

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران - گروه خاک و پی

گرایش ژئومکانیک نفت

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش ژئومکانیک نفت

بررسی شکست هیدرولیکی با سیال حاوی صمغ فارسی

دانشجو:

امیر احمد شهریاری

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم زاده

دکتر حمید سلطانیان

استاد مشاور:

مهندس یاسر پورمظاهری

تابستان ۱۴۰۴

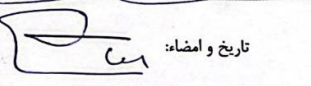
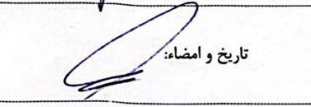
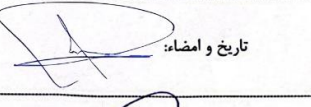
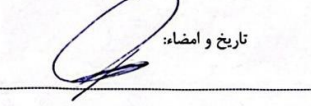
تأییدیه هیئت داوران

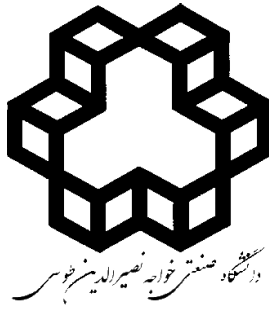
اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای : امیراحمد شهریار

را با عنوان : بررسی شکست هیدرولیکی با سیال حاوی صمغ فارسی

از نظر شکل و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می کنند.

بسمه تعالی

شماره: تاریخ:	تأییدیه هیأت داوران	 تاسیس ۱۳۰۲ دانشگاه سمنان خواجه نصیرالدین طوسی
هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: بررسی شکست هیدرولیکی با سیال حاوی صمغ فارسی توسط آقای امیراحمد شهریار، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته معدن گرایش ژئومکانیک نفت در تاریخ ۱۴۰۴/۰۶/۳۱ مورد تأیید قرار می دهند.		
 تاریخ و امضاء:	جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده	۱- استاد راهنمای اول
 تاریخ و امضاء:	جناب آقای دکتر حمید سلطانیان	۲- استاد راهنمای دوم
 تاریخ و امضاء:	جناب آقای مهندس یاسر پورمظاهری	۳- استاد مشاور
 تاریخ و امضاء:	سرکار خانم دکتر زینب علی آبادیان	۴- استاد ارزیاب داخلی
 تاریخ و امضاء:	جناب آقای دکتر محمدرضا آصف	۵- استاد ارزیاب خارج از دانشگاه
 تاریخ و امضاء:	سرکار خانم دکتر زینب علی آبادیان	۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده
* توجه: - این فرم می بایست پس از تکمیل، در نسخ تکثیر شده / فایل الکترونیکی قرار داده شود .		



اظهارنامه دانشجو

اینجانب امیراحمد شهریارى دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی ژئومکانیک نفت گواهی می‌نمایم که مطالب ارائه شده در این پایان نامه با عنوان:

بررسی شکست هیدرولیکی با سیال حاوی صمغ فارسی

با راهنمایی استاد محترم دکتر حسن قاسم‌زاده توسط شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نوشته شده در این پایان نامه تأیید می‌شود و در تدوین متن پروژه قالب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضای دانشجو:

تاریخ:

شهریارى

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده و استاد راهنمای آن است. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پروژه تنها با موافقت نویسنده یا استاد راهنما یا کتابخانه دانشکده های مهندسی عمران و نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگته صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.

۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پروژه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

تقدیم

تقدیم به پدر و مادرم که اولین معلم و بهترین استاد زندگی من بودند.

تشکر و قدردانی

اول دفتر شکر بی کران خداوند مهربان را که به این جانب توفیق به پایان رساندن این پایان نامه را عطا کرد.

سپس از اساتید فاضل و دانشمندانم، دکتر حسن قاسم زاده و دکتر حمید سلطانیان عزیز که در قسمت تئوری و دانشگاهی این پروژه وزین، پدران بار الهامی، کمک و مشورت ایشان چراغ راهی شرف این پژوهش را برافروختند.

در قسمت پژوهشگاه و آزمایشگاهی این مطالعه، بر خود وظیفه می دانم تا از استاد مشاور عزیزم مهندس یاسر پور مظاہری به عنوان مسئول پروژه واحد حفاری و تکمیل چاه، مهندس مهدی قندلاری (مسئول آزمایشگاه)، مهندس علیرضا دامغانی (مسئول پروژه واحد Rcal)، مهندس مجید ولی زاده (مدیر واحد سیالات حفاری)، جناب آقای بهروز علیخانی (واحد تراشکاری) کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم که بدون مساعدت و همکاری این عزیزان امکان به سرانجام رساندن این پروژه مقدور نبود؛

و در پایان "من لم یسکر المخلوق، لم یسکر الخالق" باید از دوستان عزیزم، مهندس بهزاد خوش، مهندس محمد راد مرد، مهندس سها ابراهیم که در این راه هم پاور من بودند، پاس گزاری نمایم و از خداوند منان برایشان آرزوی توفیق روز افزون داشته باشم.

امیر احمد شیرپاری

شهریور ماه ۱۴۰۴

چکیده

این پژوهش امکان‌پذیری به‌کارگیری «صمغ فارسی» به‌عنوان افزودنی زیست‌پایه در سیال شکست هیدرولیکی را ارزیابی می‌کند. مغزه‌های میدان امام‌حسن پس از آماده‌سازی استاندارد تحت RCAL (تخلخل-چگالی-تراوایی)، اولتراسونیک برای استخراج مدول‌های دینامیکی، و آزمون‌های UCS/سه‌محوره/برزلی بررسی شدند. صمغ فارسی پس از خردایش و دانه‌بندی در غلظت‌های مختلف با ویسکومتر معمولی و حرارتی سنجش شد که رفتار شبه‌پلاستیک از خود نشان داد. افزایش ویسکوزیته با غلظت و زمان هیدراتاسیون، و پایداری تا ۸۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. در آزمون هرزروی، افزایش غلظت از ۵٪ به ۹٪، فیلتریت را از ۸ به ۴ سی‌سیکاهش داد و فیلترکیک متراکم‌تری ساخت. آزمون‌های شکست در سلول هوک با دبی‌های کنترل‌شده نشان داد با افزایش ویسکوزیته، نشت کاهش یافته و تاثیر فشار - زمان پایداری می‌شود؛ افزایش دبی، زمان رسیدن به شکست را کاهش داد و فشار شکست را افزایش داد. همچنین شکست‌های بهتری شکل داد. روابط تبدیل دینامیک - استاتیک استخراج شد. برآیند نتایج بازه‌ی غلظتی ۷-۹ درصد را برای تعادل حمل پروپانت و کنترل هرزروی و فشارهای عملیاتی پیشنهاد می‌کند. جمع‌بندی: سیالات مبتنی بر صمغ فارسی، گزینه‌ای بومی، اقتصادی و کم‌خطر برای شکست هیدرولیکی‌اند؛ توصیه می‌شود عملکرد در شوری و نرخ‌های میدانی صحت‌سنجی با دیدگاه عملیاتی شود.

