



عنوان طرح:

"دستیابی به دانش فنی و اجرایی فناوری شکافت هیدرولیکی"

خلاصه گزارش

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

مهر ماه ۱۴۰۳

فهرست عناوین

فصل ۱: مقدمه.....	۱۱
۱-۱- معرفی فناوری.....	۱۲
۲-۱- تاریخچه و سیر تحول فناوری.....	۱۲
۳-۱- داده های آماری فناوری شکاف هیدرولیکی.....	۱۵
۱-۳-۱- آمار تولید مرتبط با فناوری شکاف هیدرولیکی در کشورهای مختلف.....	۱۶
۴-۱- تجربیات گذشته عملیات شکاف هیدرولیکی در ایران.....	۲۵
۱-۴-۱- شکاف اسیدی در میدان نفتی آذر.....	۲۵
۲-۴-۱- مطالعات ژئومکانیک پروژه شکاف اسیدی میدان نفتی آذر.....	۲۶
۳-۴-۱- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره AZR-003.....	۲۷
۴-۴-۱- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره AZR-011.....	۲۸
۵-۴-۱- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره AZR-004.....	۲۹
۶-۴-۱- شکاف اسیدی در میدان نفتی سیری.....	۳۱
۷-۴-۱- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره DPH-02.....	۳۱
۸-۴-۱- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه اکتشافی SIA-01.....	۳۲
۹-۴-۱- نتیجه گیری:.....	۳۳
۱۰-۴-۱- شاخص موفقیت از نظر طراحی مهندسی شکاف.....	۳۳
۱۱-۴-۱- شاخص موفقیت از نظر انتخاب و آزمایش سیالات شکاف.....	۳۴
۱۲-۴-۱- شاخص موفقیت از نظر فرایند اجرای عملیات.....	۳۴
۱۳-۴-۱- شاخص موفقیت از نظر بهبود وضعیت تولید.....	۳۵
۱۴-۴-۱- شاخص موفقیت از نظر حفظ یکپارچی چاه.....	۳۶
۱۵-۴-۱- شاخص موفقیت از نظر تداوم تولید.....	۳۶
فصل ۲: غربالگری.....	۳۸
۱-۲- مقدمه.....	۳۹

۳۹.....	۲-۲- پارامترهای فنی
۴۰.....	۳-۲- پارامترهای مخزنی (دینامیکی)
۴۱.....	۴-۲- پارامترهای مرتبط با تکمیل چاه.....
۴۱.....	۵-۲- پارامترهای غیر فنی
۴۲.....	۶-۲- روش های غربالگری
۴۳.....	۷-۲- انجام غربالگری بر روی میدین ایران.....
۴۵.....	۸-۲- اولویت بندی مخازن از نقطه نظر فنی
۴۷.....	۹-۲- اولویت بندی نهایی مخازن
۴۷.....	۱۰-۲- تعاریف اولویتها:
۵۴.....	فصل سوم: مبانی و تئوری شکاف هیدرولیکی
۵۵.....	۱-۳- مقدمه
۵۵.....	۲-۳- زمین شناسی
۵۶.....	۳-۳- پتروفیزیک
۵۷.....	۴-۳- ژئومکانیک
۵۷.....	۱-۴-۳- مراحل ساخت مدل یک بعدی ژئومکانیکی
۶۲.....	۵-۳- طراحی سیالات
۶۲.....	۱-۵-۳- مقدمه‌ای بر سیالات تکنولوژی شکافت هیدرولیکی.....
۶۳.....	۲-۵-۳- سیال‌های شکافنده
۶۳.....	۳-۵-۳- سیالات پایه آبی
۶۵.....	۴-۵-۳- سیالات پایه روغنی.....
۶۵.....	۵-۵-۳- سیالات بر پایه فوم (کف)
۶۶.....	۶-۵-۳- سیالات برودتی
۶۶.....	۷-۵-۳- سیالات مبتنی بر امولسیون
۶۶.....	۸-۵-۳- سیالات پایه الکلی
۶۶.....	۶-۳- مواد افزودنی سیالات شکافنده

۶۹.....	۳-۶-۱- مواد افزودنی کنترل اتلاف سیال
۶۹.....	۳-۶-۲- باکتری کش ها و آفت کش ها
۷۰.....	۳-۶-۳- فرک آب
۷۰.....	۳-۶-۴- تثبیت کننده های خاک رس
۷۰.....	۳-۶-۵- شکننده های ژلی
۷۱.....	۳-۶-۶- عوامل ژل ساز (GELLING AGENTS)
۷۱.....	۳-۶-۶-۱- ژل خطی
۷۱.....	۳-۶-۶-۲- ژل های اتصال عرضی (CROSS-LINKED GELS)
۷۱.....	۳-۶-۶-۳- بورات (BORATE)
۷۲.....	۳-۶-۶-۴- تیتانیوم و زیرکونیوم (TITANIUM AND ZIRCONIUM)
۷۲.....	۳-۶-۶-۵- گوار
۷۳.....	۳-۷- سورفکتانت ویسکوالاستیک (VISCOELASTIC SURFACTANT)
۷۴.....	۳-۸- کاهنده های اصطکاک
۷۴.....	۳-۹- بازدارنده های خوردگی اسیدی
۷۴.....	۳-۱۰- تثبیت کننده های ویسکوزیته (VISCOSITY STABILIZERS)
۷۵.....	۳-۱۱- کنترل PH
۷۵.....	۳-۱۲- سورفاکتانت ها (SURFACTANTS)
۷۵.....	۳-۱۳- خصوصیات آزمایشگاهی سیالات شکافنده
۷۶.....	۳-۱۳-۱- مدل های رئولوژیکی
۷۷.....	۳-۱۳-۱-۱- سیال نیوتنی
۷۷.....	۳-۱۳-۱-۲- پلاستیک بینگهام
۷۷.....	۳-۱۳-۱-۳- سیال POWER LAW
۷۷.....	۳-۱۴- مواد و سیالات نگهدارنده
۷۸.....	۳-۱۴-۱- ماسه سیلیس
۷۹.....	۳-۱۴-۲- پروپانت با پوشش رزین

۷۹.....	۳-۱۴-۳- مواد سرامیکی مصنوعی
۸۰.....	۳-۱۴-۴- اسید های مورد استفاده در سازند های کربناته
۸۰.....	۳-۱۵- پارامتر های مخزنی/ بهره برداری تاثیر گذار در مهندسی عملیات شکافت هیدرولیکی
۸۱.....	۳-۱۵-۱- داده های مخزنی
۸۱.....	۳-۱۵-۲- داده های چاه و بهره برداری
۸۳.....	۳-۱۶- مبانی شکافت هیدرولیکی
۸۳.....	۳-۱۶-۱- فشار خالص
۸۵.....	۳-۱۶-۲- جریان پروپانت تزریقی
۸۶.....	۳-۱۷- آزمایش های قبل از عملیات شکاف هیدرولیکی
۸۶.....	۳-۱۷-۱- آزمایش تزریق مرحله ای
۸۷.....	۳-۱۷-۲- آزمایش PUMP-IN/DECLINE
۸۸.....	۳-۱۷-۳- آزمایش PUMP-IN/FLOW BACK
۸۸.....	۳-۱۷-۴- آزمایش MINI-FRAC یا (DATA-FRAC)
۸۸.....	۳-۱۸- آنالیز آزمایش های قبل از عملیات شکافت هیدرولیکی
۹۰.....	۳-۱۸-۱- روش های آنالیز برای محاسبه ی فشار شکست
۹۰.....	۳-۱۸-۱-۱- آنالیز نمودار $\sqrt{TIME}$
۹۰.....	۳-۱۸-۲- آنالیز G PLOT
۹۲.....	۳-۱۹- آنالیزهای پس از عملیات
۹۳.....	۳-۲۰- مشبک کاری در عملیات های شکافت هیدرولیکی
۹۴.....	۳-۲۰-۱- بازه ی مشبک کاری شده
۹۵.....	۳-۲۰-۲- قطر چاه و SPF
۹۶.....	۳-۲۱- مدل های توسعه یافته شکافت هیدرولیکی
۹۶.....	۳-۲۱-۱- مدل های یک بعدی و دو بعدی شکاف
۹۷.....	۳-۲۱-۲- مدل های شبه سه بعدی
۹۸.....	۳-۲۲- تطابق تاریخچه

۹۹.....	۲۳-۳- شبیه ساز لازم برای مدلسازی شکاف
۹۹.....	۳-۲۳-۱- نرم افزار TECHLOG
۱۰۰.....	۳-۲۴-۲- نرم افزار ABAQUS
۱۰۰.....	۳-۲۴-۳- نرم افزار GOHFER
۱۰۱.....	۳-۲۴-۴- نرم افزار FRAC PRO
۱۰۱.....	۳-۲۴-۵- نرم افزار FRAC CADE
۱۰۲.....	۳-۲۵- روش های تکمیل چاه در اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی
۱۰۲.....	۳-۲۶- استراتژی های تکمیل برای عملیات شکافت هیدرولیکی
۱۰۲.....	۳-۲۶-۱- رروش عملیات شکافت از داخل لوله جداری
۱۰۲.....	۳-۲۶-۲- تکمیل MONOBORE
۱۰۳.....	۳-۲۶-۳- عملیات شکافت از داخل لوله مغزی
۱۰۳.....	۳-۲۶-۴- عملیات شکافت از درون لوله مغزی با فضای حلقوی باز
۱۰۴.....	۳-۲۶-۵- روش تکمیل BAREFOOT
۱۰۴.....	۳-۲۶-۵-۱- روش های شکاف چند مرحله ای و انواع روش های تکمیل
۱۰۶.....	۳-۲۷- بررسی اقتصادی
۱۰۶.....	۳-۲۷-۱- هزینه های عملیات شکافت
۱۰۸.....	۳-۲۸- طراحی عملیات
۱۱۰.....	۳-۲۹- روش های پایش عملیات شکاف هیدرولیکی
۱۱۳.....	فصل چهارم: طراحی شکاف هیدرولیکی در چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز
۱۱۴.....	۴-۱- زمین شناسی میدان اهواز
۱۱۵.....	۴-۲- زون های مخزنی سازند ایلام و سروک در چاه مورد مطالعه
۱۱۷.....	۴-۲- عمق سر سازندها
۱۱۸.....	۴-۳- مدلسازی ژئومکانیکی
۱۱۸.....	۴-۳-۱- داده های مورد نیاز
۱۱۹.....	۴-۳-۲- تخمین پارامترهای ژئومکانیکی

۳-۳-۴- تعیین زون کاندید برای عملیات شکافت هیدرولیکی از نظر ژئومکانیکی	۱۲۱
۴-۴- شبیه سازی شکاف چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز	۱۲۶
۴-۴-۱- مقدمه	۱۲۶
۴-۵- مدل سازی تولید و ارزیابی شاخص PI قبل و بعد از طراحی شکاف هیدرولیکی چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز	۱۳۴
۴-۵-۱- مقدمه:	۱۳۴
۴-۵-۲- فلو چارت کلی ساخت و بهینه سازی مدل تولید	۱۳۵
۴-۶- ساخت مدل IPR	۱۳۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تاریخچه فناوری شکاف هیدرولیکی ۱۵
- شکل ۲-۱: تولید گاز طبیعی ایالات متحده از چاههای توسعه یافته با فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیارد فوت مکعب بر روز ۱۷
- شکل ۳-۱: گاز طبیعی تولید شده از چاهها با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون فوت مکعب بر روز ۱۸
- شکل ۴-۱: تولید گاز شیل ایالات متحده به تفکیک میادین گازی بر حسب میلیارد فوت مکعب در روز ۱۸
- شکل ۵-۱: تولید نفت ایالات متحده با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز ۱۹
- شکل ۶-۱: نفت تولید شده از چاههایی که با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز ۲۰
- شکل ۷-۱: تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته در کشور آمریکا در سال ۲۰۱۹ به تفکیک ماه ۲۱
- شکل ۸-۱: تعداد چاه های عمودی و افقی ایالت تگزاس در طی سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰ ۲۲
- شکل ۹-۱: میزان تولید، نیاز کشور و واردات نفت در کشور امریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ ۲۳
- شکل ۱۰-۱: میزان تولید، نیاز کشور و واردات گاز در کشور امریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ ۲۳
- شکل ۱۱-۱: تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ در روسیه ۲۴
- شکل ۱۲-۱: عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای انجام گرفته در مناطق مختلف روسیه از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۸ ۲۵
- شکل ۱-۳: ساختار ضخیم‌کننده‌های ویسکوالاستیک ۷۳
- شکل ۲-۳: مدل‌های رئولوژیکی ۷۶
- شکل ۳-۳: تاثیر سیال عملیات شکاف بر پارامترهای مختلف در طراحی ۸۲
- شکل ۴-۳: نمودار تغییرات فشار با زمان تزریق در حین عملیات ۸۵
- شکل ۵-۳: آزمایش STEP RATE ۸۷
- شکل ۶-۳: تغییرات فشار درون چاهی با زمان در طول تزریق عملیات شکاف هیدرولیکی ۸۹
- شکل ۷-۳: آنالیز فشار بسته شدن شکاف در روش G- PLOT ۹۱
- شکل ۸-۳: شروع شکاف از مشبک کاری هم راستا با سطح شکاف قابل ترجیح (حداکثر تنش افقی) ۹۴

- شکل ۳-۹: شروع شکاف با مشبک کاری با زاویه زیاد نسبت به سطح شکاف قابل ترجیح (حداکثر تنش افقی) ۹۴
- شکل ۳-۱۰: اثرات قطر شکاف و افت فشار در دهانه مشبک ها و نرخ تزریق ۹۶
- شکل ۳-۱۱: روند اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی (مراحل ۱۰ تا ۱۷ مراحل اصلی فرک را نشان می دهد). ۱۱۰
- شکل ۴-۱: موقعیت چاه شماره ۵۱۵ اهواز در نقشه همتراز عمقی بر مبنا مختصات LAMBERT ۱۱۴
- شکل ۴-۲: داده های مورد نیاز در طراحی شکافت هیدرولیکی. داده هایی که علامت تیک آبی دارد در طراحی شکافت هیدرولیکی چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز در دسترس بوده است. ۱۱۹
- شکل ۴-۳: روند انجام مطالعات ژئومکانیکی ۱۲۰
- شکل ۴-۴: نقشه خود سازماندهی خوشهها را برای چهار پارامتر انتخابی برای خوشه بندی ۱۲۲
- شکل ۴-۵: پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده برای خوشه بندی، خوشهها، زونهای تعیین شده و نمودار تنش افقی مینیمم به صورت پیوسته ۱۲۴
- شکل ۴-۶: نمودار اشباع آب - تخلخل با لحاظ خوشههای تعیین شده ۱۲۵
- شکل ۴-۷: فلوچارت کلی طراحی شکافت هیدرولیکی ۱۲۸
- شکل ۴-۸: توالی تزریق و نرخ های تزریق در برنامه پمپاژ سیالات ۱۳۰
- شکل ۹-۴: فوچارت کلی شبیه سازی مدل تولید چاه ۱۳۶
- شکل ۴-۱۰: نمودار عملکرد تولید و VLP چاه ۵۱۵ ۱۳۸

فهرست جداول

جدول ۱-۱: ارزیابی کیفی موفقیت آمیز بودن عملیات شکاف هیدرولیکی.....	۳۷
جدول ۱-۲: تعداد میادین بر حسب نوع و موقعیت.....	۴۳
جدول ۲-۲: مخازن حاوی اطلاعات برای میادین نفتی-خشکی (گروه ۱).....	۴۴
جدول ۳-۲: پارامترهای غربالگری در مقیاس میدان محور مورد استفاده در اجرای این غربالگری.....	۴۵
جدول ۴-۲: گروه بندی مخازن از نظر فنی.....	۴۶
جدول ۵-۲: گروه فنی ۱.....	۴۶
جدول ۶-۲: اولویت بندی مخازن.....	۴۷
جدول ۷-۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۱.....	۴۸
جدول ۸-۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۲.....	۴۸
جدول ۹-۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۳.....	۴۹
جدول ۱۰-۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۴.....	۴۹
جدول ۱۱-۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۵.....	۵۰
جدول ۱۲-۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۶.....	۵۱
جدول ۱۳-۲: مقایسه ی نتایج الگوریتم فازی و تصمیم گیری کیفی.....	۵۲
جدول ۱-۳: سیالات گوناگون که برای شکافت هیدرولیکی استفاده می‌شود.....	۶۴
جدول ۲-۳: انواع مواد افزودنی سیالات شکافنده (FRACTURING FLUID ADDITIVES).....	۶۶
جدول ۳-۳: انواع روش های تکمیل چاه.....	۱۰۵
جدول ۱-۴: میانگین خصوصیات پتروفیزیکی در زون های مختلف مخزن ایلام و سروک در چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز.....	۱۱۶
جدول ۲-۴: عمق سر سازندهای حفاری شده در چاه شماره ۵۱۵.....	۱۱۷
جدول ۳-۴: پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده در خوشه بندی، میانگین هر پارامتر در خوشه های مختلف.....	۱۲۲
جدول ۴-۴: بهینه سازی حجم تزریقی.....	۱۳۳
جدول ۵-۴: خلاصه وضعیت چاه ۵۱۵ قبل و بعد از انجام شکاف هیدرولیکی.....	۱۳۹

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- معرفی فناوری

شکافت هیدرولیکی یکی از روش های تحریک چاه است که در آن، سنگ مخزن با تراوایی کم توسط فشار سیال شکسته می شود و به این ترتیب ارتباط مخزن و چاه بهبود یافته و از طریق آن گاز طبیعی و نفت آزادانه تر جریان می یابد. امروزه این روش، نقش مهمی در افزایش و حفظ تولید از چاه های نفت و گاز و همچنین در توسعه ذخائر هیدروکربنی متعارف و نامتعارف 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.

۱-۲- تاریخچه و سیر تحول فناوری

تاریخچه فناوری شکافت هیدرولیکی را می توان 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

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. ریشه فناوری شکافت هیدرولیکی را می توان به دهه ۱۸۶۰ نسبت داد چرا که در آن زمان، نیتروگلیسرین برای تحریک چاه های کم عمق در سنگ های سخت پنسیلوانیا، نیویورک، کنتاکی و ویرجینیای غربی مورد استفاده قرار می 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. 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

^۱ Edwin Drake

^۲ Pennsylvania

^۳ Floyd Farris

^۴ Stanolind Oil

^۵ Hugoton Gas Field

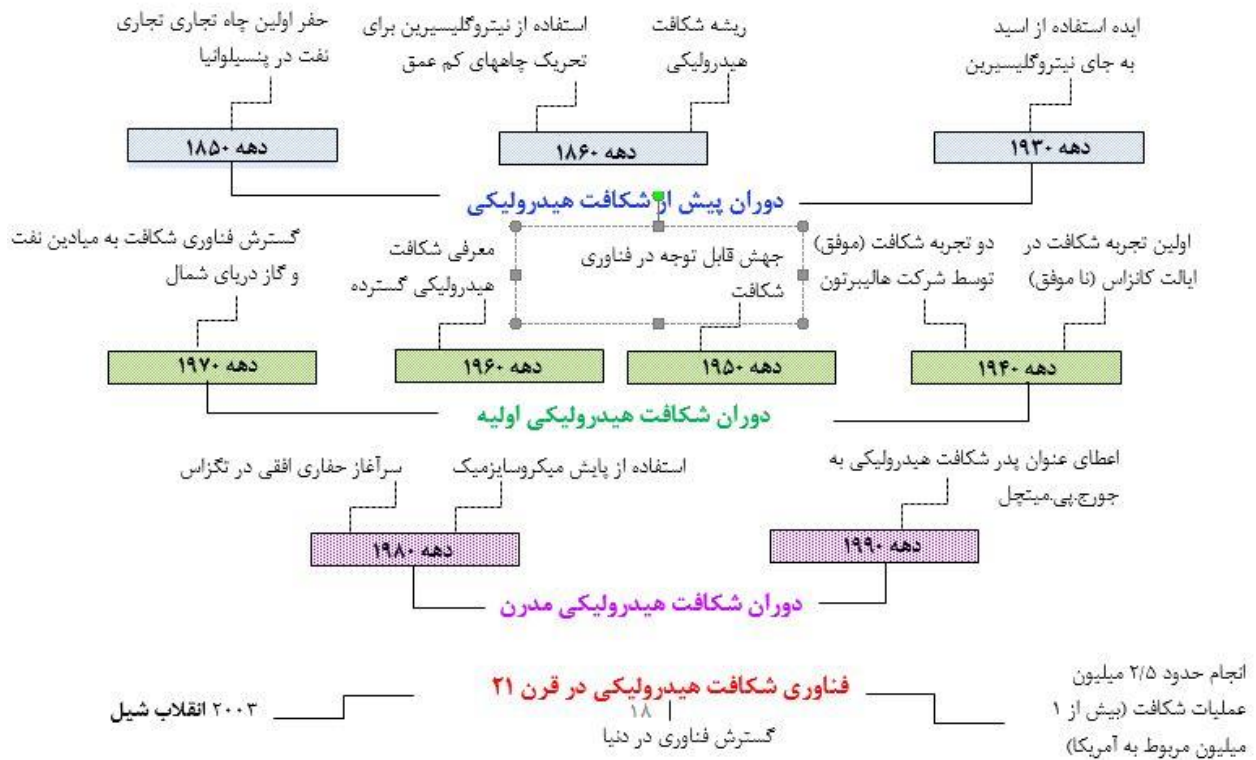
^۶ Kansas

فناوری شکافت هیدرولیکی نامید. در ادامه دوران شکافت هیدرولیکی مدرن (دهه ۲۰۰۰-۱۹۸۰) در دهه ۱۹۸۰ سرآغاز حفاری افقی در تگزاس بود چرا که قبل آن چاه‌های افقی نفت و گاز تا حدودی نا شناخته بودند. 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 میکروسایزیمیک^۱ 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. فناوری شکافت هیدرولیکی در قرن بیست و یکم (اوایل دهه ۲۰۰۰) در واقع آغاز شکاف هیدرولیکی به معنا امروزی بود. در این دهه ترکیب تکنیک‌های حفاری افقی، پایش میکروسایزیمیک و عملیات های شکافت هیدرولیکی با Slick Water شروع شد. خلاصه تاریخچه فناوری شکافت هیدرولیکی در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.

^۱ Microseismic

^۲ سیالی است که در شکافزنی هیدرولیکی استفاده شده و قسمت عمده آن (۹۸ درصد) آب بوده و باقی آن افزودنی‌هایی که باعث افزایش سرعت جریان سیال و انتقال ماسه از طریق چاه و درون سازند می‌شوند، می‌باشد

تاریخچه فناوری شکافت هیدرولیکی در یک نگاه



شکل ۱-۱: تاریخچه فناوری شکاف هیدرولیکی

۱-۳- داده های آماری فناوری شکاف هیدرولیکی

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 مبادین 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. بر اساس داده های موجود کشورهایی که عملیات شکاف هیدرولیکی اجرا می کنند در جدول ۱-۱ لیست شده است.

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

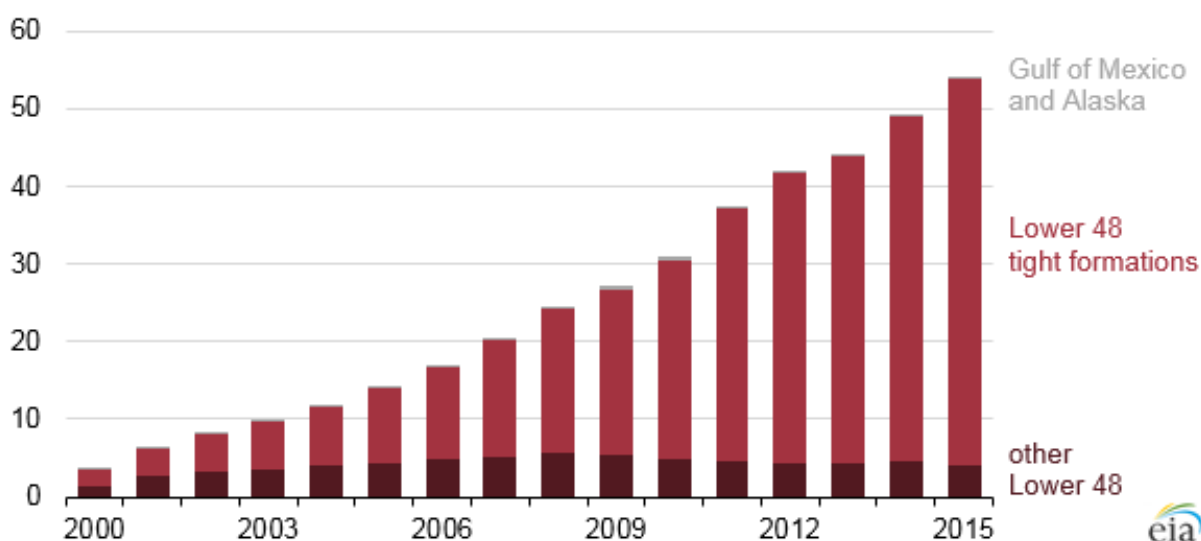
ردیف	کشور	ردیف	کشور	ردیف	کشور
۱	ایالات متحده آمریکا	۶	فرانسه	۱۱	اوکراین
۲	کانادا	۷	ایرلند	۱۲	رومانی
۳	روسیه	۸	آلمان	۱۳	آفریقای جنوبی
۴	چین	۹	نیوزیلند	۱۴	عربستان
۵	استرالیا	۱۰	هلند	۱۵	هند

۱-۳-۱- آمار تولید مرتبط با فناوری شکاف هیدرولیکی در کشورهای مختلف

کشور آمریکا یکی از بزرگترین تولیدکنندگان نفت و گاز به وسیله فناوری شکافت هیدرولیکی است. بر طبق گزارش مدیریت اطلاعات انرژی ایالات متحده 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 می شده است. تا سال ۲۰۱۵ تعداد چاههایی که با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی توسعه یافته اند 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 می دهد.

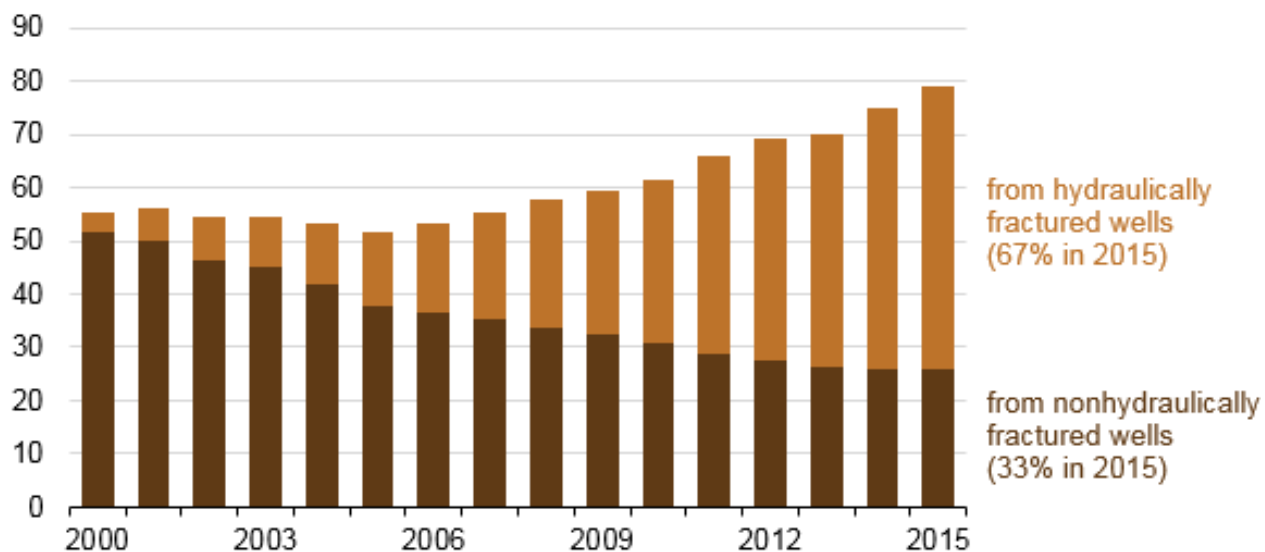
¹ Energy Information Administration

سازندهای شیلی یکی از کاندیدهای اصلی برای عملیات شکاف هیدرولیکی می باشد. نمودارهای زیر نشان می دهند که با توسعه فناوری شکافت هیدرولیکی در این بازه ۱۵ ساله میزان گاز تولیدی با این فرآیند ۱۴ برابر شده است. همچنین نمودارهای ۱-۲ الی ۱-۴ نشان دهنده افزایش تدریجی چاه های شکافته شده در طی این سال ها می باشد بطوریکه در سال ۲۰۱۵ ۶۷٪ کل چاه های گازی با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی تکمیل شده اند.



شکل ۱-۱: تولید گاز طبیعی ایالات متحده از چاه های توسعه یافته با فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب

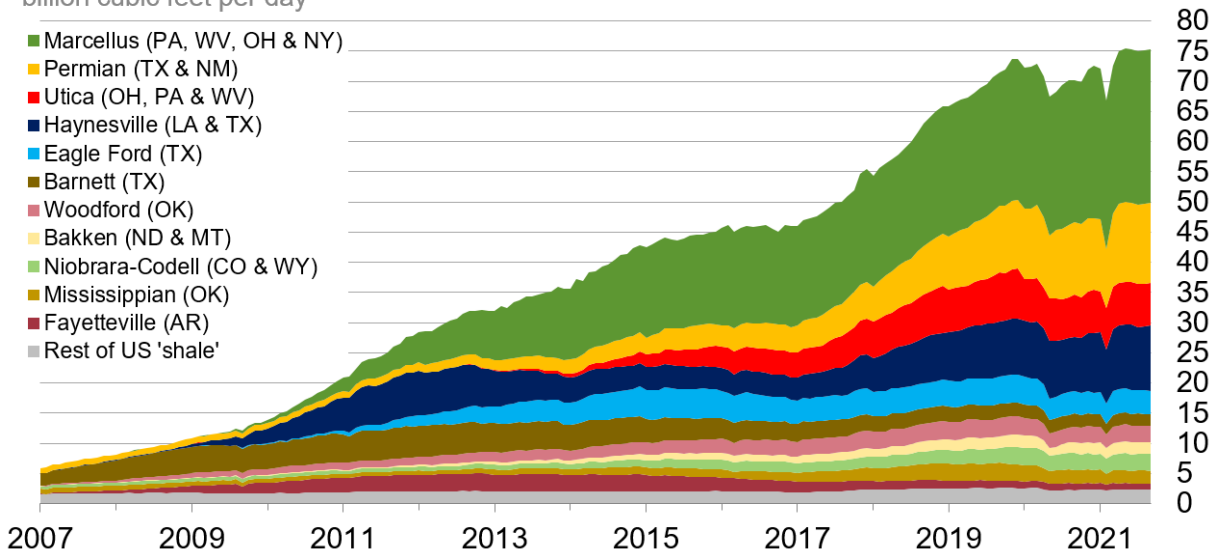
میلیارد فوت مکعب بر روز



شکل ۱-۲: گاز طبیعی تولید شده از چاه‌ها با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون فوت مکعب بر روز

Monthly dry shale gas production

billions of cubic feet per day

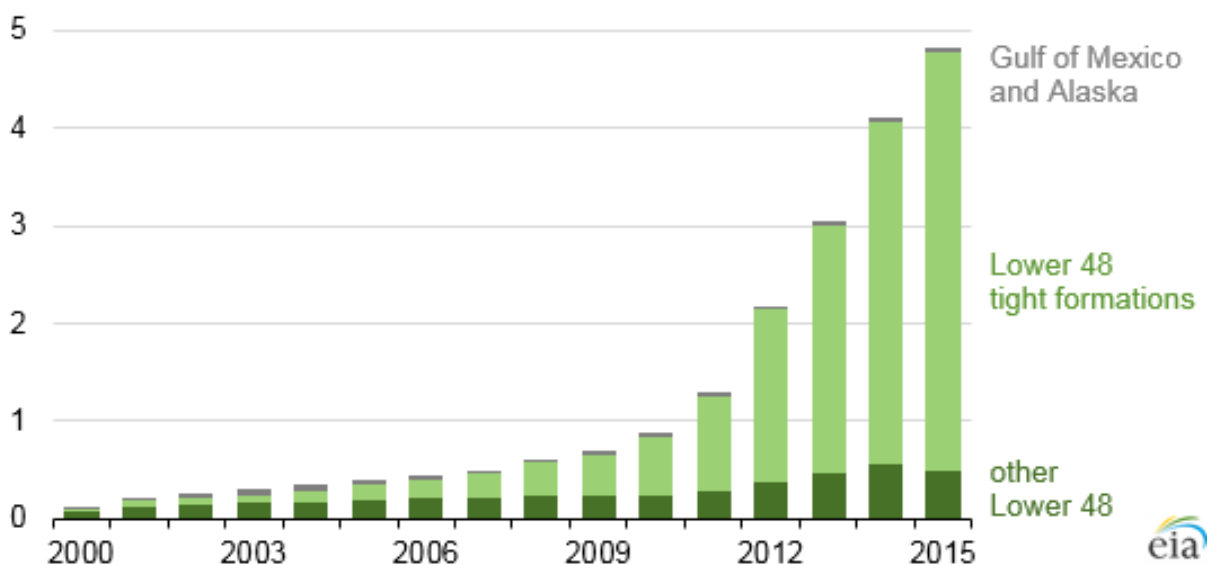


Source: Graph by the U.S. Energy Information Administration (EIA) based on state administrative data collected by Enverus. Data are through September 2021 and represent EIA's official tight gas estimates, but are not survey data. State abbreviations indicate primary state(s).

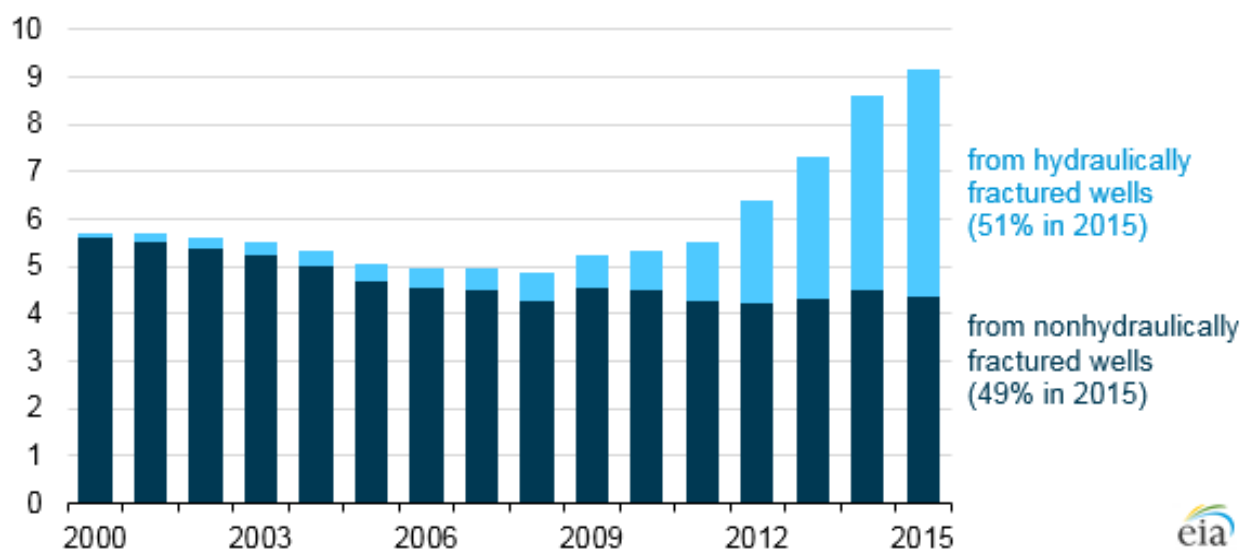
Note: Improvements to play identification methods have altered production volumes of between various plays.

شکل ۱-۳: تولید گاز شیل ایالات متحده به تفکیک میدان‌های گازی بر حسب میلیارد فوت مکعب در روز

همان گونه که در شکل ۵-۱ 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 ۴-۱ و شکل ۵-۱).

