



بررسی آزمایشگاهی ماسه‌های کوارتزی ایران به منظور تولید پروپانت مورد استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی

محمدحسین وحیدی شهیر^۱؛ سعید نوروزی اپوروری^{۲*}؛ حسین جلالی فر^۳

۱. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی نفت؛ دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. استاد؛ دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۱/۱۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.63113

چکیده

واژگان کلیدی

شکست هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی، ماسه کوارتزی، پروپانت، سلول هدایت‌پذیری

یکی از مهم‌ترین پارامترها در موفقیت عملیات شکست هیدرولیکی، انتخاب پروپانت مناسب می‌باشد. در این پژوهش عملکرد پروپانت‌ها با توجه به پیشنهادها ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد و انستیتو نفت آمریکا و با استفاده از آزمایش‌های دانه‌بندی، مقاومت خردایشی، کرویت و گردشگری و دانسیته حجمی ارزیابی شده است. ده معدن ماسه کوارتزی در نقاط مختلف ایران به عنوان معادن هدف این مطالعه در نظر گرفته شد. ز نمونه‌های اخذ شده، تعداد چهار نمونه ماسه کوارتزی از سه معدن کشور به دلیل دارا بودن ویژگی‌های اولیه پروپانت طبیعی برای مطالعات آزمایشگاهی نهایی انتخاب شدند. پس از آزمایش‌های انجام شده مشخص شد از میان چهار نمونه، ماسه ۲۰/۴۰ کرمان پتانسیل مناسب برای استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی تا فشار تراکمی 3000 Psi و نمونه ۱۶/۳۰ کرمان قابلیت استفاده به عنوان پروپانت تا فشار تراکمی 4000 Psi را دارند. نمونه ملایر قابل استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی نبوده و نمونه فیروزکوه فقط در چاه‌هایی با فشار تراکمی سازند کم‌تر از 1000 Psi قابل استفاده است. در نهایت هدایت هیدرولیکی و تراوایی نمونه‌ها در فشارهای تراکمی مختلف، به‌وسیله سلول هدایت‌پذیری ساخته شده در این پژوهش اندازه‌گیری و تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های ابتدایی حاصل شد.

۱. پیش‌گفتار

پروپانت‌های متفاوتی نظیر ماسه‌های کوارتزی و یا پروپانت‌های سرامیکی با خصوصیات تراکمی گوناگون استفاده می‌شود. به دلیل فراوانی و ارزان بودن ماسه‌های کوارتزی، این نوع پروپانت کاربرد بسیار گسترده‌ای در عملیات شکست هیدرولیکی دارد. بررسی ماسه‌ها برای امکان‌سنجی استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی، عموماً با استفاده از روش‌های ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد و انستیتو نفت آمریکا انجام می‌شود. این نهادها معیارهایی برای ویژگی‌های مختلفی مانند دانه‌بندی، گردشگری، کرویت و مقاومت خردایشی ارائه کرده‌اند که بررسی قابلیت ماسه‌ها به‌عنوان پروپانت نیز با سنجش همین پارامترها انجام می‌شود. پیش-بینی توانایی تأمین و نگهداری هدایت هیدرولیکی مطلوب

شکست هیدرولیکی یک روش معمول برای افزایش تولید از مخازنی است که کم‌تراوا بوده و یا به علت آسیب تولید کمی دارند (Aslam, 2011). در خلال فرآیند شکست هیدرولیکی برای ایجاد شکاف در سازند، ابتدا سیال با فشار بالا (بالا‌تر از فشار شکست سازند) به سازند تزریق می‌شود. پس از ایجاد شکست با ادامه تزریق سیال، شکاف ایجاد شده در سازند گسترش یافته و در نهایت با افزودن موادی به نام پروپانت (Proppant)، شکاف ایجاد شده باز نگه‌داشته می‌شود. قرار دادن نوع و میزان مناسب از پروپانت درون شکاف، یکی از ارکان موفقیت عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشد (Masoomi et al., 2015). با توجه به شرایط مختلف، از

سلول ساخته شده بر مبنای سلول کوک استفاده می‌شود که در آن پروپانت‌ها به طور دستی بین دو پیستون فلزی قرار داده شده و با تزریق سیال و اندازه‌گیری فشار در ابتدا و انتهای نمونه، تراوایی پک پروپانت اندازه‌گیری می‌شود (*API, RP-* 1989, 61). این روش بعد از چند سال توسط سازمان جهانی استاندارد با تجدید نظر مختصر به عنوان روش استاندارد تست تراوایی بلند مدت^۳ لایه پروپانت ارائه شد (*ISO 13503-5*, 2006).

پانگتونیا^۴ در سال ۲۰۰۷ شیوه جدیدی برای اندازه‌گیری دینامیک هدایت هیدرولیکی پک پروپانت ارائه کرد. هدف از اندازه‌گیری دینامیک هدایت هیدرولیکی، شبیه‌سازی تزریق پروپانت در شکاف و بررسی تأثیر سیال شکست هیدرولیکی و ژل پروپانت بر هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت می‌باشد (*Pongthunya, 2010*). رومرو لوگو^۵ در سال ۲۰۱۲ به این نتیجه رسید که هدایت هیدرولیک به دست آمده برای شکاف پر شده با پروپانت در حالت دینامیک مقادیر کم‌تری نسبت به روش‌های معمول دارد (*Lugo, 2012*).

راینیک^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۰، یک روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری تراوایی شکاف پر شده با پروپانت ارائه کردند. این محققین برای اندازه‌گیری تراوایی شکاف پر شده با پروپانت دو سلول مجزا ارائه کردند که هر دو سلول دارای سیلندری با سطح مقطع دایره‌ای می‌باشند. در این روش پیستون‌ها و نمونه سنگ‌ها به صورت استوانه با سطح مقطع دایره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک سلول مجهز به حسگرهای پیزو الکتریک برای تشخیص میکروشکاف‌هایی است که در محل تماس نمونه با پروپانت روی نمونه سنگ ایجاد می‌شود. سلول دیگر توانایی اندازه‌گیری تراوایی در دو جهت موازی و عمود بر جریان را دارا هست (*Reinicke et al., 2010*).

پروپانت در شرایط مخزن (فشار تراکمی، خوردگی سیالات مخزن، برهم کنش سنگ - پروپانت و دمای بالا) یکی از پارامترهای مهم در عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشد. برای آزمایش هدایت هیدرولیکی، پک پروپانت به صورت دستی بین دو نمونه (فلز یا سنگ مشخص) قرار داده می‌شود که این نمونه‌ها خود درون یک سیلندر عایق‌بندی شده قرار دارد. سپس با استفاده از تزریق سیال با دبی ثابت به درون شکاف پر شده با پروپانت و یا پک پروپانت، همراه با ثبت فشار در ابتدا و انتهای نمونه، هدایت هیدرولیکی پروپانت در شرایط ایجاد شده با استفاده از معادلات جریان در محیط متخلخل محاسبه می‌شود (*Cooke, 1973*).

مروری بر تحقیقات گذشته در سه قسمت استانداردهای موجود برای بررسی امکان‌سنجی استفاده از ماسه‌ها در عملیات شکست هیدرولیکی، دستگاه‌های طراحی شده برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پک پروپانت و امکان‌سنجی‌های انجام شده در مورد ماسه‌های کوارتزی دست‌بندی شده است.

