

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری مهندسی اکتشاف معدن

مطالعات آزمایشگاهی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر جریان سیال در شرایط مخزن

نگارنده: محمد فائز

اساتید راهنما

دکتر احمد رمضان زاده

دکتر سید رضا قوامی ریابی

استاد مشاور

دکتر بهزاد تخم‌چی

اسفند ۱۴۰۰

صورتجلسه دفاع

تقدیم به

خانواده عزیزم، اساتید راهمائی و دلسوزم و توانای عزیزتر از جانم

شکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند بخشنده مهربان را که توفیقی دیگر عنایت کرد تا مرحله‌ای دیگر از مسیر بی‌انتهای دانش‌اندوزی را طی نمایم.

بر خود لازم می‌دانم از حمایت‌ها و پشتیبانی‌های معنوی بی‌دریغ خانواده‌ی عزیزم به ویژه پدر و مادر صبور و مهربانم تشکر نمایم.

از اساتید راهنمای این رساله دکتر احمد رمضان زاده و دکتر سید رضا قوامی ریایی سپاسگزارم که کسب دانش در محضر آنان، یادگار پر افتخاری برای اینجانب بود.

از استاد بزرگوارم دکتر بهزاد تخم‌چی که بدون چشم‌داشت نهایت کمک و راهنمایی را به اینجانب نمودند و همیشه در اوج ناامیدی به من انرژی و امید دادند صمیمانه سپاسگزارم. از داوران گرانقدر این رساله، دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی، دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی و دکتر لهراسب فرامرزی که زحمت داوری این رساله را پذیرفتند متشکر و سپاسگزارم.

در پایان از تمامی دوستان و هم‌دانشگاهیان خویش که در طی این سال‌ها مرا تحمل نمودند تشکر و قدردانی نموده و برای آن‌ها آرزوی موفقیت می‌نمایم. به‌ویژه دوستان عزیزم دکتر بیژن دهقانی، دکتر امیر جولایی، مهندس صالح دیلمی و بسیاری از دوستان دیگر که ذکر نام آن‌ها در این مختصر نمی‌گنجد که با تشویق‌ها و مشاوره‌هایشان مرا یاری رساندند تشکر و قدردانی نموده و سلامت و موفقیت و بهروزی آن‌ها را آرزومندم.

محمد فائز - اسفند ۱۴۰۰

تعمدنامه

اینجانب محمد فائز دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مطالعات آزمایشگاهی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر جریان سیال در شرایط مخزن تحت راهنمایی اساتید محترم دکتر احمد رمضان زاده و دکتر سید رضا قوامی ریایی و مشاوره دکتر بهزاد تخم چی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

مطالعات در خصوص شکستگی‌های سنگ‌ها مخصوصاً سنگ میزبان مخازن نفتی همواره موضوعی جذاب برای محققین و شرکت‌های فعال در حوزه‌های نفتی و معدنی بوده است که در دهه‌های اخیر به طور چشم‌گیری افزایش یافته است؛ چراکه علی‌رغم جایگاه علمی، یک مسأله کاربردی نیز می‌باشد. در مخازن شکسته، مطالعه شکستگی‌ها در اکتشاف، بهره‌برداری و طراحی عملیات ازدیاد برداشت بسیار تعیین کننده است. یکی از اهداف اصلی در بررسی شکستگی‌های مخزنی، بررسی رفتار سیال و ارتباط میزان جریان با مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی شکستگی‌ها شامل باز شدگی، پیوستگی، جهت‌داری، طول شکستگی‌ها و زبری سطح آن‌ها می‌باشد. همچنین با دانستن اثر هر کدام از موارد ذکر شده در میزان هدایت هیدرولیکی سیال، می‌توان در هدف مورد نظر پیش‌بینی دقیق‌تری انجام داد. با توجه به مطالعات گذشته در این زمینه، در این مطالعه به بررسی اثر فاصله‌داری و جهت‌داری بر میزان هدایت هیدرولیکی سیال پرداخته شد. مطالعه هندسه شکستگی‌ها بر میزان هدایت هیدرولیکی یا تراوایی در مقیاس آزمایشگاهی نیازمند انتخاب نمونه مناسب از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق در وهله اول به منظور بررسی اثر هندسه شکستگی‌ها در مقیاس آزمایشگاهی نمونه مصنوعی ساخته شده از بتن انتخاب شد. انتخاب طرح اختلاط بتن از جمله فاکتورهای مهم جهت تهیه نمونه بتنی مناسب می‌باشد. علاوه بر نمونه‌های بتنی، نمونه‌های مصنوعی دیگر ساخته شده از الیاف کتان و رزین فنولیک معروف به فیبر نخ‌دار نیز در نظر گرفته شد. نمونه مورد نظر با استفاده از دستگاه CNC به استوانه‌هایی به قطر ۳۸ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر برش داده شدند. همچنین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، شامل چگالی، میزان جذب آب، تخلخل، سرعت موج فشاری و برشی، هدایت هیدرولیکی، مقاومت فشاری تک محوره اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شدند. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی بر اساس رابطه داری و در راستای قائم می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که نمونه بتنی به دلیل میزان تخلخل، جذب آب، هدایت هیدرولیکی نسبتاً بالا و شکننده بودن نمی‌تواند نمونه مناسبی برای این تحقیق باشد. از سوی دیگر نمونه ساخته شده از فیبر نخ‌دار نه تنها از ویژگی‌های مطلوبی از نظر فیزیکی و از نظر مکانیکی به منظور بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری برخوردار می‌باشد، بلکه به دلیل رفتار غیر شکننده و منعطف تر بودن، برای ایجاد شکستگی‌ها با زوایای متفاوت و فاصله‌داری‌های مختلف مناسب است. پس از ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایشات، نتایج نشان داد که افزایش تعداد شکستگی‌ها یا به عبارت دیگر کاهش فاصله‌داری تأثیر قابل توجهی بر میزان هدایت هیدرولیکی به خصوص برای شکستگی‌ها با جهت‌داری بزرگتر دارد. بیشترین تأثیر جهت‌داری و فاصله‌داری مربوط به نمونه‌ها با جهت‌داری شکستگی ۶۰ درجه و تعداد دو شکستگی یا فاصله‌داری ۱۲ میلی‌متر و کم‌ترین تأثیر مربوط به نمونه‌ها با جهت‌داری شکستگی صفر درجه و تعداد یک شکستگی یا فاصله‌داری بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین با افزایش جهت‌داری و کاهش فاصله‌داری میزان

هدایت هیدرولیکی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این میزان افزایش برای شکستگی‌هایی با جهت‌داری بزرگتر از ۳۰ درجه بیشتر است.

واژگان کلیدی: هدایت هیدرولیکی، هندسه شکستگی‌ها، فیبر نخ‌دار، جهت‌یافتگی، فاصله‌داری

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Faez, M., Ramezanzadeh, A., Gavami-Riabi, R., Tokhmechi, B., (2021) "Laboratory and numerical study of the effect of fracture geometry on permeability" The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin., 10.17794, pp.155–164.

۲- فائز، م.، تخم چی، ب.، رمضان زاده، ا.، قوامی ریابی، ر.، (۱۴۰۰)، " ساخت نمونه های مصنوعی به منظور بررسی اثر پارامترهای شکستگی بر نفوذپذیری"، نشریه علمی-پژوهشی ژئومکانیک نفت، شماره ۲، صفحات ۱۳-۲۴.

فهرست مطالب

فصل ۱ : اهمیت و ضرورت تحقیق و مروری بر تاریخچه مطالعات.....	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ اهمیت و ضرورت تحقیق	۲
۳-۱ مروری بر تاریخچه تحقیق	۳
۱-۳-۱ مطالعات جریان سیال	۳
۱-۳-۲ فاصله‌داری و جهت‌داری شکستگی‌ها در مطالعات پیشین	۶
۱-۳-۳ نمونه‌های مصنوعی ساخته شده به‌منظور بررسی تاثیر شکستگی‌ها بر تراوایی در مطالعات پیشین	۱۵
۱-۴-۱ نتیجه گیری فصل	۱۵
فصل ۲ پارامترهای موثر بر رفتار هیدرولیک توده‌سنگ درزه‌دار.....	۱۷
۲-۱ مقدمه	۱۸
۲-۲ تخلخل	۱۸
۲-۲-۱ تخلخل‌های حاصل از فرآیندهای رسوبی	۱۹
۲-۲-۲ تخلخل حاصل از فرایندهای دیاژنتیکی	۲۰
۲-۲-۳ تخلخل حاصل از شکستگی مکانیکی	۲۰
۲-۳ شکل‌شناسی شکستگی‌ها.....	۲۱
۲-۳-۱ سیستم شکستگی	۲۲
۲-۳-۲ طول شکستگی	۲۴
۲-۳-۳ فراوانی	۲۴

۲۴.....	۳-۳-۴ پرشدگی
۲۶.....	۲-۳-۵ سختی
۲۶.....	۲-۳-۶ ارتباط شبکه‌ای
۲۷.....	۲-۳-۷ فاصله‌داری
۲۸.....	۲-۳-۸ جهت‌داری
۲۸.....	۲-۴- نتیجه گیری فصل
۳۱.....	فصل ۳ آماده‌سازی نمونه‌ها و بررسی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن‌ها
۳۲.....	۳-۱ مقدمه
۳۲.....	۳-۲ تعیین اندازه نمونه‌ها
۳۳.....	۳-۳ تعیین جنس نمونه های مورد نیاز
۳۳.....	۳-۴ ساخت نمونه استاندارد و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی
۳۵.....	۳-۴-۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها
۳۵.....	۳-۴-۲ چگالی، تخلخل و جذب آب
۳۶.....	۳-۴-۳ رفتار منحنی تنش-کرنش
۳۸.....	۳-۴-۳-۳ سرعت امواج فشاری و برشی
۴۲.....	۳-۴-۴ هدایت هیدرولیکی
۴۴.....	۳-۵ الگوی نمونه های مورد نیاز
۵۰.....	۳-۶ ساخت تمام نمونه های مورد نیاز
۵۳.....	۳-۷- نتیجه گیری فصل
۵۵.....	فصل ۴ ارزیابی تأثیر هندسه ناپیوستگی‌ها بر هدایت هیدرولیکی بر اساس نتایج آزمایشگاهی
۵۶.....	۴-۱ مقدمه
۵۶.....	۴-۲ بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکستگی‌ها بر میزان هدایت هیدرولیکی

۵۶	 ۴- ۲- ۱ انجام آزمایش ها و نتایج اولیه
۵۸	 ۴- ۲- ۲ بررسی آماری نتایج
۶۴	 ۴- ۳ تحلیل نتایج
۶۹	 فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۱	 پیشنهادات
۷۳	 مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) سیستم تزریق به مغزه‌ی مورد مطالعه ۴
- شکل (۲-۱) مدل مغزه شکسته تهیه شده با پشم شیشه و سیلیس به عنوان سندپک تراوا ۵
- شکل (۳-۱) نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش با شکستگی‌های مصنوعی تحت زوایای مشخص؛ مقدار زوایا به ترتیب از راست به چپ برابر است با 30° ، 60° ، صفر و 90° ۶
- شکل (۴-۱) منحنی مربوط به آنالیز حساسیت تنش ۹
- شکل (۵-۱) دستگاه مقاومت فشاری سه‌محوره با قابلیت اندازه‌گیری تغییر شکل، تراوایی گازی و سرعت موج اولتراسونیک ۱۰
- شکل (۶-۱) رفتار تنش - کرنش - تراوایی رس سنگ‌ها شامل آستانه‌ی عملکرد، اتساع، تراوش و حداکثر گسیختگی ۱۱
- شکل (۷-۱) نمایی شماتیک از دستگاه سیلاب‌زنی مورد استفاده در آزمایش ۱۳
- شکل (۱-۲) رده‌بندی ژنتیکی تخلخل ارائه شده توسط آهر ۲۰۰۸ ۱۹
- شکل (۲-۲) شکل‌شناسی شکستگی‌ها؛ (۱) نمایش انواع شکستگی‌های مورد اشاره در برخورد با چاه (۲) فرم باز شده شکستگی‌ها به صورت دو بعدی ۲۲
- شکل (۳-۲) (الف) نمایش شماتیکی از انواع درزه‌ی سیستماتیک (ب) نمایش شماتیکی از درزه‌ها و سیستم شکستگی سیستماتیک و غیرسیستماتیک ۲۳
- شکل (۴-۲) نمایش دسته‌بندی گسل‌ها در انواع طولی، عرضی، مزدوج (توأم)، قطری (مورب)، متعامد در یک ساختار چین ۲۳
- شکل (۵-۲) نمایش مقطع نازک ماسه‌سنگی تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی مبتنی بر کاتدولومینسانس ۲۵
- شکل (۱-۳) قطعات انتقال دهنده سیال به سر و ته نمونه در دستگاه اندازه‌گیری تراوایی ۳۲
- شکل (۲-۳) نمونه‌های ساخته شده از سنگ طبیعی (الف) گرانیات و (ب) مرمریت ۳۳
- شکل (۳-۳) الف: سنگ‌دانه‌های استفاده شده در بتن. ب: نمونه‌های بتن عمل‌آوری شده در آب ۳۵
- شکل (۴-۳) نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار ۳۵

- شکل (۳-۵) دستگاه بارگذاری خودکار ۳۷
- شکل (۳-۶) منحنی تنش- کرنش مرتبط با نمونه بتنی و فیبر نخدار ۳۸
- شکل (۳-۷) اجزای تشکیل دهنده دستگاه (PUNDIT Lab+ : ۱) بدنه اصلی دستگاه (۲) مبدل (۳) میله کالیبراسیون (۴) ژل التراسونیک (۵) صفحه نمایش ۳۹
- شکل (۳-۸) شکل موج فشاری مرتبط با نمونه بتنی ۴۰
- شکل (۳-۹) شکل موج فشاری مرتبط با نمونه فیبر نخدار ۴۰
- شکل (۳-۱۰) شکل موج برشی مرتبط با نمونه بتنی ۴۱
- شکل (۳-۱۱) شکل موج برشی مرتبط با نمونه فیبر نخدار ۴۱
- شکل (۳-۱۲) الف) شمای کلی دستگاه اندازه گیری تراوایی. ۱) پمپ تزریق آب ۲) پمپ روغن به منظور اعمال فشار محصورکننده ۳) آون و محفظه نگه دارنده مغزه، ب) قسمت درون آون ۴۳
- شکل (۳-۱۳) اجزای تشکیل دهنده دستگاه تراوایی. ۱) سیال تزریق ۲) لوله مکش ۳) پمپ تزریق ۴) شیر ۵) سیال پشت پیستون ۶) پیستون ۷ و ۸ و ۹) هر سیالی که برای تزریق استفاده شود ۱۰ و ۱۱) مسیر تزریق ۱۲) شیر بای پس ۱۳) محفظه مغزه ۱۴) مغزه ۱۵) فشارسنج ۱۶) مخزن روغن ۱۷) آون ۱۸) محفظه خروجی ۱۹) گاز نیتروژن برای ایجاد Back pressure ۴۳
- شکل (۳-۱۴) الف) نمای شماتیک سه بعدی و محل تصاویر مقطع. ب) بزرگترین سطح مقطع نمونه استاندارد مورد مطالعه (واحد ها به سانتی متر) ۴۵
- شکل (۳-۱۵) نمونه های تهیه شده با جهت داری ۶۰ درجه با الف) یک شکستگی و ب) دو شکستگی ۵۱
- شکل (۳-۱۶) نمونه های تهیه شده با جهت داری ۴۵ درجه با الف) یک شکستگی، ب) دو شکستگی و ج) سه شکستگی ۵۱
- شکل (۳-۱۷) نمونه های تهیه شده با جهت داری ۳۰ درجه با الف) یک شکستگی، ب) دو شکستگی، ج) سه شکستگی و د) چهار شکستگی ۵۲
- شکل (۳-۱۸) نمونه های تهیه شده با جهت داری صفر درجه ۵۳
- شکل (۴-۱) هندسه ناپیوستگی ها، الف: جهت داری صفر درجه، ب: جهت داری ۱۵ درجه، ج: جهت داری ۳۰ درجه، د: جهت داری ۴۵ درجه، ه: جهت داری ۶۰ درجه ۵۸
- شکل (۴-۲) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت داری صفر درجه ۵۹