کلید واژه: شکست هیدرولیکی؛ سیال شکست؛ صمغ فارسی؛ رئولوژی؛ هرزروی سیال.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول ها.....	د
فهرست شکل ها.....	ه
۱- فصل اول مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- بیان مسئله.....	۲
۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق.....	۴
۱-۴- اهداف پژوهش.....	۶
۱-۵- ساختار پایان نامه.....	۶
۲- فصل دوم پیشینه شکست هیدرولیکی و افزودنی سیال شکست.....	۸
۱-۲- مقدمه.....	۹
۲-۲- اصول شکست هیدرولیکی.....	۹
۲-۳- نقش رئولوژی سیال در انتقال پروپانت و کنترل افت فشار.....	۱۳
2-4- مفاهیم از دست رفتن سیال و فیلتر کیک.....	۱۶
2-5- روش اجرایی شکست هیدرولیکی.....	۱۷
2-6- سیالات متداول شکست.....	۱۸
2-7- مکانیزم گسترش شکستگی در فرآیند شکست هیدرولیکی.....	۱۹
2-8- سیالات حاوی بیوپلیمرها در شکست هیدرولیکی.....	۲۰
2-9- صمغ فارسی به عنوان افزودنی در سیالات شکست هیدرولیکی.....	۲۲
2-10- خواص فیزیکی و شیمیایی و رئولوژیکی صمغ فارسی.....	۲۴
2-11- نقش افزودنی ها در سیالات شکست هیدرولیکی.....	۲۵
2-12- پتانسیل صمغ فارسی به عنوان افزودنی در سیالات شکست هیدرولیکی.....	۲۸
2-13- اصلاحات شیمیایی صمغ فارسی برای بهینه سازی در سیالات شکست.....	۲۸
۲-۱۴- عملکرد پلیمرهای طبیعی، صمغ زانتان و گوار به عنوان افزودنی کاربردی EOR.....	۲۹
۲-۱۵- کاربرد هیدروکلوئید جدید صمغ فارسی در تثبیت خاک.....	۳۰
۲-۱۶- افزایش های خطرناک در افزودنی های سیال شکست هیدرولیکی.....	۳۰
2-17- سیال بر پایه صمغ گوار و اثر کراس لینکر و تجزیه کننده بر رئولوژی و پروپانت.....	۳۳
۲-۱۸- رفتار رئولوژیکی ناشی از تأثیر دماهای مختلف خشک کردن بر بخش محلول صمغ فارسی.....	۳۵
۲-۱۹- جمع بندی.....	۳۶
۳- فصل سوم مواد و روش ها.....	۳۸

۳۹.....	۱-۳- مقدمه.....
۳۹.....	۲-۳- مواد مورد استفاده.....
۳۹.....	۱-۲-۳- نمونه‌های سنگی.....
۴۰.....	۲-۲-۳- سیالات آزمایشگاهی.....
۴۱.....	۳-۲-۳- تجهیزات مورد استفاده.....
۴۱.....	۱-۳-۲-۳- تجهیزات آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌ها.....
۴۳.....	۳-۲-۳-۲- تجهیزات اندازه‌گیری خواص اولیه سنگ.....
۴۵.....	۳-۲-۳-۳- تجهیزات آزمایش‌های مکانیک سنگ و ژئومکانیک.....
۴۷.....	۳-۲-۳-۴- تجهیزات آزمایش سیالات.....
۴۹.....	۳-۳- روش انجام آزمایش‌ها.....
۴۹.....	۱-۳-۳- ساختار زمین‌شناسی منطقه امام حسن و نتایج XRD.....
۴۹.....	۱-۱-۳-۳- ساختار زمین‌شناسی منطقه.....
۴۹.....	3-3-1-2- چاه‌های اکتشافی نفت.....
۵۰.....	3-3-1-3- زون گسلی.....
۵۰.....	3-3-1-4- نتایج زمین‌شناسی دفتری.....
۵۱.....	3-3-1-5- شکستگی‌ها و گسل‌های شاخص مخزن.....
۵۲.....	3-3-1-6- کانی‌شناسی نمونه با XRD.....
۵۲.....	3-4- آماده‌سازی اولیه نمونه‌های سنگی.....
۵۵.....	۳-۵- آزمایش خواص فیزیکی اولیه نمونه‌های سنگی.....
۵۵.....	۱-۵-۳- بررسی سیالات موجود و درصد اشباع هر فاز.....
۵۸.....	۲-۵-۳- اندازه‌گیری تخلخل و چگالی نمونه‌ها.....
۶۱.....	۳-۵-۳- اندازه‌گیری تراوایی.....
۶۴.....	۳-۶- آزمایش سرعت امواج التراسونیک و مدول‌های دینامیکی.....
۶۵.....	۳-۶-۱- تجهیزات و روش اجرا.....
۶۶.....	۳-۶-۲- محاسبه‌ی مدول‌های دینامیکی.....
۶۶.....	۳-۶-۳- نتایج و تحلیل.....
۶۸.....	3-7- آزمایش‌های مکانیک سنگی.....
۶۹.....	3-7-1- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS).....
۶۹.....	۳-۷-۱-۱- تجهیزات و روش اجرا.....
۷۰.....	۳-۷-۱-۲- محاسبات و روابط اصلی.....
۷۲.....	3-7-1-3- نتیجه UCS.....
۷۴.....	3-8- آزمایش فشاری سه‌محوره.....
۷۴.....	۳-۸-۱- آماده‌سازی نمونه.....
۷۴.....	3-8-2- تجهیزات و روش اجرا.....
۷۵.....	۳-۸-۳- نتایج و محاسبات.....
۷۷.....	۳-۹- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی).....
۷۷.....	۱-۹-۳- تجهیزات و روش اجرا.....

