نشریه علمی ژئومکانیک نفت
JOURNAL OF PETROLEUM GEOMECHANICS
(JPG)

مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی اثر متغیرهای عملیاتی پروپنت بر رفتار هدایت‌پذیری شکاف تحت شرایط تنش افقی حداقل در یکی از مخازن ایران

محمدحسین حاجی محمدحسن عرب[۱]؛ محمدجواد عامری[۲*]؛ یوسف رفیعی[۳]؛ حسین اسکندری‌راد[۱]
۱- کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.400686.1197

واژگان کلیدی
عملیات شکاف هیدرولیکی، هدایت‌پذیری شکاف، پروپنت، دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری شکاف، تنش افقی حداقل، ژئومکانیک مخزن.

چکیده

هدایت‌پذیری شکاف به عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده موفقیت نهایی عملیات شکاف هیدرولیکی، تحت تأثیر متغیرهای عملیاتی پروپنت شامل اندازه مش، میزان پروپنت در واحد سطح شکاف (چگالی سطحی) و رفتار خردشدگی تحت تنش قرار دارد. جهت مطالعه و شبیه‌سازی شکاف در یکی از مخازن ایران، نمونه‌های رخنمون سازند ایلام تهیه و در ابعاد مورد نظر آماده شد. از معادن فیروزکوه و همدان دو گروه ماسه سیلیس به عنوان پروپنت طبیعی تهیه گردید. پروپنت‌ها در سه اندازه مش ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰ و ۳۰/۵۰ سرند شده و در دو میزان ۲و ۰/۵ پوند بر فوت مربع در واحد سطح شکاف در آزمایش هدایت‌پذیری استفاده شدند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری قابلیت هدایت‌پذیری شکاف با تزریق گاز نیتروژن درون سلول هدایت‌پذیری در پنج دبی مختلف جهت شبیه‌سازی جریان سیال گاز با اعمال تنش‌های مختلف بستن شکاف انجام شد. در نهایت درصد خردشدگی پروپنت‌ها تعیین و با استفاده از رابطه فورشهایمر، مقادیر هدایت‌پذیری محاسبه گردید. بر اساس نتایج، مقادیر هدایت‌پذیری با افزایش تنش بستن شکاف و تراکم لایه پروپنت دچار کاهش قابل‌توجهی شد. پروپنت ۲۰/۴۰ فیروزکوه در مقایسه با ۲۰/۴۰ همدان به دلیل مقادیر بهتر کرویت و گردشدگی، هدایت‌پذیری بیشتر و در نتیجه عملکرد بهتری در محدوده تنش‌های اعمالی از خود نشان داد. مقایسه هدایت‌پذیری پروپنت‌های۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰ و ۳۰/۵۰ از ماسه فیروزکوه نشان داد، پروپنت۳۰/۵۰ به علت خردشدگی کمتر، دارای کمترین میزان کاهش مقادیر هدایت‌پذیری نسبت به دو نمونه دیگر تا تنش ۷۲۵۱ پام بود، زیرا نقاط تماس بین ذرات ریز پروپنت بیشتر و توزیع تنش بین ذرات بهتر بوده و پروپنت‌ها تحت تنش، کمتر دچار خردشدگی شدند. مقایسه دو میزان پروپنت ۲۰/۴۰ فیروزکوه نشان داد، افزایش غلظت پروپنت درون شکاف منجر به تعدد بیشتر ذرات پروپنت درون شکاف، کاهش درصد خردشدگی و درنهایت، حفظ بهتر مقادیر هدایت‌پذیری شد.

۱. مقدمه

با توجه به کاهش تولید از مخازن هیدروکربوری و روند افزایشی تقاضای انرژی در جهان و وجود میلیاردها بشکه ذخایر نفت و گاز درجا در مخازن نامتعارف با تراوایی ناچیز، بکارگیری هرچه بیشتر فرآیندهای ازدیاد برداشت و استفاده از روش‌های انگیزش چاه مورد توجه قرار گرفته است[۱].

روش‌های انگیزش و تحریک چاه شامل سه فرآیند ایجاد شکاف هیدرولیکی، شکاف اسیدی و اسید زنی ماتریسی است. این فرآیندها با بکارگیری در چاه‌های تولیدی، با هزینه‌ای کمتر نسبت به دیگر روش‌های ازدیاد برداشت نرخ تولید از مخزن را در مدت زمان کوتاهی افزایش می‌دهند. انجام این پروژه‌ها در دنیا سابقه‌ای حدود نیم قرن دارد[۱, ۲].

فرآیند شکست هیدرولیکی (اسیدی یا پروپنتی)، با تزریق

* تهران، میدان ولیعصر، خیابان حافظ، پلاک ۳۵۰، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده نفت، ۰۹۱۲۳۳۶۴۰۵۵- ۶۴۵۴۵۱۲۸ ameri@aut.ac.ir

سیال ویسکوز در فشاری بیشتر از فشار شکست سازند به درون چاه به‌منظور ایجاد شکاف با قابلیت هدایت‌پذیری بالا جهت افزایش نرخ تولید صورت می‌پذیرد. در فرآیند شکست اسیدی، پس از اعمال شکست و تزریق اسید، تماس اسید و سنگ و واکنش درون شکاف، ایجاد زبری نموده و به عنوان مانعی جهت جلوگیری از بستن شکستگی عمل می‌نماید. در شکست پروپنتی نیز پروپنت‌ها مانعی برای بستن عرض شکاف خواهند بود. درهرصورت با توجه به تراوایی مخزن، استحکام و قابلیت خوردگی سنگ، شدت تنش افقی و دمای مخزن، یکی از دو روش شکست یا ترکیبی از آن‌ها برای نتیجه‌گیری هرچه بهتر قابل استفاده است[۲].

در عملیات شکاف پروپنتی سیالی با ویسکوزیته بالا برای غلبه بر مقاومت کششی سنگ سازند و ایجاد شکاف اولیه درون مخزن تزریق می‌شود. در ادامه برای ممانعت از بستن شکاف از موادی دانه‌ای شکل مانند ماسه با مقاومت تراکمی بالا استفاده می‌گردد. این مواد پس از ایجاد شکاف، همراه سیال تزریقی که ترکیبی از سیال ایجاد شکاف و سیال پروپنتی است، درون شکاف تزریق شده تا از بسته شدن کامل شکاف تحت شرایط تنش‌های برجا جلوگیری کند[۱]. جهت مطالعه، بررسی و پیش‌بینی عملکرد فرآیند شکاف پروپنتی، طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی موثر بر رفتار هدایت‌پذیری شکاف، آزمایش‌های متعددی توسط انستیتوی نفت آمریکا و محققین در سراسر دنیا طی سالیان طراحی شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، آزمایش تعیین هدایت‌پذیری شکاف در حضور پروپنت در عملیات شکاف هیدرولیکی است.

قابلیت هدایت‌پذیری شکاف به عنوان مهم‌ترین ویژگی و یکی از کلیدی‌ترین عوامل موثر در تعیین عملکرد نهایی و موفقیت عملیات شکاف هیدرولیکی به شمار می‌رود. باتوجه به وجود منابع غنی ماسه‌های سیلیسی در ایران، بررسی پتانسیل این ماسه به‌عنوان پروپنت کاربردی در عملیات شکاف هیدرولیکی امری ضروری به نظر می‌رسد. هدف از انجام این پژوهش مطالعه و تخمین قابلیت هدایت‌پذیری شکاف پر شده با نمونه ماسه‌های طبیعی ایران با دانه‌بندی و غلظت‌های متفاوت جهت امکان‌سنجی و بکارگیری در عملیات شکاف هیدرولیکی در یکی از مخازن ایران است.

پس از آماده‌سازی و تهیه نمونه‌های بیرون‌زدگی لایه سازند ایلام و ماسه‌های سیلیس از دو معدن سیلیس همدان و فیروزکوه، برای مطالعه اثر غلظت پروپنت، اندازهٔ سرند (مش پروپنت)، مقایسه ماسه‌های مناطق مختلف ایران و درصد خردشدگی انواع ماسه‌ها و مطالعه رفتار پروپنت‌ها در تنش‌های متفاوت بستن شکاف مجموعاً پنج سری آزمایش طراحی و اجرا شد.

کوک در سال ۱۹۷۳ دو سلول مجزا جهت مطالعه پارامترهای دما و تنش بستن شکاف بر روی رفتار قابلیت هدایت‌پذیری شکاف پرشده با پروپنت طراحی و ارائه کرد. آزمایش‌های کوک نشان داد، هدایت‌پذیری شکاف پر شده با پروپنت با دما و تنش‌های بستن شکاف رابطه عکس داشته و با افزایش پارامترهای دما و فشار، هدایت‌پذیری شکاف پروپنتی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. کوک هم‌چنین به اهمیت جریان غیردارسی درون شکاف و اثر آن بر قابلیت هدایت‌پذیری اشاره کرد[۳, ۴].