- شکل (۳-۴) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۱۵ درجه ۶۰
- شکل (۴-۴) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۳۰ درجه ۶۰
- شکل (۵-۴) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۴۵ درجه ۶۱
- شکل (۶-۴) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۶۰ درجه ۶۱
- شکل (۷-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با یک شکستگی ۶۲
- شکل (۸-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با دو شکستگی ۶۲
- شکل (۹-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با سه شکستگی ۶۳
- شکل (۱۰-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با چهار شکستگی ۶۳
- شکل (۱۱-۴) میزان هدایت هیدرولیکی در برابر جهت‌داری شکستگی‌ها و تعداد شکستگی‌ها ۶۶
- شکل (۱۲-۴) میزان هدایت هیدرولیکی در برابر تعداد شکستگی‌ها و جهت‌داری شکستگی‌ها ۶۷
- شکل (۱۳-۴) تغییرات هدایت هیدرولیکی متناسب با جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها ۶۷

فهرست جداول

جدول (۱-۱) مشخصات و تصویر مغزه‌ی شکسته‌شده‌ی (مصنوعی) مورد استفاده در آزمایش.....	۱۲
جدول ۱-۲ کلاسه‌بندی پارامتر فاصله‌داری شکستگی‌ها مطابق با پیشنهاد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ.....	۲۸
جدول (۱-۳) طرح اختلاط بتن مورد مطالعه.....	۳۴
جدول (۲-۳) ویژگی‌های مقاومتی فیبر نخ‌دار.....	۳۴
جدول (۳-۳) میانگین خصوصیات فیزیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار.....	۳۶
جدول (۴-۳) میانگین خصوصیات مکانیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار.....	۳۸
جدول (۵-۳) ویژگی سرعت امواج نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار.....	۴۲
جدول (۶-۳) میانگین هدایت هیدرولیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار.....	۴۴
جدول (۷-۳) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری صفر درجه.....	۴۶
جدول (۸-۳) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۱۵ درجه.....	۴۷
جدول (۹-۳) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۳۰ درجه.....	۴۸
جدول (۱۰-۳) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۴۵ درجه.....	۴۹
جدول (۱۱-۳) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۶۰ درجه.....	۵۰
جدول ۱-۴: میانگین هدایت هیدرولیکی و انحراف از معیار بر اساس تعداد شکستگی و جهت‌داری.....	۵۸

فصل ۱ : اهمیت و ضرورت تحقیق و مروری بر تاریخچه مطالعات

۱-۱ مقدمه

از آنجایی که در مخازن شکسته، مطالعه شکستگی‌ها در اکتشاف، بهره‌برداری و طراحی عملیات ازدیاد برداشت بسیار تعیین کننده می‌باشد، مطالعات در این خصوص در دهه‌های اخیر افزایش یافته و به موضوعی جذاب برای شرکت‌ها و دولت کشور های استخراج کننده نفت تبدیل شده است که به عنوان مثال می‌توان به تهیه نقشه‌های ساختاری مخازن، آنالیزهای هندسی و ژئومکانیکی، مدل‌سازی عددی، شبیه سازی و مطالعه رفتار توده سنگ اشاره نمود. جهت دست یافتن به رفتار اصلی شکستگی‌ها در مطالعات مختلف، از روش‌های مختلفی بهره برده شده است. در این مطالعات، پژوهشگران مختلف به بررسی رفتار سیال یا ویژگی شکستگی نسبت به تغییر پارامتر خاصی از شکستگی پرداخته‌اند.

یکی از اهداف اصلی در بررسی شکستگی‌های مخزنی، بررسی رفتار سیال و ارتباط میزان جریان با مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی شکستگی‌ها شامل بازشدگی، پیوستگی، جهت‌داری، طول شکستگی‌ها و زبری سطح شکستگی می‌باشد.

شکستگی‌ها و پارامترهای منسوب به آن‌ها تا به حال از مناظر مختلف مورد بررسی‌های تئوری، تجربی و آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. در این فصل به مروری بر تحقیقات انجام شده در خصوص تاثیر مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی و هندسه شکستگی‌ها بر تراوایی پرداخته شده است.

۱-۲ اهمیت و ضرورت تحقیق

در مخازن شکسته، ارزیابی منحنی تراوایی نسبی کاملاً نشأت گرفته از تخلخل طبیعی سنگ میزبان یا تخلخل ماتریکس^۱ سنگ و تخلخل ثانویه سنگ میزبان که می‌تواند تخلخل ناشی از شکستگی‌ها یا تخلخل ناشی از انحلال که با تخلخل حفره‌ای شناخته می‌شود، است. غالباً تخلخل حفره‌ای با هم مرتبط نبوده و تأثیر زیادی روی نفوذپذیری مخزن ندارد.

به بیان دیگر چنانچه محیط مخزنی مانند بلوک‌های متخلخلی فرض شود که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، این شکستگی‌ها هستند که با برقراری ارتباط میان آن‌ها، اتصال مابین بلوک‌های دربرگیرنده نفت را فراهم می‌کنند. واژه‌ی شکستگی، ترک و یا شکاف عمدتاً به هر ناپیوستگی ساختاری اطلاق می‌گردد که در نتیجه‌ی شکل گرفتن صفحات جدایی در سنگ به وجود می‌آید. به بیان دیگر می‌توان شکستگی را نتیجه‌ی هر نوع تغییر شکل شکننده در سنگ یا ساختارهای سنگی دانست که عمدتاً به دلیل از دست دادن انسجام سنگ‌ها به وقوع پیوسته و با ارتباط بین فضاها یا متخلخل زمینه سنگ منجر به فراهم آمدن مسیر عبوری انواع سیال از جمله آب، نفت و گاز می‌گردند که در نتیجه باعث افزایش تراوایی می‌شوند. از طرفی شکستگی‌ها به نوبه‌ی خود فضایی متخلخل از نوع ثانویه در محیط نیز ایجاد می‌کنند.

¹ Matrix

تراوایی نسبی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در جریان‌های چندفازی عبوری از محیط متخلخل مطرح می‌باشد. در نتیجه می‌بایست به عنوان پارامتری کلیدی به آن نگرست و با فهم دقیق در مورد آن، قطعیت را در مطالعات مخزنی علی‌الخصوص در انواع مدل‌سازی‌ها افزایش داد. در این رابطه با توجه به گستره وسیع مشخصات شکستگی‌ها و برهم‌کنش آن‌ها، دو پارامتر فاصله‌داری و جهت‌داری مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. از آنجایی که در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته، این دو پارامتر به صورت تلفیقی وجود دارند و تأثیر هرکدام به صورت جداگانه روی تراوایی مورد بررسی قرار نگرفته است، در این پژوهش سعی بر آن است که تأثیر هر پارامتر به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. با دانستن تأثیر هر پارامتر در میزان هدایت هیدرولیکی یا تراوایی در مخزن، می‌توان با داشتن مدل شکستگی‌های مخزن به پیش‌بینی بهتری از رفتار سیال در مخزن پرداخت.

۳-۱ مروری بر تاریخچه تحقیق

شکستگی‌ها و پارامترهای منسوب به آن‌ها تا به حال از مناظر مختلف مورد بررسی‌های تئوری، تجربی و آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. در این فصل به مروری بر تحقیقات انجام شده در خصوص تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی و هندسه شکستگی‌ها بر تراوایی پرداخته شده است.

۱-۳-۱ مطالعات جریان سیال

مطالعات در زمینه جریان سیال گستره وسیعی از پژوهش‌ها را در بر می‌گیرد که در جریان انجام این پژوهش به مطالعه بسیاری از آن‌ها پرداخته شد که ذکر تمام آن‌ها در این مجال نمی‌گنجد و به طور خلاصه به تعدادی از این پژوهش‌ها می‌پردازیم.

در مطالعات مربوط به فورر^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۳، فورر و بوریس^۲ در سال ۱۹۹۵ و همچنین فورر و لنورمند^۳ در سال ۲۰۰۱ که به صورت متوالی و بر مبنای تئوری جریان دو فازی انجام شده است، پس از شناخت رژیم جریان‌های مختلف به عنوان تابعی از سرعت سطحی فازها، تراوایی‌های نسبی به عنوان تابعی از صفحات موازی هموار بدست آمد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده است که تراوایی‌های نسبی، یک رفتار خطی قوی را نسبت به رژیم جریان‌های مختلف دنبال نمی‌کنند (Fourar et al., 1993؛ Fourar and Bories, 1995).

وونگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ میلادی تراوایی نسبی نفت - آب مربوط به نمونه‌های شکسته را بررسی نموده و تغییر الگوی جریان نفت - آب را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان برای این کار، منحنی

¹ Fourar

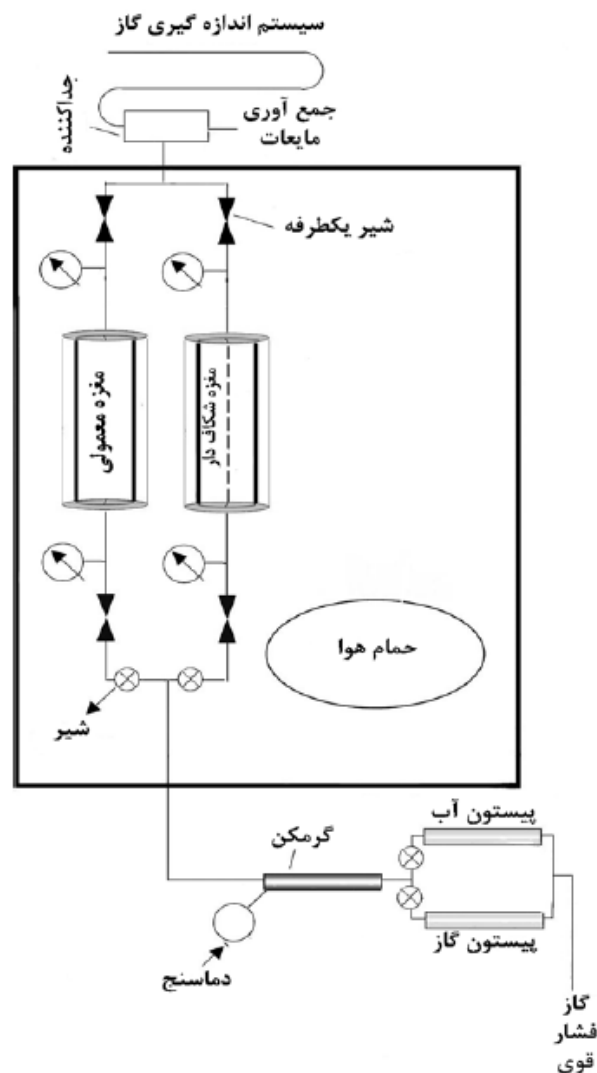
² Bories

³ Lenormand

⁴ Wong

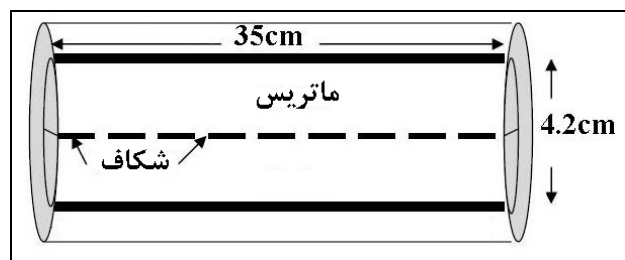
حاصل از نتایج آزمایش خود را با خط مستقیم تراوایی نسبی مطابقت داده و از طریق میزان انحرافی که نسبت به نمودار خط مستقیم مشاهده نمودند، نسبت به نتایج موجود اظهار نظر نمودند (Wong *et al.*, 2008).

درستکار و همکارانش در سال ۱۳۸۸، میزان ازدیاد برداشت نفت را در نمونه‌های شکسته مورد مطالعه قرار دادند. در این آزمایش از تزریق متناوب دی اکسیدکربن و آب به عنوان سیال غیرامتزاجی تزریقی و از نفت مارون به عنوان سیال جابه‌جا شونده استفاده شده است. نقشه کلی دستگاه مورد استفاده در این آزمایش در شکل ۱-۱ آورده شده است. برای این کار، مغزه‌ی موردنظر به دو نیم تقسیم شده به‌طوری‌که نسبت به جریان سیال، کاملاً موازی باشد (شکل ۱-۲). برای این‌که شکاف ایجاد شده دارای تراوایی یکنواخت و همگنی داشته باشد، از سیلیس‌هایی با اندازه‌های ۸۰، ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ مش با نسبت‌های مساوی استفاده شده است (درستکار و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل (۱-۱) سیستم تزریق به مغزه‌ی مورد مطالعه (درستکار و همکاران، ۱۳۸۸)

برای پر کردن شکاف، به هنگام پر کردن با سیلیس، یک لایه پشم شیشه با ضخامت ۱ میلی‌متر که تراوایی بالایی هم دارد، در مرکز نگهدارنده طوری قرار می‌گیرد که فضا به دو نیم تقسیم شده باشد. سپس با استفاده از سیلیس، دو طرف مغزه، ابتدا و انتهای آن پُر و تحت فشار و رطوبت مناسب فشرده شده است. نهایتاً با استفاده از توری ۱۰۰ مش، برای سیلیس‌های ابتدا و انتها، سدی تعبیه می‌شود تا از خروج دانه‌های سیلیس جلوگیری گردد. سپس با تزریق متناوب سیالات، میزان بازدهی تولید از این مخزن شکسته اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش، مشخصات شکستگی، کاملاً ثابت بوده و اثر تغییرات پارامترهای شکستگی بر روی نتایج بررسی نشده است.