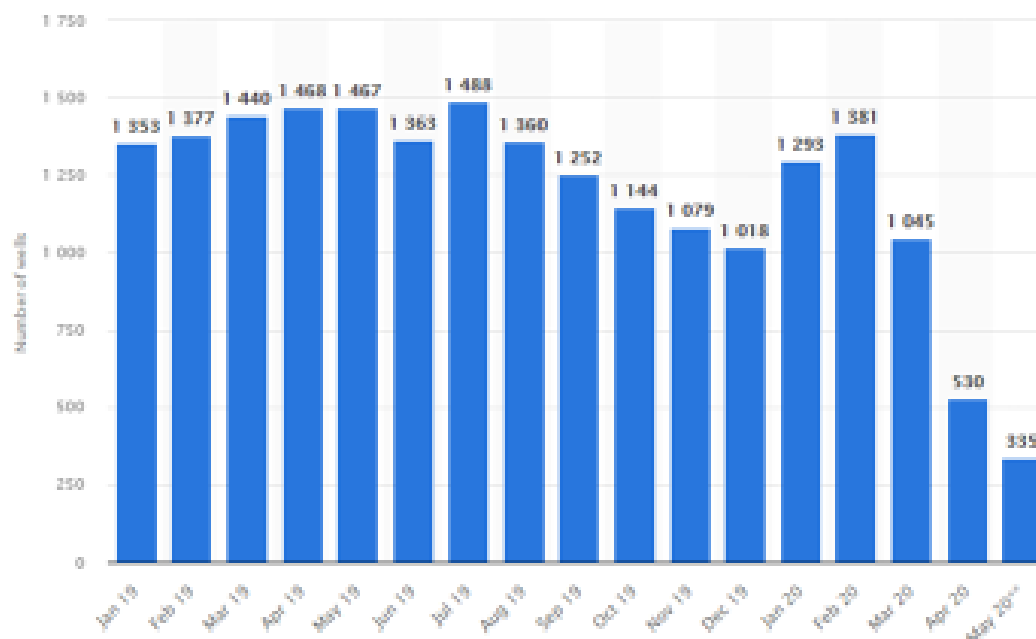


شکل ۴-۱: تولید نفت ایالات متحده با استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز



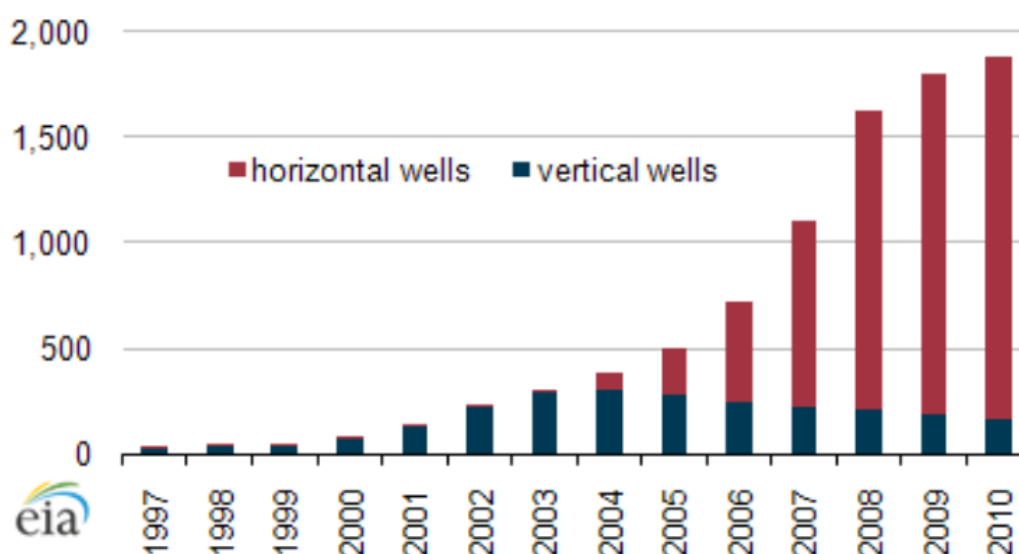
شکل ۵-۱: نفت تولید شده از چاه‌هایی که با و بدون استفاده از فناوری شکافت هیدرولیکی به تفکیک سال بر حسب میلیون بشکه در روز

جزئیات آمار مربوط به عملیات شکاف هیدرولیکی به تفکیک ماه از ژانویه ۲۰۱۹ تا ماه می ۲۰۲۰ به تفکیک در شکل ۷-۱ 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 ۱-۷: تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته در کشور آمریکا در سال ۲۰۱۹ به تفکیک ماه

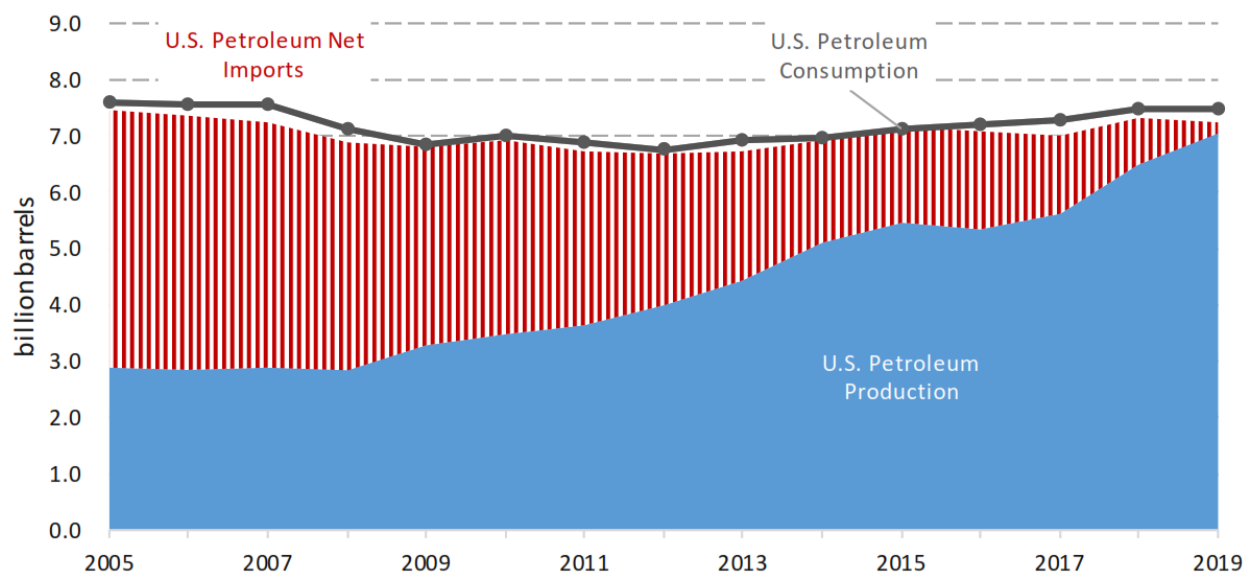
با توجه به اینکه گسترش فناوری شکافت هیدرولیکی با گسترش حفاری‌های افقی عجین بوده است تعداد و گسترش چاه‌های افقی در مقایسه با چاه‌های عمودی در ایالت تگزاس به عنوان بزرگترین ایالت تولید کننده در آمریکا در شکل ۱-۸ نشان داده شده است. افزایش تعداد چاه‌های افقی از سال ۲۰۰۰ شروع شده و با سرعت زیادی رو به رشد 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.



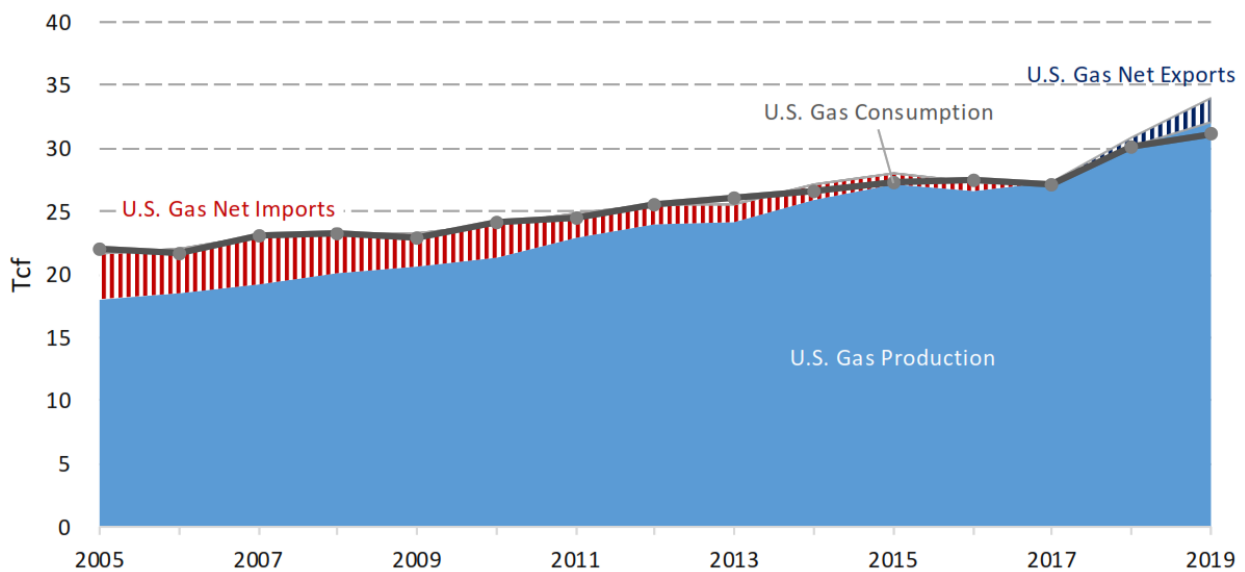
Source: U.S. Energy Information Administration based on HPDI, LLC

شکل ۸-۱: تعداد چاه های عمودی و افقی ایالت تگزاس در طی سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰

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 ۱-۱) 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 ۱-۱۰). این در حالی 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.

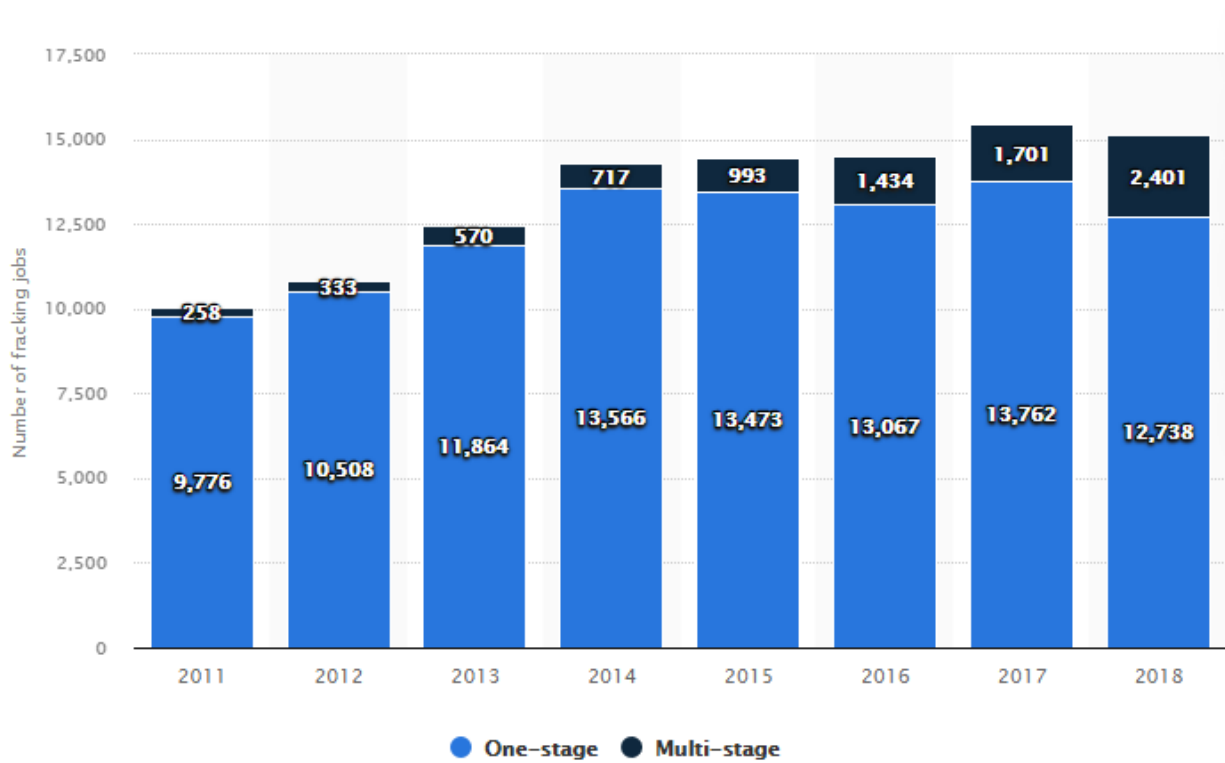


شکل ۹-۱: میزان تولید، نیاز کشور و واردات نفت در کشور آمریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹

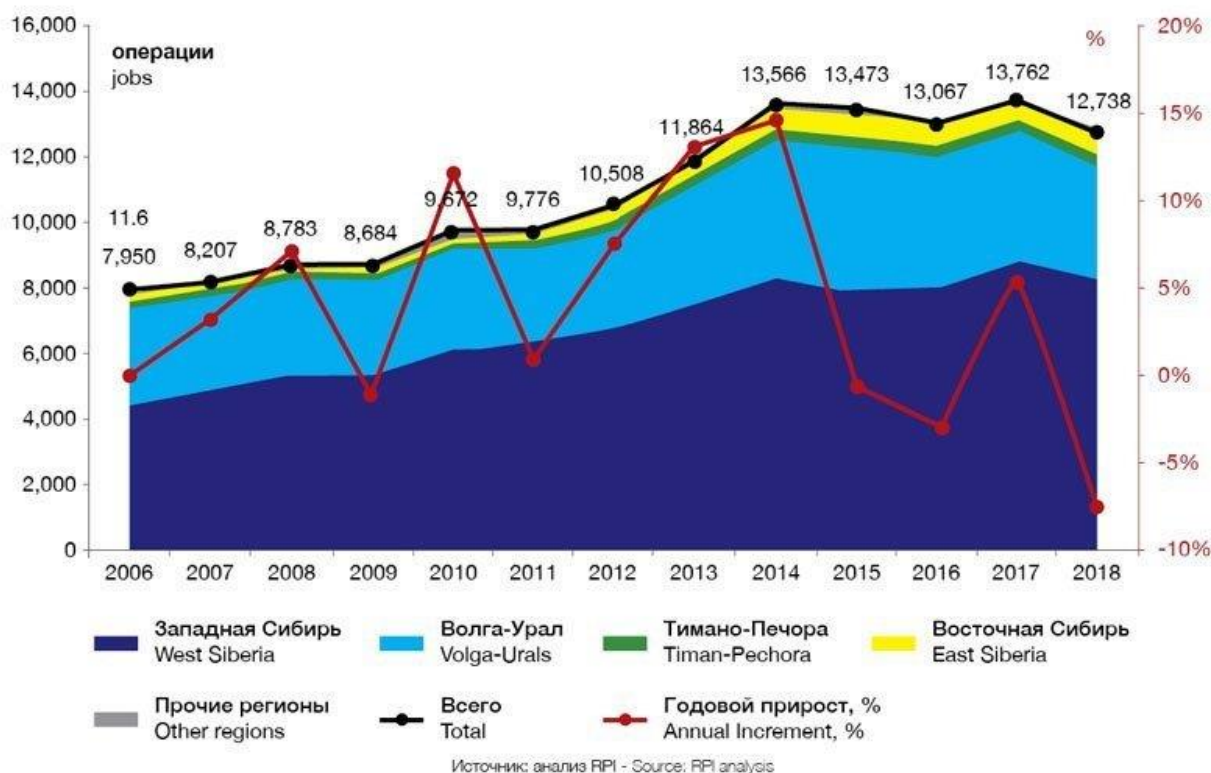


شکل ۱۰-۱: میزان تولید، نیاز کشور و واردات گاز در کشور آمریکا طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹

در کشور های دیگری مانند روسیه عملیات شکاف هیدرولیکی انجام شده است و روز به روز آمار این عملیات در حال افزایش است که در شکل های ۱۱-۱ و ۱۲-۱ نمودارهای آن نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: تعداد عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ در روسیه
[\(https://www.statista.com/\)](https://www.statista.com/)



شکل ۱-۱۲: عملیات شکافت هیدرولیکی تک مرحله‌ای انجام گرفته در مناطق مختلف روسیه از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۸

۴-۱- تجربیات گذشته عملیات شکاف هیدرولیکی در ایران

۴-۱-۱- شکاف اسیدی در میدان نفتی آذر

میدان نفتی آذر در شمال شرقی میدان چشمه خوش واقع و یکی از مخازن مشترک با کشور عراق (بدرا) به شمار می‌آید. در سال ۲۰۰۴ میلادی پس از انجام تست‌های بهره‌دهی در لایه‌های مختلف چاه شماره ۲ توسط شرکت HYDRO و اثبات وجود هیدروکربون، توسعه میدان از نظر اقتصادی توجیه پذیر تشخیص داده شد. در مخازن هیدروکربنی که سنگ مخزن آنها دارای نفوذپذیری بسیار پایینی می‌باشد روش‌های شکاف اسیدی و هیدرولیکی به عنوان روشی موثر جهت افزایش بهره‌دهی چاه اجرا می‌گردد. جنس سنگ مخزن تعیین‌کننده‌ی روش شکست مناسب در یک مخزن هیدروکربنی می‌باشد، در مخازن کربناته به دلیل حلالیت سنگ کربنات در اسید،

روش شکاف اسیدی جهت بالا بردن بهره دهی چاه استفاده می گردد. هدف از عملیات شکاف اسیدی بالا بردن نفوذپذیری سنگ مخزن با ایجاد شکاف های مصنوعی در طول سنگ مخزن می باشد. سیال شکاف اسیدی با توجه به دارا بودن درصد قابل توجهی اسید با فشاری بالاتر از فشار شکست سنگ مخزن به داخل سنگ مخزن تزریق می گردد و پس از شکست سنگ، شکاف های مصنوعی در طول سنگ مخزن ایجاد می کند. اسید موجود در سیال شکاف اسیدی با ایجاد خوردگی های نامنظم بر روی سطوح شکست باعث می شود که شکاف ایجاد شده پس از اتمام عملیات تزریق مجدداً مسدود نگردد و مسیری مناسب برای عبور هیدروکربن موجود در سنگ مخزن ایجاد می نماید.

به منظور اجرای عملیات مذکور پس از بررسی های کامل و با توجه به امکانات موجود تصمیم به انجام عملیات در چاه های میدان گرفته شد. عملیات شکافت اسیدی در سه حلقه از چاهها آذر ۳، ۴ و ۱۱ انجام گرفت که به دلیل عدم تحقق دبی مورد نظر از هر عملیات و همچنین مشکلات موجود در جداسازی لایه های مخزنی و انجام شکاف اسیدی به صورت مجزا در هر لایه، سایر چاههای تولیدی با استفاده از روش اسیدکاری گسترده برای بهره برداری آماده گردند.

۱-۴-۲- مطالعات ژئومکانیک پروژه شکاف اسیدی میدان نفتی آذر

در برنامه ریزی و اجرای عملیات شکاف هیدرولیکی/اسیدی، مطالعات ژئومکانیک از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. ساخت مدل مکانیکی زمین به عنوان خروجی مطالعات ژئومکانیک، امکان مطالعه و امکان سنجی اجرای عملیات شکاف هیدرولیکی/اسیدی را فراهم می نماید. در پروژه شکاف اسیدی میدان نفتی آذر، مطالعات ژئومکانیک به عنوان پیش نیاز اجرای این عملیات برنامه ریزی و اجرا گردید. برای توسعه این مدل از داده های مختلف میدانی و آزمایشگاهی مانند داده های لاگهای پتروفیزیکی، اطلاعات مربوط به حفاری، داده های زمین شناسی، داده های مخزنی و نتایج حاصل از تست های آزمایشگاهی ژئومکانیک استفاده گردید. در واقع توسعه یک مدل مکانیکی قابل اطمینان منوط به در اختیار داشتن داده های مذکور می باشد.

انجام نمودارگیری‌های پیشرفته مانند لاگهای FMI و DSI نیز در چاههای این میدان انجام شد. در مرحله اول مدل مکانیکی میدان نفتی آذر با استفاده از داده‌های لاگهای پتروفیزیکی توسعه داده شد (مدل مکانیکی دینامیک). به منظور کالیبراسیون مدل مکانیکی دینامیک و تبدیل آن به مدل مکانیکی استاتیک، آزمایشهای ژئومکانیکی بر روی مغزه‌های دو حلقه از چاههای میدان، برنامه‌ریزی و اجرا گردید. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و اطلاعات موجود از تستهای مینی فرک در چاه شماره ۲ میدان، مدل مکانیکی ساخته شده کالیبره گردید. خروجی اصلی این مدل در عملیات شکاف اسیدی، راستا و اندازه تنشهای برجا و همچنین فشار شکست سازند در نواحی مختلف مخزنی می‌باشد.

۱-۴-۳- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره AZR-003

چاه شماره ۳ یکی از چاه‌های توسعه ای میدان نفتی آذر با عمق نهایی ۴۶۵۳ متر بوده که در اردیبهشت ماه ۱۳۹۵ حفاری و تکمیل شده است. طبق برنامه انجام عملیات شکاف اسیدی و آزمایش‌های بهره برداری در هر لایه به ترتیب مراحل زیرآغاز گردید:

۱. مشبک کاری لایه مخزنی سروک پایینی برای انجام عملیات شکاف اسیدی
۲. انجام عملیات شستشو و تزریق پذیری با اسید با ابزار لوله مغزی
۳. انجام عملیات آزمایش چاه قبل از عملیات شکاف اسیدی
۴. انجام عملیات Data Frac قبل از عملیات شکاف اسیدی جهت کسب اطلاعات از شکست سازند
۵. انجام عملیات شکاف اسیدی
۶. تمیز سازی چاه بعد از عملیات شکاف اسیدی و آزمایش چاه

شرح عملیات

پس از مشبک کاری لایه انتخابی سروک پایینی، عملیات شکاف اسیدی با تزریق ۱۶۰۰ بشکه اسید با فشار سطحی حداکثر ۸۲۰۰ پام با موفقیت انجام گردید. بعد از تمیز سازی چاه، دبی جریان بر روی کاهنده با اندازه‌های مختلف

اندازه‌گیری شد. بیشترین دبی تولیدی در این مرحله روی کاهنده ۴۴/۶۴ به میزان ۵۲۰۰ بشکه در روز گزارش شده است. بررسی اولیه و آنالیز فشار درون چاهی در مرحله ساخت فشار (Build Up) در این لایه نشان می دهد که شاخص تولید (PI) قبل از عملیات شکاف اسیدی برابر با ۱ STBD/PSI بوده که بعد از انجام عملیات شکاف اسیدی به مقدار ۴,۰۴ STBD/PSI افزایش یافته است که نشان دهنده بهبود وضعیت تولید و موفقیت آمیز بودن عملیات شکاف اسیدی می باشد.

پس از اتمام عملیات شکاف اسیدی در لایه سروک پایینی و نصب پلاگ ماسه ای جهت جداسازی سروک پایینی، به صورت مشابه عملیات شکاف اسیدی در لایه سروک بالایی انجام شد. نتایج قبل و بعد از عملیات شکاف اسیدی در این لایه نشان می دهد که مقدار ضریب پوسته بعد از عملیات شکاف اسیدی به ۵,۸- کاهش پیدا کرده است.

نتایج حاصل از مدل سازی چاه بر اساس داده های آزمایش چاه سطحی و نمودار نگار تولید نشان می دهد که شاخص تولید (PI) برای این چاه برابر با ۵,۶ STBD/PSI می باشد. پس از انجام کلیه آزمایش های بهره برداری، چاه مذکور با فشار سرچاهی ۱۴۰۰ پام در مدار تولید قرار گرفته است.

۱-۴-۴- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره AZR-011

چاه شماره ۱۱ پس از اتمام حفاری تا عمق ۴۷۲۲ متر، عملیات تکمیل این چاه با راندن لاینر ۵ اینچ به اتمام رسید. طبق برنامه انجام عملیات شکاف اسید و آزمایش های بهره برداری به ترتیب مراحل زیر آغاز گردید.

- جابجایی سیال درون چاهی با آب توسط لوله مغزی سیار
- انجام عملیات مشبک کاری زیر لایه F سروک پایینی
- اسید شویی بازه ی مشبک کاری شده و انجام تست Mini Frac با سیال Linear Gel
- چاه آزمایی قبل از عملیات شکاف اسیدی
- انجام عملیات Data Frac قبل از عملیات اصلی جهت کسب اطلاعات

- مشبک کاری زیر لایه مخزنی D
- نصب پلاگ سیمانی بین لایه های مشبک کاری شده F & D
- انجام عملیات Data Frac به منظور کسب اطلاعات
- تمیز سازی چاه بعد از عملیات شکاف اسیدی و چاه آزمایشی بعد از شکاف اسیدی
- رفع پلاگ سیمانی و مشبک کاری و اسید کاری لایه سروک بالایی
- چاه آزمایشی بعد از اسید کاری

پس از مشبک کاری لایه انتخابی F و ارزیابی نتایج حاصل از آزمایش Mini Frac، تصمیم به مشبک کاری زیر لایه D سروک پایینی گرفته که با ارزیابی نتایج حاصل از آزمایش Mini Frac تزریق پذیری لایه مذکور تایید گردید. در این مرحله به منظور کاهش نشتی اسید بین دو لایه مشبک شده، با نصب پلاگ سیمانی لایه پایینی از لایه پایینی جدا شد. سپس انجام عملیات شکاف اسیدی با بالابردن فشار شکست مخزن تا فشار ۷۸۰۰ پام با موفقیت انجام پذیرفت. بعد از انجام عملیات شکاف اسیدی در این لایه و تمیز سازی چاه، نرخ تولید با کاهنده با سایز های مختلف اندازه گیری شد. بررسی اولیه و آنالیز فشار درون چاهی در مرحله ساخت فشار (Build Up) در این لایه نشان می دهد که ضریب عملکرد تولید (PI) قبل از عملیات شکاف اسیدی برابر با ۰,۱۷ STBD/PSI بوده که بعد از انجام عملیات شکاف اسیدی به مقدار ۲,۶ STBD/PSI یافته که نشان دهنده بهبود وضعیت تولید می باشد. پس از انجام کلیه آزمایش های بهره بردای، چاه مذکور با فشار سرچاهی ۱۵۵۰ پام در مدار تولید قرار گرفته است.

۱-۴-۵- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره AZR-004

چاه شماره AZR-004 به عنوان آخرین چاه جهت انجام عملیات شکاف اسیدی در میدان آذر انتخاب گردید. چاه مذکور یکی از چاه های توسعه ای میدان نفتی آذر با عمق نهایی ۴۷۳۹ متر بوده که انجام عملیات شکاف اسید و آزمایش های بهره برداری در این چاه به ترتیب مراحل زیر آغاز گردید:

(۱) مشبک کاری لایه مخزنی سروک پایینی برای انجام عملیات شکاف اسیدی

(۲) انجام عملیات شستشو با اسید با ابزار لوله مغزی

(۳) اضافه کردن لایه ۱۰ متری جهت انجام عملیات شکاف اسیدی

(۴) عملیات شستشو با اسید و تزریق نیتروژن با ابزار لوله مغزی سیار

(۵) عملیات Data Frac قبل از عملیات اصلی جهت کسب اطلاعات

(۶) انجام عملیات شکاف اسیدی

(۷) تمیز سازی چاه بعد از عملیات شکاف اسیدی و چاه آزمایی بعد از شکاف اسیدی

(۸) مشبک کاری لایه های باقیمانده و شستشو با اسید و چاه آزمایی

(۹) اسید کاری لایه های مشبک کاری شده

شروع عملیات شکاف اسیدی ابتدا در اولین لایه هدف با انجام آزمایش Mini Frac جهت کسب اطلاعات فشار شکست و نرخ تزریق پذیری آغاز شد که به علت پایین بودن نرخ تزریق پذیری ، ۱۰ متر دیگر از لایه مخزنی به لحاظ ویژگی های پترو فیزیکی جهت انجام آزمایش تزریق پذیری و ایجاد عملیات شکست جایگزین گردید. پس از انجام آزمایش تزریق پذیری، مقدار ۵۰ بشکه سیال linear Gel به همراه ۳۵۰ بشکه سیال (X-Linked PAD) به منظور ایجاد شکاف تزریق و متعاقب آن چندین مرتبه اسید به مجموع ۲۰۰۰ بشکه به منظور ایجاد خوردگی در سطوح شکاف ایجاد شده تزریق گردید. نتایج حاصل از چاه آزمایی بعد از انجام عملیات شکاف اسیدی در این چاه نشان می دهد که میانگین تراوایی برابر با ۰,۹ میلی داری و ضریب عملکرد تولید (PI) برابر با ۰,۶۳ STBD/PSI درحالی که پیش از انجام عملیات شکاف اسیدی هیچ تولیدی از لایه مشبک کاری شده حاصل نشده است.

بعد از انجام کلیه عملیات های اسیدکاری و چاه آزمایی به منظور بررسی وضعیت مشارکت در تولید لایه های اسیدکاری شده نمودار نگار تولید (PLT) رانده شده که نتایج مربوطه حاکی از تولید بیش از ۶۰ درصد از لایه سروک پایینی (لایه شکاف اسیدی) و مابقی از لایه سروک بالا تولید دارد. پس از انجام عملیات شکاف اسیدی در لایه سروک پایینی با

تغییر شرح کار عملیات، لایه سروک بالایی مشبک کاری و تحت انجام عملیات اسید کاری قرار گرفت. پس از انجام کلیه آزمایش های بهره بردای، چاه مذکور جهت تولید آماده بهره برداری گردید.

۱-۴-۶- شکاف اسیدی در میدان نفتی سیری

منطقه سیری شامل چهار میدان در جنوب غربی و جنوب شرقی خلیج فارس قرار دارند. مخزن ایلام در میدان الوند واقع در منطقه سیری قرار دارد. فشار اولیه مخزن ۳۴۵۰ پام بوده و تخلخل ۵ تا ۲۰ درصد و نفوذپذیری ۱ تا ۳ میلی داری را دارا می باشد. طبق مطالعات صورت گرفته در این مخزن، بدلیل عدم وجود آبران و نفوذپذیری کم و ... اجرای عملیات شکاف اسیدی در دستور کار قرار گرفته است. از میان ۱۰ چاه موجود این میدان، چاه DPH-۰۲ به علت دور بودن چاه از دو گسل اصلی مخزن و تکمیل حفره باز به عنوان چاه منتخب برای انجام عملیات شکاف اسیدی در نظر گرفته شد. این مخزن دارای ضخامت متوسط ۳۰ متر می باشد که لایه شیلی پایده گورپی در بالا و لایه ای شیل در پایین این مخزن قرار گرفته است. بیشترین نگرانی در اجرای عملیات شکاف اسیدی در لایه های پایده گورپی و لافان می باشد که در صورت شکست لایه ها، ارتباط با لایه های بالایی و پایینی مخزن برقرار می گردد و موجب ورود آب و یا شیل موجود در لایه های پوششی به درون مخزن و متعاقبا منجر به پدیده SWELLING شیل و از دست دادن بخشی از مخزن را فراهم می سازد.

۱-۴-۷- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه شماره DPH-02

چاه DPH-02 یک چاه افقی از نوع حفره باز است. حفاری این چاه بالای سازند ایلام تا عمق حدود ۲۰۰۰ متری انجام شده سپس به صورت افقی تا عمق ۴۵۵۰ mMD تکمیل شده است. طبق برنامه عملیات شکاف اسیدی در نظر گرفته شده برای این چاه، رشته ی تکمیلی ۳,۵ اینچی جهت کاهش افت فشار اصطحاکاکی با قطر ۵ اینچ جایگزین گردید. آخرین داده های تولید این چاه قبل از انجام شکاف هیدرولیکی نشان می دهد که این چاه با دبی حدود ۱۶۵۰ بشکه در روز با فشار سطحی ۲۰۰ پام تولید داشته است. انجام عملیات شکاف اسید و آزمایش های بهره برداری در این چاه به ترتیب مراحل زیرآغاز گردید:

- طبق برنامه پمپاژ Data Frac انجام شد.
- شیر اصلی SLB را ببندید و فشار دهید تا زمانی که شکستگی بسته شود نظارت کنید و سپس آن را کامل کنید.
- تجزیه و تحلیل تست با داده های جدید انجام شد
- انجام عملیات شکاف اسیدی اصلی با فشار حداکثر ۳۶۰۰ پام و تزریق حدود ۴۰۰۰ بشکه اسید و سیال شکاف
- ارزیابی وضعیت تولید

بعد از انجام عملیات شکاف طبق گزارش های ارائه شده، دبی تولید حدود ۱۵۳۰ بشکه با فشار سطحی ۲۳۰ پام اندازه گیری شده که نشان دهنده ی عدم تغییر در افزایش تولید این چاه دارد. فشار چاه مذکور بعد از گذشت مدتی از تولید افت کرده که کاندید در نظر گرفتن پمپ ESP شد و به مدت حدود ۲ سال با نرخ متغیر ۱۲۰۰ بشکه در روز تولید داشته است.

۱-۴-۸- خلاصه گزارش عملیات شکاف اسیدی در چاه اکتشافی SIA-01

نخستین چاهی که در میدان الوند حفاری و مورد اسید شکافی قرار گرفته است، چاه اکتشافی SIA-01 می باشد. چاه از نوع Vertical Cased Hole و Perforated بوده و اسید شکافی تقریباً در امتداد موازی با افق مخزن در بهترین قسمت بخش بالائی مخزن ایلام در این میدان به اجرا در آمده است. پیش از آزمایش، عملیات تحریک چاه با اسید ۱۵% HCL بمنظور تمیز سازی ناحیه نزدیک به چاه انجام شده است. در خلال آزمایش، دبی چاه برابر ۳۰۰ بشکه در روز با فشار جریانی سرچاه برابر ۲۰۰ پام بدست آمده است. عملیات اسید شکافی با ۲۸% HCL باحجم ۳۰۰ یشکه اجرا شد و بمنظور افزایش عمق تأثیر اسید قبل و بعد از تزریق آب دریا تزریق شده است. مقدار دبی چاه با فشار جریانی سرچاه حدود ۲۰۰ psia برابر ۱۰۵۶ بشکه در روز بدست آمد. نتیجه اینکه اسید شکافی مزبور عملاً توان تولیدی چاه را ۳٫۵ برابر نموده است. ارزیابی چاه آزمائی قبل و بعد از شکاف اسیدی، مقدار اثر پوسته را به ترتیب ۰٫۳ و ۳٫۳- برآورد کرده است. با توجه به تغییر ناچیز تراوایی متوسط طی عملیات اسید شکافی (از ۲/۵ به ۳/۱ md)، به نظر میرسد اصلی ترین اهداف شکاف

اسیدی یعنی انتشار شکاف مصنوعی ایجاد شده به خوبی محقق نشده و مهمترین عامل افزایش ضریب بهره دهی چاه کاهش ضریب پوسته می تواند باشد.

۱-۴-۹- نتیجه گیری:

جهت بررسی عملکرد عملیات های شکاف اسیدی انجام گرفته، نیازمند تعریفی واحد از موفقیت می باشیم. لذا به منظور ارزیابی یک سری تعریف کلی از نظر شاخص موفقیت در این بررسی مطرح و در انتهای عملیات های انجام گرفته به صورت موردی مورد ارزیابی قرار می گیرند.

- شاخص موفقیت از نظر طراحی مهندسی شکاف
- شاخص موفقیت از نظر انتخاب و آزمایش سیالات شکاف
- شاخص موفقیت از نظر فرایند اجرای عملیات
- شاخص موفقیت از نظر بهبود وضعیت تولید
- شاخص موفقیت از نظر حفظ یکپارچی چاه
- شاخص موفقیت از نظر تداوم تولید

۱-۴-۱۰- شاخص موفقیت از نظر طراحی مهندسی شکاف

در هردو میدان از شبیه ساز های تجاری از نوع Frac-CAD , Frac-PRO برای شبیه سازی هندسه ی شکاف، حجم سیالات و نرخ تزریق استفاده شد. طبق گزارش های اعلام شده در هر دو نمونه ی شکاف اسیدی انجام شده در ایران آزمایش های قبل از عملیات اصلی شکاف، شامل Mini-frac و Step rate جهت ارزیابی دقیق فشار شکست و تنش بسته شدن شکاف به همراه نقطه ی بهینه ی نرخ تزریق انجام و آنالیز صورت گرفته است.

با توجه به ضریب اهمیت توالی تزریق و همچنین حجم های تزریقی (شاخص Gal/ft) که در این شبیه سازها طراحی شده، می توان به عملکرد مناسب طراحی های صورت گرفته اشاره نمود. هرچند در توالی تزریق سیالات می توان نقطه نظراتی اصلاحی را مطرح کرد. همچنین لازم به ذکر است اگر مشبک کاری چاه را در این مرحله از طراحی در نظر بگیریم، نوع مشبک، تعداد مشبک ها در طراحی از اهمیت لازم برخوردار می باشد.

۱-۴-۱۱- شاخص موفقیت از نظر انتخاب و آزمایش سیالات شکاف

سیالات شکاف به همراه افزایه های آن در هر دو عملیات تحت ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته و با توجه به در دسترس نبودن داخلی این مواد، برخی از آنها از تامین کننده ی خارجی تامین شده است. در میدان نفتی آذر با توجه به ماهیت تولید آسفالتین این میدان به علت تولید همزمان از دو لایه مجزا با خصوصیات PVT مختلف، به نظر می رسد در صورت ارزیابی جامع تر سیالات تزریقی از نظر به حداقل رساندن تولید آسفالتین در این عملیات ها می توانست در خروجی نهایی عملکرد بهتری داشته باشد. شایان ذکر است که در چاه های تحت عملیات شکاف هیدرولیکی، رسوب آسفالت بعد از انجام عملیات صورت گرفته و به کررات مانع از دستیابی تجهیزات به عمق نهایی چاه شده است. با توجه به این موارد می توان گفت که در خروجی نهایی عملیات طراحی سیالات شاید منجر به هزینه ی مازاد شده ولی در ایجاد شکاف و افزایش عملکرد تولید چاه تاثیر چندانی در این میدان نداشته است.

در خصوص میدان سیری، همین روند جهت طراحی و آزمایش سیالات انجام شده ولی در انتهای عملیات با توجه به نتیجه آن، چندان عملکرد تولید چاه بهبود نیافته است. در صورت کاهش تولید در چاه مذکور می توانست یکی از پارامتر های موثر در شکست عملیات شکاف اسیدی در این چاه به آن اشاره نمود.

۱-۴-۱۲- شاخص موفقیت از نظر فرایند اجرای عملیات

در خصوص اجرای عملیات اصلی شکاف، می توان گفت که دقت اجرا در این مرحله از ضریب وزنی بیشتری روی خروجی نهایی برخوردار می باشد. در این مرحله از عملیات در صورت خطای انسانی یا ابزار (مثل : باز یا بسته بودن

یک لاین از تزریق یا عدم دقت در اندازه گیری حجم سیال تزریقی هر مرحله، عدم دقت در محاسبات فشار پشت لوله جداری، خراب بودن گیج های فشار و ...) اگر برنامه درست اجرا نگردد می تواند نتایج کلی را تغییر دهد.

در تجربه میدان آذر طبق گزارش ها، علاوه بر بررسی و چک چندباره ی دستورالعمل اجرای عملیات، در وسط عملیات بسته به نتایج آزمایش Mini-Frac که نرخ تزریق پایین را نشان می داد، این آزمایش در بازه های دیگری بعد از مشبک کاری مجدد انجام گردید و با توجه به مناسب بودن پارامتر های حاصل شده ادامه ی عملیات طبق برنامه قبلی انجام گردید. همچنین در یکی از چاه های همین میدان بعد از انجام عملیات شکاف در لایه سروک پایین، پلاگ ماسه ای جهت ایزوله کردن لایه پایین از لایه کاندید شکاف سروک بالایی در چاه گذاشته شد. در حین اجرای عملیات در لایه بالایی تغییرات فشار بالایی نشان می داد که ارتباط بین لایه بالا و پایین به علت احتمالی عدم تثبیت پلاگ ماسه ای برقرار شده و عملیات متوقف گردد. با توجه به تغییرات ایجاد شده در شرح کار این چاه، ادامه ی عملیات در این چاه بعد از انجام تعمیرات به صورت اسید کاری گسترده انجام گردید. از نظر موفقیت آمیز بودن فرآیند اجرای عملیات می توان به این موارد اشاره نمود.

