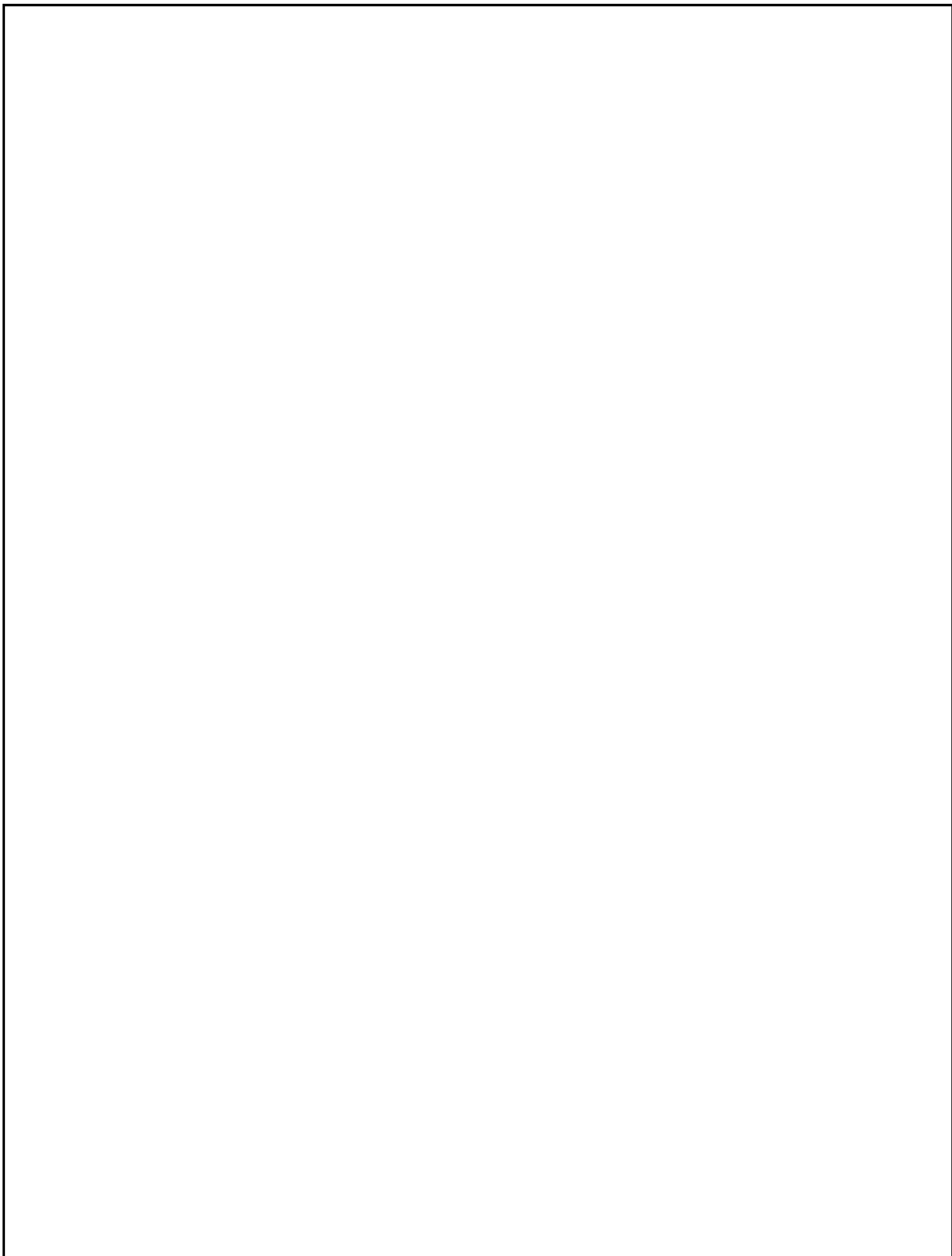






عنوان طرح:

"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 میرود 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 فعالیتهای تعریف شده در فاز یک (۱) این طرح ذیل گرد آوری اطلاعات کلی مربوط به این فناوری میپردازد. این گزارش در قالب شش (۶) فصل بترتیب زیر ارائه میگردد:

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

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- حوزه های درگیر در فناوری	۹
۲-۴- مکانیسم عملکرد فناوری	۱۰
۳- تاریخچه و سیر تحول فناوری	۱۲
۳-۱- مروری بر تاریخچه جهانی	۱۲
۳-۲- تاریخچه فناوری در مناطق مختلف	۱۹
۴- داده های آماری فناوری شکافت هیدرولیکی	۲۷
۴-۱- کلیات آماری	۲۷
۴-۲- آمار ذخائر نفت و گاز شیل جهان	۲۸
۴-۳- آمار مربوط به کشور آمریکا	۳۵
۴-۴- آمار مربوط به کشور روسیه	۴۳
۴-۴-۱- عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای	۴۴
۴-۴-۲- شکافت هیدرولیکی چند مرحله ای	۵۰
۴-۵- آمار مربوط به کشور چین	۵۲

- ۵۲-۴-۵-۱- صنعت گاز شیل کشور چین.....
- ۵۴-۴-۵-۲- صنعت نفت شیل کشور چین.....
- ۵۵-۴-۶- آمار مربوط به خاورمیانه.....
- ۵۸-۴-۶-۱- رسوبات شیلی در منطقه خاور میانه.....
- ۶۰-۴-۷- آمار مربوط به کشور ایران.....
- ۶۰-۴-۷-۱- سوابق اجرای فناوری در ایران.....
- ۶۱-۴-۷-۲- ذخایر نفت و گاز شیل ایران.....
- ۶۲-۴-۸- بازار جهانی.....
- ۶۶-۴-۹- چشم انداز فناوری.....
- ۶۶-۴-۹-۱- چشم انداز جهانی.....
- ۶۷-۴-۹-۲- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در آمریکا.....
- ۶۸-۴-۹-۳- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در روسیه.....
- ۷۰-۴-۹-۴- چشم انداز شکافت هیدرولیکی در چین.....
- ۷۳-۵- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی.....
- ۷۳-۵-۱- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنعت نفت.....
- ۷۴-۵-۱-۱- مخازن نفت و گاز کم تراوی توسعه نیافته بدلیل صرفه اقتصادی.....
- ۷۴-۵-۱-۲- مخازن نفت و گاز نامتعارف شیل.....
- ۷۵-۵-۱-۳- ترمیم آسیب های سازندی - پشت سر گذاشتن ناحیه ی آسیب دیده ی اطراف چاه.....
- ۷۶-۵-۱-۴- کنترل تولید شن.....
- ۷۷-۵-۱-۶- کاهش رسوب آسفالتین.....
- ۷۸-۵-۱-۷- افزایش سطح تماس با مخزن.....

- ۷۹-۲-۵- کاربردهای فناوری شکافت هیدرولیکی در صنایع غیر نفتی.....
- ۸۰-۲-۵-۱- تعیین وضعیت تنش منطقه.....
- ۸۱-۲-۵-۲- انرژی ژئوترمال.....
- ۸۴-۲-۵-۳- آب زیرزمینی.....
- ۸۵-۲-۵-۱- روش باز کردن و تزریق با فشار سیال.....
- ۸۶-۲-۵-۴- معدنکاری.....
- ۸۹-۲-۵-۵- تزریق پساب صنعتی و هسته ای به درون زمین.....
- ۹۰-۵-۳- کاربردها و ضرورت استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی در ایران.....
- ۹۱-۵-۴- محدودیت های زیست محیطی.....
- ۹۵-۶- مفاهیم کلی علمی-مهندسی در فناوری شکافت هیدرولیکی.....
- ۹۵-۶-۱- مفاهیم زمین شناسی.....
- ۹۷-۶-۱-۱- ارزیابی سازند (نمودارگیری).....
- ۹۹-۶-۱-۲- آنالیز مغزه.....
- ۱۰۰-۶-۱-۳- ژئوفیزیک.....
- ۱۰۴-۶-۱-۴- تکتونیک.....
- ۱۰۶-۶-۱-۵- ژئومکانیک.....
- ۱۰۹-۶-۲- سیالات.....
- ۱۱۲-۶-۳- طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی.....
- ۱۱۲-۶-۳-۱- داده های مورد نیاز برای طراحی.....
- ۱۱۶-۶-۳-۲- پارامترهای طراحی.....
- ۱۱۹-۶-۳-۳- مراحل و فرایند طراحی.....



- ۱۲۰ ۴-۳-۶- تست های قبل از عملیات اصلی
- ۱۲۰ ۵-۳-۶- آنالیز نتایج پس از عملیات
- ۱۲۱ ۶-۳-۶- روشهای پایش
- ۱۲۲ ۴-۶- تجهیزات سطح الارضی
- ۱۳۲ ۵-۶- تکمیل چاه و تجهیزات درون چاهی
- ۱۳۶ خلاصه
- ۱۳۸ 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 شکافت به وسیله ی پروپانت (Zendehboudi and Bahadori, 2017) ۶
- شکل ۳-۲- باز نگه داشتن شکافت 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 ۱-۳- اولین چاه حفاری شده توسط ادوین دریک در اواخر دهه ۱۸۵۰ ۱۳
- شکل ۲-۳- موقعیت میادین در آفریقا ۲۱
- شکل ۱-۴- نقشه توزیع حوضه های هیدروکربنی در دسترس نفت و گاز شیلی (www.eia.gov) ۲۹
- شکل ۲-۴- تولید گاز طبیعی ایالات متحده از چاههای توسعه یافته با فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیارد فوت مکعب بر روز ۳۶
- شکل ۳-۴- گاز طبیعی تولید شده از چاهها با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون فوت مکعب بر روز ۳۶
- شکل ۴-۴- تولید گاز شیل ایالات متحده به تفکیک میادین گازی بر حسب میلیارد فوت مکعب در روز ۳۷
- شکل ۵-۴- تولید نفت ایالات متحده با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز ۳۸
- شکل ۶-۴- نفت تولید شده از چاههایی که با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز ۳۸
- شکل ۷-۴- تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته در کشور آمریکا در سال ۲۰۱۹ به تفکیک ماه ۳۹
- شکل ۸-۴- تعداد چاه های عمودی و افقی ایالت تگزاس در طی سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰ ۴۰
- شکل ۹-۴- مقایسه تعداد چاه های عمودی و افقی در ایالت تگزاس. نقاط سیاه چاه های عمودی و نقاط قرمز چاه های افقی ۴۱
- شکل ۱۰-۴- میزان تولید، نیاز کشور و واردات نفت در کشور امریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ ۴۲
- شکل ۱۱-۴- میزان تولید، نیاز کشور و واردات گاز در کشور امریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ ۴۲
- شکل ۱۲-۴- تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ در روسیه (<https://www.statista.com/>) ۴۴
- شکل ۱۳-۴- سهم مناطق مختلف در تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای در روسیه در سال ۲۰۱۸ به درصد ۴۶
- شکل ۱۴-۴- عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای انجام گرفته در مناطق مختلف روسیه از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۸ ۴۷
- شکل ۱۵-۴- سهم کمپانی ها در بازار شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای در روسیه در سال ۲۰۱۸ ۴۸

- شکل ۴-۱۶- حجم بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای در روسیه از سال ۲۰۰۶-۲۰۱۸ به میلیارد روبل ۴۹
- شکل ۴-۱۷- عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای در روسیه ۲۰۱۱-۲۰۱۸ ۵۱
- شکل ۴-۱۸- (راست) منابع گاز شیل در چین (میلیارد متر مکعب) چپ) مخازن اثبات شده گاز شیل در چین (تریلیون مترمکعب) ۵۳
- شکل ۴-۱۹- شیل‌های پالئوزئیک در خاورمیانه ۵۹
- شکل ۴-۲۰- شیل‌های مزوزوئیک: سنگ‌های منشأ ژوراسیک و کرتاسه خاورمیانه ۵۹
- شکل ۴-۲۱- حجم مارکت صنعت شکافت هیدرولیکی به تفکیک بخش‌های مختلف تا سال ۲۰۱۶ ۶۳
- شکل ۴-۲۲- مارکت جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک شرکت‌های انجام دهنده ۶۴
- شکل ۴-۲۳- مارکت جهانی عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم کشورها تا سال ۲۰۱۶ ۶۵
- شکل ۴-۲۴- نمودار افزایش هزینه‌های هر چاه جهت عملیات شکافت هیدرولیکی تا سال ۲۰۱۶ ۶۶
- شکل ۴-۲۵- پیش‌بینی بازار شکافت هیدرولیکی در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ ۶۷
- شکل ۴-۲۶- بازار شکافت هیدرولیکی ایالات متحده آمریکا از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۷ (میلیارد دلار) ۶۸
- شکل ۴-۲۷- پیش‌بینی تولید گاز شیل در چین تحت سه سناریوی مختلف توسعه و قیمت گاز (Caineng et al., 2016) ۷۲
- شکل ۵-۱- برقراری ارتباط بین مخزن و چاه از طریق شکاف و دور زدن ناحیه‌ی آسیب داده (Montgomery, 2015) ۷۵
- شکل ۵-۲- پدیده‌ی مخروط شدگی آب و گاز (<https://eng-info-tech.blogspot.com>) ۷۷
- شکل ۵-۳- دسته‌بندی 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) ۷۸
- شکل ۵-۴- افزایش دسترسی چاه به نقاط دوردست مخزن بر اثر شکاف زنی (Montgomery, 2015) ۷۹
- شکل ۵-۵- تنش اصلی درون زمین ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) ۸۱
- شکل ۵-۶- نمایی از یک سیستم ژئوترمال پیشرفته که چاه تزریق و چاه استخراج توسط شکافت هیدرولیکی برانگیخته شده‌اند (Moska et al. 2021) ۸۳
- شکل ۵-۷- نقشه‌کشورهایی که در سیستم ژئوترمال پیشرفته سرمایه‌گذاری کرده‌اند و در چاه‌های تزریق و استخراج شکافت هیدرولیکی انجام داده‌اند (Moska et al. 2021) ۸۴
- شکل ۵-۸- شکافت هیدرولیکی در چاه‌های آب زیرزمینی ۸۵
- شکل ۵-۹- استخراج معادن با استفاده از شکافت هیدرولیکی به منظور ایجاد بلوکهای کوچک (Adams J. and Rowe, 2013) ۸۷

- شکل ۵-۱۰- شکافهای ایجاد شده بر اثر فناوری شکافت هیدرولیکی در یک گمانه کوچک. ۸۷.....
- شکل ۵-۱۱- پروپانت سبز رنگ که شکاف را پر کرده است. ۸۸.....
- شکل ۵-۱۲- تزریق پساب صنعتی به درون زمین با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی (Zhang and Hascakir, 2021). ۹۰.....
- شکل ۵-۱۳- استخراج آب برای فرایند شکافت هیدرولیکی (Miskimins et al. 2019). ۹۲.....
- شکل ۵-۱۴- ترکیب سیال پس از عملیات شکافت (Zhang and Hascakir, 2021). ۹۲.....
- شکل ۵-۱۵- مواد آلوده جامد حاصل از شکافت هیدرولیکی شامل گل حفاری آلوده (Zhang and Hascakir, 2021). ۹۳.....
- شکل ۵-۱۶- استخراج متان از شیل گازی کم عمق (Zhang and Hascakir, 2021). ۹۴.....
- شکل ۶-۱- دوباره فعال شدن یا باز شدن شکاف طبیعی در اثر ایجاد شکاف هیدرولیکی (Barree et al. 2014). ۹۶.....
- شکل ۶-۲- تاثیر شکاف بر تراوایی ماتریکس (Barree et al. 2014). ۹۶.....
- شکل ۶-۳- لاگ تصویری به منظور شناسایی صفحه شکستگی. خطوط سینوسی نشان دهنده شکستگی ها و سوزن ها شیب و آزیموت صفحه شکستگی (Berry and Montgomery, 2015). ۹۸.....
- شکل ۶-۴- تبدیل خطوط سینوسی شکل به موقعیت صفحه شکستگی در چاه (Berry and Montgomery, 2015). ۹۹.....
- شکل ۶-۵- 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. ۱۰۰.....
- شکل ۶-۶- کراس پلات لاندلاند رو-میو رو حاصل از سرعت موج و چگالی سنگ که برای شناسایی زون های شکل پذیر و شکننده کاربرد دارد (Perez 2013). ۱۰۲.....
- شکل ۶-۷- یک مقطع از مدول یانگ تخمین زده شده با داده سائزمیک (قره چلو ۱۳۹۹). ۱۰۲.....
- شکل ۶-۸- نقشه توزیع مدول یانگ در میدان با استفاده از داده لرزه ای 3D (Gharechelou et al. 2016). ۱۰۳.....
- شکل ۶-۹- رژیم تنش کششی، امتدادلغز و تراکمی در یک منطقه منفعل کنار قاره ای (<https://byjus.com/physics/plate-> tectonics). ۱۰۴.....
- شکل ۶-۱۰- رژیم تنش فشاری موجب کوهزایی و گسلهای معکوس شده (<https://byjus.com/physics/plate-tectonics/>). ۱۰۵.....
- شکل ۶-۱۱- نقش تاریخچه تدفین در گسترش شکافهای طبیعی سازند (Lonnee and Machel 2006). ۱۰۶.....
- شکل ۶-۱۲- مقادیر تنش های افقی و عمودی محاسبه شده از روابط پوروالاستیک در یک چاه مطالعاتی (قره چلو ۱۳۹۹). ۱۰۷.....
- شکل ۶-۱۳- لاگهای معمولی و سرعت موج s و p به همراه مدولهای الاستیک دینامیکی محاسبه شده از روابط تجربی (قره چلو ۱۳۹۹). ۱۰۸.....

- شکل ۶-۱۴- تاثیر اندازه ی پروپانت بر میزان بازشدگی شکاف (اعداد مشخص شده، اندازه ی مش هستند) ۱۱۷
- (Lengyel et al., 2021) ۱۱۷
- شکل ۶-۱۵- مراحل طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی ۱۱۹
- شکل ۶-۱۶- نمودار فشار ته چاهی برای شکاف الف) با هدایت پذیری نا محدود و ب) هدایت پذیری محدود (Spivey and Lee, 2013) ۱۲۱
- شکل ۶-۱۷- نمونه پمپهای فشار بالا، مورد استفاده در عملیات شکافت هیدرولیکی (<https://www.global.weir>) ۱۲۳
- شکل ۶-۱۸- مخلوط کن مورد استفاده در عملیات شکافت هیدرولیکی (<https://www.nov.com/products/frac-blenders>) ۱۲۴
- ۱۲۴
- شکل ۶-۱۹- تجهیزات کنترل پروپانت (<https://www.conveyorsetc.com>) ۱۲۵
- شکل ۶-۲۰- واحد مواد شیمیایی ۱۲۶
- شکل ۶-۲۱- ون داده ها و اطلاعات ۱۲۶
- شکل ۶-۲۲- واحد رطوبت دهی ۱۲۷
- شکل ۶-۲۳- واحد رطوبت دهی ۱۲۷
- شکل ۶-۲۴- میسل تریلر (<https://app.emaze.com>) ۱۲۸
- شکل ۶-۲۵- نمونه فرک تانک (<https://www.kwipped.com>) ۱۲۹
- شکل ۶-۲۶- لوله ها، اتصالات و شیرها (Montgomery, 2015) ۱۳۰
- شکل ۶-۲۷- الف) چگالی سنج رادیواکتیو ب) جریان سنج فشار بالا پ) گیرنده ی فشار ت) گیج فشار ته چاهی (Montgomery, 2015) ۱۳۱
- شکل ۶-۲۸- ابزار ایزوله کردن تجهیزات سر چاهی (Montgomery, 2015) ۱۳۲
- شکل ۶-۲۹- پکر مورد استفاده برای ایزوله کردن بخشی از چاه در عملیات شکاف زنی چند مرحله ای <https://www.smcoy.fi/knowledge/hydraulic-fracturing/> ۱۳۴
- شکل ۶-۳۰- انجام عملیات شکاف چند مرحله ای. الف) plug-and perf ب) frac sleeve ۱۳۵
- شکل ۶-۳۱- نحوه ی عملکرد frac sleeve ۱۳۵

فهرست جداول

- جدول ۴-۱- لیست تعدادی از کشورهای اجرا کننده عملیات شکافت هیدرولیکی ۲۸
- جدول ۴-۲- منابع ارزیابی شده گاز شیل در جهان در سال ۲۰۱۳ (www.eia.gov) ۳۰
- جدول ۴-۳- حجم ذخایر نفت شیل کشورهای مختلف (Dyni, 2010) ۳۲
- جدول ۴-۴- ذخائر حجم در جا و اثبات شده قابل استحصال نفت شیل جهان تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی ۳۳
- جدول ۴-۵- احجام در جا و قابل استحصال چین تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی به تفکیک حوضه های رسوبی و سازندها ۵۵
- جدول ۴-۶- ذخایر نفتی و گازی متعارف و نامتعارف برخی از کشورهای خاورمیانه ۵۶
- جدول ۴-۷- آمار مربوط به ذخائر حجم در جا و قابل استحصال بعضی از کشورهای خاور میانه (EIA ۲۰۱۴) ۵۷
- جدول ۴-۸- پروژه های شکافت هیدرولیکی انجام شده در ایران ۶۱
- جدول ۴-۹- لیست شرکت درگیر عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم فعالیت در طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ ۶۴
- ۶۴
- جدول ۵-۱- کاربردهای غیر نفتی فناوری شکافت هیدرولیکی ۸۰
- جدول ۵-۲- لیست معادنی که تا سال ۲۰۱۲ در آن فناوری شکافت هیدرولیکی انجام شده است ۸۸
- جدول ۶-۱- داده های مورد نیاز برای مدلسازی شکاف ۹۷
- جدول ۶-۲- نمونه های از سیالات شکافنده ۱۱۰
- جدول ۶-۳- افزودنی های رایج سیال شکاف زنی (Speight, 2016) ۱۱۱
- جدول ۶-۴- پارامترهای مخزنی مورد نیاز ۱۱۳
- جدول ۶-۵- داده های چاه ۱۱۴
- جدول ۶-۶- خواص الاستیک سنگ ۱۱۴
- جدول ۶-۷- اطلاعات زمین شناسی ۱۱۵
- جدول ۶-۸- داده های مربوط به سیال شکاف زنی و پروپانت ۱۱۵

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 ملتها 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 راههای 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 ملتها 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 بین‌المللی احساس می‌گردد و به نظر می‌رسد مصرف کننده‌های بزرگ انرژی دنیا (چین، هند، پاکستان) در آینده نیاز مبرم‌تری به تامین سوخت‌های 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. دست یابی به فناوری‌های نوین نیازمند

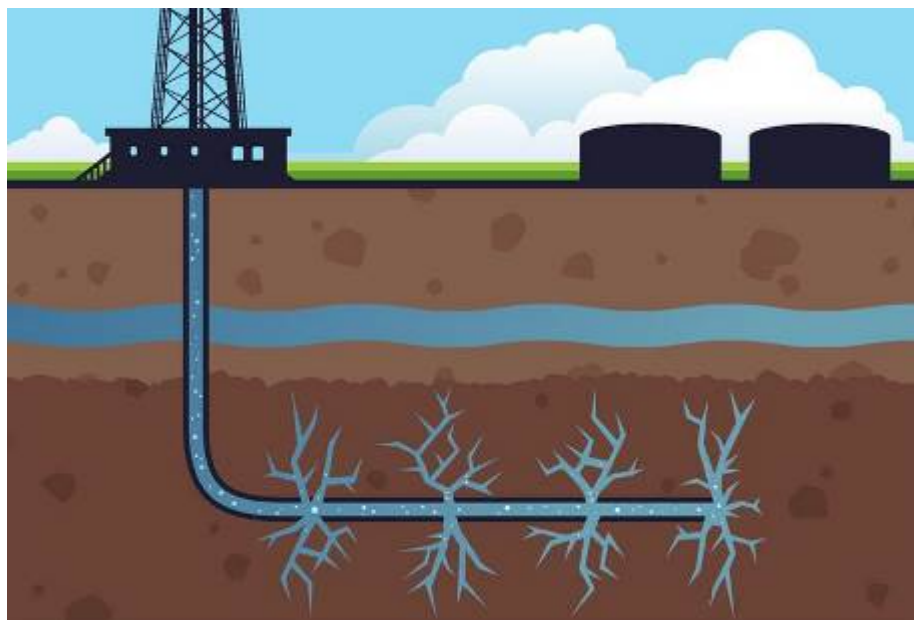
انتقال دانش مربوط به فناوری است تا هم میزان تولید از منابع هیدروکربنی را افزایش دهد هم وابستگی خارجی را کاهش داده و استقلال ملی بیشتری در زمینه تولید انرژی داشته باشد.