۷۸.....	محاسبه مقاومت کششی.....	۳-۹-۲
۷۹.....	نتایج و تحلیل.....	۳-۹-۳
۸۱.....	بررسی خواص رئولوژیکی و ساخت سیالات حاوی صمغ فارسی.....	3-10-
۸۱.....	تهیه و آماده‌سازی پودر صمغ فارسی.....	3-10-1-
۸۳.....	تعیین درصد رطوبت صمغ فارسی.....	۳-۱۰-۲
۸۳.....	آزمایش دانه‌بندی.....	۳-۱۰-۳
۸۴.....	روش اختلاط و آماده‌سازی محلول‌ها.....	3-10-4-
۸۵.....	روش ساخت سیال.....	۳-۱۰-۵
۸۶.....	تجهیزات، خواص و روش انجام آزمایش‌های رئولوژیکی.....	3-10-6-
۸۸.....	ارزیابی قابلیت حمل پروپانت.....	3-10-7-
۸۸.....	نتایج و تحلیل.....	3-10-8-
۹۱.....	میزان تحمل دمایی.....	۳-۱۰-۹
۹۱.....	وزن مخصوص.....	۳-۱۰-۱۰
۹۲.....	هرزروی سیال صمغ فارسی.....	۳-۱۰-۱۱
۹۳.....	آزمایش شکست هیدرولیکی.....	3-11-
۹۳.....	تجهیزات و نحوه انجام آزمایش.....	۳-۱۱-۱
۹۷.....	شرایط آزمون.....	۳-۱۱-۲
۱۰۵.....	جمع‌بندی فصل سوم.....	3-12-
۱۰۷.....	فصل چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهاد.....	۴-
۱۰۸.....	مقدمه.....	۴-۱-
۱۰۸.....	خلاصه فرآیند پروژه.....	۴-۲-
۱۰۸.....	خلاصه نتایج.....	۴-۳-
۱۰۹.....	پیشنهادهای پژوهشی.....	۴-۴-
۱۱۰.....	فهرست مراجع.....	

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۶.....	جدول ۲-۱: درصد حجمی مواد افزودنی در سیال شکست هیدرولیکی چاه میدان فایتویل [19]
۳۱.....	جدول ۲-۲: بیش‌ترین مقدار استفاده از افزودنی‌های مخرب [27]
۳۲.....	جدول ۲-۳: ترکیب افزودنی‌ها در چهار محفظه مشخص [27]
۵۴.....	جدول ۳-۱: لیست و مشخصات نمونه‌های آماده‌سازی شده
۶۰.....	جدول ۳-۲: نتایج اندازه‌گیری تخلخل و چگالی نمونه‌ها
۶۳.....	جدول ۳-۳: نتایج اندازه‌گیری تراوایی
۶۷.....	جدول ۳-۴: نتایج اندازه‌گیری سرعت موج‌ها و مدول‌های دینامیکی نمونه‌ها
۶۸.....	جدول ۳-۴: دسته‌بندی اولیه نمونه‌ها بر اساس آزمایش‌های غیر مخرب
۷۱.....	جدول ۳-۵: نتایج آزمایش UCS
۷۵.....	جدول ۳-۶: نتایج آزمایش سه محوری
۷۹.....	جدول ۳-۷: نتایج آزمایش‌های کششی غیر مستقیم (برزیلی)
۸۳.....	جدول ۳-۸: نتایج دانه بندی پودر صمغ فارسی
۸۵.....	جدول ۳-۹: نتایج ترکیب صمغ فارسی با دو نرخ برشی متفاوت
۸۸.....	جدول ۳-۱۰: نتایج آزمایش‌های رئولوژی سیال حاوی صمغ فارسی
۹۸.....	جدول ۳-۱۱: نتایج آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲: (a) شکست هیدرولیکی در یک چاه عمودی متعارف (b) شبکه شکست‌های ایجادشده از طریق چند مرحله شکست هیدرولیکی در یک چاه افقی در سازند شیل فشرده ۱۱
- شکل ۲-۲: شماتیک فرآیند و تجهیزات شکست هیدرولیکی ۱۳
- شکل ۲-۳: مقایسه عملکرد سیلابزنی پلیمری (HPAM و Xanthan Gum) در تست‌های مغزه ۱۵
- شکل ۲-۴: طرح شماتیک شکست هیدرولیکی در چاه‌های عمودی ۱۹
- شکل ۲-۵: ساختار گوار مورد استفاده در عملیات شکافت ۲۱
- شکل ۲-۶: (a) رسوبگذاری پروپانت منجر به ایجاد ارتفاع‌های شکستگی‌های پر شده و پر نشده با پروپانت می‌شود. (b) سطوح شکستگی‌های هم‌تراز و جابجاشده به همراه و بدون پروپان ۲۱
- شکل ۲-۷: دیاگرام مواد تشکیل دهنده سیال شکست هیدرولیکی ۲۶
- شکل ۲-۸: تغییرات ویسکوزیته سیال شکست در طول زمان با افزایش دما ۳۴
- شکل ۲-۹: رفتار رئولوژیکی سیال براساس شاخص قانون توان (n') و ضریب قوام (k') ۳۵
- شکل ۲-۱۰: تاثیر دمای خشک کردن صمغ بر رفتار رئولوژیکی سیال صمغ فارسی ۳۶
- شکل ۳-۱: دستگاه مغزه‌گیری مورد استفاده در آماده‌سازی ۴۱
- شکل ۳-۲: دو دستگاه برش مغزه به کار رفته در آزمایش‌ها ۴۲
- شکل ۳-۳: دستگاه اولتراسونیک ۴۳
- شکل ۳-۴: ساکسولت‌های سالن شستشوی نمونه ۴۳
- شکل ۳-۵: دستگاه اندازه‌گیری تخلخل ۴۴
- شکل ۳-۶: دستگاه اندازه‌گیری تراوایی ۴۵
- شکل ۳-۷: دستگاه پرس هیدرولیکی مورد استفاده در تست برزیلی ۴۶
- شکل ۳-۸: پمپ تزریق سیال ۴۶
- شکل ۳-۹: آکومولاتور استفاده شده در آزمایش ۴۷
- شکل ۳-۱۰: دستگاه fann 50 ۴۸
- شکل ۳-۱۱: پترولوژی منطقه امام حسن (ع) ۵۰
- شکل ۳-۱۲: تصویر ماهواره‌ای Quick-Bird از بخشی از محدوده شمال غربی مشرف به مخزن ۵۱
- شکل ۳-۱۳: نتیجه آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) ۵۲
- شکل ۳-۱۴: پلاگ‌های تهیه شده از مغزه‌های اولیه ۵۳
- شکل ۳-۱۵: نمونه‌ها پس از آماده‌سازی نهایی ۵۵
- شکل ۳-۱۶: محلول نیترا ت نقره ۵۶
- شکل ۳-۱۷: نمونه‌های در حال شستشو داخل ساکسولت ۵۷
- شکل ۳-۱۸: آون رطوبت‌گیر ۵۷
- شکل ۳-۱۹: اندازه‌گیری تخلخل نمونه‌ها ۵۸