شکل (۱-۲) مدل مغزه شکسته تهیه شده با پشم شیشه و سیلیس به عنوان سندپک تراوا
(درستکار و همکاران، ۱۳۸۸)

در سال ۲۰۱۱، لی^۱ و همکارانش بر روی رشد شکستگی‌ها در مخازن و اثرات مطلوب و نامطلوب آن مطالعه نمودند. در گزارش ارائه شده توسط آن‌ها ذکر شده هنگامی که آب یا پلیمر در ازدیاد برداشت مورد استفاده قرار گیرد، شکستگی‌ها و شکاف‌ها اطراف چاه تزریقی رشد خواهند کرد. اثر این پدیده در مخازن همگن^۲ و میزان بازیابی نفت اثر چندانی ندارد؛ اما در مخازن ناهمگن^۳ با توجه به تفاوت تراوایی لایه‌های مختلف، این پدیده می‌تواند منجر به ناموفق ماندن عملیات ازدیاد برداشت به دلیل باقی ماندن نفت در برخی لایه‌ها گردد. پس آن‌ها عوامل مؤثر در چنین رخدادی را نرخ توزیع تنش در مخزن و میزان همسانگردی مخزن عنوان کرده‌اند (Lee et al., 2011).

عباسی و همکارانش در سال ۱۳۹۳، اثر تزریق آب در نمونه سنگ مخزنی ماسه‌ای با رویکرد اثر شکاف بر اندازه‌گیری آسیب‌دیدگی سازند را مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات آن‌ها بر روی نمونه سنگ‌های ماسه‌ای یکی از مخازن ایران که در حال تزریق آب می‌باشد انجام شده است. از آنجایی که نمونه خود دارای شکستگی‌های ریز بوده است، وضعیت سیمان‌شدگی سنگ مخزن ضعیف بوده و سنگ از مقاومت پایینی برخوردار است، در نتیجه علاوه بر شسته شدن مغزه، مقدار تراوایی نیز کاهش یافته است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۳).

¹ Lee

² Homogenous

³ Heterogeneous

صانعیان نیز در سال ۱۳۹۳ با بررسی جهت‌گیری درزه‌ها و شکستگی‌ها در مخازن شکسته طبیعی، نقش آن‌ها را در میزان ازدیاد برداشت مورد مطالعه قرار داد. برای این منظور از نمونه مغزه‌های کربناته‌ی ۱/۵ اینچی با طول میانگین ۲ اینچ و تخلخل و تراوایی تقریباً یکسان مربوط به یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران استفاده نمود (شکل ۱-۳). وی مغزه‌ها را با استفاده از دستگاه سیلاب‌زنی، تحت تزریق آب شور با دبی‌های متفاوت قرار داد. نتایج حاصل از تزریق با دبی‌های مختلف نشان داده است که با فرض ثابت ماندن در تمامی پارامترها، افزایش نرخ تزریق باعث افزایش افت فشار در دو سر نمونه می‌شود؛ زیرا این دو پارامتر در شرایط خطی پایدار با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارند (Muskat, 1937). البته در نقاط اولیه، علت مشاهده‌ی چنین رفتاری را می‌توان نرسیدن به فشار مناسب پمپ برای تزریق دانست؛ زیرا فشار نیتروژن در سلول بالا است (صانعیان، ۱۳۹۳).



شکل (۱-۳) نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش با شکستگی‌های مصنوعی تحت زوایای مشخص؛ مقدار زوایا به ترتیب از راست به چپ برابر است با ۳۰°، ۶۰°، صفر و ۹۰° (صانعیان، ۱۳۹۳)

۱-۳-۲ فاصله‌داری و جهت‌داری شکستگی‌ها در مطالعات پیشین

در سال ۱۹۸۸، کونینگ^۱ با بررسی اثر سیلاب‌زنی به منظور ازدیاد برداشت در شرایط ایجاد شکستگی در سازند، در پی یافتن راه‌حلی جهت کاهش تعداد چاه‌های تزریقی به این نتیجه رسید که اگر تزریق آب در فشار خاصی که منجر به ایجاد شکستگی در سازند شود انجام گیرد، می‌توان بحث حفر چاه تزریق در نواحی دورتر از چاه اولیه را منتفی دانست و با این کار صرفه‌جویی اقتصادی صورت پذیرد. در این مطالعه، وی بر روی طول و نحوه و جهت گسترش شکستگی تمرکز کرد و با ارائه‌ی قوانینی جهت سیلاب‌زنی به منظور ازدیاد برداشت تحت شرایط ایجاد شکستگی با محدود کردن تولید ترک‌های عمودی، نهایتاً به روش ایجاد

¹ Koning

شکستگی بهینه، تأثیر رشد شکستگی بر سیلاب‌زنی و بهبود روش دستیابی به ابعاد شکستگی دست یافت (Koning, 1988).

شیفلت^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۳، عملیات سیلاب‌زنی آبی در مخازن کربناته‌ی گسلی را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ی مخزنی مورد مطالعه توسط آن‌ها با دو جهت عمده‌ی گسل مورب همراه بوده که در برابر سیالات مخزنی، یکی نقش هادی و دیگری نقش غیرهادی را ایفا می‌نمودند. آن‌ها با انجام آزمایشات میدانی از طریق تزریق آب به چاه‌های عمودی واقع در هر یک از این دو بلوک با نقش‌های متفاوت، نهایتاً منجر به کاهش هزینه‌ی کلی شدند (Shiflett et al., 2003). دو سال بعد، در سال ۲۰۰۵، شدید^۲ با انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی اثر جهت‌داری درزه‌ها و شکستگی‌ها در عملیات ازدیاد برداشت پرداخت. در این آزمایش که از آب و پلیمر به عنوان سیالات تزریق‌کننده استفاده شده، پس از انتخاب نمونه‌های مورد نظر، شکستگی‌های مصنوعی در جهات مختلف نسبت به جریان سیال در نمونه‌ها ایجاد شده است. وی از انجام آزمایش‌های خود نتیجه گرفته که در دمای اتاق، کم‌ترین بازیافت نفت مربوط به حالت بدون درزه است. پس از آن، از درزه‌های افقی تا تدریجاً قائم نسبت به جهت جریان، بیشترین مقادیر بازیافت را از خود نشان دادند. این درحالی است که در مورد تزریق پلیمر، بهترین ضریب بازیافت در مورد شکستگی با زاویه‌ی ۳۰ درجه گزارش شده است (Shedid, 2005). وی همچنین در ادامه‌ی تحقیقات خود بر روی جهت‌داری درزه‌ها در سال ۲۰۰۹ میلادی، این ویژگی را در عملیات ازدیاد برداشت با تزریق دی اکسید کربن به‌صورت دقیق‌تر بررسی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین ضریب بازیافت مربوط به مغزه‌ی بدون شکستگی بوده است؛ اما برخلاف روش تزریق آب و البته مشابه با آنچه از تزریق پلیمر حاصل شده بود، در صورت وجود شکستگی، بیشترین ضریب بازیافت نفت مربوط به مغزه‌ای بوده که جهت شکستگی آن با جهت جریان، زاویه‌ی ۳۰ درجه بسازد (Shedid, 2009).

در همین راستا، فرزانه و همکارانش یک سال بعد (سال ۲۰۱۰) نسبت به بررسی عوامل گوناگون و مؤثر در استحصال حداکثر نفت به روش تزریق محلول در مقیاس میکروسکوپی اقدام نمودند. از جمله پارامترهایی که در تحقیق آن‌ها مورد توجه واقع شده، وجود شکستگی در سنگ بوده است. طبق گزارش ارائه شده توسط این محققین، زمانی که زاویه‌ی شکستگی نسبت به جریان سیال برابر با ۴۵ درجه گردد، بیشترین میزان بازیافت نفت در حالت شکسته بدست می‌آید (Farzaneh et al., 2010). از طرفی در همان سال کوپر و لورنز^۳ طی تحقیقات خود میلادی نشان دادند که شناخت خاستگاه شکستگی‌ها و علت یا علل ایجاد آن‌ها جزو اطلاعات ارزنده‌ای است که آگاهی نسبت به آن‌ها خصوصاً در پروژه‌های ازدیاد برداشت و نحوه‌ی چینش چاه‌ها با درک هر چه بهتر از نحوه‌ی حرکت سیال در مخزن می‌تواند نقش مؤثری در نتایج به دست آمده ایفا نماید (Cooper and Lorenz, 2010).

¹ Shiflett

² Shedid

³ Cooper and Lorenz

وَنگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ میزان تراوایی در زغال‌های شکسته با نگرش نقش هندسه ناپیوستگی و آب محتوا را ارزیابی کردند. سه نوع شکستگی در لایه زغال مورد بررسی قرار گرفته است: چندین شکستگی کوچک، یک شکستگی طولی و یک شکستگی شعاعی. نتایج نشان داد که هندسه شکستگی نه تنها بزرگی تراوایی را تغییر می‌دهد بلکه تأثیر بسزایی در کنترل جذب آب، کرنش تورم و ارزیابی تراوایی دارد (Wang et al., 2011).

در مطالعه‌ای دیگر لاتهام و همکاران ۲۰۱۳ مدل‌سازی‌هایی مبتنی بر گسترش و خم شدن ترک و تأثیر آن بر تراوایی وابسته به تنش پرداختند. این مدل‌سازی ترکیبی از روش المان محدود و المان مجزا می‌باشد و جابه‌جایی دیواره شکستگی و در نتیجه تغییرات دهانه بازشدگی قابل مدل‌سازی است. نتایج نشان داد که شکستگی‌هایی که مستعد پذیرش تنش برشی هستند نقش مهمی را در افزایش جریان سیال در شکستگی ایفا می‌کنند. زیرا با ایجاد برش میزان افزایش حجم و در نتیجه مقدار دهانه بازشدگی افزایش می‌یابد (Latham et al., 2013).

صانعیان در سال ۱۳۹۳ با بررسی جهت‌داری درزه‌ها و شکستگی‌ها در مخازن شکسته طبیعی، نقش آن‌ها را در میزان ازدیاد برداشت مورد مطالعه قرار داد. برای این منظور با ایجاد شکستگی‌های مصنوعی تحت زوایای خاص و مشخص، آن‌ها را با استفاده از دستگاه سیلاب‌زنی، تحت تزریق آب شور با دبی‌های متفاوت قرار داد. نتایج بدست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد نمونه‌هایی که شکستگی آن‌ها موازی با جهت جریان سیال بوده است، بالاترین میزان بهره‌وری در عملیات ازدیاد برداشت را دارند. همچنین از جمله آزمایشاتی که وی در مطالعات خود انجام داد، تأثیر طول شکستگی مصنوعی بر تراوایی و افت فشار سنگ‌های کربناته بوده است. نتایج نشان داده است که با افزایش طول شکستگی میزان دبی به سطح افزایش می‌یابد و میزان سیال عبوری بیشتر می‌شود، این در حالی است که با این افزایش، فشار سنگ‌های کربناته افت می‌کند.

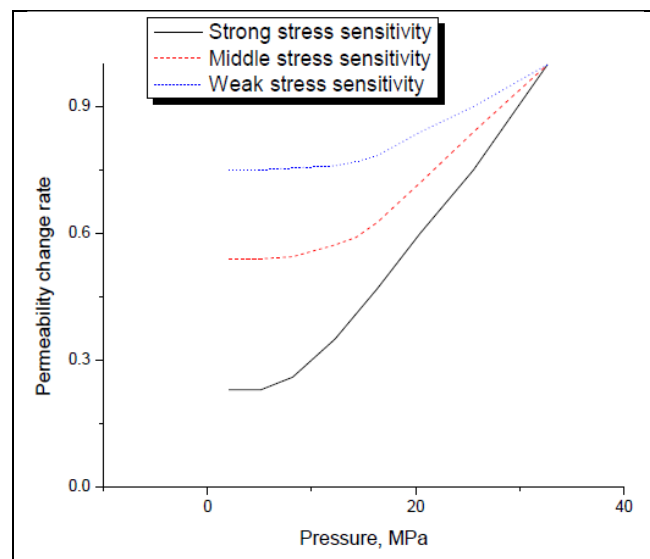
در سال ۲۰۱۵ چن و هوانگ^۱ به منظور مطالعه در خصوص انتقال املاح از طریق مدل‌سازی عددی به روش CFEM^۲ بررسی‌های خود را به صورت آزمایشگاهی نیز انجام دادند. آن‌ها یک لوله‌ی یک متری حاوی ماسه را به عنوان شکستگی اصلی و لوله‌ی دیگری را با طول ۶۲۵ میلی‌متر به عنوان شکستگی فرعی در نظر گرفتند؛ به طوری که شکستگی فرعی نسبت به اصلی با زاویه ۴۵ درجه قرار گیرد. همچنین میزان فاصله‌داری آن با شکستگی اصلی در بیشترین فاصله تقریباً ۱۵/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. تحت این شرایط نسبت به حل مساله‌ی انتقال املاح با توجه به قوانین همرفت و میزان پراکندگی اقدام کردند (Chen and Huang, 2015).

¹ Chen and Huang

² Characteristic Finite Element Method

در مطالعه ای دیگر الزایر^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ با انجام مطالعه بر روی مخازن شکسته طبیعی، اجرای هر چه بهتر پروژه‌های ازدیاد برداشت را منوط به درک کامل و صحیحی از شکستگی‌های مخازن اعم از نوع توزیع و سایر ویژگی‌های مختص آن‌ها از جمله طول و فاصله‌داری دانسته‌اند. طبق نظر ایشان چنانچه تحت تنش ثابت، مواد بعد از رشد الاستیک شکستگی‌ها با تغییرات در خصوصیات الاستیک یا فرایندهای تغییرشکل غیرالاستیک مؤثراً تضعیف شوند، جابه‌جایی بازشونده‌ی شکستگی‌ها ممکن است بدون رشد هم‌زمان طول یا ارتفاع تغییر کند (Alzayer et al., 2015). یائو و همکاران در همان سال با استفاده از مدل‌سازی عددی میزان تراوایی در سنگ‌ها با در نظر گرفتن چندین شکستگی را مورد ارزیابی قرار دادند. مدل‌سازی انجام شده بر پایه شبکه شکستگی مجزا و تخلخل دوگانه استوار است. نتایج نشان داد که شکستگی‌های مجزا و تقاطع شکستگی‌ها تأثیر بسزایی بر نرخ جریان محلی دارد. و میزان تأثیر بستگی به موقعیت شکستگی‌ها دارد (Yao et al., 2015).

به عنوان مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۵ چن و همکارانش با شبیه‌سازی عددی چاه‌های افقی شکسته و بررسی شبکه‌بندی غیرساختاری در آن‌ها، چاه‌های مربوط به مخازن گازی بسیار کم تراوا را مورد مطالعه قرار دادند. بدین‌منظور مدلی شعاعی با محوریت چاه شکسته در نظر گرفته شده و با انجام آنالیز حساسیت اثر تغییرات تنش بر روی تراوایی (شکل ۱-۴)، نسبت به میزان تولید اظهار نظر شده است (Chen et al., 2015).