ون درلیس و همکاران در سال ۱۹۷۵ به مطالعه اثر نوع قرارگیری پروپنت درون شکاف بر قابلیت هدایت‌پذیری پرداختند، مطالعات آن‌ها روابطی تجربی جهت تخمین دقیق قابلیت هدایت‌پذیری شکاف پر شده با ماسه به عنوان پروپنت ارائه نمود. آن‌ها هم‌چنین برای سیالات ایجاد شکاف با ویسکوزیته پایین و غلظت پروپنت تا ۵ پوند بر گالن، مقدار ۲ و برای سیالات با ویسکوزیته بالا و غلظت پروپنت تا ۸ پوند بر گالن، مقدار۲/۶ را برای نسبت بین عرض شکاف و بیشترین قطر دانه پروپنت پیشنهاد نمودند[۵].

مؤسسه نفت آمریکا در سال ۱۹۸۹ روشی استاندارد برای اندازه‌گیری هدایت‌پذیری لایه پروپنت براساس سلول هدایت‌پذیری طراحی شده توسط کوک ارائه نمود[۶]. در این روش پروپنت‌ها به‌طور دستی بین دو پیستون فلزی قرار داده شده و با تزریق سیال و اندازه‌گیری افت فشار در ابتدا و انتهای نمونه، تراوایی و هدایت‌پذیری پروپنت اندازه‌گیری می‌شوند. این روش بعد از چند سال توسط سازمان جهانی استاندارد با تجدید نظر مختصر به‌عنوان روش استاندارد آزمایش هدایت‌پذیری بلندمدت لایه پروپنت ارائه شد[۵]. در مطالعه صورت گرفته در سال ۲۰۱۲ توسط کوداماسو و همکاران، مقایسه‌ای بین نمونه‌هایی از ماسه طبیعی دو کشور هند و عربستان (یک نمونه از ماسه‌های عربستان و هشت نمونه از ماسه‌های هند) با پروپنت ماسه‌ای پرکاربرد اوتاوا انجام شد. در این پژوهش نمونه ماسه‌های متفاوت از نقاط مختلف

عربستان و هند تهیه و آزمایش‌های غربالگری، انحلال در اسید مقاومت خردایشی و.... بر روی آن‌ها انجام شد[۷].

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند، طبق آزمایش‌های ارائه شده توسط استاندارد انستیتو نفت آمریکا، دو نمونه از ۹ نمونه مورد مطالعه، در مقایسه با پروپنت‌های ماسه‌ای اوتاوا تا تنش ۴۰۰۰پام نتایج یکسانی در مقادیر هدایت‌پذیری شکاف و تولید ذرات ریز داشتند، به‌طوری که ماسه اوتاوا در شرایط تنش ۴۰۰۰ پام در اثر خردایش مقدار ۷/۷ درصد ذرات ریز و نمونه ماسه منتخب تا ۸/۱ درصد ذرات ریز تولید نمود. هم‌چنین با توجه به اختلاف اندک مقادیر هدایت‌پذیری ماسه اوتاوا و ماسه منتخب که به ترتیب ۴۸۵۰ و ۴۷۷۰ میلی-دارسی بر فوت تخمین زده شد امکان استفاده از این دو نوع ماسه تا شرایط تنش ۴۰۰۰ پام به‌عنوان پروپنت مورداستفاده را تایید کرد[۷].

آخرین مورد مطالعه قابلیت هدایت‌پذیری شکاف توسط جیانگوانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شده است. در این پژوهش با ترکیب نمونه‌های ماسه کوارتزی با دانه‌بندی مختلف به عنوان پروپنت کاربردی، میزان نرخ کاهش اندازه ذرات پروپنت تحت تنش‌های بستن شکاف بر حسب درصد و تأثیر آن بر قابلیت هدایت‌پذیری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان دادند که راهکار و ایده ترکیب پروپنت با اندازه‌های مختلف در بهبود هدایت‌پذیری شکاف مؤثر نبوده و یکسان بودن اندازه ذرات پروپنت ظرفیت عبوری بهتر جریان و در نتیجه هدایت‌پذیری بیشتری را برای جریان سیال درون شکاف ایجاد می‌کنند[۸].

با توجه به سابقه اجرای عملیات شکاف هیدرولیکی در داخل کشور، نبود مطالعات جامع و کاربردی در زمینه ژئومکانیک مخزن و کمبود مطالعات تجربی موجب شده است تا عملیات شکاف هیدرولیکی موفقیت آمیز نبوده و همواره در ابتدای راه با مشکل همراه شود. در این پژوهش سعی برآن شد تا با طراحی و اجرای آزمایش‌های متعدد، به بررسی دقیق‌تر رفتار هدایت‌پذیری نهایی شکاف پرداخته شود.

۲. فرآیند شکست سازند

عملیات شکست هیدرولیکی برای اولین‌بار در ایالت کانزاس آمریکا در سال ۱۹۴۷ صورت گرفت. این عملیات یکی از روش‌های مؤثر و کاربردی در استخراج نفت و گاز مخازن هیدروکربوری با تراوایی کم و یا آسیب‌دیده است تا با استفاده از اعمال شکست سازند، مسیری با هدایت‌پذیری بالا ایجاد شده و سیال مخزن به‌راحتی به سمت چاه جریان یافته و تولید شود. علاوه بر انگیزش و تحریک سازند از این فرآیند می‌توان در اهداف مختلف مهندسی از جمله تزریق گاز کربن‌دی‌اکسید و ایزوله نمودن مواد زائد و سمی در سنگ‌ها، تولید گاز از مخازن گازی شیلی و تولید از مخازن ژئوترمال بهره برد[۱].

روند کلی فرآیند شکست سازند بدین صورت است که ابتدا سیال ایجاد شکاف با ویسکوزیته بالا، با فشاری بیش از فشار شکست سازند به درون لایه مورد نظر تزریق شده و با غلبه بر مقاومت کششی سنگ سازند باعث ایجاد شکاف در محیط سازندی اطراف چاه می‌گردد. فرآیندهای شکست سازند به دودسته تقسیم می‌شوند: فرآیند شکاف اسیدی و شکاف هیدرولیکی پروپنتی[۱].

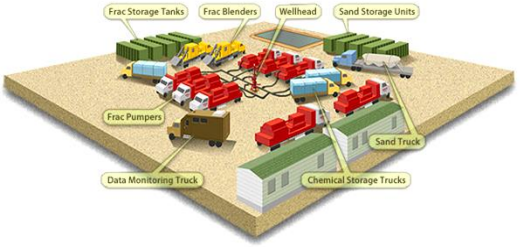
در فرآیند شکاف هیدرولیکی پروپنتی پس از ایجاد شکاف و اتمام تزریق سیال درون شکاف، تنش افقی حداقل سعی در بستن عرض شکاف دارد[۸]. برای ممانعت از بستن شکاف از موادی دانه‌ای شکل با مقاومت تراکمی بالا استفاده می‌گردد. این مواد پس از ایجاد شکاف، همراه سیال اصلی که ترکیبی از سیال ایجاد شکاف و پروپنت است درون شکاف تزریق می‌گردد. تزریق این سیال باعث افزایش عرض شکاف و گسترش آن شده و هم چنین پروپنت موجود در آن از بسته شدن شکاف پس از اتمام فرآیند جلوگیری می‌نماید. در مرحله آخر برای تمیز نمودن محیط شکاف و فضای اطراف پروپنت‌ها، از سیال فلش استفاده شده و درنهایت کانالی با قابلیت هدایت بالا برای جریان نفت و گاز در دهانه چاه ایجاد می‌شود[۱].

در فرآیند ایجاد شکاف اسیدی پس از شکست سازند، از اسید مناسب جهت تزریق به درون شکاف استفاده می‌شود که باعث ایجاد و تشکیل خوردگی و شیار بر روی سطح داخلی شکاف می‌گردد. در ادامه به بررسی دقیق شکاف پروپنتی پرداخته شده است[۴, ۹].

۱,۲. عملیات شکاف هیدرولیکی

ایجاد شکاف هیدرولیکی یک روش تحریک چاه است که برای چاه‌ها در مخازن با تراوایی کم و متوسط، کاربرد دارد[۱]. وظیفه ایجاد شکاف هیدرولیکی در محل چاه با استفاده از تجهیزات سنگین قابل انجام است که شامل پمپ‌های نصب

شده برروی کامیون، مخلوط کن، مخازن نگهداری سیال و مخازن ماده بازنگهدارنده پروپنت است. در شکل (۱) تجهیزات ساده طرح‌بندی شده در عملیات شکاف هیدرولیکی در چاه‌های نفت وگاز قابل مشاهده است[۵].

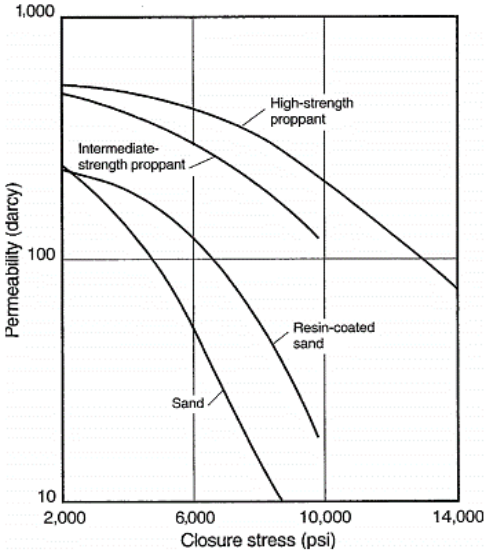


شکل ۱. طرح‌واره تجهیزات عملیات شکاف هیدرولیکی[۱۲]

عملیات شکاف هیدرولیکی به دو دسته مرحله لایه ای (ایجاد شکاف و توسعه آن) و مرحله دوغاب تقسیم می‌شود. در مرحله اول (لایه ای)، سیال شکاف به داخل چاه پمپ شده تا با غلبه بر مقاومت کششی سازند باعث شکست آن شده و ایجاد لایه شکاف نماید. در مرحله بعدی پس از ایجاد و گسترش شکاف، فرآیند ترزیق دوغاب آغاز می‌شود. در این مرحله سیال شکافده با ماده ی بازنگهدار شکاف (پروپنت) در مخلوط کن، مخلوط شده و به درون شکاف تزریق می‌گردد[۱, ۱۰].