- شکل ۲۰-۳: کپسول دستگاه اندازه‌گیری تخلخل ۵۹
- شکل ۲۱-۳: نمودار چگالی بالک به تخلخل ۶۱
- شکل ۲۲-۳: کپسول نمونه دستگاه اندازه‌گیری تراوایی ۶۲
- شکل ۲۳-۳: نمودار میزان همبستگی تخلخل و تراوایی ۶۴
- شکل ۲۴-۳: نمونه نمودار خروجی دستگاه التراسونیک (سمت راست)؛ ستاپ دستگاه اولتراسونیک (سمت چپ) ۶۵
- شکل ۲۵-۳: نمودار پراکندگی نتایج امواج فشاری به برشی نمونه‌ها ۶۸
- شکل ۲۶-۳: لحظه شکست (سمت راست) و تنظیم تست تک محوری (سمت چپ) ۶۹
- شکل ۲۷-۳: نحوه قرارگیری LVDT اطراف نمونه ۷۰
- شکل ۲۸-۳: نمودار تنش کرنش تست UCS نمونه‌های پلاگ S.4 (سمت راست) و S.5 (سمت چپ) ۷۱
- شکل ۲۹-۳: نمودار تنش کرنش تست UCS نمونه‌های S.32 NX (سمت راست) و S.35 (سمت چپ) ۷۲
- شکل ۳۰-۳: نتیجه تست UCS نمونه S.4 ۷۳
- شکل ۳۱-۳: نتیجه تست UCS نمونه S.5 ۷۳
- شکل ۳۲-۳: نتیجه تست UCS نمونه S.32 ۷۳
- شکل ۳۳-۳: نتیجه تست UCS نمونه S.35 ۷۳
- شکل ۳۴-۳: نمودار موهر-کلمب نتیجه تست سه محوری ۷۶
- شکل ۳۵-۳: نتایج تست سه محوری ۷۶
- شکل ۳۶-۳: نمونه‌های آماده تست برزیلی ۷۷
- شکل ۳۷-۳: فیکسچر تست برزیلی ۷۸
- شکل ۳۸-۳: نتیجه تست برزیلی S.24 ۸۰
- شکل ۳۹-۳: نتایج تست برزیلی S.11 ۸۰
- شکل ۴۰-۳: نتایج تست برزیلی S.29 ۸۰
- شکل ۴۱-۳: نتایج تست برزیلی S.30 ۸۰
- شکل ۴۲-۳: نتایج تست برزیلی S.31 ۸۰
- شکل ۴۳-۳: شماتیک روش چهاربخشی برای همگن سازی نمونه معرف ۸۱
- شکل ۴۴-۳: روش چهاربخشی برای همگن سازی نمونه معرف و نمونه نهایی حاصل ۸۲
- شکل ۴۵-۳: سنگ شکن فکی مورد استفاده در تحقیق ۸۲
- شکل ۴۶-۳: نمودار دانه‌بندی صمغ آسیاب شده ۸۴
- شکل ۴۷-۳: (الف) مولتی‌میکسر - (ب) میکسر پره‌ای ۸۴
- شکل ۴۸-۳: صمغ فارسی در حال انحلال ۸۶
- شکل ۴۹-۳: ویسکومتر مورد استفاده در آزمایش ۸۷
- شکل ۵۰-۳: نمودار تاثیر غلظت صمغ فارسی و زمان بر ویسکوزیته سیال ۸۹
- شکل ۵۱-۳: نمودار نرخ رشد ویسکوزیته با افزایش مقدار صمغ ۹۰
- شکل ۵۲-۳: نمودار تغییرات ویسکوزیته نسبت به افزایش دما ۹۱
- شکل ۵۳-۳: دستگاه تزاروی گل حفاری (Mud Balance) ۹۱

- شکل ۳-۵۴: نمودار تاثیر غلظت افزودنی صمغ فارسی بر میزان هرزروی ۹۲
- شکل ۳-۵۵: اشباع کردن نمونه‌ها در دسیکاتور و خلا ۹۳
- شکل ۳-۵۶: نمونه در حال آماده سازی برای تست شکست (تراش و سوراخکاری) ۹۴
- شکل ۳-۵۷: شماتیک نمونه آماده سازی شده برای تست شکست ۹۴
- شکل ۳-۵۸: ستاپ سلول هوک در تست شکست هیدرولیکی ۹۵
- شکل ۳-۵۹: ستاپ کامل دستگاه شکست هیدرولیکی ۹۶
- شکل ۳-۶۰: پنل مدیریتی پمپ سیال ۹۶
- شکل ۳-۶۱: شماتیک فشارهای اعمالی روی نمونه ۹۷
- شکل ۳-۶۲: نمونه‌های گسیخته شده S.33-S.12-S.20 ۹۹
- شکل ۳-۶۳: نتایج و نمودار شکست نمونه S.1 ۹۹
- شکل ۳-۶۴: نتایج و نمودار شکست نمونه S.2 ۱۰۰
- شکل ۳-۶۵: نتایج و نمودار شکست نمونه S.3 ۱۰۰
- شکل ۳-۶۶: نتایج و نمودار شکست نمونه S.6 ۱۰۱
- شکل ۳-۶۷: نتایج و نمودار شکست نمونه S.7 ۱۰۱
- شکل ۳-۶۸: نتایج و نمودار شکست نمونه S.17 ۱۰۲
- شکل ۳-۶۹: نتایج و نمودار شکست نمونه S.18 ۱۰۲
- شکل ۳-۷۰: نتایج و نمودار شکست نمونه S.19 ۱۰۳
- شکل ۳-۷۱: نتایج و نمودار شکست نمونه S.21 ۱۰۳
- شکل ۳-۷۲: نتایج و نمودار شکست نمونه S.22 ۱۰۴
- شکل ۳-۷۳: نتایج و نمودار شکست نمونه S.28 ۱۰۴
- شکل ۳-۷۴: نتایج و نمودار شکست نمونه S.37 ۱۰۵
- شکل ۳-۷۵: نتایج و نمودار شکست نمونه S.38 ۱۰۵

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

در عصر حاضر، تأمین انرژی مورد نیاز بشر به یکی از چالش‌های اساسی توسعه پایدار تبدیل شده است. منابع انرژی به‌طور کلی به دو دسته اصلی تجدیدپذیر (مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و هیدروالکتریک) و تجدیدناپذیر (نظیر سوخت‌های فسیلی شامل نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ) تقسیم‌بندی می‌شوند. با وجود پیشرفت‌های اخیر در بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر، همچنان بخش اعظم انرژی مورد نیاز جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، از منابع تجدیدناپذیر تأمین می‌شود. مخازن هیدروکربوری، به‌عنوان ستون فقرات تولید سوخت‌های فسیلی، نقش کلیدی در تأمین انرژی برای مصارف گوناگون از جمله تولید برق، گرمایش، حمل‌ونقل و صنایع دارند.