کوک^۱ در سال ۱۹۷۳ دو سلول جداگانه برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت و تراوایی پک پروپانت ارائه کرد. این محقق اندازه‌گیری تراوایی پک پروپانت را بدون استفاده از نمونه سنگ (لایه پروپانت بین دو سطح فلزی) و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت را با استفاده از دو نوع ماسه سنگ مشخص (پروپانت بین دو نمونه سنگ) انجام داد (*Cooke, 1973*). در سال‌های بعد روش‌های استاندارد اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت، به وسیله سلول‌های ساخته شده توسط این محقق ارائه شد.

در سال ۱۹۸۹، یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی کوتاه مدت^۲ پک پروپانت، توسط انستیتو نفت آمریکا ارائه شد که این روش در سند *API-61(1989)* ثبت شده است. در این روش برای اندازه‌گیری تراوایی، از

^۱ cooke

^۲ Short-Term

^۳ Long-term

^۴ Pongthunya

^۵ Romero Lugo

^۶ Reinicke

بالتر، با ایجاد ذرات ریز^{۱۱} حاصل از خردایش نمونه، توانایی خود را در تحمل فشارهای وارده از دیواره شکاف از دست می‌دهند (Saaid et al., 2011).

کوداماسو^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۲، بررسی مقایسه‌ای بین ۹ نمونه از ماسه‌های طبیعی دو کشور هند و عربستان (هشت نمونه از ماسه‌های هند و یک نمونه از ماسه‌های عربستان سعودی) با پروپانت ماسه‌ای پر کاربرد اوتواوا انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که طبق آزمایش‌های ارائه شده توسط نهادهای ISO^{۱۳} و API^{۱۴} دو نمونه از ۹ نمونه بررسی شده، در مقایسه با پروپانت ماسه‌ای اوتواوا، تا فشار 4000 Psi نتایج مشابهی در هدایت هیدرولیکی^{۱۵} و تولید ذرات ریز داشته و امکان استفاده از این دو نوع ماسه تا فشار 4000 Psi به‌عنوان پروپانت وجود دارد (Kothamasu et al., 2012).

فرید^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی آزمایشگاهی ماسه‌های سودان برای استفاده در شکست هیدرولیکی پرداختند. آن‌ها سه نمونه ماسه از نواحی مختلف سودان را مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که این سه نمونه قابلیت استفاده به‌عنوان پروپانت را تا فشار 3000 Psi دارا هستند. آن‌ها آزمایش روی نمونه‌ها را مطابق با روش استاندارد API RP 19 C^{۱۷} انجام دادند (Faried et al., 2016).

اگرچه عملیات شکست هیدرولیکی در ایران به صورت محدود اجرا شده و یا در حال اجرا می‌باشد، اما دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت به‌عنوان یک آزمایش مهم برای پیش‌بینی عملکرد پروپانت‌ها در عملیات شکست هیدرولیکی در ایران موجود نبوده و این آزمایش توسط شرکت‌های خارجی و با صرف هزینه‌های زیاد

لاتینسکی^{۱۸} در سال ۲۰۱۴ یک روش دیگر برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی و تراوایی پروپانت ارائه کرد. در این روش برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی و تراوایی، از شکاف ایجاد شده در سنگ استفاده شده است. در این روش برهم‌کنش سطح شکاف - پروپانت و همچنین تأثیر دیواره شکاف در هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت در نظر گرفته می‌شود (Lutynski, 2015).

شخاوت^{۱۹} و خانیندرا پاداک^{۲۰} در سال ۲۰۱۶ یک دستگاه متفاوت برای آزمایش هدایت هیدرولیکی پروپانت ارائه کردند که توانایی اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی تا فشار $35/5\text{ MPa}$ را دارد. بدنه سلول ساخته شده فلزی بوده و سطح مقطع دایره‌ای شکل دارد. فضای درونی این سیلندر توسط دو قطعه تفلونی به یک سطح مقطع طولی برای قرار دادن نمونه سنگ تبدیل شده است. پیستون نیز طوری طراحی شده که بتواند دو نمونه سنگ مستطیلی مورد آزمایش را احاطه کند. در این روش یک پروپانت بین دو نمونه ماسه‌سنگ با اندازه $80\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ قرار داده می‌شود. از ویژگی‌های بارز این روش، اندازه‌گیری مداوم تغییرات تراوایی، هدایت هیدرولیکی و بازشدگی شکاف می‌باشد (Shekhawat et al., 2016).

محد سعید^{۲۱} و همکاران در سال ۲۰۱۱ مطالعاتی روی امکان‌سنجی استفاده از ماسه‌های کشور مالزی به‌عنوان پروپانت انجام دادند. آن‌ها سه نوع ماسه را بر مبنای روش آزمایشگاهی ارائه شده توسط انستیتو نفت آمریکا (API RP 56) بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که دو نوع از این ماسه‌ها قابلیت استفاده به‌عنوان پروپانت را تا فشارهای تراکمی 1000 Psi را دارا هستند. هر دو این نمونه‌ها درصد کوارتز بالای ۹۸٪ داشته‌اند. دو نمونه ذکر شده در فشارهای

^{۱۸} Lutynski

^{۱۹} Shekhawat

^{۲۰} Khanindra Pathak

^{۲۱} Mohd Saaid

^{۱۱} Fines

^{۱۲} Kothamasu

^{۱۳} International Organization for Standardization

^{۱۴} American Petroleum Institute

^{۱۵} Conductivity

^{۱۶} Faried

۲۰/۴۰ سه نمونه از سه معدن ملایر، فیروزکوه و کرمان، همچنین به‌وسیله دسته‌سرنده با اندازه مش ۱۶/۳۰ نمونه دوم از معدن ماسه کرمان، محدوده اندازه مشخص از نمونه‌ها جدا شده و در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲.۲ دانه‌بندی

اندازه و نحوه‌ی توزیع اندازه دانه‌ها در میزان هدایت هیدرولیکی و همچنین مقاومت خردایشی پک پروپانت مؤثر بوده و با افزایش اندازه دانه‌ها، هدایت هیدرولیکی پروپانت افزایش پیدا می‌کند (Schulz, 2104; Kamenov, 2013). در این پژوهش، دانه‌بندی با یک دسته ۶ سرنده برای ماسه‌های ۲۰/۴۰ و یک دسته ۵ سرنده برای نمونه ۱۶/۳۰ تعیین شده است. چینه‌سرنده‌ها به ترتیب اندازه بازشدگی سرنده (بزرگ‌ترین اندازه در بالاترین قسمت و کوچک‌ترین بازشدگی در پایین‌ترین قسمت) انجام شده است. در هر مرحله حدود ۲۰۰ گرم از نمونه درون سرنده قرار داده شده و بعد از قرار دادن در لرزاننده^{۱۷} به مدت ۱۰ دقیقه، جرم باقی‌مانده در هر سرنده اندازه‌گیری شده است. درصد تجمعی ذرات بزرگ‌تر از هر سرنده محاسبه شده و نمودار آن به صورت نیمه‌لگاریتمی رسم شده است. سرنده‌های استفاده شده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. سرنده‌های استفاده شده در آنالیز دانه‌بندی

مش سرنده	اندازه چشمه سرنده (μm)	سایز ۲۰/۴۰	سایز ۱۶/۳۰
۱۴	۱۷۰۰	*	*
۱۶	۱۱۸۰	*	*
۲۰	۸۵۰	*	*
۳۰	۶۰۰	*	*
۳۵	۵۰۰	*	*
۴۰	۴۲۵	*	*
۶۰	۳۰۰	*	*

۲.۳ کرویت و گردشگری

هدف از تعیین این دو پارامتر توصیف شکل و ظاهر دانه‌ها می‌باشد. معمول‌ترین روش برای توصیف میزان کرویت و

صورت می‌پذیرد. از طرفی با وجود منابع ماسه کوارتزی متعدد در ایران، تاکنون مطالعه‌ای جهت سنجش پتانسیل ماسه‌های طبیعی موجود در ایران به عنوان پروپانت مورد استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش ساخت دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیک شکاف پر شده با پروپانت و همچنین بررسی ماسه‌های کوارتزی ایران برای استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشد.

