنوعی توسط شرکتهای پیمانکار اصلی موجود در زمینه ابزارآلات و تجهیزات رشته تکمیلی بمنظور اجرای عکلیات شکافت هیدرولیکی ارائه می‌گردد که در فازهای بعدی این طرح مورد بررسی قرار خواهند گرفت.



شکل ۶-۳۰- انجام عملیات شکاف چند مرحله‌ای. الف) plug-and perf ب) frac sleeve



شکل ۶-۳۱- نحوه‌ی عملکرد frac sleeve

خلاصه

در جمع بندی مطالب تشریح شده در فصول مختلف این گزارش میتوان به مطالب زیر اشاره کرد:

- فناوری شکافت هیدرولیکی بعنوان یک فناوری نسبتاً قدیمی و پر کاربرد در سطح جهان تلقی میگردد که فرایند اثبات علمی، صنعتی و اقتصادی خود را گذارنده است.
- تاریخچه و سیر تحول فناوری نشاندهنده سیر تکاملی و گسترش روزافزون این فناوری در جای جای کشورهای دنیا می باشد.
- کشور آمریکا بعنوان پیشروترین و پرکاربردترین کشور دنیا در زمینه این فناوری شناخته شده و آمار مربوطه را بصورت مدون و منظم ارائه می دهد.
- این فناوری بعنوان اصلی ترین فناوری انقلاب شیل و تحول در مسایل ژئوپلیتیک تامین انرژی در سطح جهان گردیده است.
- آمار جمع آوری شده نشاندهنده گسترش سریع این فناوری در آسیا و منطقه خاورمیانه می باشد.
- ادعاهای مبروط به مسائل محیط زیستی باعث رکود نسبی گسترش فناوری در قاره اروپا شده است.
- کاربردهای متنوع این فناوری هم در صنعت نفت و هم در صنایع غیر نفتی همچون ژئوترمال مطرح می باشد.
- با توجه به کاربردهای فناوری در زمینه نگهداشت، بهبود و ازدیاد برداشت در ایران، ضرورت دستیابی به دانش فنی-اجرایی این فناوری یک امر حیاتی و اجتناب پذیر بنظر می رسد. این کاربردها می تواند شامل موارد زیر باشد:

- جلوگیری از افت تولید چاه های در حال تولید بعلت مشکلات آسیب سازندی
- توسعه میادین با سازندهای ضعیفتر که صرفه اقتصادی با روشهای متداول ندارند.
- توسعه ذخائر نا متعارف شامل ذخائر نفت و گاز شیل که بدون استفاده از این فناوری قابل استخراج نیستند.

- مفاهیم مبانی علمی-مهندسی مختلف و فراوانی در دانش فنی-اجرایی این فناوری درگیر می‌باشند. این مفاهیم تقریباً شامل تمام شاخه‌های علوم زمین از جمله زمین شناسی، ژئوفیزیک، مکانیک سنگ، ژئومکانیک و پتروفیزیک و در شاخه‌های مهندسی شامل مهندسی نفت، مخزن، حفاری و تکمیل چاه، شیمی، مواد و مکانیک می‌باشد.
- اجرای این طرح نیاز به تشکیل یک تیم فنی-اجرایی جامع از متخصصین داخلی در شاخه‌های مختلف علمی-مهندسی و همچنین یک تیم مجرب خارجی با توان و سابقه علمی و اجرایی بین المللی دارد.

منابع

امانی‌پور، ح.، ۱۳۹۱. تعیین مدل ژئومکانیکی لایه مخزنی بنگستان میدان نفتی منصوری. پایان‌نامه دکترا، دانشگاه فروسى مشهد.

قره چلو، س.، ۱۳۹۹، بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئومکانیکی و رخساره‌ای مخزن آسماری، در یکی از میادین نفتی شمال غرب فروافتادگی دزفول و رخنمون‌های مجاور، پایان‌نامه دکترا، دانشگاه تهران، ۲۱۲ ص.

Abass, H.H., Al-Mulhem, A.A., Alqam, M.H., Khan, M.R., 2006. Acid fracturing or proppant fracturing in carbonate formation? A rock mechanics view, in: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.

Adams, J. and Rowe, C., 2013. Differentiating Applications of Hydraulic Fracturing. Intech, Chapter 18, 391-400.

Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. 2006. Stability analysis of vertical boreholes using and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin. 1st International Conference on

Archer, S. and Rasouli, V., 2012. A log-based analysis to estimate mechanical properties

Barree, R.D., Conway, M.W. and Miskimins, J.L., 2014, April. Use of conventional well logs in selective completion designs for unconventional reservoirs. In SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting. OnePetro.

Berry M., Montgomery C.T., 2015. Hydraulic Fracturing. Taylor and Francis, 812 pp. Fjaer E., Holt R. M., Raaen A. M., Risnes R., & Horsrud P. 2008. Petroleum related between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well.

Biot M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys., 12 (2), 155–164.

Cai, B., Y. H. Ding, H. Shen, Z. Q. Cui and C. M. He (2014). Hydraulic Fracturing Technology in Oil and Gas Development. Advanced Materials Research, Trans Tech Publ.

Caineng, Z., D. Dazhong, W. Yuman, L. Xinjing, J. HUANG, W. Shufang, G. Quanzhong, C. ZHANG, W. Hongyan and L. Honglin (2016). Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II). Petroleum Exploration and Development vol.43(2),pp. 182-196.