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 د رکشور 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 می یابند (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 چاه های 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 شرکت های 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 می شود. 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 دانه های ماسه ای یا شنی معروف به "پروپانت" به همراه سیال تزریقی به داخل شکاف فرستاده می شود تا بعد از پایان تزریق و کاهش فشار، از بسته شدن شکاف یا شکافهای ایجاد شده جلوگیری شود (شکل ۲- ۲). پروپانت ها دانه هایی 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 می شود. در نوع اول اهم در مرحله ی ایجاد شکاف و هم در مرحله ی بعدی که پروپانت به درون شکاف تزریق می شود از یک سیال دارای ویسکوسیته ی بالا

^۱Gel fracking

استفاده می شود. این سیال غالباً با اضافه کردن ژل، پلیمر و کراس لینک به سیال پایه ایجاد می شود. در نوع دوم اهم برای ایجاد و توسعه ی شکاف و هم برای انتقال پروپانت ها به درون شکاف از آب استفاده می شود. استفاده از آب بدون ژل و پلیمر در ایجاد شکاف نسبت به روش اول باعث ایجاد ساختار شکاف پیچیده تری می شود که میزان تولید را افزایش می دهد. همچنین به علت پایین بودن ویسکوسیته، فشار پمپاژ مورد نیاز کاهش یافته و می توان با نرخ بیشتری تزریق را انجام داد. اما استفاده از آب برای حمل پروپانت ها، بدون اضافه کردن پلیمر و ژل، ریسک ته نشست پروپانت ها را افزایش می دهد. زیرا قدرت چسبندگی سیال است که توانایی حمل پروپانت ها را افزایش می دهد. از این رو امروزه استفاده از روش های ترکیبی ۳رایج شده است. به این صورت که در گروه سوم طراحی عملیات با پروپانت، ایجاد و توسعه ی شکاف به وسیله ی آب انجام می گیرد تا بتوان با صرف انرژی کمتر، شکاف پیچیده تر و گسترده تری را توسعه داد. اما در مرحله بعد و برای فرستادن پروپانت ها به داخل شکاف از مخلوط آب و پلیمر/ژل/ کراس لینک استفاده می شود (Sharma et al., 2005).



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

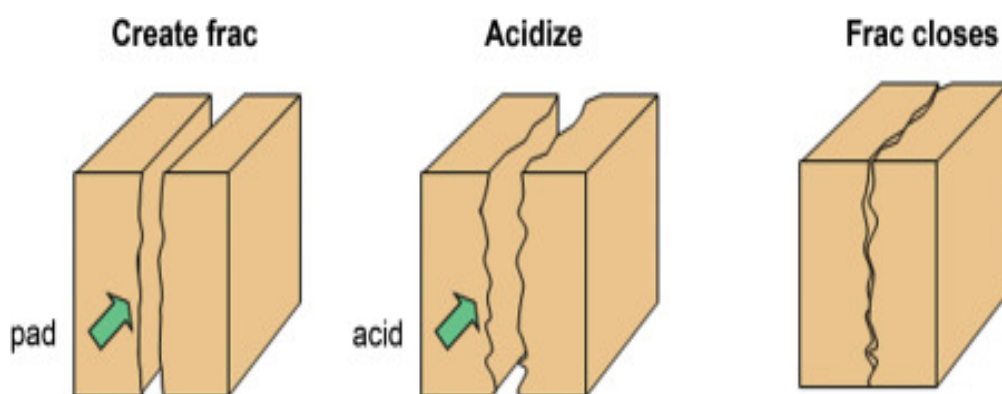
^۱Water frackin

^۲Hybrid

۲-۱-۲- شکافت هیدرولیکی اسیدی

در این روش، پس از آنکه با تزریق سیال اولیه، شکاف توسعه یافت، یک سیال اسیدی به درون شکاف تزریق می شود. 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 می کند (شکل ۲-۳). این روش در سازندهای کربناته ی گچی، آهکی و دولومیتی انجام می گیرد که در اسید انحلال پذیر هستند. استفاده از اسید به جای پروپانت، باعث کاهش ریسک هایی مانند جریان یافتن پروپانت به درون چاه و آسیب رساندن به تجهیزات سطحی و درون چاهی، خرد شدن پروپانت ها بر اثر فشار و تولید ذرات ریز، جا گیری نامناسب پروپانت ها درون شکاف، تغییر ساختار پک پروپانت به مرور زمان و ... می شود. 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 شکاف نیز بیشتر می باشد.

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



شکل ۲-۳- باز نگه داشتن شکاف به وسیله ی اسیدزنی (Guo et al., 2017)

۲-۲- فرآیند عملیات اصلی شکافت هیدرولیکی

فرآیند انجام عملیات شکافت هیدرولیکی با دریافت داده های مورد نیاز از منابع مختلف (مغزه، چاه آزمایی، چاه نگاری، داده های حفاری) آغاز می شود. سپس در طول فرآیند طراحی، پارامترهایی مانند نرخ تزریق، ویسکوزیته سیال، پروپانت ها و افزودنی های شیمیایی مناسب، ابعاد و هندسه ی شکاف، میزان هرزروی و ... تعیین می شوند. قبل از انجام فرآیند اصلی، یک سری تست ها با ماهیتی مشابه فرآیند اصلی اما در مقیاس زمانی و عملیاتی کوچکتر به منظور پیشبرد مدل سازی و طراحی اصلی انجام می شود. با استفاده از نمودارهای فشاری ثبت شده، پارامترهایی نظیر فشار شکست تعیین شده و جهت کالیبراسیون و طرحی مدل مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در نهایت نیز عملیات اصلی انجام می شود که البته می توان همزمان با انجام عملیات و پردازش و تفسیر داده های 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 می گیرد. قابل ذکر است با توجه به هدف انجام فرآیند، نوع سازند و نوع چاه طراحی عملیات میتواند بصورت یک مرحله ای و یا چند مرحله ای صورت پذیرد که بالطبع در صورت چند مرحله ای 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 می تواند از داخل چاه، لوله جداری و یا فضای حلقوی پشت لوله جداری باشد) به داخل سازند تزریق می شود. در این مرحله، شکاف یا شبکه شکافی شکل گرفته و توسعه می یابد. در حالت طبیعی برداشتن فشار تزریق منجر به بسته شدن مجدد شکاف می گردد.

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 می شود. 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 نحوه‌ی 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 زمین‌شناسی 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 بهره‌برداری و تکمیل چاه باید تجهیزات سرچاهی و ته‌چاهی 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 زمین‌شناسی 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

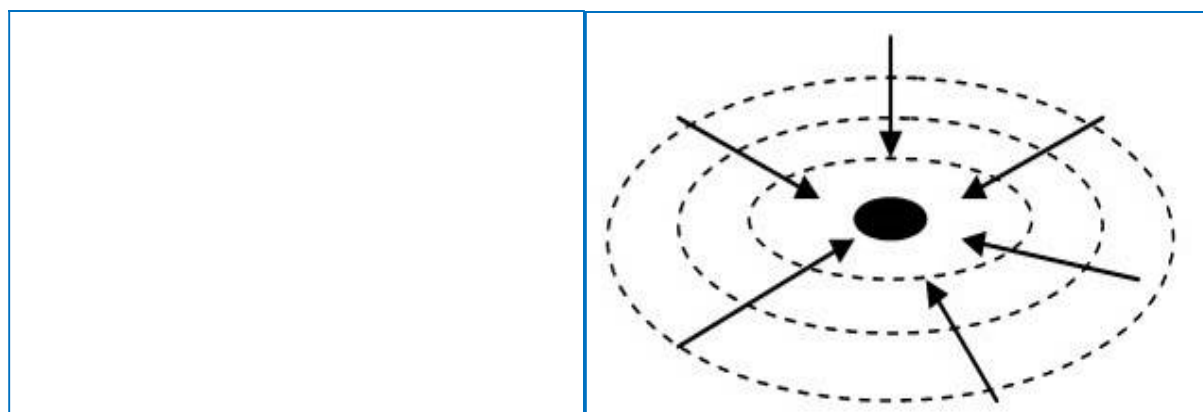
برآوردهای اقتصادی برای بهینه سازی فرآیند و رسیدن به بیشترین تولید با صرف کمترین هزینه، اقدامی ضروری می باشد. تعیین افزودنی های شیمیایی مورد نیاز برای رسیدن به خواص مطلوب سیال شکاف زنی باید توسط یک تیم شیمیدان متخصص در این زمینه انجام شود. جلوگیری از هرزروی سیال (با ایجاد به موقع فیلتر یک بر روی سطح شکاف) 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 پمپ ها و سایر تجهیزات سطح الارضی مورد استفاده بر عهده ی مهندسان مکانیک و بهره برداری متخصص است. هندسه ی 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 می توان 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 می توان نتیجه گرفت که به سرانجام رساندن یک عملیات شکاف زنی نیاز به تشکیل یک تیم قوی از گستره ی متنوعی از تخصص ها دارد.

۲-۴- مکانیسم عملکرد فناوری

اصلی ترین مکانیزم عملکرد شکافت هیدرولیکی، فرآهم 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 می باشد در صورتیکه ایجاد شکاف در مخزن، هندسه ی جریان را از حالت شعاعی به حالت خطی تغییر می دهد)

شکل ۲-). در رژیم جریان شعاعی همانطور که در شکل ۲-۴- الف مشخص است خطوط جریان در راستای شعاع های یک استوانه اند اما با ایجاد شکاف هیدرولیک، وقتی که جریان از مخزن وارد شکاف شد در

ادامه ی مسیر برای رسیدن به چاه یا افت فشار خیلی ناچیزی را تجربه می کند و یا در صورت ایجاد شکاف با گذردهی بالا می توان 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 هندسه ی جریان باعث کاهش افت فشار و افزایش دبی می شود و این تغییر رژیم جریان در مراحل بعدی توسعه ی مخزن و حفر چاه های جدید بسیار تاثیر گذار است (Miskimins, 2019).



(ب)

(الف)

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

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 دکل های 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.

^۱Edvin Drake

^۲Pennsylvania

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

ریشه فناوری شکافت هیدرولیکی را می توان به دهه ۱۸۶۰ نسبت داد چرا که در آن زمان، نیتروگلیسرین برای تحریک چاههای کم عمق در سنگهای سخت پنسیلوانیا، نیویورک، کنتاکی و ویرجینیایی غربی مورد استفاده قرار می گرفت. این ماده با وجود اینکه بسیار سمی است و در برخی مواقع استفاده از آن غیرقانونی می باشد ولی در مشبک کاری 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 شبکه های 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 نیتروگلیسرین 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 بهره-وری می شدند.

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

پس از مطرح شدن ایده استفاده از اسید برای تحریک چاه، فلوید فریس^۳ از شرکت نفت و گاز استانولینداویل^۴ 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^۵ در ایالت کانزاس^۶ 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 ژله ای 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^۷ از شرکت استانولینداویل عملیات ایجاد شکاف به طور مبسوطتری به صنعت معرفی شد و پس از آن با اعطای امتیاز تزریق سیال به شرکت سیمانکاری چاههای نفت هالیبرتون^۸ 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

^۳Floyd Farris

^۴Stanolind Oil

^۵Hugoton Gas Field

^۶Kansas

^۷J.B.Clark

^۸Halliburton 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 فراورده های 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 هسته ای 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 فزاینده ای 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., 2018). 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

^۱Oklahoma

^۲Archer

^۳Yumen

^۴Massive Hydraulic Fracturing

میکروسایز میک^۳ در این صنعت برای اولین بار توسط آزمایشگاه Sandia معرفی شد. با استفاده از این روش پایش می توان اطلاعاتی از قبیل طول، ارتفاع، آزمون و موقعیت شکستگی در اطراف چاه به دست آورد. می توان 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 میکروسایز میک نیز در این دهه افزایش یافته است. همچنین در این دهه جورج. پی. میچل^۴ (بنیانگذار شرکت میچل انرژی) در شرکت خود گامی در جهت شکافت هیدرولیکی شیل ها 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 می شناسیم. در این دهه ترکیب تکنیک های حفاری افقی، پایش میکروسایز میک و عملیات های شکافت هیدرولیکی با Slick Water رخ داد.

سال ۲۰۰۳ نقطه ای بود که بسیاری از مورخان و تحلیل گران 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.

^۳Microseismic

^۴George.P.Mitchell

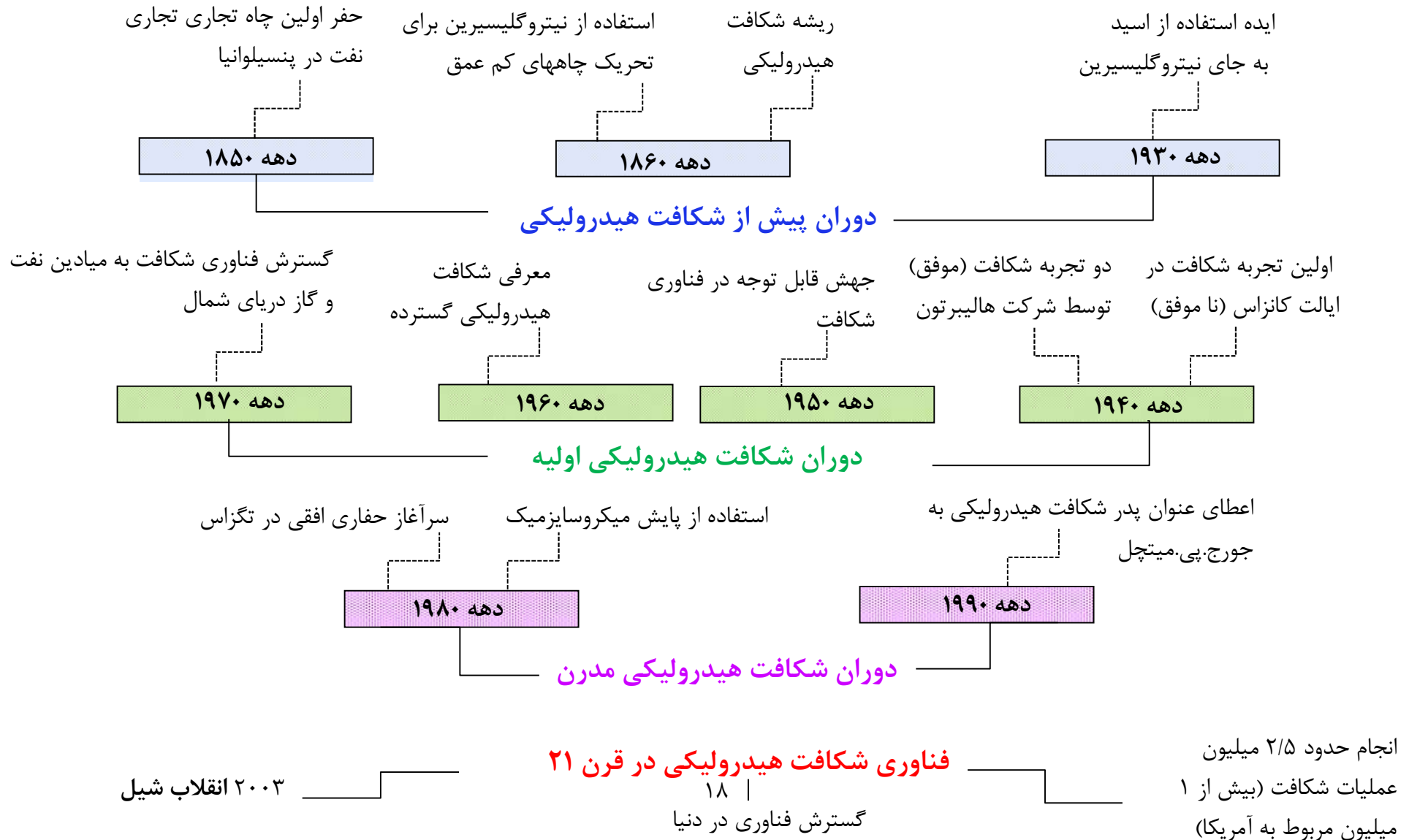
^{۱۵} سیالی است که در شکاف های هیدرولیکی استفاده شده و قسمت عمده آن (۹۸ درصد) آب بوده و باقی آن افزودنی هایی که باعث افزایش سرعت جریان سیال و انتقال ماسه از طریق چاه و درون سازند می شوند، می باشد

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 گسترده ای 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^۱ 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

^۱Hydroxyethylcellulose

کننده های سطحی، بیوسایدها، الکترولیتها و بازدارنده های تشکیل رسوب) هستند که باعث افزایش سرعت جریان سیال و انتقال ماسه از طریق چاه و درون سازند می شوند (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 عملیات ها 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 می توان 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 طاق دیس همراه با گسل می باشد (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 منطقه ای به نام کارو در آفریقای جنوبی، کانون شکافت هیدرولیکی آفریقا در آینده خواهد بود.

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



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 هیدروکربن ها از میدان نفتی پمبينا 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 استان های کانادا را افزایش داده است به طوریکه امروزه برای تولید نفت و گاز طبیعی در ایالت های بریتیش کلمبیا، آلبرتا، ساسکاچوان و مانیتوبا و بخصوص برای استخراج منابع نفت شیل و سازندهای با تراوایی پایین گاز از این تکنیک استفاده می شود 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 استان های غربی مورد شکافزنی قرار گرفته است. اکنون تخمین زده می شود که ۸۰ درصد از چاه های نفت و گاز جدید در کانادا تحت عملیات شکافزنی هیدرولیکی قرار گرفته اند.

- ایران و سایر کشورهای خاور میانه

در نگاه اول به نظر می رسد خاورمیانه منطقه ای 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 کشور های منطقه مستقر نموده اند. 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^۳ 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

^۳Yumen

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 می کند. 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 J.P. Zheltov و S.A. Khristianovich 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 شرکت های 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 پایین تر از حد انتظار بود و توسعه فناوری بیشتر را برای سالها به تعویق انداخت. اما در نهایت در سال ۲۰۰۴ فناوری ای که همراه با حفاری چاه افقی بیشترین تأثیر را بر افزایش تولید داشت، شکافت هیدرولیکی است که با موفقیت هم برای چاه های قدیمی و هم برای چاه های تازه حفر شده اجرا شده است (Igor Kuvshinov, et al., 2008). استفاده از این فناوری در این کشور بطور گسترده ای 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 چاه های 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 نگرانی های 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 می تواند تحت نظارت دقیق تر ادامه یابد. در سال ۲۰۱۸، لندن برنامه ای را برای تسریع پیشرفت های 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 گرفته اند. 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 می کرد 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 شکافزنی هیدرولیکی را آغاز کرده است، اما هنوز اطلاعات جزئی در مورد عملیات ها در این کشور منتشر نشده است (Lorenzo Cremonese, et al. , 2015).

هند -

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).

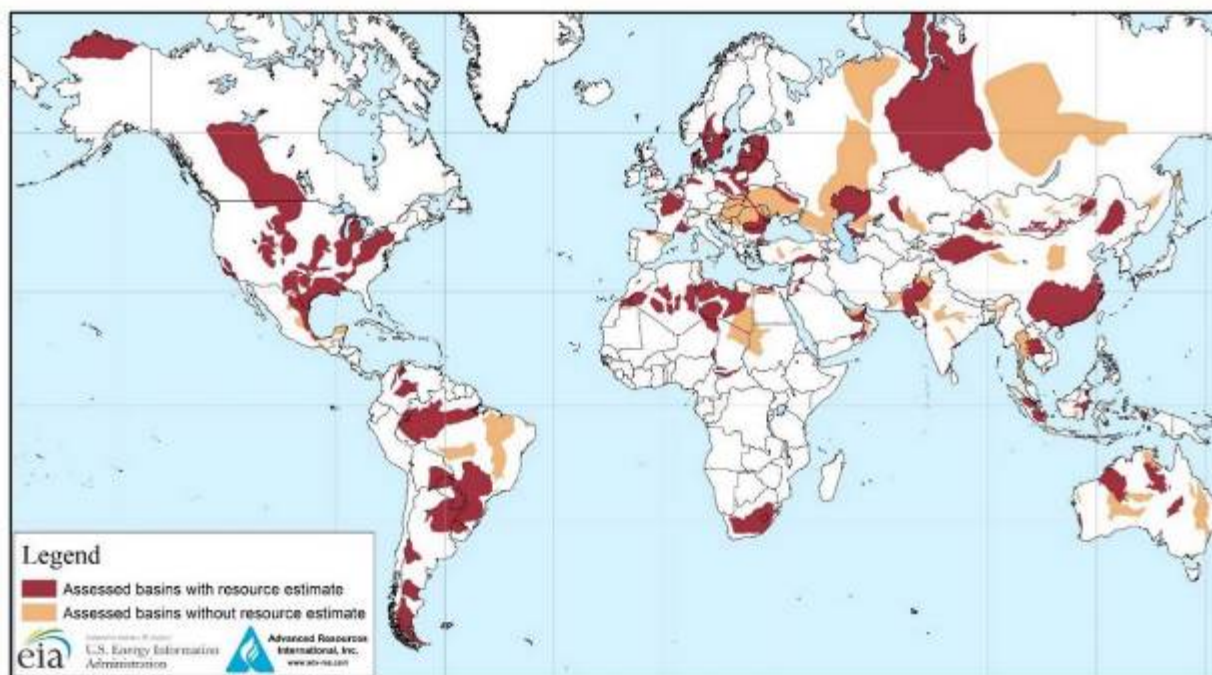
جدول ۴-۱- لیست تعدادی از کشورهای اجرا کننده عملیات شکافت هیدرولیکی

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 کشور های مختلف ارائه شده است. طبق این جدول کشور چین با ذخیره ۱،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 ۲-۴- منابع ارزیابی شده گاز شیل در جهان در سال ۲۰۱۳ (www.eia.gov)

Estimated recoverable resources (trillion cubic feet)	
Country	Reserves
World	7,577
China	1,115
Argentina	802
Algeria	707
United States	665
Canada	573
Mexico	545
Australia	430
South Africa	390
Russia	285

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).

^۱Cut 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 برورسانی 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 بمقدار 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.

جدول ۴-۴- ذخائر حجم در جا و اثبات شده قابل استحصال نفت شیل جهان تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی بر اساس منبع

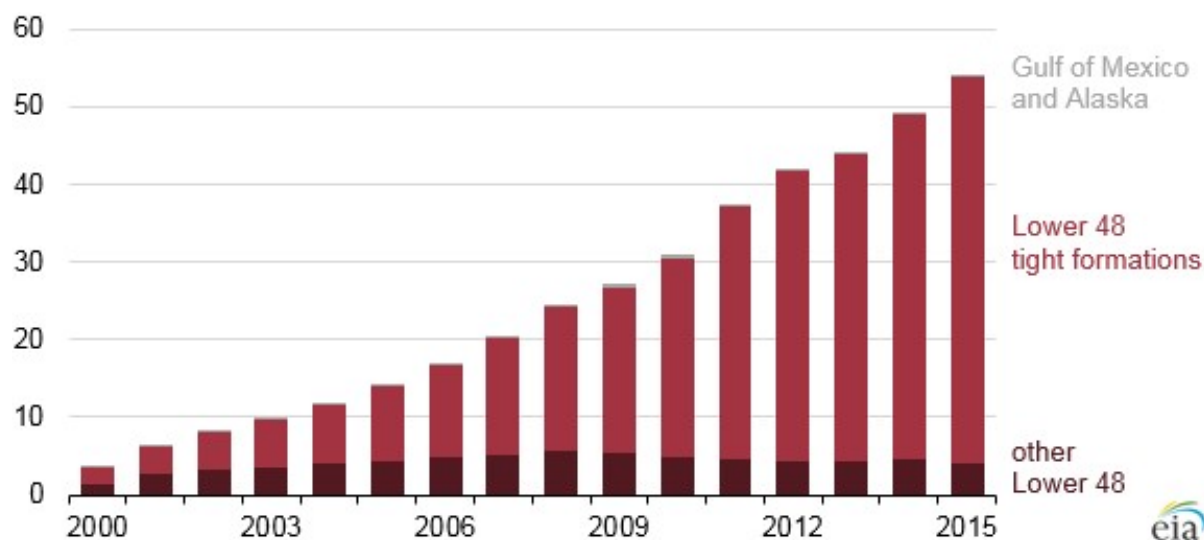
EIA

Region	Country	Risked Oil In-Place (Billion bbl)	Technically Recoverable (Billion bbl)
North America	Canada	162	9
	Mexico	275	13
Australia	Australia	364	16
South America	Colombia	92	5
	Colombia/Venezuela	297	15
	Argentina	480	27
	Brazil	134	5
	Paraguay	14	1
	Uruguay	14	1
	Paraguay/Bolivia	75	4
	Chile	47	2
Eastern Europe	Poland	36	2
	Lithuania/Kaliningrad	29	1
	Russia	1,243	75

	Ukraine/Romania	0	0
	Ukraine	23	1
	Ukraine/Romania	2	0
	Romania/Bulgaria	8	0
Western Europe	UK	17	1
	Spain	3	0
	France	118	5
	Germany	14	1
	Netherlands	59	3
	Sweden	0	0
	Denmark	0	0
North Africa	Morocco	5	0
	Algeria	121	6
	Tunisia	29	1
	Libya	613	26
	Egypt	114	5
Sub-Saharan Africa	Chad	393	16
	South Africa	0	0
Asia	China	644	32
	Mongolia	85	3
	Thailand	0	0
	Indonesia	234	8
	India	87	4
	Pakistan	227	9
	Turkey	94	5
Caspian	Kazakhstan	221	11
Middle East	Jordan	4	0
	Oman	116	6
	United Arab Emirates	376	23
Total World		6,867	340.6

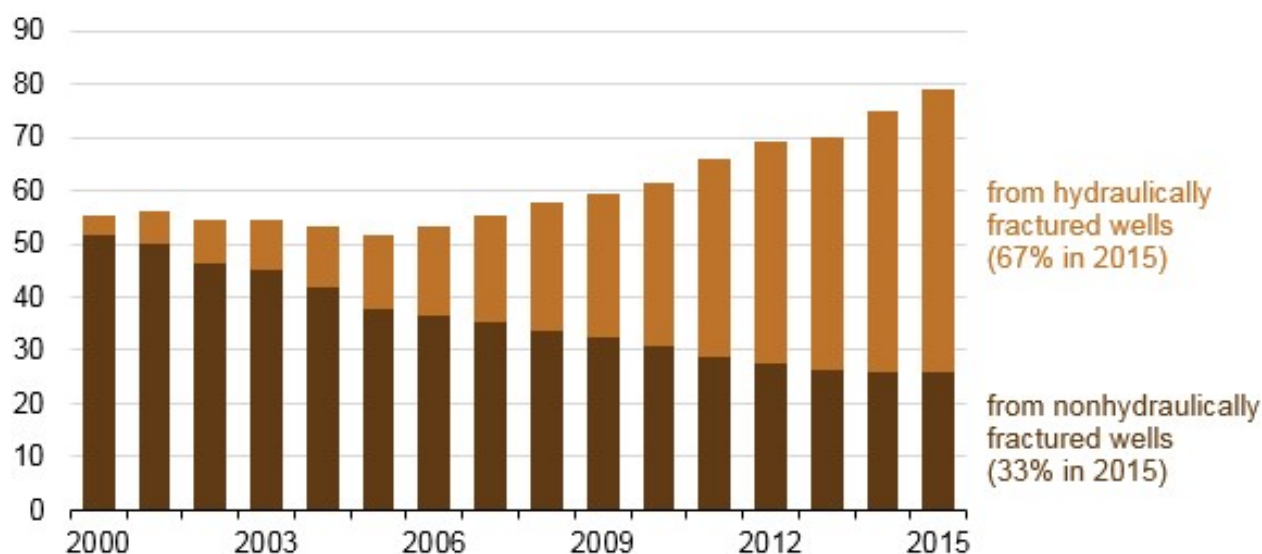
۴-۳- آمار مربوط به کشور آمریکا

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).