ماده ی باز نگه‌دار شکاف (پروپنت) باید براساس شرایط تنش برجا انتخاب شود. قدرت تراکمی و اثر تنش روی تراوایی پروپنت، موضوعات مهمی هستند. برای شکاف عمودی، قدرت تراکمی پروپنت باید از تنش افقی مؤثر بیش‌تر باشد[۱۰]. به‌طور کلی، پروپنت‌ها با اندازه ذرات بزرگ‌تر، تراوایی و هدایت‌پذیری بهتری را نتیجه می‌دهند، اما اندازه ی پروپنت در برابر ضابطه ورود از طریق منافذ مشبک کاری و داخل شکاف باید بررسی شود. در این پژوهش به‌طور دقیق به بررسی رفتار هدایت‌پذیری نمونه‌های پروپنت در شرایط تنش‌های مختلف بستن شکاف پرداخته شده است. شکل (۲) تراوایی انواع مختلف پروپنت تحت شرایط تنش‌های بستن شکاف را نشان می‌دهد[۱, ۲].

پس از پرشدن شکاف با پروپنت تزریقی عملیات تمام شده و پمپ‌ها خاموش می‌شوند. پس از به پایان رسیدن تزریق سیال شکاف، در اثر نشت سیال درون سازند و توقف پمپاژ، فشار سیال درون شکاف کاهش یافته و تنش افقی حداقل وارد بر شکاف موجب کاهش عرض و در نهایت بسته شدن شکاف می‌گردد. برای جلوگیری از بسته شدن شکاف و حفظ قابلیت هدایت‌پذیری آن که نقش مهمی در افزایش بهره‌دهی مخزن دارد از پروپنت استفاده می‌شود[۱].



شکل ۲. تراوایی انواع مختلف پروپنت تحت شرایط تنش‌های مختلف بستن شکاف[۱]

از عوامل مؤثر بر حفظ قابلیت هدایت‌پذیری شکاف که میزان موفقیت عملیات شکاف هیدرولیکی به آن وابسته است می‌توان به استحکام پروپنت، اندازه ذرات، توزیع آنها، کیفیت مواد ریز، ناخالصی‌ها، میزان کرویت و گردشدگی و چگالی سطحس آن‌ها اشاره نمود. استحکام پروپنت‌ها باید قدری بالا باشد تا در مقابل تنش‌ها مقاومت خوبی را از خود نشان دهند و علاوه بر حفظ و جلوگیری از بسته شدن کامل عرض شکاف، با له‌شدگی و خردشدگی کم‌تر، مسیری با هدایت‌پذیری بیش‌تر برای حرکت سیالات از مخزن به سمت چاه و تولید از آن را فراهم نمایند[۱, ۵].

مهم‌ترین گام در انتخاب پروپنت مناسب، تعیین هدایت‌پذیری آن در شکاف مورد نظر و تحت تنش‌های بستن شکاف است[۵]. این پارامتر معیاری جهت ارزیابی ظرفیت عبور سیال از درون شکاف به سمت چاه بوده و از دیدگاه ریاضی، هدایت‌پذیری شکاف به صورت حاصلضرب نفوذپذیری پروپنت درون شکاف در عرض شکاف قابل تعریف است. به‌طور کلی پروپنت‌ها با ایجاد یک مسیر هدایت‌پذیر درون مخزن بعد از توقف پمپاژ سیال ایجاد شکاف و نشتی آن از بسته شدن

عرض شکاف براثر تنش‌های اعمالی جلوگیری می‌کنند[۵، ۸].

۳. روش تحقیق

جهت مطالعه عملکرد فرآیند شکاف پروپنتی در مخازن نفت و گاز، طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، آزمایش‌های متعددی توسط انستیتوی نفت آمریکا، مؤسسات و محققین در سراسر دنیا طی سالیان طراحی شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، آزمایش تعیین هدایت‌پذیری لایه پروپنت است. در همین راستا پس از تهیه‌ی نمونه‌های بیرون‌زدگی سازند ایلام و برش در ابعاد استاندارد آزمایش، ماسه‌های سیلیس همدان و فیروزکوه، برای مطالعه اثر میزان پروپنت در واحد سطح، اندازه‌ی سرند (مش پروپنت)، مقایسه ماسه‌های مناطق مختلف ایران، در سه اندازه سرند ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰و ۳۰/۵۰ تهیه شدند[۱۱].

درنهایت جهت مطالعه و شبیه‌سازی شکاف پروپنتی و انجام آزمایش‌های هدایت‌پذیری، نمونه ماسه‌های سلیسی همدان و فیروزکوه مابین نمونه سنگ سازند ایلام درون دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری قرارگرفته و با عبور دبی‌های مختلف جریان گاز جهت شبیه سازی تولید از مخازن گازی، مقادیر هدایت‌پذیری شکاف با استفاده از رابطه فورشهایمر در هر مرحله اعمال تنش محاسبه شد[۱۱].

۱،۳. تهیه نمونه‌های آزمایش

برای کاربردی نمودن نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری قابلیت هدایت‌پذیری شکاف و تشابه هرچه بیشتر شرایط آزمایشگاهی به شرایط عملیاتی و میدانی فرآیند ایجاد شکاف در کشور، استفاده از نمونه‌های سازندی ایران امری ضروری است. در این میان انتخاب سازندی که مستعد انجام عملیات شکاف هیدرولیکی باشد، بسیار حائز اهمیت است [۱۲].

کربناته بودن سازند و نفوذپذیری پایین آن می‌تواند از اصلی‌ترین دلایل انتخاب آن به‌عنوان گزینه مناسب جهت انجام آزمایش‌های هدایت‌پذیری باشد. در میان مخازن کشور، مخازن بنگستان و مخصوصاً سازندهای، ایلام و سروک باتوجه به تعدد آن‌ها در میادین مختلف کشور و بعضاً نفوذپذیری پایین، گزینه‌های مناسبی جهت نمونه‌برداری هستند [۱۲].
سازند آهکی ایلام برای اولین بار توسط جیمز و وایند در تنگه گراب، در شمال غربی تاقدیس کبیر کوه، در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر ایلام، در ناحیه لرستان معرفی شد. این سازند در محل مقطع نمونه، شامل ۱۹۰ متر سنگ آهک خاکستری با لایه بندی متوسط تا نازک همراه با میان لایه‌های شیلی است. این واحد در ناحیه لرستان، دارای رخساره‌ی پلاژیک سرشار از الیگواستژینا و فرامینیفرهای پلانکتونی نظیر گلوبوترونکانا است. این واحد در منطقه لرستان به صورت قاطع بر روی سازند سورگاه قرار گرفته است. هم‌چنین مرز بالایی آن را سازند گورپی به صورت واضح تشکیل داده به‌طوری که سن آن در دوره سانتونین تا کامپانین است[۱۲].

برای برداشت رخ نمون‌های سازند ایلام با توجه به تعدد مکان‌های موجود در کشور، ابتدا امکان دسترسی به مکان‌های مورد نظر بر اساس نقشه‌های زمین شناسی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با نمونه برداری و انجام آزمایش مقطع نازک از نمونه‌های برداشت شده، از وجود این سازند در محل اطمینان حاصل شده و در نهایت با بررسی راه‌های دسترسی به محل و امکان برداشت رخ نمون، کوه گیسکان در نزدیکی روستای دهدار با طول و عرض جغرافیایی ″۱/۲۲ ′۱۸ °۲۹ و ″۵۹/۲۳ ′۱۶ °۵۱ جهت برداشت رخنمون‌ها انتخاب شد. این روستا در ۷ کیلومتری شمال شرقی شهرستان برازجان، از توابع بخش مرکزی شهرستان دشتستان استان بوشهر، واقع شده است[۱۲].

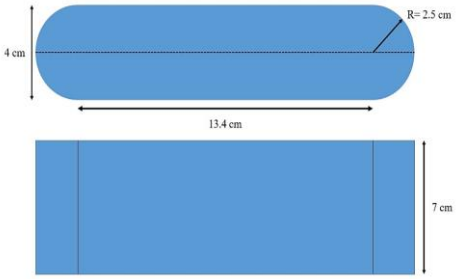
همان‌طور که در شکل (۳) نمایان است، رخنمون‌های تهیه شده از سازند ایلام در ابتدا به‌صورت کلوخه است. این کلوخه‌ها جهت استفاده در دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری، ابتدا باید به بلوک تبدیل شده و سپس در ابعاد استاندارد و هندسه موردنظر دستگاه هدایت‌پذیری برش داده شوند[۱۲].