۲. مواد و روش تحقیق

سنجش کیفیت ماسه‌های کوارتزی برای استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی عموماً بر اساس آزمایش‌های ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد و انستیتو نفت آمریکا انجام می‌شود. در این مطالعه بر اساس پیشنهادهای ارائه شده توسط این دو موسسه، آزمایش‌های دانسیته، دانه‌بندی، کرویت، گردشگری و مقاومت خردایشی انجام شده است. پس از امکان‌سنجی ماسه‌ها برای استفاده در شکست هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی نمونه‌ها در فشارهای مختلف تعیین شده است.

۲.۱ تهیه نمونه ماسه کوارتزی

برای بررسی ماسه‌های کوارتزی ایران به‌عنوان پروپانت مورد استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی نمونه‌های ۱۰ معدن مختلف مورد بررسی کلی قرار گرفت. از این تعداد به جز سه معدن، بقیه نمونه‌ها به علت خلوص پایین و یا دانه‌های گوشه تیز (ویژگی‌های اولیه پروپانت طبیعی) حذف شده و در نهایت چهار نمونه ماسه کوارتزی از سه معدن کشور برای مطالعه آزمایشگاهی انتخاب شد.

نمونه اول از معادن ماسه کوارتزی شهرستان ملایر در استان همدان با درصد خلوص کوارتز حدود ۹۵٪، نمونه دوم از معادن ماسه کوارتزی شهرستان فیروزکوه در استان تهران با درصد خلوص کوارتز ۹۷٪ و دو نمونه دیگر از معدن ماسه کوارتزی شهرستان شهربابک در استان کرمان با درصد خلوص حدود ۹۴٪ تهیه شده است. از هر معدن حدود ۲۰ kg نمونه اولیه به صورت تصادفی تهیه شده است. به علت نامناسب بودن دانه‌بندی نمونه‌های اولیه، توسط دسته‌سرنده با اندازه مش

^{۱۷} Shaker

سازمان جهانی استاندارد انتخاب شده است. برای آزمایش مقاومت خردایشی، حدود $44/7_{gr}$ ماسه (مقدار پیشنهاد شده توسط سازمان جهانی استاندارد) را درون سلول قرار داده و بعد از جایگذاری پیستون در سلول، بدون اعمال فشار تراکمی 180 درجه پیستون گردانده شده تا سطح تماس پیستون با ماسه هموار شود. در مرحله بعد فشار تراکمی توسط جک بارگذاری اعمال شده است. بعد از اعمال فشار و نگهداری آن به مدت دو دقیقه، پروپانت درون سلول را در سرنده ریخته و آنالیز سرنده دوباره انجام شده است.

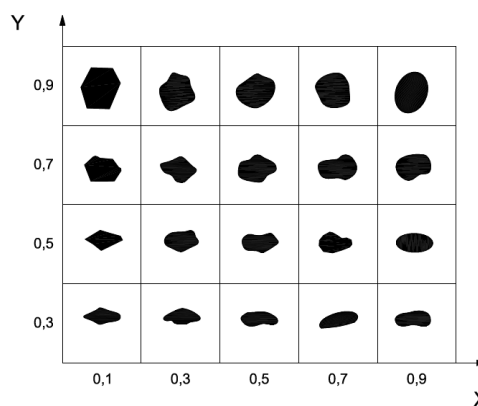
جرم ذرات ریزی که از آخرین سرنده عبور کرده و درون تشتک کف دسته سرنده قرار می‌گیرند (برای ماسه $20/40$ ذرات کوچک‌تر از سرنده 40 مش و برای ماسه‌های $16/30$ ذرات کوچک‌تر از سرنده 30 مش) اندازه‌گیری شده و درصد جرم این مواد ریز نسبت به کل جرم آزمایش شده محاسبه شده است. مطابق با استاندارد ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد مقدار تنش لازم برای تولید 10% درصد از ذرات ریز، به‌عنوان مقاومت فشاری پروپانت گزارش شده و دسته‌بندی کیفیت ماسه‌ها بر اساس جدول ۲ تعیین شده است (ISO 13503-2, 2006). آزمایش وابسته به جرم پروپانت درون سلول می‌باشد و با افزایش میزان پروپانت مقاومت خردایشی به دست آمده افزایش می‌یابد (Sondergeld et al., 2013).

جدول ۲. دسته‌بندی ماسه‌ها بر اساس مقاومت خردایشی 10% (ISO 13503-2, 2006).

دسته‌بندی مقاومت خردایشی	فشار مورد نیاز برای ایجاد 10%	
	MPa	Psi
۱ K	۶٫۹	۱۰۰۰
۲ K	۱۳٫۸	۲۰۰۰
۳ K	۲۰٫۷	۳۰۰۰
۴ K	۲۷٫۶	۴۰۰۰
۵ K	۳۴٫۵	۵۰۰۰
۶ K	۴۱٫۴	۶۰۰۰

برای این آزمایش جرم در نظر گرفته شده برای هر آزمایش،

گردشده‌گی استفاده از چارت *Krumbien/Sloss* نشان داده شده در شکل ۱ است. محور افقی میزان گردشده‌گی و محور عمودی میزان کرویت را نشان می‌دهد.



شکل ۱. چارت تعیین کرویت و گردشده‌گی (API-RP 56 (1995).

برای تعیین کرویت و گردشده‌گی، ابتدا نمونه‌ای تصادفی با جرم حدود 5 گرم انتخاب شده است. سپس دانه‌ها در یک زمینه با رنگ مناسب پخش شده و با بزرگ‌نمایی حدود 15 برابر، تصویربرداری شده است. به صورت تصادفی 20 دانه از هر تصویر انتخاب شده و کرویت و گردشده‌گی آن‌ها با استفاده از چارت نشان داده شده در شکل ۱ تعیین شده است. در نهایت میانگین حسابی کرویت و گردشده‌گی نمونه محاسبه شده است. برای پروپانت‌های طبیعی مقدار قابل قبول برای هر دو پارامتر کرویت و گردشده‌گی، مقدار 6 ، و یا بالاتر می‌باشد (ISO 13503-2, 2006).

۲.۴ دانسیته حجمی

دانسیته حجمی یک پارامتر مهم برای به دست آوردن جرم لازم پروپانت برای یک حجم مشخص از شکاف می‌باشد. برای تعیین دانسیته حجمی می‌توان جرم یک توده پروپانت را تقسیم بر حجم آن نموده و دانسیته حجمی را به دست آورد. با توجه به تغییر دانسیته حجمی نمونه‌ها با افزایش فشار، دانسیته حجمی نمونه‌ها در فشارهای مختلف محاسبه شده است.