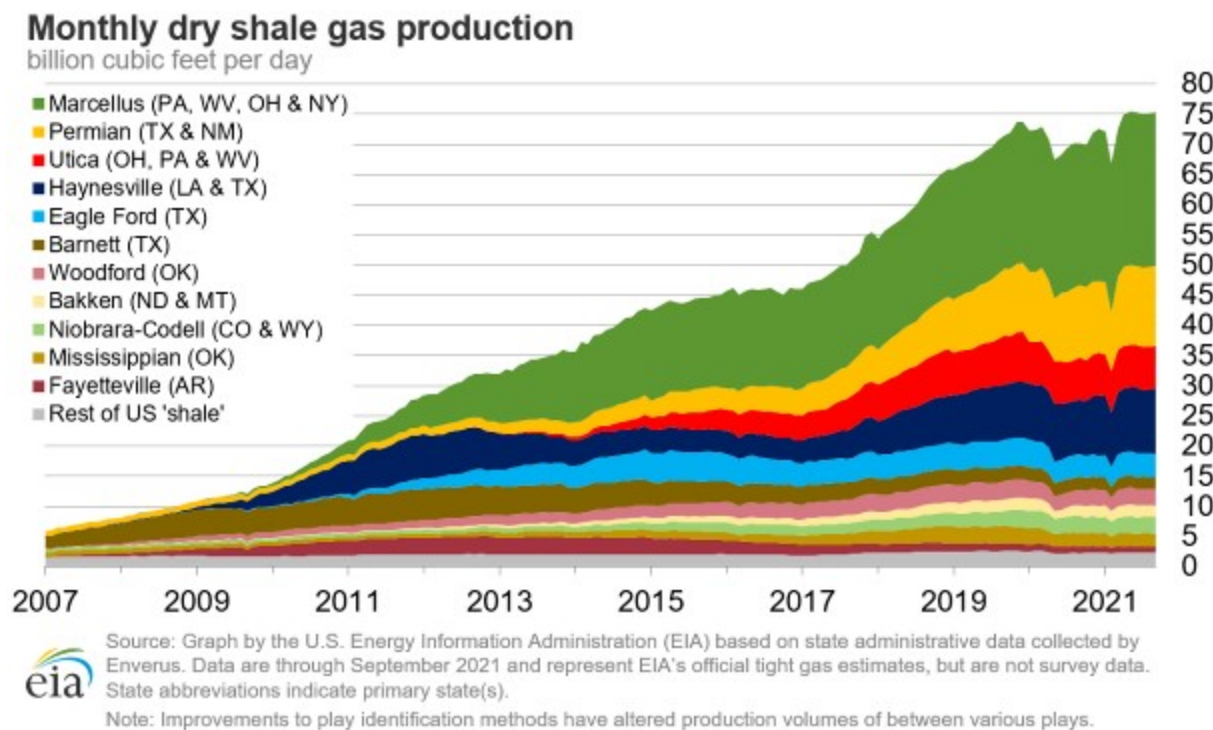
شکل ۴-۲- تولید گاز طبیعی ایالات متحده از چاه‌های توسعه یافته با فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب

میلیارد فوت مکعب بر روز



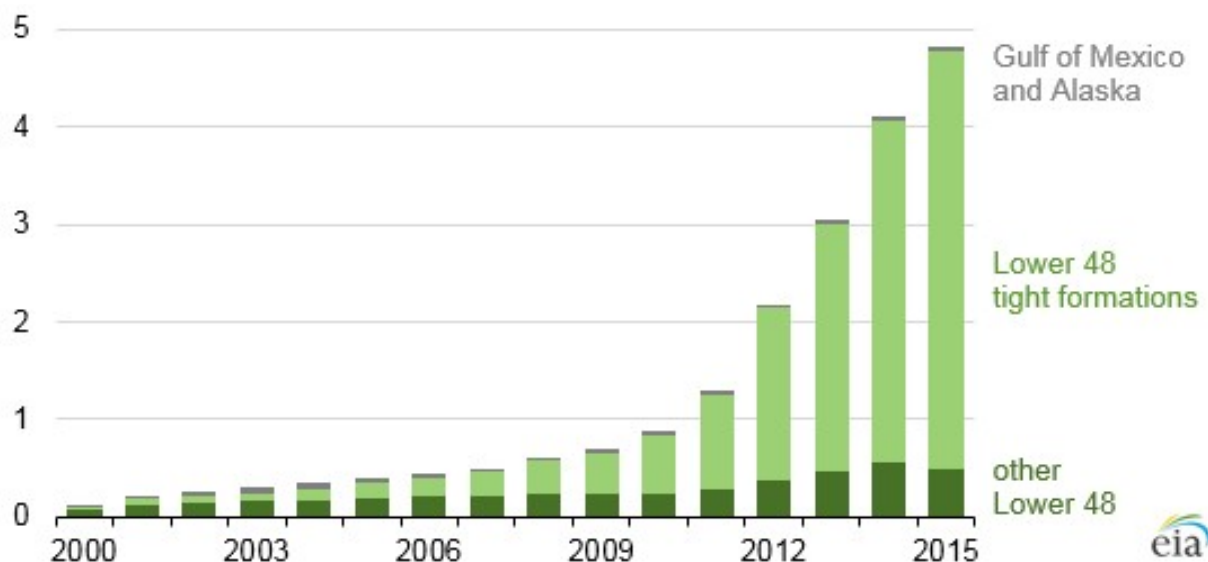
شکل ۴-۳- گاز طبیعی تولید شده از چاه‌ها با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون

فوت مکعب بر روز

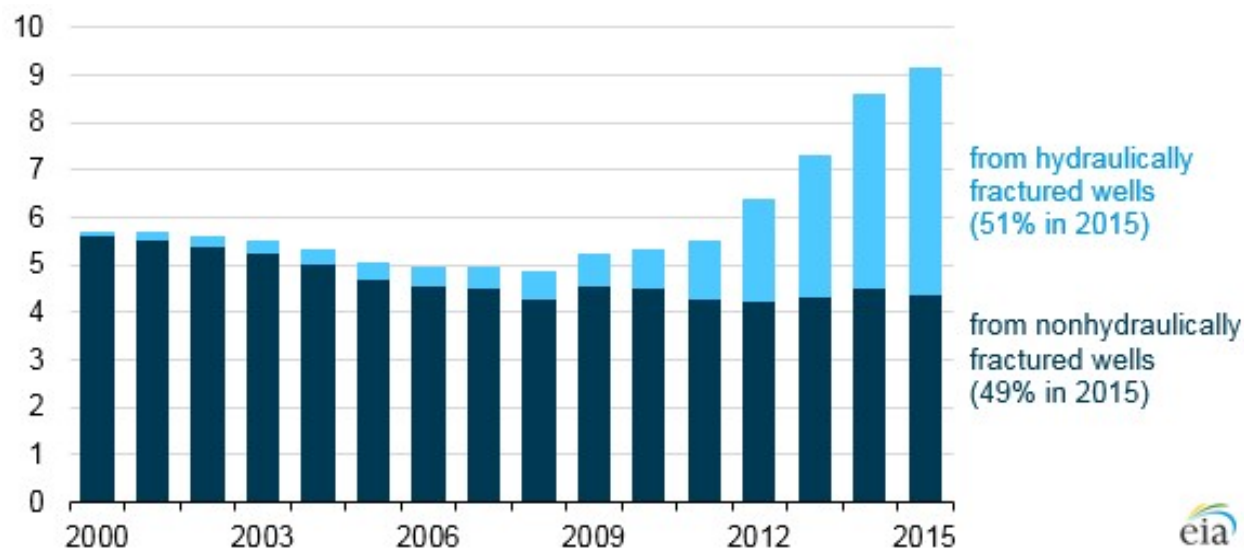


شکل ۴-۴- تولید گاز شیل ایالات متحده به تفکیک میدان گازی برحسب میلیارد فوت مکعب در روز

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).



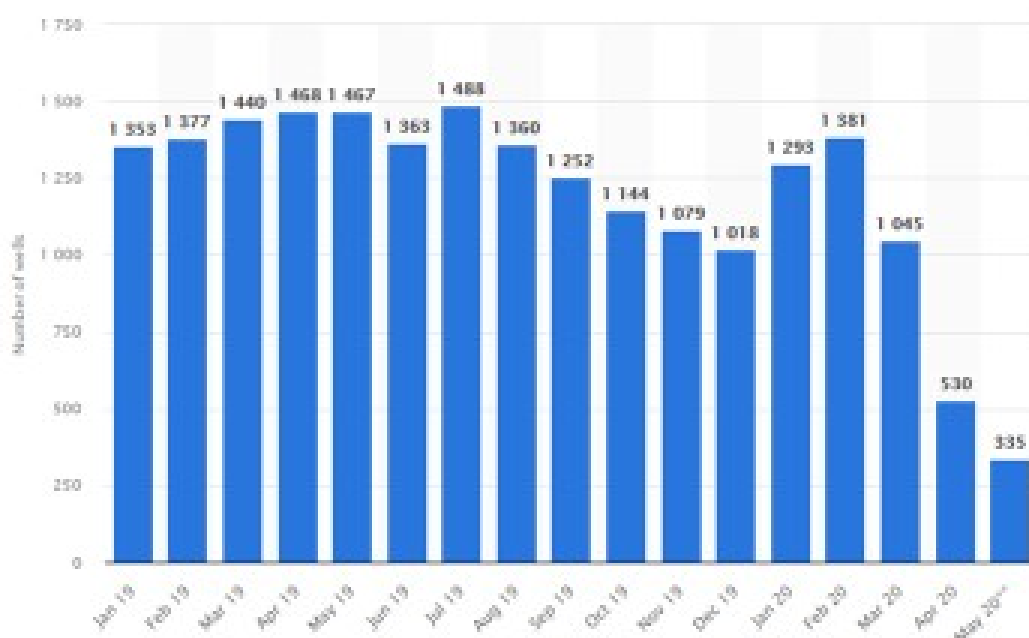
شکل ۴-۵- تولید نفت ایالات متحده با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز



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

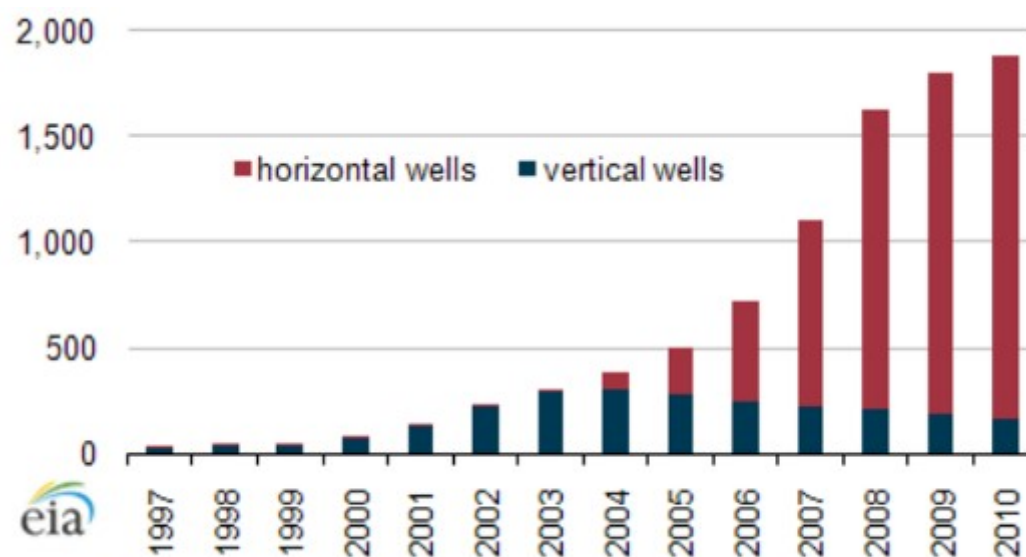
جزئیات آمار مربوط به عملیات شکاف هیدرولیکی به تفکیک ماه از ژانویه ۲۰۱۹ تا ماه می ۲۰۲۰ به تفکیک در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. تا پیش از شیوع پاندمی در آمریکا به طور میانگین حدوداً ۱۴۰۰ عملیات شکافت هیدرولیکی در آمریکا در هر ماه انجام گرفته است. تعداد کل عملیات انجام گرفته برای یک سال از ژانویه ۲۰۱۹ تا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

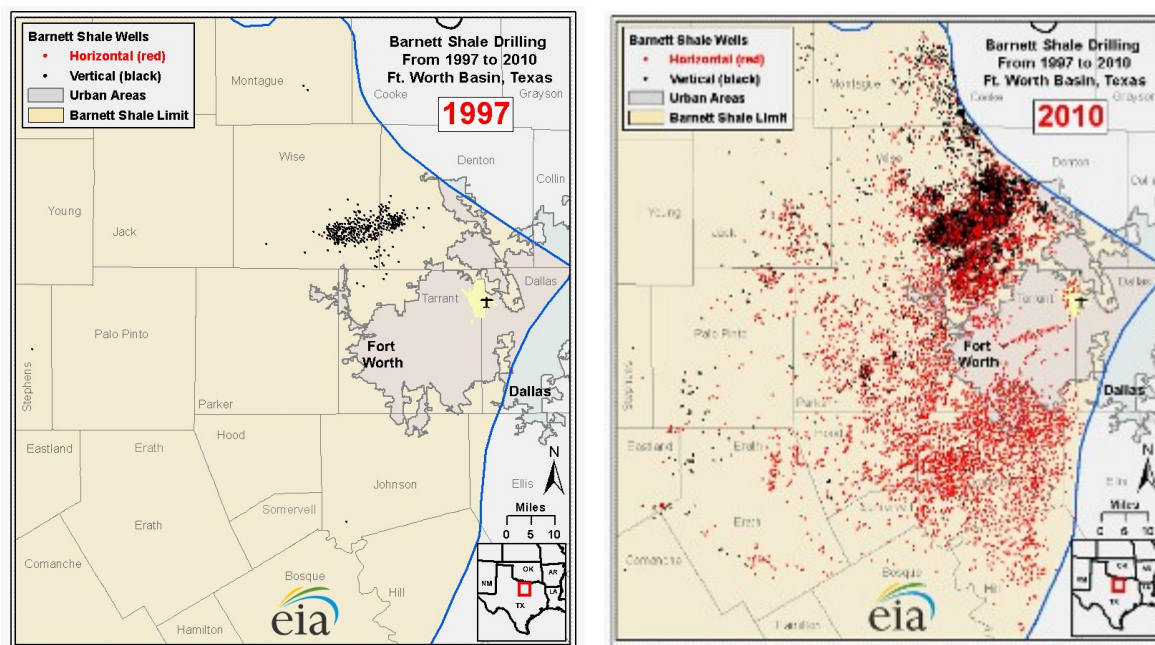
با توجه به اینکه گسترش فناوری شکافت هیدرولیکی با گسترش حفاری‌های افقی عجین بوده است تعداد و گسترش چاه‌های افقی در مقایسه با چاه‌های عمودی در ایالت تگزاس به عنوان بزرگترین ایالت تولید کننده در آمریکا در شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ نشان داده شده است. افزایش تعداد چاه‌های افقی از سال ۲۰۰۰ شروع شده

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

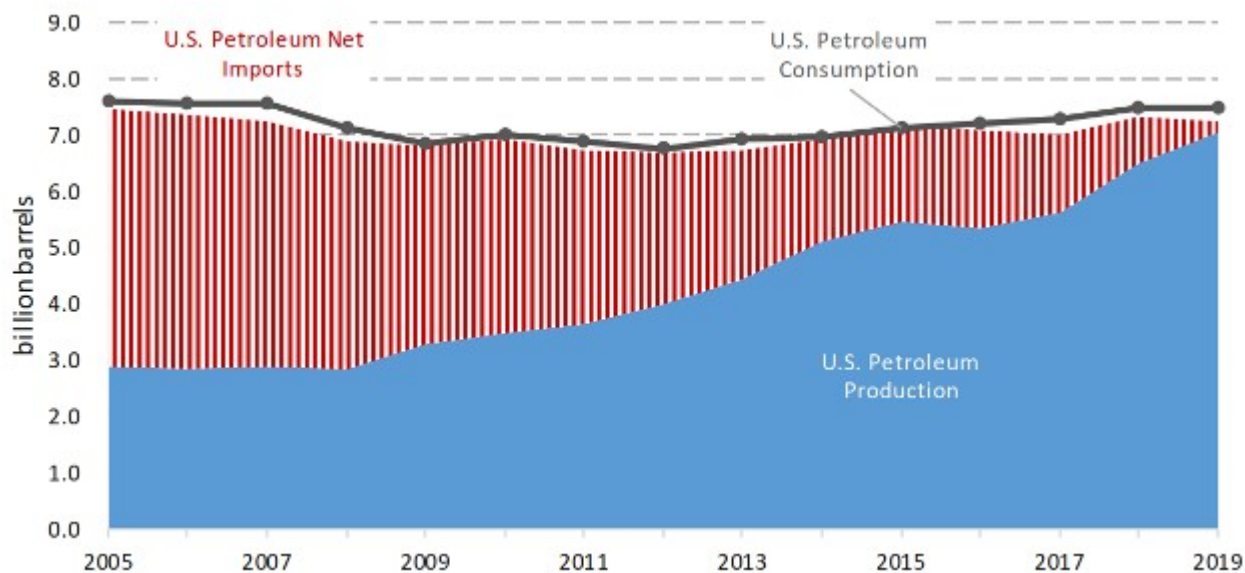
شکل ۴-۸- تعداد چاه‌های عمودی و افقی ایالت تگزاس در طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰



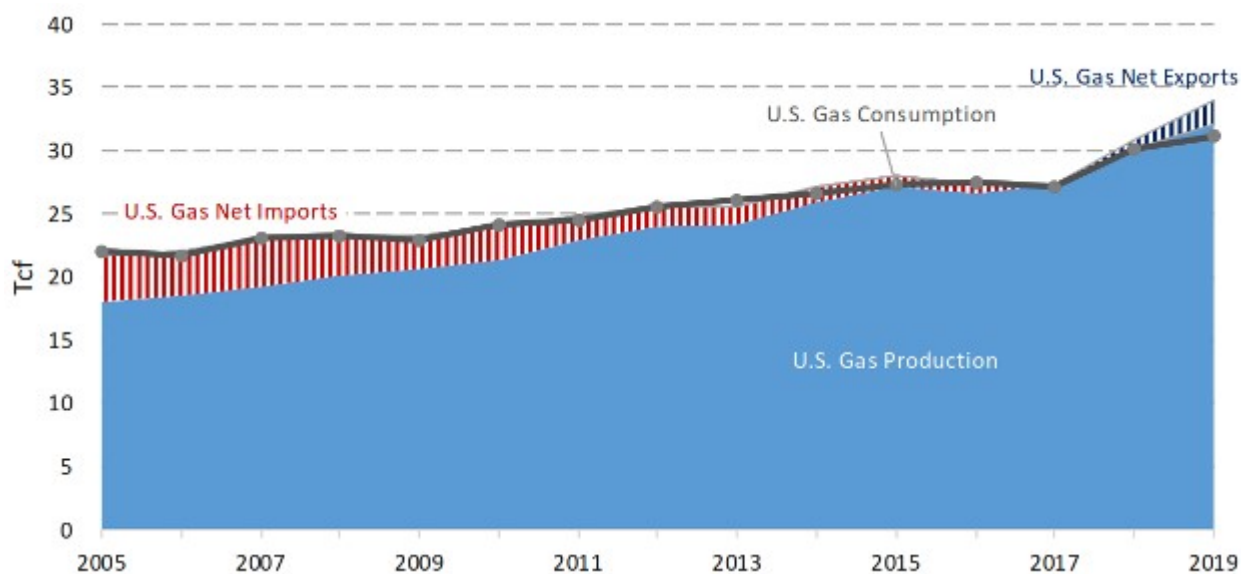
شکل ۴-۹- مقایسه تعداد چاه های عمودی و افقی در ایالت تگزاس. نقاط سیاه چاه های عمودی و نقاط قرمز چاه های افقی

با توجه به داده های منتشر شده، نیاز مصرف داخلی کشور آمریکا حدود ۷,۵ میلیون بشکه در روز می باشد 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 داده های منتشر شده در سال های اخیر، این کشور از ۱۱ میلیون بشکه در روز نیز فراتر رفته است. با ادامه این روند پیش بینی ها 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

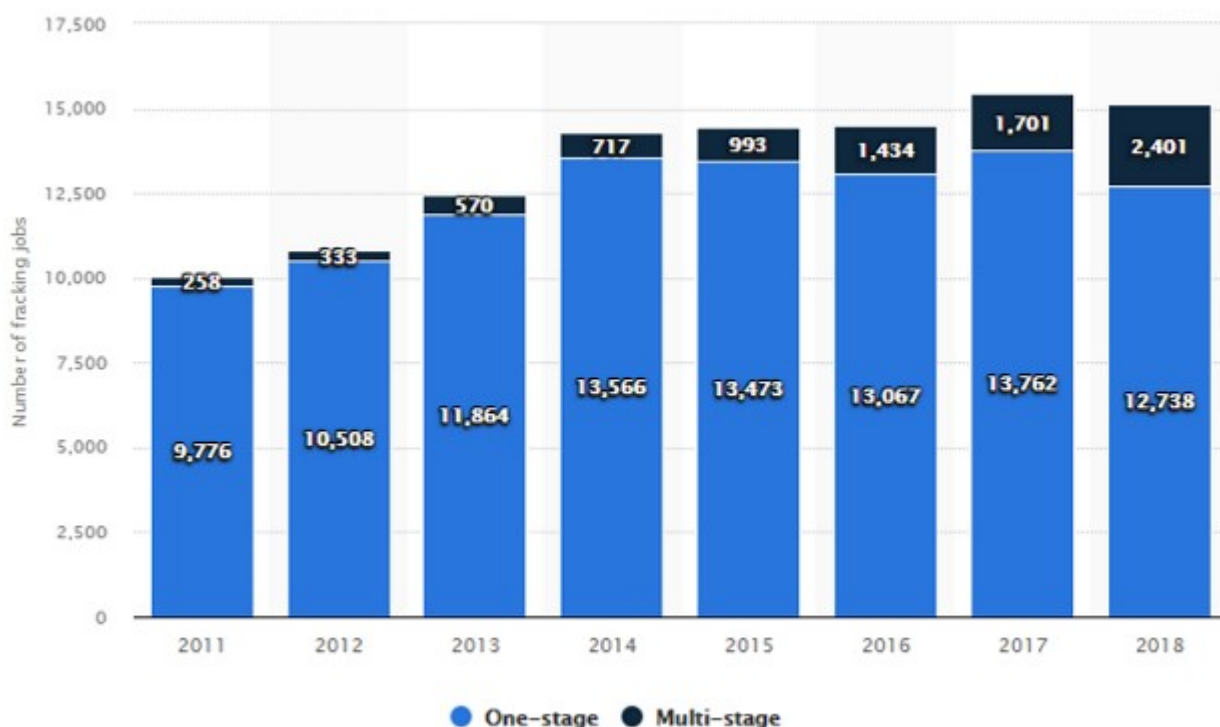
در حال حاضر، تجهیزات شکافت هیدرولیکی حیاتی‌ترین فناوری برای حفظ تولید نفت روسیه و کشورهای همسایه آن مانند اوکراین، قزاقستان، ازبکستان، تاجیکستان، آذربایجان و غیره است. این موضوع می‌تواند به حفظ تولید در میادین موجود و رشد تولید در ذخایر نفتی غیر متعارف احتمالی کمک کند. در شرایط فعلی، ساخت داخلی تجهیزات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

^{۲۳}Leading research and consulting firm specializing in the energy industry of Russia, the Caspian region, Eastern and Central Europe.