در خصوص میدان سیری هم می توان اشاره نمود که اجرای عملیات طبق برنامه چاه انجام شده و در برخی موارد نظیر استفاده از آب دریا جهت ایجاد عملیات Data-Frac و احتمال آسیب سازندی (داده های خروجی نشان از وضعیت مناسب لایه کاندید جهت شکاف بوده و نرخ تزریق طراحی شده را بهینه تر پیش بینی کرده است) ، استفاده از آب دریا پس از انجام عملیات شکاف به علت افزایش فشار ناگهانی چاه و کشتن چاه که منجر به آسیب مخزنی شده که از دلایل عدم موفقیت این عملیات طبق شاخص اجرای عملیات می تواند مطرح گردد.

۱-۴-۱۳- شاخص موفقیت از نظر بهبود وضعیت تولید

داده های ناشی از آزمایش چاه قبل و بعد از چند عملیات انجام شده در چاه های میدان آذر و سیری گویای افزایش وضعیت شاخص تولید در این چاه و موفقیت آمیز بودن عملیات شکاف هیدرولیکی در خصوص افزایش نرخ تولید بوده است.

۱-۴-۱۴- شاخص موفقیت از نظر حفظ یکپارچگی چاه

در این خصوص در چاه های میدان آذر با توجه به عدم دسترسی به عمق نهایی چاه بعد از انجام عملیات، می توان به موفقیت آمیز نبودن این عملیات در این چاه از نظر حفظ یکپارچگی چاه اشاره نمود. در ۲ حلقه از این چاه ها عدم دسترسی به عمق نهایی چاه بعد از انجام عملیات گزارش شده است. البته دلایل مختلفی از جمله جنس لوله های جداری، مشبک کاری مجدد، تمیز سازی ستون چاه جهت جریان برگشتی و ... می توانند هر کدام دلیلی احتمالی برای این اتفاق در نظر گرفته شوند.

همچنین در چاه DPH-02 طبق گزارش های اعلام شده، یکپارچگی چاه در طول و بعد از انجام عملیات حفظ شده است.

۱-۴-۱۵- شاخص موفقیت از نظر تداوم تولید

تداوم داشتن تولید از چاه های تحت شکاف اسیدی قرار گرفته شده در هر دو میدان در حله اول بسته به سیاست مدیریت مخزن دارد که این چاه به صورت پیوسته در مدار تولید قرار گیرد. از طرفی در میدان آذر چاه های کاندید شده با توجه به همزمانی حافزی چاه های قبلی و ساخت تجهیزات سطحی و خطوط لوله برای چاه ها، برخی از این چاه ها دارای خط لوله جریانی از سر چاه تا لاین اصلی نبوده و با توجه به فرا نرسیدن بازه تولید زود هنگام از میدان دستور به توقف تولید از این چاه ها تا تکمیل خط لوله آن ها بعد از انجام عملیات داده شد.

از طرفی در صورت وجود تجهیزات سطحی و خط لوله، اگر تولید پیوسته از چاه صورت نگرفته، می بایست به پارامتر های مخزنی در خصوص کاندید انجام عملیات شکاف شدن این چاه ها اشاره نمود. با توجه به افزایش وضعیت تولید، اینکه تولید مستمر از این چاه صورت نگرفته الزاما دلیل عدم موفقیت شکاف اسیدی نمی باشد. دلایلی همچون عدم یا ارتباط ضعیف بین ماتریکس و شکاف یا کاهش تراوایی نسبی نفت و ... می تواند از دید مخزنی مطرح گردد. این مورد در چاه میدان سیری نیز صدق می کند که تولید از این چاه بعد از کشتن چاه به علت اشاره شده پس از ۳ ماه تولید مجدد متوقف شده است و در بازه های زمانی مختلف به صورت محدود در مدار تولید قرار گرفته شده است.

عملیات های شکاف اسیدی اجرا شده در ایران طبق جدول زیر به صورت کیفی مورد اشاره قرار گرفته اند.

جدول ۱-۱: ارزیابی کیفی موفقیت آمیز بودن عملیات شکاف هیدرولیکی

هیدرولیکی شکاف عملیات بودن آمیز موفقیت کیفی ارزیابی				
موفقیت شاخص	آذر میدان			سوی میدان
	شماره چاه 3	شماره چاه 4	شماره چاه 11	شماره چاه 2
شاخص موفقیت از نظر طراحی مهندسی شکاف				
شاخص موفقیت از نظر انتخاب و آزمایش سیالات شکاف				
شاخص موفقیت از نظر فرایند اجرای عملیات				
شاخص موفقیت از نظر بهبود وضعیت تولید				
شاخص موفقیت از نظر حفظ یکپارچی چاه				
شاخص موفقیت از نظر تداوم تولید				
رنگ سبز	بوده آمیز موفقیت			
رنگ زرد	شود گرفته نظر در آمیز موفقیت تواند می ها پاراقر بقیه بررسی صورت در			
رنگ قرمز	نبوده آمیز موفقیت			
رنگ خاکستری	ندارد وجود موفقیت عدم خصوص در محکمی های داده			

فصل ۲: غربالگری

۲-۱- مقدمه

غربالگری یک مرحله مهم و تأثیرگذار در انجام و موفقیت عملیات شکافت هیدرولیکی می باشد. انجام غربالگری فرآیند انتخاب و تشخیص مخزن یا چاهی است که بیشترین احتمال موفقیت اجرای عملیات و همچنین بیشترین پتانسیل را برای افزایش تولید و بازگشت سرمایه، پس از انجام عملیات داشته باشد. غربالگری می تواند در سطح میدان، ناحیه، چاه و زون های درون چاه انجام بگیرد. پارامترهای تأثیرگذار در حالت معمول به دو دسته فنی و غیرفنی تقسیم بندی می شوند.

۲-۲- پارامترهای فنی

پارامترهای غربالگری از نظر فنی به چند دسته تقسیم می شود: پارامترهای زمین شناسی و ژئومکانیکی، پارامترهای مخزنی، و پارامترهای مرتبط با تکمیل و محدودیت های چاه های تولیدی پارامترهای زمین شناسی و ژئومکانیکی (استاتیکی)

این پارامترها در مقیاس های مختلف قابل بحث و بررسی هستند و اهمیت و تاثیر گذاری هر کدام از این پارامترها در فرایند انتخاب بسته به مقیاس و هدف غربالگری متغیر خواهد بود. از مهمترین این پارامترها در این بخش می توان به خواص پتروفیزیکی از جمله تخلخل، اشباع شدگی آب، لیتولوژی سازند یا مخزن، خواص ساختمانی از جمله وجود شکستگی و شکاف های طبیعی در مخزن، عمق مخزن، محصور شدن مخزن بین دو لایه با خواص زمین شناسی و ژئومکانیکی متفاوت و خواص ژئومکانیکی مانند مقدار تنش های برجای مخزن، مقاومت تک محوری فشاری، میزان اختلاف بین تنش های افقی مینیمم و ماکسیمم چاه، شاخص شکاف پذیری، شاخص شکنندگی و محدود سازی شکاف اشاره کرد.

محدوده مناسب برای کاندید شدن		پارامتر
بالتر از ۳/۳ مناسب		شاخص شکاف پذیری
اختلاف تنش بیشتر بین لایه هدف با لایه های بالا و پایین		محدود سازی شکاف
شکاف طبیعی کمتر		حضور شکاف های طبیعی
جهت گیری مناسب شکاف طبیعی با شکاف هیدرولیکی		جهت گیری شکاف طبیعی
لیتولوژی های شکننده خوب و لیتولوژی های رسی نامناسب		لیتولوژی مخزن
هر چه عمق بیشتر فشار شکست بالاتر خواهد رفت. عمق و فشار در حدی باشد که ساختار تکمیل شده چاه، فشار شکست را با محدودیت همراه نکند		عمق و فشار مخزن
در مخازن نفتی کمتر از ۱۰ متر نامناسب و بالاتر از ۳۰ متر عالی؛ مخزن گازی بیش از ۱۰ متر مناسب		ضخامت مخزن
بیشترین فاصله		فاصله از مرز آب و گاز
مخزن نفتی	مخزن گازی	-
بین ۸ تا ۱۸ درصد	بین ۲ تا ۱۲ درصد	تخلخل
کمتر از ۴۰٪	کمتر از ۵۰٪	آب اشباع
کمتر از ۰,۵ ضعیف بالاتر از ۰,۷ عالی		شاخص شکاف پذیری
کمتر از ۱ ضعیف بیشتر از ۳ عالی		محدود سازی شکاف
کمتر از ۱۰ متر ضعیف بالاتر از ۳۰ متر عالی	بیش از ۱۰ متر	ضخامت مخزن

۲-۳- پارامترهای مخزنی (دینامیکی)

پارامترهای مخزنی که در غربالگری و انتخاب میدان یا چاه مناسب جهت اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی باید مورد نظر قرار گیرند و عمدتاً از نوع شاخصهای دینامیکی می باشند شامل شاخص های پتروفیزیکی از جمله تراوایی، خواص سیالی مانند گراوایته ، ویسکوزیته نفت و نسبت گاز محلول به نفت، خواص مربوط به وضعیت تولیدی چاه نظیر برش آب تولیدی، تشکیل پوسته در اطراف دیواره چاه، و دبی تولید چاه و همچنین خواص دینامیکی مخزن مانند فشار حال حاضر مخزن، فشار زمان حال مخزن نسبت به فشار اولیه و ضریب برداشت کل مخزن می باشند.

پارامتر	مخزن نفتی	مخزن گازی
تراوایی	کمتر از ۱۰ میلی داری	کمتر از ۱۰ میلی داری
میزان برش آب تولیدی	کمتر از ۳۰٪	کمتر از 200 bbl/MMscf
فشار مخزن نسبت به فشار اولیه	بیش از ۷۰٪ ذخیره ی مخزن باقی مانده باشد	بیش از ۲ برابر فشار ترک مخزن

۲-۴- پارامترهای مرتبط با تکمیل چاه

این پارامترها به نوع و محدودیت های ناشی از نوع تکمیل چاه و همچنین محدودیت های اجرایی بر می گردد. در انجام فرایند غربالگری پارامتر های مربوط به تکمیل چاه بسته به انجام عملیات در چاه های موجود و یا چاه های مورد نظر برای حفاری در آینده می تواند متفاوت باشد. به عنوان پیشنهاد کلی می توان چنین مطرح کرد که انجام عملیات شکافت هیدرولیکی در طراحی و نوع تکمیل چاه هایی که در طرح توسعه برای حفاری در نظر گرفته می شوند از ابتدا لحاظ شود. در غیر این صورت و یا در مواردی که انجام عملیات در چاه های موجود و قدیمی مد نظر است محدودیت های جدی عملیاتی میتواند منجر به عدم انتخاب و یا عدم نتیجه گیری مناسب و بهره بردن از مزایای این فناوری در مخزن و چاه مورد مطالعه باشد. این محدودیت ها شامل، محدودیت های فشاری تجهیزات تکمیل چاه، انقباض لوله جداری چاه، محدودیت فشار سرچاهی، لوله مغزی های کم کیفیت، پیوندهای سیمانی ضعیف می باشد.

۲-۵- پارامترهای غیر فنی

جدا از پارامتر های علمی و فنی تاثیر گذار در فرایند غربالگری فناوری شکافت هیدرولیکی، یکسری از پارامتر های تاثیر گذار دیگری که الزاما طبیعت فنی ندارند در این فرایند وجود دارند که می توانند نقش حیاتی در تصمیم گیری های نهایی ایفا نمایند. این پارامتر های غیر فنی در دو دسته پارامترهای اقتصادی-هزینه ای و پارامترهای مربوط به نگرش ها و ملاحظات کارفرمایی تقسیم بندی می شوند.

هزینه های اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی می تواند بسیار بالا باشد و لذا بررسی توجیه پذیری چنین عملیاتی یکی از ارکان اصلی قبل از اجرا خواهد بود. هزینه های اجاره تجهیزات اصلی، تجهیزات جانبی، مواد

تزریقی و پرسنل و غیره بستگی به محل اجرا، زمان اجرا، روش اجرا، حجم پروژه، و دیگر عوامل میتواند بسیار متغیر باشد. لذا در انجام هر گونه فرایند غربالگری در نظر گرفتن اینگونه عوامل که هزینه های عملیاتی را مد نظر قرار دهد بسیار حیاتی خواهد بود.

از طرف دیگر باید غربالگری را با توجه به میزان بلوغ فناوری در ایران نیز مد نظر قرار داد. در حال حاضر دانش مربوط به این فناوری در حال اکتساب است. بنابراین انتخاب گزینه های دریایی که از پیچیدگی های فراوان تری نسبت به عملیات خشکی برخوردار است باید در اولویت پایین تری قرار گیرد. همچنین باید غربالگری از نگاه انتخاب میدان نفتی یا گازی نیز مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که اجرای عملیات در میداین گازی از پیچیدگی بالاتری برخوردار است باید در انتخاب اولویت در این مرحله از دانش میداین گازی از درجه اهمیت پایین تری برخوردار باشند.

۲-۶- روش های غربالگری

تکنیک های مورد استفاده در غربالگری، به سه دسته ی روش های معمول یا مبتنی بر نظر کاربر، روش های آماری چند معیاره و روش های هوشمند تقسیم می شوند. در روش های معمول کارشناسان و متخصصان با در نظر گرفتن جنبه های مهندسی، زمین شناسی و ... اقدام به تصمیم گیری می نمایند. از جمله این روش ها می توان به تعریف کردن اندیس های خاص برای مخزن یا چاه و تصمیم گیری بر اساس محدوده تغییرات اندیس تعریف شده در گزینه مورد مطالعه اشاره کرد. از جمله این روش ها می توان به اندیس تولید اشاره کرد. یکی دیگر از روش های معمول برای غربالگری تعیین پارامترهای مهم و تاثیر گذار ذاتی (زمین شناسی، ژئومکانیکی، مخزنی و تولیدی-تکمیلی) و اظهار نظر کیفی بر اساس این پارامترها است. در این روش، پارامترها از نظر اهمیت در شکافت هیدرولیکی توسط کارشناسانی که به شرایط میدان اشراف کامل اطلاعاتی دارند انجام می شود و بر اساس میزان همخوانی پارامترها با عملیات شکافت هیدرولیکی غربالگری انجام می گیرد. اما با توجه به پیچیدگی فراوان و عدم قطعیت بالا در مسئله ی مورد نظر، امروزه کاربرد روش های هوشمند و داده محور به

سرعت در حال افزایش است. در روش‌های آماری پارامترهای ورودی که بر اساس آنها تصمیم‌سازی انجام می‌گیرد در سطوح مختلف از نظر اهمیت قرار می‌گیرند و تصمیم‌گیری نهایی بر اساس ترکیب ورودی‌ها و سطوح اهمیتی انجام خواهد شد. روش‌های هوشمند امروزه به صورت خیلی گسترده در شاخه‌های مختلف مرتبط با نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله مهم‌ترین آن می‌توان به منطق فازی اشاره کرد.

۲-۷- انجام غربالگری بر روی میادین ایران

بر اساس پارامترهای توضیح داده شده، پایگاه داده‌ای از میادین ایران تهیه گردیده است. بر اساس پایگاه داده تهیه شده، غربالگری میدان جهت انتخاب بهترین میدان کاندید به منظور اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی انجام گرفته است. برای انجام غربالگری پارامترهای مختلفی در مقیاس کلی و عمومی تا پارامترهای فنی و عملیاتی دقیق نقش داشته است. با توجه به میزان در دسترس بودن و دقت داده‌های میادین، غربالگری به دو روش کیفی و هوشمند و نتایج بر اساس اولویتهای مختلف تعریف شده است.

از آنجایی که اولویت بررسی با میادین خشکی و نفتی است (میادین خشکی هستند یا دریایی، نفتی هستند یا گازی) میادین مورد نظر به چهار دسته تقسیم شده اند که در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲: تعداد میادین بر حسب نوع و موقعیت

نوع میدان	اولویت بررسی	تعداد میدان
نفتی - خشکی	۱	۶۱
گازی - خشکی	۲	۲۵
نفتی - دریایی	۳	۲۴
گازی - دریایی	۴	۲۲

همچنین مخازن میادین بر اساس درصد وجود اطلاعات به سه دسته تقسیم شده اند. مخازن میادینی که دارای اکثریت اطلاعات هستند (بالاتر از ۸۰ درصد اطلاعات مورد نیاز) گروه ۱ را تشکیل می دهند (جدول ۲-۲). مخازن میادینی که اطلاعات آنها کامل نیست (در حدود ۵۰ درصد از اطلاعات مورد نیاز را پوشش می دهند) در گروه ۲ قرار گرفتند. در این میان، مخازن میادینی که هیچ اطلاعاتی از آنها در دسترس نیست یا اطلاعات آنها کمتر از ۵۰ درصد است در گروه ۳ قرار گرفته اند.

جدول ۲-۲: مخازن حاوی اطلاعات برای میادین نفتی-خشکی (گروه ۱)

ردی ف	نام میدان	نام مخزن	ردی ف	نام میدان	نام مخزن	ردی ف	نام میدان	نام مخزن	ردی ف	نام میدان	نام مخزن	ردی ف	نام میدان	نام مخزن
۱	سپهر	ایلام	۱۱	کوپال	بنگستا ن	۲۱	یاران شمال ی	فهلپان و گدوان	۳۱	آذر	سروک	۴۱	رگ سف ید	سروک
۲	سپهر	سروک	۱۲	سروستا ن	سروک	۲۲	جفیر	ایلام	۳۲	منصور ی	آسمار ی	۴۲	بند کرخه	ایلام
۳	سپهر	گدوان	۱۳	پایدار غرب	سروک	۲۳	جفیر	سروک	۳۳	منصور ی	بنگستا ان	۴۳	بند کرخه	سروک
۴	سپهر	فهلپان پایین	۱۴	چنگوله	بنگستا ن	۲۴	جفیر	گدوان	۳۴	منصور ی	خامی	۴۴	چشمه خوش	آسمار ی
۵	سپهر	فهلپان پایین	۱۵	دهلران	ایلام	۲۵	جفیر	فهلپان پایین	۳۵	آزادگان	سروک	۴۵	دانان	آسمار ی
۶	دارخو ین	فهلپان	۱۶	دهلران	سروک	۲۶	جفیر	فهلپان پایین	۳۶	آزادگان	کژدمی	۴۶	دانان	ایلام
۷	اروند	فهلپان	۱۷	اهواز	آسمار ی	۲۷	شادگ ان	آسمار ی بالا	۳۷	آزادگان	گدوان	۴۷	دانان	سروک
۸	پازنان	آسمار ی	۱۸	اهواز	بنگستا ن	۲۸	شادگ ان	آسمار ی پایین	۳۸	آزادگان	فهلپان	۴۸	لب سفید	آسمار ی
۹	پازنان	فهلپان	۱۹	بینک	سروک	۲۹	شادگ ان	ایلام	۳۹	کرنج	آسمار ی- پایده	۴۹	نفت سفید	آسمار ی
۱۰	کوپال	آسمار ی	۲۰	یاران شمالی	سروک بالا	۳۰	شادگ ان	سروک	۴۰	رگ سف ید	آسمار ی- پایده	۵۰	خشت	آسمار ی- چهرم

به منظور انجام غربالگری در مقیاس میدان محور جدول ۲-۳ تهیه شده است.

جدول ۲-۳: پارامترهای غربالگری در مقیاس میدان محور مورد استفاده در اجرای این غربالگری

دسته بندی پارامتر	عنوان پارامتر
عمومی	نوع میدان، منطقه، موقعیت (خشکی، دریایی)، وضعیت توسعه میدان
سازندی	نام سازند، نام لایه، تعداد چاه در سازند، نوع حفاری چاهها، عمق سازند، فشار، دما،
مشخصات مخزنی	نوع سیال سازند، API، SG، ویسکوزیته، GOR، آسفالت، H ₂ S، برش آب، بازه دبی تولید چاه، بازه فشار سرچاهی چاهها
پتروفیزیکی	لیتولوژی غالب سازند، تخلخل متوسط سازند، اشباع آب متوسط سازند، تراوایی متوسط سازند، نمونه‌های مغزه و آزمایشات Rcal/Scal، نمودارهای پیشرفته، چاههای مرجع مشخصات پتروفیزیکی
ژئومکانیکی	مطالعات ژئومکانیکی، وضعیت شکستگیها
تکمیل چاه/ تولید و بهره برداری	توضیحات رشته تکمیلی (سایز لوله‌های جداری و تیوبینگ، نوع تاج،...)، نوع تکمیل بخش مخزنی چاه (مشبک کاری یا حفره باز یا لاینر)، مشکلات تولیدی چاهها

۲-۸- اولویت بندی مخازن از نقطه نظر فنی

برای این منظور اطلاعات فنی جمع آوری شده بر مبنای روند اطلاعات فنی و مناسب یا نامناسب جهت اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی دخیل داده شدند. بر این اساس سه گروه از نظر اولویت تعریف گردید.

گروه اولیتهی ۱ شامل مخازنی است که بیشتر از ۸۰ درصد اطلاعات فنی موافق با عملیات شکافت هیدرولیکی را پاس خواهند کرد.

گروه اولیتهی ۲ شامل مخازنی است که اطلاعات فنی آنها در حدود ۶۰ درصد موافق با اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی است.

گروه اولویتی ۳ شامل مخازنی است که کمتر از ۵۰ درصد اطلاعات فنی موافق با عملیات شکافت هیدرولیکی را پاس خواهند کرد.

جدول ۲-۴: گروه بندی مخازن از نظر فنی

گروه	میزان انطباق اطلاعات فنی با معیار های اجرای موفق عملیات شکافت هیدرولیکی
۱	$> 80\%$
۲	$> 50\%$ و $> 80\%$
۳	$< 50\%$

جدول ۲-۵: گروه فنی ۱

ردیف	نام میدان	نام مخزن
۱	جفیر	ایلام
۲	آذر	سروک
۳	منصوری	بنگستان
۴	آزادگان	سروک
۵	رگ سفید	سروک
۶	بند کرخه	ایلام
۷	بند کرخه	سروک
۸	دانان	آسماری
۹	دانان	ایلام
۱۰	دانان	سروک

۹-۲- اولویت بندی نهایی مخازن

در این مرحله با توجه به گروه بندی مخازن از نظر درصد وجود اطلاعات و از نظر میزان درصد اطلاعات فنی، نسبت به اولویت بندی آنها جهت انجام غربالگری کیفی نهایی اقدام شد. بدین منظور با آگاهی از درجه اهمیت هر یک از این گروهها، معیارهایی برای اولویت بندی مخازن تعیین شدند که در جدول ۶-۲ ذکر شده اند.

جدول ۶-۲: اولویت بندی مخازن

اولویت نهایی	شماره گروه از نظر فنی	شماره گروه از نظر وجود اطلاعات
۱	۱	۱
۲	۱	۲
۳	۲	۲
۴	۲	۱
۵	۳	۲
۶	۳	۱

۱۰-۲- تعاریف اولویت ها:

اولویت ۱: اولویت یک شامل میادین خشکی نفتی است که از نظر میزان اطلاعات در گروه اطلاعاتی یک و از نظر پاس کردن اطلاعات فنی در گروه فنی یک قرار می گیرند (جدول ۷-۲).

اولویت ۲: اولویت دو شامل میادین خشکی نفتی است که از نظر میزان اطلاعات در گروه اطلاعاتی دو و از نظر پاس کردن اطلاعات فنی در گروه فنی یک قرار می گیرند (جدول ۸-۲).

اولویت ۳: اولویت سه شامل میادین خشکی نفتی است که از نظر میزان اطلاعات در گروه اطلاعاتی دو و از نظر پاس کردن اطلاعات فنی در گروه فنی دو قرار می گیرند (جدول ۹-۲).

اولویت ۴: اولویت چهار شامل میادین خشکی نفتی است که از نظر میزان اطلاعات در گروه اطلاعاتی یک و از نظر پاس کردن اطلاعات فنی در گروه فنی دو قرار می گیرند (جدول ۱۰-۲).

اولویت ۵: اولویت پنج شامل میادین خشکی نفتی است که از نظر میزان اطلاعات در گروه اطلاعاتی دو و از نظر پاس کردن اطلاعات فنی در گروه فنی سه قرار می گیرند (جدول ۲-۱۱).

اولویت ۶: اولویت شش شامل میادین خشکی نفتی است که از نظر میزان اطلاعات در گروه اطلاعاتی یک و از نظر پاس کردن اطلاعات فنی در گروه فنی سه قرار می گیرند (جدول ۲-۱۲).

جدول ۲-۷: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۱

ردیف	نام میدان	نام مخزن	نکات مثبت
۱	سپهر	ایلام	فشار کم ، عمق مناسب ، تخلخل مناسب، ضخامت مناسب ، نفت سبک، در طرح توسعه میدان، عملیات شکافت ذکر گردیده است.
۲	یاران شمالی	سروک بالا	عملیات شکافت در طرح توسعه شرکت پرسیا قرار دارد.
۳	جفیر	ایلام	خواص سازندی و دینامیکی مناسب، در طرح توسعه میدان عملیات شکافت موجود است.
۴	منصوری	بنگستان	شرایط عمقی و فشار مناسب -شرایط مخزنی مناسب
۵	آزادگان	سروک	شرایط عمقی و فشار مناسب -شرایط مخزنی مناسب
۶	رگ سفید	سروک	شرایط عمقی و فشار مناسب -شرایط مخزنی مناسب
۷	بند کرخه	ایلام	عملیات شکافت در طرح توسعه قرار دارد.

جدول ۲-۸: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۲

ردیف	نام میدان	نام مخزن	نکات مثبت/منفی
۱	سروستان	سروک	مطالعه توسط شرکت پترو ایران ، عمق مناسب/ کمبود اطلاعات دینامیکی
۲	پایدار غرب	سروک	در حال اقدام برای اجرای عملیات شکافت توسط شرکت روسی
۳	بند کرخه	سروک	عملیات شکافت در طرح توسعه قرار دارد.
۴	دانان	آسماری	شرایط مخزنی مناسب
۵	دانان	ایلام	عملیات شکافت در طرح توسعه قرار دارد.
۶	دانان	سروک	عملیات شکافت در طرح توسعه قرار دارد.
۷	آذر	سروک	فشار نسبتا بالا، قبلا جهت عملیات شکافت در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۹: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۳

ردیف	نام میدان	نام مخزن	نکات مثبت/منفی
۱	کوپال	بنگستان	قابل مطالعه، کربناته/ عمق نامناسب بالا در حدود ۴۴۰۰-۵۵۰۰
۲	چنگوله	بنگستان	قابل مطالعه، اکتشافی، مستعد عملیات شکافت به دلیل قرارگیری کنار میدان آذر
۳	دهلران	ایلام	قابل مطالعه، در حال تولید، سازند مناسب
۴	دهلران	سروک	قابل مطالعه، در حال تولید، عمق مناسب در حدود ۳۵۰۰ متر، سازند مناسب
۵	اهواز	بنگستان	قابل مطالعه، در حال تولید، عمق مناسب در حدود ۳۰۰۰ متر
۶	یاران شمالی	فهلپان و گدوان	اکتشافی، نفت سبک، عملیات شکافت در طرح توسعه شرکت پرشیا قرار دارد.
۷	شادگان	ایلام	قابل مطالعه، اکتشافی، سازند مناسب
۸	شادگان	سروک	قابل مطالعه، اکتشافی، سازند مناسب

جدول ۲-۱۰: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۴

ردیف	نام میدان	نام مخزن	نکات مثبت/منفی
۱	بینک	سروک	کربناته، تولیدی قدیمی/ تراوایی بسیار پایین، مشکلات تولیدی مثل اب نمک
۲	جفیر	سروک	قابل مطالعه، اکتشافی / نفت سنگین
۳	شادگان	آسماری بالا	قابل مطالعه، تولیدی قدیمی/ ترکیب ماسه سنگ و کربناته، مشکل تولید ماسه، تراوایی بسیار بالا
۴	شادگان	آسماری پایین	قابل مطالعه، تولیدی قدیمی / ترکیب ماسه سنگ و کربناته، مشکل تولید ماسه، تراوایی بسیار بالا
۵	رگ سفید	آسماری - پایده	کربناته، در حال تولید، عمق مناسب حدود ۲۳۰۰ متر
۶	خشت	آسماری - جهرم	کربناته، اکتشافی، دارای شکستگیهای زیاد، عمق مناسب در حدود ۲۷۰۰ متر

جدول ۲-۱۱ : مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۵

ردیف	نام میدان	نام مخزن	نکات منفی/مثبت
۱	اروند	فهلپان	در حال توسعه / عمق بالا در حدود ۴۰۰۰ متر شبیه دیگر لایه های فهلپان در میادین دیگر، API بسیار بالا (۴۴)، کمبود اطلاعات
۲	پازنان	آسماری	کربناته، نفت-گاز-سیال میعانی / تولیدی قدیمی (نیمه دوم عمر)، افت فشار زیاد از ۴۲۰۰ به ۲۲۰۰ به علت تخلیه زیاد، تزریق گاز برای جبران تولید، عملیات شکافت تاثیر زیادی نخواهد داشت.
۳	پازنان	فهلپان	کربناته، در حال تولید/عدم وجود اطلاعات، سازند نامناسب فهلپان
۴	کوپال	آسماری	کربناته- ماسه سنگی، در حال تولید/مچالگی جداری، افت فشار مخزن، مشکلات ژئومکانیکی، تزریق گاز، عمق نامناسب
۵	اهواز	آسماری	در حال تولید/تولید قدیمی ممکن است مشکل ایجاد کند، بررسی شود
۶	منصوری	خامی	کربناته، اکتشافی/اطلاعات خیلی کم
۷	چشمه خوش	آسماری	کربناته-ماسه سنگ، در حال تولید/در دست روسیه است.
۸	لب سفید	آسماری	نفت سبک /تولیدی قدیمی، تولید آب نمک اضافی، عدم وجود واحد نمک زدایی، تخلیه مخزن، تزریق گاز ترش از بنگستان
۹	نفت سفید	آسماری	کربناته/تولیدی بسیار قدیمی، افت فشار، در صورت وجود بنگستان به علت عمق کم قابل مطالعه

جدول ۲-۱۲: مخازن میادین نفتی-خشکی با اولویت ۶

ردیف	نام میدان	نام مخزن	نکات منفی/مثبت
۱	سپهر	سروک	کربناته، اکتشافی/ نفت فوق سنگین
۲	سپهر	گدوان	ماسه سنگ، در حال توسعه، نفت سبک/کم ضخامت
۳	سپهر	فهلپان ۱،۲،۳	کربناته، نفت فوق سبک/فشار بالا
۴	سپهر	فهلپان ۵،۶	فشار بالا
۵	دارخوین	فهلپان	کربناته، در حال تولید، نفت سبک/فشار و عمق بالا
۶	جفیر	گدوان	ماسه سنگی، در حال توسعه، نفت سبک/ نازک
۷	جفیر	فهلپان ۱،۲،۳	کربناته، در حال توسعه، نفت فوق سبک /عمق بالا
۸	جفیر	فهلپان ۵،۶	کربناته، در حال توسعه، نفت فوق سبک /عمق بالا
۹	منصوری	آسماری	کربناته-ماسه سنگی/تولیدی قدیمی، تولید ماسه، افت دبی
۱۰	آزادگان	کژدمی	ماسه سنگی، در حال تولید، نفت سبک/ تولید ماسه، ضخامت کم
۱۱	آزادگان	گدوان	ماسه سنگی، در حال تولید، نفت سبک/ تولید ماسه، ضخامت کم
۱۲	آزادگان	فهلپان	کربناته، در حال تولید، نفت سبک/عمق و فشار بالا
۱۳	کرنج	آسماری - پابده	کربناته/تولیدی قدیمی، افت فشار مخزن، تولید گاز

برای مخازن دیگر نیز غربالگری کیفی انجام شده است که در گزارش اصلی آورده شده است.

با استفاده از روش هوشمند منطق فازی نیز غربالگری انجام شده است که نتایج آن با روش کیفی مقایسه شده است (جدول ۲-۱۳). نتایج نشان می دهد که در ۵۲ درصد موارد دو روش به پیش بینی یکسانی رسیده اند. در ۸۴ درصد موارد، پیش بینی ها فقط یک درجه با هم تفاوت داشتند. در ۴ مورد، نتایج دو روش به کلی یک دیگر را نقض می کنند.

جدول ۲-۱۳: مقایسه ی نتایج الگوریتم فازی و تصمیم گیری کیفی

میدان	مخزن	اولویت روش هوشمند	اولویت روش کیفی	match
سپهر	ایلام	1	1	Yes
	سروک	3	3	Yes
	گدوان	1	3	No
	فهلپان	3	3	Yes
دارخوین	فهلپان	3	3	Yes
بینک	سروک	2	2	Yes
یاران شمالی	سروک بالا	2	1	No
جفیر	ایلام	1	1	Yes
	سروک	1	2	No
	گدوان	1	3	No
	فهلپان	1	3	No
شادگان	آسماری بالا	2	2	Yes
	آسماری پایین	2	2	Yes
آذر	سروک	1	1	Yes
منصوری	آسماری	2	3	No
	بنگستان	2	1	No
آزادگان	سروک	1	1	Yes
	کژدمی	2	3	No
	گدوان	2	3	No
	فهلپان	2	3	No



کرنج	آسماری-پابده	1	3	No
رگ سفید	آسماری-پابده	2	2	Yes
	سروک	2	1	No
بند کرخه	ایلام	1	1	Yes
خشت	آسماری-چهرم	2	2	Yes



فصل سوم: مبانی و تئوری شکاف هیدرولیکی

۳-۱- مقدمه

مطالعات پیش از عملیات شکافت هیدرولیکی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. چرا که شناسایی هرچه دقیق تر منطقه، سازند مخزنی و چاه کمک شایانی به بهبود طراحی و انجام عملیات خواهد کرد. برای این منظور لازم است تا زمین شناسی میدان و چاه به دقت مورد مطالعه قرار گیرد تا در صورت وجود محدودیت های زمین شناختی راه حل مناسبی برای آن پیدا شود. در ادامه برای استخراج داده های مورد نیاز، لازم است تا داده های چاه مانند تست های برجا، نگارهای پتروفیزیکی بررسی و مطالعه شوند. با به کارگیری تمامی این داده و ایجاد داده های جدید آزمایشگاهی، با استفاده از دانش ژئومکانیک مدل ژئومکانیکی چاه برای انجام طراحی شکافت هیدرولیکی استخراج خواهد شد.

۳-۲- زمین شناسی

اهمیت مبحث زمین شناسی در مطالعات و طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی شامل مبحث تکتونیک، تأثیرات کانی های رسی و سنگ شناسی می شود.

تکتونیک یکی از ارکان اصلی زمین شناسی است که به بررسی ساختار و حرکات لایه های زمین و تأثیرات آن بر روی زمین شناسی و فرآیندهای زمین ساختی می پردازد. طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی مستلزم آگاهی از ساختار زمین شناسی و سیستم تنش منطقه ای است. هرچند ملاحظات زمین شناسی ساختاری در مقیاس بزرگ از مهمترین مباحث مد نظر در طراحی نمی باشد و این عملیات بیشتر به عنوان عملیات چاه محور شناخته می شود، با این حال، آگاهی از رژیم کلی تنش حاکم بر منطقه در مبحث نوع رژیم تنش و جهت یابی آنها بسیار راهگشا خواهد بود. انواع گسل ها شامل گسل های نرمال، معکوس و امتداد لغز در نتیجه نوع و اندازه مختلف تنش ها در صفحات تکتونیکی قابل ایجاد هستند. همچنین یکی از مهمترین مواردی که می تواند بر نتایج عملیات شکافت هیدرولیکی مؤثر باشد شکستگی های طبیعی موجود مخزن هستند که نیازمند مطالعه و شناسایی این شکستگی ها در لایه ها هدف شکاف هیدرولیکی می باشد.

اهمیت سنگ شناسی در طراحی و اجرای عملیات شکاف هیدرولیکی در بحث های مختلفی قابل مشاهده است. از جمله این موارد می توان به تأثیر کانی های رسی، نوع سنگ شناسی، میزان سیمان شدگی، دیاژنز و شکنندگی سنگ و سایر پارامترها اشاره کرد.

شناسایی کانی های رسی در زون های هدف اهمیت بسیاری دارد. این کانی ها شامل ایلیت، اسمکتیت، کائولینیت و کلریت می باشند. کانی های رسی از جنس اسمکتیت با جذب آب و آماس سبب افت شدید تراوایی شکاف هیدرولیکی ایجاد شده می شوند و می توانند باعث شکست عملیات شوند. جهت شناسایی انواع کانی های رسی از روش های آزمایشگاهی متفاوتی مانند پراش پرتو ایکس XRD، طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس XRF و میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده می شود.