شکل ۳. کلوخه استخراج شده رخنمون سازند ایلام [۱۲]

نمونه‌های استفاده شده در این مطالعه دارای ابعاد استاندارد ۱۳/۴سانتی‌متر طول، ۴سانتی‌متر پهنا و ۷سانتی‌متر ارتفاع و سطح بیضوی شکل هستند. باتوجه به سطح مقطع بیضوی شکل دستگاه در محل قرارگیری نمونه‌ها، انتهای بلوکه‌ها گرد

و با ابعاد دقیق برش داده شد. به این ترتیب نمونه‌ها کاملا با محل قرارگیری خود در دستگاه یکسان می‌شوند. نمونه‌های برش خورده و ابعاد دقیق نمونه‌ها به ترتیب در دو شکل (۴) و شکل (۵) قابل مشاهده است [۱۱].

شکل ۴. نمونه‌های برش خورده جهت انجام آزمایش



شکل ۵. ابعاد دقیق نمونه‌های کربناته[۱۲]

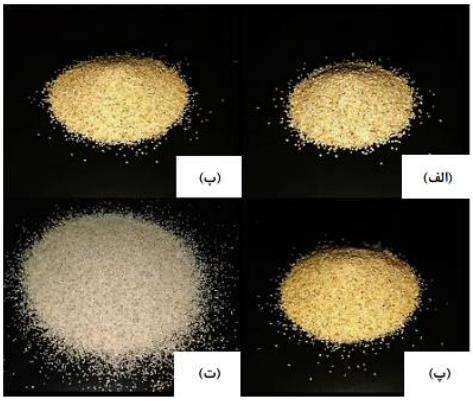
پس از آماده سازی نمونه‌های سازند ایلام، جهت ایجاد یک عایق و پوشش مناسب درون سلول دستگاه برای جلوگیری از نشت گاز نیتروژن و عدم افت فشار درون سلول در حین انجام آزمایش، اطراف نمونه‌ها با سیلیکون دوجزئی قالب‌گیری شد. سیلیکون مورد استفاده در این پژوهش، سیلیکون دو جزیی *E640* است. این سیلیکون از دو جزء A و B تشکیل شده است. با ترکیب این دو جزء در یک میزان مشخص، سیلیکون نهایی تهیه می‌شود. این سیلیکون هم‌چنین قابلیت بندش در دمای اتاق را دارا بوده و به آن سیلیکون *RTV* نیز گفته می‌شود[۱۲].

۲,۳. تهیه نمونه ماسه طبیعی به‌عنوان پروپنت

جهت امکان‌سنجی استفاده از ماسه‌های سیلیسی ایران در عملیات شکاف هیدرولیکی به عنوان مواد بازنگهدارنده شکاف، دو نمونه ماسه از دو معدن فعال کشور تهیه شد. نمونه اول از معادن سیلیس استان همدان و نمونه دوم از معادن ماسه سیلیس شهرستان فیروزکوه در استان تهران با درصد خلوص ۹۸ درصد به‌عنوان سیلیس درجه یک است. برای مطالعه اثر دانه بندی و اندازه ذرات ماسه‌ها بر روی رفتار هدایت‌پذیری شکاف تحت فشارهای مختلف بستن ۶ سرند در اندازه مش، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ساخته شد. شکل (۶) سرندهای ساخته شده جهت دانه‌بندی ماسه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۱۲].

شکل ۶. سرند ساخته شده جهت دانه بندی ماسه‌ها[۱۲]

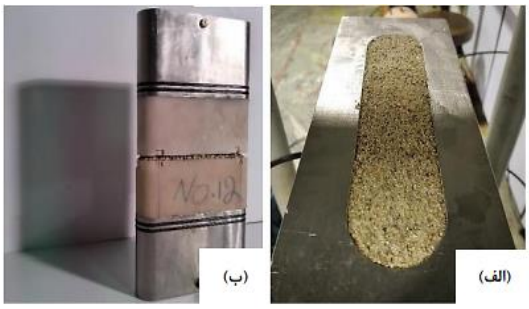
باتوجه به اندازهٔ رایج و کاربردی پروپنت در عملیات شکاف هیدرولیکی نمونه ماسه‌ی همدان به‌وسیله دسته سرند با اندازه مش ۲۰/۴۰ و نمونه ماسه‌ی فیروزکوه با اندازه مش‌های ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰ و ۳۰/۵۰ سرند شده و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند، شکل (۷). پس از آماده شدن نمونه سنگ سازند ایلام و نمونه ماسه‌ها ابتدا پارامتر کرویت و گردشدگی ذرات ماسه‌ها با استفاده از روش *krumbien & loss* تعیین شد[۱۱].



شکل ۷. نمونه ماسه‌های فیروزکوه با دسته سرند: (الف) ۱۶/۳۰، (ب) ۲۰/۴۰، (پ) ۳۰/۵۰ و نمونه ماسه همدان با دسته سرند (ت) ۲۰/۴۰

در نهایت برای اندازه‌گیری و مطالعه هدایت‌پذیری لایه پروپنت، نمونه ماسه‌ها و نمونه سنگ سازند به ترتیب مطابق

شکل (۸) درون دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری قرارگرفته و با اعمال تنش‌های مختلف بستن شکاف در محدوده‌ی صفر تا ۸۰۰۰ پام با عبور جریان گاز نیتروژن از داخل لایه پروپنت و تعیین مقادیر افت فشار، هدایت‌پذیری محاسبه شد[۱۱].

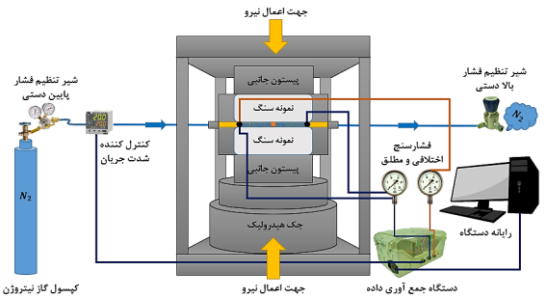


شکل ۸. (الف) لایه پروپنت درون سلول، (ب) ترتیب قرارگیری نمونه‌ها درون سلول هدایت‌پذیری[۱۱]

۳،۳. معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری شکاف بر اساس استاندارد (*API RP-61 & ISO 13503-5*) جهت مطالعه رفتار هدایت‌پذیری شکاف تحت تنش‌های مختلف بستن شکاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه شامل سه بخش اصلی: سلول هدایت‌پذیری، دستگاه بارگذاری و دستگاه جمع‌آوری داده است. کپسول نیتروژن، کنترل‌کننده دبی جرمی گاز نیتروژن، دستگاه اندازه‌گیری فشار مطلق و اختلاف فشار، شیر تنظیم‌کننده فشار بالادست، اجزای دیگر این دستگاه را تشکیل می‌دهند، شکل (۹). با عبور جریان گاز نیتروژن از میان شکاف موجود بین نمونه‌های سنگ جهت شبیه سازی حرکت سیال درون شکاف اسیدی در مخازن گازی و اندازه‌گیری افت فشار ایجاد شده در طول شکاف، پارامتر هدایت‌پذیری با استفاده از رابطه فورشهایمر محاسبه می‌گردد[۱۲].

کاربرد اصلی دستگاه، محاسبه افت فشار سیال هنگام عبور از درون شکاف است. داده‌های به‌دست‌آمده از فشارسنج‌ها درون پردازنده‌ای به نام *Data acquisition* وارد شده و در آنجا ثبت می‌شوند[۱۲]. برای اندازه‌گیری این دو فشار باید از یک گیج فشار مطلق و یک گیج اختلاف فشار استفاده نمود. برای تنظیم دبی جرمی گاز نیتروژن درون شکاف ابزار دقیق خاصی مورد نیاز است که علاوه بر خواندن دبی جریان آن را روی عدد خاصی ثابت نگه دارد، زیرا آزمایش‌ها در پنج دبی خاص انجام می‌گیرد[۱۲]. در هر مرحله دبی جریانی گاز باید بدون تغییر و ثابت باشد، چراکه افت فشار ثبت شده متناسب با همان دبی ثابت است؛ به همین منظور از ابزاری به نام کنترل‌کننده دبی جرمی گاز در این پژوهش استفاده شد. در انتهای دستگاه (پس از سلول اصلی) یک شیر کنترل‌کننده پس فشار قرار داشته تا با استفاده از آن فشار ابتدای سلول هدایت‌پذیری را روی عدد استاندارد آزمایش (در آزمایش‌های هدایت‌پذیری مقدار فشار مطلق سلول هدایت‌پذیری معمولا ۵۰پام است) تنظیم نمود [۱۲].