^{۲۴}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 مرحله ای

الف) سیر تحول فناوری در بازه های مختلف زمانی و مناطق عملیاتی

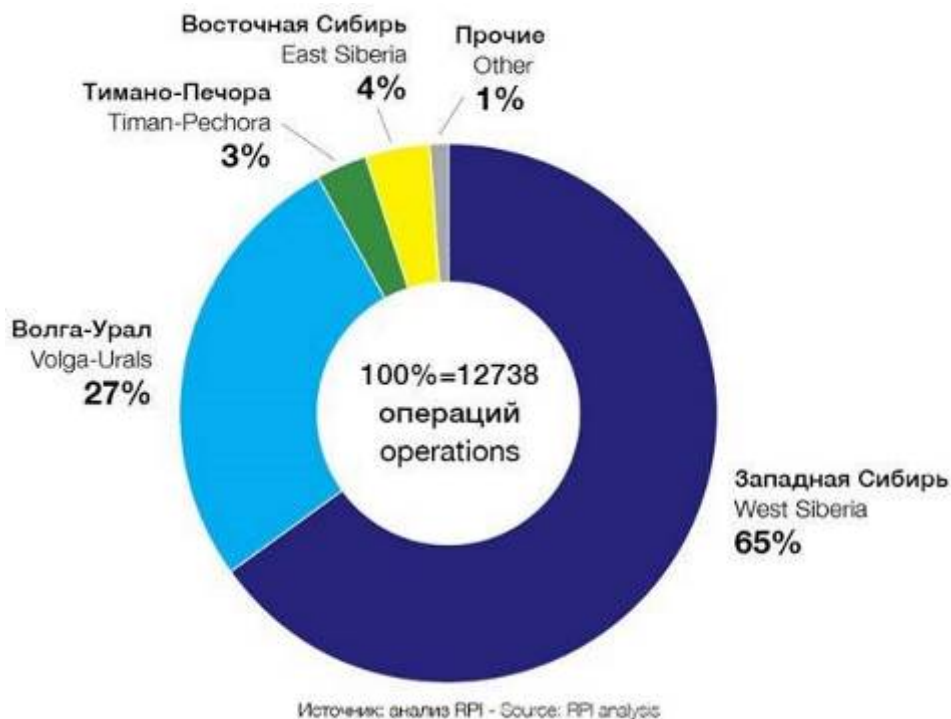
رویداد مهمی در صنعت نفت و گاز روسیه در سال ۲۰۱۸ رخ داده است. شاخص چاه های افقی که از نظر فناوری پیچیده تر هستند به رشد خود ادامه داده نزدیک به ۲۱ درصد افزایش یافته اند. گزارش های موجود حاکی از افزایش این تعداد از ۲,۹۷۴ چاه در سال ۲۰۱۷ به ۳,۵۸۷ چاه در سال ۲۰۱۸ است. بازار شکافت هیدرولیکی با پیروی از همان الگوی سال های قبل تر در حال توسعه بوده است. تعداد عملیات کم هزینه تر شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای نسبت به سال قبل ۷,۵٪ کاهش یافته است، در حالی که تعداد عملیات پر هزینه تر چند مرحله ای شکافت هیدرولیکی به ۴۱٪ افزایش یافته است. روند جایگزینی فناوری های کم هزینه و کم

کارآمد با فناوری‌های پرهزینه تر و کارآمدتر ممکن است به یک روند بلند مدت در بازار شرکت های 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 چاه های 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 شرکت های نفتی باید از مخازن هیدروکربنی تخلیه شده با نفوذپذیری کمتر تولید کنند. این منطقه حفاری های جدید گسترده ای دارد تا به حفظ سطح تولید کمک کند. در خارج از سیبری غربی، سهم قابل توجهی از بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای در منطقه نفت و گاز ولگا-اورال است، با این حال، در مقایسه با سیبری غربی، عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای در این منطقه کمتر رایج است.

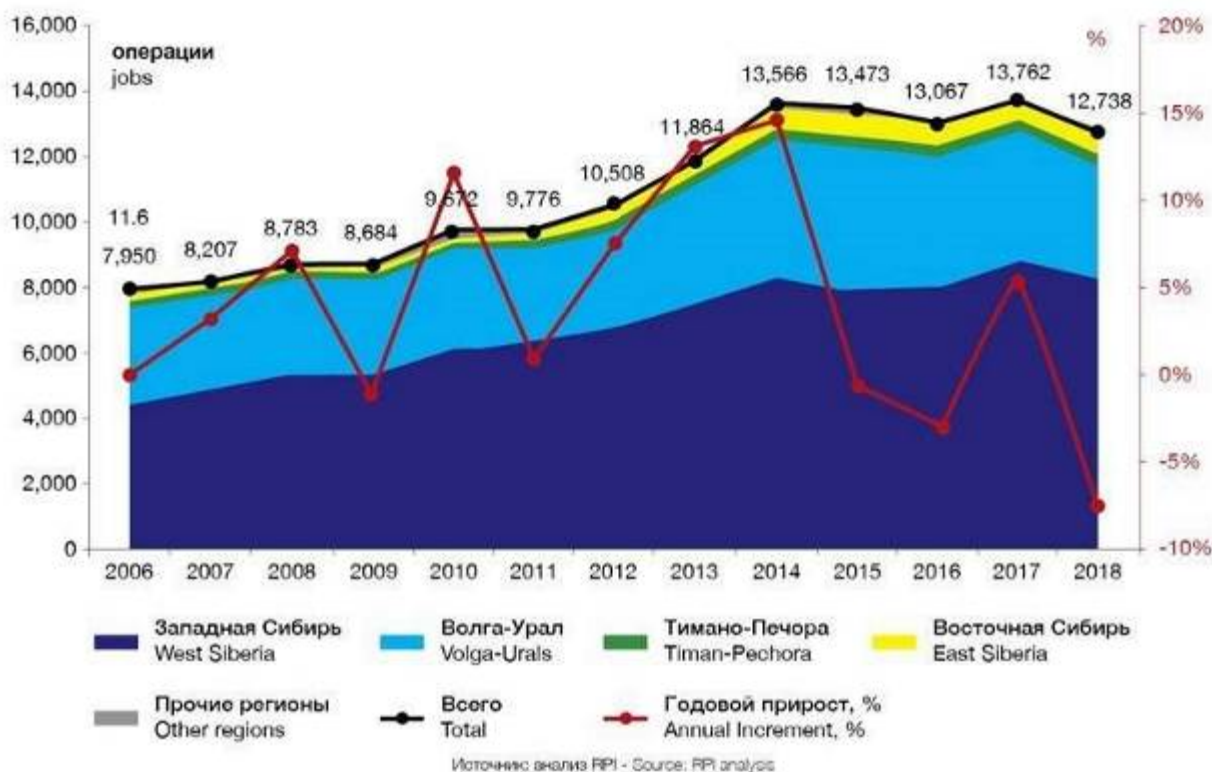
تقاضای منطقه ای برای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای منعکس کننده الگوی ذخایر نفتی در روسیه است. حداکثر تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای در سیبری غربی (۶۵٪) و ولگا-اورال (۲۷٪) است (شکل ۴-۱۳). این مناطق دارای بزرگترین و قدیمی ترین ذخایر چاه های تولیدی هستند و حداکثر حفاری چاه های جدید در اینجا انجام می شود.



شکل ۴-۱۳- سهم مناطق مختلف در تعداد عملیات شکافت هیدرلیکی تک مرحله ای در روسیه در سال ۲۰۱۸ به درصد

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

- کاهش اثربخشی ویژه عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای انجام شده در چاه های با افت تولید
- کاهش تعداد چاه های کاندید برای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای
- تغییر تقاضا به سمت بخش عملیات چند مرحله ای MSF
- امکان بکارگیری روش های جایگزین برای حفظ حجم تولید



شکل ۴-۱۴- 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 ۴-۴):

- Rosneft ۳۲,۸٪
- Surgutneftegas ۲۱٪
- LUKOIL ۱۲,۱٪



شکل ۴-۱۵- سهم کمپانی ها در بازار شکافت هیدرولیکی تک مرحله ای 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 «Surgutneftegas» (۵٫۸٪) مشاهده شد. این امر به دلیل وجود تعداد کافی چاه های کاندید، داشتن پتانسیل اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله ای و همچنین به دلیل استفاده از فناوری های نوین در شکافت هیدرولیکی است که می تواند 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- شکافت هیدرولیکی چند مرحله ای^{۲۵}

الف) سیر تحولی فناوری در بازه های مختلف زمانی و مناطق عملیاتی

شکافت هیدرولیکی چند مرحله ای (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 می گردد. (شکل ۴-). این روند به افزایش تعداد چاه های افقی راه اندازی شده و فرعی افقی مربوط می شود.

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

^{۲۵}Multi-stage hydraulic fracturing

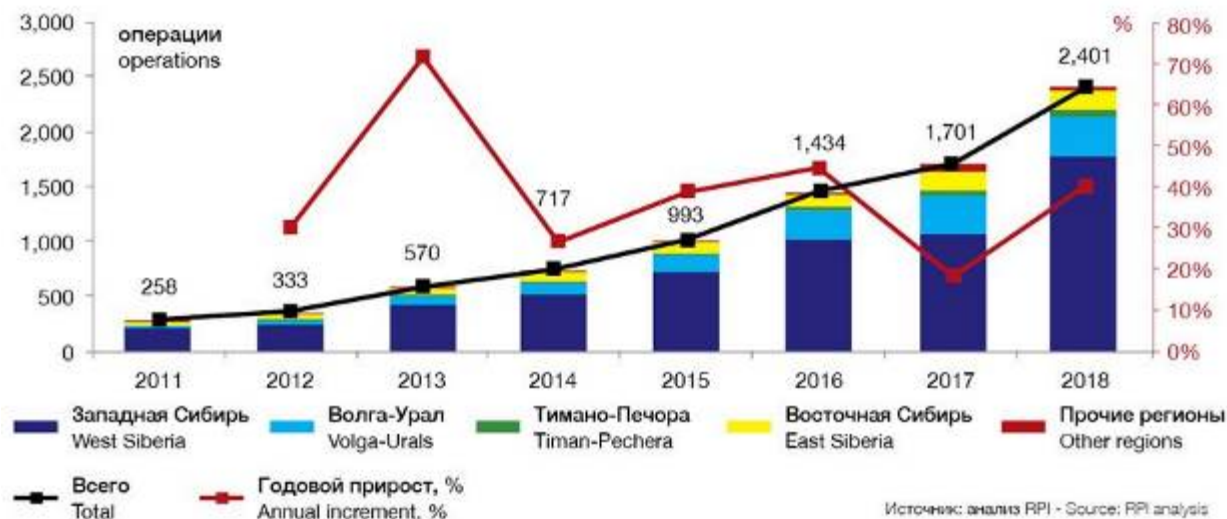


Диаграмма 5: Динамика операций МГРП в России в 2011-2018 гг., ед.
Diagram 5: Dynamics of MSF jobs in Russia in the period of 2011-2018, job units

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 بمیزان 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 حل‌شونده فرک انجام می‌شود، که اجازه می‌دهد تا آسیاب کردن توپ‌ها را حذف و راه‌اندازی را تسریع کند. این فناوری امکان می‌دهد زمان تکمیل هر چاه پس از انجام عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای بر روی آن را 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 مرحله ای به دلیل افزایش تعداد عملیات و همچنین افزایش میانگین وزنی مراحل بود. در نتیجه، بخش بازار عملیات شکافت هیدرولیکی چند مرحله ای 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 کننده های مواد تزریقی از پیشرو ترین 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 بین المللی ایفا می‌کند.

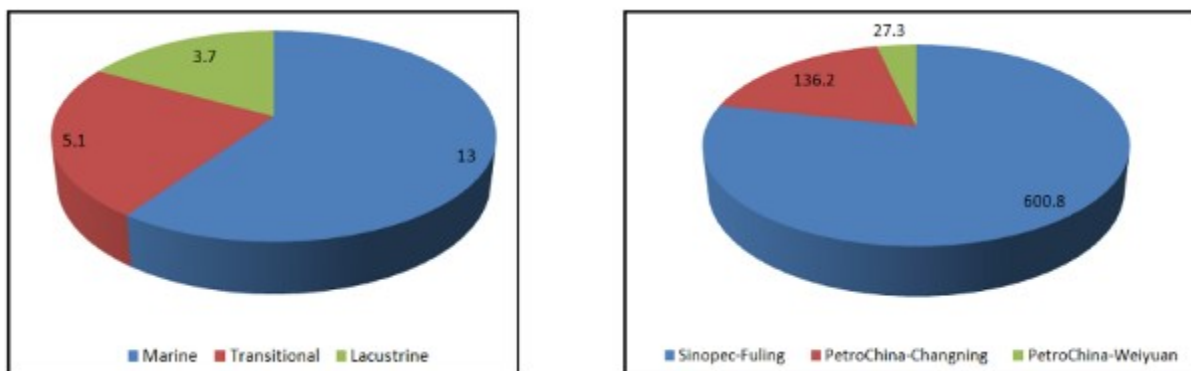
با این حال، بطور غیر مستقیم و با استفاده از آمار تولید نفت و گاز شیل در این کشور می‌توان به توسعه و بومی سازی فناوری شکافت هیدرولیکی در این کشور پی برد.

۴-۵-۱- صنعت گاز شیل کشور چین

امنیت انرژی یکی از مهمترین محرک های 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 رخساره های دریایی است، ۵,۱ (۲۳٪) تریلیون مترمکعب در رخساره های انتقالی و ۷,۳ (۱۷٪) تریلیون مترمکعب در رخساره های دریاچه ای 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 Wei yuan (27.3 میلیارد متر مکعب) و پیلوت میدان Changning (136.2 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 عمیق تر از ۳۵۰۰ متر و در شیل کامبرین "قدیمی تر" 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 لرزه ای ۲ بعدی و ۲۱۳۴ کیلومتر مربع برداشت لرزه ای 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 تست های پایلوت اکتشاف و توسعه گاز شیل، فناوری های کلیدی اکتشاف و توسعه گاز شیل، مانند بررسی لرزه ای سه بعدی، پایش ریز لرزه ای 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 گرفته اند (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 زنی هایی 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 میکند. در جدول زیر احجام در جا و احجام قابل استحصال این گزارش به تفکیک حوضه های نفتی مهم و سازندهای مربوطه ارائه میشود.

جدول ۴-۵- احجام در جا و قابل استحصال چین تا انتهای سال ۲۰۱۴ میلادی به تفکیک حوضه های رسوبی و سازندها

Country	Basin	
	Sichuan Basin	
	Yangtze Platform	

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 میباشد) 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
	Jordan	Hamad
		Wadi Sirhan

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. شرکت های 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 می شود که دو برابر میزان گاز طبیعی متعارف در این کشور است.

شرکت آرامکوی 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 می رود 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 می کند 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 بیکر هیوس 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 Klradag	Shiranish Soukhne	Shiranish Sarmord		Mishfir Mauddud Burgan	Gupl Ilam Sarvak	Mishfir Khatiyah Mauddud	Khatlyah 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 مزوزوئیک: 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 بی نصیب 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 بعثت عدم نتیجه گیری در مرحله تست پیش از عملیات اصلی متوقف گردیده 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 بعثت مشکلات عدیده عملیاتی دیگر و ریسک‌های 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- پروژه های 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 گزارش ها
میدان سیری شرکت فلات قاره	؟	۱	پروپانت فرک	ناموفق در مرحله تست	عدم وجود اطلاعات و گزارش ها
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 خبر ها 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.

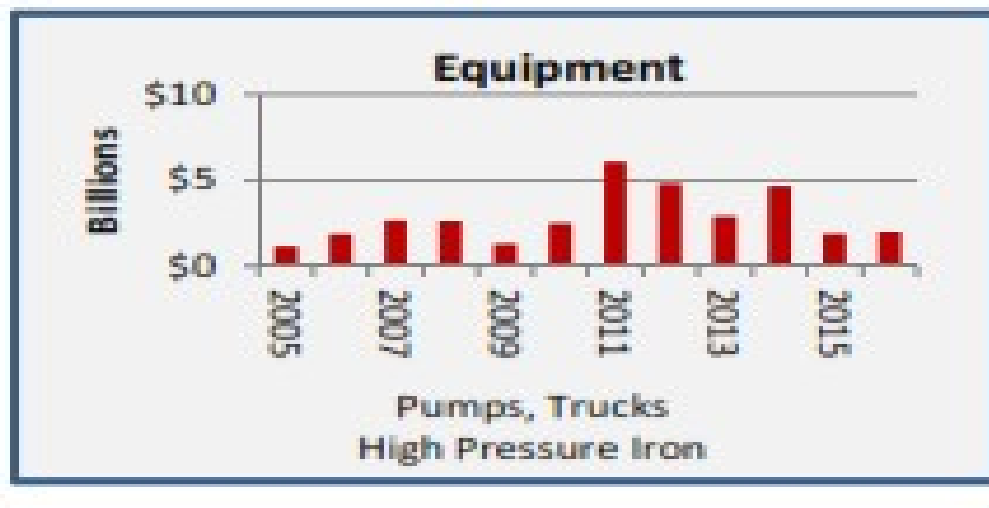
از سوی دیگر نتایج مطالعات انجام شده در معدن شیل نفتی با انستیتو نفت دانشگاه تهران در قالی کوه استان لرستان دو میلیارد بشکه نفت درجا از نوع سبک کشف شده است.

از آنجاییکه در توسعه این ذخائر نیاز به توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی می‌باشد، با در نظر گرفتن واقعیت‌های موجود صنعت نفت و گاز و نیازمندی‌های کشور در رابطه با مقوله امنیت انرژی اهمیت انتقال دانش و بومی سازی این فناوری در کشور دو چندان بنظر می‌رسد.

۴-۸- بازار جهانی

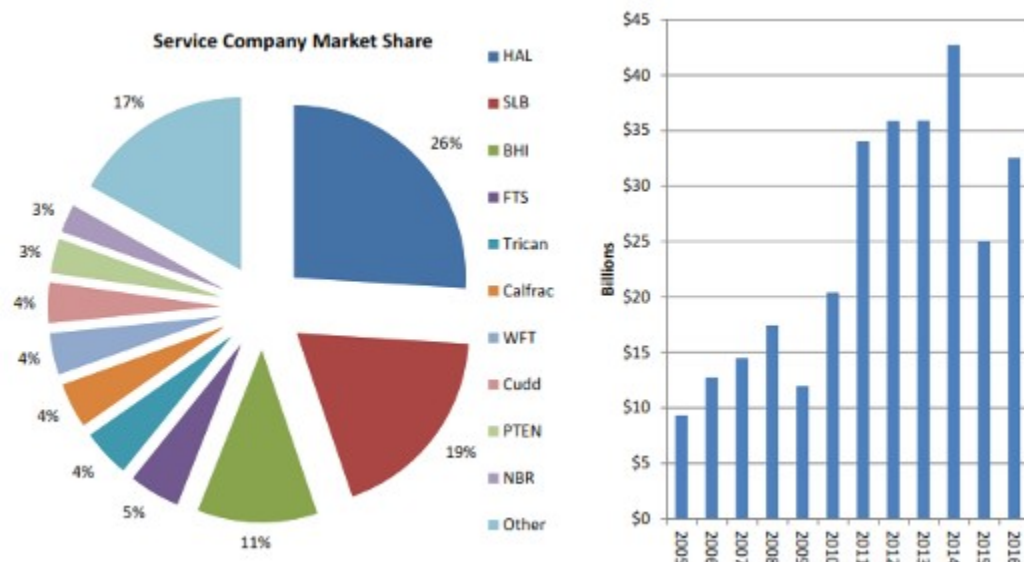
با توجه به دسترسی محدود به اطلاعات به روز حجم بازار شکافت هیدرولیکی، در این بخش بیشترین اطلاعات مربوط به مارکت این صنعت در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ می باشد. بر این اساس با توجه به اطلاعات موجود، حجم بازار این صنعت در حال افزایش می باشد، به صورتی که حجم بازار گزارش شده از حدود ۹ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۵ 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 شده است (Spears, Richard. 2016).

Hydraulic Fra



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

شرکت های اصلی ارائه دهنده خدمات بالادستی نفتی دنیا شامل شرکت های هالیبرتون (HAL)، شلومبرژه (SLB)، بیکر هیوس (BHI) و Trican سهم عمده ای از این بازار را در اختیار داشته اند (شکل ۴-۲۲). طوریکه این چهار شرکت به تنهایی ۷۳ درصد از بازار این صنعت را در سال ۲۰۱۶ به خود اختصاص داده اند. عمده فعالیت این شرکت ها در کشورهای آمریکا و کانادا می باشد. البته در طی سالهای بعد کشورها و شرکت های زیادی وارد این بازار شده اند. در طی سال های بعد از ۲۰۱۶ کشورهایی مانند چین و روسیه با سرعت زیادی در حال افزایش سهم خود در این بازار می باشند. در جدول ۴-۹ لیست شرکت هایی که عملیات شکافت هیدرولیکی انجام می دهند به تفکیک سهم فعالیت در طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ آورده شده است.



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

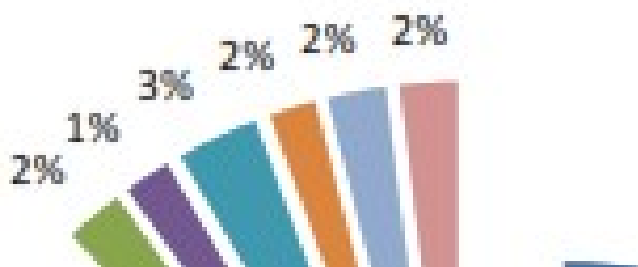
جدول ۴-۹- لیست شرکت درگیر عملیات شکافت هیدرولیکی به تفکیک سهم فعالیت در طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵

	2005	2006	2016
Halliburton	\$2,810	\$3,725	\$4,110
Schlumberger	\$2,300	\$2,800	\$3,210
Baker Hughes	\$1,800	\$2,447	\$2,410
Calfrac Well Services Ltd.	\$233	\$428	\$510
FTS International	\$100	\$250	\$310
C&J Energy Services	\$116	\$206	\$310
Weatherford	\$180	\$260	\$310
Trican	\$420	\$639	\$610
Patterson-UTI Energy, Inc.	\$217	\$351	\$410
Cudd Pumping	\$192	\$273	\$310
Seventy Seven Energy	\$0	\$0	\$10
Sanjel Corporation	\$180	\$225	\$110
ProPetro	\$0	\$0	\$10

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 بوده‌اند. 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.