۲.۵ مقاومت خردایشی

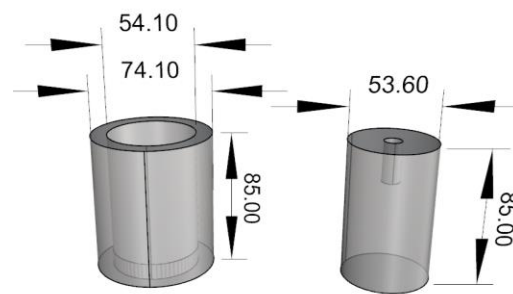
شیوه انجام این آزمایش بر اساس روش ارائه شده توسط

استفاده، مقادیر مطلوبی خواهند بود. اندازه‌گیری تغییرات بازشدگی به وسیله کولیس و با دقت 0.05mm انجام شده است. در این پژوهش به علت دسترسی آسان و جلوگیری از مشکلات ایمنی و بهداشتی، از آب به عنوان سیال تزریقی استفاده شده است. ویسکوزیته آب در دما و فشارهای مختلف در منابع موجود می‌باشد (Korson et al., 1969). پمپی که به منظور تزریق سیال استفاده شده، یک دستگاه پمپ سرنگی فیوژن وان^{۱۸} بوده که با توجه به سرنگ 60 میلی‌لیتر استفاده شده، این پمپ توان ایجاد دبی‌های 1 تا 60 میلی‌لیتر بر دقیقه و فشار 100 میلی‌بار (محدوده مجاز فشار برای فشارسنج‌ها) را دارد.

مقدار و ضخامت پروپانت درون سلول در میزان هدایت هیدرولیکی مؤثر است (Schulz, 2014). در این پژوهش مطابق با پیشنهاد سازمان جهانی استاندارد، دانسیته سطحی 2 پوند در هر فوت مربع استفاده شده است. طراحی و ساخت سلول هدایت‌پذیری بر اساس ایجاد جریان خطی درون شکاف انجام شده است. جنس بدنه سلول، استیل ضد زنگ انتخاب شده است. در طرفین سلول دو مجرا برای ایجاد جریان (مجرای ورودی و خروجی) و در قسمت جلوی بدنه سلول، دو مجرا برای نصب فشارسنج‌ها تعبیه شده است. به‌منظور ایجاد جریان خطی، درون سلول مجرای طولی به صورت یک مستطیل با اندازه $40\text{mm} \times 143\text{mm}$ که در طرفین آن دو نیم دایره به شعاع 20mm قرار گرفته، طراحی شده است. برای اعمال تنش روی نمونه و پروپانت، دو پیستون فولادی یکسان، با ابعادی تقریباً هم‌اندازه با دهانه سیلندر ساخته شده است. هر پیستون دارای یک شیار برای قرار دادن حلقه آب‌بندی^{۱۹} لاستیکی است. از حلقه آب‌بندی به‌منظور جلوگیری از نشت سیال تزریقی از سطح تماس پیستون‌ها و دیواره سلول استفاده شده است.

برای محافظت از پیستون‌ها در برابر آسیب وارده (سایش، پارگی و یا سوراخ شدن حلقه آب‌بندی) به‌وسیله پروپانت، از دو صفحه استیل ضد زنگ با ابعاد مشابه با پیستون و ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شده است. در صورت نیاز به آزمایش هدایت هیدرولیکی شکاف پر شده با پروپانت، می‌توان

برابر با مقدار پیشنهاد شده توسط سازمان جهانی استاندارد، 4 پوند در هر فوت مربع می‌باشد. سلول استفاده شده در این مطالعه با تغییرات جزئی در اندازه و جنس فولاد، بر مبنای سلول ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد ساخته شده است. ابعاد و شماتیک سلول استفاده شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. ابعاد سیلندر و پیستون سلول مقاومت فشاری (ابعاد برحسب میلی‌متر)

۲.۶ هدایت هیدرولیکی پک پروپانت

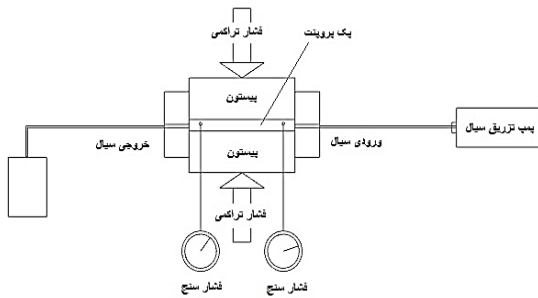
برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پک پروپانت، از سلول هدایت‌پذیری هیدرولیکی ساخته شده در این پروژه استفاده شده است. سیستم اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی شامل بخش‌های سیستم بارگذاری، ابزار سنجش فشار تراکمی و فشار سیال، ابزار سنجش بازشدگی شکاف، سیال تزریقی، پمپ سیال و سلول هدایت‌پذیری می‌باشد. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی کوتاه مدت، در دمای اتاق و پس از قرار گرفتن تحت بارگذاری به مدت حدود 15 دقیقه، اندازه‌گیری شده است.

بارگذاری به‌صورت پیوسته و با نرخ 0.5 مگاپاسکال در هر دقیقه انجام شده است. فشار تراکمی توسط فشارسنج موجود روی جک بارگذاری با دقت 0.1 کیلو نیوتن قرئت شده است. برای سنجش فشار سیال در ابتدا و انتهای مسیر جریان درون سلول، از دو فشارسنج دیافراگمی با قابلیت اندازه‌گیری فشار در بازه $0\text{mbar} - 100\text{mbar}$ و دقت 2mbar استفاده شده است. این بازه‌ها با توجه به دقت و دبی تزریقی پمپ مورد

^{۱۸} Fusion One

^{۱۹} O ring

فشار از طریق فشارسنج‌ها قرائت می‌شود. ویسکوزیته آب در دماهای مختلف در مرجع (Korson et al., 1969) موجود است. با توجه به دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد در زمان آزمایش، ویسکوزیته آب حدود ۰/۹۵ سانتی‌پویز می‌باشد. شکل ۴ نمای کلی سیستم اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

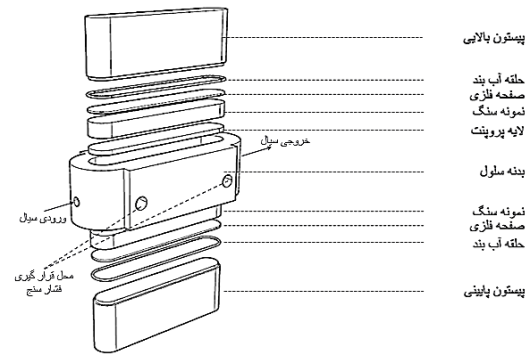


شکل ۴. شمای کلی از سیستم اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پیک پروپانت

استفاده از صفحه فلزی به جای نمونه سنگ، به علت کم‌تر بودن زبری فلز نسبت به سنگ، باعث افزایش هدایت هیدرولیکی به دست آمده برای پروپانت می‌شود (Much et al., 1987). در آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه به علت قرار دادن چگالی سطحی دو پوند در هر فوت مربع، پروپانت‌ها در حالت چند لایه قرار دارند که در این حالت عامل اصلی در کنترل هدایت هیدرولیک شکاف، خواص پروپانت بوده و تأثیر برهم کنش دیواره شکاف و پروپانت کم می‌باشد (Jansen et al., 2014; Pena, 2015; Wen, 2007).