شکل ۹. طرح واره دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری [۱۲]

۴،۳. روش محاسبه قابلیت هدایت‌پذیری شکاف

پس از انجام آزمایش‌های تعیین هدایت‌پذیری و ثبت داده‌های فشاری، نیاز به محاسبه مقادیر هدایت‌پذیری شکاف است. هدایت‌پذیری شکاف خاصیت شکاف بوده و به‌طور کلی از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$c_f = k_f w_f \qquad (۱)$$

دراین‌رابطه k_f تراوایی شکاف و w_f عرض شکاف است. محاسبه قابلیت هدایت شکاف توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش از روش توسعه یافته به وسیله پورسل استفاده شده است[۱۱]. رابطه فورشهایمر برای محاسبه افت فشار شدت جریان بالای گاز نیتروژن در محیط شکاف به طول L به صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد:

$$\frac{(p_1^2 - p_2^2)}{L} = \frac{2zRT\mu\rho v}{Mk} + \frac{2ZRT\beta(\rho v)^2}{M} \qquad (۲)$$

در این رابطه $\frac{p_1^2-p_2^2}{L}$ برابر مجموع افت فشار ناشی از ویسکوزیته $\frac{2zRT\mu\rho v}{Mk}$ ، و افت فشار ناشی از اینرسی سیال $\frac{2ZRT\beta(\rho v)^2}{M}$ است، که در آن β ضریب اینرسی جریان سیال

است. زمانی که این ضریب کوچک و نزدیک به صفر است، رابطه فورشهایمر به رابطه دارسی تبدیل می‌شود[۱۲]. در آزمایش هدایت‌پذیری شکاف، سرعت گاز نیتروژن با توجه به سطح مقطع شکاف از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$v = \frac{q}{wh} \qquad (۳)$$

در این رابطه q شدت جریان گاز نیتروژن، h و w به ترتیب ارتفاع و عرض شکاف است. با جای‌گذاری رابطه(۳) در معادله (۲) و اعمال تغییرات و انتگرال‌گیری مربوطه، رابطه(۴) معروف به رابطه فورشهایمر برای محاسبه هدایت‌پذیری شکاف به دست می‌آید:

$$\frac{(P_1^2 - P_2^2)Mh}{2ZRT\mu L\rho q} = \frac{\beta\rho q}{w^2\mu h} + \frac{1}{k_f w_f} \qquad (۴)$$

با رسم مقادیر $\frac{(P_1^2-P_2^2)Mh}{2ZRT\mu L\rho q}$ به عنوان محور y، در برابر مقادیر $\frac{\rho q}{\mu h}$ تحت عنوان محور x برای دبی‌های مختلف جریان گاز در هر تنش بستن شکاف، نموداری با خط راستی حاصل شده که عرض از مبدا آن معکوس قابلیت هدایت‌پذیری شکاف و شیب نمودار برابر ضریب اینرسی جریان است. به این ترتیب پس از محاسبه افت فشار در طول شکاف برای دبی‌های جریانی مختلف و تخمین مقادیر p_1 و p_2 و تعیین سایر پارامترهای معادله، با رسم منحنی فورشهایمر در هر تنش بستن شکاف و رسم بهترین خط راست منطبق بر داده‌ها و محاسبه عرض از مبدا منحنی، مقدار $\frac{1}{k_f w_f}$ به دست می‌آید. با اعمال تبدیل واحد مقدار هدایت‌پذیری شکاف در تنش‌های مختلف بستن شکاف بر حسب میلی دارسی-فوت قابل محاسبه است [۱۲].

۵،۳. تعیین متغیرهای عملیاتی آزمایش

شدت جریان گاز نیتروژن، فشار بستن شکاف، متغیر آزمایش‌های هدایت‌پذیری شکاف هستند. فشار بستن شکاف می‌بایست متناسب با تنش افقی حداقل و میزان تنش نهایی سازندی که قرار است، عملیات شکاف هیدرولیکی در آن صورت‌پذیری انتخاب گردد. از آن‌جا که تنش نهایی نمونه سازندی انتخاب شده بیش از ۵۰۰۰ پام بوده و عموماً تنش بستن شکاف در میادین منتخب این پروژه‌ها در ایران، حداکثر تا ۸۰۰۰ پام است، لذا حداکثر تنش بستن شکاف در این آزمایش‌ها ۷۲۵۱ پام معادل ۵۰۰ بار انتخاب شد [۱۲]. از طرفی برای ایجاد افت فشار جریان گاز درون شکاف، محدوده منتخب شدت جریان گاز نیتروژن با در نظرگرفتن رژیم جریان حاکم در محیط متخلخل لایه پروپنت بین ۲ تا ۱۰ لیتر بر دقیقه در پنج دبی افزایشی به ترتیب ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. فشار سلول قابلیت هدایت نیز براساس استاندارد انجام آزمایش هدایت‌پذیری برروی ۵۰ پام تنظیم گردید [۱۲].

۴. تحلیل نتایج

پس از آماده‌سازی نمونه‌های سنگ سازند ایلام و ماسه‌های سیلیس همدان و فیروزکوه برای مطالعه اثر غلطت پروپنت، اندازهٔ سرند (مش پروپنت)، مقایسه ماسه‌های مناطق مختلف ایران و مطالعه رفتار پروپنت‌ها در تنش‌های متفاوت بستن شکاف مجموعاً پنج سری معادل ۱۵۰ مرحله آزمایش طراحی و اجرا شد. سری اول آزمایش‌ها مربوط به مطالعه ماسه همدان در اندازه سرند استاندارد ۲۰/۴۰ است. سری دوم، سوم و چهارم آزمایش‌ها شامل مطالعه ماسه فیروزکوه در سه اندازه سرند متفاوت ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰و ۳۰/۵۰ در غلظت ثابت ۲پوند بر فوت مربع و سری پنجم آزمایش‌ها شامل مطالعه ماسه فیروزکوه با اندازه سرند ۲۰/۴۰ با میزان پروپنت در واحد سطح ۰/۵ پوند بر فوت مربع جهت مطالعه اهداف مورد نظر طراحی و اجرا شد.

جدول ۱. خلاصه‌ای از آزمایش‌های هدایت‌پذیری شکاف

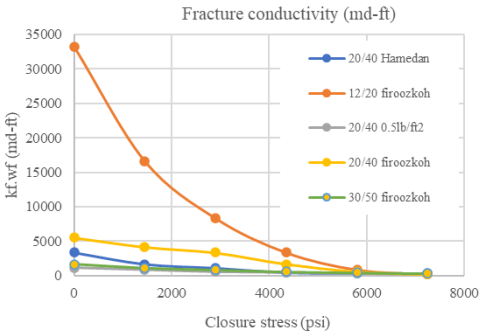
سری آزمایش	میزان پروپنت در واحد سطح (lb/ft^2)	اندازه سرند و نوع ماسه	هدف
۱	۲	۲۰/۴۰ همدان	مطالعه اثر تغییرات اندازه سرند، نوع ماسه و هدایت‌پذیری شکاف پروپنتی
۲		۱۶/۳۰ فیروزکوه	
۳		۲۰/۴۰ فیروزکوه	
۴		۳۰/۵۰ فیروزکوه	
۵	۰/۵	۲۰/۴۰ فیروزکوه	

پس از انجام آزمایش‌ها و ثبت داده‌های فشاری و رسم منحنی‌های مربوطه، تحلیل و بررسی رابطه بین متغیرهای پروپنت و رابطه آن با هدایت‌پذیری شکاف امری ضروری است.

قابلیت هدایت‌پذیری شکاف پارامتر کلیدی و تأثیرگذار بر موفقیت و عملکرد نهایی عملیات شکاف هیدرولیکی بوده و شناخت کامل و درک درست از رابطه بین متغیرهای عملیاتی و نحوهٔ تأثیر آن‌ها بر رفتار هدایت‌پذیری در شرایط مختلف، کمک شایانی در امر مطالعه و طراحی بهینه عملیات شکاف هیدرولیکی و در نهایت بهبود نرخ تولید می‌نماید. جهت بررسی پارامترهای متغیر عملیاتی در روند آزمایش و ارتباط آن‌ها با هدایت‌پذیری شکاف، نتایج آزمایشگاهی در چهار مرحله مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. این مراحل شامل بررسی رابطه تنش‌های بستن شکاف، اندازه‌ی سرند پروپنت، بررسی و مقایسه عملکرد دو ماسه فیروزکوه و همدان و رابطه میزان پروپنت در واحد سطح و هدایت‌پذیری شکاف است.

۱،۴. بررسی رابطه حداقل تنش افقی (تنش بستن شکاف) و قابلیت هدایت‌پذیری

پارامتر مهم در پیش‌بینی قابلیت هدایت‌پذیری شکاف، تعیین نوع رابطه قابلیت هدایت‌پذیری با تنش بستن شکاف است. پس از ثبت و ذخیره داده‌ها در هر مرحله اعمال تنش بستن شکاف و رسم منحنی فورشهایمر دبی‌های تزریق گاز نیتروژن مشاهده شد، با افزایش تنش بستن شکاف، ظرفیت جریان درون شکاف کاهش‌یافته و جریان سیال درون شکاف مقادیر افت فشار بیشتری را دچار می‌شود. این پدیده ناشی از عدم توانایی ذرات پروپنت در تحمل تنش‌های بالا و افزایش درصد خردشدگی، کاهش عرض شکاف، کاهش تخلخل، تراوایی و در نتیجه کاهش مقادیر هدایت‌پذیری در هر مرحله اعمال تنش بستن شکاف است. شکل (۱۰) رابطه هدایت‌پذیری و تنش‌های مختلف بستن شکاف مربوط به تمامی پروپنت‌ها را نشان می‌دهد.