Global Market

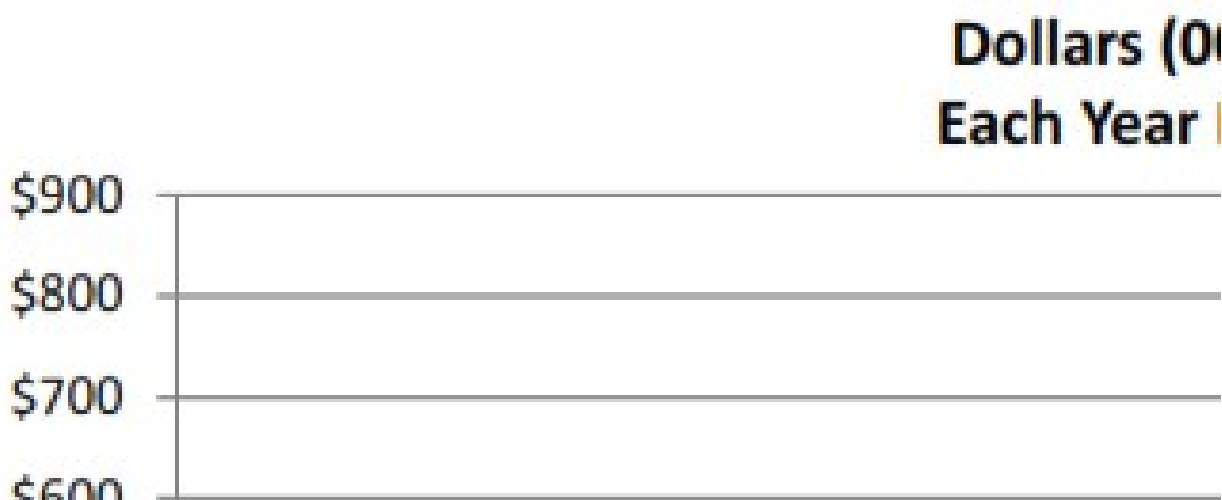
Regional Market Share



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 چاه های 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 شیل های 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 چندمرحله‌ای 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

۴-۹- 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.

۴-۹-۱- 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 می رود 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 سال های 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

^{۲۶}compound annual growth rate

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.



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 شاخص های زیر توجه میشود:

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

با توجه به پارامترهای بالا، پیش بینی ها 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 می رود که تعداد عملیات یک مرحله‌ای شکافت هیدرولیکی که در چاه‌های جدید انجام می شود 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 می رود 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 می شود و همچنین افزایش سهم عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای انجام شده در چاه‌های جهت دار کنترل شده به میزان ۹۰ درصد است. افزایش سهم عملیات شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای که در چاه‌های جهت‌دار کنترل‌شده 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 نمی رسد - رشد عملیات یک مرحله‌ای پس از سال ۲۰۲۹ پیش بینی می - شود، که مربوط به افزایش تعداد عملیات یک مرحله‌ای موفق در نتیجه معرفی فناوری های نوین برای تولید است که می تواند کارایی عملیات انجام شده را افزایش دهد (مثلاً روش های جدید شبیه سازی شکافت هیدرولیکی). تا سال ۲۰۳۰، اندازه بازار شکافت هیدرولیکی یک مرحله‌ای به سطح ۱۰۷,۴ میلیارد روبل خواهد

^۷Water cut

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 شکافت هیدرولیکی چند مرحله‌ای با میانگین نرخ سالانه ۱۰,۷ درصد پیش‌بینی 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 پیش‌بینی 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 بازیافت 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

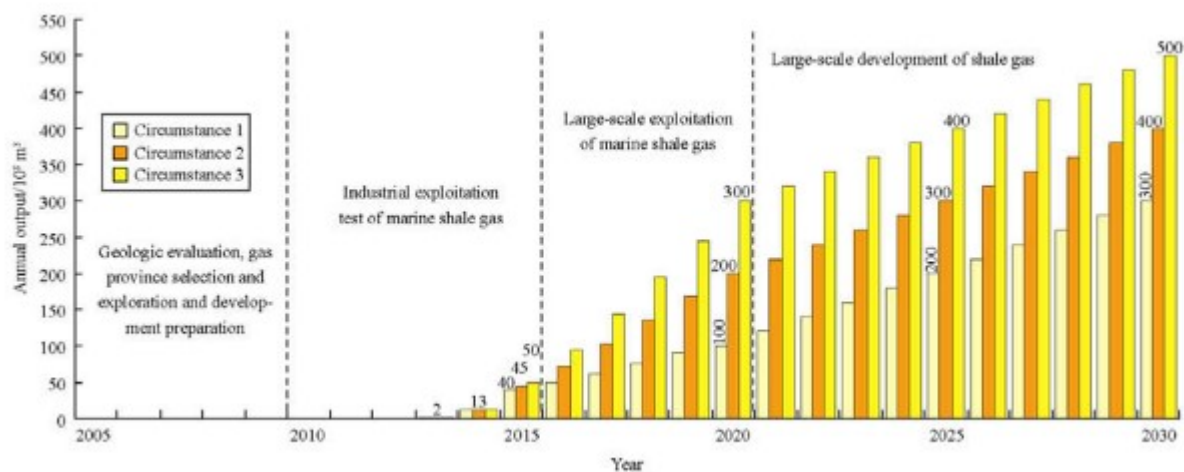
به طور خلاصه، چشم انداز گاز شیل در چین می‌تواند سه سناریوی قوی، متوسط و ضعیف داشته باشد.

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: فناوری‌ها 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 تأسیسات 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 نمی باشد، در این گزارش، بمنظور 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 می توان از منظر مفهومی و تعاریف شناخته شده مهندسی مخزن در دو دسته (۱) ازدیاد برداشت (۲) بهبود برداشت گنجانید.

در دسته ی 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 بوده اند و یا اینکه پیش از انجام فرآیند شکافت هیدرولیکی به کلی قادر به تولید و استحصال از ذخائر ثبات شده مخزن نبوده ایم . در هر دو حالت ذکر شده فوق فرآیند شکافت هیدرولیکی باعث افزایش ضریب برداشت ذخائر هیدروکربنی (شروع برداشت در حالت دوم) می شود.

در دسته ی 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 هیدرو کربنی 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 دسته بندی کلی ارائه شده فوق، در ادامه نمونه هایی 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

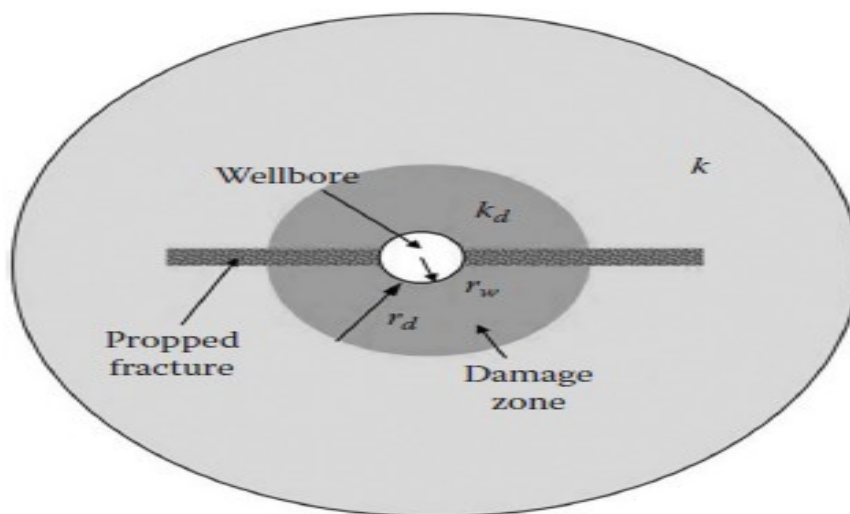
در این دسته از مخازن نفت و گاز، سازندهای مخزنی دارای خصوصیات ضعیف سنگی میباشند. در عین حال تولید اولیه و ثانویه از این ذخائر قابل انجام بوده و لیکن این تولید بعلت میزان و سرعت تخلیه مخزن صرفه اقتصادی ندارد. بدیهی است تعیین به صرفه بودن اقتصادی این مخازن بشدت بسته به پارامترهای اقتصادی در زمان تصمیم گیری 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 شده ای 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 ناحیه ی آسیب دیده ی اطراف چاه^{۲۸}

با گذشت زمان و تولید از مخازن هیدروکربنی، ناحیه ی اطراف چاه آسیب دیده و تراوایی آن نسبت به نواحی دور از چاه، کاهش می یابد. 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 می توانند 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 واکنش های شیمیایی را باعث خواهد شد که منجر به تشکیل رسوب های آلی و معدنی در حفرات سنگ می شوند. از دیگر دلایل آسیب سازند در نواحی اطراف چاه را می توان 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 ناحیه ی آسیب دیده را نداشته باشد و از طریق شکاف ها به چاه برسد می توان 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 می شود.



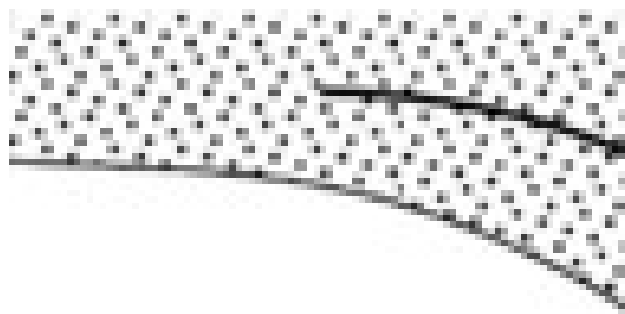
شکل ۵-۱- برقراری ارتباط بین مخزن و چاه از طریق شکاف و دور زدن ناحیه ی آسیب داده (Montgomery, 2015)

۵-۱-۴- کنترل تولید شن

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

۵-۱-۱-۵- کاهش پدیده ی مخروطی شدن

با گذشت زمان و تولید از مخزن، افت فشار ایجاد شده در ناحیه ی اطراف چاه باعث ایجاد یک مکش شده و گاز و آب لایه های بالا و پایین را به سمت چاه تولیدی می کشاند. شکل ۵-۲ این پدیده را نشان می دهد. وارد شدن آب و گاز به چاه تولیدی، مشکلات فراوانی را در زمینه ی جداسازی و تفکیک سیالات تولید شده ایجاد می کند. با ایجاد شکاف هیدرولیکی و افزایش تراوایی در ناحیه ی اطراف چاه، افت فشار کاهش می یابد و این پدیده ی مخروطی شدن به تعویق می افتد. البته باید به این نکته توجه داشت که اگر لایه ی نفتی محصور بین لایه های آب و گاز ضخامت کمی داشته باشد و عملیات شکافت هیدرولیکی به صورت کنترل شده انجام نشود، شکاف هیدرولیکی ممکن است به ناحیه ی 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.

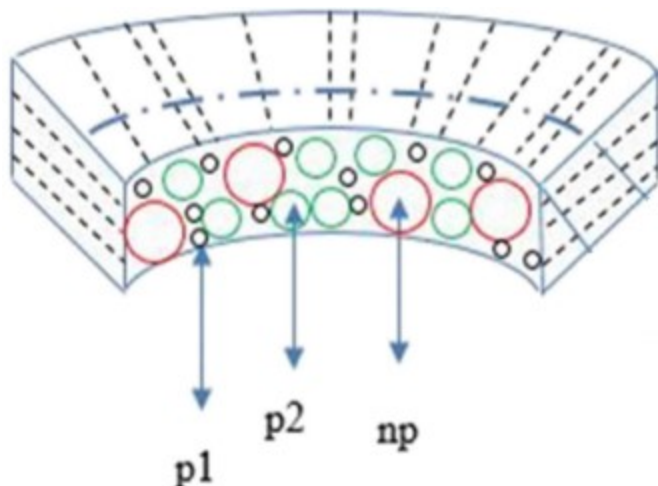


شکل ۵-۲- پدیده ی مخروط شدگی آب و گاز (<https://eng-info-tech.blogspot.com>)

۵-۱-۶- کاهش رسوب آسفالتین

آسفالتین ها مولکول هایی با اندازه ی بزرگ هستند که اگر از فاز نفت جدا شده و رسوب کنند، باعث بسته شدن گلوگاه ها و حفرات سنگ می شوند. در دمای مخزن، معمولا فشار اولیه ی مخزن بالاتر از حد بالایی فشار برای رسوب آسفالتین است و بنابراین مشکل جدا شدن آسفالتین ها از فاز نفت اتفاق نمی افتد اما بر اثر افت فشار، مخزن از نظر فشاری وارد ناحیه ی ناپایداری ذرات آسفالتین و جدا شدن آن ها از فاز نفت می شود. با ایجاد شکاف هیدرولیکی و کنترل افت فشار می توان زمان ورود به ناحیه ی رسوب آسفالتین را برای مخزن به تعویق انداخت. از جنبه ی دیگر نیز ایجاد شکاف هیدرولیکی در مسئله ی آسفالتین کمک کننده است. باید ذکر کرد که ناپایداری آسفالتین ها و جدا شدن آن ها از فاز نفت تا زمانی که این ذرات به همراه نفت حمل می شوند مشکل ساز نیست. حفره های سنگ را می توان در مسئله ی رسوب ذرات جامد به سه دسته تقسیم کرد: (۱) حفراتی که سایز آن ها از سایز ذرات جامد کوچکتر است و بلافاصله مسدود می شوند ($p1$) (۲) حفراتی که نسبت اندازه ی آن ها به اندازه ی ذرات ۲-۳ برابر می باشد. ذرات با پل زدن در این حفرات باعث مسدود شدن آن ها می شوند ($p2$). (۳) حفراتی که اندازه ی آن ها ۶-۸ برابر اندازه ی ذرات جامد است. این حفرات هرگز مسدود نمی شوند و ذراتی که بر سطح این حفرات می نشینند بر اثر ایجاد نیروی برشی ناشی از سرعت، جدا

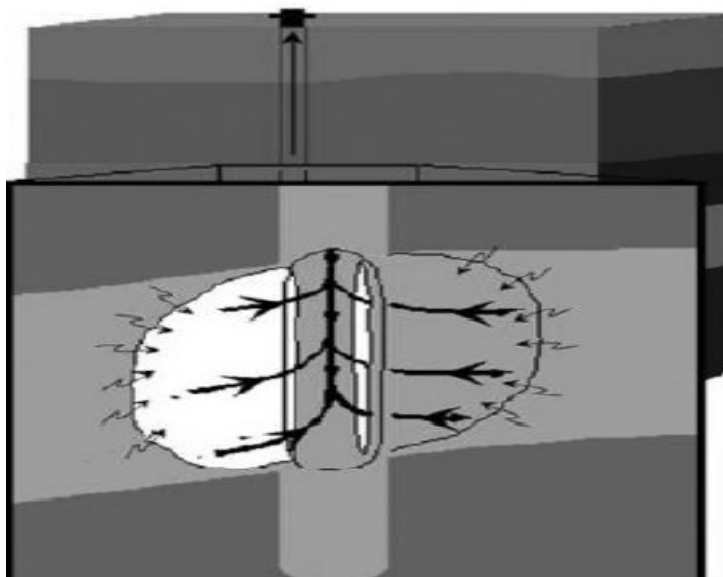
می شوند (np) (شکل ۵-۳). شکاف ها از دسته ی این نوع مسیرها هستند و بنابراین بر اثر رسوب آسفالتین مسدود نمی شوند و از این نظر به رفع مشکل آسفالتین مخازن کمک می کنند. بنابراین عملیات شکافت هیدرولیکی با این هدف، یک عملیات بهبود برداشت به حساب می آید.



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)

۵-۱-۷- افزایش سطح تماس با مخزن

در مخازن با تراوایی کم، معمولاً ناحیه ی خیلی کوچکی در اطراف چاه تحت تاثیر قرار می گیرد و وارد تولید می شود. برای اینکه بتوانیم از نواحی دورتر از چاه نیز تولید کنیم، باید سطح تماس با مخزن را افزایش دهیم (شکل ۵-۴). نقش شکاف ها 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

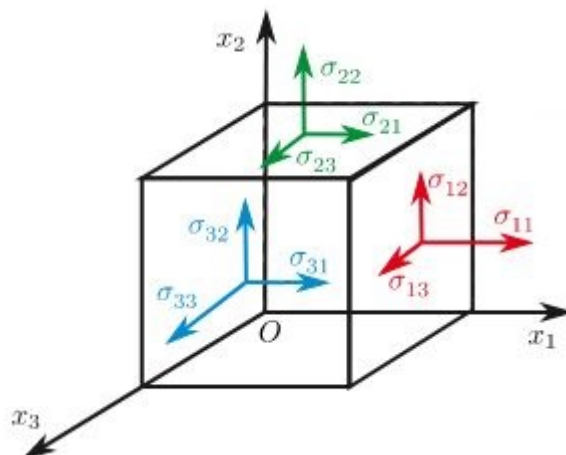
اگرچه مهمترین کاربرد فناوری شکافت هیدرولیکی در صنایع نفت و گاز می باشد و بیشترین پیشرفت صنعت شکافت هیدرولیکی در زمینه استحصال هیدروکربن بوده اما در سایر زمینه ها و صنایع دیگر نیز کاربرد دارد. امروزه انسان به دنبال استخراج منابع و استفاده از منابع زمین بوده و لذا هر روشی که با کمترین هزینه او را به این 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 می دهد. در انرژی ژئوترمال، آبهای زیرزمینی و معدنکاری از شکافت هیدرولیکی استفاده می شود. همچنین برای تزریق پسابهای صنعتی و هسته ای یا مطالعات زلزله از داده های شکافت هیدرولیکی استفاده می شود. 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 Ksi	دارد	محدود	ندارد	ندارد
چاه های آب	<103	Psi 3000>	به ندرت	دارد	گاهی اوقات	ندارد
معدنکاری	106	> 10 Ksi	دارد	> 1000 m	گاهی اوقات	ندارد
ژئوترمال	107	15 Ksi <	دارد	دارد	دارد	دارد
تزریق پساب صنعتی و هسته ای	106	>5 Ksi	دارد	دارد	گاهی اوقات	گاهی اوقات

۵-۲-۱- تعیین وضعیت تنش منطقه

تعیین 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 موجب تغییر در تعادل تنش زمین می شود. تعریف تنش نیرو بخش بر واحد سطح است که کمیتی تانسوری می باشد. درون پوسته زمین سه تنش اصلی داریم که مقدار ۱ بیشتر از ۲ بیشتر از ۳ می باشد (شکل ۵-۵).



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

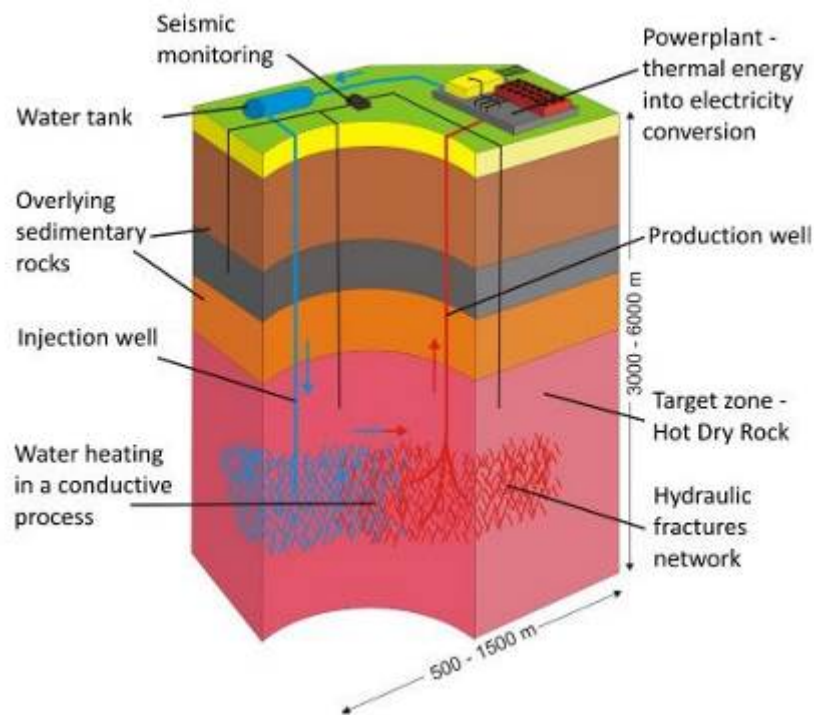
چگونگی وضعیت تنش موجود در توده سنگ، قبل و بعد از حفر سازه های زیر زمینی، به حالت و چگونگی تنش برجای اولیه مربوط می شود که برای اندازه گیری آن روش هایی ارائه شده است و در حالت کلی به دو روش تئوری (روابط تخمینی) و مستقیم (عملی) تقسیم بندی می شوند. در اکثر موارد، تنش برجای قائم از روابط تئوری قابل محاسبه است، اما این روش ها برای تخمین تنش های برجای افقی مقبولیت چندانی ندارد و در موارد مهم و تاسیساتی، از روش های مستقیم برای تخمین تنش های برجای افقی استفاده می شود. از میان روش های مستقیم، روش شکافت هیدرولیکی مطمئن ترین روش برای اندازه گیری تنش های برجای در اعماق زیاد می باشد. این روش از لحاظ مبانی تئوری و انطباق با نتایج آزمایشگاهی و عاری بودن از مشکلات مرتبط با روش های مغزه گیری، نسبت به روش های دیگر دارای امتیاز است و بطور گسترده ای در حوزه های علوم زمین به کار برده می شود.

۵-۲-۲- انرژی ژئوترمال

انرژی زمین گرمایی یک منبع انرژی تجدید پذیر است و همچنین به عنوان منبع انرژی پاک شناخته می شود، زیرا گازهای گلخانه ای را که به انسان ها و محیط زیست آسیب می رسانند، تولید نمی کند. 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 می باشد.

برای استحصال انرژی ژئوترمال با حفر چاه در بعضی از مناطق خاص زمین می توان آب گرم از زمین استخراج کرد. در سیستم های 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 می کنند. البته بعضی از این چاه ها دارای بخار آب نیز می باشند که در تولید برق از آن استفاده می شود. اما سیستم انرژی های ژئوترمال پیشرفته^{۲۹} (EGS) به این صورت می باشد که آب با دمای پایین از یک چاه تزریق شده پس از عبور از میان سنگهای دما بالا به چاه دیگری می رسند که آب با دمای بالا از آن استخراج می شوند. لذا برای عبور آب از چاه تزریق تا رسیدن به چاه استخراج نیاز به یک شبکه متخلخل و تراوا می باشیم. به همین منظور یک شبکه شکستگی در بین دو چاه برای ایجاد تراوایی لازم و بسیار کارآمد می باشد. 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 می توان تراوایی قابل ملاحظه ای را ایجاد کرد که آب در فاصله بین دو چاه در زمانی مناسب به دمای مورد نظر برسد (شکل ۵-۶).



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 می باشد در حالی که کشوری های شمال اروپا بیشترین سرمایه گذاری را داشته اند (شکل ۵-۷).

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).

۵-۲-۳- آب زیرزمینی

برداشت سیالات از سنگ های رسوبی ملزم به وجود تخلخل و تراوایی در سنگ است. برداشت آب از سفره های 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 می باشد (شکل ۸-۵). فناوری شکافت هیدرولیکی در سفره های آب زیرزمینی معمولاً به سه روش انجام می گیرند:



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 شکاف ها شوند. در این روش سیال تزریقی برای حمل پروپانت شبیه سیال تزریقی در چاه های نفتی می باشد. ولی در روش قبلی ترکیب سیال به ترکیب آب شبیه تر بود است (چگالی کمتر).

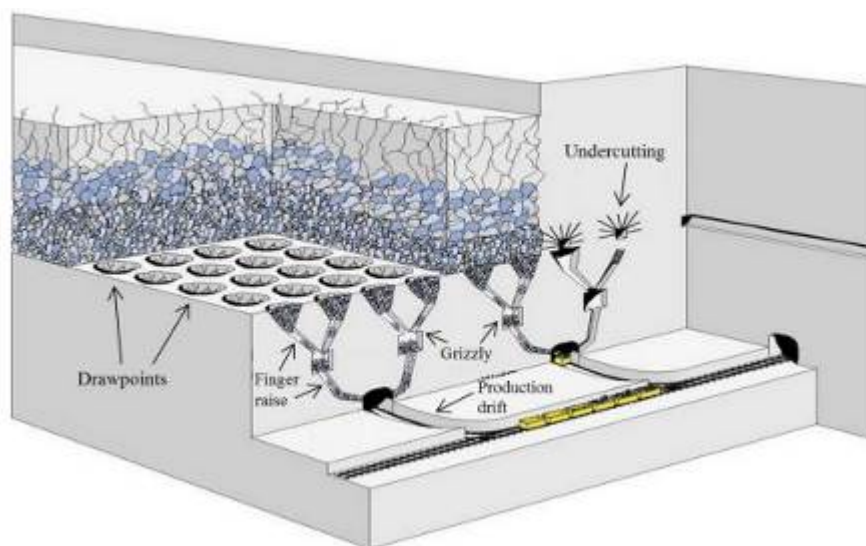
۵-۲-۳-۳- روش ایجاد شکاف و تزریق پروپانت^{۲۲}

این روش کاملاً شبیه اجرای طرح شکافت هیدرولیکی در میادین هیدروکربنی می باشد. در این روش با استفاده از فشار سیال در سنگ شکستگی ایجاد می شود. 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 می شود. از این روش معمولاً در سنگهای رسوبی دانه ریز (مادستون) با تراوایی کم استفاده می شود.