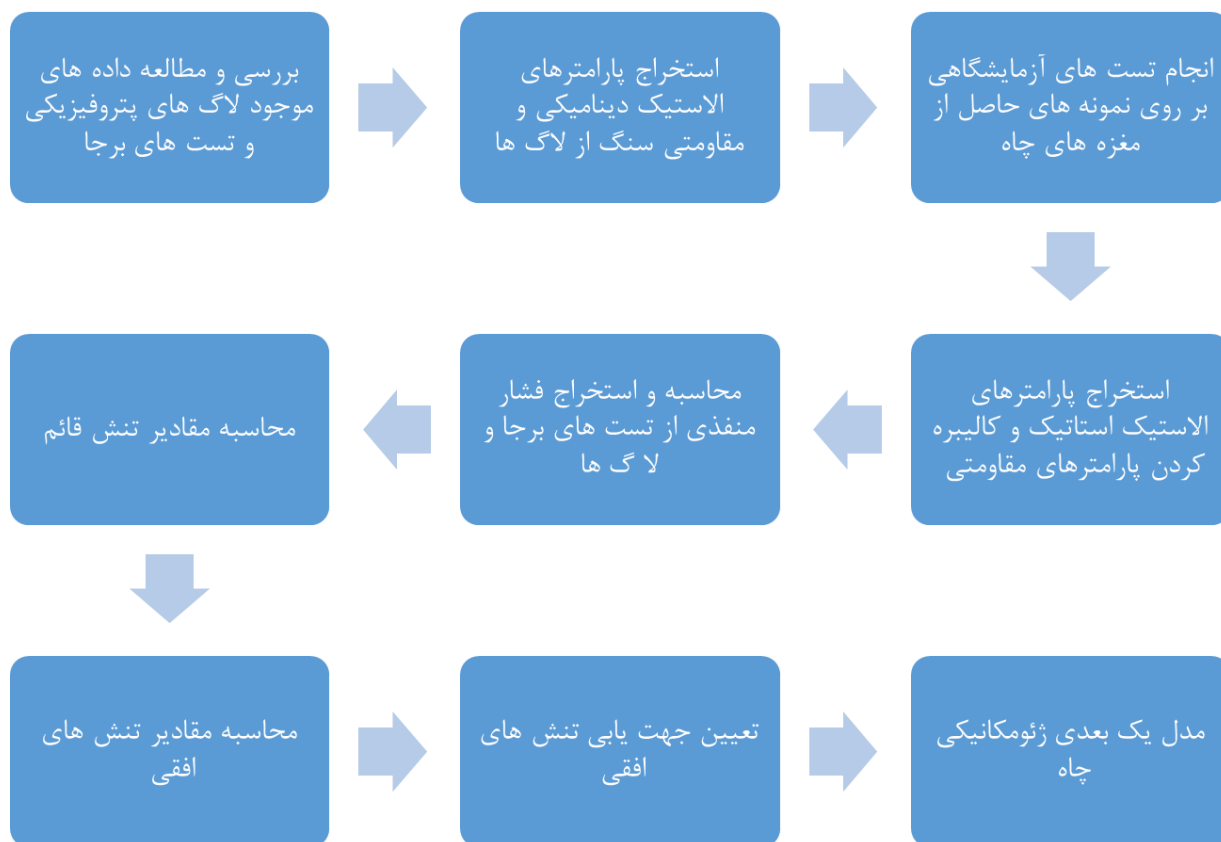
شناخت نوع لیتولوژی مخازن، شامل ماسه سنگ ها، کربنات ها و دیگر انواع سنگ ها، به مهندسان و زمین شناسان کمک می کند تا رفتار سنگ ها در برابر فشارهای هیدرولیکی را پیش بینی کنند. هر نوع سنگ ویژگی های خاصی از جمله تخلخل، تراوایی و مقاومت در برابر شکست دارد که بر روی کارایی عملیات تأثیر می گذارد.

۳-۳- پتروفیزیک

اهمیت پتروفیزیک در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی مربوط به نگارهای چاه ها می باشد که در استخراج پارامترهای مکانیک سنگی و تنش های اصلی به صورت پیوسته به کار می روند. این نگارها شامل نگارهای اولیه و نگارهای تخصصی ثانویه می شوند. نگارهای اولیه شامل دما، نوترون-چگالی، اشعه گاما، صوتی (سرعت موج فشاری) می باشند. نگارهای تخصصی ثانویه شامل نگارهای دو قطبی، و نگارهای تصویری می باشند. این نگارها در محاسبات پارامترهای مکانیک سنگی، اندازه تنش ها و جهت یابی آنها، و همچنین نوع و جهت یابی شکستگی های طبیعی موجود در مخزن مورد استفاده قرار می گیرند. لازم است مقادیر پارامترهای مکانیک سنگی از جمله مدول های الاستیک با استفاده از نتایج تست های مکانیک سنگی بر روی مغزه یا روابط تجربی معتبر به مقادیر استاتیک تبدیل شوند.

۳-۴- ژئومکانیک

مهم ترین بخش در طراحی شکاف هیدرولیکی استخراج پارامترهای مکانیک سنگی و ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی برای چاه هدف است. برای این منظور لازم است از داده های نگار چاه، تست های برجا، تست های آزمایشگاهی استفاده می شود. در شکل شمایی از مراحل انجام کار برای ساخت مدل یک بعدی نشان داده شده است.



۳-۴-۱- مراحل ساخت مدل یک بعدی ژئومکانیکی

پارامترهای مورد نظر شامل پارامترهای الاستیک سنگ، پارامترهای مقاومتی سنگ، و تنش های اصلی و فشار منفذی است. بدست آوردن این پارامترها از روش های مختلفی شامل استخراج از نگارهای پتروفیزیکی، تست های آزمایشگاهی بر روی مغزه های چاه و تست های برجا می باشد. پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ با استفاده از تست های آزمایشگاهی و نگارهای پتروفیزیکی قابل دستیابی است. مقادیر تنش های اصلی و فشار

منفذی با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی، نگارهای تصویری، تست های برجا، با روابط و آنالیز نتایج قابل دستیابی است. در ادامه مهم ترین تست های مکانیک سنگی و نتایج حاصل از آنها بررسی شده است.

ردیف	نام تست آزمایشگاهی	نتایج قابل انتظار
۱	آزمایش تعیین تخلخل و چگالی	تخلخل، چگالی
۲	تست چکش اشمیت	مقاومت فشاری تک محوری
۳	تست اندیس بار نقطه ای	مقاومت فشاری تک محوری
۴	تست مقاومت فشاری تک محوری	مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، نسبت پواسون
۵	تست مقاومت فشاری سه محوری	مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی سنگ، چسبندگی سنگ، مدول یانگ، نسبت پواسون
۶	تست برزیلین	مقاومت کششی سنگ
۷	تست چقرمگی شکست	چقرمگی شکست
۸	تست سرعت امواج صوتی	سرعت موج های برشی و فشاری

انجام تست های آزمایشگاهی نیازمند مغزه های چاه است و همچنین نیازمند صرف هزینه بالاست و نتایج آن پیوسته نیست، از این رو استفاده از نگارهای پتروفیزیکی برای استخراج این پارامترها می تواند سودمند باشد. نتایج حاصل را می توان با استفاده از این مقادیر کالیبره کرد.

مدول های الاستیک دینامیک با استفاده از نگارهای سرعت امواج برشی و فشاری، و نگار چگالی محاسبه شود. در میان مدول های الاستیک مدول یانگ و نسبت پواسون از اهمیت خاصی برخوردار هستند. از آنجایی که لازم است

تا مقادیر استاتیک در مدلسازی استفاده شود، بایستی مقادیر دینامیکی محاسبه شده از نگارها را به مقادیر استاتیک تبدیل کرد. این کار با استفاده نتایج تست های مکانیک سنگی بر روی نمونه های حاصل از مغزه های چاه و یا روابط تجربی امکانپذیر است.

پارامتر محاسبه شده	رابطه
مدول یانگ دینامیک	$E_{dyn} = \rho v_s^2 \frac{3v_s^2 - 4v_p^2}{v_p^2 - v_s^2}$
ضریب پواسون دینامیک	$\nu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$
ضریب لامه	$\lambda_{dyn} = \rho(v_p^2 - 2v_s^2)$

در این روابط V_p ، V_s و ρ به ترتیب سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری و چگالی می باشند.

برای پارامترهای مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی سنگ، چسبندگی سنگ، مقاومت کششی سنگ نیز روابط تجربی وجود دارد که با استفاده از آنها می توان این پارامترها را محاسبه کرد.

پارامتر محاسبه شده	رابطه
مقاومت فشاری تک محوری	$UCS = 570.808e^{-0.031\Delta T_{co}}$
مقاومت فشاری تک محوری	$UCS = \frac{(1450 \times (\frac{304.8}{\Delta T_{co}}))}{145.8}$
چسبندگی سنگ	$C = \frac{UCS}{2(\sqrt{(1 + (\tan\phi)^2} + \tan\phi)}$
چسبندگی سنگ	$C = \frac{UCS}{2 \tan(45 + \frac{\phi}{2})}$

$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{V_p - 1000}{V_p + 1000} \right)$	زاویه اصطکاک داخلی (شیل)
--	--------------------------

در این روابط UCS مقاومت فشاری تک محوری سنگ، ΔT_{co} زمان عبور موج فشاری، C چسبندگی، V_p سرعت موج فشاری و φ زاویه اصطکاک داخلی سنگ می باشند.

محاسبه تنش های اصلی و فشار منفذی

تنش های اصلی در حالت معمول شامل تنش قائم و دو تنش افقی است. بسته به اندازه تنش قائم نسبت به دو تنش افقی سه رژیم تنش اصلی وجود دارد. در حالتی که اندازه تنش قائم از دو تنش افقی بیشتر باشد، رژیم تنش نرمال را داریم. در حالتی که اندازه تنش قائم از یکی از تنش های افقی کمتر باشد رژیم تنش امتداد لغز و در حالتی که از هر دو تنش افقی کمتر باشد رژیم تنش معکوس را داریم.

برای محاسبه اندازه تنش ها و فشار منفذی راهکارهایی شامل تست های درون چاهی و روابط موجود است.

فشار منفذی

اندازه گیری فشار منفذی با استفاد از تست درون چاهی و همچنین با استفاده از روابط تجربی امکانپذیر است. تست های درون چاهی شامل تست های RFT، XPT و MDT هستند. روش های غیر مستقیم نیز شامل روش ایتون می باشد که با استفاده نگارهای مقاومت، هدایت الکتریکی، زمان عبور موج و ضریب نمایی حفاری قابل محاسبه می باشد.

تنش قائم

تنش قائم ناشی از وزن سنگ های روباره است و با استفاده از چگالی و ضخامت این سنگ ها قابل محاسبه می باشد.

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

که در آن S_v تنش قائم، ρ_w چگالی آب، ρ چگالی سنگ، z_w عمق آب (برای میادین دریایی)، z عمق سنگ

تنش افقی مینیمم و ماکسیمم

برای محاسبه تنش افقی مینیمم می توان از تست درون چاهی بر پایه شکافت هیدرولیکی استفاده کرد. با استفاده از این تست می توان تنش افقی مینیمم را با بیشتر دقت برآورد کرد. همچنین برای محاسبه تنش های افقی روابط مختلفی وجود دارد که از جمله مهم ترین آنها می توان به روابط پوروالاستیک اشاره کرد.

$$S_h = \frac{\nu}{1 - \nu} (S_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y)$$

$$S_H = \frac{\nu}{1 - \nu} (S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x)$$

در روابط بالا S_h تنش افقی مینیمم، S_H تنش افقی ماکسیمم، ν ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و S_v تنش عمودی، E_{sta} مدول الاستیسیته استاتیک، ϵ_x و ϵ_y به ترتیب کرنش تکتونیک در جهت تنش افقی مینیمم و ماکسیمم می باشد.

جهت یابی تنش های افقی مینیمم

جهت یابی تنش های افقی یکی از مسائل مهم در مطالعات ژئومکانیکی است. اگر جهت یکی از تنش های افقی مشخص شود جهت تنش افقی دیگر ۹۰ درجه با آن اختلاف دارد و این دو تنش بر یکدیگر عمود هستند. روش های مختلفی چون نقشه تنش های جهان، نقشه های زمین شناسی، مکانیزم صفحه کانونی زلزله، ناهمسانگردی سرعت موج برشی، جهت گیری شکاف هیدرولیکی و شکستگی های برشی و کششی دیواره چاه ناشی از تنش برای تعیین جهت تنش وجود دارد، که مرسوم ترین آنها در مطالعات ژئومکانیک استفاده از لاگ های تصویری می باشد. با استفاده از لاگ های تصویر شکستگی های برشی و کششی در دیواره چاه قابل مشاهده و شناسایی هستند. شکستگی های برشی در دیواره چاه قائم در راستای تنش افقی مینیمم و شکستگی های کششی در راستای تنش افقی ماکسیمم رخ می دهند.

۳-۵- طراحی سیالات

۳-۵-۱- مقدمه‌ای بر سیالات تکنولوژی شکافت هیدرولیکی^۱

شکافت هیدرولیکی متداول‌ترین روش تحریک چاه‌هایی است که نرخ تولید آنها به دلیل تراوایی پایین مخزن و یا آسیب‌زدگی محیط پیرامون چاه، غیر اقتصادی است. شکافت هیدرولیکی به عنوان روشی برای بازیابی گاز طبیعی غیرمتمعارف از سازندهای شیل (tight gas) برای چندین دهه وجود داشته است. اخیراً بازیابی نفت خام غیرمتمعارف از سازندهای شیل و از سازندهایی با تراوایی بسیار کم که غیرقابل دسترس بود نیز مورد بررسی و توسعه قرار گرفته است. بخش مهمی از دانش فنی این تکنولوژی مربوط به علم سیالات و مواد تزریقی در فرایند اجرای عملیات است. سیال شکافنده شامل سیال پایه و هم مواد افزودنی می‌شود. افزودنی‌ها طیف وسیعی از مواد شیمیایی هستند که برای تأثیرگذاری بر خواص کلی سیال شکافنده استفاده می‌شوند. عوامل نگهدارنده (پروپانت‌ها و اسید) برای جلوگیری از بسته شدن شکافت ایجاد شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جهت آشنایی با این بخش از تکنولوژی و دستیابی به دانش فنی آن، مطالعات منابع اطلاعاتی در این فصل در بر روی این موضوع متمرکز می‌شود. در این فصل به ابعاد گوناگون فناوری شکافت هیدرولیکی از نظر سیالات و مواد به کار رفته پرداخته می‌شود. از آنجاکه ویژگی بارز این فناوری، ایجاد شکافت از طریق تزریق سیالات است، در این فصل به تمام عوامل درگیر از جمله سیالات شکافنده (به تفکیک سیال پایه آبی، پایه روغنی، بر پایه فوم و ...)، مواد افزودنی شامل ژل‌های اتصال عرضی (crosslink)، ژل‌سازها، انواع شکننده‌های ژلی، باکتری‌کش‌ها، تثبیت‌کننده‌ها، بازدارنده‌های خوردگی، عوامل کنترل pH و سورفکتانت‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه خصوصیات آزمایشگاهی سیالات شکافنده و آزمون‌های مورد نیاز به‌ویژه آزمون‌های در ارتباط با خواص رئولوژیکی که بسیار با اهمیت است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور باز نگه داشتن شکاف‌های ایجاد شده پس از تزریق سیال، مواد

^۱ - Fracturing Fluid

نگه‌دارنده پروپانت و فناوری شکافت اسیدی استفاده می‌شود که در این فصل ارائه می‌گردد. در انتهای فصل نیز به کاربرد نانوفناوری در مخازن نامتعارف اشاره می‌گردد و به نقش آن در پروپانت‌ها و مواد کنترل‌کننده اتلاف سیال پرداخته می‌شود.

۳-۵-۲- سیال‌های شکافنده^۱

انواع شکافنده عبارتند از: سیالات پایه آبی آب (Water-based fluids)، سیالات پایه روغن (Oil-based fluids)، سیالات پر انرژی (Energized fluids)،^۲ امولسیون‌های چند فازی (Multiphase emulsions).

۳-۵-۳- سیالات پایه آبی

به دلیل هزینه کم، کارایی بالا و سهولت کار، پرکاربردترین سیالات شکافنده هستند. برای تهیه یک محلول ویسکوز که قابلیت تعلیق پروپانت در دمای محیط را داشته باشد می‌توان بسیاری از پلیمرهای محلول در آب را استفاده کرد. اما این محلول‌ها با افزایش دما به‌طور قابل توجهی رقیق می‌شوند. برای جبران اثرات حرارتی می‌توان غلظت بارگذاری پلیمر را افزایش داد ولی این روش گران است.

سیال شکافنده عمدتاً از آب و ماسه (بیش از ۹۸٪) تشکیل شده است. مواد شیمیایی اضافی برای کاهش اصطکاک، خوردگی و جلوگیری از رشد باکتری‌ها و ارائه مزایای دیگر در طول فرآیند تحریک چاه اضافه می‌شود. سیالات آب روان با ویسکوزیته پایین، شکاف با عرض کمتر و در نتیجه طول بیشتر ایجاد می‌کنند. انواع سیالات در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

^۱ - Fracturing Fluid

^۲ - سیالات ویژه مانند فوم‌های نیتروژن و/یا دی اکسیدکربن یا پروپان نیاز به توجه ویژه در هنگام پمپاژ دارند در حالیکه استانداردهای QA/QC رعایت می‌شود.

جدول ۳-۱: سیالات گوناگون که برای شکافت هیدرولیکی استفاده می‌شود

Fluid	Fluid Type	Main Composition
Water based	Slickwater	Water + sand (+chemical additives)
Linear fluids		Gelled water
Cross-linked fluid		Cross-linking agent
Viscoelastic fluids		Electrolyte + surfactant
Surfactant gel fluids		
Foam based	Water-based foam	Water and foamer + N ₂ or CO ₂
Acid-based foam		Acid and foamer + N ₂
Alcohol-based foam		Methanol and foamer + N ₂
Oil based	Linear fluids	Oil, gelled oil
Cross-linked fluid		Phosphate ester gels
Water emulsion		Water + oil + emulsifiers
Acid based	Linear	
	Cross-linked	
	Oil emulsion	
Alcohol based	Methanol/water mixes or 100% methanol	Methanol + water
Emulsion based	Water-oil emulsions	Water + oil
CO ₂ -methanol		CO ₂ + water + methanol
Other fluids	Liquid CO ₂	CO ₂
Liquid nitrogen		N ₂
Liquid helium		He
Liquid natural gas		LPG (butane and/or propane)

در واقع، سیالات بر پایه آب مزیت قابل توجهی نسبت به سایرین دارند، از جمله:

- غیرقابل اشتعال بودن
- وزن مخصوص بالاتر، که به معنای نیازهای کمتر نیروی هیدرولیک است
- ویسکوزیته کم، به این معنی که پمپاژ راحت‌تر سیال است
- همچنین در دسترس بودن و هزینه کمتر

۳-۵-۴- سیالات پایه روغنی^۱

سیالات شکافنده روغنی اولین سیالات با ویسکوزیته بالا هستند که در عملیات شکافت هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفتند. مزیت این نوع سیال سازگاری تقریباً با هر نوع سازندی است. اولین بار برای ایجاد شکافت از بنزین به عنوان سیال پایه، روغن پالم به عنوان عامل ژل و اسید نفتنیک به عنوان اتصال عرضی استفاده شده است. استفاده از روغن های ژل دار (gelled oils) دارای معایبی است. هنگام استفاده از روغن های خام با ویسکوزیته بالا یا روغن های خام که حاوی مقدار زیادی سورفکتانت های طبیعی هستند، مشکلات ژل سازی ممکن است رخ دهد.

۳-۵-۵- سیالات بر پایه فوم (کف)

برای سازندهای حساس به آب و محیط هایی که آب کمیاب است، سیالات مبتنی بر فوم مدت هاست که به عنوان یکی از بهترین سیال های شکافنده در نظر گرفته می شوند. مزیت اصلی این سیال ویسکوزیته اضافی به دست آمده توسط فوم نسبت به دی اکسید کربن مایع است. فوم از افزودن گاز به سیال ایجاد می شود. برای ایجاد ثبات در مخلوط، یک ماده فعال کننده سطح (سورفاکتانت) به کار می رود که کشش سطحی را در سطح مشترک گاز / مایع کاهش می دهد. فوم ها بازیابی سیال از شکاف را تسریع می کنند، پس سیالات بسیار خوبی برای استفاده در مخازن کم فشار هستند. سیالات شکافنده بر پایه امولسیون، محلول های بسیار ویسکوز با خواص حمل پروپانت مناسب هستند. با افزودن گاز فشرده (معمولاً دی اکسید کربن یا نیتروژن)، که بخش قابل توجهی از انرژی مورد نیاز برای بازیابی سیال را فراهم می کند و آب بسیار کمتری را در سازندهای حساس به آب قرار می دهد.

^۱ Oil-Based Fluids

۳-۵-۶- سیالات برودتی^۱

دی اکسیدکربن سیال (یا فوق بحرانی) را می توان به جای آب به عنوان سیال شکافنده استفاده کرد. خواص فیزیکی دی اکسیدکربن مایع آن را به یک سیال منحصر به فرد تبدیل می کند. دی اکسید کربن ترکیبی نسبتاً بی اثر است که بسته به دما و فشار به صورت جامد، مایع، گاز یا سیال فوق بحرانی وجود دارد. دی اکسیدکربن فوق بحرانی یک حالت سیال است که در آن دی اکسیدکربن در دمای بحرانی (۳۱,۱ درجه سانتیگراد) و فشار بحرانی (۱۰۷۰ psi) یا بالاتر از آن نگه داشته می شود.

۳-۵-۷- سیالات مبتنی بر امولسیون

سیالات مختلفی بر پایه امولسیون وجود دارد. بسیاری سیالات امولسیون های روغن و آب هستند و بنابراین می توانند ذیل سیالات پایه روغنی طبقه بندی شوند. به طور کلی، سیالات امولسیون استفاده از آب را کاهش داده یا به طور کامل حذف می کنند.

۳-۵-۸- سیالات پایه الکلی

در دهه ۱۹۹۰ متانول برای اولین بار برای سازندهای دارای (۱) نفوذپذیری کم با محتوای رس بالا، (۲) فشار پایین حفره پایین به عنوان سیال پایه در کاربردهای شکافت هیدرولیکی در کانادا و آرژانتین مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۶- مواد افزودنی سیالات شکافنده

افزودنی ها مواد شیمیایی هستند که برای دستیابی به ویژگی های هدف خاص سیال شکافنده (جدول ۳-۲) به سیال شکاف اضافه می شوند و بین ۰,۱ تا ۰,۵ درصد از حجم کل سیال شکافنده را تشکیل می دهند.

جدول ۳-۲: انواع مواد افزودنی سیالات شکافنده (Fracturing Fluid Additives)

توضیحات	ترکیب	نوع
---------	-------	-----

^۱- Cryogenic Fluids

Acid	Hydrochloric acid (also called <i>muriatic acid</i>)	به منظور ایجاد شکاف سازندهای شیل، اسیدها برای تمیز کردن سیمان از سوراخ‌های پوشش و گل حفاری که تخلخل سازند طبیعی را مسدود می‌کند، غلظت اسید رقیق معمولاً ۱۵٪ حجمی است. در واقع حل کردن کانی‌ها و رس‌ها برای باز کردن مسیرها و جلوگیری از انسداد
Biocide	Glutaraldehyde	باکتری‌ها که باعث مسدود کردن مسیر، تولید گازها و محصولات جانبی مزاحم و ایجاد خوردگی می‌شوند سیالات شکافنده معمولاً حاوی ژل‌هایی آلی هستند و می‌توانند محیطی برای رشد باکتری‌ها فراهم کنند. باکتری‌ها می‌توانند عامل ژل‌کننده را تجزیه کنند و ویسکوزیته را کاهش دهند. آفت‌کش‌ها به مخازن اختلاط با عوامل ژل‌کننده اضافه می‌شوند تا این باکتری‌ها را از بین ببرند.
	Sodium chloride شککننده (Breaker)	شککننده‌ها در پایان عملیات برای تسریع و تسهیل بازیابی یا «جریان برگشتی» سیال شکافنده را افزایش دهد.
Corrosion inhibitor	N,N - Dimethyl Formamide	در سیالات شکافنده حاوی اسید استفاده می‌شود و از خوردگی لوله‌های فولادی، پوشش چاه، ابزار و مخازن جلوگیری می‌کند

Cross - linking agent	Borate salts	دو نوع ژل خطی و اتصال عرضی در سیالات استفاده می‌شود. ژل‌های اتصال عرضی دارای مزیت ویسکوزیته بالاتر هستند که به سرعت تجزیه نمی‌شوند و توانایی غلیظ و سفت کردن سیال برای حمل پروپانت را دارند.
Friction reducer	Petroleum distillate (also called <i>mineral oil</i>)	اصطکاک را بین سیال (fracture fluids) و سطح شکاف به حداقل می‌رساند به سیالات شکافنده بهبود نرخ و فشار بهینه تزریق شوند.
Gel	Guar gum (hydroxyethyl cellulose)	از ژل‌ها در سیالات برای افزایش ویسکوزیته به منظور معلق نگه داشتن پروپانت در طول مسیر سیال استفاده می‌شود. همچنین عوامل ژل‌کننده زیست تخریب پذیر هستند
سورفکتانت		کاهش کشش سطحی
پایدارکننده رس		جلوگیری از جداشدن رس‌ها از سطح سنگ
کف ساز Foamer		افزایش ظرفیت حمل پروپانت توسط سیال و کاهش حجم سیال مورد نظر
کف شکن Defoamer		شکافتن کف در هنگامی که دیگر به آن نیازی نیست
بازدارنده رسوب		جلوگیری از تشکیل رسوب های معدنی
کاهنده‌های اصطکاک (Frictin) (Reducer)		افزایش نرخ و بازده جابه‌جایی سیال شکاف زنی از طریق کاهش اصطکاک بین سیال و سطح شکاف

کنترل PH	بافر
مسدود کردن موقتی بعضی مسیرها و منحرف کردن جهت جریان برای دستیابی یک نواخت سیال شکاف به مخزن افزایش بازده سیال با نگه داشت سیال درون شکاف و جلوگیری از نفوذ و هدررفت آن به ماتریس^۲ سنگ از سطوح شکاف	عامل منحرف کننده جریان Diverting agent بازدارنده اتلاف سیال

۳-۶-۱- مواد افزودنی کنترل اتلاف سیال^۳

افزودنی‌های کنترل اتلاف سیال که منجر به جلوگیری از نشت بیش از حد می‌شود و اثربخشی سیال شکافنده را حفظ می‌کند. مواد افزودنی اتلاف سیال در گذشته و حال شامل مواد پل‌زننده مانند ماسه ۱۰۰ مش، رزین محلول ۱۰۰ مش، یا مواد گچکاری مانند مخلوط نشاسته، تالک، آرد سیلیس (سیلیکا پودری ریز) و انواع کانی‌های رسی مناسب است. در این فرآیند، افزودنی اتلاف سیال، که تا حد زیادی نامحلول است، هنگامی که به سیال شکافنده اضافه می‌شود، به صورت به ذرات با ابعاد میکرونی (میکرومتر) پراکنده می‌شود. افزودنی اتلاف سیال، یک لایه نازک (که گاهی اوقات کیک فیلتر نامیده می‌شود) روی دیوارهای داخلی شکاف تازه ایجاد شده رسوب می‌کند.

۳-۶-۲- باکتری کش‌ها و آفت کش‌ها^۴

یکی از مشکلات طراحی شکافت هیدرولیکی که هنگام استفاده از پلیمرهای آلی در سیالات شکافنده ایجاد می‌شود، بروز رشد باکتری در سیالات است. آفت کش‌ها افزودنی‌هایی برای کنترل رشد باکتری‌ها هستند و اغلب برای سیالات پایه آبی ضروری هستند.

^۱ Diverting agent

^۲ matrix

^۳ - Fluid-loss additives

^۴ - Biocides/Bactericides

۳-۶-۳- فرک آب

فرک آب از آب، یک عامل کنترل خاک رس و یک کاهش دهنده اصطکاک (پلی آکریل آمید)^۱ تشکیل شده است. گاهی اوقات یک عامل بازیابی آب^۲ (WRA) اضافه می شود تا هرگونه نفوذپذیری نسبی یا اثرات بلوک آب را کاهش دهد. مزیت اصلی استفاده از "Water Frac" هزینه کم، سهولت اختلاط و توانایی بازیابی و استفاده مجدد از آب است. نقطه ضعف اصلی ویسکوزیته کم است که منجر به باریک شدن عرض شکافت می شود.

۳-۶-۴- تثبیت کننده های خاک رس

تثبیت کننده های خاک رس نوعی عوامل کنترل خاک رس (Clay Control Agents) هستند. کانی های رسی چالش هایی را ایجاد می کنند که به دلیل تورم در حضور آب شناخته شده اند. در درون لایه های کریستالی، کانی های رسی حاوی کاتیون هایی (معمولاً سدیم و پتاسیم) هستند. پس از تماس با آب، این کاتیون ها حل می شوند و در نتیجه ناپایداری خاک رس ایجاد می شود که ممکن است به صورت تورم ظاهر شود. KCl یک تثبیت کننده رس آلی به سیال پایه اضافه می شود تا از تعامل آب با کانی مخزن جلوگیری شود. KCl معمولاً در غلظت ۲٪ اضافه می شود اما بسته به نتایج آزمایش ها می توان در غلظت های بالای ۸٪ اضافه کرد.

۳-۶-۵- شکننده های ژلی

سیال شکاف باید قابلیت کاهش ویسکوزیته را پس از انتقال پروپانت درون شکاف داشته باشد. این کاهش برای به حداقل رساندن بازگشت پروپانت همچنین به حداکثر رساندن بازگشت سیال شکافنده به سطح ضروری است. این کاهش با استفاده از مواد شیمیایی به نام شکننده ژل به دست می آید. پراکسیدهای فلزات قلیایی خاکی به عنوان ژل شکن های تأخیری در مایعات آبی قلیایی حاوی هیدروکسی پروپیل گوار توصیف شده اند.

¹ - (C₃H₅NO)_n

² - water recovery agent

۳-۶-۶- عوامل ژل ساز (Gelling Agents)

این مواد برای افزایش ویسکوزیته به سیال شکافنده اضافه می‌شوند که عرض شکاف را افزایش دهد و بتواند غلظت‌های بیشتری از مواد را بپذیرد. ویسکوزیته یک عامل ژل ساز در محلول تابعی از وزن مولکولی آن است. ویسکوزیته با افزایش طول زنجیره و غلظت افزایش می‌یابد.

۳-۶-۶-۱- ژل خطی^۱

این ماده از آب، یک عامل کنترل خاک رس و یک عامل ژل کننده مانند گوار، هیدروکسی پروپیل گوار (HPG) یا هیدروکسی اتیل سلولز (HEC) تشکیل شده است. مزیت اصلی ژل خطی (liner gel) قیمت پایین و ویژگی‌های بهبود یافته ویسکوزیته آن است. نقطه ضعف اصلی در مقایسه با فرک آب (water fracs) این است که چون آب برگشتی دارای ژل شکننده است، آب قابل استفاده مجدد نیست (Smith and Montgomery, 2015).

۳-۶-۶-۲- ژل‌های اتصال عرضی (Cross-Linked Gels)

این افزودنی از مواد مشابه یک ژل خطی با افزودن یک اتصال‌دهنده عرضی تشکیل شده که ویسکوزیته ژل خطی (linear gel) را از کمتر از ۵۰ cps به ۱۰۰۰ S یا ۱۰۰۰۰ S محدود می‌دهد. بنابراین می‌تواند غلظت‌های بیشتری از ماده را بپذیرد، اتلاف سیال را کاهش می‌دهد تا راندمان سیال را بهبود بخشد.

۳-۶-۶-۳- بورات (Borate)

بورات به شکل اسید بوریک، نمک‌های محلول کلسیم و منیزیم، و کمپلکس‌های بورات آلی، رایج‌ترین اتصال‌دهنده‌های عرضی (cross-linker) مورد استفاده امروزه است. سیال‌های شکافنده با اتصال‌دهنده عرضی بورات را می‌توان در طیف گسترده‌ای از شرایط اعمال کرد و در برابر تخریب برشی مقاوم هستند.

^۱- Linear Gel

۳-۶-۴- تیتانیوم و زیرکونیوم (Titanium and Zirconium)

از آنجایی که سیستم‌های اتصال‌هنده عرضی بورات به دماهای کمتر از ۲۵۰ درجه فارنهایت و pH بالای ۸ محدود می‌شدند، سیالات اتصال عرضی فلزی برای گسترش این محدوده ایجاد شدند. در مقایسه با سیالات اتصال عرضی بورات، سیالات اتصال عرضی فلزی دارای چندین مورد مزایا / معایب هستند:

۱. پیوند اتصال عرضی فلزی یک پیوند کووالانسی قوی است که باعث می‌شود پیوند عرضی در برابر نرخ‌های برشی بالا مستعد شود. هنگامی که پیوند شکسته شود، مانند پیوند اتصال عرضی بورات ترمیم نمی‌شود.

۲. سیستم‌های پلیمری اتصال عرضی فلزی را می‌توان ساخت که طیف وسیعی از شرایط pH را پوشش می‌دهد، بنابراین می‌توان از آنها در سیال‌های شکافنده بر پایه CO₂ استفاده کرد. آنها همچنین در دماهای بالا بسیار پایدارتر هستند.

۳. به دلیل ماهیت دائمی پیوند عرضی فلزی، وزن مولکولی باقیمانده ژل شکسته بسیار بیشتر از وزنی است که از ژل‌های خطی یا بوراتی با پیوند اتصال عرضی تشکیل شده است. این باعث درجه بیشتری از آسیب محتوای پروپانت و از دست دادن رسانایی می‌شود.

۳-۶-۵- گوار^۱

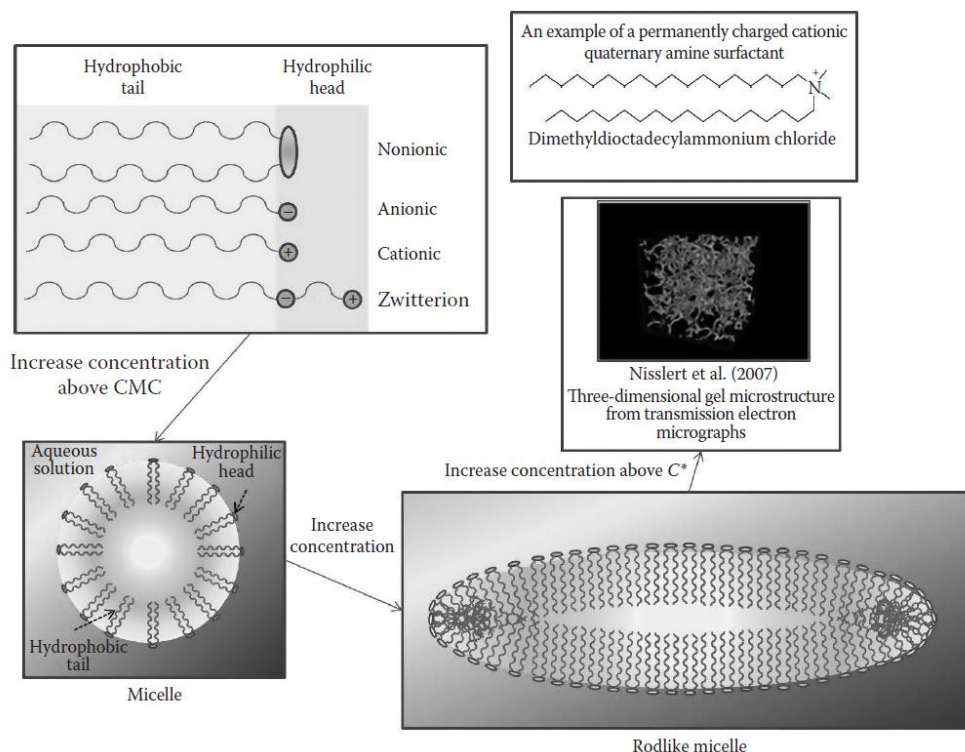
گوار و مشتقات آن هیدروکسی پروپیل گوار (k)، کربوکسی متیل گوار (CMG) و کربوکسی متیل هیدروکسی پروپیل گوار (CMHPG) رایج‌ترین عوامل ژل‌ساز مورد استفاده در فرآیند شکافت هیدرولیکی هستند. عوامل ژل‌کننده مبتنی بر گوار، معمولاً هیدروکسی پروپیل گوار، به دلیل خواص رئولوژیکی مطلوب، اقتصادی بودن و سهولت هیدراتاسیون، به‌طور گسترده برای viscify کردن سیالات شکافنده استفاده می‌شوند.

^۱- Guar

۷-۳- سورفکتانت ویسکوالاستیک (Viscoelastic Surfactant)

سورفکتانت‌های ویسکوالاستیک (VESs) سیال‌های شکافنده پایه آبی بدون پلیمر هستند که ویسکوزیته خود را از طریق ارتباط مولکول‌های سورفکتانت ایجاد می‌کنند (شکل ۱-۳). با افزایش غلظت سورفکتانت، مولکول‌ها به نقطه‌ای می‌رسند که توده‌هایی به نام میسل تشکیل می‌دهند که در آن دم‌های آبگریز هسته را تشکیل می‌دهند و سرهای آب‌دوست با مایع آبی اطراف در تماس هستند.

سورفکتانت‌های آنیونی، کاتیونی و یون دوقطبی (zwitterionic) برای فرمولاسیون VES استفاده می‌شود. مزیت اصلی این سیالات عدم آسیب رساندن به هدایت و رسانایی شکاف است. عیب اصلی این سیالات پایه سورفکتانت قوی آنهاست که آنها را با بسیاری از سیالات مخزن ناسازگار می‌کند.



شکل ۱-۳: ساختار ضخیم‌کننده‌های ویسکوالاستیک

۳-۸- کاهنده‌های اصطکاک^۱

برای بهینه‌سازی فرآیند شکافت هیدرولیکی، سیالات پایه آبی باید با حداکثر سرعت پمپ شوند و سیالات باید با حداکثر فشار تزریق شوند. افزایش سرعت و فشار جریان به این روش می‌تواند منجر به سطوح نامطلوب اصطکاک در داخل چاه تزریق شود. به‌منظور به حداقل رساندن اصطکاک، کاهنده‌های اصطکاک به سیالات شکافنده پایه آبی اضافه می‌شوند.

۳-۹- بازدارنده‌های خوردگی اسیدی^۲

بازدارنده‌های خوردگی در مخلوط‌های سیال اسیدی مورد نیاز هستند زیرا اسیدها باعث خوردگی لوله‌های فولادی، لوله‌های جداری، ابزارها و مخازن ذخیره می‌شوند. بازدارنده‌های خوردگی که معمولاً در تکنیک شکافت اسیدی مورد نیاز هستند، خوردگی را متوقف نمی‌کنند بلکه میزان خوردگی را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهند. آنها با تشکیل یک لایه نازک روی لوله‌ها عمل می‌کنند که به‌عنوان یک مانع برای جلوگیری از واکنش اسید با لوله عمل می‌کند.

۳-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ویسکوزیته^۳ (Viscosity Stabilizers)

تثبیت‌کننده‌های ویسکوزیته به سیالات شکافنده اضافه می‌شوند تا از دست دادن ویسکوزیته در دمای بالای مخزن را کاهش دهند. دو مورد از رایج‌ترین تثبیت‌کننده‌ها متانول (مورد استفاده در ۵ تا ۱۰ درصد حجمی در حجم) و تیوسولفات سدیم هستند. استفاده از تثبیت‌کننده‌های ویسکوزیته در شکاف در دمای بالا کاربرد دارد.