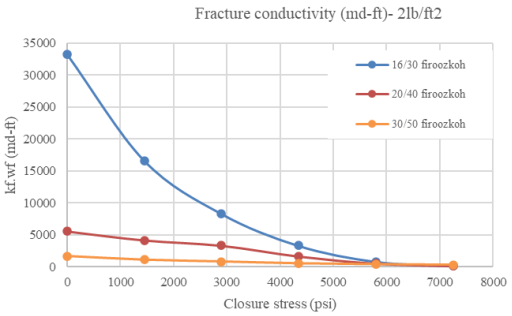


شکل ۱۰. منحنی رابطه تنش بستن شکاف و قابلیت هدایت‌پذیری پروپنت‌های مختلف

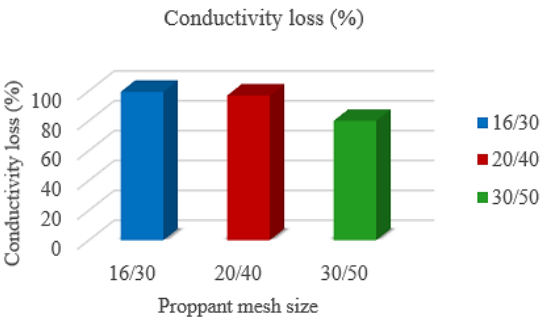
۲،۴. بررسی رابطه اندازه سرند پروپنت با قابلیت هدایت‌پذیری

جهت مطالعه اثر تغییر اندازه ذرات پروپنت و رابطه آن با هدایت‌پذیری شکاف، پارامتر متغیر، اندازه‌ی سرند پروپنت بوده و با تهیه پروپنت در سه اندازه‌ی سرند (مش) ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰، ۳۰/۵۰ از نمونه ماسه سیلیس فیروزکوه و انجام آزمایش‌های تعیین هدایت‌پذیری اثر تغییر اندازه‌ی دانه‌های پروپنت بر روی رفتار هدایت‌پذیری شکاف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد مقادیر هدایت‌پذیری برای پروپنت با اندازه ذرات بزرگ‌تر در تنش‌های اعمالی کم‌تر، بیش تر است. نکته حائز اهمیت این است که علی‌رغم بیش‌تر بودن مقادیر هدایت‌پذیری لایه پروپنت با ذرات بزرگ‌تر، با افزایش تنش، مقادیر هدایت‌پذیری با سرعت بیشتری روند کاهشی را طی می‌کنند، چراکه با توجه به بزرگ‌تر بودن ذرات پروپنت تعداد کمتری از پروپنت در یک جرم ثابت درون شکاف در هر مرحله آزمایش قرار گرفته، بنابراین نقاط تماس بین هر ذره پروپنت با ذره مجاور کاهش‌یافته و توزیع تنش بین ذرات کمتری انجام شده و هر ذره پروپنت تنش بیشتری را تحمل می‌کند. در این شرایط درصد خردشدگی ذرات پروپنت افزایش‌یافته و در نهایت باعث کاهش ظرفیت جریان و کاهش سریع‌تر مقادیر هدایت‌پذیری شکاف در تنش‌های بیشتر می‌شود. از مقایسه پروپنت ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰ و ۳۰/۵۰ نتیجه شد، در محدوده ابتدایی تنش‌های بستن شکاف تا ۴۳۵۱ پام به ترتیب پروپنت ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰ و پروپنت ۳۰/۵۰ عملکرد بهتری را از خود نشان دادند، در حالی که با افزایش تنش در محدوده ۵۸۰۲ تا ۷۲۵۱ پام، پروپنت ۱۶/۳۰ مقدار ۸۰ درصد، پروپنت ۲۰/۴۰ مقدار ۶۹/۹۹ درصد و پروپنت ۳۰/۵۰ مقدار ۲۰ درصد از مقدار هدایت‌پذیری خود را از دست داده و پروپنت ۳۰/۵۰ پایداری بهتری در حفظ مقادیر هدایت‌پذیری از خود نشان داد. از نحوه کاهش مقادیر هدایت‌پذیری پروپنت ۳۰/۵۰ در محدوده تنش ۵۸۰۲ تا ۷۲۵۱ پام نتیجه شد، علی‌رغم بیش‌تر بودن مقادیر قابلیت هدایت‌پذیری پروپنت با ذرات بزرگ‌تر در تنش‌های کم‌تر، با افزایش تنش بستن شکاف، لایه پروپنت با اندازه ذرات کوچک‌تر عملکرد بهتری در حفظ مقادیر هدایت‌پذیری از خود نشان داده و برای تنش‌های در محدوده ۵۰۰۰ الی ۸۰۰۰ پام بکارگیری پروپنت با ذرات ریزتر پایداری بهتری را در مقادیر هدایت‌پذیری شکاف

نتیجه می‌دهد. شکل (۱۰) رابطه بین تغییرات اندازه ذرات پروپنت با قابلیت هدایت‌پذیری شکاف و شکل (۱۱) مقایسه درصد کاهش هدایت‌پذیری برای سه ماسه فیروزکوه با اندازه سرند ۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰، ۳۰/۵۰ را نشان می‌دهد.



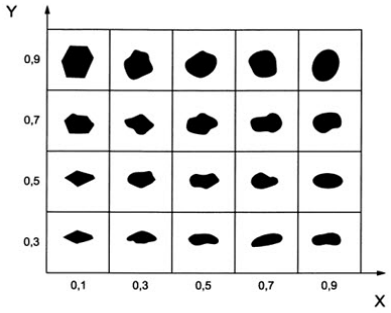
شکل ۱۱. رابطه اندازه ذرات پروپنت با هدایت‌پذیری شکاف



شکل ۱۲. مقایسه درصد کاهش هدایت‌پذیری پروپنت برای ماسه فیروزکوه با سه سرند متفاوت

۳،۴. بررسی و مقایسه هدایت‌پذیری ماسه‌های فیروزکوه و همدان

برای مطالعه و بررسی ماسه‌های مناطق مختلف ایران جهت بکارگیری درعملیات شکاف به‌عنوان ماده بازنگهدارنده (پروپنت) دو ماسه سیلیس همدان و فیروزکوه از معادن مربوطه تهیه شد. هر دو ماسه در اندازه سرند ۲۰/۴۰ در شرایط یکسان مورد مطالعه قرار گرفتند. میزان پارامتر کرویت و گردشدگی طبق روش پیشنهادی *krumbien and loss* برای هردو ماسه محاسبه شد. در این روش با استفاده از چارت پیشنهادی میزان کرویت و گردشدگی دانه‌های هر ماسه قابل محاسبه است، به‌طوری که با تعیین میزان گردشدگی از محور افقی (محورx) و میزان کرویت از محور عمودی (محور y)، با محاسبه میانگین حسابی، مقادیر کرویت و گردشدگی برای هر نمونه ماسه قابل تعیین است (شکل۸).



شکل ۱۳. منحنی krumbien & loss (۱۹۵۱) [۱۲]

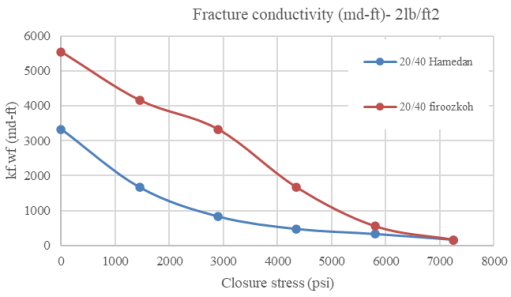
بر اساس پیشنهاد سازمان جهانی استاندارد، مقدار مطلوب کرویت و گردشدگی برای پروپنت‌های طبیعی برابر ۶ یا مقادیر بالاتر است. به همین منظور جهت تعیین کرویت و گردشدگی ماسه‌های همدان و فیروزکوه، از هر نمونه ابتدا به‌طور تصادفی ماسه به جرم ۵ گرم تهیه شد، سپس دانه‌ها در یک زمینه با رنگ مناسب جهت تشخیص هندسه دانه‌های ماسه قرار گرفته و با بزرگ نمایی حدود ۴ برابر تصویربرداری شدند. به صورت تصادفی ۱۰ دانه از تصویر انتخاب شده و مقادیر گردشدگی و کرویت برای هر دانه تعیین شد. مقدار کرویت برای نمونه ماسه فیروزکوه مقدار مطلوب ۷ و برای ماسه همدان مقدار ۶ تعیین شد. از لحاظ ساختار و هندسه، ماسه همدان کرویت کمتری نسبت به ماسه فیروزکوه داشت. در جدول (۲) مقادیر کرویت و گردشدگی هر دو نمونه ماسه سیلیس همدان و فیروزکوه ۲۰/۴۰ را ذکر شده است. با توجه به مقادیر جدول هر دو نمونه کیفیت مناسبی جهت بکارگیری در عملیات شکاف هیدرولیکی و قابلیت معرفی به‌عنوان پرونت طبیعی را دارند.