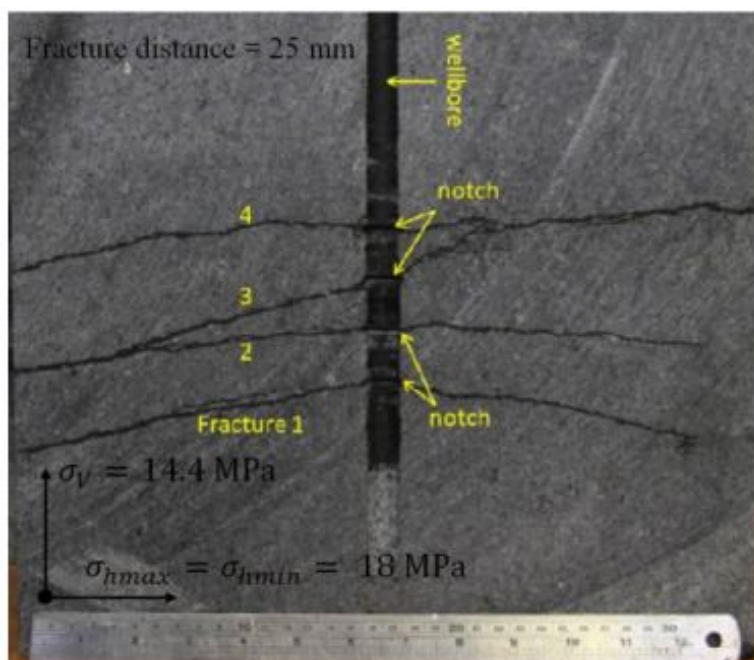
۵-۲-۴- معدنکاری

یکی از روش های استخراج معادن زغال سنگ، سنگهای فلزی و کانی های سخت استفاده از ایجاد شکست درون سنگ به منظور ایجاد بلوک در معادن می باشد. به همین منظور گمانه هایی در معادن حفر کرده و سپس فرایند شکافت هیدرولیکی باعث گسترش شکستگی در سنگ می شود. پس از ایجاد شکست در سنگ، بلوکها از طریق حفره های قیفی شکل توسط نیرو جاذبه بسمت ریل های استخراج انتقال می یابند (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 پروپانت های بزرگ برای جدایش بلوکها استفاده می شود (شکل ۵-۱۱). معادن زیادی در دنیا با استفاده از شکافت هیدرولیکی استخراج می شوند 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.

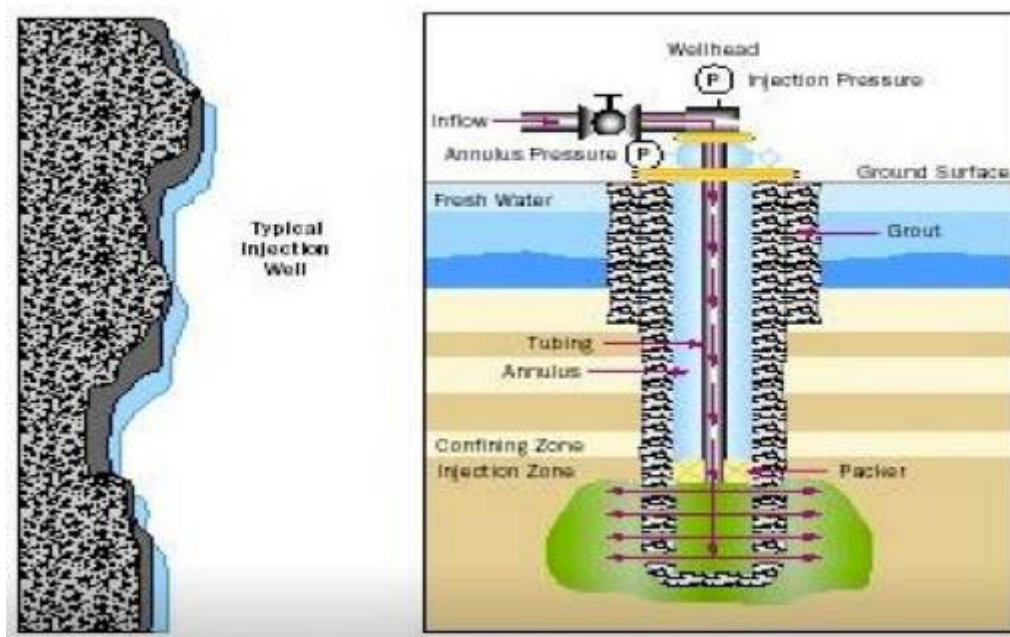
by (Hem and Caldwell, 2012).

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
Resolution	USA	Copper & Molybdenum
Quinta	USA	Molybdenum
San Manuel	USA	Copper
King	Zimbabwe	Asbestos
Shabani	Zimbabwe	Asbestos

۵-۲-۵- تزریق پساب صنعتی و هسته ای به درون زمین

فاضلاب هسته ای سطح بالا عموماً به صورت محلول های اسیدی حاصل از پردازش شیمیایی سوخت مصرف شده در فعالیت های هسته ای هستند. در سال های اولیه توسعه ی صنایع هسته ای، با تبخیر این فاضلاب، حجم آن را کاهش داده و سپس در مخازن زیر زمینی انبار می کردند. مسئله انبار کردن فاضلاب های سطح بالا به خاطر بالا بودن تولید گرمای واپاشی مشکلات پیچیده ای در صنعت هسته ای ایجاد کرده بود. همچنین پساب های صنعتی که آلوده به عناصر سمی و سرطان زا می باشند را نمی توان در محیط رها کرد. لذا بطور کلی پساب های صنعتی و هسته ای را که بشدت بر سلامت انسان و محیط زیست خطرناک هستند به درون زمین تزریق می کنند. چاه تزریقی این پساب، آبهای عمیق بوده تا به چرخه سفره های زیر زمینی بر نگردند (شکل ۵-۱۲). لذا محدوده تزریق این فاضلابها مشابه چاه های نفتی می باشد. برای تزریق این پسابها در چاه بمنظور ایجاد تراوایی در سنگ از فناوری شکافت هیدرولیکی استفاده می کنند. پس از حفر چاه توسط ایجاد شکاف هیدرولیکی تراوایی را در محدوده خاصی از چاه افزایش داده سپس تزریق انجام می شود. 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 روش های دیگر ازدیاد/ بهبود برداشت محل بحث و مناقشه نیست. این روش بر خلاف تکنیک های ازدیاد برداشت فرآیندی زود بازده است که به سرعت نقش خود را در افزایش برداشت از مخزن ایفا می کند.

از طرفی، این حقیقت که غالب مخازن ایران وارد نیمه ی دوم عمر خود شده و شاهد کاهش تولید و افت فشار قابل ملاحظه در آن ها هستیم قابل کتمان نمیباشد. از این رو، دیگر نمی توان با اتکا به مکانیزم های 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.

۴-۵- محدودیت های زیست محیطی

در فرایند شکافت هیدرولیکی چاه های 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:

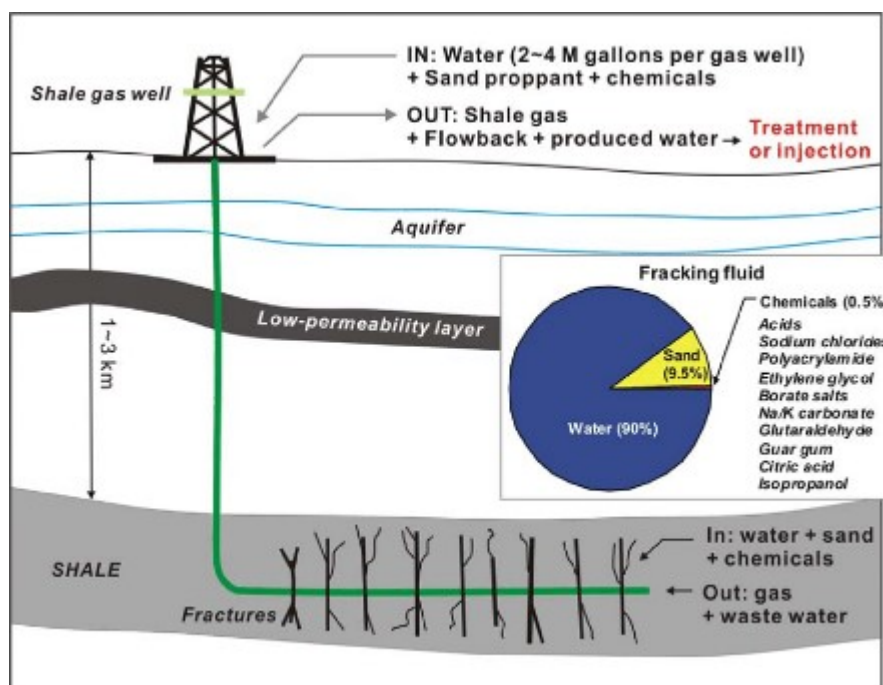
۱- آب برگشتی: از آنجایی که فرایند شکست سنگ با سیال انجام می شود آب برگشتی حاوی مقداری از انواع هیدروکربن های مخزن، سیالات شیمیایی محلول در آب و مواد شیمیایی می باشد (شکل ۵-۱۳ و شکل ۵-۱۴).

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)

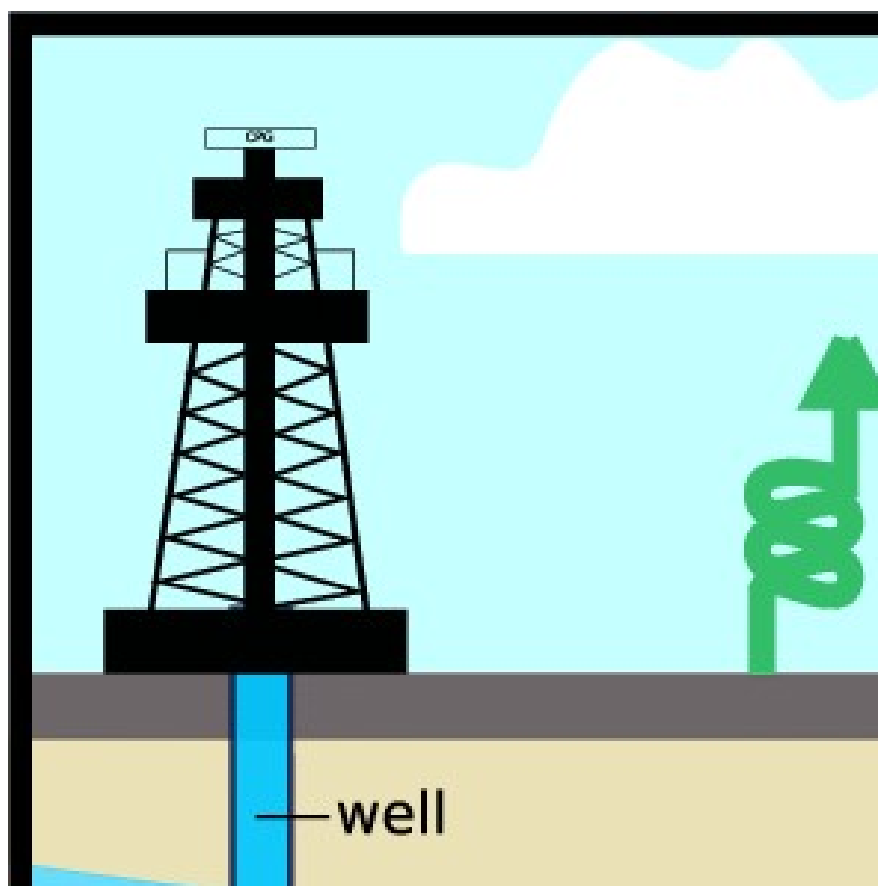


شکل ۵-۱۴- ترکیب سیال پس از عملیات شکافت (Zhang and Hascakir, 2021)



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

لایه های 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 می باشد. 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).

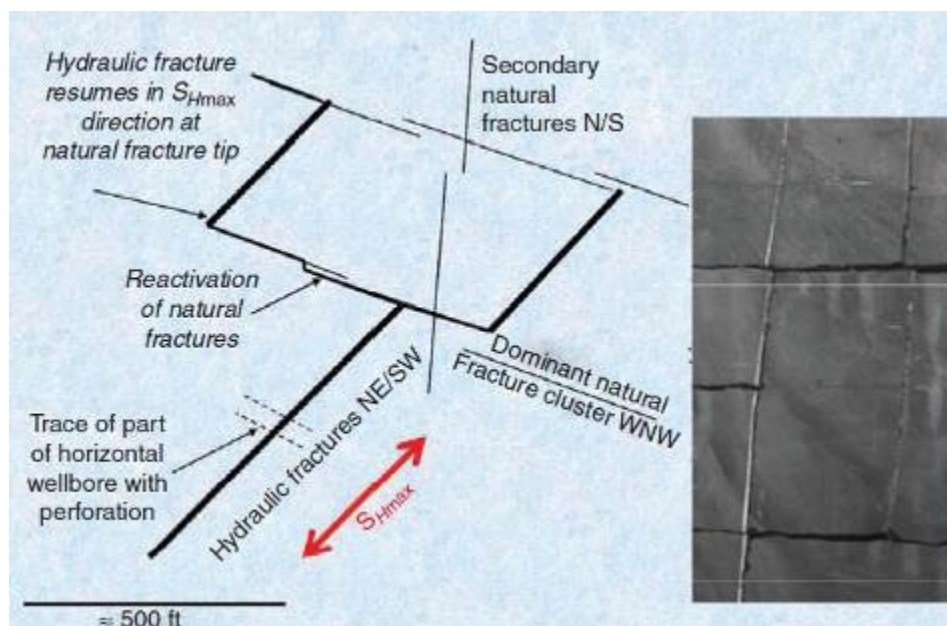
با این وجود اجرای هر طرحی بر روی زمین با آلودگی زیست محیطی همراه می باشد ولی راهکارهایی نیز برای کنترل این آلودگی ها در محیط زیست وجود دارد که در اجرای عملیات بایستی مورد بحث، بررسی و برنامه ریزی قرار گیرد.

۶- مفاهیم کلی علمی-مهندسی در فناوری شکافت هیدرولیکی

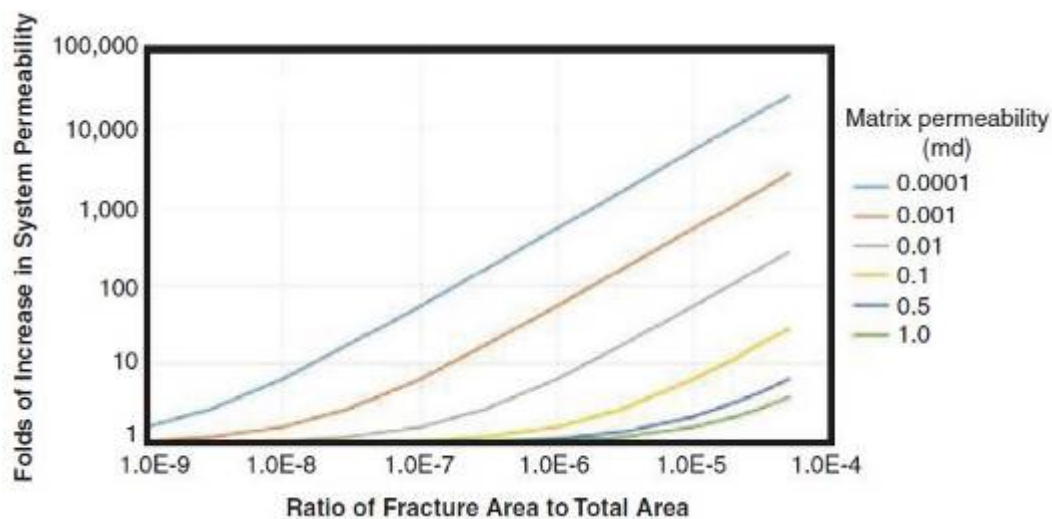
در این بخش از گزارش به ارائه خلاصه ای از مفاهیم کلی علمی-مهندسی که در شاخه های مختلف علوم زمین و مهندسی درگیر در فناوری شکافت هیدرولیکی مورد نیاز و استفاده قرار خواهند گرفت، صرفاً جهت آشنایی خواننده، می پردازیم. لازم به ذکر است که این مفاهیم به تفصیل در فازهای بعدی این طرح و در جهت دستیابی به دانش فنی-اجرایی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

۶-۱- مفاهیم زمین شناسی

شکافهای طبیعی سنگ در اثر تنش های بزرگ مانند جابجایی پوسته زمین، حرکت گسلها و بالآمدن پوسته زمین در طول دوران زمان زمین شناسی بوجود می آیند. در حالیکه شکاف هیدرولیکی یک تغییر محدود در سنگ است که معمولاً کمتر از ۱/۰ درصد توده سنگ در اطراف چاه را در بر می گیرد. این تغییرات جزئی در سنگ اغلب موجب باز یا گسترده شدن شکاف های طبیعی یا ایجاد شکاف به منظور ایجاد مسیری برای جریان و افزایش تراوایی سنگ می شوند. بطور کلی ایجاد شکاف هیدرولیکی موجب دوباره فعال شدن شکاف طبیعی یا باز شدن شکاف های طبیعی خواهد شد (شکل ۶-۱). 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 میگیرند در جدول زیر لیست شده اند (جداول ۶-۱).

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

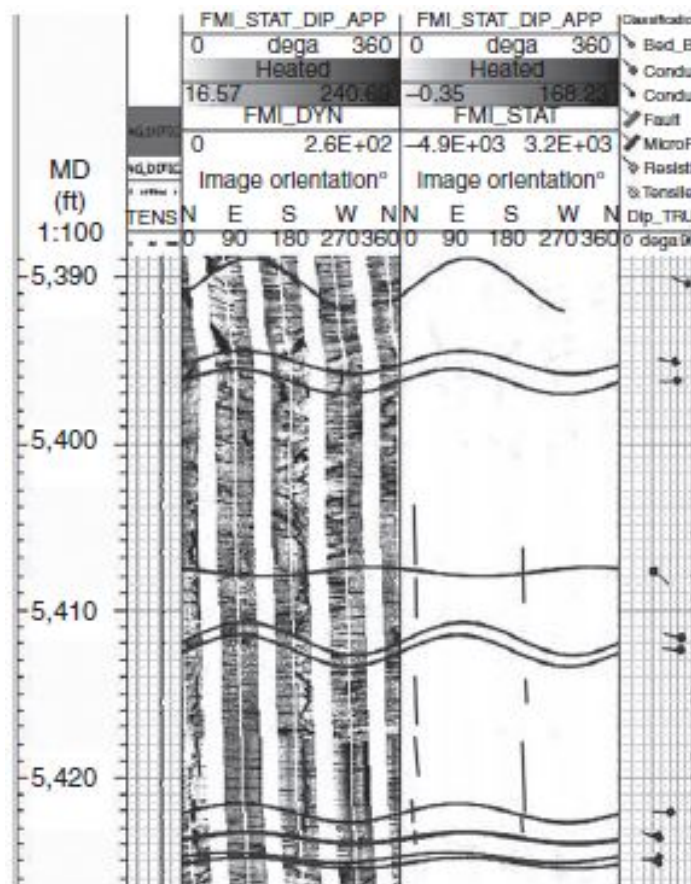
نوع داده	روش های تعیین مقدار داده
مدول های الاستیک سنگ	لاگها (روابط تجربی) و آزمایشات مکانیک سنگ
تنش های درجا	لاگها (روابط تجربی)، آزمایشات درون چاهی، آنالیز موج، گزارش حفاری و تکمیل چاه
اندیس رفتار جریان	گزارش شرکت خدمات دهی
پارامتر هرزروی سیال	تخلخل، تراوایی، آب اشباع شدگی، گزارش شرکت خدمات دهی
خصوصیات 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 ^3NMR و ^3DSI 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

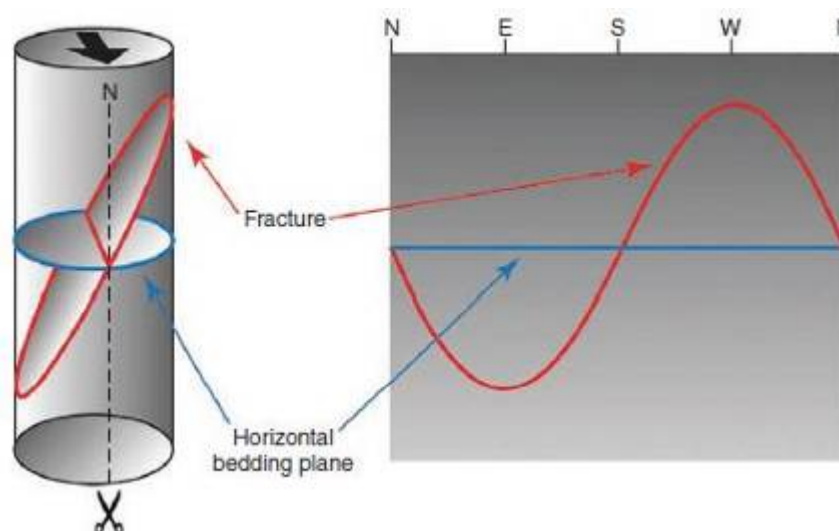
^۳Nuclear Magnetic Resonance

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



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

آزیموت صفحه شکستگی (Berry and Montgomery, 2015)

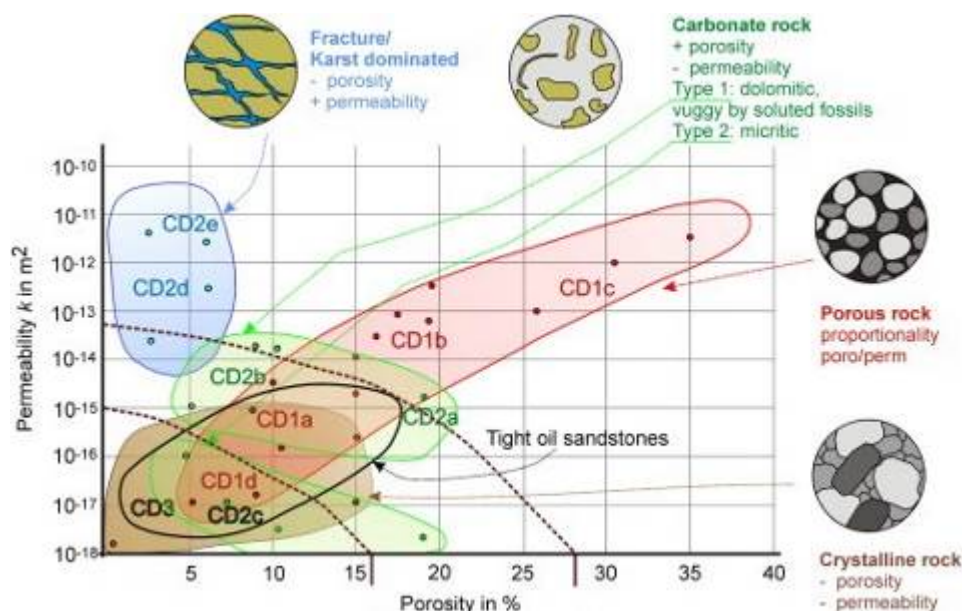


شکل ۴-۶- تبدیل خطوط سینوسی شکل به موقعیت صفحه شکستگی در چاه (Berry and Montgomery, 2015).

شاید بتوان گفت مهمترین کاربرد نمودارهای ذکر شده تشخیص شکستگی های طبیعی و خصوصیات آن در چاه باشد. با استفاده از لاگهای الکتریکی، صوتی، چگالی و نوترون نیز می توان شکستگی های طبیعی سازند را تشخیص داد. همچنین می توان 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 می باشد که قبل و بعد از عملیات در چاه برداشت می شود.

۶-۱-۲- آنالیز مغزه

یکی از روشهای شناسایی شکستگی های طبیعی در مخزن با استفاده از دادههای آنالیز مغره می باشد. در آنالیز مغزه داده تخلخل و تراوایی بدست می آیند که با استفاده از کراس پلات تخلخل و تراوایی می توان نمونه ها و زون های دارای شکستگی طبیعی را شناسایی کرد (شکل ۵-۶). همینطور می توان زون هایی که دارای ریز تخلخل هستند و می توانند تبدیل به اهداف فناوری شکافت هیدرولیکی شوند را شناسایی کرد.



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.