در صورت نیاز به محاسبه تراوایی باید ضخامت لایه‌ی پروپانت در فشار مورد نظر معلوم باشد. به همین منظور قبل از انجام آزمایش هدایت هیدرولیکی، تمامی اجزای نشان داده شده در شکل ۳ به جز پروپانت و نمونه سنگ (در صورت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با نمونه سنگ، باید در هنگام اندازه‌گیری ضخامت، نمونه سنگ نیز قرار داده شود) باید به ترتیب نشان داده شده، آماده شود و ضخامت آن‌ها در فشار مورد نظر (فشارهایی که آزمایش هدایت هیدرولیکی انجام خواهد شد) به دست آید. سپس هنگام آزمایش هدایت هیدرولیکی ضخامت کل که شامل ضخامت تجهیزات سلول و لایه پروپانت است، اندازه‌گیری شود. تفاضل این ضخامت‌های

از دو نمونه سنگ با ابعاد مشابه با صفحه فلزی و ضخامت حدود ۱۰ میلی‌متر و یا بیش‌تر استفاده کرد. ترتیب قرارگیری این قطعات در شکل ۳ نمایش داده شده است.



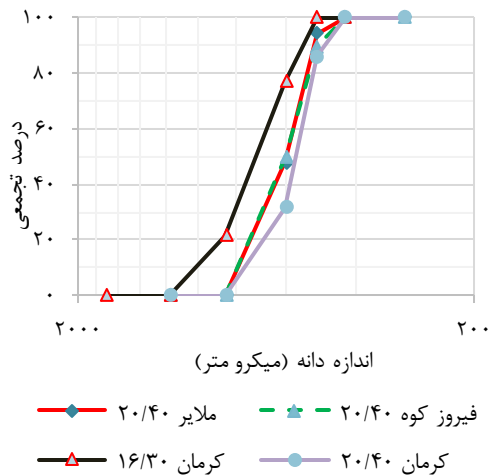
شکل ۳. تصویر سه بُعدی از قطعات سلول هدایت‌پذیری هیدرولیکی

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پیک پروپانت، قطعات به ترتیب نشان داده شده در شکل ۳ قرار می‌گیرند. در صورت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پیک پروپانت نیازی به داشتن نمونه سنگ نیست. ابتدا حلقه‌های آب‌بند به پیستون‌ها و سپس فشارسنج به بدنه سلول متصل می‌شود. سپس پیستون پایین درون سلول طوری قرار می‌گیرد که سطح فوقانی آن ۴ میلی‌متر پایین‌تر از محل قرارگیری مجراها (فشارسنج، ورودی و خروجی سیال) قرار گیرد. بعد از قرار دادن صفحه فلزی روی پیستون پایینی، مقدار پروپانت دلخواه، به ترتیب گفته شده در صفحه قبل درون سلول ریخته می‌شود.

در مرحله بعد صفحه فلزی دوم را روی لایه پروپانت قرار داده و در نهایت پیستون بالایی روی آن قرار داده می‌شود. سپس این مجموعه به صورت افقی برای اعمال فشار درون جک بارگذاری قرار داده می‌شود.

بعد از رساندن فشار و نگهداری آن به مدت تقریباً ۱۵ دقیقه، جریان آب با دبی مشخص، تا زمان تک‌فاز شدن جریان درون پیک پروپانت و مجراها ادامه داده می‌شود. برای هر مرحله از فشار تراکمی مشخص، جریان سیال را حداقل در سه دبی تزریقی اعمال کرده و هدایت هیدرولیکی و تراوایی برای هر دبی مشخص می‌شود. برای محاسبه تراوایی و هدایت هیدرولیکی باید شرایط جریان تک‌فاز، پایا و خطی (جریان دارسی) هنگام قرائت فشارها برقرار شود.

به دست آمده و در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. توزیع دانه‌بندی نمونه‌های ماسه کوارتزی

اندازه دانه‌های سه نمونه ۲۰/۴۰ مربوط به ماسه‌های ملایر، فیروزکوه و کرمان در بازه $425 \mu m - 850 \mu m$ قرار دارد و اندازه دانه‌های نمونه ماسه ۱۶/۳۰ کرمان نیز در بازه $1180 \mu m - 500 \mu m$ قرار دارد. این بازه‌ها (اندازه دانه‌ها) در هنگام آماده سازی نمونه انتخاب شده است.

۳.۲ کرویت و گردشگری

مقدار مطلوب برای کرویت و گرد شدگی مطابق با پیشنهاد ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد مقدار ۰.۶ و یا بزرگ‌تر از ۰.۶ می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد میزان کرویت هر چهار نمونه در مقدار مطلوب (بزرگ‌تر از ۰.۶) قرار دارد. میزان گردشگری نمونه ماسه ملایر مقدار نامطلوب (کوچک‌تر از ۰.۶) بوده و نمونه ماسه فیروزکوه در محدوده بحرانی (حدود ۰.۶) قرار دارد. هر دو نمونه ماسه کرمان میزان گردشگری مطلوبی داشته که از میان دو نمونه ماسه کرمان، نمونه‌ی ۱۶/۳۰ که سایز ذرات بزرگ‌تری دارد گردشگری بهتری نشان می‌دهد. میزان کرویت و گردشگری دانه‌های چهار نمونه در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده برای چهار نمونه نشان می‌دهد که نمونه ۱۶/۳۰ کرمان بهترین کیفیت، نمونه ۲۰/۴۰ کرمان در مرتبه دوم، نمونه ۲۰/۴۰ فیروزکوه در مرتبه سوم و نمونه ۲۰/۴۰ ملایر پایین‌ترین کیفیت را دارد.

به دست آمده در دو حالت برابر با ضخامت لایه پروپانت خواهد بود.

۲.۷ محاسبه هدایت هیدرولیکی

برای محاسبه تراوایی و هدایت هیدرولیکی، فشار، باز شدگی شکاف و سایر پارامترهای موجود در رابطه (۱) و (۲) از ابزار سنجش قرائت شده و با استفاده از معادلات ارائه شده، هدایت هیدرولیکی و تراوایی محاسبه می‌شود. با توجه به تزریق سیال با دبی ثابت برای محاسبه تراوایی و هدایت هیدرولیکی به پارامترهای فشار ابتدا و انتهای مسیر و باز شدگی شکاف نیاز است (ISO 13503-5, 2006).

$$k = \mu q l / A \Delta P \quad (1)$$

k تراوایی لایه پروپانت (D)

μ گرانیوی سیال تزریقی (cp)

q دبی سیال تزریقی (cm^3/s)

l فاصله بین دو فشارسنج (cm)

A سطح مقطع عمود بر جریان (cm^2)

ΔP افت فشار در طول مسیر l (atm)

هدایت هیدرولیکی حاصل ضرب باز شدگی شکاف در تراوایی است. با در نظر داشتن عرض ۴ سانتی‌متری سلول، فاصله ۱۱/۶ سانتی‌متری دو فشارسنج و تبدیل واحدها، هدایت هیدرولیکی در مقیاس رایج در صنعت نفت از طریق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$kw_f = 23.3 \mu q / \Delta P \quad (2)$$

kw_f هدایت هیدرولیکی پک پروپانت ($mD.ft$)

μ گرانیوی سیال تزریقی (cp)

q دبی سیال تزریقی (cm^3/min)

ΔP اختلاف فشار ابتدا و انتهای مسیر جریان (psi)

۳. نتایج و بحث

۳.۱ دانه‌بندی

نتایج دانه‌بندی نمونه‌های ۲۰/۴۰ ملایر، فیروزکوه و کرمان در بازه‌ی $1180 \mu m - 300 \mu m$ و نتیجه دانه‌بندی برای نمونه ماسه کوارتزی ۱۶/۳۰ کرمان نیز در بازه‌ی $1700 \mu m - 425 \mu m$

جدول ۴. مقاومت خردایشی و دسته‌بندی نمونه‌ها

نمونه ماسه کوارتزی	مقاومت خردایشی (Psi)	دسته‌بندی مقاومت خردایشی ۱۰٪
ملایر ۲۰/۴۰	-	-
فیروزکوه ۲۰/۴۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۱ K
کرمان ۲۰/۴۰	۳۵۰۰	۳ K
کرمان ۱۶/۳۰	۴۰۰۰	۴ K

مقایسه نتایج به دست آمده برای چهار نمونه نشان می‌دهد که نمونه ۱۶/۳۰ کرمان بهترین کیفیت، نمونه ۲۰/۴۰ کرمان در مرتبه دوم، نمونه ۲۰/۴۰ فیروزکوه در مرتبه سوم و نمونه ۲۰/۴۰ ملایر پایین‌ترین کیفیت را دارد. این نتایج با نتایج به دست آمده برای کرویت و گردشگری در بخش ۲.۳ تطابق خوبی نشان می‌دهد.