جدول ۲. مقادیر کرویت و گردشدگی نمونه ماسه‌های فیروزکوه و همدان

نمونه ماسه	کرویت	گردشدگی
فیروزکوه ۲۰/۴۰	۷	۶/۲
همدان ۲۰/۴۰	۶	۶

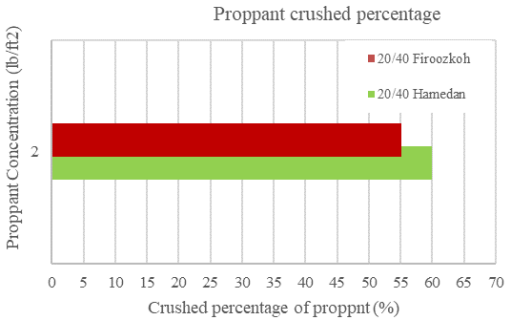
نتایج هر دو آزمایش نشان داد نمونه ماسه فیروزکوه مقادیر هدایت‌پذیری بیشتری نسبت به ماسه همدان دارد. علت این امر ناشی از کرویت و گردشدگی بهتر ماسه فیروزکوه نسبت

به ماسه همدان است. کرویت کمتر و لبه دار بودن دانه‌های ماسه همدان سبب می‌شود که در اثر قرارگیری ذرات ماسه در کنار هم، لایه پروپنت در شرایط اعمال تنش‌های بستن شکاف متراکم و فشرده شده و در اثر خردشدگی لبه‌های تیزتر دانه‌های ماسه، لایه پروپنت تخلخل کمتری نسبت به لایه پروپنت با دانه‌های کروی شکل را نتیجه دهد که در نهایت باعث کاهش ظرفیت جریان و افت مقادیر هدایت‌پذیری شود. علاوه بر کاهش تخلخل، کاهش هدایت‌پذیری می‌تواند ناشی از تغییر آرایش قرارگیری ذرات ماسه، افزایش درصد خردشدگی و مسدودشدن مجراهای حرکت سیال، فرونشست دانه‌های ماسه درون سنگ و ذرات دیگر یا ترکیبی از این عوامل باشد که می‌تواند در کاهش مقادیر هدایت‌پذیری نمونه همدان مؤثر باشد. شکل (۱۳) مقایسه نتایج هدایت‌پذیری نمونه‌های ماسه فیروزکوه و همدان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. مقایسه هدایت‌پذیری ماسه ۲۰/۴۰ فیروزکوه و همدان

پس از انجام آزمایش‌های هدایت‌پذیری شکاف برای نمونه ماسه ۲۰/۴۰ فیروزکوه و ۲۰/۴۰ همدان در غلظت ۲ پوند بر فوت مربع با خروج نمونه‌ها و انجام آنالیز غربالگری برای هر نمونه پروپنت، مقدار جرم خرد شده پروپنت محاسبه و نسبت به جرم اولیه، درصد خردشدگی برای هر دو نمونه تعیین شد. شکل (۱۴) نتایج درصد خردشدگی نمونه ۲۰/۴۰ فیروزکوه و ۲۰/۴۰ همدان را نشان می‌دهد. براساس نمودار مقایسه درصد خردشدگی نتیجه شد، نمونه پروپنت ۲۰/۴۰ همدان در شرایط محدوده تنش بستن شکاف شامل مقادیر صفر تا ۸۰۰۰ پام، ۶۰ درصد و ماسه فیروزکوه ۵۵ درصد خردشدگی را نشان داد. نتایج به‌دست آمده می‌تواند تأییدی بر اختلاف موجود در مقادیر هدایت‌پذیری نمونه ماسه فیروزکوه و همدان باشد. همان‌طور که از مقایسه نتایج مشخص است، باتوجه به درصد خردشدگی بیش‌تر نمونه ۲۰/۴۰ همدان نسبت به ۲۰/۴۰ فیروزکوه، نمونه ۲۰/۴۰ همدان در محدوده تنش‌های مطرح شده، مقادیر هدایت‌پذیری کم‌تری را نتیجه داده و در شرایط مورد نظر عملیاتی بکارگیری نمونه ماسه۲۰/۴۰ فیروزکوه عملکرد بهتری را نتیجه می‌دهد.

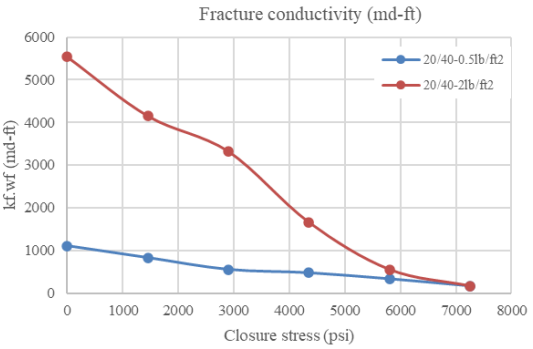


شکل ۱۵. درصد خردشدگی دو نمونه ماسه همدان و فیروزکوه

۴،۴. بررسی رابطه میزان پروپنت در واحد سطح با قابلیت هدایت‌پذیری شکاف

با توجه به استفاده از پروپنت‌ها با غلظت‌های متفاوت درون سیال ایجاد شکاف، می‌توان پارامتر میزان پروپنت در واحد سطح شکاف را به عنوان متغیر آزمایش هدایت‌پذیری شکاف مورد مطالعه قرار داد. به همین جهت، نمونه ماسه سیلیس فیروزکوه ۲۰/۴۰ در دو میزان ۰/۵ و ۲ پوند بر فوت مربع براساس استاندارد انجام آزمایش‌های قابلیت هدایت‌پذیری تهیه شد و درون سلول هدایت‌پذیری قرار گرفت. در نهایت مقادیر هدایت‌پذیری برای هر دو غلظت پروپنت تعیین شد. نتایج نشان دادند با افزایش میزان پروپنت در واحد سطح شکاف، جرم بیشتری از پروپنت درون شکاف قرار گرفته و عرض شکاف افزایش می‌یابد و مقادیر هدایت‌پذیری در میزان بالاتر پروپنت، بیش‌تر است. در غلظت ۰/۵ پوند بر فوت مربع به علت کم‌تر بودن جرم پروپنت درون شکاف و عرض کم‌تر شکاف نسبت به غلظت ۲ پوند بر فوت مربع، تعداد ذرات پروپنت بیشتری در تماس با سطح نمونه‌های سنگ درون سطح شکاف قرار می‌گیرند، در این شرایط نقاط تماس بین ذرات پروپنت و سطح شکاف، کاهش یافته و توزیع تنش بین ذرات نامناسب بوده و هر ذره پروپنت تنش بیشتری را متحمل می‌شود. با توجه به رابطه مستقیم هدایت‌پذیری شکاف با

عرض شکاف، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان پروپنت در واحد سطح شکاف و افزایش عرض شکاف، مقادیر هدایت‌پذیری در غلظت‌های بیشتر پروپنت درون شکاف افزایش می‌یابد. شکل (۱۵) تغییرات غلظت پروپنت ۲۰/۴۰ فیروزکوه درون شکاف و تاثیر آن بر مقادیر هدایت‌پذیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. رابطه غلظت پروپنت با هدایت‌پذیری شکاف

۵. جمع بندی

در این پژوهش به مطالعه رفتار هدایت‌پذیری شکاف تحت تاثیر متغیرهای عملیاتی پروپنت در عملیات شکاف هیدرولیکی در شرایط آزمایشگاهی با انجام آزمایش‌های هدایت‌پذیری با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری پرداخته شد. به همین منظور دو نمونه از ماسه‌های طبیعی ایران جهت امکان‌سنجی و بکارگیری به‌عنوان پروپنت طبیعی در عملیات شکاف مورد مطالعه قرار گرفتند. در سری آزمایش‌های شکاف پروپنتی، اندازه سرند دانه‌های ماسه، پارامتر کرویت و گردشدگی، درصد خردشدگی پروپنت‌های طبیعی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت با انجام مجموعاً ۱۵۰ مرحله آزمایش هدایت‌پذیری شکاف در تنش‌های بستن شکاف در محدوده صفر تا ۸۰۰۰ پام، رفتار هدایت‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- ماسه ۲۰/۴۰ فیروزکوه به دلیل مقادیر بهتر پارامترهای کرویت و گردشدگی نسبت به ماسه ۲۰/۴۰ همدان عملکرد بهتری در محدوده تنش‌های بستن شکاف تا ۷۲۵۱ پام داشت و جهت به‌کارگیری در عملیات شکاف هیدرولیکی مناسب است.
- هردو نمونه ماسه همدان و فیروزکوه به دلیل مقادیر کرویت و گردشدگی مناسب در محدوده پیشنهاد شده توسط سازمان جهانی، جهت استفاده در عملیات شکاف هیدرولیکی مناسب هستند.
- در پروپنت با اندازه سرند ۳۰/۵۰ علی رغم مقادیر کمتر هدایت‌پذیری، درصد کاهش هدایت‌پذیری نسبت به نمونه‌ها با اندازه ذرات بزرگ‌تر کمتر بوده و پایداری بهتری در حفظ مقادیر هدایت‌پذیری را شامل شد.
- در بررسی صورت گرفته بین سه نمونه ماسه سیلیس فیروزکوه با اندازه سرند (مش)۱۶/۳۰، ۲۰/۴۰و ۳۰/۵۰ نتیجه شد، علی رغم مقادیر هدایت‌پذیری بیش‌تر نمونه‌های پروپنت با ذرات بزرگ‌تر، درصد خردشدگی در این نمونه‌ها بیشتر بوده و مقادیر هدایت‌پذیری به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- در مطالعات صورت گرفته در رابطه با تغییرات غلظت پروپنت، نتایج نشان دادند با افزایش میزان پروپنت در واحد سطح شکاف، عرض شکاف افزایش یافته و مقادیر هدایت‌پذیری افزایش می‌یابند. این امر در نتیجه افزایش جرم پروپنت درون شکاف، افزایش نقاط تماس بین ذرات پروپنت و سطوح سنگ، در نتیجه توزیع بهتر تنش بین ذرات پروپنت و کاهش درصد خردشدگی و حفظ مقادیر هدایت‌پذیری است.