^۱- Friction Reducers

^۲- Acid Corrosion Inhibitors

^۳- Viscosity Stabilizers

۳-۱۱- کنترل pH

pH سیال بر خواص مختلف سیال مثل سرعت ژل شدن اولیه پلیمر، ویژگی‌های اتصال عرضی، خواص شکننده ژل، کنترل باکتری، پایداری ویسکوزیته و سایر خواص اثر می‌گذارد. استیک اسید (CH_3COOH) از موارد کنترل‌کننده pH است. محدوده pH معمولی برای سیال شکافنده بین ۳ تا ۱۰ (تقریباً کل محدوده pH) است. بافرهای ساخته شده از اختلاط اسیدهای ضعیف با بازهای ضعیف برای حفظ pH مورد نظر استفاده می‌شوند.

۳-۱۲- سورفاکتانت‌ها^۱ (Surfactants)

سورفاکتانت (عامل فعال سطحی) را می‌توان به‌عنوان مولکولی تعریف کرد که به‌دنبال یک رابط است و توانایی تغییر شرایط را دارد. از آنجا که حلالیت جزئی در روغن و آب وجود دارد، سورفاکتانت تمایل به تجمع در سطح مشترک این سیالات دارد. بخش محلول در آب مولکول ممکن است از نظر یونی مثبت (کاتیونی)، منفی (آنیونی) یا مخلوط (آمفوتریک) باشد. این افزودنی به سیالات شکافنده اضافه می‌شوند تا کشش سطحی سیال شکافنده را کاهش دهند و بازیابی سیال و سازگاری بین سیال و ماتریس سازند بهبود یابد.

۳-۱۳- خصوصیات آزمایشگاهی سیالات شکافنده

سیال شکاف چندین بار نمونه‌برداری می‌شود که باید مطمئن شد که نقطه نمونه‌برداری به اندازه کافی در پایین دست منیفولد تخلیه مخلوط کن قرار دارد که تمام مواد افزودنی در مخلوط باشند و اختلاط کافی رخ داده باشد.

سیالات خطی (Linear fluids)

➤ آزمایش‌ها باید حداقل دو بار در سیال pad و حداقل چهار بار در حجم دوغاب انجام شود.

➤ ویسکوزیته ژل پایه و pH باید پایش و ثبت شود.

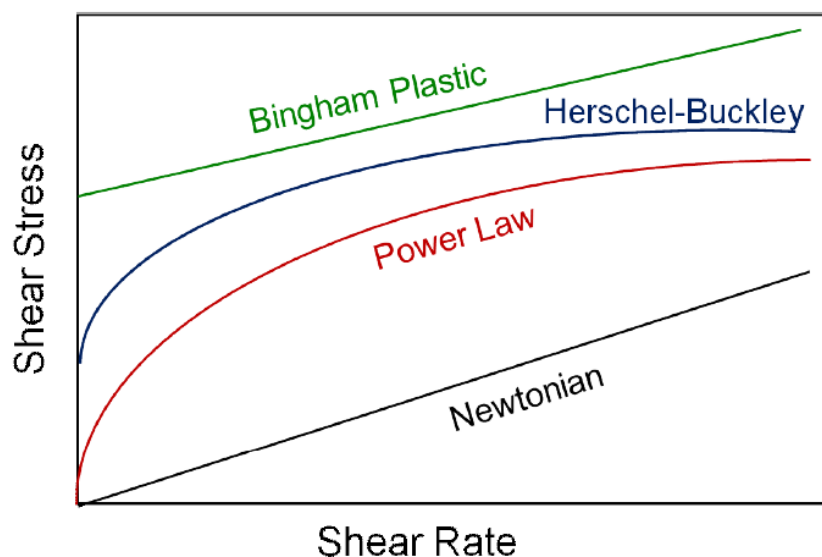
¹ - Surfactants

سیالات اتصال عرضی (Cross-linked fluids)

- در طول هر مرحله پمپاژ باید حداقل دو بار نمونه برداری و آزمایش انجام شود.
- ویسکوزیته ژل پایه، pH پایه ژل، pH اتصال عرضی و دما و/یا زمان اتصال متقابل کنترل و ثبت شود.
- مقداری از شکننده حاوی ژل را در حمام داغ در دمای مخزن قرار دهید و زمان استراحت ثبت شود. زمان استراحت معمولاً به عنوان نقطه‌ای است که ژل به ۱۰ cp یا کمتر می‌رسد.

۳-۱۳-۱- مدل‌های رئولوژیکی

آزمایش‌هایی که قبلاً توضیح داده شد، تنش برشی ایجاد شده توسط نرخ‌های برشی افزایشی خاص (به نام ramp) را اندازه‌گیری می‌کنند و این داده‌ها با استفاده از یک مدل رئولوژیکی برای توصیف رفتار سیال به مقدار «ویسکوزیته» تبدیل می‌شوند. شکل ۳-۲ سه مدل رایج در صنعت نفت را نشان می‌دهد که به شرح زیر است:



شکل ۳-۲: مدل‌های رئولوژیکی

۳-۱-۱۳-۱- سیال نیوتنی

یک سیال نیوتنی رابطه خطی بین نرخ برشی^۱ و تنش برشی^۲ دارد و ویسکوزیته سیال شیب نرخ برشی در برابر داده‌های سرعت برشی است.

۳-۱-۱۳-۲- پلاستیک بینگهام^۳

پلاستیک بینگهام با سیال نیوتنی متفاوت است، زیرا برای شروع جریان سیال به یک تنش برشی غیر صفر به نام مقدار تسلیم پلاستیک نیاز است. شیب داده‌های نرخ برشی/تنش برشی با ویسکوزیته پلاستیکی برچسب‌گذاری می‌شود، و این مدل به‌طور معمول برای سیمان و بسیاری از گل‌های حفاری استفاده می‌شود.

۳-۱-۱۳-۳- سیال Power law

این رایج‌ترین مدل سیال مورد استفاده برای سیالات شکاف فعلی است، و برای این مدل رئولوژیکی، داده‌های تنش برشی/نرخ برشی یک رابطه خطی در مقیاس‌های log-log ارائه می‌دهند. شیب این خط log-log با n نشان داده می‌شود و این نشانگر شاخص رفتار جریان است. $n' = 1$ دلالت بر یک سیال نیوتنی دارد. $n' > 1$ سیال سخت‌کننده برشی (stiffening fluid) نامیده می‌شود. و $n < 1$ یک سیال نرم‌کننده برشی است. n به‌طور کلی کمتر از ۱ برای سیالات شکافنده است. برای سیالات واقعی، K و n' با دما و زمان تغییر می‌کند، K به‌طور کلی کاهش می‌یابد و n به سمت یگانگی گرایش دارد.

۳-۱۴- مواد و سیالات نگهدارنده

استفاده از مواد نگهدارنده پس از تزریق سیالات شکافنده به‌منظور بازنگه داشتن مسیر شکاف پس از تشکیل آن است و این از طریق به‌کارگیری پروپانت و نیز شکافت اسیدی انجام می‌شود که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

^۱ - shear rate

^۲ - shear stress

^۳ - Bingham plastic

۳-۱۴-۱- پروپانت؛ معرفی، خصوصیات و کاربردها

پروپانت یک ماده جامد نگهدارنده شکاف است، معمولاً ماسه معمولی، ماسه تصفیه شده، یا یک ماده سرامیکی ساخته شده که برای باز نگه داشتن شکافت هیدرولیکی اعمال شده در حین و پس از عملیات شکافت هیدرولیکی طراحی شده است تا شکاف فرو نریزد و بسته نشود و مسیر رسانایی به چاه ایجاد شود. پروپانت‌ها معمولاً شامل ماسه یا سرامیک‌هایی مانند بوکسیت هستند. برای بهبود محتوای پروپانت، می‌توان مواد را با رزین روکش کرد، که به نگهدارنده کمک می‌کند در جای خود بماند و به چاه باز نگردد. خصوصیات فیزیکی پروپانت که در رسانایی شکاف تأثیر دارد عبارتند از استقامت پروپانت، سایز دانه و توزیع اندازه دانه، مقدار ریز دانه‌ها و ناخالصی‌ها، گردی و کروی بودن، دانسیته یا چگالی پروپانت. چالش‌های پیش روی بهبود تحریک شامل جایگیری مناسب مواد پروپانت، جلوگیری از خرد شدن یا جاسازی و استقرار، متوقف کردن محدودیت‌ها و توانایی جریان برگشت پروپانت به دهانه چاه است.

انواع اصلی پروپانت‌ها در ذیل توضیح داده می‌شوند:

۳-۱۴-۱-۱- ماسه سیلیس^۱

اصطلاح شن و ماسه به‌عنوان پروپانت به انواع کانی‌های خرد شده استفاده شده است و ممکن است ماسه سیلیسی واقعی نباشد اما ممکن است از سیلیس و سایر مواد معدنی تشکیل شده باشد انواع مختلفی از شن و ماسه در جهان وجود دارد که هر کدام ترکیب و خواص منحصر به فرد خود را دارند. به‌عنوان مثال، ماسه‌های سفید از جنس از سنگ آهک (CaCO_3) و همچنین ماسه‌های سیاهی از مگنتیت (Fe_3O_4 یا $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) یا با منشأ آتشفشانی و ماسه‌های زرد با سطح بالای آهن همگی ماسه محسوب می‌شوند.

^۱Proppant

^۲- Silica Sand

۳-۱۴-۲- پروپانت با پوشش رزین^۱

پروپانت پوشش داده شده با رزین معمولاً ماسه سیلیسی است که با رزین پوشش داده شده است که برای دو کاربرد اصلی استفاده می‌شود:

- (۱) پخش یکنواخت بار فشار که مقاومت در برابر خرد شدن ذرات ماسه سیلیس را بهبود می‌بخشد
 - (۲) نگه داشتن قطعات حاصل از تنش بسته شدن ناشی از فشار درون چاهی (downhole) و دما که نه تنها از جاری شدن قطعات شکسته به چاه (borehole) جلوگیری می‌کند، از بازگشت قطعات شکسته نیز به سطح در طول عملیات تولید جریان برگشتی جلوگیری می‌کند.
- RCS ماسه سیلیس خشک است که با رزین مایع در یک سیستم اختلاط در حضور یک کاتالیزور پوشانده شده است و پس از آن ماسه پوشش داده شده برای پخت کامل از یک محفظه حرارتی عبور داده می‌شود. استفاده از رزین مایع یک پوشش یکنواخت بر روی دانه‌های ماسه ایجاد می‌کند.

۳-۱۴-۳- مواد سرامیکی مصنوعی

۲

سومین نوع متداول پروپانت شامل مواد سرامیکی مصنوعی - معمولاً بوکسیت غیر فلزی (nonmetallurgic) یا خاک رس کائولن است.

پروپانت‌های سرامیکی معمولاً ویژگی‌های ذیل را دارند:

- مقاومت بالا در برابر خرد شدن
- حلالیت اسیدی پایین‌تر
- گرد بودن و کروی بودن آن بالاست

^۱- Resin- Coated Proppant

^۲- Manufactured Ceramic Materials

۳-۱۴-۴- اسید های مورد استفاده در سازند های کربناته

HCl رایج ترین اسید مورد استفاده است، در حالی که اسیدهای آلی استیک و فرمیک در چاه های با دمای بالاتر استفاده می شوند. HCl درجه صنعتی به عنوان ۳۰٪ تا ۳۴٪ فروخته می شود و از سازنده حمل می شود. استوکیومتری اسیدی برای محاسبه مقدار کربنات خورده شده توسط هر اسید خاص استفاده می شود

۳-۱۵- پارامتر های مخزنی/ بهره برداری تاثیر گذار در مهندسی عملیات شکافت هیدرولیکی

در مهندسی و طراحی یک عملیات شکافت هیدرولیکی پارامترهای مخزنی مختلف به همراه مفاهیم و اطلاعات متنوعی از چاه و مهندسی بهره برداری درگیر می باشند که در این بخش به ارائه این پارامترها پرداخته خواهد شد. گردآوری این داده ها نقشی حیاتی در نتایج و دقت و برنامه ریزی فعالیت های منجر به اجرای عملیات ایفا خواهد کرد. داده هایی که در این فصل به آن ها پرداخته می شود، شامل موارد زیر خواهد بود:

- داده های مخزنی
- داده های چاه، تولید و محدودیت های سرچاهی
- داده های سیال شکاف
- داده های ژئومکانیکی حاصل از آزمایش های مکانیک سنگ یا از طریق نمودار های پتروفیزیکی

اهمیت داده های مخزنی از آنجا خواهد بود که تعیین کننده ی نوع عملیات شکافت (شکاف با طول بیشتر برای سنگ تراوایی کم، شکاف با عرض بیشتر برای شرایط مخزنی با تراوایی بالا) می باشد. از طرفی داده های مربوط به ناحیه اطراف چاه و خود چاه تعیین کننده ی شرایط و روش انجام عملیات خواهند بود. برای مثال زاویه انحراف چاه در میزان فشار شکست، تحت شرایط خاص اثرگذار می باشد. همچنین داده های مربوط به نوع تکمیل چاه و مشبک کاری مسیر انجام عملیات و نتیجه ی آن را تعیین می کند. از طرفی سیال شکاف رئولوژی و هرزروی و هندسه ی

شکاف را تحت تاثیر گذاشته که نقش بسزایی در عملیات شکافت هیدرولیکی خواهد داشت. دیگر پارامتر حیاتی در طراحی و شبیه سازی عملیات شکافت هیدرولیکی، داده های ژئومکانیکی حاصل از آزمایش های سنگ می باشد. در حقیقت این داده ها پایه طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی می باشند.

۳-۱۵-۱- داده های مخزنی

پارامتر کلیدی که روی هدایت پذیری و حتی نوع شکاف ایجاد شده مستقیماً اثرگذار می باشد. در مخازنی با تراوایی متوسط تا خوب، شکاف با طول زیاد مورد نظر نمی باشد. نتایج مطالعات Zhichao Li نشان می دهد که بدون تغییر دیگر پارامترهای ورودی، هرچه سنگ مخزنی تراوایی بیشتری داشته باشد، شکافی با طول بیشتر بدست می آید. فشار مخزن از دیگر پارامترهای مهم در محاسبه تنش درجا و دارای اهمیت بیشتر در جریان برگشتی (برگشت پروپانت) از چاه می باشد. به طور کلی در صورت بالا بودن فشار منفذی، میزان فشار شکست کمتر خواهد بود (منجر به کاهش تنش موثر که تحت تاثیر پارامترهای پروالاستیک می باشد می گردد). ضخامت خالص ناحیه تولیدی می تواند توسط نمودارهای گاما تخمین زده شود. هرچه ضخامت ناحیه تولیدی زیادتر باشد، سطح مقطع بیشتری برای جریان در اختیار سیال تولیدی قرار گرفته و می تواند شکاف هیدرولیکی با سایز بزرگتر را در پی داشته باشد.

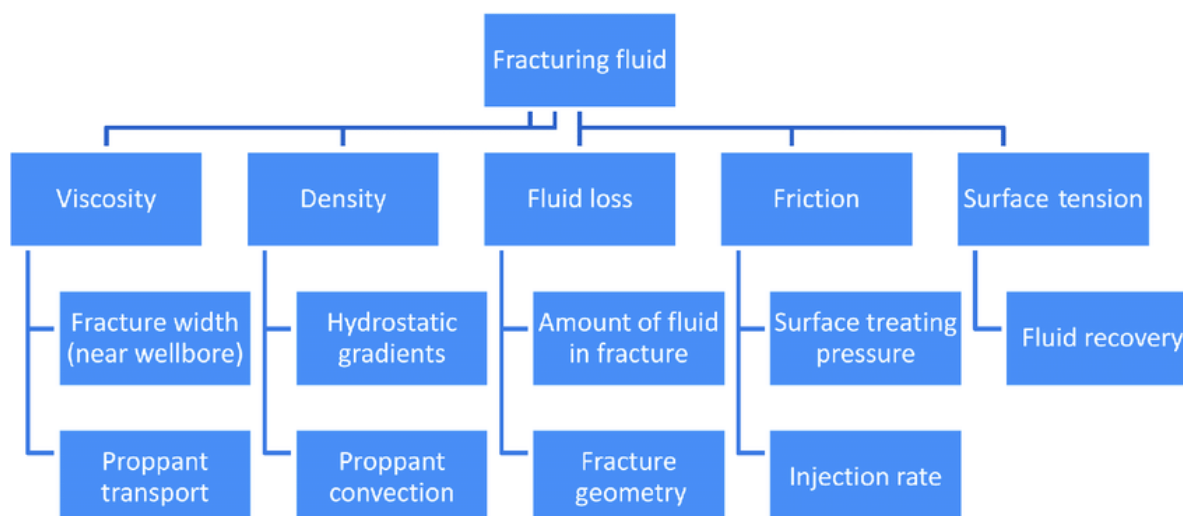
۳-۱۵-۲- داده های چاه و بهره برداری

مطالعات انجام شده که تاثیر زاویه انحراف چاه روی فشار شکست تا مقدار کمتر از ۳۰ درجه قابل صرف نظر می باشد. این پارامتر در زاویه های ۴۵ درجه و چاه های افقی بیشترین تاثیر را روی افزایش فشار شکست در پی خواهد داشت. از طرفی هرچه زاویه چاه در عملیات های شکافت هیدرولیکی بیشتر شود، سرعت رسوب پروپانت در شکاف بیشتر می شود. دانسیته مشبک کاری (SPF)، زاویه بندی (Phasing) و قطر مشبک ها و عمق نفوذ از دیگر پارامترهای کلیدی برای شکاف می باشند که در نظر نگرفتن هر کدام از این پارامترهای ریسک ایجاد پدیده

ی Screen Out در دهانه چاه را بالا می برد. سایز و قطر و گرید (Grade) لوله های جداری و مغزی، محدودیت های فشاری (burst and collaps pressure)، بررسی وضعیت باند سیمان پشت لوله جداری و محدودیت های تاج سرچاهی می بایست در طراحی مد نظر گرفته شود.

۳-۱۵-۳- داده های مربوط به سیال شکاف

خواص فیزیکی و شیمیایی سیال شکاف نتایج متفاوتی روی شکاف از لحاظ هندسی و کارایی دارند. اساس سیالات شکاف اکثرا بر مبنای پایه آبی می باشند که به دلیل هزینه کم، کارایی بالا و سهولت کار، مزیت قابل توجهی نسبت به دیگر سیالات دارند. هر کدام از خواص فیزیکی و شیمیایی سیال شکاف طبق شکل ۳-۳ روی قسمت های مختلفی از فرایند ایجاد شکاف اثر می گذارند.



شکل ۳-۳: تاثیر سیال عملیات شکاف بر پارامترهای مختلف در طراحی

انتخاب سیال با ویسکوزیته مناسب پارامتر کلیدی در طراحی شکاف هیدرولیکی می باشد. فاکتور های زیادی برای انتخاب سیالات شکاف وجود دارد (شکسته شدن، سازگار با محیط زیست، هزینه، فشار پمپاژ و ایمنی و ...). اگر ویسکوزیته سیال طراحی شده بیش از اندازه باشد منجر به افزایش هزینه و فشار پمپاژ شده و رشد ناخواسته ارتفاع شکاف می شود. از طرفی ویسکوزیته مناسب انتقال پروپانت از دهانه چاه تا دماغه شکاف را فراهم می سازد.

یکی از مسائل کلیدی در طراحی شکافت هیدرولیکی، آگاهی دقیق از سرعت نشت سیال از شکاف به مخزن است. هرزروی سیال تزریقی باعث از دست رفتن آب پروپانت و ایجاد انسداد زودرس در شکاف شده و سیال از دست رفته می‌تواند به نفوذپذیری سازند آسیب برساند و منتج به کاهش تراوایی دهانه اطراف چاه گردد. در بسیاری از هرزروی‌های شدید، ضریب هرزروی fluid loss coefficient یک پارامتر کلیدی برای طراحی شکاف می‌باشد. ضریب هرزروی، تابعی از تراوایی، فشار و دما، ویژگی‌های سیال مخزن و ویسکوزیته سیال شکاف می‌باشد.

یکی از موضوعاتی که منجر به پدیده‌ی ضعف بازیاب سیال (س از اتمام عملیات تزریق و دوره تمیز سازی چاه) می‌شود در اثر کشش سطحی است. این پدیده منجر به کاهش شدید نرخ تولید یا بالا بردن زمان تمیز سازی بعد از انجام عملیات شکاف می‌شود. این پدیده معمولاً می‌تواند با تزریق فعال کننده سطحی که منجر به کاهش کشش سطحی سیال و سنگ مخزن می‌شود بر طرف گردد.

۳-۱۶- مبانی شکافت هیدرولیکی

۳-۱۶-۱- فشار خالص

فشار خالص برابر با اختلاف فشار تزریق و حداقل تنش افقی درجاست:

$$\Delta p_{net} = P_{frac} - \sigma_{closure} \quad \text{رابطه ۳-۱}$$

که $\sigma_{closure}$ برابر با تنش بستگی شکاف می‌باشد و P_{frac} فشار شکست تعریف می‌گردد.

گاهی اوقات فشار درون چاهی در دسترس بوده (داده‌های مموری گیج) اما در روش‌های مرسوم عملیات، داده‌های فشار سطحی (جهت محاسبه فشار درون چاهی) در طول دوره‌ی بستن چاه از تاج چاه جمع‌آوری می‌شود.

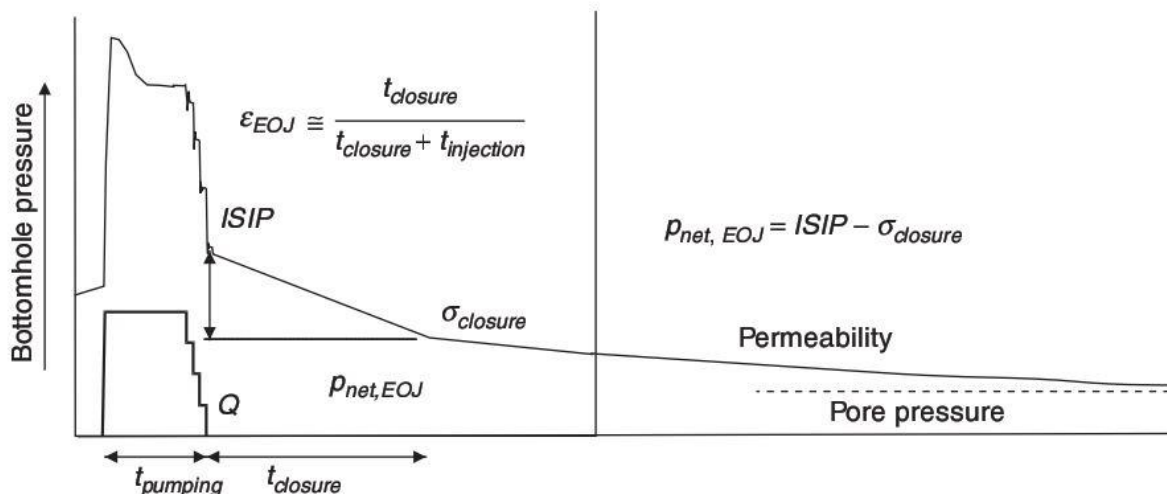
بیشتر شبیه ساز های تجاری، این ترم افت فشار را در قالب دو افت فشار محاسبه می کنند. طبق رابطه این ترم ها شامل، افت فشار ناشی از اصطکاک در مشبک ها و اصطکاک در طول لوله مغزی و جداری تولیدی است. افت فشار توسط رابطه ی ۲-۳ محاسبه می گردد.

$$\Delta P_{BHfric} = \beta_{perf} Q^2 + \beta_{near wellbore} Q^{0.5} \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

دیگر پارامتر کلیدی برای محاسبه فشار خالص، تنش بستگی بوده که معمولا توسط یک سری آزمایش ها پیش از عملیات اصلی قابل دستیابی می باشد (تنش بستگی بدست آمده از این آزمایش جهت کالیبره کردن مدل های شکاف به کار برده می شود). یک روش سریع بدست آوردن فشار خالص در انتهای دوره ی تزریق از رابطه ی ۳-۳ بدست می آید:

$$P_{netEOJ} = ISIP - \sigma_{closure} \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

پارامتر ISIP برابر با فشار آنی بسته شدن شکاف ایجاد شده می باشد. از شکل شماره ۳-۴ می توان دریافت که اختلاف بین مقدار ISIP بدست آمده و تنش بستگی در انتهای آزمایش برابر با فشار خالص درون شکاف می باشد.



شکل ۳-۴: نمودار تغییرات فشار با زمان تزریق در حین عملیات

۳-۱۶-۲- جریان پروپانت تزریقی

انتقال پروپانت درون شکاف یکی از پارامترهای کلیدی در عملیات شکافت هیدرولیکی است که به دو صورت شکل می گیرد:

۱- ورود به کانال مشبک کاری شده

۲- ورود درون شکاف

این دو حالت جریان پروپانت در تعیین عرض اولیه شکاف که در محاسبات حجم پد تزریقی اثرگذار می باشد. همچنین میزان اصطکاک در این دو حالت زیاد می باشد که بعضی از مدل های شکاف می توانند طی تست-step down rate میزان بالا یا پایین بودن اصطکاک در این منطقه از تزریق را بررسی کنند. انتقال پروپانت وابسته به ویژگی های سیال و پروپانت، غلظت پروپانت، نرخ تزریق و برنامه توالی تزریق می باشد. به صورت ویژه رئولوژی سیال، سایز، دانسیته و نوع پروپانت، نرخ تزریق، هندسه شکاف، تغییرات دما و مشبک کاری از پارامترهای موثر در انتقال پروپانت می باشد. پروپانت همراه با یک سیال (سیال حمل کننده) در تجهیزات سطحی با یک نسبت

طراحی شده، ترکیب و آماده پمپاژ می شود. با پمپاژ سیال ایجاد شده، سیال حمل کننده شروع به هرزروی درون سازند تراوا می کند و افزایش غلظت پروپانت ته نشین شده در مسیر شکاف، منجر به باز ماندن شکاف بعد از توقف پمپاژ می شود.

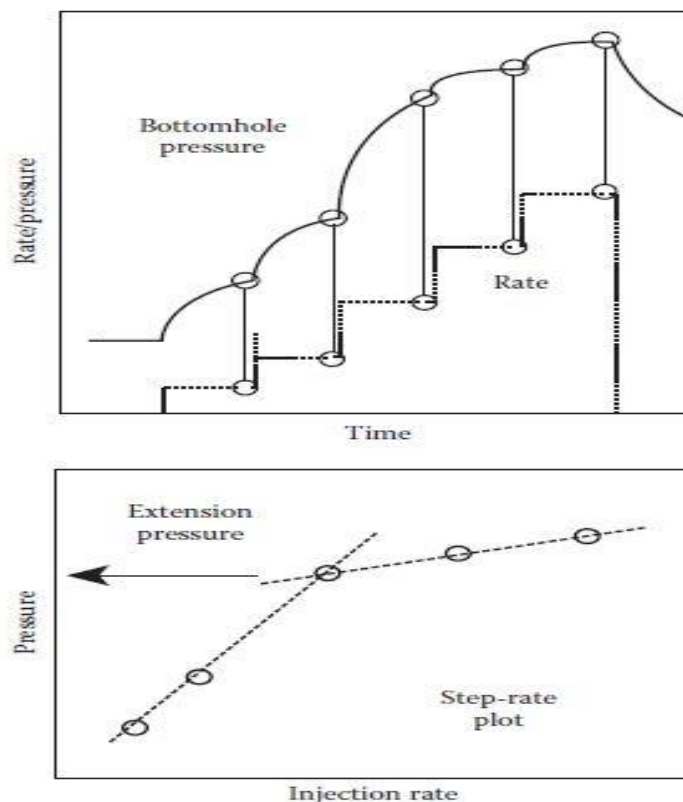
۳-۱۷- آزمایش های قبل از عملیات شکاف هیدرولیکی

به منظور ارزیابی شکاف طراحی شده با شرایط واقعی، یک سری آزمایش ها جهت بدست آوردن مقدار نهایی فشار بسته شدن معرفی شده است.

۳-۱۷-۱- آزمایش تزریق مرحله ای

هدف از این آزمایش بدست آوردن فشار گسترش شکاف می باشد. بعد از ایجاد شکاف اولیه، در حقیقت به دنبال اطمینان از شکافته شدن ناحیه مورد نظر هستیم که با چه فشاری شروع به باز کردن شکاف در عمق مخزن کنیم. آزمایش تزریق مرحله ای برای چاه های مشبک کاری شده با زون های حدود ۵۰ فوت در مخازن با تراوایی مناسب به کار می رود. این آزمایش فشار گسترش شکاف^۱ FPP را در نهایت در اختیار می گذارد. در صورت رسم فشار درون چاهی با نرخ تزریق، هر جا که شکستی در روند داده های رسم شده مشاهده شد نشان دهنده فشار گسترش شکاف می باشد (شکل ۳-۵).

^۱Fracture Propagation pressure



شکل ۳-۵: آزمایش Step Rate

۳-۱۷-۲- آزمایش pump-in/decline

برای مخازن با تراوایی متوسط تا زیاد به علت پاسخ سریع تنش فشاری این آزمایش مفید می باشد. نوع خاصی از این آزمایش، آزمایش Microfrac (در حال حاضر به آن تشخیص شکستگی^۱ DIFIT یا MFO^۲ هم گفته می شود) است که برای اندازه گیری تنش بستگی در زون های کوچک با تراوایی کم کاربرد دارد. هدف از انجام تست DIFIT بدست آوردن تراوایی، فشار منفذی^۳ و محاسبه ی حداقل تنش افقی درجا می باشد. مقدار ISIP برابر با مجموع فشار بسته شدن و فشار خالص ($P_{cl} + P_{net}$) می باشد.

^۱Diagnostic fracture injection testing

^۲Mini Fall-off

^۳Pore pressure

۳-۱۷-۳- آزمایش pump-in/flow back

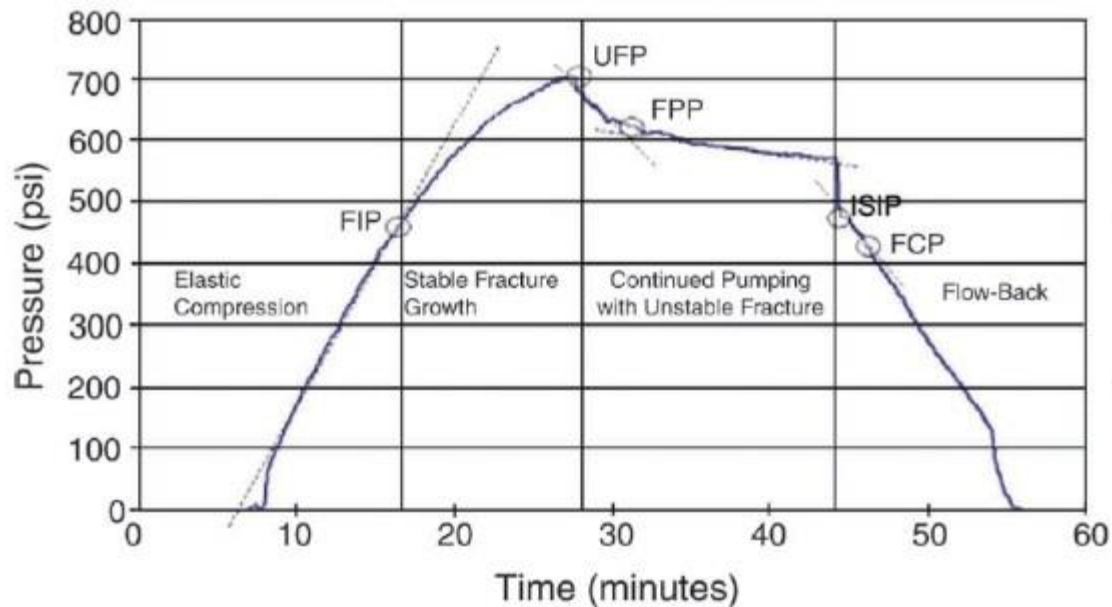
برای مخازن با تراوایی پایین، با توجه به احتمال طولانی شدن زمان بسته شدن، فشار بستگی ممکن است خیلی دقیق مشاهده نشود. در این صورت بهتر است از آزمایش pump-in/flow back استفاده گردد که مشابه روش آزمایش pump-in/decline می باشد که با سیال های قابل تزریق مثل آب نمک، دیزل و ... نرخ های تزریق ۱۰-۵۰ بشکه در دقیق شروع می شود.

۳-۱۷-۴- آزمایش Mini-Frac یا (Data-Frac)

این آزمایش در حجم و نرخ های بالایی از سیال تزریقی انجام می شود. هدف از این آزمایش، اندازه گیری هندسه شکاف، میزان بازدهی سیال و مشخصات فرایند هرزروی سیال می باشد. این آزمایش با حجم حدود ۱۰ بشکه با نرخ تزریق بسیار پایین جهت اندازه گیری فشار بسته شدن و پارامترهای مخزنی تراوایی استفاده می شود. این آزمایش با تزریق سیالی با ویسکوزیته کم با نرخ حداقل شروع شده و میزان ISIP محاسبه شده یک تقریب خیلی نزدیک برای فشار واقعی بسته شدن را می دهد.

۳-۱۸- آنالیز آزمایش های قبل از عملیات شکافت هیدرولیکی

آنالیز پاسخ فشاری در شکاف شبیه آنالیز فشار جریانی در مخزن می باشد که در هر دو حالت، این پاسخ فشاری توسط مفاهیم بنیادی به منظور درک عمیقی از فرآیندهای پیچیده جریان بررسی می شوند. مشابه شکل شماره ۳-۶ با ثبت داده های فشار جریانی ته چاه با زمان می تواند شماتیکی از پاسخ رفتار جریانی در شکاف را ارائه داد.



شکل ۳-۶: تغییرات فشار درون چاهی با زمان در طول تزریق عملیات شکاف هیدرولیکی

در شکل شماره ی ۳-۶ روند شروع و بسته شدن شکاف در مقابل زمان پمپاژ و یعد از آن رسم شده است. به ترتیب هر مرحله شامل:

۱- FIP: Fracture Initiation Pressure نقطه شروع شکست

۲- UFP: Unstable fracture pressure نقطه ی ناپایدار فشار شکست

۳- FPP: Fracture propagation pressure نقطه ی انتشار شکاف

۴- ISIP: Instantaneous shut in pressure فشار لحظه ای بسته شدن

۵- FCP: Fracture closer pressure فشار بسته شدن شکاف

در بیشتر مطالعات پیشنهاد شده که انحراف از خط صاف در شروع عملیات تزریق نشان دهنده ی باز شدن یک شکاف کوچک است (FIP) که تا بیشترین فشار که مرحله ی نقطه ی ناپایدار فشار است ادامه دارد (UFP)، که پس از این مرحله، شکاف با سرعتی سریعتر از سیال تزریق شده گسترش می یابد. در آنالیز فشار درون چاهی در طول عملیات شکاف، فشار بسته شدن با فشار جریانی ته چاه تا قبل از بستن چاه برای آزمایش چاه در نظر گرفته

می شود. از طرفی فشار بسته شدن برابر یا کمتر از فشار شکست لازم برای ایجاد شکاف (فشار برای توسعه شکاف های موجود) می باشد.

۳-۱۸-۱- روش های آنالیز برای محاسبه ی فشار شکست

هدف تمام روش های آنالیز فشاری، مشخص کردن پایان رژیم جریان خطی در شکاف می باشد. به صورت ایده آل ی تغییر رفتار یک رژیم خطی سیال درون شکاف و انتقال به رژیم جریانی غالب در مخزن می تواند برای پی بردن به مکانیسم بسته شدن شکاف استفاده شود. آنالیز افت فشار جهت تخمین فشار شکست توسط دو روش زیر انجام می گردد.

۱- $\sqrt{Time}$ plot

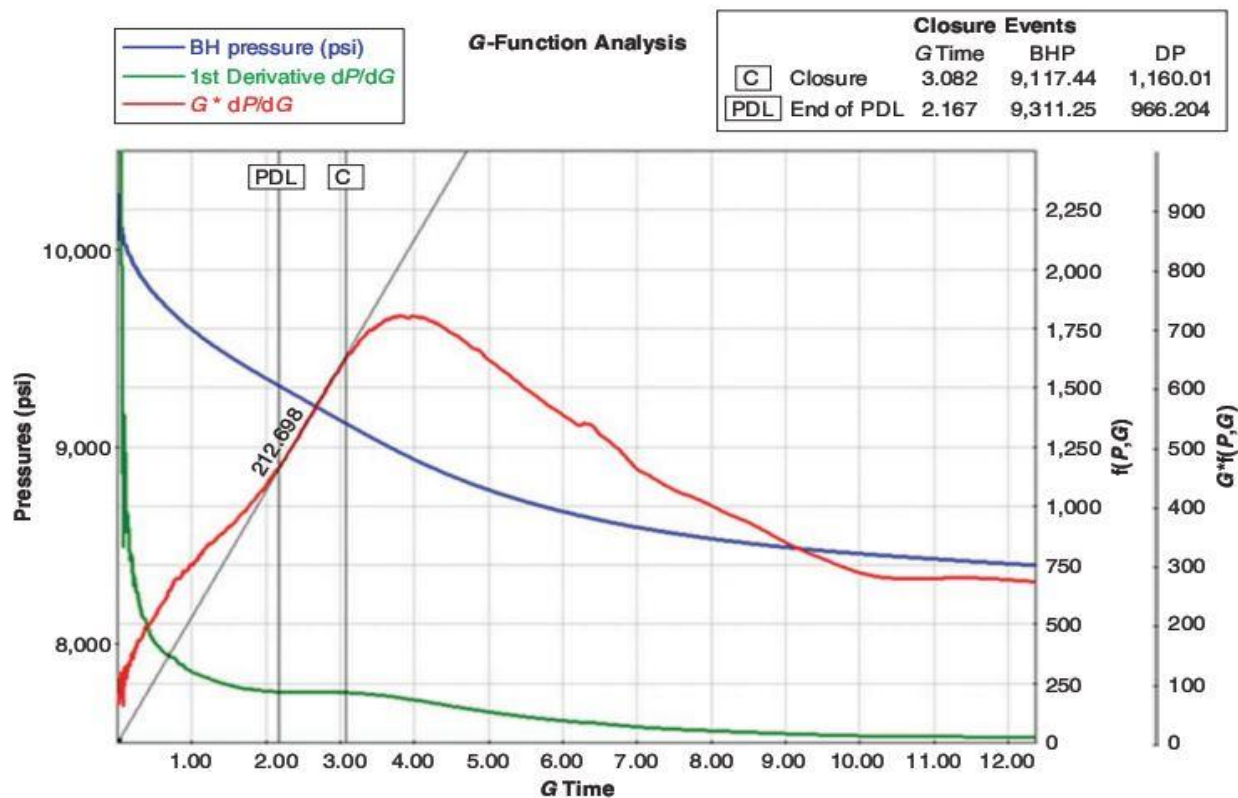
۲- G and $(G \cdot dp/Dg)$ plots

۳-۱۸-۱-۱ آنالیز نمودار $\sqrt{Time}$

زمانیکه شکاف هنوز باز می باشد، نشت سیال هم از دیواره چاه و هم از شکاف در حال رخ دادن می باشد. به محض شروع بسته شدن شکاف با توقف پمپاژ، فشار به آرامی به صورت خطی در مقابل زمان $\sqrt{Time}$ شروع به کاهش می کند و نشت سیال فقط از دیواره چاه در حال انجام می باشد.