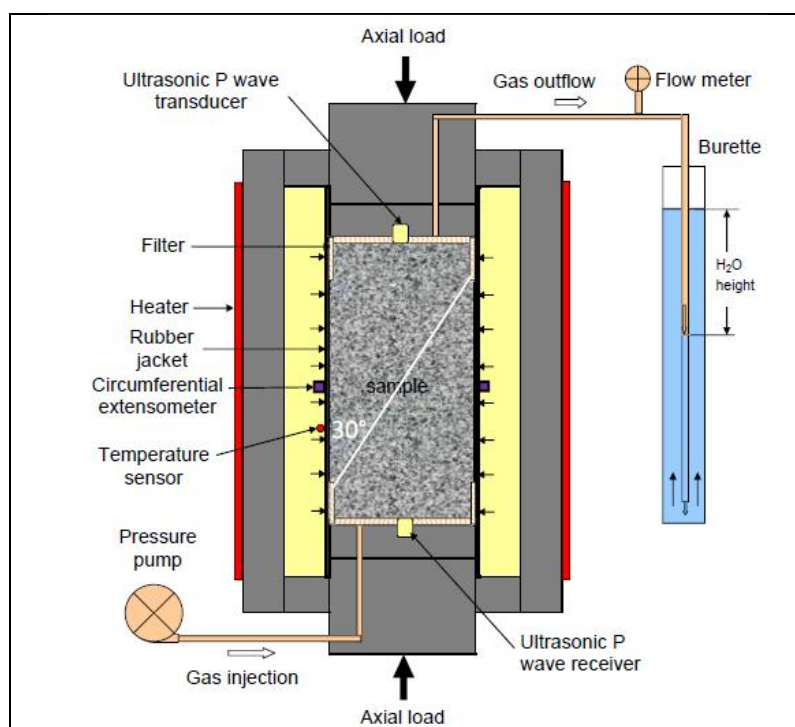
شکل (۱-۴) منحنی مربوط به آنالیز حساسیت تنش (Chen et al., 2015)

رفتار تنش - کرنش - تراوایی شیل‌ها را در طی آسیب و بازفشرده‌گی و به منظور پیش‌بینی منطقه‌ی آسیب حفاری و ارزیابی میزان تأثیر آن بر امنیت مخازن، موضوعی است که ژانگ در سال ۲۰۱۶ میلادی مورد مطالعه قرار داده است. در این آزمایش نمونه در دستگاه تست مقاومت فشاری سه محوره قرار می‌گیرد (شکل ۱-۵). با فرض اینکه شکستگی با زاویه ۳۰ درجه قرار گرفته باشد جهت اطمینان از اینکه جریان

¹ Alzayer

گاز از مسیر شکستگی عبور می کند، فیلترهایی تقریباً به طول ۱/۶ طول مغزه در ابتدا و انتهای آن قرار داده شده است. با استفاده از رابطه ی ۱-۱، تراوایی نسبی گاز طبق قانون دارسی برای این محیط بدست آمده است (Zhang, 2016).

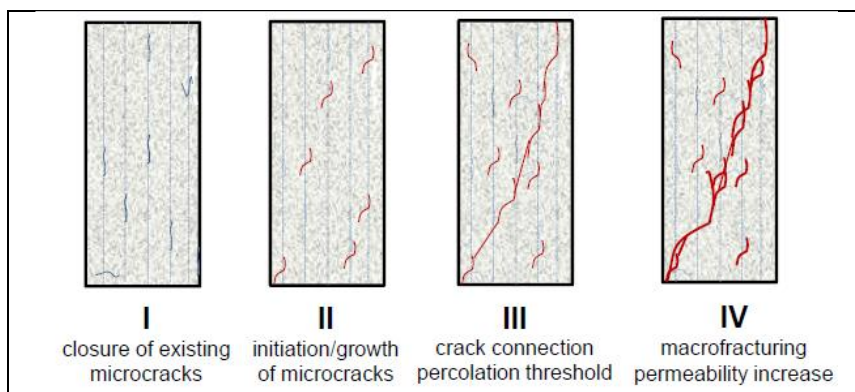
$$k = 2\mu \frac{p_o q_v}{p_i^2 - p_o^2} \frac{1}{A} \quad (1-1)$$



شکل (۵-۱) دستگاه مقاومت فشاری سه محوره با قابلیت اندازه گیری تغییر شکل، تراوایی گازی و سرعت موج اولتراسونیک (Zhang, 2016)

در این رابطه، k بیانگر تراوایی بر حسب دارسی (D)، q_v نشانگر دبی بر حسب میلی لیتر بر دقیقه ($\frac{ml}{min}$)، μ نشان دهنده میزان گرانروی بر حسب سانتی پواز (cp)، p_i نمایانگر فشار ورودی بر حسب پوند بر اینچ مربع (psi)، p_o نمایانگر فشار خروجی بر حسب پوند بر اینچ مربع (psi) و A نشان دهنده ی مساحت بر حسب سانتی متر مربع (cm^2) می باشد.

نهایتاً با توجه به رفتار تنش - کرنش - تراوایی، تنش بحرانی در لحظه ی تراوش گاز مشخص شده است (شکل ۶-۱).



شکل (۱-۶) رفتار تنش - کرنش - تراوایی رس سنگ‌ها شامل آستانه‌ی عملکرد، اتساع، تراوش و حداکثر گسیختگی (Zhang, 2016)

در سال ۲۰۱۶، هاجو و همکارانش اقدام به مدل‌سازی استخراج گرما از منابع ژئوترمال نمودند. آن‌ها با مبنا قراردادن جهت‌گیری سطوح شکسته در سازندهای عمیق و کم‌تراوای مربوط به سیستم‌های ژئوترمال و همچنین بررسی اثر حفاری جهت‌دار و فاصله‌داری چاه‌های تولیدی از یکدیگر، تأثیر موارد مذکور را بر میزان استخراج گرما از این منابع مطالعه نمودند. نتایج مدل‌سازی این افراد نشان داد که جهت‌گیری شکستگی‌ها در چاه‌های عمودی که به هم فشردگی بیشتری نسبت به چاه‌های افقی دارند در میزان افت دمایی مخزن تأثیرگذاری متفاوتی دارند (Hadgu et al., 2016).

مطالعه اثر تنش‌های برجا و هندسه شکستگی‌ها بر دهانه‌بازشدگی هیدرولیکی و تراوایی در مخازن شکسته توسط بیسدام و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شد. برای این منظور ترکیبی از روش المان محدود و شبکه شکستگی مجزا^۱ برای مدل‌سازی مخزن شکسته مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که زاویه بین امتداد شکستگی و جهت تنش اصلی نقش کنترلی بر دهانه‌بازشدگی و تراوایی دارد به‌طوری‌که دهانه‌بازشدگی برای زاویه ۱۵ درجه بیشترین مقدار را داراست زیرا در این حالت شکستگی کم‌ترین تنش برشی را تجربه خواهد کرد (Bisdorn et al., 2016). بیسدام و همکاران همچنین در سال ۲۰۱۷ نقش هندسه شکستگی بین چاهی بر تراوایی در سنگ‌های کربناته با تغییرشکل‌پذیری کم را مطالعه کردند. بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده بر اساس شبکه شکستگی مجزا و داده‌های برداشت شده از رخنمون‌ها با فاصله‌های مختلف از یکدیگر نشان داد که کوچکترین تغییر در هندسه و توپولوژی منطقه منجر به تغییر در تراوایی خواهد شد به‌طوری‌که در گذشته تجزیه و تحلیل‌های هدایت محور مانند احتمال نفوذ، قادر به تشخیص تغییرات تراوایی نبوده‌اند (Bisdorn et al., 2017).

در مطالعه‌ای دیگر چن و همکاران در سال ۲۰۱۷ ویژگی‌های هندسه شکستگی شامل دهانه‌بازشدگی، نسبت سطح تماس شکستگی و نحوه توزیع فضاهای خالی و نقش آن بر تراوایی برای سه نوع ماسه‌سنگ با دانه‌بندی کوچک، متوسط و بزرگ را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش فشار

¹ Discret Fracture Network (DFN)

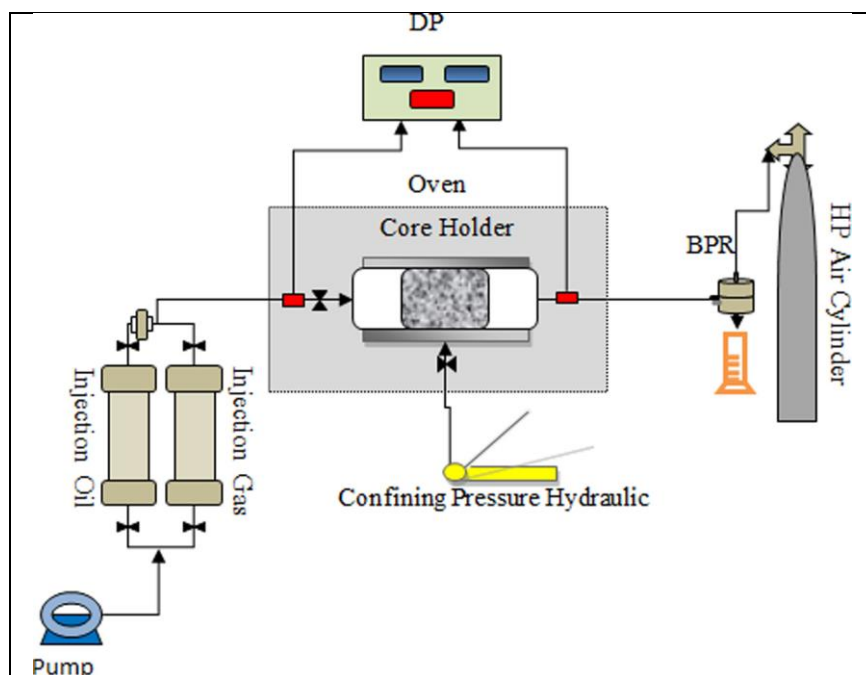
جانبی، دهانه بازشدگی برای نمونه ماسه‌سنگ با دانه‌بندی کوچک نسبت به سایر نمونه‌ها کاهش بیشتری دارد (Chen *et al.*, 2017).

پروازدوانی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ بر روی مخازن با شکستگی‌های طبیعی زیاد مطالعه نمودند. هدف آن‌ها از چنین آزمایشی، بررسی منحنی تراوایی نسبی گاز - نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز اعم از امتزاج‌پذیر و نزدیک امتزاج‌پذیر عنوان شده است. بدین منظور از نمونه‌های ماسه‌سنگی مربوط به یکی از مخازن شکسته طبیعی ایران استفاده شده است (جدول ۱-۱) (Parvazdavani *et al.*, 2017).

جدول (۱-۱) مشخصات و تصویر مغزه‌ی شکسته‌شده‌ی (مصنوعی) مورد استفاده در آزمایش (Parvazdavani *et al.*, 2017)

جنس نمونه	ماسه سنگ
طول مغزه (سانتی‌متر)	۶/۵۹
سطح مقطع (سانتی‌متر مربع)	۱۰/۹۵
حجم منافذ (سانتی‌متر مکعب)	۹/۴۷
تخلخل (درصد)	۰/۱۳۱۳
تراوایی (میلی‌داری)	۱/۳۱
	

بدین‌منظور نمونه‌های اشباع شده با نفت، در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (شکل ۱-۷) تحت تزریق با گاز دی‌اکسیدکربن قرار گرفته و با بکارگیری روش مدل‌سازی وارون، منحنی‌های تراوایی نسبی محاسبه شدند. نتیجه‌ی مقایسه‌های صورت‌گرفته بین منحنی‌های تراوایی نسبی در دو حالت تزریق امتزاج‌پذیر و نزدیک به امتزاج‌پذیر نشان می‌دهد که تغییرات، قابل توجه است؛ اما در نمونه‌هایی با شکستگی زیاد قابل توجه نیست. در طول انجام این آزمایش، نسبت به تغییر ویژگی‌های مربوط به شکستگی‌ها گزارشی اعلام نشده است.



شکل (۷-۱) نمایی شماتیک از دستگاه سیلاب‌زنی مورد استفاده در آزمایش (Parvazdavani et al., 2016)

در بررسی تأثیر جهت‌یافتگی، تعداد دسته و فراوانی ناپیوستگی‌های سنگ قبل و بعد از بهسازی با تزریق سیمان در میزان تراوایی، محمدی قراگوز و مومیوند در سال ۱۳۹۷ به مطالعه دیگری پرداختند. نتایج نشان داد که روند تأثیر جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها بر تراوایی با تغییر تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آن‌ها تغییر می‌کند (قراگوز و مومیوند، ۱۳۹۷).

لنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ رابطه بین جهت تراوایی بیشینه و تنش اصلی متوسط در سنگهای شکسته را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد در حالتی که جابه‌جایی برشی باعث القای انتقال غیرهمگن شکستگی‌ها شود، جهت تراوایی بیشینه به احتمال زیاد در راستای تنش اصلی متوسط خواهد بود (Lang et al., 2018). در همان سال کانگبین آزمایش‌هایی در ارتباط با تراوایی شکستگی‌های القایی در نمونه‌های شیلی انجام داد. در این تحقیق شکستگی‌های بسته القایی با زبری بالا ایجاد شد که می‌تواند تراوایی مخازن شیلی را بدون تزریق پروپانت افزایش دهد (Congbin, 2018). چن و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر هندسه ناپیوستگی‌ها بر جریان غیر داری تحت فشار محصورکننده را بررسی کردند. در این تحقیق از ۴ نمونه ماسه‌سنگ با دانه‌بندی‌های متفاوت استفاده شده است. نتایج نشان داد که معادله فورکهایمر (Forchheimer) با دو ضریب A و B که بیان‌کننده جریان غیر داری در شکستگی‌ها می‌باشد، حساسیت بالایی به هندسه شکستگی‌ها دارد. به‌طوری‌که با افزایش فشار محصورکننده ضرایب معادله به دلیل کاهش دهانه بازشدگی و توزیع غیرهمگن حفرات به هم‌پیوسته افزایش می‌یابد (Chen et al., 2019).

در مطالعه‌ای دیگر به بررسی اثر پارامترهای جهت تنش و زبری بر تراوایی در سنگ‌های شکسته موجود در طبیعت توسط عزیزمحمدی و صداقت در سال ۲۰۲۰ پرداخته شده است. در این تحقیق از روش ماتریکس درزه مجزا (DFM) برای شبیه‌سازی درزه‌های برداشت شده در طبیعت و از روش المان محدود و حجم محدود به منظور بررسی رفتار سیال درون درزه‌ها استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش زبری میزان تراوایی کاهش می‌یابد. همچنین محورهای ماتریس تراوایی تطابق مناسبی با جهت اصلی تنش‌ها و جهت شکستگی‌های هدایت‌کننده جریان ندارد. بنابراین تعیین ماتریس کامل تراوایی برای مدل‌سازی جریان سیال در سنگ‌های شکسته لازم و ضروری است (Azizmohammadi and Sedaghat, 2020).

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به صورت آزمایشگاهی به بررسی پاسخ تراوایی در سنگ‌های شکسته تحت تأثیر فرایند توامان هیدرولیک-مکانیک و هندسه ناپیوستگی پرداختند. از نمونه‌های ماسه سنگ و آهک به منظور انجام آزمایش استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان داد که میزان تراوایی برای نمونه ماسه‌سنگ دارای دو ناپیوستگی ۲ تا ۳ برابر تراوایی برای نمونه ماسه‌سنگ با یک ناپیوستگی می‌باشد. اما میزان تراوایی برای نمونه‌های آهک در حالت بدون ناپیوستگی و چندین ناپیوستگی یکسان است (Zhang et al., 2020).