۳.۴ چگالی حجمی

چگالی حجمی ρ_v نمونه‌ها در فشارهای متفاوت، مقادیر مختلفی داشته و با افزایش فشار، چگالی حجمی نمونه‌ها به علت فشرده شدن دانه‌ها افزایش می‌یابد. برای چهار نمونه، دانسیته حجمی در محدوده‌های فشاری مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. چگالی حجمی پروپانت یک پارامتر مهم برای به دست آوردن میزان پروپانت مورد نیاز برای یک حجم مشخص از شکاف می‌باشد.

جدول ۳. کرویت و گردشگری نمونه‌ها

نمونه	گرد شدگی (Roundness)	کرویت (sphericity)
ملایر ۴۰/۲۰	۰.۵۵	۰.۷۱
فیروزکوه ۴۰/۲۰	۰.۶	۰.۷۹
کرمان ۴۰/۲۰	۰.۶۵	۰.۷۳
کرمان ۳۰/۱۶	۰.۷۱	۰.۷۳

۳.۳ مقاومت خردایشی

نتایج آزمایش مقاومت خردایشی برای نمونه ملایر نشان دهنده مقاومت بسیار کم این نمونه در برابر فشارهای تراکمی اعمال شده است. برای این نمونه، در فشار 1000 psi میزان ذرات ریز تولید شده بیش‌تر از ۱۰٪ جرم اولیه می‌باشد که نشان دهنده نامناسب بودن مقاومت خردایشی این نمونه می‌باشد. نمونه فیروزکوه مقاومت فشاری در حدود $1000 \text{ psi} - 1500 \text{ psi}$ دارد. این نمونه در فشار 1000 psi کم‌تر از ۱۰٪ و در فشار 1500 psi بیش‌تر از ۱۰٪ جرم اولیه، ذرات ریز تولید می‌کند. نمونه ۲۰/۴۰ ماسه کرمان مقاومت خردایشی 3500 psi و نمونه ۱۶/۳۰ ماسه کرمان مقاومت خردایشی 4000 psi نشان می‌دهد. اگر چه دو نمونه ماسه کرمان از یک معدن تهیه شده است، اما تفاوت مقاومت خردایشی در حدود 500 psi با یکدیگر دارند. دلیل این تفاوت در مقایسه میزان کرویت و گردشگری دو نمونه مشهود است. هر دو نمونه میزان کرویت یکسانی دارند ولی گردشگری نمونه ۱۶/۳۰ حدود ۰/۰۶ بالاتر از نمونه ۲۰/۴۰ بوده و این بدان معنی است که دانه‌های نمونه ۲۰/۴۰ گوشه‌های تیزتری دارد. گوشه‌های تیز در برابر فشار اعمالی، مقاومت کمی داشته و با خرد شدن، باعث تولید ذرات ریز بیش‌تری می‌شوند. نتایج مقاومت خردایشی چهار نمونه به همراه دسته‌بندی انجام شده بر اساس دسته‌بندی ارائه شده توسط سازمان جهانی استاندارد در جدول ۴ نشان داده شده است.

^{۲۰} Bulk density

$$UP = Q_3 + (a \times IQR) \quad (۳)$$

$$LB = Q_1 - (a \times IQR) \quad (۴)$$

مقدار ضریب a با توجه به پراکندگی نتایج در هر فشار، مقدار مشخصی انتخاب شده است. در فشارهای پایین تراکمی، هدایت هیدرولیکی پک پروپانت بالا بوده و در نتیجه تفاوت فشار ابتدا و انتهای مسیر جریان در سلول هدایت‌پذیری هیدرولیکی مقادیر کمی (کم‌تر از ۱۰ میلی‌بار) دارد. با توجه به محدود بودن دقت فشارسنج‌ها (۲ میلی‌بار) پراکندگی داده‌ها در این مراحل زیاد است به همین دلیل به ضریب a مقدار کم‌تری اختصاص داده شده است. با افزایش فشار تراکمی تفاوت فشار ابتدا و انتهای مسیر سیال افزایش یافته و در نتیجه با توجه به ثابت بودن دقت فشارسنج‌ها، پراکندگی داده‌ها کم‌تر شده و در نتیجه ضریب a مقادیر بزرگ‌تری انتخاب شده است. مقادیر اختصاص داده شده به ضریب a در جدول ۶ برای داده‌های هدایت هیدرولیکی و تراوایی در فشارهای مختلف نشان داده شده است. برای نمونه ملایر ۲۰/۴۰ با توجه به کم بودن هدایت هیدرولیکی ضریب a مقدار ۱/۵ انتخاب شده و برای سایر نمونه‌ها این ضریب با توجه به پراکندگی داده‌ها انتخاب شده است.

داده‌های هدایت هیدرولیکی و تراوایی مربوط به چهار نمونه مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شد، برای نمونه ماسه کوارتزی ملایر حداکثر تا فشار حدود 1300 psi هدایت هیدرولیکی در مقیاس زمان آزمایش قابل اندازه‌گیری می‌باشد و این نمونه با افزایش فشار به 2100 psi ، درصد قابل توجهی از هدایت هیدرولیکی خود را از دست می‌دهد به طوری که در مقیاس زمان آزمایش (حدود ۱۵ دقیقه) توانایی تخلیه فشار سیال ایجاد شده درون سلول به علت افزایش فشار تراکمی را ندارد. این نمونه در فشار 1300 psi هدایت هیدرولیکی برابر با $1097/56 \text{ mD.ft}$ و تراوایی حدود ۲۸ داری را تأمین می‌کند. آزمایش هدایت هیدرولیکی برای این نمونه پنج بار تکرار شد که در چهار مورد فشار 2100 Psi باعث کاهش شدید هدایت هیدرولیکی (کم‌تر از 56 mD.ft) شد و در موردی که امکان اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در زمان

جدول ۵. چگالی حجمی نمونه‌ها در فشارهای تراکمی مختلف

فشار تراکمی (Psi)	ρ (g/Cm ³) ملایر ۲۰/۴۰	ρ (g/Cm ³) فیروزکوه ۲۰/۴۰	ρ (g/Cm ³) کرمان ۲۰/۴۰	ρ (g/Cm ³) کرمان ۱۶/۳۰
۱۳۰۰	۱٫۶۳	۱٫۵۴	۱٫۵۹	۱٫۵۸
۲۰۰۰	-	۱٫۶۳	۱٫۶۵	۱٫۶۷
۲۷۰۰	-	۱٫۷۲	۱٫۷۰	۱٫۷۱
۳۵۰۰	-	۱٫۷۸	۱٫۷۳	۱٫۷۸
۴۱۰۰	-	۱٫۸۰	۱٫۷۶	۱٫۸۳
۵۶۰۰	-	-	۱٫۸۵	۱٫۸۸
۷۰۰۰	-	-	-	۱٫۹۲