۳-۱۸-۲ آنالیز G plot

آنالیز روش G یک تابع بدون بعد زمان است که جهت خطی سازی پاسخ فشاری شکاف در طول یک آزمایش minifrac طراحی شده است. در صورت رسم فشار در مقابل تابع بدون بعد زمان G طبق شکل شماره ی ۳-۷ خط راست از یک جایی شروع به انحراف کرده که محل این انحراف در این آنالیز به عنوان تخمینی از فشار بسته شدن شکاف می باشد.



شکل ۳-۷: آنالیز فشار بسته شدن شکاف در روش G-plot

در شکل شماره ی ۳-۷ می بینیم که خط قرمز (حاصل $G \cdot \frac{dp}{dG}$) یک انحراف از خط راست را نشان داده که برابر نقطه ی فشار بسته شدن می باشد. هدف از ضرب مشتق فشار $G \cdot \frac{dp}{dG}$ بزرگ نمایی تغییرات رفتاری کوچک می باشد که در روش های مختلف آنالیز فشار بعد از ایجاد شکاف هم مشتق فشار کاربرد مهمی دارد. در مواردی که هرزروی زیادی در شکاف مشاهده می شود، تفسیر این نمودار پیچیده تر شده که باعث بزرگنمایی بیش از حد در تغییرات شیب نمودار می شود. تفسیر فشار بسته شدن در این نمودار تنها زمانی قابل مشاهده می باشد که نمودار $G \cdot \frac{dp}{dG}$ به سمت راست منحرف گردد (در عمل این موضوع صحیح نیست).

۳-۱۹- آنالیزهای پس از عملیات

در این بخش به آنالیز جریان گذرا (*Fluid flow analysis*) پس از عملیات شکافت هیدرولیکی پرداخته می شود. آنالیز جریان سیال به آنالیز داده های تولیدی به همراه فشار جریان برگشتی پس از عملیات می پردازد که در نهایت خصوصیات مخزن/شکاف ایجاد شده محاسبه گردد. به طور کلی ترکیبی از معادلات داری، معادلات حالت و معادلات موازنه مواد برای بدست آوردن معادلات دیفرانسیل جزئی به کار می رود. از روش های آنالیز فشار جریانی پس از انجام عملیات شکافت هیدرولیکی می توان به دو روش اصلی اشاره نمود:

۱- آنالیز فشار گذرا *Perssure Transeient Analysis-PTA*۲- آنالیز دبی گذرا *Rate Transient Analysis-RTA*

آزمایش های مذکور نرخ جریان، فشار و زمان را در شرایط تحت کنترل اندازه گیری می کنند. روش آنالیز فشار گذرا به این صورت می باشد که مجموعه ای از اقدام های های کنترل شده نظیر باز یا بسته کردن چاه می باشد که این اقدامات سیگنال فشاری درون مخزن ارسال می کند در حالیکه پاسخ فشاری مخزن نسبت به این اقدامات به صورت همزمان در حال ثبت می باشد. در روش آنالیز دبی گذرا در حقیقت پاسخ فشاری مخزن به عملیات واقعی تولید بدون وقفه مورد آنالیز قرار می گیرد. این دو روش از نظریه و مبانی یکسانی استفاده می کنند.

هدف از آنالیز فشار گذرا در میادین نفت و گاز شامل موارد زیر می باشد:

۱- محاسبه فشار مخزن (فشار اولیه یا فشار میانگین در طول آزمایش ساخت فشار)

۲- ارزیابی خصوصیات مخزنی و بهره برداری (تراوایی، ضریب آسیب دیدگی سازند، طول شکاف)

۳- ارزیابی ضریب بازدهی چاه (چاه آسیب دیده یا چاهی که تحت عملیات انگیزش قرار گرفته)

۴- تاثیر تداخل چاه های همجوار^۱ (اندازه ناحیه زهکشی^۲) و مشخص کردن مرزهای مخزن در صورت ادامه

دار بودن آزمایش (آزمایش پایدار^۳)

روش PTA وضوح بالاتری از خواندن پاسخ فشاری مخزن که به معنای توصیف بهتر و متمرکز مخزن ارائه می دهد. از آنجایی که کنترل دبی جریان در روش RTA در عملیات به سادگی صورت نمی گیرد روش PTA به عنوان پایه آنالیز فشار جریانی پس از انجام عملیات شکافت هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد. آزمایش های مختلف فشار گذرا، و پایدار برای دستیابی به اهداف مطرح شده قابل انجام می باشد که شامل (آزمایش ساخت فشار، تخلیه^۴، دبی چند مرحله ای و ...) می باشد.

۳-۲۰- مشبک کاری در عملیات های شکافت هیدرولیکی

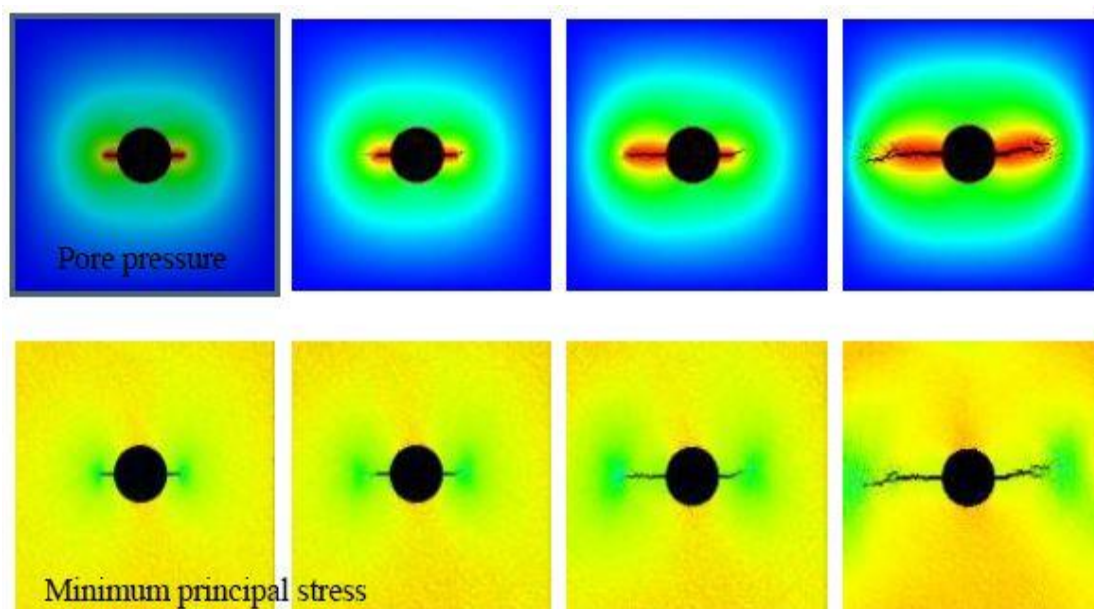
یک مشبک کاری ایده آل برای شروع عملیات شکاف، حداقل افت فشار را خواهد داشت و یک شکاف با کمترین پیچ و خم را ایجاد می کند. پیچاپیچی منافذ یک پدیده مهم شناسایی شده که می تواند بر اجرای عملیات شکاف دهی تاثیر بگذارد. مطالعات انجام گرفته در خصوص انواع زاویه های مشبک کاری (زاویه بین مشبک ها با حداکثر تنش افقی درجا) و توزیع حداقل تنش درجا می تواند به پیدا کردن بهینه ترین زاویه مشبک کاری کمک کند (شکل ۳-۸). در شکل ۳-۹ مسیر شروع ایجاد شکاف و ادامه ی شکست در زاویه های مختلف مشبک کاری آزمایش شده نشان می دهد که با افزایش زاویه مشبک کاری، فشار شروع و شکست شکاف افزایش می یابد.

^۱Well Interference effect

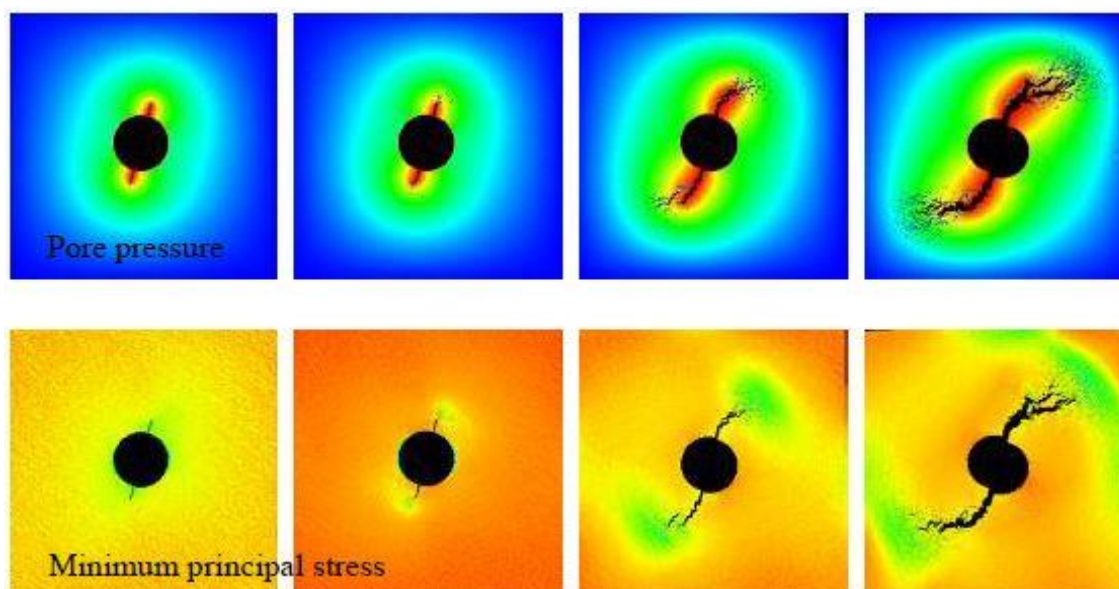
^۲Drainage area

^۳Stablized Test

^۴Draw Down Test



شکل ۳-۸: شروع شکاف از مشبک کاری هم راستا با سطح شکاف قابل ترجیح (حداکثر تنش افقی)



شکل ۳-۹: شروع شکاف با مشبک کاری با زاویه زیاد نسبت به سطح شکاف قابل ترجیح (حداکثر تنش افقی)

۳-۲۰-۱ بازه ی مشبک کاری شده

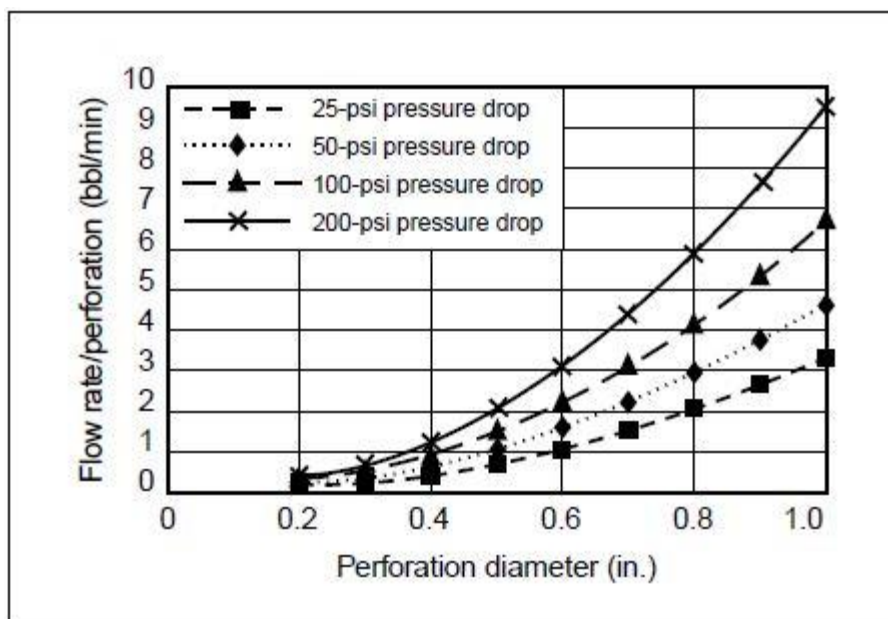
در صورتی که حتی بخشی از مشبک کاری های انجام شده هم راستا با سطح شکاف قابل ترجیح باشد، باید حداقل بازه ی مشبک کاری شده در نظر گرفته شود. از دلایل تعیین محدودیت بازه ی مشبک کاری برای عملیات شکاف هیدورلیکی این است که به ایجاد نوعی از شکاف با ارتفاع محدود (vertical confinement of a tip-) screen out کمک کند و دلیل این موضوع این می باشد که ناحیه مشبک کاری محدود منجر به افزایش فشار هیدرواستاتیکی روی سیال تزریقی شده (کاهش سطح مقطع برای تزریق و افزایش فشار) و در نهایت هرزروی سیال در دهانه چاه را افزایش داده که تمرکز پروپانت در دهانه چاه را در پی خواهد داشت.

۳-۲۰-۲- قطر چاه و^۱SPF

حداقل میزان SPF توسط قطر دهانه مشبک کاری شده، نرخ تزریق مشبک ها، افت فشار ناشی از مشبک کاری و خواص سیال بدست می آید (شکل ۳-۱۰).

$$\Delta P_{pf} = 0.237 \times \rho \left[\frac{q_i}{C_d \times D^2} \right]^2 \quad \text{رابطه ۳-۴}$$

^۱Shot Per Foot



شکل ۳-۱۰: اثرات قطر شکاف و افت فشار در دهانه مشبک ها و نرخ تزریق

صرف نظر از اینکه ابزار مشبک کاری در مرکز چاه قرار گرفته، قطر مشبک کاری تابعی از زاویه گلوله ها می باشد. این یعنی نرخ تزریق برای قطر های مختلف متفاوت می باشد. در صورت مشخص بودن تنش های سازند و زاویه مشبک کاری ها، یک زاویه ۱۸۰ درجه همسو با حداکثر تنش افقی درجا بهترین مورد می باشد.

۳-۲۱- مدلهای توسعه یافته شکافت هیدرولیکی

۳-۲۱-۱- مدل های یک بعدی و دو بعدی شکاف

تا به الان که مفاهیم اولیه شکافت هیدرولیکی بدست آمد، حال می توان از این مفاهیم در یکی از ساده ترین مدل های شکاف برای بررسی هندسه شکاف استفاده نمود. در اینجا فرض می شود که شکاف فقط در یک بعد توسعه می یابد. در این مدل مفهوم تغییر شکل الاستیک شکاف با مکانیسم جریان سیال در شکاف برای ساده سازی مدل سازی مدل ترکیب شده اند.

در مدل های دو بعدی تعریف ضریب نشتی سیال شکاف با جزییات بیشتری بین شده است که می توان با این مدل مقدار سطح شکاف ایجاد شده را محاسبه نمود (این مقدار تابعی از میزان حجم سیال پمپاژ شده است). اولین مدل های دو بعدی شکاف که سطح شکاف برای طراحی شکاف همراه با مکانیسم های مختلف نشتی به کار شامل (KGD, PKN), می باشند. هر دو مدل PKN و KGD حاوی تعدادی فرض هستند. آنها فرض می کنند که شکستگی مسطح است (به عنوان مثال، در یک جهت خاص، عمود بر حداقل تنش، گسترش می یابند). آنها همچنین فرض می کنند که جریان سیال یک بعدی (1D) در طول شکاف وجود دارد. در مورد مدل های توصیف شده، آنها سیالات نیوتنی را فرض می کنند (اگرچه پرکینز و کرن نیز راه حل هایی برای سیالات قانون توان ارائه کردند)، و رفتار نشتی توسط یک عبارت ساده که از تئوری فیلتراسیون مشتق شده کنترل می شود.

۳-۲۱-۲-مدل های شبه سه بعدی

مدل های ساده ای که در بخش های قبلی مورد بحث قرار گرفت، محدود هستند، زیرا از مهندس می خواهند که ارتفاع شکستگی را مشخص کند یا فرض کند که شکستگی شعاعی ایجاد می شود. در حالیکه فرض ارتفاع ثابت امکان این را به وجود آورده که از معادلات نسبتاً ساده ای برای رشد طول شکاف و عرض شکاف به عنوان تابعی از حجم پمپاژ استفاده کرد. این محدودیت را می توان با استفاده از مدل های سه بعدی مسطح و شبه سه بعدی (P3D) برطرف کرد. سه نوع اصلی از مدل های شکافت هیدرولیکی که شامل رشد ارتفاع می شوند با توجه به فرضیات اصلی آنها دسته بندی می شوند.

✓ مدل های سه بعدی عمومی هیچ فرضی در مورد جهت شکاف ندارند. عواملی مانند جهت یابی چاه یا الگوی مشبک کاری ممکن است باعث شوند که شکاف قبل از تبدیل شدن به جهت گیری ترجیحی نهایی (عمود بر حداقل تنش برجا) در جهت خاصی شروع شود. شبیه سازی هایی که چنین مدل هایی را در خود جای می دهند، محاسباتی فشرده هستند و عموماً به یک متخصص برای بدست آوردن و تفسیر نتایج نیاز دارند.

✓ مدل‌های سه‌بعدی مسطح بر این فرض استوارند که شکاف‌ها مسطح و عمود بر حداقل تنش برجا هستند. هیچ تلاشی برای توضیح پیچیدگی‌هایی که منجر به انحراف از این رفتار مسطح می‌شود، صورت نمی‌گیرد. این مدل‌ها باید در جایی استفاده شوند که بخش قابل توجهی از حجم شکاف خارج از ناحیه ای است که شکاف شروع می‌شود یا جایی که جریان سیال عمودی بیشتری نسبت به افقی وجود دارد. چنین مواردی معمولاً زمانی به وجود می‌آیند که تنش در لایه‌های اطراف زون مشابه یا کمتر از تنش درون زون هدف باشد.

✓ مدل‌های شبه سه بعدی P3D تلاش می‌کنند تا رفتار قابل توجه مدل‌های مسطح را بدون پیچیدگی محاسباتی به تصویر بکشند. دو نوع اصلی در اینجا به عنوان "توده" و بر پایه سلول‌آنامیده می‌شوند. در مدل‌های توده ای (یا بیضوی)، مشخصات عمودی شکستگی از دو نیمه بیضی به هم پیوسته در مرکز فرض می‌شود. طول افقی و امتداد نوک عمودی چاه در هر مرحله زمانی محاسبه می‌شود و شکل فرضی با این موقعیت‌ها مطابقت دارد.

۳-۲۲- تطابق تاریخچه

بعد از توسعه مدل‌های شبه سه بعدی در سال ۱۹۸۰، در سال‌های بعد توسط Shlyapobersky این تصور را عوض کرده و نشان داد که آزمایش‌های کالیبره کردن وقتی از این مدل‌های استفاده می‌شود حذف شده است و برای اولین بار فشار خالص در میدان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که این فشار خالص مشاهده شده همواره خیلی بیشتر از فشار خالص پیش‌بینی شده در مدل‌های شبه سه بعدی می‌باشد و حساسیت پارامترها با

^۱lumped^۲cell-based

مشاهدات میدانی مغایرت داشت. به صورت خاص مدل های خیلی به نرخ تزریق و تغییر ویسکوزیته سیال نسبت به آن داده هایی که در میدان مشاهده شده بود حساس بودند.

روش اصلی تفسیر توسعه یافته از این مطالعات برای بررسی رفتار رشد شکاف، رسم نمودار لاگ-لاگ فشار خالص در مقابل زمان پمپاژ می باشد. اختلاف بین فشار خالص مشاهده شده در میدان و مدل، مدل سازی را به سمت لحاظ کردن فشار خالص برای درک بهتر از مدل رشد شکاف سوق می دهد. پیامدهای عملی تطبیق تاریخچه نظیر آپدیت کردن مدل های رشد شکاف که هندسه ای عریض تر با طولی کوتاه تر یا بلندتر می باشد. مدل های تطبیق یافته با فشار خالص مشاهده شده می تواند منجر به بارگذاری حجم بیشتری از پروپانت یا حجم های کمتر از پد تزریقی گردد. فشار خالص یکی از داده های اصلی برای تطبیق با مدل شکاف بوده که به صورت مستقیم در ارتباط با هندسه شکاف دارد که می تواند به صورت واقعی در سطح اندازه گیری داشته باشد.

زمانیکه فشار خالص مدل با فشار خالص اندازه گیری شده در میدان هم خوانی داشته باشد و مفروضات درستی در مدل ساخته شده باشد، می توان امیدوار بود که مدل نمایانگر ماهیت طبیعی هندسه شکاف هیدرولیکی می باشد. روش تطابق تاریخچه فشار خالص زمانیکه نتایج با دیگر روش های کالیبراسیون نظیر آنالیز داده ها از طریق چاه آزمایی یا روش های تشخیص مستقیم مطابقت داشته باشد بیشترین استفاده را خواهد داشت.^۱

۳-۲۳- شبیه ساز لازم برای مدلسازی شکاف

۳-۲۳-۱- نرم افزار Techlog

کاربرد عمده ماژول Geomechanics نرم افزار Techlog در بحث طراحی و آنالیز شکافت هیدرولیکی می تواند بحث ساخت مدل ژئومکانیکی زمین (GEM) باشد. از جمله استخراج تنش قائم که با استفاده از روش های Miller، Amoco، Extrapolation و ... امکانپذیر است. همچنین محاسبه فشار منفذی با استفاده از روش های

^۱Microseismic mapping data/tiltmeter

^۲Geomechanical Earth Model

مختلف از جمله محاسبه از طریق نگاره سرعت امواج، DExp و ... امکانپذیر است. یکی از کاربردهای مهم این نرم افزار در مطالعات و طراحی شکافت هیدرولیکی محاسبه گرادیان شکستگی است. همچنین امکان محاسبه پارامترهای مقاومتی مانند مقاومت فشاری تک محوری سنگ، مقاومت کششی سنگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ به صورت پیوسته وجود دارد.

۳-۲۴-۲- نرم افزار Abaqus

نرم افزار آباکوس بر پایه روش عددی المان محدود بنیانگذاری شده است و در بخش‌ها و شاخه‌های مختلف مهندسی از جمله مکانیک، ژئوتکنیک و... کارایی دارد. این نرم افزار در بحث رشد ترک توسعه زیادی داشته است و از جدیدترین روش‌های مدل‌سازی رشد ترک پشتیبانی می‌کند. مهم‌ترین قابلیت‌هایی که در این نرم افزار می‌توان از آن برای مدل‌سازی رشد شکاف هیدرولیکی استفاده کرد استفاده از روش المان‌های چسبنده^۱ و روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) است. این نرم افزار با پشتیبانی از المان‌های C3D8RP قابلیت مدل کردن فشار منفذی و تخلخل در سنگ را دارد. همچنین برای مدل‌سازی شکستگی از المانهای چسبنده COH3DP استفاده می‌شود که اثر نشت سیال در شکستگی را نیز لحاظ می‌کند.

۳-۲۴-۳- نرم افزار Gohfer

نرم افزار Gohfer یک شبیه ساز بسیار قوی است که در شبیه سازی مدل های پیچیده شکست هیدرولیکی به خصوص در مخازن تایت گاز (tight gas) در صنعت نفت به طور گسترده ای استفاده می شود. این نرم افزار برای مدل‌سازی سه بعدی شکستگی بر اساس روش تفاضل محدود (Finite Difference) عمل می کند. این نرم افزار از یک ساختار شبکه ای همانند یک شبیه ساز مخزن بهره مند است. این شبکه بر اساس گره هایی که توسط کاربر در دو جهت افقی و قائم تعیین شده طراحی می شود. مزیت عمده نرم افزار Gohfer توانایی جداسازی خواص

^۱Cohesive Elements

سنگ در نرم افزار است. سنگها به ندرت رفتاری واقعاً الاستیک دارند اما اغلب رفتار آنها در برابر تنشها الاستیک خطی فرض می شود.

۳-۲۴-۴- نرم افزار FRAC PRO

شبیه ساز FRACPRO به طور خاص طراحی شده تا جامع ترین ابزارها برای طراحی و تجزیه و تحلیل شکستگی هیدرولیک ارائه دهد. نرم افزار طراحی و تجزیه و تحلیل شکستگی FRACPRO با ارائه درک مورد نیاز برای طراحی برنامه های تحریک چاه، می تواند عملکرد چاه را بهبود بخشد. FRACPRO برای اولین بار جهت ارائه به برنامه تامین گاز موسسه فناوری گاز نوشته شد و امروزه در بسیاری از کاربردهای تجاری مخازن گاز، نفت و زمین گرمایی در سراسر جهان استفاده می شود. مدل شکستگی هیدرولیک سه بعدی lumped-parameter (نباید با مدل های به اصطلاح شبه سه بعدی اشتباه گرفته شود) در این شبیه ساز به اندازه کافی می تواند سطح پیچیدگی و واقعیت شکاف هیدرولیکی ایجاد شده را نشان دهد.

علاوه بر آن این شبیه ساز شکاف، شامل ابزارهای کمکی برای گرفتن و وارد کردن دادهای لازم و همچنین خروجی گرفتن از محاسبات بر اساس فرمت های مختلف می باشد. انجام عملیات Mini Frac به صورت اتوماتیک، آنالیز Step Rate، محاسبات اصطکاک، فشار خالص، تطابق تاریخچه تولید همگی در یک برنامه یکپارچه انجام می شوند. خروجی این شبیه ساز می تواند برای نرم افزار شبیه ساز مخزن Eclipse و نرم افزار QuickLook را با ایجاد یک فایل با حالت انتخاب ویژگی های مش بندی توسط خود کاربر مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲۴-۵- نرم افزار FRAC CADE

این نرم افزار برای شبیه سازی های شکاف هیدرولیکی و شکاف اسیدی در چاه های عمودی و افقی کاربرد دارد. این سیستم طیف وسیعی از پیچیدگی ها را از مدل های دوبعدی تا شبیه سازی های سه بعدی جفت شده شامل

می شود. این شبیه ساز کاملاً یکپارچه همراه با داده های نظارت آنلاین، تطبیق تاریخچه و امکان طراحی مجدد شکاف می باشد. این نرم افزار قابلیت مدیریت داده، ادغام و فیلتر کردن داده ها، و همچنین گزارش ها را دارد.

۳-۲۵- روش های تکمیل چاه در اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی

نحوه ی تکمیل کردن یک چاه برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی با توجه به اجرای عملیات در فشار های بالا می بایست تحت شرایط خاصی انجام گردد. در صورت در نظر گرفتن عملیات شکاف هیدرولیکی برای یک چاه، می بایست یک سری الزامات در مرحله حفاری به منظور در دسترس قراردادن یک سایز مناسب از لایه تولیدی که در تماس با تمام طول ناحیه مخزنی است در نظر گرفته شود.

۳-۲۶- استراتژی های تکمیل برای عملیات شکافت هیدرولیکی

۳-۲۶-۱- روش عملیات شکافت از داخل لوله جداری^۱

یکی از معمول ترین روش های عملیات های انگیزش چاه در بحث عملیات شکاف هیدرولیکی، انجام عملیات در آخرین لایه جداری می باشد که در این صورت پکر، ابزارهای نگهداری و دیگر تجهیزات رشته تکمیلی در شرایط حداقل ریسک باشند. یکی از مهمترین مزیت های این روش، انجام عملیات با فشار بالاتر در شرایط نرخ پایین تزریق می باشد. از طرفی نرخ تزریق بالا به علت افزایش عملکرد سیال می تواند منجر به کاهش تمایل پدیده Screen-out گردد که در نهایت بهبود توزیع پروپانت در شکاف را در پی خواهد داشت.

۳-۲۶-۲- تکمیل Monobore

یکی از ساده ترین انواع تکمیل چاه می باشد که از یک قطر یکسان از ته چاه تا سر چاه استفاده می کند. این روش منجر به کاهش هزینه های تکمیل استفاده می شود. کاهش هزینه های حفاری و تکمیل چاه قابل درک است، اما زمانی که پای روش های انگیزش چاه در میان باشد می تواند با تغییراتی همراه باشد. چاه هایی با قطر

^۱Fracturing down casing

کوچک (Slimhole) و نحوه ی تکمیل Monobore منجر به محدودیت عملیات شکاف هیدرولیکی می شود. این محدودیت ها شامل نرخ تزریق و سائز تجهیزات درون چاهی، پروپانت برای تزریق است (به علت کاهش قطر نهایی، افت فشار زیاد تر شده و فشار سطحی بیشتر می شود). در صورت تکمیل چاه با این نوع، می بایست طراحی جداری با ضخامت بیشتر که اجازه پمپاژ با نرخ های زیاد را می دهد در نظر داشت.

۳-۲۶-۳- عملیات شکافت از داخل لوله مغزی^۱

در این حالت سیال شکاف هیدرولیکی درون لوله مغزی که با یک پکر، فضای حلقوی پشت لوله مغزی را ایزوله کرده و لوله جداری در معرض فشار عملیاتی قرار نمی گیرد. نقاط ضعفی می تواند در لوله جداری مثل خوردگی، مسائل مکانیکی (نشستی Liner-Lap یا انجام عملیات Squeezed-off مشبک کاری و وجود داشته باشد. معمولاً جهت جلوگیری از پاره شدن قسمت بالایی لوله جداری Burst فشاری پشت فضای حلقوی بین لوله مغزی و لوله جداری گذاشته می شود. زمانیکه فقط لاینر تولیدی تا زون تولیدی رانده شده، عملیات شکاف هیدرولیکی درون لوله مغزی انجام می شود. در این حالت توصیه می شود که بالای لاینر به صورت مستقیم در معرض سیال شکاف باشد (حتی اگر قبل از عملیات اصلی، تست فشاری تاپ لاینر با حداکثر فشار مورد انتظار در عملیات شکاف با موفقیت انجام شود، احتمال نشستی از این ناحیه زیاد است). مزیت دیگر این نوع از تکمیل، تمیز سازی مناسب بعد از انجام عملیات می باشد (بعد از انجام عملیات و بستن کوتاه مدت چاه، چاه می تواند به سرعت تولید کند و زمان در تماس بودن سیال مخزنی با سیال شکاف را به حداقل می رساند).

۳-۲۶-۴- عملیات شکافت از درون لوله مغزی با فضای حلقوی باز^۲

در این روش سیال شکاف درون لوله مغزی بدون پکر تزریق شده که امکان اندازه گیری فشار درون چاهی بدون تاثیر فشار اصطکاکی وجود دارد. در این حالت سیال شکاف درون لوله مغزی تزریق شده و از فضای حلقوی می

^۱Fracturing Down Tubing

^۲Fracturing with Live Annulus

توان برای اندازه گیری فشار درون چاهی استفاده کرد (در بعضی شرایط می توان این روند برعکس باشد). از دیگر مزیت های این روش تکمیل این است که، در صورت تشکیل پدیده ی Screen-out، چاه می تواند به صورت معکوس جهت خروج پروپانت که امکان پل زدن پروپانت در لوله مغزی یا جداری جریان پیدا کند.

۳-۲۶-۵- روش تکمیل Barefoot

این نوع از روش تکمیل برای زمان هایی که یک زون تولیدی موجود می باشد نتیجه بهتری خواهد داشت. پاشنه جداری آخر قبل از حفاری لایه تولیدی گذاشته شده و از سیال های سازگار با سازند برای حفاری این قسمت استفاده می کنند. معمولاً این نوع تکمیل برای سازندهای کربناته شکاف دار که سختی بالایی داشته و می توانند پایداری دیواره چاه را تضمین کنند استفاده می شود. این نوع از تکمیل هزینه های لاینر تولیدی، سیمان کاری و مشبک کاری را کاهش داده و سطح مقطع بیشتری از سازند را در دسترس قرار داده که از افت فشار اضافی جلوگیری می کند. از معایت این روش از تکمیل، عدم کنترل در ورود سیال مخزنی درون چاه و سیال تزریق درون سازند می باشد در چاه های افقی به منظور پایداری دیواره چاه معمولاً از آستری مشبک کاری شده^۱ یا Slotted liner استفاده می کنند.

۳-۲۶-۵-۱- روش های شکاف چند مرحله ای و انواع روش های تکمیل

یکی از ملاحظات کلیدی در طراحی و تکمیل چاه این است که چطور می توان عملیات بهینه شکاف هیدرولیکی چندگانه درون یک چاه انجام داد. از روشهای متداول ایزوله سازی به لیست زیر میتوان اشاره نمود:

- Plug-and-perf
- Sand plugs
- Fracturing baffles with balls
- Ball-actuated completions
- Coiled Tubing-based methods

^۱Perforated liner

- Limited-entry perforating
- Perforation ball sealers
- Divertin Agent

سه پارامتر کلیدی عبارتند از: ۱- ایزوله کردن فضای حلقوی بین جداری ها در مقابل بازه های مختلف تولیدی ۲- کنترل زمان و مکان وقتی که ارتباط هیدرولیکی بین دیواره و مخزن برقرار می شود (مشبک کاری یا دریچه های کشویی (Sliding sleeve) ۳- ایزوله سازی موثر از نواحی که قبلا تکمیل شده است. انواع روش های ایزوله سازی و ارتباط بین مخزن و دیواره چاه مطابق با روش هایی ارائه شده برای شکاف هیدرولیکی چند مرحله ای طبق جدول ۳-۳ بررسی شده است.

جدول ۳-۳: انواع روش های تکمیل چاه

Method	Wellbore/Reservoir Communication	Subsequent Interval Isolation	Completed Interval Isolation	Interval Isolation Mechanism	Interval Isolation Location
Plug-and-perf	Perforations	Unperforated liner	Bridge plugs	Mechanical	In wellbore
Sand plugs	Perforations	Unperforated liner	Sand plugs	Permeability	
Fracturing baffles with balls	Perforations	Unperforated liner	Fracturing balls	Mechanical	
Ball-actuated completion	Sleeves	Sleeves	Fracturing balls	Mechanical	
Coiled-tubing-based methods	Abrasive jetting or sleeves	Unperforated liner or sleeves	CT plug/packers, sand plugs, or sleeves	Mechanical or permeability	At Perforation
Limited-entry perforating	perforating	No isolation, perforation friction used to simultaneously treat all open intervals	Rate/pressure		
Perforation ball sealers	perforating	Unperforated liner	Perforation balls	Mechanical	
Diverting agents	As desired	As desired	Diverting agents	Particulate/ chemical	Behind casing
Induced-stress diversion	As desired(order based on treating pressure)	As desired	Induced-stress	pressure	

محل بازه های ایزوله شده در به کار گیری هر کدام از روش های بیان شده و در طراحی و تکمیل چاه تاثیر گذار خواهد بود. ملاحظات انتخاب بهترین روش های تکمیل در انتهای این بخش مورد بررسی قرار می گیرد. در این

بخش به ارائه روش های معمول برای کنترل جریان که می تواند شامل ریسک ها هر روش، بازدهی عملیات، موثر بودن و هزینه های مربوطه باشد.

۳-۲۷- بررسی اقتصادی

بررسی اقتصادی شکافت هیدرولیکی با قطعیت همراه نیست، منظور این است که اغلب پیدا کردن یک راه حل برای بررسی اقتصادی عملیات شکافت ناممکن می باشد. علاوه بر این عدم قطعیت های زمین شناسی و تنوع پارامترهایی که می بایست در طراحی و عملیات شکافت هیدرولیکی در نظر گرفته شود منجر به عدم قطعیت بیشتری برای هزینه کالا ایجاد می کند که این مساله به حساسیت بیشتری برای بهینه سازی اقتصادی انجام عملیات شکافت هیدرولیکی می افزاید.

۳-۲۷-۱- هزینه های عملیات شکافت

در حالی که بسیاری از افراد مبلغ صورت وضعیت شرکت های خدمات پمپاژ را به عنوان هزینه عملیات شکافت هیدرولیکی می دانند، در واقعیت این بخش مهمی از هزینه های عملیات شکافت بوده ولی هزینه دیگر نیز بخش مهمی از هزینه های شکافت را در بر می گیرد.

هزینه حفاری چاه

۱. هزینه تکمیل

هزینه حفاری چاه نشان دهنده هزینه های انجام شده برای رسیدن چاه به عمق برنامه ریزی شده و چاه پیمایی آن برای تعیین هیدروکربن کافی برای تضمین توسعه میدان می باشد. هزینه های ناشی از تکمیل پس از تعیین اینکه آیا هیدروکربن کافی برای ادامه حفاری چاه تا تولید چاه وجود دارد، می تواند هزینه های پیش رو را پوشش دهد. این هزینه ها شامل موارد زیر می باشند:

۲. هزینه آماده سازی محل چاه

برای اکثر عملیات های شکافت، معمولاً حداکثر فشار سطحی با در نظر گرفتن یکپارچگی چاه برای عملیات در نظر گرفته می شود. در بعضی از موارد نیاز به راندن یک لوله در چاه برای انجام عملیات می باشیم. در برخی دیگر نیازمند آزمایش لوله جداری یا تولیدی برای بررسی یکپارچگی دیواره چاه قبل از انجام عملیات شکافت می باشد. همه موارد به تجهیزات فنی و شیرآلات در سر چاه جهت آزمایش فشار و سیستم تاج چاه برای تزریق و تولید از آن نیاز دارد. هزینه ها زمانی که نیاز به حضور دکل برای راندن لوله ها باشد به شدت بالا می رود. آزمایش های نظارتی معمولاً طی چند روز یا حتی چند هفته قبل از شروع پمپاژ زمان نیاز دارند. معمولاً محوطه اطراف تاج چاه بعد از خراج شدن دکل حفاری به اندازه ای می باشد که جانمایی تجهیزات لازم برای عملیات شکافت را پوشش دهد. و در برخی موارد این هزینه شامل لوله گذاری یا انتقال آب برای تانک های ذخیره سر چاهی برای شروع عملیات می شود.