آریان‌فر و رمضان زاده در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش عددی به بررسی تغییرات تراوایی سنگ آهک در اثر تنش‌های محصورکننده موثر پرداختند. نتایج نشان داد که تراوایی در جهت تنش بزرگ‌تر بیشتر از جهت‌های دیگر تنش می‌باشد (Arianfar and Ramezanzadeh, 2020). بررسی تأثیر شکستگی‌ها بر میزان تراوایی تحت آزمایش سه محوره واقعی مطالعه دیگری است که در سال ۲۰۲۰ توسط ژیانگ و همکاران انجام شد. در این تحقیق از نمونه‌های ماسه‌سنگ استفاده شده است. نتایج نشان داد که میزان تراوایی، وابسته به تنش، جهت شکستگی‌ها و جهت تنش‌ها می‌باشد (Jiang et al., 2020).

آرین‌فر و همکاران در سال ۲۰۲۱ به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی اثر زبری سطح درزه و میزان بازشدگی بر رفتار هیدرولیکی درزه‌ها پرداختند. نمونه‌های بتنی برای این منظور استفاده شد. بر این اساس، زبری سطح درزه به تنهایی قادر به بررسی رفتار هیدرولیکی درزه‌ها نمی‌باشد و پارامترهای دیگر به صورت هم‌زمان نیازمند آزمایش و تحلیل می‌باشد (Arianfar et al., 2021). در همان سال گائو و همکاران به بررسی میزان تراوایی در ارتباط با اندرکنش شکستگی و ماتریکس، تحت دماها و تنش‌های مختلف پرداختند. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های زغال سنگ انجام شد. نتایج نشان داد که تحت فشار حفره‌ای ثابت، با افزایش تنش موثر، تراوایی کاهش می‌یابد و تحت تنش موثر ثابت، با افزایش فشار حفره‌ای تراوایی به صورت نمایی کاهش می‌یابد (Gao et al., 2021).

۱-۳-۳ نمونه‌های مصنوعی ساخته شده به منظور بررسی تاثیر

شکستگی‌ها بر تراوایی در مطالعات پیشین

در سال ۱۳۹۴ شریفی گلوپیک و همکاران به بررسی تراوایی نسبی به روش پایا روی مغزه‌های ترکیبی کربناته با استفاده از پرتو ایکس جهت تعیین اشباع درجا پرداختند. این تحقیق برای تشکیل مغزه ترکیبی، نمونه‌های پلاگ یک گروه سنگی به هم متصل شده است (شریفی گلوپیک و همکاران، ۱۳۹۴).

در مطالعه دیگری در سال ۱۳۹۸ لطفی و تخم‌چی به بررسی ساخت مغزه‌های مصنوعی شکسته با الگوی زبری برای آزمایش در شرایط مخزن پرداختند (لطفی و تخم‌چی، ۱۳۹۸). در سال ۱۳۹۶ امیری و مومیوند اقدام به ساخت ماسه‌سنگ مصنوعی با حوزه وسیعی از تخلخل به منظور مطالعه در مخازن نفتی پرداختند (امیری و مومیوند، ۱۳۹۶). در مطالعه‌ای مشابه در سال ۲۰۱۵ لی و همکاران به ساخت و مطالعه ماسه‌های مصنوعی ساخته شده از سیمان پرتلند پرداختند (Li et al., 2015).

۱-۴- نتیجه گیری

با توجه به بررسی اولیه و همچنین مطالعه و بررسی مطالعات پیشین که در رابطه با مباحث هدایت هیدرولیکی صورت گرفته است، مشخص گردید که تاکنون در مطالعات صورت گرفته به بررسی اثر فاصله‌داری و جهت‌داری به صورت جداگانه پرداخته نشده است. از طرفی اشراف بر اثر این دو پارامتر روی هدایت هیدرولیکی می‌تواند کمک به‌سزایی در پیش‌بینی رفتار سیال داشته باشد. با بررسی مطالعات گذشته مشخص شد در موارد زیادی برای بالا بردن دقت آزمایشات در بررسی تک پارامتری یا چند پارامتری موضوع مطالعه از نمونه‌های مصنوعی استفاده شده است. برای بالا بردن دقت آزمایشات، همگن بودن نمونه‌ها لازم است تا وجود پارامترهای دیگر به صورت ناخواسته روی نتایج آزمایش تاثیرگذار نباشد. بنابراین در این مطالعه از نمونه‌های مصنوعی استفاده خواهد شد.

فصل ۲ : پارامترهای موثر بر رفتار هیدرولیک توده سنگ درزه‌دار

۲-۱ مقدمه

به طور کلی شکستگی به شکل گرفتن صفحات جدایی در سنگ گفته می‌شود. در واقع شکستگی‌ها عبارتند از بریدگی‌های صفحه‌ای در ابعاد ماکروسکوپی که در اثر تغییر شکل یا دیاژنز فیزیکی در سنگ‌ها بوجود می‌آیند. شکستگی‌ها در ابتدا باز بوده ولی در ادامه ممکن است توسط کانی‌های مختلف پر شوند و به همین دلیل در جریان سیالات تسریع و تعدیل بوجود می‌آورند. در یک تعریف جامع شکستگی‌ها، ناپیوستگی‌هایی هستند که بعد از دیاژنز در سنگ شکل می‌گیرند (Priest, 1993). شکستگی‌ها بر اساس مکان قرارگیری به دو دسته شکستگی‌های سطحی (واقع در سطح زمین) و عمقی (واقع در عمق زمین) و بر اساس روش‌های شناسایی و برداشت آن‌ها نیز به دو دسته روش‌های نگاشت مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. از مهم ترین پارامترهای ژئومکانیکی می‌توان به تخلخل^۱، سیستم شکستگی^۲، طول^۳، فراوانی^۴ و توزیع مربوط به آن، بازشدگی^۵، پرشدگی^۶، زبری^۷، سختی^۸، ارتباط شبکه‌ای، فاصله‌داری^۹ و جهت‌گیری^{۱۰} اشاره کرد.

۲-۲ تخلخل

به طور معمول در مخازن کربناته تخلخل حفره‌ای و تخلخل ناشی از شکستگی‌ها گسترش وسیعی دارند. وجود هم‌زمان این دو نوع تخلخل ثانویه به همراه تخلخل اولیه در مخازن کربناته باعث شکل‌گیری یک سیستم تخلخل سه‌گانه پیچیده می‌شود. شناخت صحیح از وضعیت تخلخل در مخازن کربناته هتروژن برای ارزیابی پتروفیزیکی و شبیه‌سازی دینامیک این مخازن حیاتی می‌باشد.

بر پایه رده‌بندی جدید ژنتیکی تخلخل که توسط آهر در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است، فرآیندهای ایجادکننده یا تغییردهنده تخلخل به‌طور کلی شامل فرآیندهای رسوبی یا ته‌نشستی، فرآیندهای دیاژنزی و شکستگی است. این ۳ فرایند در ۳ رأس مثلث قرار داده شده‌اند (شکل ۲-۱). اضلاع مثلث نیز تخلخل‌هایی هیبریدی را که محصول دو فرایند باشند را نشان می‌دهد (Ahr, 2008).

¹ porosity Porosity

² systematic / non-systematic

³ length

⁴ frequency

⁵ aperture

⁶ filling

⁷ roughness

⁸ stiffness

⁹ spacing

¹⁰ orientation



شکل (۱-۲) رده‌بندی ژنتیکی تخلخل ارائه شده توسط آهر ۲۰۰۸ (پرهام و کمالی ۱۳۹۱)

۱-۲-۲ تخلخل‌های حاصل از فرآیندهای رسوبی

تخلخل‌هایی که در زمان رسوب‌گذاری و تحت تأثیر فرایندهای رسوبی در نمونه‌های مورد مطالعه تشکیل شده‌اند شامل تخلخل میان‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، فنسترال و پناهگاهی است که در ادامه مهم‌ترین آن‌ها یعنی تخلخل میان‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای معرفی شده‌اند.

- تخلخل میان‌دانه‌ای

این نوع تخلخل همه فضاهای خالی میان‌دانه‌ها را در زمان رسوب‌گذاری را شامل می‌شود و از نوع اولیه و تحت کنترل فابریک سنگ است. در رسوبات کربناتی بدون گل، تخلخل میان‌دانه‌ای در زمان ته‌نشست غالب است. پس از ته‌نشست، این فضاهای خالی بر اثر عوامل مختلف از بین می‌رود (Moore, 1989).

- تخلخل درون‌دانه‌ای

این نوع تخلخل اولیه و وابسته به فابریک سنگ است. میزان این نوع تخلخل نسبت به انواع دیگر کمتر است و افزون بر این به دلیل جدا بودن، نفوذپذیری کمی دارد بنابراین این نوع تخلخل از دید مخزنی بسیار کم اهمیت است (Moore, 1989).

۲-۲-۲ تخلخل حاصل از فرایندهای دیاژنتیکی

تخلخل اولیه در زمان رسوبگذاری ایجاد می‌شود در حالی که تخلخل دیاژنتزی را فرایندهای پس از رسوب-گذاری به وجود می‌آورند (Ahr, 2008). نکته بنیادین در شناخت و بهره‌بردای از مخازن دیاژنتیکی، توانایی شناخت انواع تخلخل و رده‌بندی آن‌ها برپایه منشأ است.

- تخلخل انحلال سیمان یا زمینه

این نوع تخلخل بر اثر انحلال سیمان زمینه سنگ ایجاد می‌شود و یکی از مهمترین تخلخل‌های دیده شده در مخازن نفتی است. در این نوع تخلخل سیمان انحلال یافته و تخلخل میان‌دانه‌ای ثانویه ایجاد می‌شود. فضای خالی حاصل در مواردی با سیمان دیگری کاهش یافته و در محل‌هایی دیگر به صورت فضای خالی باقی می‌ماند.

- تخلخل قالبی^۱

تخلخل قالبی از نوع تخلخل‌های ثانویه و انتخاب شده به وسیله فابریک سنگ است. این تخلخل بر اثر انحلال آلوکرها تشکیل می‌شود. انحلال سنگ‌آهک و رسوبات ممکن است در هر زمانی در طی تاریخچه تدفین روی دهد. رخداد انحلال همراه با افزایش حجم فضاهای خالی در پاسخ به تغییرات شیمی سیال درون منفذی مانند تغییر در شوری، دما یا تغییرات فشار CO₂ رخ می‌دهد.

-تخلخل حفره‌ای^۲

این نوع تخلخل به طور چیره در اثر افزایش انحلال تخلخل قالبی و نیز انحلال سیمان زمینه تشکیل شده است. تخلخل حفره‌ای جزو تخلخل‌های ثانویه و مستقل از فابریک سنگ است. انحلال در مراحل پس از پایدار شدن کانی‌ها در تاریخچه تدفین سنگ‌های کربناتی هم رخ می‌دهد و سبب تشکیل تخلخلی می‌شود که فابریک پیشین مانند دانه، سیمان و ماتریکس را قطع می‌کند (پرهام و کمالی ۱۳۹۱).

۳-۲-۲ تخلخل حاصل از شکستگی مکانیکی

تخلخل شکستگی^۳

این تخلخل ثانویه است و در کنترل فابریک سنگ نیست. شکستگی در مخازن کربناتی متداول و مؤثر است و این به دلیل خاصیت شکنندگی کربنات‌ها نسبت به طبیعت انعطاف‌پذیرتر سنگ‌های دانه‌ریز سیلیسی کلسیتی است که به صورت میان‌لایه با آن‌ها قرار دارند. شکستگی در هر زمانی طی تاریخچه تدفین رسوبات کربناتی می‌تواند رخ دهد و می‌تواند با گسل‌خوردگی، چین‌خوردگی، تراکم تفریقی، حرکت گنبد نمکی و شکستگی‌های هیدرولیکی در منطقه با فشارهای بالا مرتبط باشد (Blount & Moore, 1969).

¹ Moldic

² Vuggy porosity

³ Fracture porosity

تخلخل برشی

تخلخل برشی ثانویه است و می‌تواند در کنترل فابریک سنگ باشد یا نباشد. برشی شدن سنگ‌های آهکی در موقعیت‌های مختلف مانند ریزش به دلیل انحلال کربنات یا می‌تواند به دلیل انحلال تبخیری‌ها، غسل‌خوردگی و تشکیل خاک رخ دهد. برشی شدن می‌تواند تخلخل را افزایش دهد به‌طوری که محیط، مخزنی برای هیدروکربن یا میزبانی برای کانی‌زایی شود (پرهام و کمالی ۱۳۹۱).

۲-۳ شکل‌شناسی شکستگی‌ها

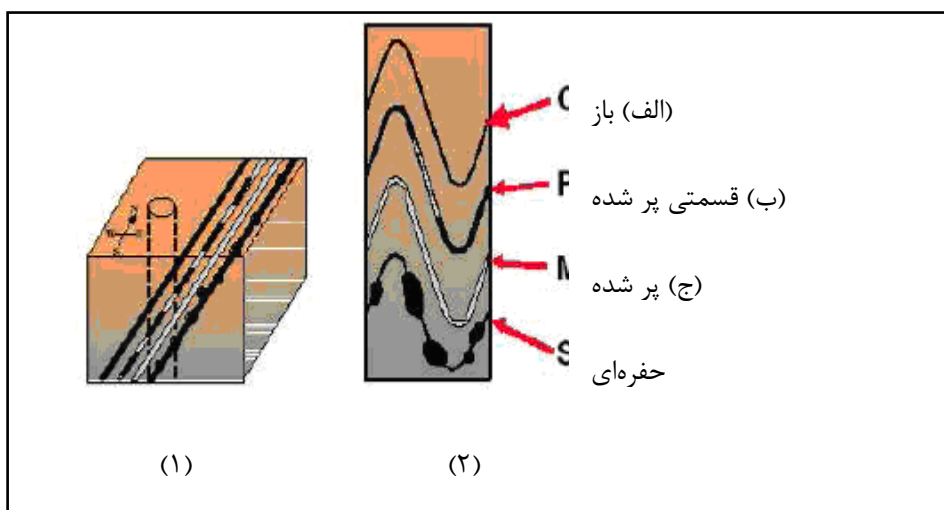
یکی از عوامل مهم تأثیرگذاری شکستگی‌ها در تخلخل و تراوایی، شکل‌شناسی سطح شکستگی‌ها است (Priest & Hudson 1981). بررسی شکل‌شناسی می‌تواند با مطالعه مغزه‌ها، رخنمون‌ها و گاهی بکارگیری نمودارهای چاه‌پیمایی صورت گیرد. در هر حال چهار نوع شکل بنیانی شکستگی‌های باز، نیمه‌بسته، پر شده به وسیله کانی‌ها و حفره‌ای در سطوح شکستگی‌ها قابل ملاحظه است که در شکل ۲-۲ آورده شده است. در قسمت (۱) این شکل انواع شکستگی‌های مورد اشاره در برخورد با چاه نمایش داده شده است و در قسمت (۲) این شکل فرم باز شده شکستگی‌ها به صورت دو بعدی که شامل موارد زیر است نشان داده شده است:

الف- شکستگی‌های دارای دهانه بازشدگی باز که برای عبور سیال مناسب است.

ب- شکستگی‌های نیمه پر شده با انواع کانی‌ها که تخلخل کمتری نسبت به شکستگی‌های باز از خود نشان می‌دهند.

ج- شکستگی‌های پر شده که کاملاً با کانی‌های دیگر پر شده اند.

د- شکستگی‌های حفره‌ای در طول صفحه شکستگی که شکل‌های بی‌قاعده‌ای از خود نشان می‌دهند.