۳.۵ هدایت هیدرولیکی و تراوایی

در این مطالعه برای هر نمونه در هر فشار تراکمی، آزمایش‌هایی برای ۲ تا ۴ مرتبه تکرار شده است. برای هر مرحله آزمایش شده، ۳ تا ۶ دبی تزریقی متفاوت اعمال شده و هدایت هیدرولیکی و تراوایی برای هر دبی به دست آمده است. تکرار آزمایش در هر فشار تراکمی و برای هر نمونه با توجه به پراکندگی داده‌ها انجام شده است. برای آزمایش‌هایی با پراکندگی داده‌های بیش‌تر، تعداد آزمایش‌های بیش‌تری انجام شده است. داده‌های غیر قابل قبول به وسیله نرم‌افزار اکسل حذف شده و سپس هدایت هیدرولیکی و تراوایی هر نمونه در هر فشار با میانگین‌گیری از داده‌های قابل قبول به دست آمده است. برای حذف داده‌های غیر قابل قبول ابتدا داده‌ها به صورت صعودی مرتب شده و چارک^{۲۱} اول (Q_1) و چارک سوم (Q_2) تعیین شده است. سپس با تفاضل مقدار چارک اول و سوم، دامنه تغییر چارک‌ها^{۲۲} (IQR) به دست آمده است. در نهایت محدوده بالایی (UP) و محدوده پایینی (LP) قابل قبول برای داده‌ها به وسیله رابطه‌های (۳) و (۴) به دست آمده است.

^{۲۱} quartile

^{۲۲} interquartile range (IQR)

آزمایش محیا بود، هدایت هیدرولیکی مقدار بسیار ناچیزی (حدود ۲۰۰ میلی داری) نشان داد.

در سایر محدوده فشاری، کاهش هدایت هیدرولیکی می‌تواند در اثر تغییر نحوه چینش دانه‌ها، تغییر شکل دانه‌ها و خرد شدن دانه‌ها باشد. نمونه ماسه ۱۶/۳۰ بهترین عملکرد را در بین نمونه‌های آزمایش شده نشان داده است. هدایت هیدرولیکی برای این نمونه تا فشار 7000 psi تعیین شده است. در دو نمودار تغییرات هدایت هیدرولیکی-فشار و تراوایی-فشار این نمونه، تغییر ناگهانی مشاهده نشده است که این موضوع می‌تواند نشان دهنده این باشد که ذرات تولید شده به علت خرد شدن دانه‌ها، در این نمونه نسبت به مجراهای جریان سیال به اندازه کافی کوچک بوده و این ذرات توسط جریان سیال از محیط خارج شده و باعث بسته شدن مسیر عبور سیال نشده است. مشاهده ذرات ریز در مجرای خروجی سلول هدایت هیدرولیکی نیز تأیید کننده این موضوع می‌باشد. به نظر می‌رسد در این نمونه علت اصلی کاهش هدایت هیدرولیکی و تراوایی با افزایش فشار، تغییر آرایش دانه‌ها و فرو رفتن ذرات در یکدیگر باشد.

در شکل ۶ و ۷ هدایت هیدرولیکی و تراوایی سه نمونه ۲۰/۴۰ فیروزکوه، ۲۰/۴۰ کرمان و ۱۶/۳۰ کرمان در محدوده فشاری آزمایش شده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ هدایت هیدرولیکی و تراوایی نمونه ۱۶/۳۰ کرمان نسبت به دو نمونه دیگر مقادیر بالاتری دارد. نمونه ۲۰/۴۰ کرمان نیز نسبت به نمونه ۲۰/۴۰ فیروزکوه نتایج بهتری نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده برای هدایت هیدرولیکی و تراوایی سه نمونه، با نتایج به دست آمده برای کرویت، گردشگری و مقاومت خردایشی در بخش‌های ۳.۲ و ۳.۳ مطابقت دارد. به عبارت دیگر نمونه‌هایی با دانه‌بندی بزرگ‌تر، گردشگری بهتر، کرویت بهتر و مقاومت خردایشی بهتر، در آزمایش هدایت هیدرولیکی نیز توانایی ایجاد هدایت هیدرولیکی بالاتری در فشارهای مختلف داشته‌اند.

جدول ۶. ضریب a برای داده‌های هدایت هیدرولیکی و تراوایی نمونه‌ها

فشار (Psi)	ضریب a	ضریب a	ضریب a	ضریب a
	ماسه ملایر ۲۰/۴۰	ماسه فیروزکوه ۲۰/۴۰	ماسه کرمان ۲۰/۴۰	ماسه کرمان ۱۶/۳۰
۱۳۰۰	۱/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۲
۲۰۰۰	-	۱	۰/۴	۰/۴
۲۷۰۰	-	۱/۵	۰/۶	۰/۸
۳۵۰۰	-	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۴۱۰۰	-	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۵۶۰۰	-	-	۱/۵	۱/۵
۷۰۰۰	-	-	-	۱/۵

هدایت هیدرولیکی نمونه ماسه فیروزکوه تا فشار حدود 4200 Psi تعیین شده و مشاهده شد با افزایش فشار، هدایت هیدرولیکی این نمونه کاهش یافته و توانایی نگهداری هدایت هیدرولیکی اولیه را از دست می‌دهد. کاهش هدایت هیدرولیکی می‌تواند در نتیجه تغییر آرایش دانه‌های ماسه، مسدود شدن مجراها توسط ذرات خردشده، فرو رفتن دانه‌ها در یکدیگر و یا ترکیبی از این سه اثر باشد. تراوایی نیز رفتار مشابه با هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد.

هدایت هیدرولیکی نمونه ۲۰/۴۰ ماسه کرمان تا فشار 5600 Psi تعیین شده است. در نمودار فشار-هدایت هیدرولیکی این نمونه، یک افت سریع هدایت هیدرولیکی و تراوایی در فشار 3500 Psi مشاهده می‌شود (شکل ۶ و شکل ۷) که این فشار تقریباً برابر با مقاومت خردایشی به دست آمده برای این نمونه می‌باشد. این افت سریع نشان دهنده تأثیر غالب مسدود شدن مجراها توسط ذرات متحرک در کاهش هدایت هیدرولیکی یک پروپانت در محدود فشاری مقاومت خردایشی می‌باشد.

نمونه‌های ماسه‌ای و در نهایت هدایت هیدرولیکی یک پروپانت، با توجه به معیارهای ارائه شده استاندارد، مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱. نمونه ۲۰/۴۰ ماسه کوارتزی کرمان در محدوده فشاری حدود 3000 Psi و نمونه ۱۶/۳۰ ماسه کوارتزی کرمان در محدوده فشاری 4000 Psi امکان استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی را دارد.

۲. نمونه ماسه فیروز کوه به علت مقاومت خردایشی کم (حدود 1000 Psi) قابلیت استفاده در عملیات شکست معمول را ندارد مگر در موارد خاص که فشار تراکمی سازند بسیار کم (کمتر از 1000 Psi) باشد.