- Caineng, Z., D. Dazhong, W. Yuman, L. Xinjing, J. HUANG, W. Shufang, G. Quanzhong, C. ZHANG, W. Hongyan and L. Honglin (2016). Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II). PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT vol.43(2), PP. 182-196.
- Chen, J. (2018). Shale gas exploration and development progress in china and the way forward. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.
- Dyni, John R. 2006. Geology and resources of some world oil-shale deposits. Scientific Investigations Report 2005–5294. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Retrieved 2007-07-09. 49 pp.
- Dyni, John R. 2010. 2010 Survey of Energy Resources. Word Energy Council. 618 pp.
- Eaton, B.A., 1975. The equation for geopressure prediction from well logs. In Fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Society of Petroleum Engineers.
- Fracturing, Drilling and Structural Engineering. Elsevier, 318 pp.
- Gandossi, L. and U. Von Estorff (2013). An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production. Eur. Commisison Jt. Res. Cent. Tech. Reports vol.26347.
- Ghadimi, M., Ghaedi, M., Malayeri, M.R., Amani, M.J., 2020. A new approach to model asphaltene induced permeability damage with emphasis on pore blocking mechanism. J. Pet. Sci. Eng. 184. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106512>
- Guo, B., Liu, X., Tan, X., 2017. Chapter 13 - Acidizing, in: Guo, B., Liu, X., Tan, X.B.T.-P.P.E. (Second E. (Eds.), . Gulf Professional Publishing, Boston, pp. 367–387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809374-0.00013-1>
- Heidbach O., Reinecker J., Tingay M., Müller B., Sperner B., Fuchs K., & Wenzel F. 2007. Plate boundary forces are not enough: Second- and third- order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. Tectonics, 26(6).
- Jacobs, J. A. and S. M. Testa (2019). Environmental Considerations Associated with Hydraulic Fracturing Operations: Adjusting to the Shale Revolution in a Green World, John Wiley & Sons. Journal of Geophysical Research 90, 5513-5521.
- Kosari E., Ghareh-Cheloo S., Kadkhodaie-Ilkhchi A. and Bahroudi A., 2015. Fracture characterization by fusion of geophysical and geomechanical data: a case study from the Asmari reservoir, the Central Zagros fold-thrust belt. Journal of Geophysics and Engineering, 12(1), 130-143.
- Lengyel, T., Varga, A., Safranyik, F., Jobbik, A., 2021. Coupled Numerical Method for Modeling Propped Fracture Behavior. Appl. Sci. . <https://doi.org/10.3390/app11209681>



- Lonnee, J. and Machel, H.G., 2006. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas field, Middle Devonian Slave Point Formation, British Columbia, Canada. AAPG bulletin, 90(11), pp.1739-1761.
- McClure M.W., Horne R.N., 2013. Discrete Fracture Network Modeling of Hydraulic Stimulation. Springer, 96 pp. Mining Sciences, 43(8), 1200-1211.
- Miskimins J.L., Holditch S.A., Veatch Jr., R.W., 2019. Hydraulic Fracturing: Fundamentals and Advancements. Society of Petroleum Engineers, 798 pp.
- Miskimins, J.L., 2019. Hydraulic Fracturing: Fundamentals and Advancements. Society of Petroleum Engineers.
- Montgomery, C. T. and M. B. Smith (2010). Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. Journal of Petroleum Technology vol.62(12), PP. 26-40.
- Montgomery, C., 2015. Hydraulic Fracturing. CRC Press.
- Moska R., Labus K., Kasza P., 2021. Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems-Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions-A Review. Energies, 14, 5725.
- Perez, R. and Marfurt, K., 2013. Brittleness estimation from seismic measurements in unconventional reservoirs: Application to the Barnett Shale. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013 (pp. 2258-2263). Society of Exploration Geophysicists.
- Petroleum and Mineral Resources, Kurdistan, Iraq, University of Koya.
- Plumb, R.A., Hickman, S.H., 1985. Stress-induced borehole enlargement: a comparison rock mechanics, 53, Elsevier.
- Shaoul, J. R., W. J. Spitzer, S. B. Mendenhall, S. Soufi and S. Aloun (2008). Optimizing Hydraulic Fracturing in a Mature Oil Reservoir in Algeria. SPE North Africa Technical Conference & Exhibition, OnePetro.
- Sharma, M.M., GADDE, P.B., SULLIVAN, R., Sigal, R., FIELDER, R., 2005. Slick-water and hybrid fracturing treatments: lessons learned. J. Pet. Technol. 57, 38–40.
- Shojaei A.K., Shao J., 2017. Porous Rock Fracture Mechanics with Application to Hydraulic
- Spears, Richard. 2016. Hydraulic Fracturing Market. Tulsa, Oklahoma 74137 USA. 196 pp.
- Speight J.G., 2016. Handbook of Hydraulic Fracturing. Wiley, 299 pp.
- Speight, J.G., 2016. Handbook of hydraulic fracturing. John Wiley & Sons.
- Spivey, J.P., Lee, W.J., 2013. Applied well test interpretation. Society of Petroleum Engineers Richardson, TX.
- Susko, K. A. (2017). Fracking in Pennsylvania: History, Geopolitics, and Public Health.



- Terzaghi, K., 1925. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Franz Deuticke, Leipzig, Germany. 399 pp. the Mogi–Coulomb failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and
- World Energy Outlook, 2010. IEA Chief Economist. 23 pp.
- World Energy Resources, 2016. World Energy Council. 1028 pp.
- Zendehboudi, S., Bahadori, A., 2017. Production Methods in Shale Oil Reservoirs.[In:] Shale Oil and Gas Handbook.
- Zhang, L. and Hascakir, B., 2021. A Review of Issues, Characteristics, and Management for Wastewater due to Hydraulic Fracturing in the US. Journal of Petroleum Science and Engineering, p.108536.
- Zoback, M.D, 2007. Reservoir geomechanics. Paperback edition. New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-14619-7.