با توجه به ماهیت محدود و پایان‌پذیر منابع تجدیدناپذیر، افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و کاهش تدریجی ذخایر متعارف، ضرورت بهره‌برداری بهینه از این منابع بیش از پیش آشکار شده است. در بسیاری از کشورهای دارای منابع غنی نفت و گاز، تمرکز اصلی بر بهره‌برداری از مخازن متعارف بوده و راندمان تولید به دلیل استفاده از روش‌های سنتی اغلب پایین است. علاوه بر این، مخازن غیرمتعارف، مانند شیل‌های نفتی و گازی، به دلیل پیچیدگی‌های فنی و اقتصادی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، کاهش ذخایر متعارف و نیاز روزافزون به انرژی، توسعه فناوری‌های نوین و روش‌های ازدیاد برداشت نفت (EOR)^۱ را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. این روش‌ها، شامل تکنیک‌های تزریق گاز، تزریق آب، روش‌های حرارتی و شیمیایی، امکان استخراج مقادیر بیشتری از نفت باقی‌مانده در مخازن را فراهم می‌کنند و می‌توانند به افزایش بهره‌وری و طول عمر مخازن کمک کنند.

علاوه بر این بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته نظیر مدل‌سازی مخازن، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های کلان می‌تواند به بهبود مدیریت مخازن و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند. در این راستا، ضرورت توجه به پایداری زیست محیطی و کاهش اثرات منفی استخراج سوخت‌های فسیلی نیز مطرح است. به‌کارگیری روش‌های نوین ازدیاد برداشت، نه تنها به افزایش تولید کمک می‌کند بلکه می‌تواند با کاهش هدررفت منابع و بهینه‌سازی فرآیندها، به حفظ محیط‌زیست و دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک کند. در نتیجه، سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه فناوری‌های مرتبط با بهره‌برداری از مخازن هیدروکربوری و انتقال به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر، راهکاری جامع برای پاسخگویی به نیازهای انرژی آینده خواهد بود.

۱-۲- بیان مسئله

در روش‌های متداول تولید نفت، فرآیند تولید عمدتاً بر پایه‌ی انرژی طبیعی مخزن، شامل فشار اولیه سیال مخزن و نیروی رانش طبیعی صورت می‌گیرد و در این روش‌ها هیچ‌گونه تغییری در خواص فیزیکی سنگ مخزن یا سیال انجام نمی‌شود. در مراحل ابتدایی بهره‌برداری، فشار طبیعی موجود در مخزن معمولاً برای انتقال نفت به سطح کافی است اما با گذشت زمان و افت فشار، میزان تولید کاهش یافته و بهره‌برداری

^۱ Enhance Oil Recovery

اقتصادی از چاه دشوار می‌شود. در چنین شرایطی لازم است از روش‌های پیشرفته‌تری موسوم به روش‌های ازدیاد برداشت نفت استفاده شود تا امکان تولید از مخازن با نفوذپذیری پایین یا محتوای نفت باقیمانده بالا فراهم گردد. این روش‌ها با هدف افزایش تحرک سیال، تغییر ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی سنگ و سیال و تسهیل جریان نفت به سمت چاه تولید طراحی می‌شوند و نقش مهمی در افزایش طول عمر مخزن و بهبود ضریب برداشت دارند.

مکانیزم اصلی در اغلب روش‌های ازدیاد برداشت، بر پایه‌ی ایجاد مسیرهای جدید یا تسهیل حرکت سیال در محیط متخلخل سنگی است. این روش‌ها موجب تغییرات قابل توجهی در ساختار فیزیکی سنگ، رفتار جریان و برهم‌کنش‌های شیمیایی بین سیال و سازند می‌شوند. در حالت کلی، هر فرآیندی که بتواند با کاهش ویسکوزیته نفت، افزایش نفوذپذیری یا ایجاد ترک‌های جدید، مسیرهای عبور سیال را در سنگ افزایش دهد، به عنوان یک روش مؤثر ازدیاد برداشت شناخته می‌شود. بر این اساس، روش‌های مختلفی از جمله تزریق آب، روش‌های حرارتی (تزریق بخار، تزریق آب گرم و احتراق درجا)، روش‌های شیمیایی (تزریق پلیمر، سورفکتانت و مواد قلیایی)، روش‌های امتزاجی (تزریق گاز طبیعی، دی‌اکسید کربن یا نیتروژن) و حتی روش‌های میکروبی توسعه یافته‌اند [2]، [1]. هر یک از این روش‌ها بسته به نوع سنگ مخزن ویژگی‌های سیال و شرایط عملیاتی مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند.

در کنار این روش‌های کلی، برخی از روش‌های مکمل و تحریک‌کننده نیز با هدف بهبود نفوذپذیری موضعی و افزایش تولید از چاه‌های کم بازده مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین روش‌ها، شکست هیدرولیکی^۱ است که به عنوان روشی مکانیکی برای افزایش نفوذپذیری سازند به کار می‌رود. در این روش، با تزریق سیال تحت فشار بالا به درون سازند، تنش‌های موضعی در سنگ افزایش یافته و در نهایت ترک‌هایی ایجاد می‌شود که به عنوان مسیرهای جدید جریان عمل می‌کنند. این ترک‌ها سبب افزایش سطح تماس بین چاه و مخزن و در نتیجه بهبود چشمگیر نرخ تولید می‌شوند. از آنجا که سنگ‌های با تراوایی پایین معمولاً سهم زیادی از ذخایر نفت و گاز جهان را شامل می‌شوند، شکست هیدرولیکی به عنوان یکی از مؤثرترین و پراستفاده‌ترین روش‌های افزایش تولید در دهه‌های اخیر شناخته شده است.

انتخاب روش مناسب ازدیاد برداشت، به مجموعه‌ای از عوامل زمین‌شناسی و مهندسی بستگی دارد. پارامترهایی همچون نوع سنگ، تراوایی، تخلخل، دمای مخزن، فشار ویسکوزیته سیال و ترکیب شیمیایی آن، در تعیین کارایی هر روش نقش کلیدی دارند. در میان روش‌های مختلف، شکست هیدرولیکی به دلیل قابلیت اعمال در شرایط گسترده و امکان اجرای آن در مخازن کم‌تراوا، جایگاه ویژه‌ای دارد. با این حال، کارایی این روش به شدت وابسته به نوع سیال تزریقی و خواص رئولوژیکی^۲ آن است. سیال شکست باید توانایی ایجاد فشار کافی برای باز کردن ترک‌ها، انتقال پروپانت^۳ (ذرات نگهدارنده ترک) و در عین حال

¹ Hydraulic Fracture

² Rheological

³ Proppants

کنترل میزان افت سیال^۱ را داشته باشد. در صورتی که سیال از پایداری شیمیایی یا حرارتی کافی برخوردار نباشد، می‌تواند موجب انسداد ترکها یا آسیب به سازند شود و در نهایت کارایی فرآیند کاهش یابد.