شکل (۲-۲) شکل‌شناسی شکستگی‌ها (Schlumberger, www.slb.com)؛ (۱) نمایش انواع شکستگی‌های مورد اشاره در برخورد با چاه (۲) فرم باز شده شکستگی‌ها به صورت دو بعدی.

۲-۳-۱ سیستم شکستگی

در سال ۱۹۶۱ میلادی، هاجسون نتایج مطالعات خود را در مورد توسعه‌ی الگوهای درزه بر روی سنگ‌های منطقه‌ی آریزونا و یوتا در بولتن انجمن زمین‌شناسان نفت آمریکا^۱ به چاپ رساند که در آن بین درزه‌های سیستماتیک و غیرسیستماتیک تمایز قائل شده بود (Hadgson, 1961). منظور از درزه‌های سیستماتیک، درزه‌های صفحه‌ای، موازی و با فواصل برابر از یکدیگر می‌باشد؛ درحالی‌که منظور از درزه‌های غیرسیستماتیک، درزه‌هایی هستند که در فرم و حالت، وضعیتی بی‌قاعده داشته و در جهت‌گیری و میزان فواصل از یکدیگر نامرتب می‌باشند (شکل ۲-۳).

درز لایه‌ها^۲ بر مبنای جهت‌گیری شکستگی‌ها و با توجه به شکست لایه‌ها^۳ (خصوصاً درزه‌ها) به درزه‌های امتدادی^۴ (همان‌طور که در شکل ۲-۳-الف مشاهده می‌شود، به موازات امتداد سطح لایه‌بندی قرار گرفته است)، درزه شیبی^۵ (عمود بر لایه‌بندی) و درز لایه‌ها (به موازات لایه‌بندی؛ همان‌طور که در شکل ۲-۳-الف دیده می‌شود) تقسیم‌بندی می‌شوند.

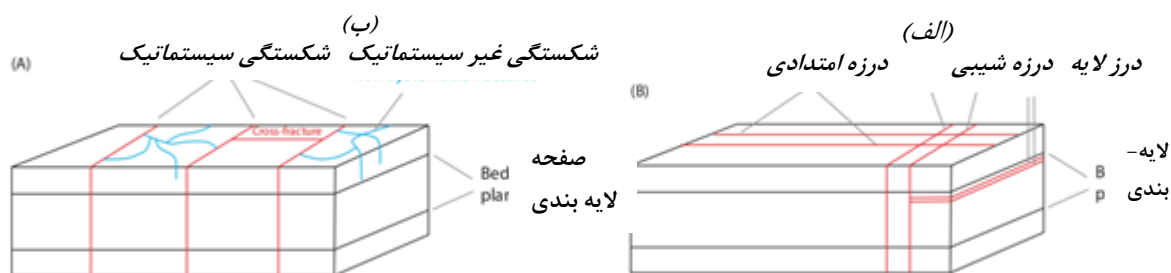
¹ American Association of Petroleum Geologists (AAPG)

² bedding Joints

³ bedding Fractures

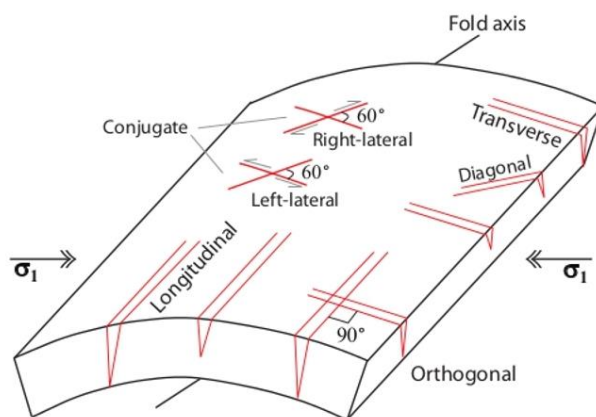
⁴ strike joints

⁵ dip joints



شکل (۲-۳) (الف) نمایش شماتیکی از انواع درزه‌ی سیستماتیک (ب) نمایش شماتیکی از درزه‌ها و سیستم شکستگی سیستماتیک و غیرسیستماتیک (Sorkhabi, 2014)

درزه‌های غیرسیستماتیک منحنی شکل بوده و اغلب در سطح لایه‌بندی به اتمام می‌رسند (شکل ۲-۳-ب). شکستگی‌ها و درزه‌های سیستماتیک سنگ، غالباً در یک یا بیش از یک مجموعه شکستگی^۱ توسعه می‌یابند. این درزه‌ها از جهت فرم، مجموعه شکستگی‌های فراگیر عمود بر سطوح لایه‌بندی هستند که ممکن است توسط درزه‌های عرضی^۲ به یکدیگر نیز متصل شده باشند. البته مجموعه شکستگی‌ها نیز خود ممکن است در یک زاویه‌ی تماس دوسطحی ثابت، متقاطع باشند. به عنوان مثال، شکستگی‌های مزدوج (توأم)^۳، زاویه‌ی دوسطحی ۳۰-۶۰ درجه دارند؛ درحالی‌که شکستگی‌های متعامد^۴، زاویه‌ی دقیقاً برابر با ۹۰° دارند (شکل ۲-۴). این مفاهیم برای اولین بار توسط زمین‌شناسان و در نیمه‌ی اول قرن ۲۰ به فرمول درآمد (Singhal and Gupta, 2010).



شکل (۲-۴) نمایش دسته‌بندی گسل‌ها در انواع طولی، عرضی، مزدوج (توأم)، قطری (مورب)، متعامد در یک ساختار چین (Singhal and Gupta, 2010).

¹ fracture sets
² cross-fracture
³ conjugate
⁴ orthogonal

۲-۳-۲ طول شکستگی

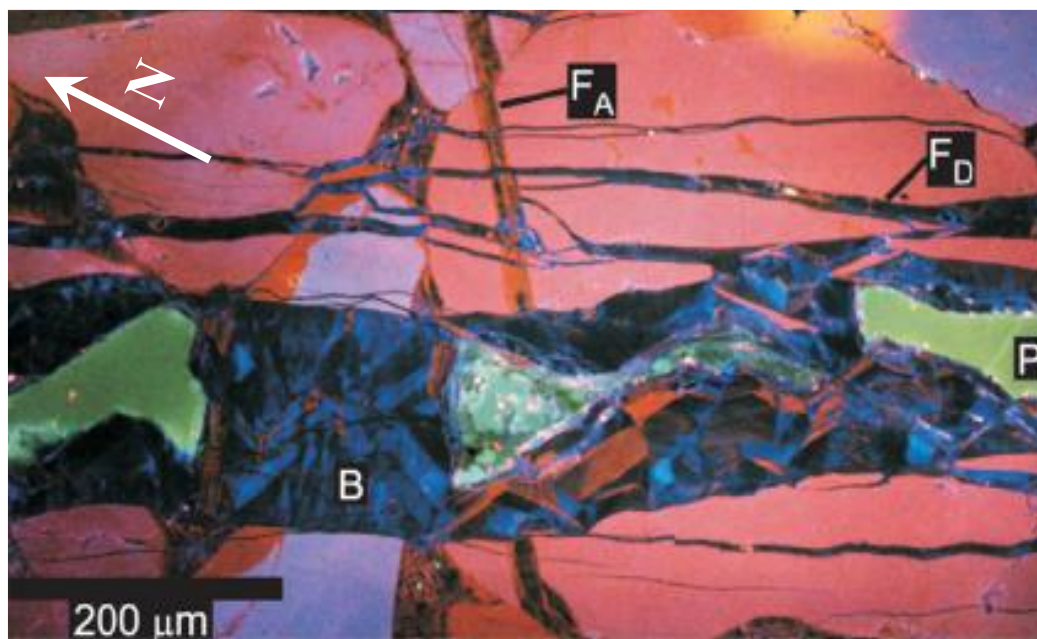
طول شکستگی میزان تداوم جانبی یک ساختار را نمایش می‌دهد. طول اثر کمتر از ۱ متر تداوم خیلی کمی را نشان می‌دهند؛ این درحالیست که به ازای طول اثر بیشتر از ۲۰ متر، شکستگی‌ها تداوم بسیار زیادی خواهند داشت. البته باید توجه داشت که چنین ارقامی در مقیاس‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که صحبت از مطالعات مخزنی به میان می‌آید، چنین طول‌هایی عموماً مطرح نبوده و یا به ندرت مطرح می‌باشند؛ زیرا ابعاد شکستگی‌ها و میکروترک‌هایی که نقش عامل تراواکننده را در مخزن ایفا می‌نمایند بسیار کوچک‌تر از این اعداد است. به عنوان مثال میکرو شکستگی‌ها، بعضاً طولی در حدود چند میلی‌متر و حتی کمتر دارند که طبیعتاً برای مشاهده‌ی درست آن‌ها می‌بایست از میکروسکوپ‌های قوی استفاده نمود (Anders et al., 2014).

۲-۳-۳ فراوانی

منظور از فراوانی شکستگی، بیان کمی از وقوع یا رخداد شکستگی‌هاست. به بیان دیگر، شکستگی‌ها را می‌توان به‌صورت کمی در یک بعد، دو بعد و یا سه بعد بیان کرد. در بیان یک‌بعدی، تعداد شکستگی‌ها برای یک طول مشخص مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در بیان دو بعدی، مفهوم تعداد شکستگی‌ها تبدیل به شدت شکستگی می‌شود. بنابراین شدت شکستگی در سطح داده شده بررسی می‌شود. این پارامتر در حالت سه بعدی نیز به‌صورت محاسبه‌ی کمی چگالی شکستگی در حجم داده شده بیان می‌گردد.

۲-۳-۴ پرشدگی

در تمام سنگ‌ها، درصدی از شکستگی‌ها و میکروشکستگی‌ها توسط مواد ثانویه مثل سیمان یا کانی‌ها پرشدگی دارند. مشخصه‌ی کاملاً مشهود این پدیده در سنگ‌های غنی از کوارتز و برخی از کربناته‌ها وجود دارد (Laubach, 2003؛ Gale et al., 2010)؛ به‌طوری‌که حتی با استفاده از مطالعات میکروسکوپی (Hicks, 1884؛ Anders et al., 2014)، سیمانی بودن منافذ خالی در بین سنگ میزبان مشاهده می‌شود (شکل ۲-۵).



شکل (۲-۵) نمایش مقطع نازک ماسه‌سنگی تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی مبتنی بر کاتدولومینسانس؛
(Hooker et al., 2014).

در شکل ۲-۵، میکروشکستگی مورد نظر با طول چند ده میلی‌متر و بازشدگی سینماتیک^۲ به اندازه‌ی کمتر از ۰/۱ میلی‌متر (تقریباً ۰/۰۰۱ میلی‌متر) در بخش‌هایی با کانی کوارتز (B) پر شده است که این رخداد بیشتر در ماسه‌سنگ‌ها اتفاق می‌افتد (Hooker et al., 2014). به‌طور کلی می‌توان گفت که در عموم شکستگی‌ها، پدیده‌ی پرشدگی به‌صورت کلی یا جزئی وجود دارد. در مواردی مانند ماسه‌سنگ‌ها که میکروترک‌ها با کوارتز پر می‌شوند، چالش اصلی اینجاست که در مواقعی دیواره‌های شکستگی حتی تحت تابش نور، نامرئی بوده و رؤیت نمی‌شوند. طبیعتاً چنین رخدادی می‌تواند در برخی موارد نسبت به تشخیص مرزهای موجود، خصوصاً در اکثر سنگ‌های ماسه‌ای مشکل جدی ایجاد نماید.

مطالعه در این خصوص در مورد سیالات درگیر نیز انجام گرفته است. در سال ۱۹۴۹ میلادی، تاتل توصیفی بر مبنای پرشدگی شکستگی‌ها با سیال به منظور توصیف بهتر ترک‌های مرتبط با این نوع سیالات ارائه داد. نتایج مطالعات وی پس از او نیز به عنوان توصیفی استاندارد برای سیالات درگیر باقی ماند (Groshong, 1988; Tuttle, 1949).

در مورد شیل‌ها و همچنین گل‌سنگ‌هایی که ذخایر گاز را در خود جای داده‌اند، رفتارهای خاصی مشاهده می‌شود. میزان تولید از این منابع که امروزه از نظر اقتصادی نیز اهمیت یافته‌اند را نمی‌توان صرفاً به ماتریکس کم‌تراوای آن‌ها نسبت داد؛ بلکه تفسیر تحلیلی چنین رخدادی به وجود شبکه‌ای از ریزشکستگی‌های تراواکننده که جمعیت پراکنده‌ای در محل دارند نسبت داده می‌شود (Apaydin et al., 2012).

¹ cathodoluminescence

² kinematic apertures (opening displacements)

این درحالی است که گال^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ استدلال در این حوزه و چنین تفسیری را مستلزم وجود شکستگی‌هایی که مقیاس طولی آن‌ها در ابعاد سانتی‌متر، دسی‌متر و حتی بیشتر است می‌دانند. در واقع آنان معتقدند که چنین تفسیری تنها با وجود اطلاعات چنین شکستگی‌هایی در این ابعاد میسر است که در اختیار مهندسين نفت و ژئوفیزیک قرار داده شده است. درحالی که وجود این میکروشکستگی‌ها با وجود امکان رخداد در شیل‌ها، اصولاً امری غیرمعمول می‌باشد. چرا که میکروشکستگی‌ها به‌طور میانگین و با کمک گرفتن از حس زمین‌شناختی، عرضی حدود چند میکرون و طول یا ارتفاعی در حدود چند میلی‌متر دارند (Gale *et al.*, 2014). به عنوان مثال می‌توان میکروترک‌های پرشده با بیتومین را در شیل‌های دونین کتزکیل^۲ (Lash and Engelder, 2005) و شیل‌های سازند فریو^۳ متعلق به الیگوسن را نام برد (Capuano, 1993) که مؤید این مطلب می‌باشند. تمامی این موارد به این مسئله اشاره دارد که در کنار وضعیت شکستگی‌ها و میکروترک‌ها و میزان بازشدگی آن‌ها، پر یا خالی بودن آن‌ها و حتی نوع ماده‌ی پرکننده نیز در نتایج مطالعات می‌تواند تأثیرگذار باشد.

۲-۳-۵ سختی

سختی شکستگی‌ها، پارامتر دیگری است که در مورد شکستگی‌ها مطرح است. این پارامتر که بر حسب پاسکال بر میلی‌متر بیان می‌گردد، بیانگر تغییر شکل تنشی شکستگی با پاسخ به تنش نرمال و برشی است. این بدین مفهوم است که چنانچه شکستگی تحت تأثیر تنش نرمال قرار گیرد، چه میزان مقاومت در برابر بسته‌شدن از خود نشان می‌دهد. این پاسخ در برابر تنش نرمال، اصطلاحاً سختی نرمال^۴ نیز نامیده می‌شود. در مورد پاسخ‌دهی شکستگی به تنش برشی، فرآیند بدین شکل خواهد بود که اگر شکستگی تحت تأثیر تنش برشی قرار گیرد، مقدار مقاومت آن در برابر جابه‌جایی برشی چقدر خواهد بود. ماحصل این جریان تحت عنوان سختی برشی^۵ نامیده می‌شود. در بین پارامترها و خصوصیات نسبت داده شده به شکستگی‌ها، به‌دست‌آوردن و اخذ داده‌های منتسب به سختی شکستگی‌ها، سخت‌ترین و دشوارترین نوع جمع‌آوری داده محسوب می‌شود؛ چرا که این کار نیازمند فعالیت آزمایشگاهی در حوزه‌ی ژئومکانیک و شکست سنگ‌ها می‌باشد (فرهمند، ۱۳۹۱).