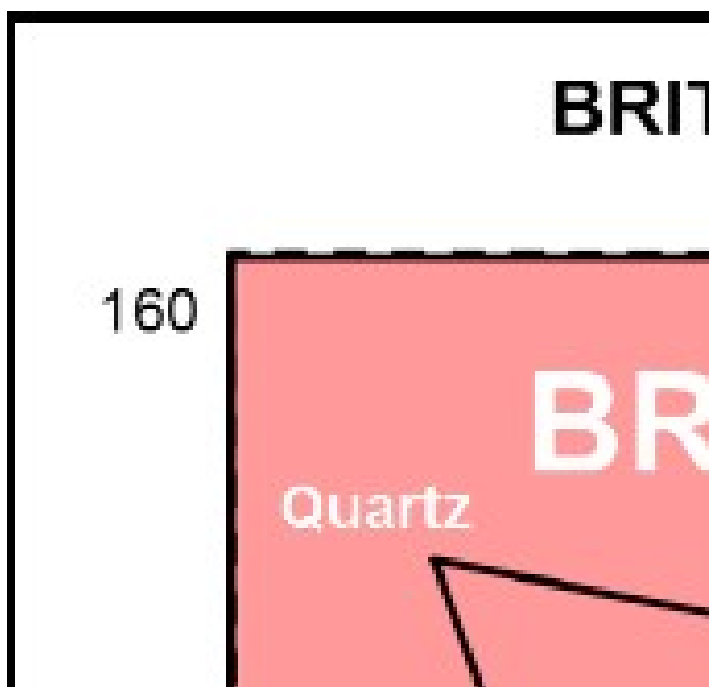
۳-۱-۶- ژئوفیزیک

هدف اصلی بررسی های ژئوفیزیکی و میکروسایزیمیک، تعیین محل ساختارهای زمین شناسی و در صورت امکان اندازه گیری ابعاد و ویژگی های فیزیکی یا تغییرات فیزیکی آنها قبل و بعد از عملیات شکاف هیدرولیکی می باشد. روش های ژئوفیزیکی به صورت گسترده ای در اکتشاف نفت استفاده می شوند. پیشرفت های این روش ها در اثر گسترش ابزارهای دقیق تر و پیچیده تر برای کسب اطلاعات و هم چنین ظهور کامپیوترهای بسیار سریع برای پردازش داده ها حاصل شده است. در واقع داده های لرزه ای تصاویری از شرایط زیر سطح فراهم می کند که در اجرای دقیق تر عملیات شکاف هیدرولیکی کمک خواهد کرد. روش های مختلف اکتشاف ژئوفیزیکی وجود دارد که در این بخش از روش لرزه ای (سایزیمیک) استفاده می شود.

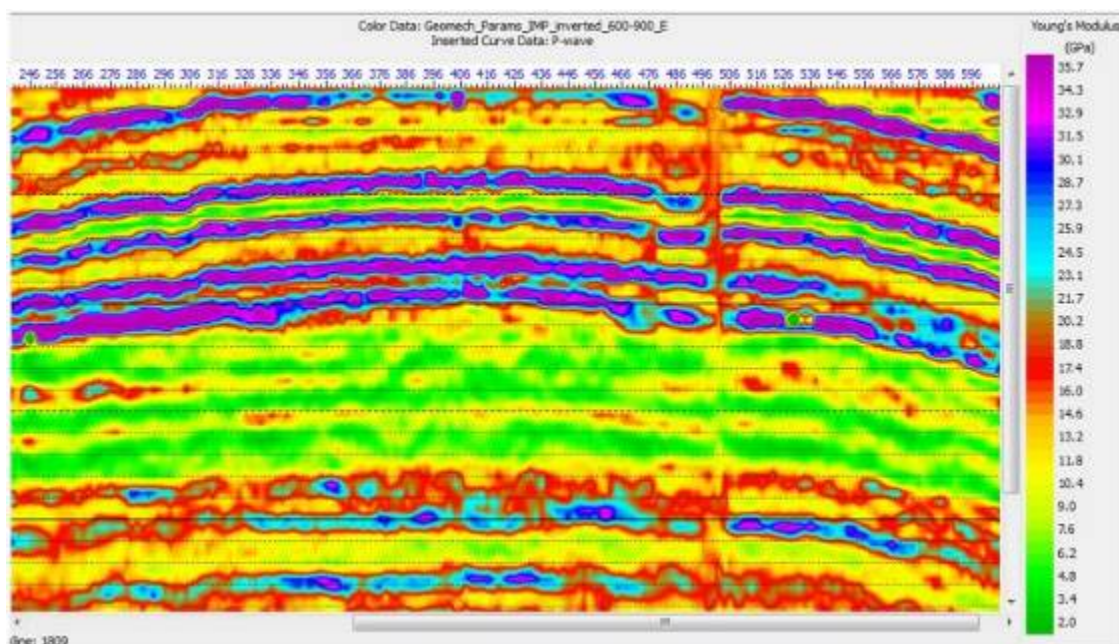
۱-۳-۱-۶ سائز میک

با استفاده از عبور موج از درون سنگ و تعیین سرعت موج P و S می توان خصوصیات مکانیک سنگی را تخمین زد. یکسری از روابط فیزیک سنگ تعریف شده اند (Perez 2013) که این روابط با استفاده از سرعت موج و چگالی شکننده یا شکل پذیر بودن سنگ را مشخص می کنند (شکل ۶-۶). در واقع روابط تجربی پوروالاستیکی وجود دارد که با استفاده از این روابط می توان خصوصیات مکانیک سنگی را تخمین زد. بر همین اساس با استفاده از سکشن های سائز میک 2D و 3D در میدان می توان زون های شکننده و شکل پذیر را شناسایی کرد (شکل ۶-۷ و شکل ۶-۸). همچنین با استفاده از داده های سائز میک می توان در مقیاس میدانی مدول های یانگ و پواسون را تخمین زد که اطلاعات ارزشمندی از خصوصیات مکانیک سنگی در مقیاس میدان ارائه می دهند. در نتیجه به کمک داده لرزه ای می توان زون های کاندید برای شکافت هیدرولیکی در امتداد چاه و همینطور در مقیاس میدانی شناسایی کرد.

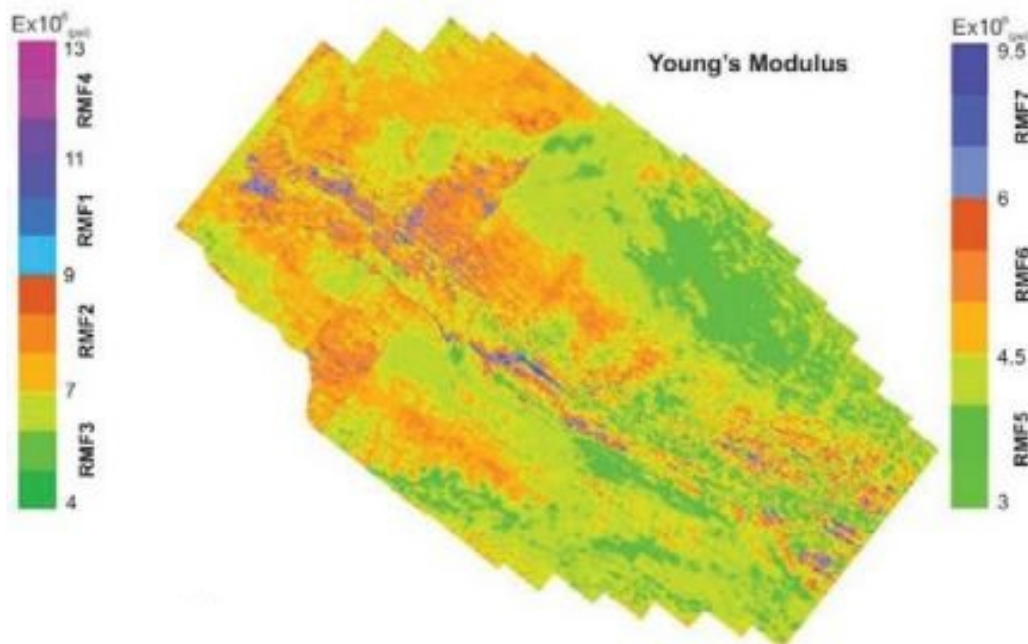
یکی دیگر از کاربردهای ژئوفیزیک در اجرای یک پروژه شکافت هیدرولیکی به عملیات بعد از شکافت برمی گردد. بعد از این که عملیات شکافت مخزن اجرا گردید باید با استفاده از روش های ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک بالا (میکروسائز میک) شکاف های ایجاد شده در سازند را رصد و پیگیری کرد. در این مرحله نیز ژئوفیزیک در شناسایی شکاف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



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



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



شکل ۶-۸- نقشه توزیع مدول یانگ در میدان با استفاده از داده لرزه ای 3D (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 لرزه های بسیار کوچک یا رویدادهای ریزلرزه ای ایجاد می شوند. تصور می شود که این زمین لرزه های کوچک، ناشی از افزایش فشار منفذی نشتی به سنگ های اطراف شکافت هیدرولیکی باشد. ضبط و تجزیه و تحلیل مکان از ریزلرزه به تجهیزات تخصصی سنجش لرزه ای و الگوریتم های پردازش نیاز دارد. تعیین محل و اندازه این ریزلرزه برای تعیین هندسه شکافت هیدرولیکی در سازند استفاده می شود. در واقع با استفاده از روش پایش میکروسایز میک می توان اطلاعاتی از قبیل طول، ارتفاع، آزمون و موقعیت شکستگی در اطراف چاه به دست آورد. به طور کلی در یک جمله می توان گفت پایش عملیات با این روش شامل تصویر برداری دقیق از هندسه مجموعه شکافت های هیدرولیکی است که نمای ۴ بعدی شبکه جریان مخزن را فراهم می نماید. مزیت این روش در تعیین دقیق

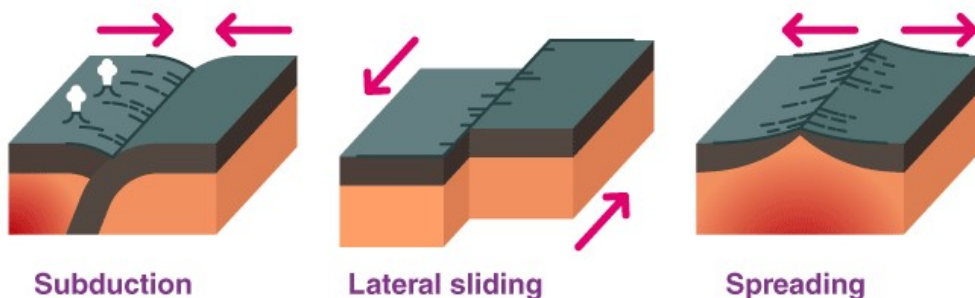
هندسۀ شکستگی در محلی دورتر از چاه است، بنابراین با تغییر در عملیات، پیچیدگی شکستگی میدان در دوردست را می‌توان کنترل و مانیتور کرد.

۶-۱-۴- تکتونیک

تکتونیک منطقه یکی از کنترل کننده های اصلی پیچیدگی ایجاد شکاف در چاه هدف می باشد. 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 کنترل کننده مقدار و جهت تنش در میدان می باشد. لذا از نظر تکتونیکی سه رژیم تنش (کششی، تراکمی و امتداد لغز) داریم که هر یک دارای سناریوهای متفاوتی در یک میدان دارند.

برای مثال در یک حاشیه منفعل کنار قاره ای در اثر جریان ماگمای زیر پوسته، عامل ایجاد کشش در پوسته زمین ایجاد می شود (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.

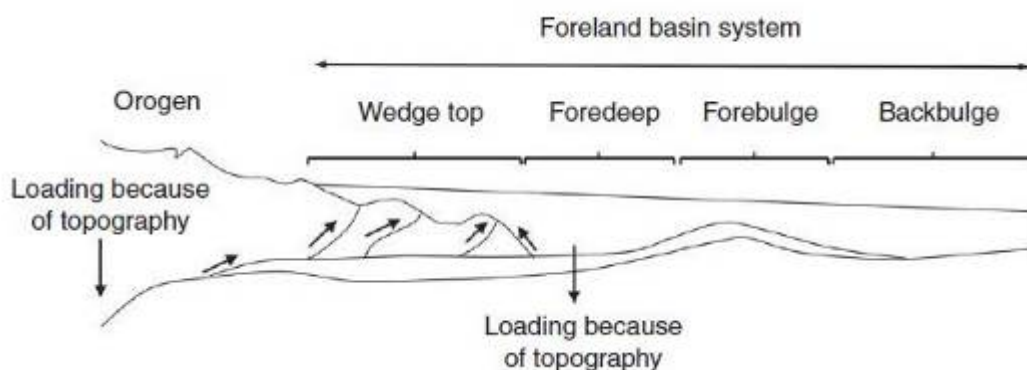
PLATE TECTONICS



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

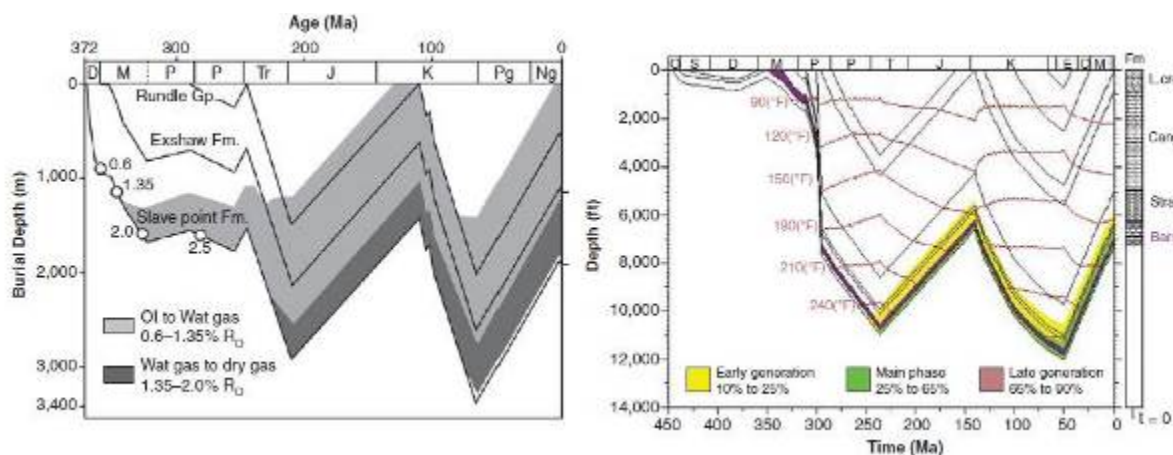
(tectonics)

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

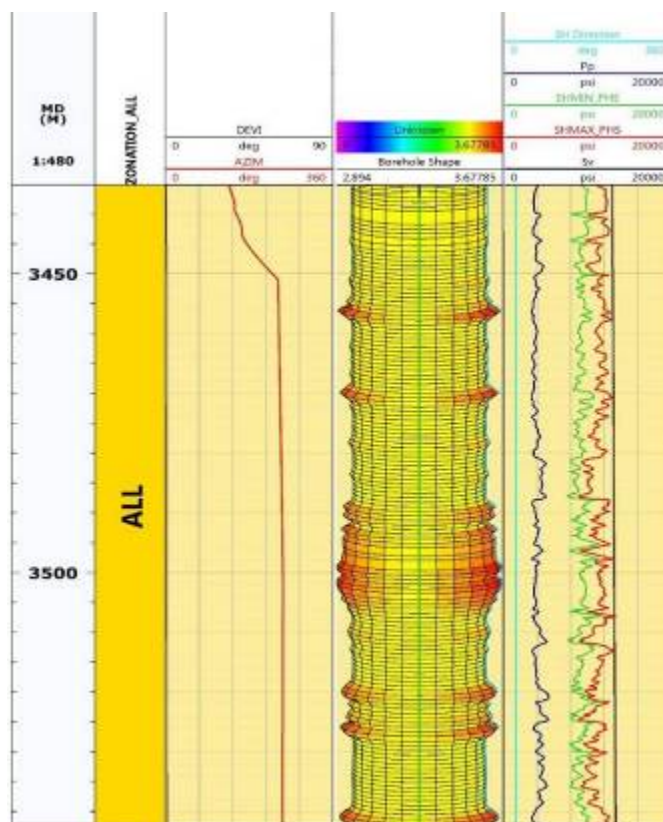
بطور کلی رژیم تنش در یک میدان بر توزیع گسلها و شکستگی طبیعی میدان تاثیر گذار است. لذا مطالعه دقیق و شناسایی رژیم تنش و تکتونیک میدان در طرح ریزی انجام عملیات شکافت هیدرولیکی بسیار اهمیت دارد.

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 معمولا 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

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 می توان بسیاری از پلیمرهای محلول در آب را استفاده کرد. اما این محلول ها 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 شده اند، از نفت های سنگین به عنوان سیالات شکافت استفاده میشد زیرا در مقایسه با سیالات پایه آبی، آسیب کمتری به سازند وارد می کردند. اگر چه ویسکوزیته ذاتی آنها باعث جذابیت بیشتر از آب می شود ولی گران بودن و دشوار بودن انجام عملیات با آن ها، استفاده از آن ها را محدود به شرایط خاصی می کند. سیالات چند فازی نیز، نوع دیگری از سیالات شکافت 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 فازی است که از افزودن گاز به سیال ایجاد می شود. برای ایجاد ثبات در مخلوط، یک ماده فعال کننده سطح (سورفاکتانت) بکار میرود که کشش سطحی را در سطح مشترک گاز /

مايع کاهش ميدهد. فوم ها بازيايي سيال از شكاف را تسريع ميكنند، پس سيالات بسيار خوبي براي استفاده در مخازن كم فشار هستند. استفاده از امولسيون ها نيز به عنوان سيال شكاف رايج است. امولسيون از پراكندگي دو فاز غيرقابل اختلاط مانند روغن در آب يا آب در روغن تثبيت شده با سورفاكتانت ايجاد ميشود. سيالات شكافت برپايه امولسيون، محلولهاي بسيار ويسكوز با خواص حمل و انتقال خوب هستند. هرچه درصد فاز داخلي بيشتر باشد، مقاومت بيشترى در برابر حركت و در نتيجه ويسكوزيته بالاترى ايجاد ميشود. پلي امولسيون عليرغم ايجاد آسيب كمتر در سازند و پاكسازى سريع، فشار اصطكاك زياد و هزينه بالايى دارد و با افزايش دما نيز رقيق ميشود. در جدول زير خلاصه اى از گزينه هاى موجود سيالات ايجاد شكافت كه بر اساس نوع پايه سيال تقسيم بندي ميگردند ارائه گرديده است:

جدول ۶-۲- نمونه هاى از سيالات شكافنده

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 میشود تا مسیر رسانایی به چاه ایجاد شود.

سیال شکاف زنی معمولاً در بردارنده ی 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 افزودنیهای 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 جداسدن 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

^{۳۶}Crosslinker

^{۳۷}Breaker

^{۳۸}Foamer

^{۳۹}Defoamer

^{۴۰}Diverting agent

^{۴۱}matrix

۶-۳- طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی

مباحث عنوان شده در بخشهای پیشین این گزارش در طراحی فرآیند عملیات این فناوری بکار گرفته میشود. مباحث تئوری به همراه استفاده از قابلیت‌های نرم افزارهای تجاری موجود توانایی طراحی و بهینه سازی فرآیند عملیات را ایجاد خواهد نمود. یکی از مهمترین بخشهای طراحی شکافت مدلسازی هندسه شکافت 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

داده های مورد نیاز به همراه کاربرد آن ها در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی و همچنین روش به دست آوردن آن ها در جداولی آمده است. داده های مورد نیاز در پنج گروه شامل پارامترهای مخزنی مورد نیاز، داده های چاه، خواص الاستیک سنگ، اطلاعات زمین شناسی و داده های مربوط به سیال شکافت زنی 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 ۵-۶- داده های چاه

کاربرد	داده
تأثیر قوی بر ارتباط بین چاه و سازند	میزان انحراف چاه
تعیین میزان افت فشار سیال به هنگام عبور از سوراخ ها/ توانایی عبور دهی پروپانت ها	داده های سوراخ شدگی ^{۴۳} شامل چگالی سوراخ شدگی (shot/feet)، زاویه ی بین سوراخ ها، ^{۴۴} قطر سوراخ ها ^{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

^{۴۳}Perforation

^{۴۴}Phasing

^{۴۵}Hole diameter

^{۴۶}Wellbore configuration

^{۴۷}Cohesion Strength

^{۴۸}Biot's coefficient

^{۴۹}Thermo- poro elastic test

جدول ۶-۷- اطلاعات زمین شناسی

داده	کاربرد	منبع
وضعیت شکاف های طبیعی	متاثر شدن رژیم های جریان 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/ ^{۵۱} لاگ تصویری/ ^{۵۲} صوتی
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

^{۵۱}Worldwide stress map developed by the earth system management

^{۵۲}oriented fracture microimaging log

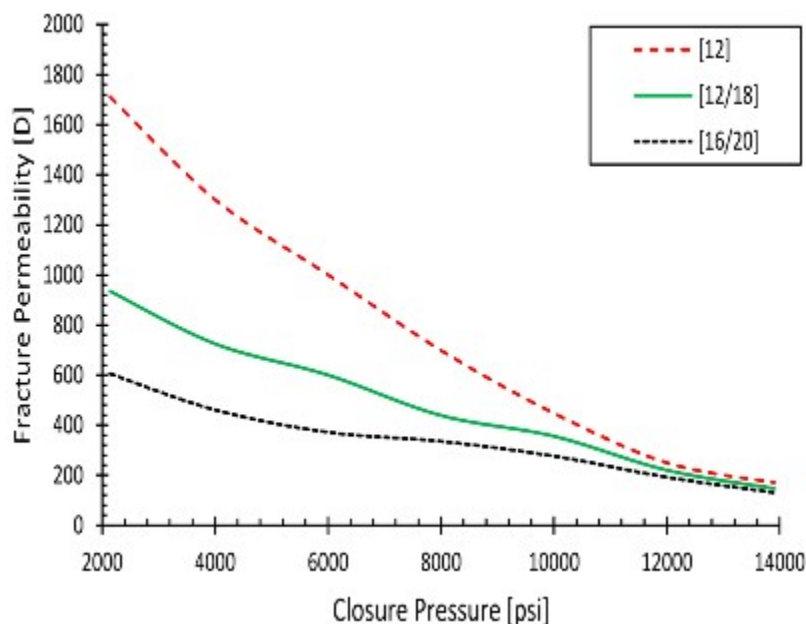
^{۵۳}oriented circumferential acoustic log

۶-۳-۲- پارامترهای طراحی

برخی از پارامترهای غالب و تاثیر گذار 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 اندازه ی پروپانت

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



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

(Lengyel et al., 2021)

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

۶-۳-۲-۲- گرانروی سیال شکافت

گرانروی سیال نقش عمده ای را در توانایی حمل پروپانتها ایفا می کند. سیال با گرانروی کم توانایی نگه داری پروپانت ها و حمل آن ها را تا انتهای شکاف ندارد. از طرف دیگر اضافه کردن پلیمرها به سیال شکاف و افزایش گرانروی آن، منجر به کاهش میزان هدر رفت سیال شکاف از دیواره های شکاف می شود. گرانروی سیال، همچنین بر روی میزان فشار موثر و باز شدگی شکاف نیز اثر می گذارد. البته واضح است که هزینه پمپ کردن سیال، با افزایش گرانروی آن افزایش می یابد.