۶. سپاس‌گزاری

بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی شائبه و شبانه‌روزی پدر عزیزم، همدلی و همراهی برادرم که همواره بر کوتاهی و درشتی من قلم عفو کشیده و در تمامی مراحل زندگی یار و یاور بی‌چشم‌داشت بوده اند، کمال تقدیر و تشکر را به عمل آورم. جناب آقایان دکتر عامری و دکتر رفیعی، اساتید گرانقدرم، کلمات قادر نیستند وصف کننده مهربانی، تشویق‌ها و زحمات بی دریغ شما بزرگواران باشند، هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی کران الطاف شما را سپاس نتوان بگویم چراکه نگارش این پژوهش بدون یاری آنان ناممکن می‌نمود.

۷. فهرست نمادها

جدول ۱. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
C_f	*md-ft*	هدایت‌پذیری شکاف
k_f	*md*	تراوایی شکاف
w_f	*cm*	عرض شکاف
P_1	*pa*	فشار ورودی سلول
P_2	*pa*	فشار خروجی سلول
M	*(kg/mol)*	جرم مولکولی گاز
q	*(lit/min)*	شدت جریان گاز
A	cm^2	عرض شکاف
h_f	*cm*	ارتفاع شکاف
z	بدون بعد	ضریب تراکم پذیری گاز
R	*(J/kg.mol)*	ثابت جهانی گازها
h_f	*cm*	ارتفاع شکاف
T	*K*	دمای محیط
μ	*pa.sec*	ویسکوزیته گاز
L	*cm*	طول شکاف
ρ	(kg/cm^3)	دانسیته گاز نیتروژن
β	بدون بعد	ضریب اینرسی جریان
T	*K*	دمای محیط
v	*m/sec*	سرعت گاز

۸. پیوست‌ها

الف) معادله اصلاح شده فورشهایمر جهت محاسبه هدایت‌پذیری شکاف هیدرولیکی برای جریان سیال تراکم‌پذیر:

معادله فورشهایمر، فرم اصلاح شده معادله دارسی برای جریان سیال با سرعت بالا در محیط متخلخل با در نظر گرفتن ترم اینرسی جریان بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$-\left(\frac{dp}{dl}\right)=\frac{\mu v}{k}+\beta(\rho v)^2 \qquad (پ-۱)$$

هنگامی که ضریب اینرسی جریان (β) کوچک باشد، معادله فورشهایمر به معادله دارسی تبدیل می‌شود. شار گاز بصورت $\rho v = {}^{W}/_{A}$ تعریف می‌شود. با فرض ثابت بودن سطح مقطع عبوری جریان، سرعت جرمی گاز نیز ثابت است، بنابراین با ضرب چگالی درمعادله (پ-۱)، معادله (پ-۲) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho\left(-\left(\frac{dp}{dl}\right)\right)=\rho\left(\frac{\mu v}{k}\right)+\beta(\rho v)^2 \qquad (پ-۲)$$

با جای‌گذاری شار گاز در معادله (پ-۲)، خواهیم داشت:

$$\rho\left(-\left(\frac{dp}{dl}\right)\right)=\frac{\mu W}{kA}+\beta\left(\frac{W}{A}\right)^2 \qquad (پ-۳)$$

و با اعمال قانون گاز حقیقی $\rho = {}^{PM}/_{zRT}$ در معادله بالا:

$$-\frac{M}{zRT}\int_1^2 PdP=\left[\frac{\mu W}{kA}+\beta\left(\frac{W}{A}\right)^2\right]\int_1^2 dL \qquad (پ-۴)$$

با اعمال انتگرال گیری و جابجایی معادله (پ-۴)، خواهیم داشت:

$$\frac{(P_1^2-P_2^2)}{L}=\frac{2zRT}{M}\left[\frac{\mu W}{kA}+\beta\left(\frac{W}{A}\right)^2\right] \qquad (پ-۵)$$

با جابجایی ρυ با ${}^{W}/_{A}$ و بازنویسی معادله (پ-۵) خواهیم داشت:

$$\frac{(P_1^2-P_2^2)M}{2zRTL}=\frac{\mu\rho v}{k}+\beta(\rho v)^2 \qquad (پ-۶)$$

در نهایت با جای‌گذاری $v = {}^{q}/_{wh}$ در معادله (پ-۳)، معادله اصلاح شده فورشهایمر برای محاسبه هدایت‌پذیری شکاف به دست می‌آید:

$$\frac{(P_1^2-P_2^2)Mh}{2ZRT\mu L\rho q}=\frac{\beta\rho q}{w^2\mu h}+\frac{1}{k_f w_f} \qquad (پ-۷)$$

با مشخص بودن مقادیر خواص گاز نیتروژن و در دست داشتن مقادیر افت فشار و نرخ جریان سیال در راستای شکاف، منحنی خط راست با شیب مثبت براساس معادله خط تحت عنوان منحنی فورشهایمر بدست می‌آید. هدایت پذیری شکاف از عرض از مبداء نمودار و شیب خط اینرسی جریان سیال را توصیف می‌نماید.

ب) اجزای دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری شکاف:

در ادامه به جزییات اجزاء تشکیل دهنده دستگاه اندازه‌گیری هدایت پذیری شکاف در قالب تصویر نمایش داده شده است:

شکل ۱۷. سلول هدایت‌پذیری[۱۲]

شکل ۱۸. نمایی از دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌پذیری[۱۲]

شکل ۱۹. پیستون‌های بارگذاری[۱۲]

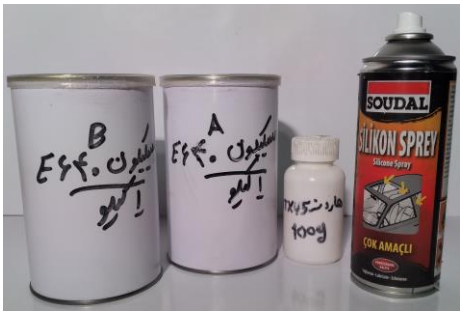
شکل ۲۰. دستگاه جمع‌آوری داده[۱۲]

شکل ۲۱. دستگاه اندازه‌گیری فشار مطلق[۱۲]

شکل ۲۲. دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار[۱۲]

شکل ۲۳. مش فلزی جهت جلوگیری از حرکت دانه‌های پروپنت درون سلول هدایت‌پذیری[۱۲]

شکل ۲۴. دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان گاز نیتروژن[۱۲]



شکل ۲۵. سیلیکون دو جزئی پوشاننده[۱۲]

۹. مراجع

1. Economides, M.J. and K.G. Nolte, *Reservoir stimulation*. Vol. 2. 1989: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.

2. Elsarawy, A.M. and H.A. Nasr-El-Din, *A new method to measure propped fracture width and proppant porosity in shale fractures*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019. **181**: p. 106162.

3. Hafidh, H., *OPEC Annual Statistical Bulletin 2016*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, 2016.

4. Hill, A.D., et al. *Small-scale fracture conductivity created by modern acid fracture fluids*. in *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. 2007. OnePetro.

5. Simo, H., M. Pournik, and C. Sondergeld. *Proppant Crush Test: A New Approach*. in *SPE Production and Operations Symposium*. 2013. OnePetro.

6. Department, A.P.I.P., *Recommended practices for evaluating short term proppant pack conductivity*. Vol. 61. 1989: American Petroleum Institute.

7. Kothamasu, R., Y.K. Choudhary, and M.K. Kurubaran. *Comparative study of different sand samples and potential for hydraulic-fracturing applications*. in *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. 2012. OnePetro.

8. Zhao, L., et al., *Experimental Study on a new type of self-propping fracturing technology*. Energy, 2019. **183**: p. 249-261.

9. Beg, M.S., et al., *A systematic experimental study of acid fracture conductivity*. SPE Production & Facilities, 1998. **13**(04): p. 267-271.

10. Walsh, J. *Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability*. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 198 .۱Elsevier.

۱۱. حاجی محمد حسن عرب، محمد حسین؛ اسکندری راد، حسین. (۱۴۰۱). مطالعه تجربی هدایت‌پذیری شکاف هیدرولیکی با بکارگیری پروپنت‌های طبیعی در یکی از مخازن ایران. چهارمین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت نوآوری و فناوری، تهران (صص.۱-۱۶). سیویلیکا: https://civilica.com/doc/1618293.

۱۲. حاجی محمد حسن عرب، محمد حسین. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی قابلیت هدایت‌پذیری شکاف هیدرولیکی در حضور پروپنت و اسید در یکی از مخازن ایران. پایان نامه منتشر شده کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده نفت، مهندسی نفت-بهره برداری.