از سوی دیگر، هزینه‌های بالا و ملاحظات زیست‌محیطی مرتبط با استفاده از سیالات پایه‌پلیمری مصنوعی، ضرورت جستجوی جایگزین‌های طبیعی و سازگار با محیط‌زیست را افزایش داده است. در سال‌های اخیر، پژوهشگران توجه ویژه‌ای به استفاده از پلیمرهای طبیعی یا بیوپلیمرها در سیالات شکست نشان داده‌اند. این مواد با داشتن ساختارهای پلی‌ساکاریدی پیچیده، قادر به ایجاد ویسکوزیته بالا و پایداری مناسب در شرایط مختلف هستند. در میان این ترکیبات، صمغ فارسی^۲ به عنوان یک بیوپلیمر طبیعی استخراج شده از درخت بادام کوهی^۳، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود از پتانسیل بالایی برای استفاده در سیالات شکست برخوردار است.

صمغ فارسی به عنوان یک پلی‌ساکارید زیست‌سازگار، علاوه بر ایجاد ویسکوزیته بالا، توانایی تشکیل ژل و کنترل افت سیال را دارد و می‌تواند به عنوان جایگزینی طبیعی برای پلیمرهای سنتزی مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این ویژگی‌های پایداری حرارتی و رئولوژیکی مناسب این صمغ، آن را برای استفاده در شرایط دمایی و فشاری متنوع در مخازن نفتی مناسب می‌سازد. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی ترکیب سیالات شکست و کاهش اثرات زیست‌محیطی، بررسی عملکرد صمغ فارسی به عنوان افزودنی طبیعی در سیالات شکست هیدرولیکی می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه فناوری‌های سبز و کارآمد در مهندسی نفت باشد.

بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش بر بررسی امکان‌پذیری استفاده از صمغ فارسی به عنوان افزودنی طبیعی در سیالات شکست هیدرولیکی متمرکز است. هدف این است که با ارزیابی خواص رئولوژیکی، پایداری حرارتی، کنترل افت سیال و قابلیت حمل پروپانت در سیالات حاوی صمغ فارسی، بتوان عملکرد آن را با سیالات معمول مقایسه و کارایی بالقوه این بیوپلیمر را در بهبود فرآیند شکست هیدرولیکی تعیین نمود. نتایج حاصل از این بررسی می‌تواند در طراحی سیالات جدید با کارایی بالا، هزینه کمتر و اثرات زیست محیطی حداقلی مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان گامی در جهت توسعه پایدار در مهندسی بهره‌برداری از مخازن نفتی تلقی شود.

۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

با توجه به مطالب بیان شده تا به اینجا اهمیت نیاز به افزایش بازدهی چاه در مخازن غیرمتعارف حس می‌شود. به جهت افزایش بازدهی روش‌های ازدیاد برداشت مورد توصیه می‌باشند. اجرای موفق هر یک از روش‌های ازدیاد برداشت یا تحریک مخزن، مستلزم استفاده دقیق و هماهنگ از سه عامل اصلی یعنی مواد، ابزار و نیروی انسانی است. هدف نهایی از به‌کارگیری این عوامل، بهبود عملکرد فرآیند و افزایش بازدهی تولید در عین کاهش هزینه‌ها و آسیب‌های احتمالی به سازند است. در میان این سه عامل، ابزار و نیروی

¹ Fluid Lost

² Persian Gum

³ Amygdalus scoparia

انسانی معمولاً با محدودیت‌های فنی و ساختاری بیشتری مواجه‌اند و امکان تغییر یا جایگزینی آنها در کوتاه مدت دشوارتر است. در مقابل، مواد مصرفی به ویژه سیالات و افزودنی‌های شیمیایی، انعطاف پذیری بالاتری در طراحی، اصلاح و بهینه‌سازی دارند و می‌توان با تغییر ترکیب یا نوع آنها ویژگی‌های کلیدی فرآیند را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار داد. از این رو، انتخاب صحیح مواد و افزودنی‌ها، به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای قابل کنترل در عملیات ازدیاد برداشت و به‌ویژه شکست هیدرولیکی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در عملیات شکست هیدرولیکی، سیال تزریقی نقش حیاتی در ایجاد ترک، انتقال پروپانت و کنترل رفتار جریان درون سازند دارد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این سیال باید به گونه‌ای تنظیم شود که در عین ایجاد فشار کافی برای گسترش شکست، بتواند پایداری ساختار ترک را نیز حفظ کند. به همین منظور، افزودنی‌های متعددی از جمله پلیمرها، عامل‌های ژل ساز، پایدارکننده‌های حرارتی، کاهنده‌های اصطکاک و مواد کنترل کننده افت سیال به ترکیب سیال افزوده می‌شوند. هر یک از این افزودنی‌ها با هدفی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند و انتخاب آنها باید براساس شرایط مخزن، نوع سنگ، دما، فشار و ویژگی‌های سیال مخزنی صورت گیرد.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی سیالات شکست، بسیاری از ترکیبات مصنوعی مورد استفاده، به دلیل هزینه‌های بالا، سمیت شیمیایی و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، با محدودیت‌های جدی مواجه هستند. علاوه بر این، پایداری شیمیایی این مواد در شرایط دمایی و فشاری بالای مخزن گاهی ناکافی است و منجر به کاهش کارایی عملیات می‌شود. از این رو، تحقیقات اخیر بر استفاده از مواد طبیعی و زیست‌پایه متمرکز شده است که بتوانند عملکرد مشابه یا حتی بهتری نسبت به ترکیبات سنتزی ارائه دهند و در عین حال از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مقرون به صرفه باشند. در این میان، بیوپلیمرهایی مانند صمغ فارسی که از منابع گیاهی بومی نظیر درخت بادام کوهی استخراج می‌شوند، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند.

صمغ فارسی با دارا بودن ساختار پلی‌ساکاریدی پیچیده، توانایی افزایش ویسکوزیته، کنترل افت سیال و بهبود پایداری رئولوژیکی را دارد و می‌تواند به عنوان جایگزینی طبیعی برای پلیمرهای صنعتی در سیالات شکست مطرح شود. افزون بر این، زیست‌تخریب‌پذیری بالا و سازگاری محیطی این ماده، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل در راستای توسعه فناوری‌های سبز در مهندسی نفت تبدیل کرده است. از آنجا که در عملیات شکست هیدرولیکی عملکرد سیال به‌طور مستقیم بر موفقیت فرآیند تأثیر می‌گذارد، بررسی و شناخت دقیق تأثیر افزودنی‌های طبیعی نظیر صمغ فارسی در این سیالات، ضرورتی اساسی در بهبود کارایی و پایداری فرآیند محسوب می‌شود.