۲-۳-۶ ارتباط شبکه‌ای

چنانچه پیش از این نیز ذکر شد، تخلخل و تراوایی از جمله خصوصیات پتروفیزیکی مطرح هنگام وجود شکستگی‌ها می‌باشند. چنانچه شکستگی‌ها در کل مجموعه‌ی مخزنی در نظر گرفته شوند، فصل مشترک

¹ Gale

² Catskill

³ Frio Formation

⁴ normal stiffness

⁵ shear stiffness

میان شکستگی‌های طبیعی، در صورت پر نشدن، شبکه‌ای کاملاً تراوا به منظور حرکت سیالات در سیستم فراهم می‌کند؛ این درحالیست که شکستگی‌های منفرد^۱ که با دیگر شکستگی‌ها در ارتباط نمی‌باشند، نمی‌توانند از نظر هیدرولیکی مؤثر بوده و هدایت هیدرولیکی را ارتقا ببخشند. از آنجایی که در بررسی شکستگی‌ها هم‌زمان با مطالعه بر روی پارامتر مورد نظر می‌بایست نسبت به مقادیر و تغییرات دیگر پارامترها نیز به اندازه‌ی کافی مطلع بود، احتمال افزایش این پارامتر نیز با افزایش فراوانی شکستگی‌ها به‌صورت گسترده و همچنین افزایش طول آن‌ها در حجم سنگ داده شده، نیز بیشتر خواهد شد. به بیان ساده‌تر، هرچه شکستگی‌های بیشتر با طول‌های بزرگتر در یک حجم مشخصی وجود داشته باشد، شانس برخورد شکستگی‌ها با یکدیگر و ایجاد شبکه‌ای از شکستگی‌ها به مراتب بیشتر خواهد شد (فرهمند، ۱۳۹۱).

۲-۳-۷ فاصله‌داری

فاصله‌داری شکستگی‌ها و رابطه‌ی آن با ضخامت لایه یا موقعیت ساختاری (مرتبط با گسل یا مرتبط با چینه‌شناسی یا هیچکدام)، از جمله داده‌های مهم محسوب می‌شود. در رخنمون‌ها و برونزدگی‌ها^۲، فاصله‌ی شکستگی‌ها می‌تواند با برچسب‌زنی^۳ در راستای خط بررسی انجام شود. نتایج مشاهدات محققان نشان می‌دهد که لایه‌های خیلی سفت درزه‌های بیشتری نسبت به لایه‌های خیلی ضعیف دارند؛ و برای لیتولوژی داده شده، لایه‌های نازک‌تر، درزه‌های بسته‌تری دارند. انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۴ به منظور کلاسه‌بندی فاصله‌داری شکستگی‌ها توصیه کرده که آن‌ها را در بازه‌های بسیار نزدیک، خیلی نزدیک، نزدیک، متوسط، زیاد، خیلی زیاد و بسیار زیاد دسته‌بندی کنند. این کلاسه بندی در جدول ۲-۱ آورده شده است.

¹ isolate

² outcrops

³ tape

⁴ International Society for Rock Mechanics (ISRM)

جدول ۱-۲ کلاسه‌بندی پارامتر فاصله‌داری شکستگی‌ها مطابق با پیشنهاد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ
(Sorkhabi, 2014)

فاصله داری	بازه ی پیشنهادی (متر)
بسیار نزدیک	< 0.2
خیلی نزدیک	$0.2 - 0.6$
نزدیک	$0.6 - 2$
متوسط	$2 - 6$
زیاد	$6 - 20$
خیلی زیاد	$20 - 60$
بسیار زیاد	> 60

تعداد شکستگی‌ها در یک واحد طول، فراوانی شکستگی نامیده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که مفهوم فراوانی شکستگی درست برعکس مفهوم فاصله‌داری است و در مورد آن می‌توان رابطه‌ی (۱-۲) را نوشت.

$$(1-2) \quad \text{فراوانی شکستگی} = \frac{\text{طول نمونه برداری}}{\text{تعداد شکستگی}}$$

۲-۳-۸ جهت‌داری

یکی از ویژگی‌هایی که در بررسی میزان هدایت هیدرولیکی نقش دارد، جهت‌داری فضایی خود شکستگی است. منظور از جهت‌داری فضایی و مشخصات مرتبط با آن، ایجاد نگرشی نسبت به شکستگی شامل امتداد، زاویه‌ی شیب و جهت شیب آن است. در انجام مطالعات، می‌توان این داده‌ها را پس از جمع‌آوری بر روی شبکه‌ی استریوگرافی ترسیم نمود (فرهمند، ۱۳۹۱).

۲-۴- نتیجه‌گیری فصل

اولین گام جهت مطالعه مخازن (به‌ویژه مخازن شکسته)، شناسایی شکستگی‌ها و سپس بررسی ویژگی‌های آن‌ها می‌باشد. با وجود اینکه تقریباً تمامی مخازن نفتی به نحوی تحت تأثیر شکستگی‌های طبیعی قرار می‌گیرند، هنوز نقش و رفتار شکستگی‌ها در مخازن به خوبی شناخته نشده است، چرا که شکستگی‌ها دارای رفتار متفاوتی هستند که پیش‌بینی در مورد مخازن را دشوار می‌سازد، به دلیل اینکه در بررسی‌ها معمولاً نتیجه دیده شده تلفیقی از تأثیر چندین ویژگی است. در مخازن نفتی با میزان تخلخل و تراوایی ناچیز، شکستگی‌ها از جمله عوامل کنترل‌کننده جریان سیال می‌باشد. از جمله پارامترهای هندسی

شکستگی‌ها می‌توان به جهت‌داری، فاصله‌داری، چگالی شکستگی، دهانه بازشدگی، طول شکستگی و ارتباط شکستگی‌ها با یکدیگر اشاره کرد. بنابراین شناخت و بررسی پارامترهای شکستگی تاثیرگذار بر جریان سیال، کمک شایانی به‌منظور به دست آوردن ضریب بازدهی مخزن ایفا خواهد کرد.

|

فصل ۳: آماده سازی نمونه ها و بررسی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن ها

۳-۱ مقدمه

از آنجایی که برای شکستگی‌ها، ویژگی‌های گوناگونی تعریف می‌شود، تک تک خصیصه‌های مربوط به آن‌ها بر نتیجه‌ی بررسی‌ها اثرگذار است. تمرکز همزمان بر روی تمامی این پارامترها عملاً ناممکن و البته نامطلوب است. در این فصل به منظور بررسی تاثیر جهت‌داری و فاصله‌داری روی تراوایی به صورت جداگانه ابتدا به انتخاب بهترین جنس نمونه خواهیم پرداخت. بدیهی است که برای بررسی هر ویژگی به صورت جداگانه باید سایر متغیرها ثابت باشند. بنابراین از نمونه با جنس مصنوعی استفاده شده است. بهترین جنس نمونه مصنوعی در اکثر مطالعات بتن می‌باشد ولی در این پژوهش به معرفی و استفاده از نمونه با جنس فیبر نخ‌دار پرداخته خواهد شد. یک نمونه از هر جنس تهیه شده و روی آن‌ها مطالعه صورت گرفت و از بین این دو جنس بهترین جنس نمونه با بهترین ویژگی انتخاب شد و برای ۱۷ حالت مختلف نمونه‌ها برای انجام آزمایشات ساخته شدند.

۳-۲ تعیین اندازه نمونه‌ها

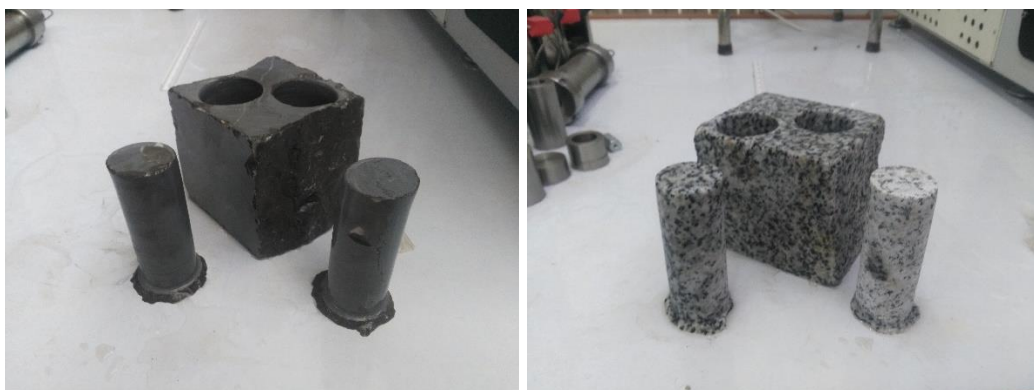
پس از بررسی سوابق مطالعاتی (درستکار و همکاران، ۱۳۸۸؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۳؛ صانعیان، ۱۳۹۳؛ Singh et al., 2016؛ Caulk et al., 2016)، و شرایط دستگاه موجود در آزمایشگاه ژئومکانیک نفت دانشگاه صنعتی شاهرود، سایز قطر مغزه‌های موردنظر به میزان ۱/۵ اینچ ($\sim 3/8$ cm) تعیین شد. همچنین طول نمونه جهت استاندارد سازی تمام نمونه‌ها به میزان ۱۰ سانتی‌متر تعیین گردید. به دلیل استفاده از این طول برای نمونه‌ها با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه و تجهیزات جانبی موجود برای دستگاه، اقدام به طراحی و ساخت یک قطعه اضافه جهت قرارگیری نمونه در دستگاه صورت گرفت تا بتوان به صورت استاندارد و با کم‌ترین خطا نمونه‌های با طول ۱۰ سانتی‌متر را مورد تست قرار داد (شکل ۳-۱). قطعه (الف) در شکل، قطعه جدید ساخته شده با طول مورد نیاز و قطعه (ب) یکی از قطعات موجود می‌باشد که شیارهای موجود روی سطح این قطعات برای پخش شدن یکنواخت سیال روی سطح نمونه است.



شکل (۳-۱) قطعات انتقال دهنده سیال به سر و ته نمونه در دستگاه اندازه‌گیری تراوایی

۳-۳ تعیین جنس نمونه های مورد نیاز

با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر فاصله‌داری و جهت‌داری شکستگی‌ها بر روی میزان تراوایی در شرایط یکسان می‌باشد، نمونه‌های تولید شده باید کاملاً همگن بوده و قابلیت برش به صورت کاملاً صاف و یکسان داشته باشند. لذا در وهله اول از سنگ گرانیت و مرمریت برای ساخت نمونه استاندارد استفاده شد که در شکل ۲-۳ قابل مشاهده می‌باشد. ولی این نمونه‌ها در موقع برش دچار انحراف شده و زبری نا همسان در سطح برش آن‌ها ایجاد شد. لذا تصمیم به استفاده از نمونه‌های مصنوعی گرفته شد.



(ب)

(الف)

شکل (۲-۳) نمونه‌های ساخته شده از سنگ طبیعی (الف) گرانیت و (ب) مرمریت

با بررسی مطالعات پیشین نمونه بتنی جهت پژوهش استفاده شد که با استفاده از طرح اختلاط مناسب گزینه خوبی برای جایگزینی سنگ می‌باشند. ولی با توجه به اینکه کماکان مشکل برش نمونه تا حدی در این نمونه‌ها هم وجود داشت، به بررسی دیگر مواد صنعتی و موجود پرداخته شد و در نهایت ماده خاصی با عنوان فیبر نخ‌دار به عنوان ماده خام ساخت نمونه انتخاب شد که در صورت رفتار فیزیکی و مکانیکی مشابه سنگ می‌تواند به عنوان ماده پایه ساخت نمونه‌ها استفاده شود. در ادامه به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه استاندارد بتنی و فیبر نخ‌دار پرداخته خواهد شد.

۳-۴ ساخت نمونه استاندارد و بررسی خصوصیات فیزیکی و

مکانیکی

در این پژوهش در وهله اول به منظور بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها در مقیاس آزمایشگاهی نمونه مصنوعی ساخته شده از بتن انتخاب شد. انتخاب طرح اختلاط بتن از جمله فاکتورهای مهم به منظور تهیه نمونه بتنی مناسب می‌باشد. از این رو سعی بر آن شد که از طرح اختلاطی استفاده شود که نمونه بتنی عمل‌آوری شده خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لازم برای بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری

شکستگی‌ها را داشته باشد. طرح اختلاط نمونه بتنی بر اساس استاندارد ملی بتن ۵۸۱، در جدول ۱-۳ نشان داده شده است. در این طرح، ماسه‌های رودخانه‌ای با اندازه دانه بین ۰-۵ میلی‌متر و شن شکسته با اندازه ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۳-الف). فوق روان کننده استفاده شده از نوع (Structuro 335) محصول شرکت FOSROC می‌باشد. پس از این مرحله، ملات مورد نظر دراستوانه‌هایی با قطر ۳۸ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر قالب‌گیری شدند و در انتها به مدت ۲۸ روز به منظور رسیدن به حداکثر مقاومت، درون آب قرار داده شدند (شکل ۳-۳-ب). طول نمونه طبق استانداردهای موجود باید دو تا سه برابر قطر نمونه باشد که بر این اساس میزان ۱۰ سانتی‌متر برای آن انتخاب شد. در این پژوهش علاوه بر نمونه‌های بتنی، نمونه‌های مصنوعی دیگر ساخته شده از الیاف کتان و رزین فنولیک معروف به فیبر نخ‌دار نیز در نظر گرفته شد. این نمونه‌ها در فشار ۲۰۰۰ تن و حرارت بالا ساخته می‌شود. نمونه مورد نظر با استفاده از دستگاه (CNC) به استوانه‌هایی به قطر ۳۸ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر برش داده شدند. از بهترین ویژگی این نمونه‌ها برش کاملاً صاف و صیقلی و فاقد هر گونه لب پری و انحراف برش می‌باشد. تهیه نمونه‌ها به این صورت انجام شد که نمونه خام با دستگاه تراش با دقت بسیار بالا به صورت استوانه‌ای با قطر ۳۸/۵ میلی‌متر تراش داده شده و سپس به وسیله فرزکاری به صورت کاملاً صیقلی قطر نمونه به ۳۸ میلی‌متر تبدیل و نمونه نهایی ساخته شد. در ادامه بررسی و مقایسه ویژگی‌های نمونه استاندارد تهیه شده با فیبر نخ‌دار با بتنی انجام شد. هدف از تعیین پارامترهای ژئومکانیکی نمونه‌ها، آشنایی با خواص ذاتی و فیزیکی نمونه‌ها و رفتار آن‌ها تحت بارگذاری‌های مکانیکی و میزان تغییر شکل‌پذیری می‌باشد.

جدول (۱-۳) طرح اختلاط بتن مورد مطالعه

سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن شکسته (kg/m^3)
۶۰۰	۲۱۰	۶۰	۳/۳	۸۵۰	۶۷۰

شکل ۳-۴ نمونه‌های مصنوعی بتنی و فیبر نخ‌دار استاندارد تهیه شده را نشان می‌دهد. ویژگی مقاومتی فیبر نخ‌دار در جدول ۲-۳ نشان داده شده است که مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده آورده شده است.