۶-۳-۲-۳- نرخ پمپاژ

افزایش نرخ پمپ کردن باعث می شود شکاف به اندازه ی کافی باز شود تا پروپانت ها بتوانند به راحتی به آن وارد شوند. همچنین حمل پروپانت ها به همراه سیال، با افزایش نرخ پمپاژ، آسانتر می شود. از آنجایی که هدر رفت سیال درون شکاف با زمان رابطه ی مستقیم دارد، پس از افزایش نرخ پمپاژ و به دنبال آن کاهش زمان عملیات باعث می شود 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

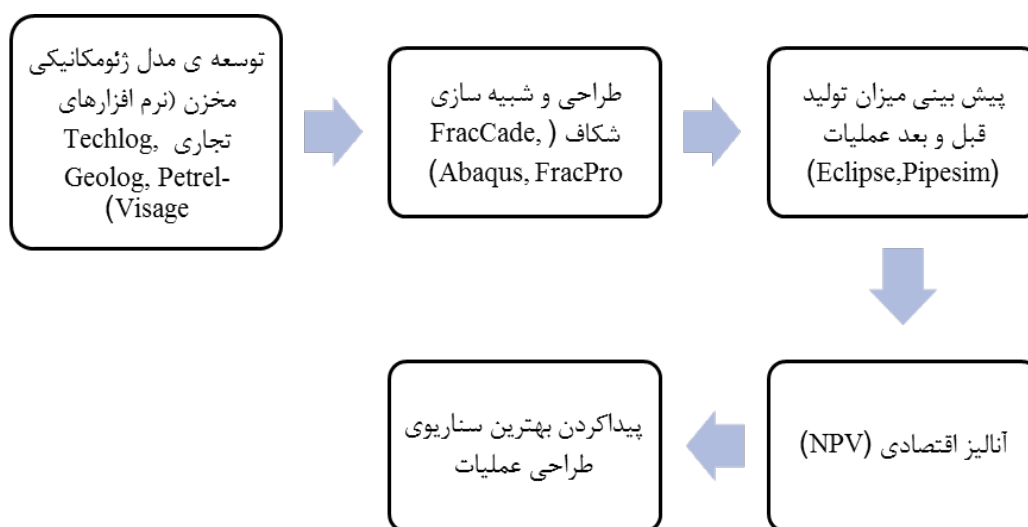
با دانستن مقدار تنش های موثر سازند و مقاومت کششی سنگ، می توان فشار لازم برای شکست سازند را محاسبه کرد که در حقیقت فشار در دهانه شکاف است. بنابراین این فشار، یک پارامتر طراحی نبوده و وابسته به مشخصات سازند است. مقدار این فشار از فشار سر چاهی و بر اساس افت فشارهایی که سیال درون چاه (افت فشار اصطکاکی و هیدروستاتیک) و سوراخ شدگی تجربه می کند به دست می آید. 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 شدگی ها

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 شدگی ها تاثیر قابل توجهی بر میزان افت فشار و همچنین توانایی عبور دهی پروپانت ها دارد (به طوری که پروپانت ها، سوراخ ها را مسدود نکنند). بنابراین طراحی مناسب سوراخ شدگی ها و تکمیل چاه ، همواره مسئله ی 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، استراتژی های 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 داده های مورد نیاز، مقدار مناسب پارامترهایی که در قسمت های قبل ذکر شد تعیین گردند. روش و مراحل این کار در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. در ابتدا با استفاده از نرم افزارهای تجاری مانند Techlog, Geolog, Petrel-Visage مدل ژئومکانیکی مخزن ساخته می شود. 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 می توان ارزش افزوده ای که ایجاد این شکاف به ارمغان می آورد با محاسبه ی هزینه های عملیات و مقایسه ی 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

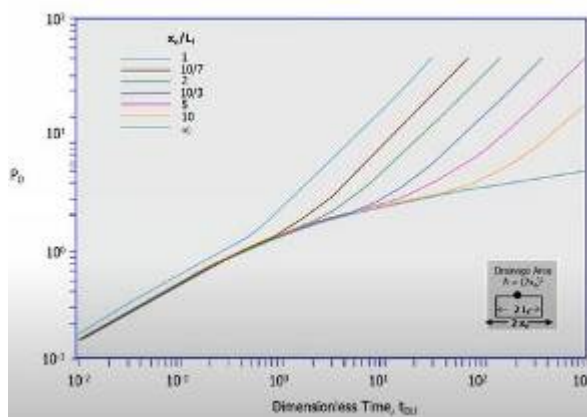
۴-۳-۶- تست های قبل از عملیات اصلی

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 استرس های برجا با دقت بالا تعیین میشوند (Montgomery, 2015).

۵-۳-۶- آنالیز نتایج پس از عملیات

با توجه به داده هایی که بعد از عملیات به دست می آید، شرایط مخزن و عملیات انجام شده، آنالیز و بازسازی مجدد می شود. تجزیه و تحلیل داده های فشار و تزریق جهت ارزیابی بعد از عملیات برای بررسی میزان گسترش شکستگی در مخزن و افزایش کارایی مخزن مورد استفاده قرار می گیرد. با بررسی پارامترهای مخزنی، هندسه شکستگی های ایجاد شده می توان سیستم تولیدی مخزن را تجزیه و تحلیل کرد. با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز عملیات به انطباق تاریخچه پرداخته و مدل هایی که برای طراحی عملیات ایجاد شده بود بهینه سازی می شود. آنالیز داده ها بعد از عملیات اولیه کمک بسیار زیادی برای اصلاح شبیه سازی عملکرد عملیات در مخزن می کند.

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 مقایسه ی آن با معادلات تحلیلی به دست آمده به طور غیر مستقیم هندسه ی 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 نامحدود و شکاف با هدایت پذیری محدود ایجاد شده است نشان داده شده است. خط با شیب ۰,۵ در زمان های اولیه معرف وجود شکاف با هدایت پذیری نامحدود و خط با شیب ۰,۲۵ بیانگر شکاف با هدایت پذیری محدود می باشد.



(ب)

(الف)

شکل ۶-۱۶- نمودار فشار ته چاهی برای شکاف (الف) با هدایت پذیری نا محدود و (ب) هدایت پذیری محدود (Spivey and

Lee, 2013)

۶-۳-۶- روشهای پایش

علاوه بر آنالیز فشار، روش های پایشی نیز وجود دارد که ابعاد و جهت گیری شکاف را به صورت مستقیم

مشخص می کنند (Montgomery, 2015):

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

۲- ردیاب های رادیواکتیو: این ردیاب ها به همراه سیال به درون مخزن فرستاده می شوند و اشعه ی گامایی

که از آن ها ساطع می شود توسط یک گیرنده ثبت می شود.

۳- ردیاب های شیمیایی: این ردیاب ها نیز مشابه ردیاب های رادیواکتیو به همراه سیال به درون مخزن

فرستاده می شوند و بر اساس غلظت خروجی مشاهده شده و انجام محاسبات موازنه ی جرم می توان میزان نفوذ

و جذب آن ها را مشخص کرد.

۴- میکروسایز میک: بر اثر عملیات شکافت هیدرولیک، زلزله های کوچی ایجاد می شود که با ثبت و تفسیر آنها می توان درباره ی شکل شکاف نتیجه گیری کرد.

۵- شیب سنج: ایجاد شکاف، باعث تغییراتی در شکل زمین اطراف چاه می شود که توسط گیرنده های خاصی که آنجا کار گذاشته شده اند، ثبت و تفسیر می شوند.

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 پیشرفته تر 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 پیشرفته ای 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:

پمپ های فشار قوی

برای انجام فرآیند شکافت هیدرولیکی، اولین بار از پمپ های 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، پمپ هایی مخصوص این فناوری ساخته شدند که قابلیت تزریق مواد در دبی ها و فشارهای بالا را دارند. شکل ۶-۱۷ پیکربندی یک پمپ فشار بالا را نشان می دهد که تا ۲،۴۰۰ اسب بخار توان دارند. انرژی این پمپ ها معمولاً از موتورهای دیزلی تامین می شود. البته با پیشرفت در فناوری توربینها، امروزه پمپ هایی با همین سایز اما دارای توان ۵،۰۰۰ اسب بخار نیز ساخته شده اند. کنترل این پمپ ها به صورت اتوماتیک و از راه دور انجام می شود.



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

مخلوط کن

وظیفه ی مخلوط کن این است که سیال را از مخزن ذخیره از طریق یک منیفولد بیرون بکشد و با پروپانت و سایر افزودنی های شیمیایی مخلوط کند و با فشار مورد نیاز تحویل دهد (شکل ۶-۱۸).



شکل ۶-۱۸- مخلوط کن 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، پروپانت ها باید با نرخ مناسب وارد مخلوط کن شوند. این وسیله بر روی مخلوط کن قرار می گیرد و ورود آن را به مخلوط کن، کنترل می کند (شکل ۶-۱۹).



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

واحد مواد شیمیایی (Chemical Unit)



شکل ۶-۲۰- واحد مواد شیمیایی

ون داده ها و اطلاعات (Data Van)



شکل ۶-۲۱- ون داده ها و اطلاعات

واحد رطوبت دهی (Hydration Unit)



شکل ۶-۲۲- واحد رطوبت دهی

واحد گرمادهی آب فرک (Frac Water Heating)



شکل ۶-۲۳- واحد رطوبت دهی

میسل تریلر^{۵۳}

یک منیفولد است که سیال کم فشار را از مخلوط کن گرفته و بین پمپ های فشار بالا توزیع می کند. وقتی که فشار سیال افزایش یافت، این سیالات دوباره به میسل برمی گردند و میسل آن ها را به صورت یک جریان واحد پر فشار تحویل می دهد (شکل ۶-۲۴).



شکل ۶-۲۴- میسل تریلر (https://app.emaze.com)

فرک تانک^{۵۴}

سیالات شکاف زنی در این محفظه ها نگه داری می شوند. این تانکها در مقابل خواص سیالات دارای مقاومت هستند (شکل ۶-۲۵).

^{۵۳}Missile Trailer

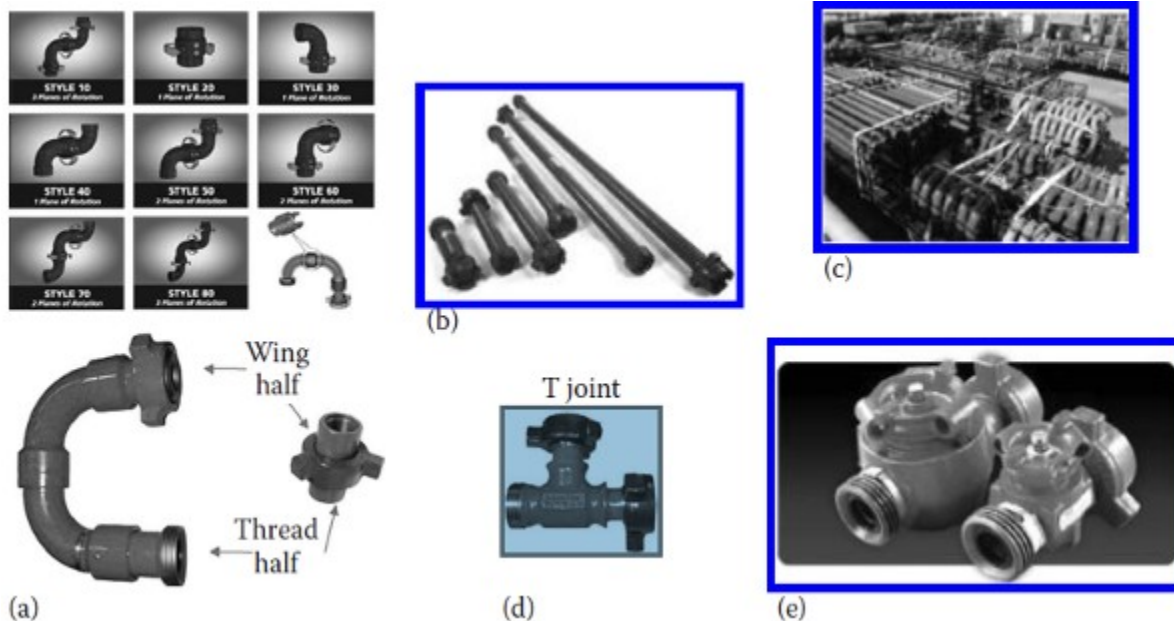
^{۵۴}Frac tank



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

لوله ها، اتصالات و شیرها

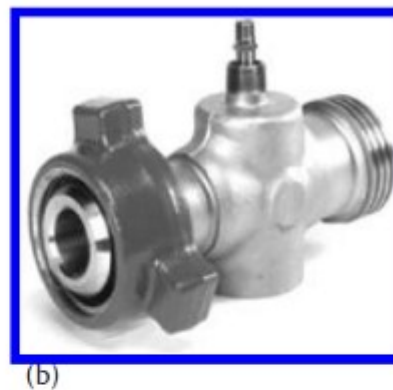
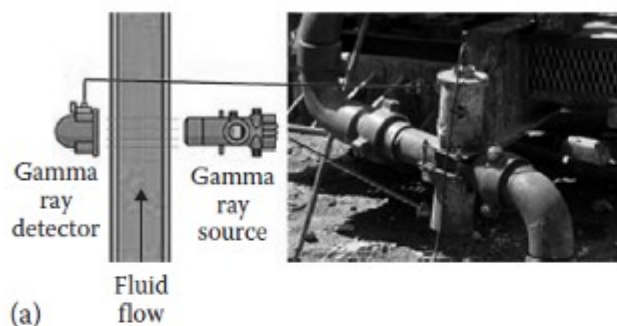
لوله های حامل سیال پر فشار تزریقی، اتصالات و شیرهایی خاص برای فرآیند شکافت هیدرولیکی طراحی شده اند که از نظر جنس و طراحی منحصر به فرد هستند (شکل ۶-۲۶). شکل زیر نمونه ای از این ادوات را نشان می دهد.



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

سنسورها^{۵۵}

برای تعیین چگالی سیال تزریقی یک حسگر رادیواکتیو در طول خط تزریق قرار داده می شود (densitometer). برای اینکه تغییرات چگالی ناشی از تغییر غلظت پروپانت ثبت شوند، باید حداقل یک دستگاه اندازه گیری چگالی در نزدیک ترین فاصله ی ممکن از سر چاه قرار بگیرد. فشارسنج و جریان سنج نیز از اصلی ترین ابزار جمع آوری داده هستند.



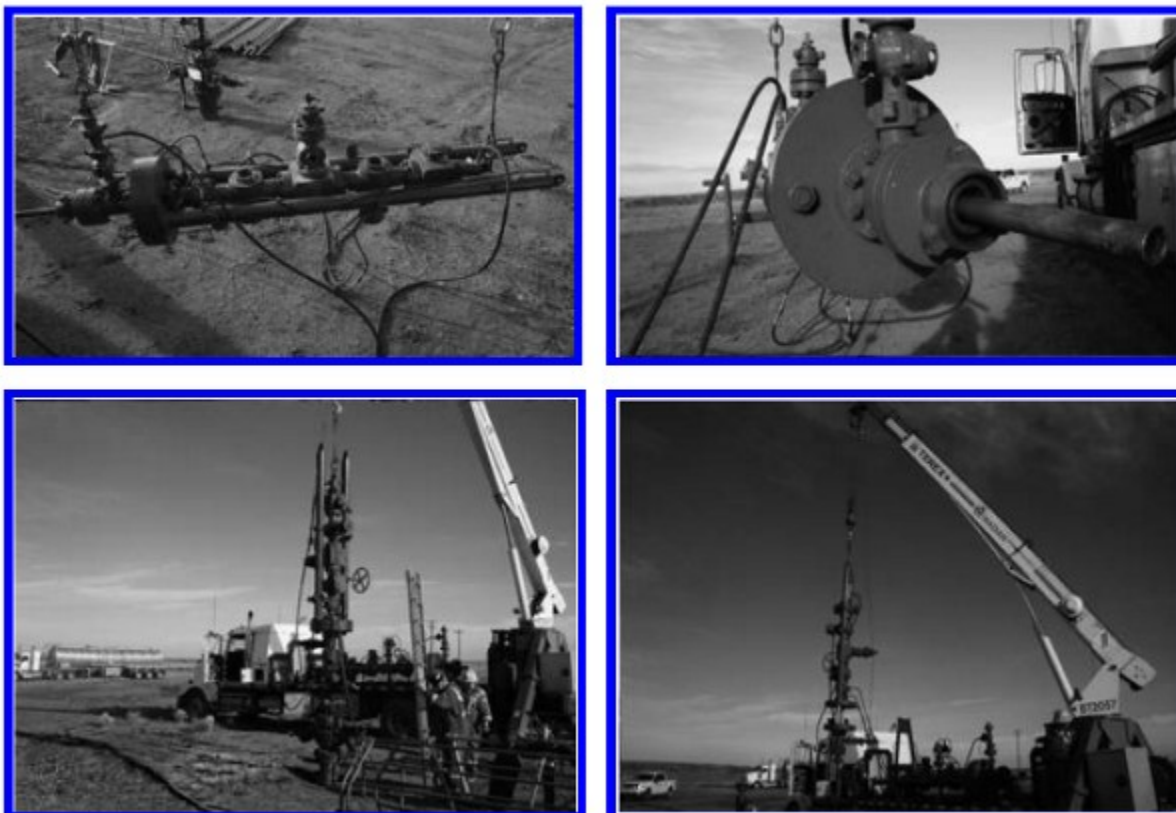
شکل ۶-۲۷- الف) چگالی سنج رادیواکتیو ب) جریان سنج فشار بالا پ) گیرنده ی فشار ت) گیج فشار ته چاهی

(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 پروپانت ها با خود، خاصیت تخریبی و خوردگی دارد در هنگام عملیات شکافت هیدرولیکی تجهیزات سر چاهی موقتا کنار گذاشته می شوند و یک سری شیر موقتا جایگزین شیرهای کنترلی حاضر بر سر چاه می شوند (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 می باشد. از آنجائیکه ابزار و روشهای تکمیل چاه همراه با پیشرفت کلی صنعت نفت دچار تغییر و تحول گسترده ای شده است، صنعت شکافت هیدرولیکی را نیز دچار تحول و پیشرفت قابل ملاحظه ای نموده است. تحقق اهداف اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی نیازمند توجه به استراتژیهای بهینه سازی تکمیل و مشبک کاری، 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.

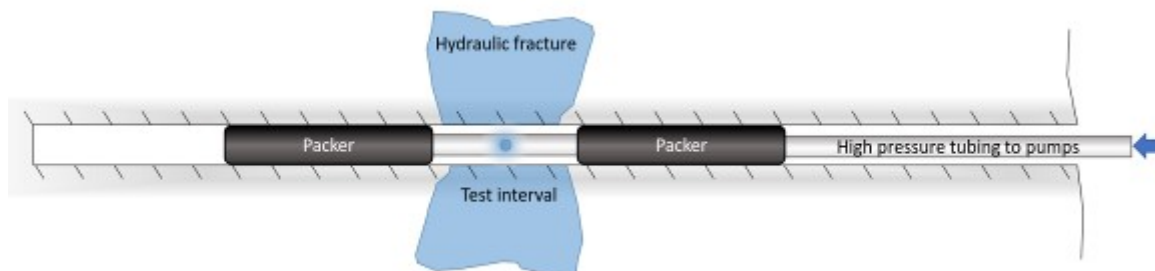
به طور کلی عملیات شکافت هیدرلیکی هم در چاه های حفره باز و هم در چاه های دارای لوله جداری سیمانی شده، انجام میگیرد. روش تکمیل و اجرای عملیات بسته به هدف های انجام عملیات که میتواند بصورت تک مرحله ای و یا چند مرحله ای تعریف گردد، انتخاب میشود.

در عملیاتهایی تک مرحله ای معمولاً اجرای عملیات بسیار ساده تر 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 مرحله ای میباشد، چنانچه امروزه بسیار متداول میباشد، انتخاب روش اجرا و نوع رشته تکمیلی اهمیت دوچندان و ویژه ای پیدا میکند. معمولاً در چنین عملیاتی پیچیدگی اصلی مربوط به نحوه ایزوله کردن ناحیه ها از همدیگر میباشد.

دو روش معمول در عملیات چند مرحله ای عبارتند از روش پلاگ-پرف (Plug-and Perf) و روش (Frac Sleeve). در چاه هایی که دارای لوله جداری سیمانی شده هستند از پکرها در عملیات های شکافت چند مرحله ای برای جدا کردن محل انجام فرآیند از سایر بخش های چاه استفاده می شود (شکل ۶-۲۹). در فاصله ی بین دو پکر مشبک کاری انجام می شود و سپس سیال در فاصله ی بین دو پکر تزریق می گردد و فشار افزایشی تا مرحله ی شکسته شدن سنگ انجام می گیرد. 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 می شود و عملیات در آن انجام می گیرد. در صنعت شکافت هیدرولیکی این عملیات Plug-and Perf نامیده می شود (شکل ۶-۳۰ الف).

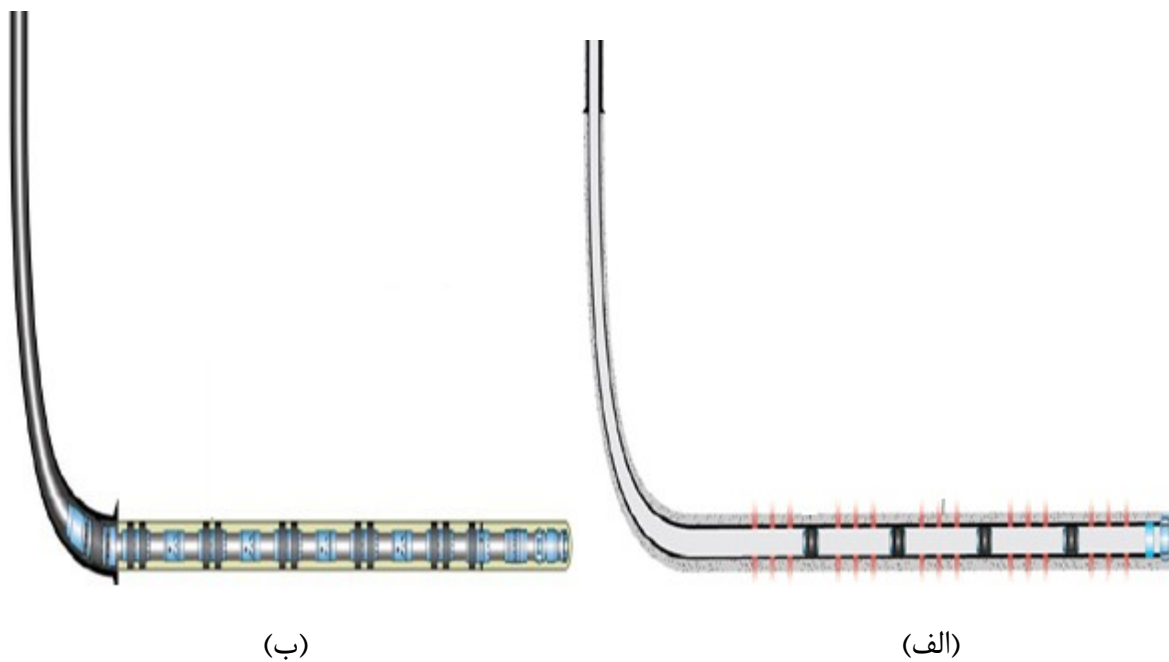


شکل ۶-۲۹- پکر مورد استفاده برای ایزوله کردن بخشی از چاه در عملیات شکاف زنی چند مرحله ای

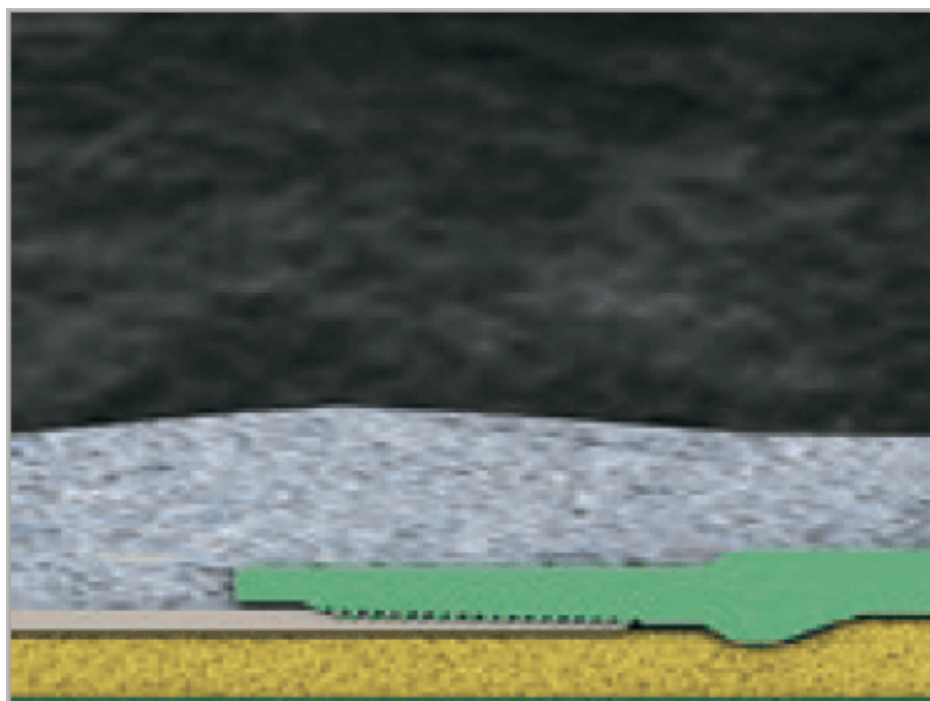
<https://www.smcroy.fi/knowledge/hydraulic-fracturing/>

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

بمانند عملیات تک مرحله ای ، در عملیات چند مرحله ای 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 مرحله ای. الف) plug-and perf ب) frac sleeve



شکل ۶-۳۱- نحوه ی 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 میباشد.
- کشور آمریکا بعنوان پیشرو ترین و پرکاربردترین کشور دنیا در زمینه این فناوری شناخته شده و آمار مربوطه را بصورت مدون و منظم ارائه میدهد.
- این فناوری بعنوان اصلی ترین فناوری انقلاب شیل و تحول در مسایل ژئو پلتیک تامین انرژی در سطح جهان گردیده است.
- آمار جمع آوری شده نشاندهنده گسترش سریع این فناوری در آسیا و منطقه خاورمیانه میباشد.
- 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 میباشد.
- 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 میرسد. این کاربردها میتواند شامل موارد زیر باشد:
 - جلوگیری از افت تولید چاههای 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 شاخه های علوم زمین از جمله زمین شناسی، ژئوفیزیک، مکانیک سنگ، ژئومکانیک و پتروفیزیک و در شاخه های 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 شاخه های 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 رخساره ای 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.