هزینه های انجام عملیات شکافت

معمولاً این بخش بزرگترین قسمت هزینه های تکمیل چاه را به ویژه در سازند های غیر متعارف در بر خواهد گرفت. معمولاً چندین شرکت خدماتی در طول این عملیات سر چاه می باشند که بیشترین هزینه ها، هزینه پمپاژ خواهد بود. در کل هزینه های این عملیات به سه جز اصلی تقسیم بندی می شود.

- هزینه تجهیزات

- ✓ هزینه برپایی تجهیزات

- ✓ هزینه پلاگ و مشبک کاری

- ✓ هزینه های آماده به کار

- مواد شیمیایی

✓ اسید و افزایه های آن

• هزینه پروپانت

✓ هزینه های ماسه

✓ جابجایی و ذخیره آن

هزینه های تجهیزات را می توان توسط های های مختلف نظیر: نرخ ساعتی، روزانه یا بخشی از کار یا به صورت اسب بخار تعیین کرد. صرف نظر از واحد اندازه گیری همیشه یک جز از هزینه های قابل توجه مربوط جابجایی تجهیزات به محل چاه و میزان خدمات مورد نیاز برای پمپاژ جهت تحویل چاه خواهد بود. به طور مشابه بخشی از هزینه مواد شیمیایی مربوط به قرارگیری آن ها در محل چاه بسته به حجم و نوع ماده می باشد. دومین هزینه ی قابل توجه مربوط به تامین آب برای انجام عملیات بوده که توسط شرکت خدماتی دیگری انجام می شود.

۳-۲۸- طراحی عملیات

بطور خلاصه، هر مرحله از فرآیند شکافت هیدرولیکی یک عملیات کوتاه مدت 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 مراحل بعدی نیز تکرار می گردند.

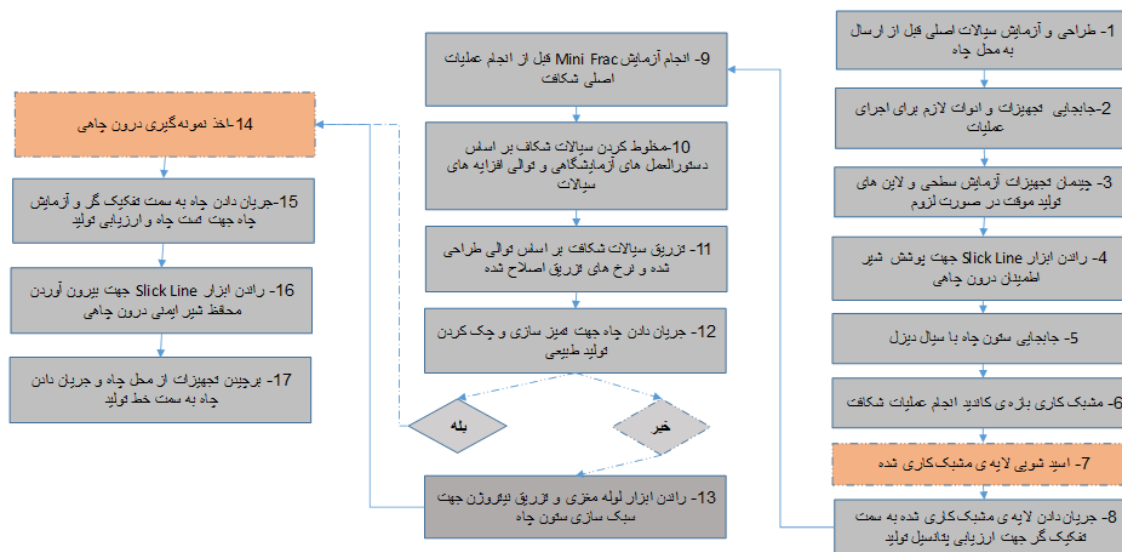
در قدم نخست، حجم زیادی سیال با فشاری بیشتر از فشار شکست سازند برای مدت زمان کافی از طریق چاه (محل تزریق می تواند از داخل چاه، لوله جداری و یا فضای حلقوی پشت لوله جداری باشد) به داخل سازند تزریق می شود. در این مرحله، شکاف یا شبکه شکافی شکل گرفته و توسعه می یابد. در حالت طبیعی برداشتن فشار تزریق منجر به 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 شکاف های ایجاد شده به داخل مخزن تزریق می شود. نهایتاً با برداشتن فشار و پایان تزریق، سیال

مجدداً به درون چاه بر می گردد. اما پروپانت درون شکاف باقی می ماند و دهانه ی شکاف را باز نگه می دارد. در این مرحله می توان به جای سیال حاوی پروپانت، سیال اسیدی تزریق کرد. اسید باعث خوردگی دیواره شکاف شده و با ایجاد زبری و دندانه در سطوح شکاف (Etching) از بسته شدن مجدد شکاف بعد از برداشتن فشار تزریق جلوگیری می کند.

قابل ذکر است که در صورت چند مرحله ای بودن عملیات نحوه جداسازی مراحل عملیاتی در درون چاه به طرق مختلف و با استفاده از روشهای متنوعی انجام می گیرد که بالطبع به طول زمان انجام عملیات می افزاید. انتخاب روش مناسب جداسازی مراحل بسته به نوع چاه، هدف عملیات، رشته تکمیلی موجود و ... خواهد بود. بنابراین کل عملیات از طراحی تا اجرا را از نظر کاری و آنالیز اقتصادی می توان به شرح زیر ارائه داد.

تا به امروز روش های مختلفی جهت بهبود بهره دهی چاه ها در دنیا انجام گرفته است. در مخازن هیدروکربنی که سنگ مخزن آنها دارای نفوذپذیری بسیار پایینی می باشد روش های شکاف اسیدی و هیدرولیکی به عنوان روشی موثر جهت افزایش بهره دهی چاه اجرا می گردد. جنس سنگ مخزن تعیین کننده ی روش شکست مناسب در یک مخزن هیدروکربنی می باشد، در مخازن کربناته به دلیل حلالیت سنگ کربنات در اسید، روش شکاف اسیدی جهت بالا بردن بهره دهی چاه استفاده می شود. هدف از عملیات شکاف اسیدی بالا بردن نفوذپذیری سنگ مخزن با ایجاد شکاف های مصنوعی در طول سنگ مخزن می باشد. سیال شکاف اسیدی با توجه به دارا بودن درصد قابل توجهی اسید با فشاری بالاتر از فشار شکست سنگ مخزن به داخل سنگ مخزن تزریق می شود و پس از شکست سنگ، شکاف های مصنوعی در طول سنگ مخزن ایجاد می کند. اسید موجود در سیال شکاف اسیدی با ایجاد خوردگی های نامنظم بر روی سطوح شکست باعث می شود که شکاف ایجاد شده پس از اتمام عملیات تزریق مجدداً مسدود نگردد و مسیری مناسب برای عبور هیدروکربن موجود در سنگ مخزن ایجاد می نماید. شکل ۳-۱۱ شماتیک اجرای عملیات را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۱: روند اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی (مراحل ۱۰ تا ۱۷ مراحل اصلی فرک را نشان می دهد).

۳-۲۹- روش های پایش عملیات شکاف هیدرولیکی

روش های پایش به سه دسته کلی مستقیم، میدان دور، حین عملیات، مستقیم، نزدیک چاه، پس از عملیات، و غیر مستقیم تقسیم می شوند. انواع روش های پایش با ذکر محدودیت ها و توانمندی تخمین در جدول آورده شده است.

گروه	روش پایش	محدودیت های اصلی	توانمندی تخمین						
			طول	ارتفاع	عدم تقارن	عمق	آزمودت	پیش	تراوانی
مستقیم، میدان دور،	شیب سنج سطحی	- نمی توان ابعاد شکستگی را از شیب سنج سطحی به دست آورد - قدرت تفکیک با عمق کاهش می یابد							
	شیب سنج درون چاهی	- با افزایش افست چاه، قدرت تفکیک در طول و ارتفاع شکستگی کاهش می یابد - جزئیات کوچک را نشان نمی دهد							

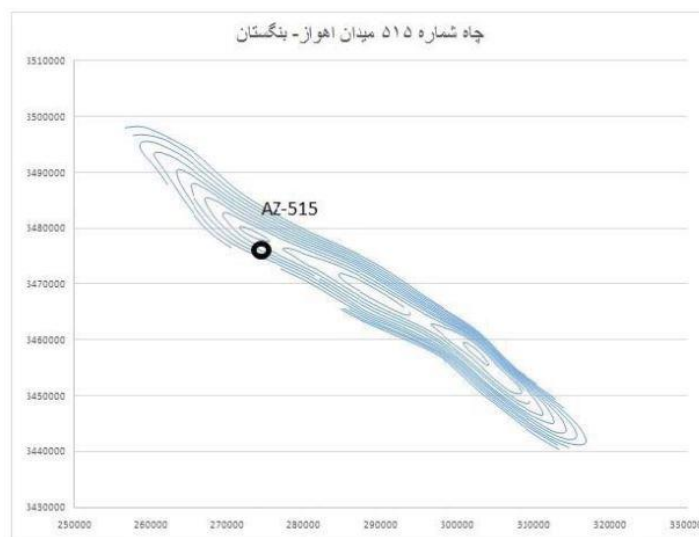
گروه	روش پایش	محدودیت‌های اصلی	توانمندی تخمین						
			تراوایی	حجم	شیب	آزموت	عرض	تقارن	عدم
	میکروسایز میک	- صفحات شکستگی انفرادی قابل شناسایی نیستند - مقادیر نسبت مناسب سیگنال به نویز، فاصله چاه افست را از چاه شکستگی به ۱۵۰۰ فوت محدود می‌کند - در تمامی سازندها قابل استفاده نیست - هیچ اطلاعاتی در مورد توزیع و اثر پروپانت و هندسه شکافت مولد نمی‌دهد							
مستقیم، نزدیک چاه، پس از عملیات	ردباب رادیواکتیو	- عمق نفوذ در حدود ۱ تا ۲ فوت از چاه شکستگی می‌باشد - اگر شکستگی و مسیر چاه هم راستا نباشند فقط حد پایین شکستگی را برای تعیین ارتفاع در نظر می‌گیرد							
	نمودار دما	- تراوایی سازندهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد - در صورتی که شکستگی و مسیر چاه هم راستا نباشند فقط حد پایین شکستگی را برای تعیین ارتفاع در نظر می‌گیرد. - عدم توانایی پس از ۳۶ ساعت							
	نمودار تولید	در Open hole برای تعیین ارتفاع شکافت در چاه و در cased hole برای تعیین مشبکهایی که شکافته شده و تولید می‌کنند مورد استفاده قرار می‌گیرد							
	نمودار تصویرگر چاه	- این روش فقط می‌تواند در چاه باز انجام شود - این نمودارها، تصاویر جهت گیری شکستگی های القایی و طبیعی را نزدیک چاه ارائه می‌دهند - تفسیر این شکستگی ها ممکن است جهت حداکثر تنش را ارائه کنند							
	دوربین درون چاهی	تنها در چاههای با لوله جداری اجرا شده و اطلاعاتی در مورد وضع لوله جداری، مشبکها و نواحی مشارکت کننده در تولید می‌دهد.							

گروه	روش پایش	محدودیت‌های اصلی	توانمندی تخمین						
			طول	ارتفاع	عدم تقارن	عرض	آزموت	شیب	حجم
پایش مستقیم		ممکن است در open hole با استفاده از این ابزار بتوان وضع کیفی شکاف ایجاد شده را بررسی کرد							
	نمودار قطرسنجی	- این روش فقط می‌تواند در open hole انجام شود - این نمودار می‌تواند میزان انحراف دیواره چاه از حالت متقارن و دایره ای به دلیل وجود تنشهای افقی نابرابر را اندازه گیری کند							
	آنالیز فشار خالص شکست	- نتایج به فرضیات مدل و توصیف مخزن بستگی دارد - نیاز به تراوایی دقیق و تخمین فشار مخزن و کالیبراسیون دارد							
پایش غیرمستقیم	چاه آزمایشی	- نتایج وابسته به مفروضات مدل است - به نفوذپذیری دقیق و فشار مخزن نیاز دارد							
	آنالیزهای تولید	- نتایج وابسته به مفروضات مدل است - به نفوذپذیری دقیق و فشار مخزن نیاز دارد							

فصل چهارم: طراحی شکاف هیدرولیکی در چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز

۴-۱- زمین شناسی میدان اهواز

میدان نفتی اهواز در جنوب غربی ایران و در فروافتادگی دزفول قرار دارد که دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی، به موازات رشته کوه زاگرس می باشد. این میدان بین طول های جغرافیایی ۴۸ و ۴۹ درجه و عرضهای جغرافیایی ۳۱ و ۳۲ درجه قرار دارد. طول میدان اهواز ۶۷ کیلومتر و عرض آن ۶ کیلومتر است. این میدان نفتی در حاشیه شمال شرقی شهرستان اهواز، بین میادین مارون در شرق، بندکرخه و سوسنگرد در غرب و در بخش های جنوب شرقی و جنوب غربی آن به ترتیب میادین شادگان و آبتیمور واقع شده است و جزء میادین نفتی عظیم محسوب می شود. در این طرح چاه شماره ۵۱۵ میدان که در ضلع جنوب غربی میدان قرار دارد (شکل ۴-۱) مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۴-۱: موقعیت چاه شماره ۵۱۵ اهواز در نقشه همتراز عمقی بر مبنا مختصات Lambert

سازندهای آسماری، ایلام و سروک مهمترین سنگ مخزن این میدان را تشکیل می دهند. در چاه شماره ۵۱۵ سازند مخزنی هدف شامل سازند ایلام و سروک می باشند. سازند ایلام با دو رخساره عمیق و کم عمق دیده می شود. برش الگوی این سازند که نشانگر رخساره عمیق است در بخش شمال باختری کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری

شهرستان ایلام قرار دارد. در این برش، سازند ایلام شامل ۱۹۰ متر سنگ آهک های رسی دانه ریز پلاژیک خاکستری رنگ با لایه بندی منظم و میان لایه های نازک شیل و سن سانتونین-کامپانین است. همچنین رخساره های کم عمق سازند ایلام، در نواحی فارس و خوزستان گسترش دارد که شامل سنگ آهک های قلوه ای است که همچنان سن سانتونین تا کامپانین دارد. در برخی نقاط می توان ارتباط بین انگشتی دو رخساره پلاژیک و کم عمق سازند ایلام را می توان دید. سازند سروک دو رخساره متفاوت دارد. در محل برش الگو و فارس ساحلی، رخساره های کم عمق این سازند گسترش دارد. در حالی که در ناحیه لرستان، می توان رخساره های عمیق سازند سروک را دید.

۴-۲- زون های مخزنی سازند ایلام و سروک در چاه مورد مطالعه

بر اساس گزارش شرکت نفت مناطق نفت خیز جنوب سازند ایلام به سه زون مخزنی (A, B, C) تقسیم شده است. البته زون C دارای ۳ زیر زون می باشد. در مخزن ایلام زون A و B دارای آب اشباع شدگی بالای ۴۰ درصد بوده اما زون C مقدار آب اشباع شدگی کمتر از ۲۰ درصد می باشد. همچنین سایر زونها بجز زونهای C1 و C2 تخلخل بسیار پایینی دارند. لذا از نظر پتروفیزیکی زون C1 مخزن ایلام مناسب ترین زون تولیدی می باشد. مخزن سروک نیز به شش زون (D, E, F, G, H, I) به همراه تعدادی زیر زون تقسیم شده است. این مخزن آب اشباع شدگی از ۳۰ تا ۴۵ درصدی و تخلخل کمتر از ۶ درصد دارد، بجز زون I2 که تخلخل در حدود ۱۱ درصد و آب اشباع شدگی ۳۲ درصدی دارد. لذا زون I2 یکی از مناسب ترین زون های تولیدی مخزن سروک می باشد. اطلاعات جزئی تر از زون های مختلف مخزن ایلام و سروک در چاه شماره ۵۱۵ در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱: میانگین خصوصیات پتروفیزیکی در زون های مختلف مخزن ایلام و سروک در چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز.

Az#515								
Formation	Reservoir Zonation	Depth (m)	Hydrocarbon Column (m)	Sw (%)	Porosity (%)		Thickness (m)	
					Total	Effective	Total	Effective
Gurpi	Gu	3205.5	-	-	-	-	-	-
Ilam	A	3402.7	0.1	44.8	6.6	4.3	19.1	1.8
	B	3421.7	0.0056	46.8	5.3	2.7	13.3	0.2
	C1	3435.0	6.4	14.4	18.5	18.4	40.5	40.2
	C2	3475.6	5.1	15.6	16.1	16.1	37.8	37.8
	C3	3513.4	4.1	25	11	8.3	73.3	49.8
Sarvak	D	3586.6	0.032	27.8	5.5	0.7	41.6	0.8
	E1	3628.3	0.6	21.3	6.4	2.4	107	11.7
	E2	3735.3	3.8	26.5	9	5.6	129.1	57
	F1	3864.4	0.1	26.7	6.1	2.3	43.4	1.8
	F2	3907.8	0	-	-	1.5	43	0
	G1	3950.7	0.6	33.8	5.6	3.6	74.1	17.1
	G2	4024.8	1.5	37.1	9.2	6.4	51.4	26.2
	H	4076.1	0.023	45.9	5.5	2.6	29.3	0.8
	I1-1	4105.5	0.041	42.6	6.6	4.5	31.5	1.1

	I1-2	4136.9	0	-	-	1.7	46.5	0
	I2	4183.5	5.8	32.1	11.3	11.2	86.4	75.7

۲-۴- عمق سر سازندها

دکل حفاری در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۲۲ شروع به کار کرده که در طی ۲۸۵ روز به عمق نهایی ۴۲۸۸ متری رسیده است. عمق سرسازندها در حفاری چاه شماره ۵۱۵ در جدول ۲-۴ ارائه شده است. در این چاه سازند هدف سروک می باشد که سر سازند آن در عمق ۳۵۸۶ متری دیده شده است. در این بخش میدان سازند سروک در حدود ۷۰۰ متر ضخامت دارد.

جدول ۲-۴: عمق سر سازندهای حفاری شده در چاه شماره ۵۱۵

سازند	عمق سرسازندها (م ح)		سازند	عمق سرسازندها (م ح)		سازند
	پیش بینی	واقعی		پیش بینی	واقعی	
آغاچاری	سطح	سطح	گچساران ۲	۲۴۸۳	۲۴۳۸	
میشان	۱۶۳۸	۱۶۵۵	پوش سنگ	۲۵۹۰	۲۵۸۴	
گچساران ۷	۱۷۳۸	۱۷۴۲	آسماری	۲۶۳۱	۲۶۲۶	
گچساران ۶	۱۸۳۰	۱۸۳۱	پابده	۳۲۹۴	۳۰۷۴	
گچساران ۵	۱۹۶۵	۱۹۶۷	گورپی	۳۲۲۴	۳۲۱۷	
گچساران ۴	۲۱۸۸	۲۱۸۳	ایلام	۳۴۱۳	۳۴۰۱	
گچساران ۳	۲۳۶۸	۲۳۱۶	سروک	۳۵۸۶	۳۵۸۴	

۴-۳- مدلسازی ژئومکانیکی

۴-۳-۱- داده های مورد نیاز

در طراحی یک عملیات شکافت هیدرولیکی نیازمند داده در بخش زمین شناسی، پتروفیریک، ژئومکانیک، مخزن و تکمیل چاه می باشیم. در بخش زمین شناسی تعیین درصد کانی های رسی، کلسیت و دولومیت بعلاوه مطالعه شکستگی ها طبیعی از اهمیت بسیاری برخوردار است. همچنین در بخش پتروفیزیک به داده های تخلخل، تراوایی و آب اشباع شدگی نیاز است. در بخش ژئومکانیک به داده های لاگها و در صورت امکان نمونه مغزه به منظور تعیین پارامترهای مکانیک سنگی لازم می باشد. در بخش مخزن و تکمیل چاه مهمترین داده های مورد نیاز شامل فشار استاتیک مخزن، نتایج آزمون چاه، وضعیت مشبککاری، داده دما و فشار سیال، لاگهای تولیدی و خصوصیات لوله جداری می باشد. داده های مورد نیاز برای طراحی شکافت هیدرولیکی در یک چاه در شکل ۴-۲ ذکر شده است. البته اگر داده های آزمون چاه، تاریخچه تولید چاه و داده های دما و فشار سیال در دسترس بود، پیش بینی تولید پس از عملیات شکافت هیدرولیکی در چاه انجام می شد.

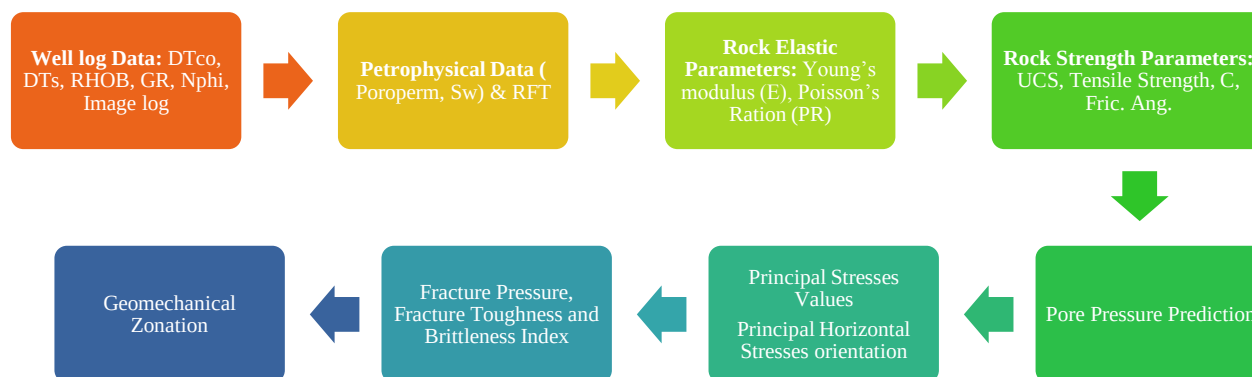
Geological Data	• Percent of Clay ✗ • Percent of Calcite and Dolomite ✓ • Natural Fracture Distribution ✗
Petrophysical Data	• Compressive wave velocity ✓ • Shear wave velocity ✓ • Density ✓ • Porosity ✓ • Image logs ✗
Geomechanical Data	• Uniaxial Compressive Strength test ✗ • Tri-axial compressive test ✗ • Fracture toughness test ✗ • Brazilian test ✗ • Waves velocity test ✗
Well Test Data	• MDT ✗ • RFT ✓ • XPT ✗ • LOT ✗ • XLOT ✗
Reservoir/Completion Data	• PVT and Well Test Data ✗ • PLT ✗ • Pressure Survey ✓ • Perforation Data ✓ • Tubing and liner burst/Collapse analysis & Annulus pressure history ✗

شکل ۴-۲: داده های مورد نیاز در طراحی شکافت هیدرولیکی. داده هایی که علامت تیک آبی دارد در طراحی شکافت هیدرولیکی چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز در دسترس بوده است.

۴-۳-۲- تخمین پارامترهای ژئومکانیکی

برای یک عملیات موفق شکافت هیدرولیکی علاوه بر تجهیزات سر چاهی مناسب و یکپارچگی ستون چاه، خصوصیات ژئومکانیکی زون های انتخاب شده برای عملیات شکافت هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت می باشد. مدل ژئومکانیکی در واقع یک نمایش عددی از وضعیت تنشها و خواص مکانیکی سنگ برای یک برش خاص در یک چاه یا میدان یا حوضه است. تعیین این پارامترها عموماً از طریق اطلاعات حاصل از مغزه های حفاری و استفاده از داده های چاه نگاری امکان پذیر است. دقیق ترین روش جهت تعیین پارامترهای مکانیک سنگ انجام آزمایشات مکانیک سنگی بر روی نمونه های مغزه است. که به دلیل هزینه بر بودن و تعداد محدود نمونه ها، نمی تواند جهت

مدلسازی پیوسته لایه های زیرسطحی استفاده شود. بنابراین، عموماً این پارامترها از طریق نگارهای چاه و کالیبراسیون آنها از طریق داده های مغزه تعیین می شوند. در واقع در طول این فرآیند، مطالعات ژئومکانیکی سازند انجام می شود که می تواند جهت بررسی پایداری چاه، تعیین تنش های برجا و اثرات آن بر روی لوله های جداری مورد استفاده قرار می گیرد. بعلاوه، یکی از مهمترین کاربردهای مدلسازی ژئومکانیکی استفاده از داده های آن در طراحی عملیات شکست هیدرولیکی و انتخاب چاه و لایه کاندید برای این عملیات می باشد. با آگاهی از عوامل تأثیرگذار بر طراحی شکافت هیدرولیکی، مطالعات ژئومکانیکی انجام می شود؛ بنابراین تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ از قبیل تنشهای اصلی، مقاومت سنگ، چقرمگی شکست، فشار منفذی، فشار شکست، و ضرایب الاستیک برای طراحی شکست هیدرولیکی امری ضروری است. در شکل ۳-۴ روند انجام مطالعات ژئومکانیکی رایج در یک عملیات شکاف هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: روند انجام مطالعات ژئومکانیکی

۴-۳-۳- تعیین زون کاندید برای عملیات شکافت هیدرولیکی از نظر ژئومکانیکی

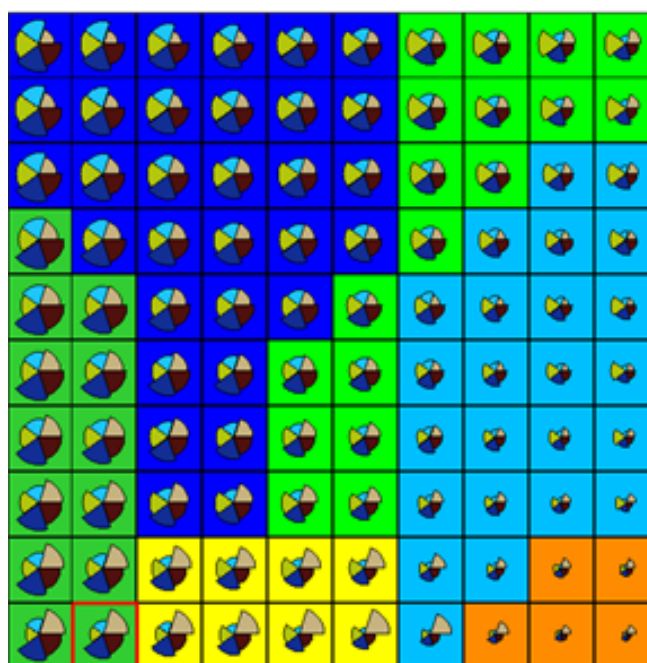
به منظور تحلیل بهتر چگونگی تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی لازم است که چاه مورد مطالعه به زون‌های ژئومکانیکی تقسیم بندی شود و در نهایت بهترین زون ها برای اجرا عملیات شکاف هیدرولیکی مشخص می شوند. برای این منظور از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. روش خوشه بندی یکی از بهترین روش‌های تعیین زون در سازندهاست. در این مطالعه از روش خوشه بندی درختی برای تعیین زون‌های ژئومکانیکی استفاده شده است. بعد از آماده کردن داده‌ها برای خوشه بندی، در مرحله بعد روش خوشه بندی درختی برای تعیین خوشه‌های بهینه استفاده شد. برای این منظور نمودارهای مقاومت تک محوره، مدول یانگ، چقرمگی شکست، اندیس شکنندگی، و ضریب پواسون به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب گردیده است. بعد از انتخاب متغیرهای ورودی در ادامه با استفاده از درخت خوشه‌ای، شماره تعداد گونه‌های سنگی بهینه مشخص گردید. شش خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه انتخاب گردیده است. شکل ۴-۴ نقشه خود سازماندهی^۱ خوشه‌ها را برای چهار پارامتر انتخابی برای خوشه بندی بر اساس رنگ‌های نشان داده شده است. جدول ۴-۳ همچنین میانگین خصوصیات مکانیک سنگی را برای هر یک از خوشه‌های ژئومکانیکی را نشان می‌دهد که برای هر پارامتر از ۱ تا ۶ و رنگ‌های مختلف هر خوشه به تفکیک آورده شده است. در شکل ۴-۴ خوشه‌های ژئومکانیکی به همراه پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده، نشان داده شده است. بر اساس این خوشه بندی بازه مورد مطالعه به ۱۳ زون تقسیم شده است. زون‌های A، E، G و I ترکیبی از تمامی خوشه‌ها هستند. در صورتی که زون B با ضخامت تقریبی ۷۰ متر، به طور یکنواختی از خوشه ۶ و تا حدود بسیار کمی از خوشه ۲ تشکیل شده است و از آنجایی که این دو خوشه پایین‌ترین مقادیر پارامترهای مکانیک سنگی را دارا هستند می‌تواند به عنوان یک کاندید مد نظر قرار گیرد. از طرفی زون C همانند زون F و J و M عمدتاً از خوشه ۲ تشکیل شده است که نشان دهنده میزان پایین مقادیر

^۱Self organizing map

مکانیک سنگی در این زون‌ها است. همچنین زون‌های D، H و I عمدتاً از خوشه ۴ و ۱ تشکیل شده‌اند که بالاترین مقادیر پارامترهای مکانیک سنگی را از آن خود کرده‌اند. قرار گرفتن این زون‌ها در کنار زون‌های کاندید دیگر می‌تواند به عنوان یک سد در برابر رشد عمودی شکاف در چاه عمل کند.

جدول ۴-۳: پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده در خوشه بندی، میانگین هر پارامتر در خوشه‌های مختلف

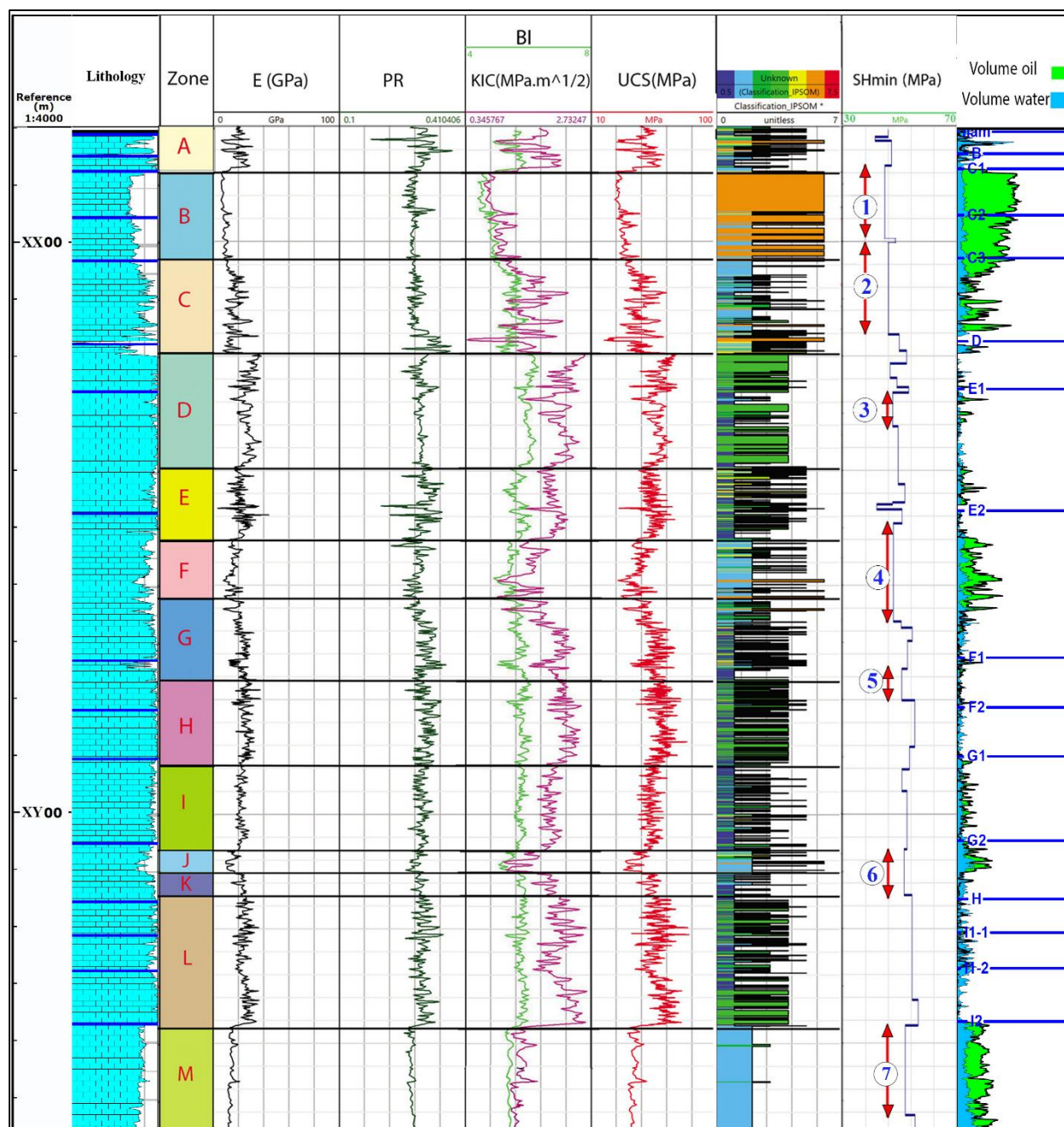
Name	1	2	3	4	5	6
Color						
Poisson Ratio (Static)	0.3040	0.2848	0.3229	0.2972	0.3255	0.2842
Young's Modulus (Static)	25.56	13.61	25.12	18.87	15.87	8.31
BI	5.8580	5.3182	5.6060	5.7351	5.4563	4.7170
KIC	1.9793	1.3464	2.1409	1.6652	1.6732	0.9859
UCS	57.05	40.34	62.47	47.80	48.27	32.12



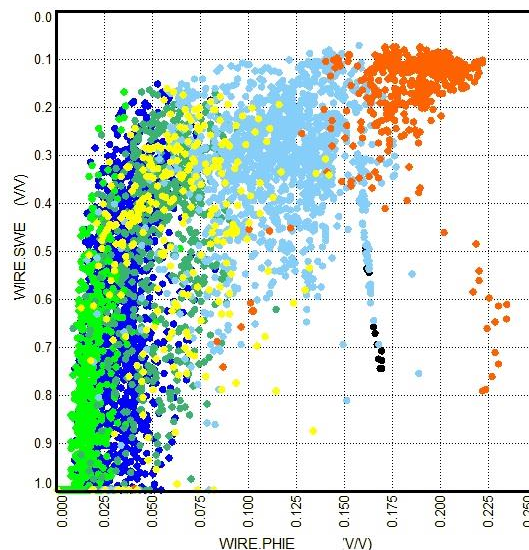
شکل ۴-۴: نقشه خود سازماندهی خوشه‌ها را برای چهار پارامتر انتخابی برای خوشه بندی

با توجه به اینکه یکی از اساسی‌ترین پارامترها در تعیین هندسه شکاف تنش افقی مینیمم می‌باشد، بایستی در نظر داشت در زون‌ها مشخص شده، هر زونی که برای شکافت هیدرولیکی کاندید باشد بایستی چگونگی تغییرات تنش در آن زون مورد بررسی قرار گیرد. ایده آل‌ترین حالت این است که یک زون با تنش کمتر در بین دو زون با تنش بیشتر قرار گرفته باشد (سد تنشی). این نواحی در تراک تنش افقی مینیمم در شکل ۴-۵ مشخص شده‌اند. در بخش پایینی زون A تنش کاهش یافته و این کاهش یک بازه عمقی ۳۲ متری را در زون B ایجاد می‌کند (بازه ۱ در شکل ۴-۵). با یک افزایش جزئی در تنش مجدداً یک ناحیه با اختلاف تنش در قسمت پایینی زون B و قسمت بالایی زون C ایجاد می‌شود (بازه ۲ در شکل ۴-۵). قسمت میانی زون D (بازه ۳ در شکل ۴-۵)، زون F و بالای زون G (بازه ۴ در شکل ۴-۵)، در زون J و K (بازه ۶ در شکل ۴-۵) و بالاخره زون M (بازه ۷ در شکل ۴-۵) که بسیار مساعدتر از موارد دیگر به نظر می‌رسد، مشاهده می‌شود.

در ادامه لیتولوژی و زون‌های مخزنی تعیین شده در مقابل زون‌های ژئومکانیکی آورده شده است (تراک آخر شکل ۴-۵). همانطور که مشاهده می‌شود در چندین زون مرزهای زون‌های مخزنی و ژئومکانیکی انطباق خوبی نشان می‌دهند. از میان زون‌های ژئومکانیکی تعیین شده، پارامترهای مخزنی نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت و زون‌های کاندید نهایی مشخص خواهد شد. نکته قابل توجه میزان اشباع آب و سیال هیدروکربنی است، که بایستی برای زون‌های کاندید در نظر گرفته شود. زون‌هایی که تولید طبیعی آنها از نظر اقتصادی بسیار قابل توجه است (تخلخل و تراوایی بالا) و همچنین زون‌هایی که اشباع آب آنها بالاست، از زون‌های کاندید حذف خواهند شد. با در نظر گرفتن این موضوع و با توجه به شکل ۴-۶ می‌توان نتیجه گرفت که کلاس‌های ۲، ۵ از لحاظ وضعیت تخلخل و اشباع شدگی آب مناسب هستند چرا که در خوشه ۶ تخلخل به صورت طبیعی بالاست و از ۱۵ درصد بیشتر است.