بنابراین، ضرورت انجام این تحقیق از آنجا ناشی می‌شود که در ایران و جهان چاه‌های نفت در دوره‌ای هستند که نیازمند احیا یا افزایش راندمان‌اند و تنها با انجام فرآیند ازدیاد برداشت که خود نیازمند دانش فنی صحیح و افزودنی‌های مختلف است قابل انجام است. به لحاظ دانش و نوآوری در افزودنی سیال، صمغ فارسی مورد بررسی است که تاکنون مطالعات محدودی به بررسی جامع رفتار رئولوژیکی، پایداری حرارتی

و عملکرد عملی این صمغ در سیالات شکست هیدرولیکی پرداخته‌اند. درک عمیق از نحوه تأثیر این ماده طبیعی بر خواص سیال، می‌تواند زمینه‌ساز طراحی سیالاتی با کارایی بالا، هزینه‌ی کمتر و اثرات زیست‌محیطی پایین‌تر باشد. این موضوع نه تنها از دیدگاه علمی و فنی اهمیت دارد، بلکه از منظر اقتصادی نیز می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری عملیات شکست در مخازن کم‌تراوا منجر شود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش و کارایی صمغ فارسی به عنوان افزودنی طبیعی در سیالات شکست هیدرولیکی، گامی مؤثر در جهت ارتقای پایداری و بهبود عملکرد فرآیندهای ازدیاد برداشت به شمار می‌آید.

۴-۱- اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش و کارایی صمغ فارسی به عنوان یک افزودنی طبیعی در سیالات شکست هیدرولیکی و مقایسه‌ی عملکرد آن با افزودنی‌های پلیمری متداول است. در انتخاب صمغ فارسی به‌عنوان غلظت‌دهنده سیال شکست، علاوه بر مزیت‌های زیست‌پایه و بومی بودن، از پیشینه گروه پژوهشی نیز بهره گرفته شد. نتایج "قاسم‌زاده و مدیری" (۲۰۲۰) در محیط خاک نشان داد این هیدروکلوئید می‌تواند با ایجاد پیوند بین ذرات، پرکردن منافذ و پایداری حرارتی مناسب، موجب بهبود رفتار ژئوتکنیکی شود. با تکیه بر همین سازوکارهای ریزساختاری و رئولوژیک، در این پایان‌نامه کارایی صمغ فارسی در مقیاس آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی ارزیابی شده است [3]. این تحقیق با تمرکز بر ویژگی‌های رئولوژیکی، پایداری حرارتی و سازگاری صمغ فارسی در شرایط مشابه مخزن، به دنبال ارزیابی توانایی این ماده در بهبود ویژگی‌هایی چون افزایش ویسکوزیته، کنترل افت سیال، بهبود انتقال پروپانت و کاهش آسیب سازند است. همچنین هدف دیگر پژوهش، تحلیل رفتار این بیوپلیمر در غلظت‌های مختلف و تحت دماهای متفاوت به منظور شناسایی شرایط بهینه‌ی کاربرد آن در عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشد. از سوی دیگر، این مطالعه در پی آن است که با تکیه بر منابع طبیعی بومی و تجدیدپذیر، گامی در جهت توسعه‌ی سیالات شکست سازگار با محیط‌زیست و کاهش وابستگی به ترکیبات شیمیایی گران قیمت و آلاینده بردارد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی نسل جدیدی از سیالات شکست زیست‌پایه با کارایی بالا و هزینه‌ی کمتر در صنایع نفت و گاز کشور فراهم آورد.

۵-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در چهار فصل تدوین شده است. فصل اول به بیان مسئله، ضرورت علمی و صنعتی شکست هیدرولیکی، اهداف و نوآوری پژوهش، دامنه و روش کلی کار اختصاص دارد تا چارچوب مفهومی مطالعه روشن شود. در فصل دوم، مبانی نظری و مرور منابع ارائه می‌شود: سازوکار شکست و تنش‌های درجا، مدل‌های برآورد فشار شکست و پایداری ترک، الزامات رئولوژیک سیالات برای حمل پروپانت و کنترل هرزرفت^۱ سیال، و جایگاه بیوپلیمرها با تمرکز بر صمغ فارسی. فصل سوم مواد و روش‌ها را پوشش می‌دهد:

^۱ Fluid Lost

توصیف نمونه‌های سنگی، آزمون‌های پتروفیزیکی و مکانیکی، ساخت و مشخصه‌یابی سیالات بر پایه صمغ فارسی، و اجرای آزمون‌های شکست هیدرولیکی در سلول هوک همراه با جزئیات کالیبراسیون و پردازش داده‌ها. در فصل چهارم، نتایج به‌صورت یکپارچه تحلیل می‌شود؛ اثر غلظت و نرخ تزریق بر فشار و انرژی شکست و الگوی ترک تبیین می‌گردد، پنجره عملیاتی ویسکوزیته برای حمل پروپانت و کنترل نشست استخراج می‌شود و یافته‌ها با مدل‌ها و استانداردهای مرجع مقایسه می‌شوند. در پایان، جمع‌بندی نهایی، محدودیت‌ها و پیشنهادهای پژوهشی و کاربردی ارائه شده است. فهرست منابع و پیوست‌ها شامل داده‌های خام، نمودارهای تکمیلی و مشخصات تجهیزات و استانداردهای مورد استفاده است.

فصل دوم

پیشینه شکست هیدرولیکی و افزودنی سیال شکست

۲-۱- مقدمه

شکست هیدرولیکی یکی از تکنیک‌های پیشرفته در صنعت نفت و گاز است که با استفاده از خواص مکانیکی سیالات، سنگ مخزن را شکسته و امکان استخراج هیدروکربن‌ها را تسهیل می‌کند. این روش به‌عنوان یکی از مؤثرترین تکنیک‌های ازدیاد برداشت نفت و گاز از مخازن با نفوذپذیری پایین شناخته می‌شود. با این حال، تمامی سازندهای زمین‌شناسی به این روش نیازی ندارند؛ برخی سازندها به‌صورت طبیعی دارای شکستگی‌ها و منافذ متصلی هستند که جریان آزاد سیالات را امکان‌پذیر می‌سازند. در مقابل، مخازن غیرمتعارف مانند شیل‌های نفتی و گازی اغلب نفوذپذیری پایینی دارند و هیدروکربن‌های محبوس در آنها تنها از طریق ایجاد شکستگی‌های مصنوعی قابل استخراج هستند [1].