۳. نمونه ماسه ملایر به علت مقاومت خردایشی بسیار کم (کمتر از 1000 Psi) و گردشگری نامطلوب (کمتر از ۰/۶) قابلیت استفاده در عملیات شکست هیدرولیکی را ندارد. هدایت هیدرولیکی ناچیز این نمونه در فشار 2100 Psi تأیید کننده این مطلب می‌باشد.

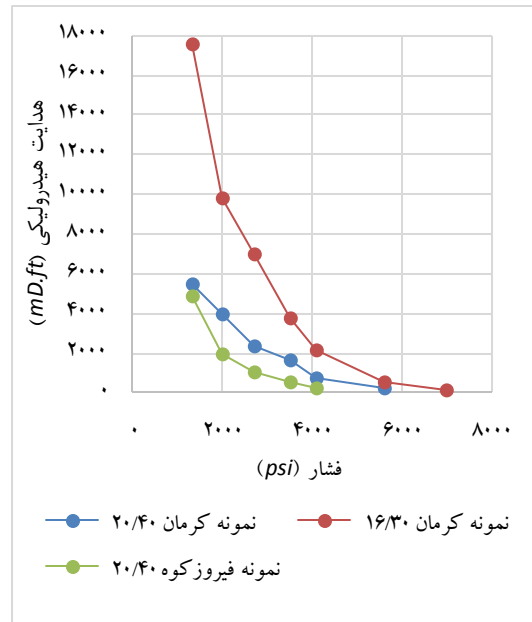
۴. نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت خردایشی و آزمایش هدایت هیدرولیکی برای تمامی نمونه‌ها، رابطه‌ی منطقی با یکدیگر نشان می‌دهند.

۵. با توجه به اینکه نتایج ارائه شده برای نمونه‌های بدون فرآوری (افزایش خلوص و جدا کردن دانه‌های نامطلوب) است، احتمال تولید پروپانت های طبیعی با کیفیت بالاتر نیز در داخل کشور وجود دارد و جزو برنامه های آتی این گروه تحقیقاتی است.

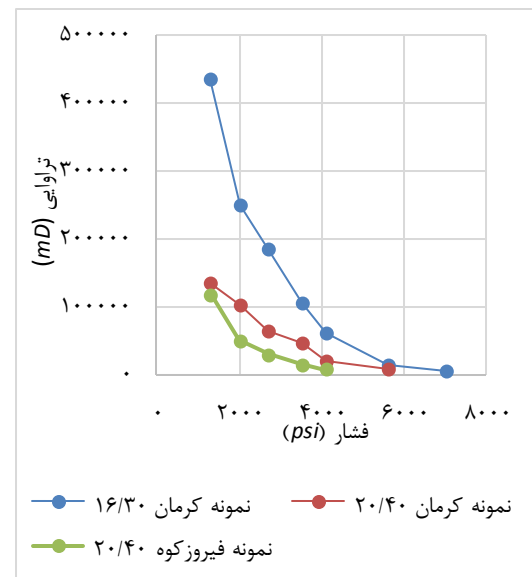
۵. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۷. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
kw_f	$mD.ft$	هدایت هیدرولیکی
μ	cp	گرانروی
q	cm^3/min	دبی
ΔP	psi	اختلاف فشار
k	D	تراوایی
A	cm^2	سطح مقطع
ρ	g/cm^3	چگالی حجمی



شکل ۶. مقایسه هدایت هیدرولیکی سه نمونه



شکل ۷. مقایسه تراوایی سه نمونه

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت انتخاب پروپانت مناسب در موفقیت عملیات شکست هیدرولیکی، پتانسیل چند نمونه از ماسه‌های کوارتزی ایران به منظور تولید پروپانت طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. کرویته، گردشگری، توزیع دانه‌بندی و مقاومت خردایشی

۶. مراجع

- Aslam, T. 2011, REVIEW ON HYDRAULIC FRACTURING TECHNIQUE. Dalhousie University Halifax, Nova Scotia.
- Masoomi, R., Bassey, I., Viktorovich, D., Dehghani, H. 2015, Analysis of proppant hydraulic fracturing in a sand oil reservoir in southwest of Iran". International Journal of Engineering and Technology, 7(5), 1598
- Cooke Jr, C. E. 1973, Conductivity of fracture proppants in multiple layers. Journal of Petroleum Technology, 25(09), 1-101
- API, R. 61, Recommended Practices for Evaluating Short Term Proppant Pack Conductivity. 1989. Washington, DC: API
- ISO 13503-5, Petroleum and natural gas industries — Completion fluids and materials — Part 5: Procedures for measuring the long-term conductivity of proppants. 2006, Washington, DC: API.
- Pongthunya, P. 2010, Development, setup and testing of a dynamic hydraulic fracture conductivity apparatus (Doctoral dissertation, Texas A & M University).
- Romero, J. D., Zhu, D., Hill, D., Awoleke, O. O., 2012, Experimental investigation of propped fracture conductivity in tight gas reservoirs using factorial design. In SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Society of Petroleum Engineers
- Reinicke, A., Rybacki, E., Stanchits, S., Huenges, E., & Dresen, G. 2010, Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms—Implications from laboratory testing of tight sandstone–proppant systems. Chemie der Erde-Geochemistry, 70, 107-117.
- Lutynski, M. A. 2015, A method of proppant pack permeability assessment. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 51
- Shekhawat, D. S., Pathak, K. 2016, Proppant's performance with reservoir rock under variable closure pressure: Results of experiments with a newly developed experimental set-up. Journal of Petroleum Science and Engineering, 147, 34-46
- Mohd Saaid, I., Dahlila, K., Suhaila, M., 2011, Characterization of Malaysia Sand for Possible Use as Proppant. American International Journal of Contemporary Research 1.1: 37-44.
- Kothamasu, R., Choudhary, Y. K., Murugesan, K. 2012, Comparative study of different sand samples and potential for hydraulic-fracturing applications. In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers
- Mohammed Khair, E. M., Faried, M. 2016, Preliminary Evaluation of Silica Sand in Sudan with Respect to Fracture Sand. J Pet Environ Biotechnol, 7(276), 2
- Schulz, E. C. 2014, Conductivity of proppant mixtures (Doctoral dissertation). The University of Texas at Austin.
- Kamenov, A. 2013, The effect of proppant size and concentration on hydraulic fracture conductivity in shale reservoirs (Doctoral dissertation).

- API, RP. 56, Recommended Practices for Testing Sand Used in Hydraulic Fracturing Operations, 1995. Washington, DC: API.
- ISO 13503-2, Petroleum and natural gas industries — Completion fluids and materials — Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, 2006.
- Sondergeld, C., Simo, H., Pournik, M. 2013, Proppant Crush Test: A New Approach. In SPE Production and Operations Symposium. Society of Petroleum Engineers.
- Korson, L., Drost-Hansen, W., Millero, F. J. 1969, Viscosity of water at various temperatures. The Journal of Physical Chemistry, 73(1), 34-39.
- Much, M. G., Penny, G. S. 1987, Long-term performance of proppants under simulated reservoir conditions. In Low Permeability Reservoirs Symposium. Society of Petroleum Engineers.
- Jansen, T. A. 2014, The effect of rock properties on hydraulic fracture conductivity in the Eagle Ford and Fayetteville Shales (Doctoral dissertation).
- Perez Pena, P. A. 2015, The Effect of Rock Properties on Fracture Conductivity in the Marcellus Shale (Doctoral dissertation).
- Wen, Q., Zhang, S., Wang, L., Liu, Y., Li, X. 2007, The effect of proppant embedment upon the long-term conductivity of fractures. Journal of Petroleum Science and Engineering, 55(3), 221-227.