شکل ۴-۵: پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده برای خوشه بندی، خوشه ها، زون های تعیین شده و نمودار تنش افقی
مینیمم به صورت پیوسته



شکل ۴-۶: نمودار اشباع آب - تخلخل با لحاظ خوشه‌های تعیین شده

در فاز دوم همین پروژه پارامترهای ضروری جهت غربالگری و انتخاب چاه و لایه مخزنی برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی معرفی گردید. همانطور که ذکر گردید، در کنار پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های موجود، خصوصیات پتروفیزیکی از قبیل تخلخل، اشباع شدگی، تراوایی نیز جهت انتخاب زون مناسب مخزنی باید مورد بررسی قرار گیرد. اگر در یک بازه مخزنی تخلخل بالا (بالتر از ۱۸ درصد) وجود داشته باشد و تراوایی نیز بیشتر از ۱۰ میلی داری باشد زهکشی و تخلیه مخزن بصورت طبیعی اتفاق می افتد و دیگر نیازی به عملیات شکافت هیدرولیکی نخواهد داشت. از طرف دیگر، اگر میزان تخلخل کمتر از ۵ درصد باشد و تراوایی هم کمتر از ۱ میلی داری باشد میزان ذخیره مخزن در حدی نخواهد بود که عملیات را اقتصادی کند. بنابراین، کالبره کردن زون‌های مناسب از منظر مکانیک سنگی و تنشی با نتایج پتروفیزیکی، در این چاه نیز ضروری است.

از آنجایی که زون‌های کاندید بایستی از لحاظ اشباع شدگی آب و نفت مورد بررسی قرار گیرند در این بخش، زون‌های ژئومکانیکی مشخص شده در بخش قبل در مقابل اشباع شدگی آب و نفت قرار گرفته تا انتخاب بازه‌های کاندید امکانپذیر گردد. در مخزن مورد مطالعه زون‌های پتروفیزیکی (C1-C3، E2، G2، و I2) دارای اشباع هیدروکربنی قابل ملاحظه‌ای می‌باشند که این زون‌ها کاندید مناسبی از نگاه پتروفیزیکی هستند (شکل ۴-۷).

زون ژئومکانیکی B معادل زون های مخزنی C1 و C2 دارای تخلخل بالا بوده (میانگین بالاتر از ۱۵ درصد) بوده و اشباع شدگی نفت بالایی دارد. با توجه به پارمترهای غربالگری، این زون ها می توانند در شرایط موجود به صورت طبیعی تخلیه شوند و نیازی به عملیات شکافت هیدرولیکی در این زون ها وجود ندارد. زون C3، معادل زون ژئومکانیکی C و زون تنشی ۲ نیز می تواند به عنوان یک کاندید برای شکاف هیدرولیکی در نظر گرفته شود. یکی دیگر از زون های دارای تخلخل و اشباع هیدروکربن مناسب زون F و بخش بالایی زون ژئومکانیکی G است که معادل زون مخزنی E2 هستند. این زون معادل زون تنشی شماره ۴ بوده و مناسب عملیات شکافت هیدرولیکی است. بازه بعدی بازه مخزنی G2 است که زون ژئومکانیکی J و K را تشکیل می دهد و معادل زون تنشی شماره ۶ است (شکل ۴-۷ تراک ۸). این زون نیز با ارزش پایین تر از زون بالایی مناسب عملیات شکافت هیدرولیکی است. بازه نهایی مناسب از نظر هیدروکربنی، زون مخزنی I2 است. این زون معادل زون ژئومکانیکی M است که کل زون تنشی ۷ را به خود اختصاص می دهد. این زون از تمام جهت (خواص مکانیک سنگی، پایین بودن تنش افقی و مناسب بودن حجم ذخیره و اشباع شدگی) در اولویت اول از نظر عملیات شکافت هیدرولیکی قرار می گیرد.

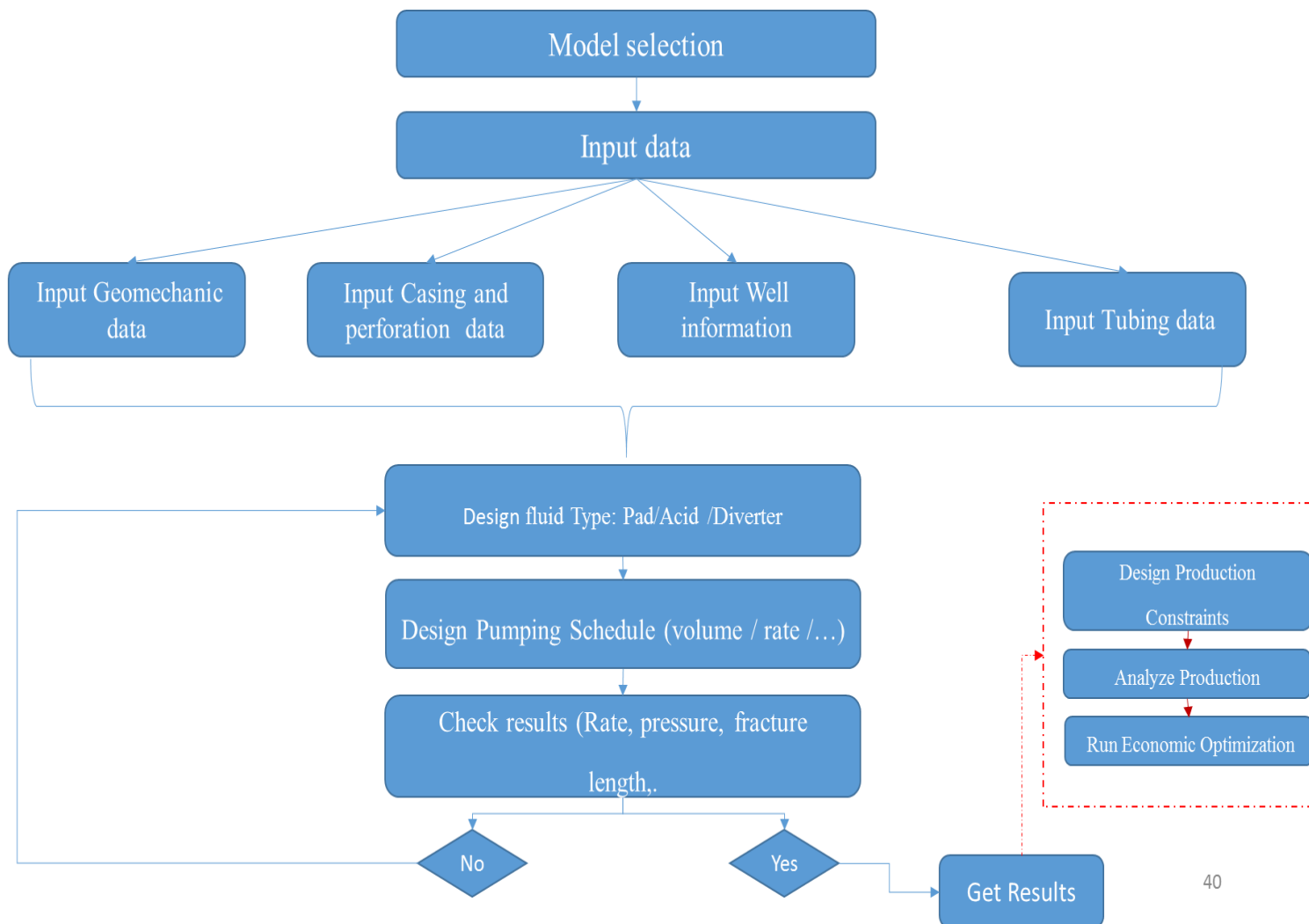
۴-۴- شبیه سازی شکاف چاه شماره ۵۱۵ میدان اهواز

۴-۴-۱- مقدمه

چاه شماره ۵۱۵ اهواز (E: 274818, N: 3476731) در سازند بنگستان در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۲۲ شروع به حفاری شده و در تاریخ ۱۳۹۸/۰۹/۲ تکمیل شده است. با توجه به برنامه شکاف اسیدی، لاینر ۷ اینچ تا انتهای بازه ی حفاری شده رانده شده و رشته تکمیلی ۴،۵ اینچ (فشار کاری ۱۰،۰۰۰ پام) در سازند کربناته ایلام تا عمق ۳۶۷۶ متری تکمیل شده است. لایه تولیدی این چاه در بازه ی ۴۲۰۵-۴۲۴۵ متری مشبک کاری شده است. با توجه به مطالعات ژئومکانیکی صورت گرفته تمامی زون تولیدی مشبک کاری شده به عنوان لایه کاندید برای انجام عملیات شکاف اسیدی در نظر گرفته شده است. با توجه به آنالیز داده های فشار منفذی در طول بازه ی کاندید شده احتمال شکستگی در بازه ی ۴۲۰۵ تا ۴۲۴۵ متری پیش بینی می گردد. وضعیت سیمان پشت لوله جداری در

بازه ی مشبک کاری شده خوب گزارش شده ولی اطلاعاتی از وضعیت فشار مچالگی و ترکیدگی لاینر ۷ اینچ در دسترس نمی باشد. شبیه سازی عملیات با انتخاب سیالات و طراحی نحوه ی پمپاژ با شبیه ساز FracPro انجام شده و پس از بررسی نتایج حاصله از شبیه سازی، آنالیز حساسیت برای حجم اسید، نرخ تزریق و برنامه پمپاژ سیالات جهت رسیدن به بهینه ترین هندسه ی شکاف ممکن انجام شد. در انتها نرخ تزریق ۲۰ بشکه در دقیقه با توجه محدودیت فشار تزریق و هندسه ی خروجی از شبیه ساز برای ادامه ی طراحی در نظر گرفته شد.

داده های ورودی این شبیه ساز طبق فلوچارت شکل شماره ۴-۷ به ترتیب وارد شبیه ساز شده و در نهایت به خروجی مورد نظر می رسد.



40

شکل ۴-۷: فلوچارت کلی طراحی شکافت هیدرولیکی

طبق فلوچارت ارائه شده برای روند شبیه سازی در چاه شماره ۵۱۵، ابتدا داده های مورد نیاز شامل داده های ژئومکانیکی محاسبه شده، مشخصات حفاری و رشته ی تکمیلی، مشبک کاری به ترتیب وارد مدل می شوند. پس از ورود اطلاعات اولیه، از پایگاه داده خود شبیه ساز، ۴ سیال شامل: پد ویسکوز، اسید، سیال منحرف کنندف، سیال جابجا کننده استفاده شد. سیال انتخاب شده در این طراحی به اسم تجاری Prime Frac در شرایط دمایی بالا آزمایش های رئولوژی آن انجام شده است. حداکثر ویسکوزیته ظاهری بدست آمده طبق داده های خود سیال در نرخ برشی ۱۷۰ (1/sec) حدود ۲۶۵ cp ثبت شده است. جهت ایجاد خوردگی در سطح شکاف و همچنین جلوگیری از خوردگی اجزا رشته تکمیلی از اسید ۱۵ % HCL استفاده شده است. از مزایای این سیال اندک بودن میزان ضریب اصطکاک با توجه به ویسکوزیته پایینی که دارد می باشد.

با توجه به تجربه های طراحی پیشین سیال منحرف کننده جریان VDA انتخاب گردید (البته این سیال در شرایط عملیاتی نیازمند طراحی و فرمولاسیون خاص خود را دارد). در انتخاب این سیال پارامتر ویسکوزیته از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. بدین منظور سیال VDA (Visco Elastic Diverting Agent) را از کتابخانه خود شبیه ساز انتخاب کرده به عنوان سیال منحرف کننده به صورت پایه در طراحی استفاده می کنیم. در انتها سیال جابجا کننده (در اینجا دیزل) انتخاب شده است.

طبق فلوچارت، ترتیب تزریق سیالات مرحله بعدی می باشد. این مرحله از طراحی در حقیقت کلید ایجاد هندسه شکاف با تزریق متوالی سیالات مختلف جهت کاهش هرزروی و نفوذ بیشتر اسید به نواحی با تراوایی کمتر می باشد. بدین منظور در طراحی پمپاژ سیالات، ابتدا سیال شکننده را تزریق کرده که موجب شکست و گسترش سنگ شده و متعاقب آن اسید و VDA به توالی با نرخ ها و حجم های مختلف تزریق شده که موجب خوردگی سطوح مسیر باز شده می شوند.

برای دستیابی به پوشش بهینه نواحی تحت تزریق اسید پس از محاسبات از شاخص تزریق تقریباً ۳۸۰ گالن/ فوت به عنوان حجم اولیه (نزدیک به مدل Daccord) برای سیالات اسید و VDA با حجم پد حدود ۱۰۰ بشکه جهت شروع شبیه سازی در نظر گرفته شد و طراحی پمپاژ اولیه طبق برنامه زیر در شکل ۴-۸ طراحی گردید.

	Stage Type	Flow Rate (bpm)	Prop Conc (ppg)	Clean Vol (gal)	Step Length (min)	Cumul Time (min:sec)	Fluid Type
1	Circulation	5.00	0.00	9,770	46.52	46:31	Diesel
2	Main frac pad	25.00	0.00	4,200	4.00	50:31	PrimeFRAC 15
3	Main frac acid	25.00	0.00	19,530	18.60	69:07	15%HCl
4	Main frac slurry	25.00	0.00	20,790	19.80	88:55	VDA10
5	Main frac acid	25.00	0.00	19,530	18.60	107:31	15%HCl
6	Main frac slurry	25.00	0.00	20,790	19.80	127:19	VDA10
7	Main frac acid	25.00	0.00	19,530	18.60	145:55	15%HCl
8	Main frac flush	25.00	0.00	10,000	9.52	155:26	Diesel

شکل ۴-۸: توالی تزریق و نرخ های تزریق در برنامه پمپاژ سیالات

پس از تزریق سیالات طبق برنامه پمپاژ، هندسه ی ایجاد شده در طراحی اولیه ارزیابی شده که طول شکاف ایجاد شده برابر با ۸۱۴ فوت و طول تحت تاثیر خوردگی اسید برابر با ۳۳۲ فوت بوده که حدود ۴۰ درصد حاکاکی^{۵۶} شده تاثر مهمی بر هدایت پذیری نهایی ایجاد نماید. بیشترین عرض بازدگی در دهانه ی مشبک ها برابر با 0.47 اینچ بوده و میانگین عرض برابر با 0.2 اینچ بوده که از این عرض بازشدگی به صورت میانگین 0.06 اینچ تحت تاثر خوردگی اسید قرار گرفته است. حداکثر فشار سطحی ناشی از تزریق حدود ۸۶۶۰ پام بوده که با توجه به محدودیت فشار تاج سرچاهی می بایست این فشار در مراحل بهینه سازی مورد توجه قرار گیرد.

^{۵۶}Etching

در مرحله ی بعد تکرار انتخاب حجم، نرخ تزریق و توالی تزریق طبق روند اجرای شبیه سازی تا رسیدن به مقدار بهینه انجام گردید. حجم های اولیه سیالات اسیدی، بر اساس یک سری فرضیات بدست آمده و می بایست متناسب با خصوصیات لایه های مخزنی بهینه سازی گردند. بهینه سازی در چند سطح نظیر، داده های ورودی (احجام ورودی، نرخ تزریق و نوع سیالات و پارامتر های رئولوژی و ..) که می بایست همگی بر یک شاخص هماهنگ اثر کاهشی یا افزایش داشته باشند، انجام گرفت.

در این مطالعه با توجه به داده های موجود و محدودیت فشار تجهیزات سطحی، این پارامتر به عنوان محدودیت اصلی تعیین کننده در طراحی در نظر گرفته شده است. منظور از شاخص، پارامتریست که بهینه سازی فاکتور های ورودی منجر به تغییر آن می شود. مهمترین شاخص در نظر گرفته در این مرحله از کار، هدایت پذیری بدون بعد می باشد که در انتهای عملیات در صورت ساخت مدل چاه و مخزن این پارامتر نقش کلیدی در پیش بینی مدل های تولید دارد.

به منظور رسیدن به طول و عرض بهینه شکاف، ابتدا بر اساس حجم اولیه، نرخ تزریق را بهینه سازی کرده و از نرخ تزریق ۲۰ بشکه در دقیقه تا ۵۰ بشکه در دقیقه (افزایش ۵ تایی نرخ تزریق در هر سناریو) بدین منظور ۸ سناریو بر پایه برنامه پمپاژ مطرح شده در نظر گرفته شد. نتایج نشان داده که با افزایش نرخ تزریق روند افزایشی طول شکاف مشاهده می شود.

سوال مطرح شده در طول ارزیابی این روند افزایشی این بود که فارغ از محدودیت فشار سطحی، تا کجا می توان نرخ تزریق را افزایش دهیم؟ هر مرحله از افزایش نرخ تزریق منجر به چقدر اختلاف طول شکاف نسبت به مرحله ی قبل می شود؟ لذا تغییرات طول (نسبت طول شکاف ایجاد شده به مرحله قبل) برای ارزیابی در نظر گرفته شد. اما با لحاظ کردن پارامتر تغییرات طول مشاهده گردید که بیشترین افزایش طول شکاف از نرخ ۲۰ به ۲۵

بشکه در دقیقه معادل ۶۵ فوت بدست آمده است و با افزایش نرخ تزریق تا مرحله ی ۶ فارغ از رد شدن حد توقف از فشار سطحی تاج سرچاهی میزان تغییرات طول شکاف نسبت به مرحله ی قبلی با کاهش همراه بوده است. نتایج شبیه سازی نشان داد که از نرخ تزریق ۴۰ بشکه در دقیقه به بالا، به علت سرعت بالای تزریق مدت زمان تماس اسید با سطح شکاف کمتر بوده و عرض حکاکی شروع به کاهش می کند. البته در صورت استفاده از اسید های تاخیری میزان واکنش اسید در دهان ی اولیه شکاف (نزدیک دیواره چاه) کمتر شده و این مهم با طراحی اسید مناسب قبل از طراحی عملیات قابل دست یابی می باشد. هدایت پذیری شکاف، دیگر پارامتر بررسی شده می باشد که تغییرات کاهشی آن با افزایش نرخ تزریق نشان دهنده معکوس بودن روند تغییرات این پارامتر می باشد. باتوجه به تغییرات مشاهده شده در اثر افزایش نرخ تزریق، نرخ تزریق ۲۰ بشکه در دقیقه با توجه به بالا بودن هدایت پذیری شکاف در این نرخ و همچنین فشار سطحی در محدوده ی امن فشار کاری تاج چاه برای این چاه در نظر گرفته شد.

بعد از بهینه سازی نرخ تزریق، حجم سیال اسیدی می بایست متناسب با این نرخ بهینه شده محاسبه گردد. برای این منظور طبق جدول ۴-۴ (لازم به ذکر است که حجم پایه سناریو شماره ۳ بوده و سناریو ۱ و ۲ بعد از اتمام سناریو ها به منظور ارزیابی تاثیر حجم کمتر به ارزیابی ها وارد شده است) افزایش حجم اسید و سیال منحرف کننده در نظر گرفته شد.

جدول ۴-۴ : بهینه سازی حجم تزریقی

Stage Type	Flow Rate (bpm)	Volume 1	Volume 2	Volume 3	Volume 4	Volume 5	Volume 6	Volume 7	Volume 8	Volume 9
Diesel	5	9770	9770	9770	9770	9770	9770	9770	9770	9770
PAD	20	4,200	4,200	4200	4200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200
HCL	20	11718	15,819.3	19,530	21,483	23,436	25,389	27,342	29,295	31,248
VDA	20	12474	16,839.9	20,790	22,869	24,948	27,027	29,106	31,185	33,264
HCL	20	11718	15,819.3	19,530	21,483	23,436	25,389	27,342	29,295	31,248
VDA	20	12474	16,839.9	20,790	22,869	24,948	27,027	29,106	31,185	33,264
HCL	20	11718	15,819.3	19,530	21,483	23,436	25,389	27,342	29,295	31,248
Diesel	20	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Total Volume	Gal	84,072	105,108	124,140	134,157	144,174	154,191	164,208	174,225	184,242
	bbl	2,002	2,503	2,956	3,194	3,433	3,671	3,910	4,148	4,387
Fracture length (ft)		600.9	682	747	779	812	841	869	896	922
Etched Length (ft)		263	309	334	346	360	372	382	391	406
Average etched width (in)		0.053	0.062	0.077	0.085	0.077	0.083	0.089	0.095	0.101
surface pressure (psi)		7707	7710	7712	7714	7717	7717	7718	7719	7719
Avg Fracture conductivity (md.ft)		422.6	717.3	1238	1562	1576	1877	2212	2595	3071

همانطور که مشخص است از حجم تزریقی ۲۹۹۰ به بعد افزایش تغییرات طول حکاکی شده با افزایش ۱۰ درصدی سیال ورودی تغییر چندانی ندارد، لذا حجم ۳۱۹۴ بشکه به عنوان سناریو بهینه انتخاب شده است. در حجم بهینه انتخاب شده طول شکاف و طول حکاکی شده برابر با ۷۷۹ و ۳۳۴ فوت و همچنین میانگین عرض حکاکی شده برابر با ۰,۰۶ اینچ می باشد. از حجم ۲۹۵۰ در سناریو سوم به بعد روند ثابتی داشته و از سناریو ۵ به بعد افزایش اختلاف هدایت پذیری شکاف تغییرات زیادی ندارد، لذا با توجه این روند اختلاف هدایت پذیری شکاف، حجم بهینه ۳۲۰۰ بشکه انتخاب شده است. پارامتر بعدی برنامه پمپاژ سیالات تزریقی بوده که بدین منظور چند سناریو مختلف با حجم و دبی تزریق بهینه آنالیز و بهترین حالت سناریو اول شامل ۳ مرحله تزریق اسید و ۲ مرحله تزریق VDA انتخاب گردید.

پس از انتخاب سناریو بهینه، مدل را با این تغییرات اجرا کرده و نتایج هندسه ی شکاف و تغییرات فشار سطحی و دیگر پارامتر های خروجی را به عنوان مدل بهینه برای چاه مذکور در نظر گرفته است. با بهینه سازی پارامتر های نرخ تزریق ۲۰ بشکه در دقیقه، حجم تزریقی ۳۲۰۰ بشکه و توالی تزریق مدل ساخته شده اجرا و نتایج پارامتر های خروجی قابل توجه بود. در خصوص طول شکاف ایجاد شده، مشاهده گردید که طول حکاکی شده با اسید برابر با ۳۴۶ فوت بدست آمده که نسبت به طول کلی شکاف ایجاد شده یعنی ۷۸۰ فوت به نسبت ۴۴ درصد بیشتر تحت تاثیر نفوذ اسید قرار گرفته است.

۴-۵- مدل سازی تولید و ارزیابی شاخص PI قبل و بعد از طراحی شکاف هیدرولیکی چاه شماره

۵۱۵ میدان اهواز

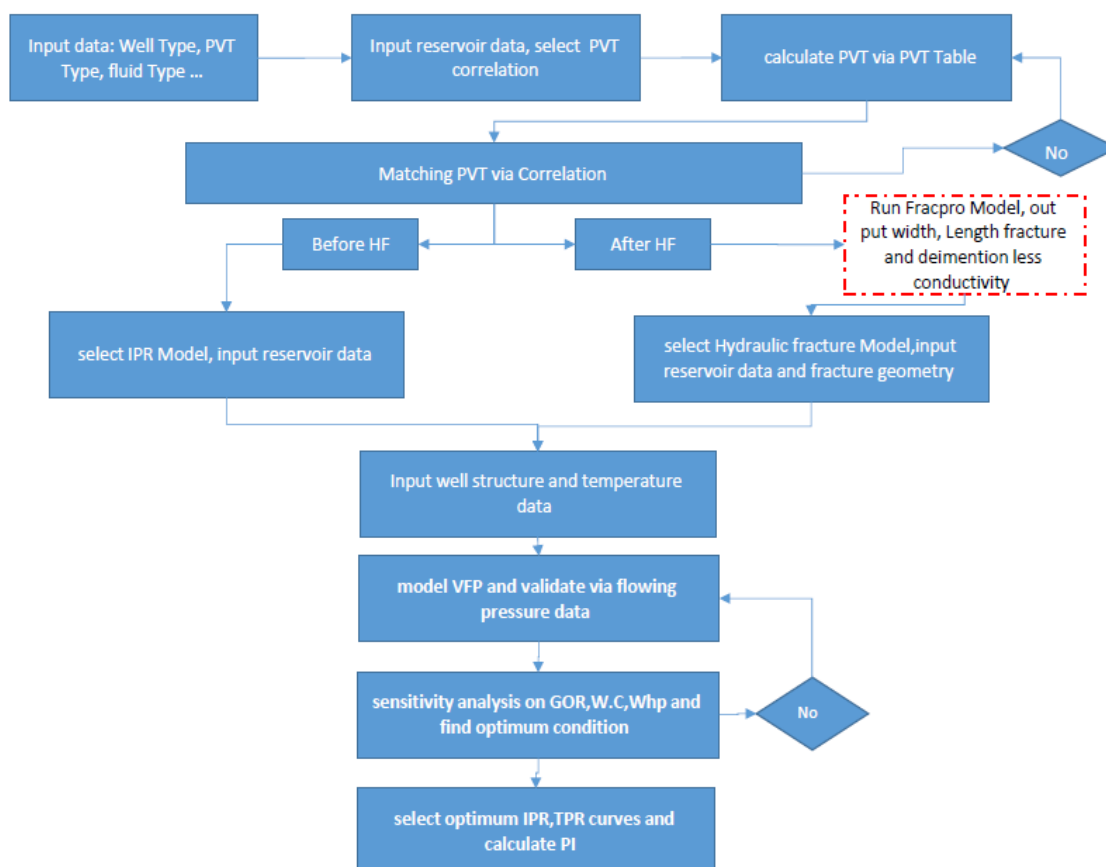
۴-۵-۱- مقدمه:

هدف از ارائه این مدل تولید، ارزیابی عملکرد چاه شماره ۵۱۵ که در شرایط قبل و بعد از طراحی شکاف هیدرولیکی و بررسی وضعیت اثر پارامتر های موثر بر این عملکرد می باشد. این مطالعه توسط نرم افزار شبیه ساز Prosper از پکیج IPM صورت گرفته که ابتدا داده های اصلی ساختار چاه و مخزن به همراه داده های PVT به مدل وارد شده و در با توجه به داده های موجود از روابط سیال برای تطبیق داده های و صحت سنجی آن ها استفاده گردید. سپس مدل تولید چاه برای ایجاد نمودار عملکرد تولید IPR قبل از انجام شکاف هیدرولیکی بر اساس شرایط مخزنی چاه مذکور انتخاب شد. به منظور مدلسازی شرایط درون چاهی و ساخت مدل تولید ستون چاه از آنالیز گره ای استفاده گردید که جهت کالیبره کردن روابط فشار و دما از داده های فشار جریان درون چاهی استفاده شده است. پس از ساخت مدل، نقطه ی عملکردی محاسبه و شاخص تولید چاه حدود 0.98 stb/d/psi تخمین زده شد. به منظور بررسی وضعیت تولید چاه بعد از طراحی شکاف هیدرولیکی، داده های هدایت پذیری و طول

شکاف جهت ساخت مدل عملکرد تولید، از مدل شبیه ساز شکاف استخراج و وارد شبیه ساز تولید شده که جهت ساخت نمودار عملکرد تولید از مدل Hydraulic fractured استفاده و طبق روابط تجربی جریان در ستون چاه با داده های سر چاهی مدل محاسبه شد. نتایج نشان دهنده ی حدود ۲ برابر افزایش شاخص PI بعد از طراحی در نظر گرفته شده این چاه می باشد. در انتهای این مطالعه یک سری از پارامتر های مهم که بر محاسبات جریان در ستون چاه اثرگذار بوده مورد آنالیز حساسیت قرار گرفت

۴-۵-۲- فلو چارت کلی ساخت و بهینه سازی مدل تولید

هدف از ارائه این بخش، نگاه کلی به روند کار جهت ورود اطلاعات، نحوه ی Matvhing و بهتر شدن داده ها، انتخاب مدل و ساخت نمودار های عملکرد تولید می باشد که طبق شکل شماره ۱ در این مطالعه به آن پرداخته شده است.



شکل ۹-۴: فوچارت کلی شبیه سازی مدل تولید چاه

داده های ورودی مخزنی و تولید شامل ضریب حجمی نفت، نسبت گاز به نفت تولیدی، ویسکوزیته نفت و فشار اولیه به منظور محاسبات PVT وارد مدل گردید. جهت اطمینان از این داده های اندازه گیری شده در آزمایشگاه ابتدا تست تطبیق با روابط تجربی موجود در خود شبیه ساز که معیار محاسبات PVT می باشند انجام شد. تست تطبیق پذیری داده های اندازه گیری شده با روابط تجربی در دما و فشار حباب برابر F_{264} با 1700 psi محاسبه گردید. در این چاه داده ی ضریب حجمی نفت موجود نبود که توسط روابط این پارامتر در فشار اشباع برابر با مقدار 1.27 bbl/stb محاسبه گردید. در این مرحله باتوجه به داده های محدود PVT برای انطباق داده های اندازه گیری شده از مدل Black Oil استفاده شده و در این مدل معادله حالت Standing برای محاسبه ضریب حجمی نفت، فشار نقطه ی حباب و نسبت گاز محلول در نفت و برای محاسبه ویسکوزیته نفت از معادله حالت Beggs استفاده شده است. با توجه به PVT Match صورت گرفته، بهترین رابطه برای محاسبه ضریب حجمی نفت و نسبت نفت و گاز با داده های اندازه گیری شده رابطه Laster با کمترین ضریب انحراف استاندارد می باشد.

۴-۶- ساخت مدل IPR^۲

مدل عملکرد تولید رابطه بین فشار جریان و میزان نرخ تولید را محاسبه می کند و نشان می دهد به ازای هر psi افت فشار بین فشار مخزن و فشار درون چاهی چه مقدار نفت در طول یک روز تولید می گردد. در این قسمت دو مدل IPR، یکی قبل از انجام عملیات شکاف هیدرولیکی و یک مدل هم برای بعد از انجام شکاف هیدرولیکی به منظور نشان دادن بهتر عملکرد عملیات انجام شده در نظر گرفته می شود. طبق آخرین گزارش با فشار سر چاهی 187 psi به مقدار 2000 بشکه در روز تولید داشته، لذا برای پیش بینی تولید قبل از انجام عملیات شکاف هیدرولیکی برای این چاه از مدل PI استفاده می شود. به منظور محاسبه شاخص تولید از داده های چاه های

^۱Formation Volume Factor

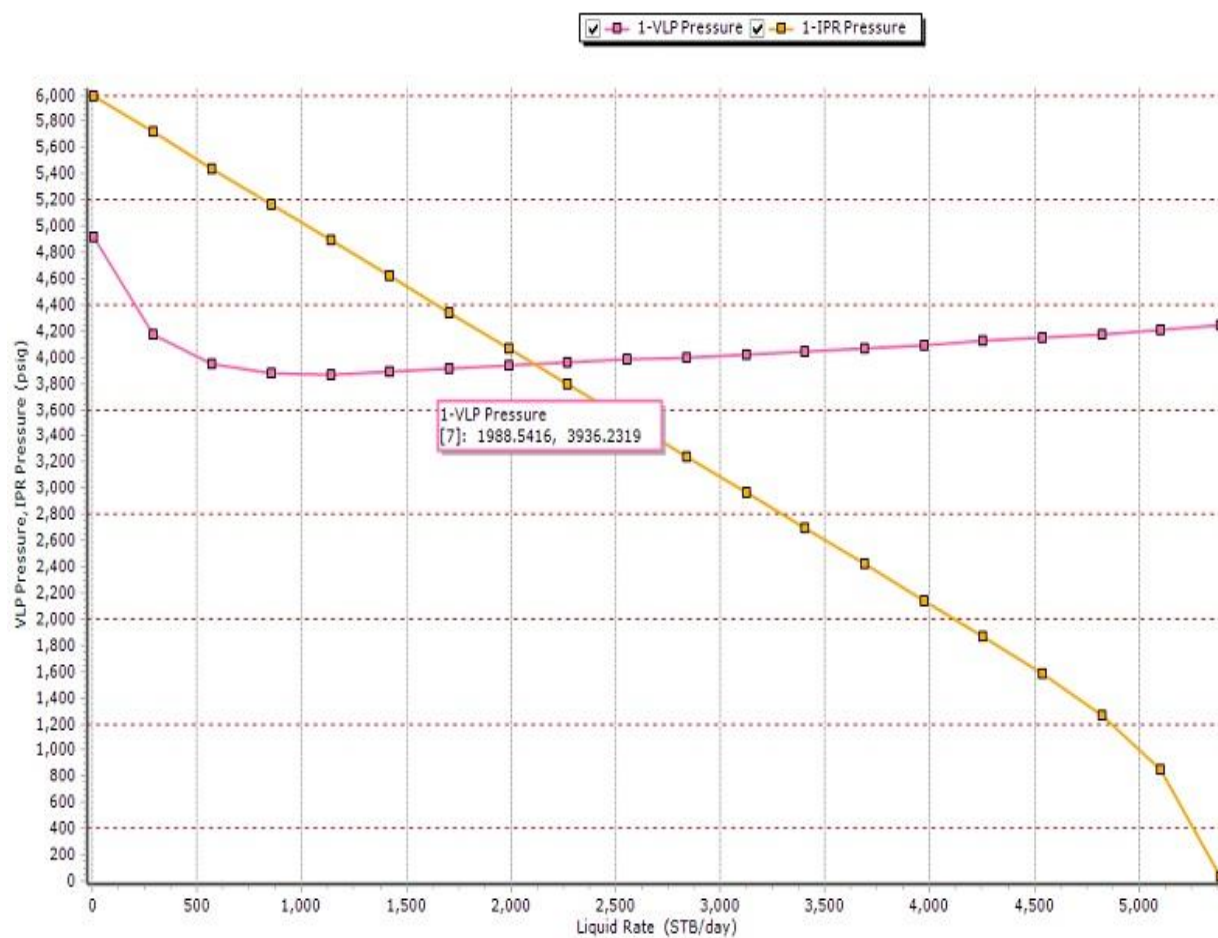
^۲Inflow Performance Relationship

مجاور (داده های فشار جریانیه ته چاه) جهت محاسبه این پارامتر استفاده گردید. فشار جریانیه ته چاه در عمق ۴۲۳۰ متری برابر با ۴۰۶۰ پام محاسبه گردید. با مشخص شدن فشار جریانیه درون چاهی و نرخ تولید گزارش شده، میزان شاخص تولید 1.03 (STB/day/psi) حاصل گردید که به عنوان پارامتر ورودی و شبیه سازی نمودار عملکرد تولید استفاده شد.

بعد از به دست آوردن شاخص تولید، شبیه ساز نمودار عملکرد چاه ۵۱۵ قبل از انجام عملیات شکاف هیدرولیکی را محاسبه نموده که به منظور محاسبه نقطه ی عملیاتی تولید نیازمند محاسبه نمودار فشار سطحی بر اساس قطر لوله مغزی، نسبت گاز به نفت تولیدی و شرایط دمایی ته چاه می باشد. لذا پس از ورود داده های رشته تکمیلی و عمق جداری ها، نمودارهای عملکرد سر چاهی را بر اساس روابط موجود در شبیه ساز محاسبه گردید.

برای محاسبه ی شاخص تولید از آنالیز گره ای^۲ استفاده شد. برای این منظور فشار Top Node در ایجا برابر با آخرین فشار سطحی سر چاهی (۱۸۷ پام) در نظر گرفته شد. برای محاسبه ی VLP از رابطه Petroleum expert 2 استفاده شده است. شبیه ساز Prosper نیاز به انتخاب تعدادی نرخ تولید دارد تا فشارهای VLP و IPR مربوط به این نرخ ها محاسبه شود. که در این چاه حدود ۲۰ نرخ به صورت افزایش خطی برای محاسبات وارد مدل گردید. خروجی مدل چاه شماره ۵۱۵ برای نمودارهای عملکرد تولید و VLP در شکل ۴-۱۰ آمده است. همانطور که در نقطه ی عملکرد^۳ مشاهده می گردد، فشار جریانیه درون چاهی با نرخ تولید حدود ۲۰۵۰ بشکه در روز و فشار سرچاهی ۱۸۷ پام برابر با معادل ۳۹۳۶ پام محاسبه شده که با مقدار تقریبی فشار جریانیه درون چاهی که از داده های چاه های مجاور در نظر گرفته شد با تقریب مناسبی نزدیک می باشد. همچنین شاخص عملکرد تولید با این فشار درون چاهی معادل 0.96 stbd/psi به دست آمده که نزدیک به مقدار محاسبه شده ی قبلی می باشد.

^۱Vertical lift Performance (VLP)^۲Nodal Analysis^۳Operating Point



شکل ۴-۱۰: نمودار عملکرد تولید و VLP چاه ۵۱۵

برای ساخت مدل IPR چاه بعد از ایجاد شکاف هیدرولیکی، ابتدار از مدل FRACPRO داده های طول شکاف حکاکی شده هدایت پذیری بدون بعد^۲ را بدست آورده، سپس داده های PVT طبق مدل قبل از ایجاد شکاف، تطبیق داده شد. بدین منظور برای محاسبه ی مدل IPR و TPR این چاه، از مدل Hydraulically fractured well استفاده می کنیم. مدل مذکور بر اساس مقاله Cinco et all (در سال ۱۹۸۷) رابطه ی رفتار جریان فشار گذرا^۳ در یک چاه با شکاف های عمودی با هدایت پذیری محدود در شبیه ساز Prosper ساخته شده است.

با توجه به مشخص نبودن مقدار فشار سطحی بعد از انجام عملیات شکاف هیدرولیکی آنالیز گره ای برای فشار سر چاهی (از فشار ۱۸۷ پام قبل از انجام عملیات شکاف هیدرولیکی افزایش تا ۱۲۰۰ پام) به صورت افزایشی در نظر گرفته شد. نقطه ی عملکردی چاه شماره ۵۱۵ با همان فشار سر چاهی قبلی ۱۸۷ psi برابر با دبی ۷۸۷۲ بشکه در روز و مقدار فشار جریانی ۳۱۵۳ psi بدست آمده که در این صورت مقدار شاخص تولید بعد از انجام شکاف هیدرولیکی $PI = 2.76 \text{ stb/day/psi}$ بدست می آید.

جدول ۴-۵: خلاصه وضعیت چاه ۵۱۵ قبل و بعد از انجام شکاف هیدرولیکی

P	P _{wh}	P _{wf}	Q	GOR	PI
psi	psi	psi	bbl/day	scf/stb	stb/d/psi
6000	187	3936	2000	400	0.988
6000	389	3519	7086	400	2.85

^۱Etched Length

^۲Dimensionless Conductivity

^۳Pressure Transient Analysis



جهاد دانشگاهی



شرکت نفت مناطق نفت خیز جنوب