فرآیند شکست هیدرولیکی با تزریق سیالات پرفشار به داخل سنگ مخزن انجام می‌شود که منجر به ایجاد ترک‌ها و شکاف‌هایی در ساختار سنگ می‌گردد. این شکاف‌ها مسیرهای جدیدی برای جریان هیدروکربن‌ها به سمت چاه فراهم می‌کنند و در نتیجه، نرخ تولید را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند. این عملیات معمولاً پس از مراحل حفاری و سیمن‌کاری چاه، به‌عنوان بخشی از فرآیند تکمیل چاه، اجرا می‌شود. استفاده از این تکنیک به‌ویژه در مخازن غیرمتعارف، مانند شیل‌های گازی و نفتی، نقش کلیدی در اقتصادی کردن استخراج منابع ایفا می‌کند.

با این حال، اجرای شکست هیدرولیکی نیازمند بررسی دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی مخزن، طراحی بهینه عملیات و مدیریت اثرات زیست محیطی است. به کارگیری فناوری‌های نوین، نظیر مدل‌سازی پیشرفته مخازن و استفاده از سیالات سازگار با محیط‌زیست، می‌تواند به بهبود کارایی این روش و کاهش اثرات منفی آن کمک کند. در نهایت، شکست هیدرولیکی به‌عنوان یک راهکار استراتژیک در صنعت انرژی، امکان بهره‌برداری از منابع هیدروکربوری محبوس را فراهم کرده و نقش مهمی در تأمین انرژی جهانی ایفا می‌کند [1].

۲-۲- اصول شکست هیدرولیکی

شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین روش‌های ازدیاد برداشت از مخازن کم‌تراوا به شمار می‌رود که به‌طور گسترده در توسعه مخازن نفت و گاز به‌کار گرفته شده است. اساس این روش بر تزریق سیالی با فشار بالا به درون سازند استوار است؛ به‌گونه‌ای که فشار تزریق^۱ از فشار شکست^۲ سنگ فراتر رفته و موجب ایجاد یا گسترش ترک در سنگ شود. ترک‌های ایجادشده سپس با مواد نگهدارنده مانند ماسه یا پروپانت‌های سرامیکی پر می‌شوند تا پس از کاهش فشار، شکاف‌ها بسته نشوند و مسیرهایی پایدار برای جریان سیال از مخزن به چاه ایجاد گردد [2].

¹ Injection Pressure

² Breakdown Pressure

شکست هیدرولیکی، به عنوان یکی از تکنیک‌های کلیدی در صنعت نفت و گاز، برای اولین بار به صورت رسمی توسط شرکت استنولیند اویل^۱ در سال ۱۹۴۹ معرفی شد. با این حال، ریشه‌های این روش را می‌توان در دهه ۱۸۶۰ جستجو کرد، زمانی که از نیتروگلیسرین برای تحریک چاه‌های کم عمق در ایالات متحده استفاده می‌شد. در آن دوره، نیتروگلیسرین با هدف ایجاد شکستگی در سازندهای حامل نفت به کار گرفته می‌شد تا جریان اولیه و بازیافت نهایی نفت افزایش یابد. این رویکرد بعدها برای تحریک چاه‌های گازی و حتی چاه‌های آب نیز مورد استفاده قرار گرفت [4].

در دهه ۱۹۳۰، ایده جایگزینی نیتروگلیسرین با سیالات ایمن تر، نظیر اسید، برای تحریک چاه‌ها مطرح شد. این روش به عنوان راهکاری برای ایجاد شکستگی در سازندها شناخته شد. پیشرفت‌های بعدی در این حوزه مدیون تحقیقات فاریس^۲ از شرکت استنولیند اویل بود که ارتباط بین تغییرات فشار در فرآیندهای اسیدکاری، تزریق آب و تزریق سیمان را بررسی کرد. این تحقیقات زمینه‌ساز توسعه مفهوم شکست هیدرولیکی به منظور افزایش تولید از چاه‌های نفت و گاز شد. اولین آزمایش عملیاتی این روش در سال ۱۹۴۷ در میدان گازی هوگوتون^۳ توسط استنولیند اویل انجام شد و در سال ۱۹۴۸، این تکنیک از طریق انتشار مقاله‌ای به طور گسترده به صنعت نفت معرفی گردید. در سال ۱۹۴۹، شرکت هالیبرتون^۴ که در زمینه سیمان کاری چاه‌های نفت فعالیت داشت، مجوز انحصاری برای اجرای فرآیند شکست هیدرولیکی را دریافت کرد و این روش به سرعت در صنعت نفت ایالات متحده گسترش یافت [4].

با پیشرفت این فناوری، نیاز به سیالاتی با ویسکوزیته مناسب و قابلیت عملکرد در دماهای بالای مخزن منجر به توسعه تثبیت کننده‌های ژل شد. در ابتدا، از متانول با غلظت ۵ درصد به عنوان افزودنی استفاده شد اما به تدریج افزودنی‌های شیمیایی جدیدی معرفی شدند که به تنهایی یا در ترکیب با متانول کاربرد داشتند. در ادامه، بهبودهایی در عوامل ژل کننده و معرفی ترکیبات شیمیایی نظیر سورفکتانت‌ها و افزودن ماسه (پروپانت) به سیالات شکست هیدرولیکی انجام شد. این افزودنی‌ها با جلوگیری از بسته شدن شکاف‌ها، آسیب به شکستگی‌ها را کاهش داده و هدایت هیدرولیکی را بهبود بخشیدند.

تا اواخر سال ۱۹۵۲، بخش عمده عملیات شکست هیدرولیکی با استفاده از نفت خام تصفیه شده انجام می‌شد، زیرا این ماده ارزان بوده و ویسکوزیته مناسبی برای تزریق با فشار پایین داشت. با این حال، برای انتقال پروپانت‌هایی مانند شن و ماسه، نرخ‌های تزریق بالاتری مورد نیاز بود که منجر به استفاده از آب همراه با افزودنی‌های شیمیایی شد. امروزه، با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای هیدروکربن‌ها و گرایش صنعت به سمت بهره‌برداری از منابع غیرمتعارف نظیر شیل‌های نفتی و گازی، شکست هیدرولیکی به یک فناوری حیاتی تبدیل شده است. بدون این روش، بسیاری از میادین غیرمتعارف از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و امکان دسترسی به آنها وجود نداشت. این تکنیک نه تنها بهره‌وری تولید را افزایش داده، بلکه

¹ Stanolind Oil

² Floyd Farris

³ Hugoton

⁴ Halliburton Oil Well Cementing Company