جدول (۲-۳) ویژگی‌های مقاومتی فیبر نخ‌دار

مقاومت کششی (مگا پاسکال)	مقاومت خمشی (مگا پاسکال)	مقاومت در برابر ضربه (ژول بر متر)	مقاومت الکتریکی (اهم متر)	تحمل ولتاژ عمود بر صفحه (کیلوولت)	مقاومت حرارتی به مدت نیم ساعت درجه سانتیگراد
۵۴	۱۰۴	۱۱۲/۳۱	۱۰ ^{۱۱}	۵	۱۶۰-۱۵۰

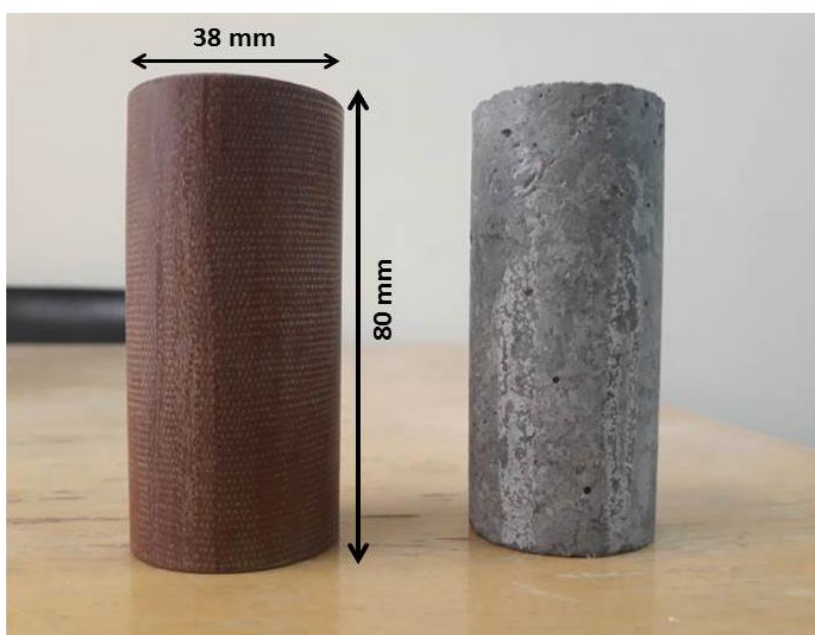


ب



الف

شکل (۳-۳) الف: سنگ‌دانه‌های استفاده شده در بتن. ب: نمونه‌های بتن عمل‌آوری شده در آب



شکل (۴-۳) نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

۳-۴ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

۳-۴-۱ چگالی، تخلخل و جذب آب

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی نمونه بتنی و فیبرنخ‌دار بر اساس استاندارد (ISRM)، ۱۰ قطعه بتنی به جرم ۵۰ گرم تهیه شد و پس از اندازه‌گیری جرم اولیه، جرم خشک، جرم اشباع و جرم غوطه‌وری،

ویژگی‌های فیزیکی نمونه شامل چگالی خشک، چگالی اشباع، میزان تخلخل، درصد پوکی و میزان جذب آب اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از آزمایش نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار در جدول ۳-۳ نشان داده شده است. قابل ذکر است که به دلیل آزمایش سه نمونه بتنی به خاطر احتمال ناهنگی، در جدول، مقدار بالایی در ردیف نمونه بتنی برابر با مقدار میانگین پارامتر مورد نظر و مقدار پایینی مقدار انحراف معیار حاصل از سه مقدار به دست آمده از سه نمونه است. نتایج نشان داد که نمونه تهیه شده از فیبر نخ‌دار میزان تخلخل و جذب آب بسیار ناچیزی در مقایسه با نمونه بتنی دارد.

جدول (۳-۳) میانگین خصوصیات فیزیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

نوع نمونه	تعداد نمونه	چگالی خشک gr/cm^3	چگالی اشباع gr/cm^3	میزان تخلخل (%)	جذب آب (%)	درصد پوکی (%)
		انحراف معیار	انحراف معیار	انحراف معیار	انحراف معیار	انحراف معیار
نمونه بتنی	۳	۲/۳۲	۲/۳۹	۷/۲	۳/۱۲	۷/۷۶
		۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۲۵
نمونه فیبر نخ‌دار	۱	۱/۵	۱/۵	ناچیز	ناچیز	ناچیز

۳-۴-۲ رفتار منحنی تنش-کرنش

به منظور بررسی رفتار منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها، از دستگاه بارگذاری خودکار ژئوتک^۱ با ظرفیت ۶۰ تن و نرخ بارگذاری ۰/۱ میلی متر بر دقیقه و نوع بارگذاری از نوع استاتیک استفاده شد (شکل ۳-۶). به‌طوری‌که نمودار تنش-کرنش نمونه بتنی و نمونه فیبر نخ‌دار در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که رفتار منحنی تنش-کرنش نمونه فیبر نخ‌دار کاملاً متفاوت از نمونه بتنی می‌باشد. میزان کرنش در نمونه ساخته شده از فیبر نخ‌دار به دلیل انعطاف‌پذیر بودن بیشتر از نمونه بتنی می‌باشد. همچنین رفتار منحنی تنش-کرنش نمونه بتنی در نتیجه شکننده بودن، خطی می‌باشد در صورتی که رفتار منحنی تنش-کرنش نمونه فیبر نخ‌دار تا تنش نزدیک به ۶۰ مگاپاسکال خطی بوده و پس از آن تا لحظه شکست رفتار منحنی به صورت پلاستیک و غیر خطی می‌باشد. به دلیل رفتار شکننده نمونه بتنی، زاویه صفحات شکست شکل گرفته پس از گسیختگی نمونه به صورت قائم می‌باشد که نشان دهنده وجود شکستگی‌های کششی می‌باشد (شکل ۳-۶). بر اساس رابطه بین صفحه شکست و زاویه اصطکاک داخلی به صورت رابطه ۳-۱، زاویه اصطکاک داخلی نمونه بتنی قابل ملاحظه می‌باشد.

¹Geotech

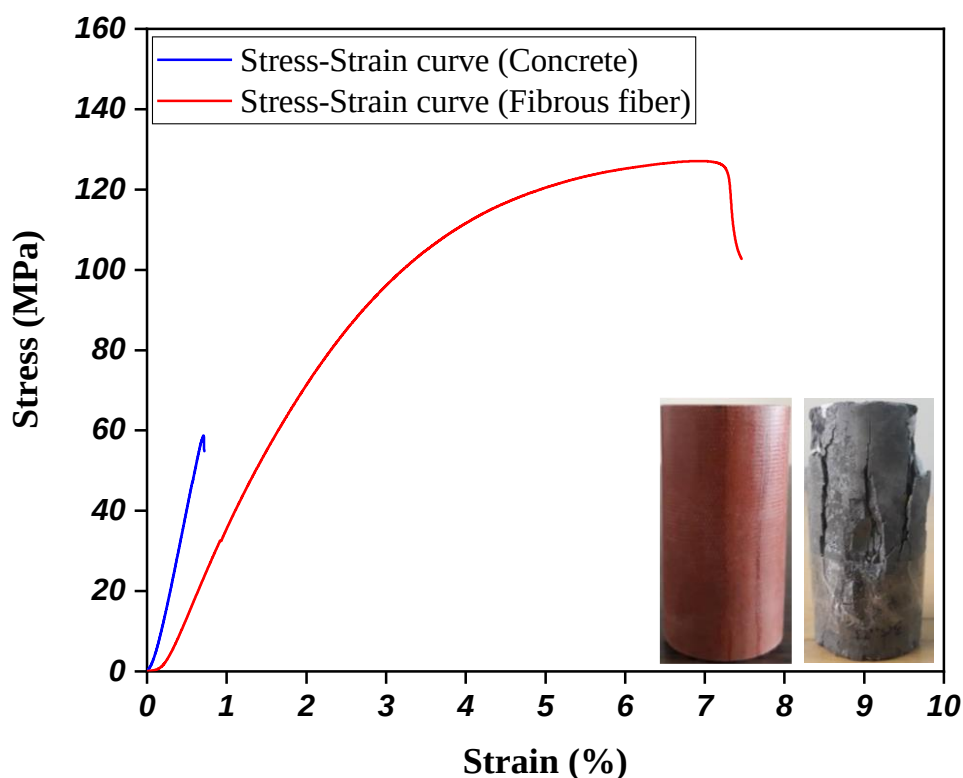
$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (۳-۱)$$

که در این رابطه β زاویه صفحه شکست و ϕ زاویه اصطکاک داخلی نمونه بتنی می‌باشد.

شکننده نبودن نمونه فیبر نخ‌دار باعث خواهد شد تا در هنگام ایجاد شکستگی در نمونه، میزان بازشدگی نمونه برای تمام حالت‌های جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها یکسان باشد و از لب پر شدن نمونه در هنگام برش نمونه جلوگیری خواهد شد. پارامترهای مکانیکی نمونه‌های بتنی و فیبر نخ‌دار در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. توضیح اینکه در جدول ۳-۴ به دلیل آزمایش سه نمونه بتنی، در جدول، مقدار بالایی در ردیف نمونه بتنی برابر با مقدار میانگین پارامتر مورد نظر و مقدار پایینی مقدار انحراف معیار حاصل از سه مقدار به دست آمده از سه نمونه است.



شکل (۳-۵) دستگاه بارگذاری خودکار



شکل (۳-۶) منحنی تنش-کرنش مرتبط با نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

جدول (۳-۴) میانگین خصوصیات مکانیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

مدول تانژانته GPa	مدول سکانته GPa	مقاومت فشاری تک محوره MPa	تعداد نمونه	نوع نمونه
انحراف معیار	انحراف معیار	انحراف معیار		
۱۰	۷/۴	۶۰	۳	نمونه بتنی
۰/۵۴	۰/۳۸	۶/۲۳		
۳/۷	۳/۶	۱۲۷	۱	نمونه فیبر نخ‌دار

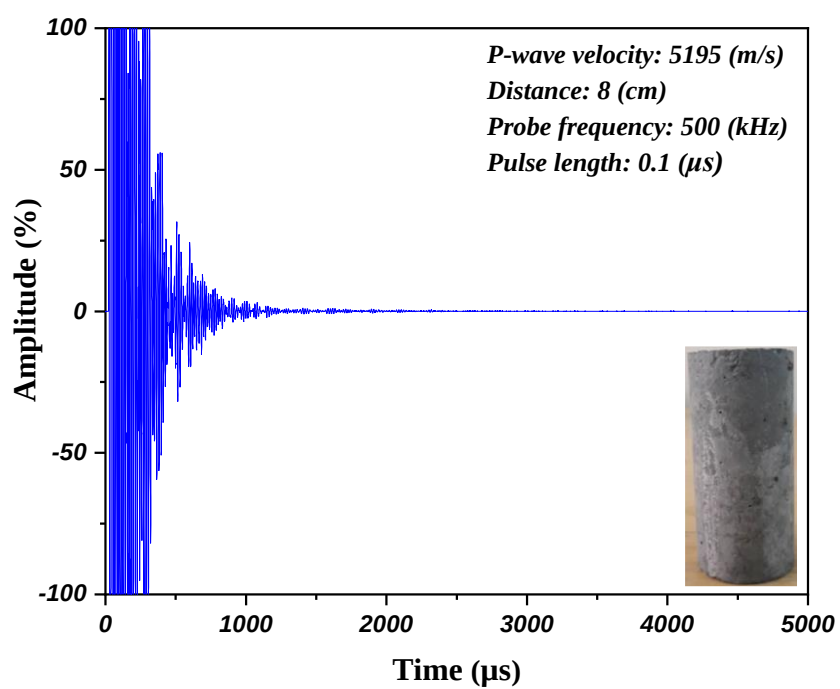
۳-۴-۳ سرعت امواج فشاری و برشی

در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری سرعت موج فشاری و برشی، دستگاه (PUNDIT Lab+) با دو مبدل (یک فرستنده و یک گیرنده) با فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز برای اندازه‌گیری موج فشاری و ۲۵۰ کیلوهرتز برای اندازه‌گیری موج برشی مورد استفاده قرار گرفت. دلیل استفاده از فرکانس‌های متفاوت، تفاوت در نوع مبدل

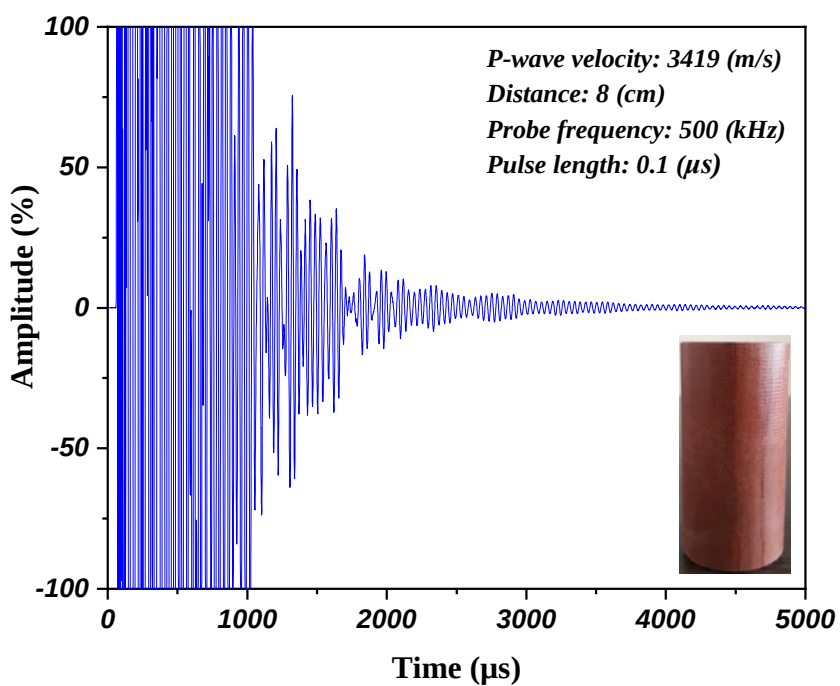
اندازه‌گیری سرعت موج فشاری و برشی می‌باشد. اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج به همراه نمونه‌های بتنی و فیبر نخ‌دار در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، سرعت موج فشاری و برشی و شکل امواج فشاری و برشی اندازه‌گیری شد. در واقع با محاسبه زمان عبور موج فشاری و برشی شکل‌های (۳-۸ تا ۳-۱۱) و طول نمونه، سرعت امواج اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش سرعت موج فشاری نشان داد که برای نمونه بتنی که سرعت موج فشاری بیشتری دارد شکل موج فشرده‌تر از نمونه فیبر نخ‌دار می‌باشد (شکل ۳-۸). به عبارت دیگر به دلیل تغییر شکل‌پذیری کم نمونه بتنی، رفتار الاستیک شکننده بودن و چگالی بیشتر نسبت به نمونه فیبر نخ‌دار، دامنه موج با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و در مدت زمان کمتر تعداد پالس‌های بیشتری ثبت شده است. در مقابل برای نمونه تهیه شده از فیبر نخ‌دار شکل موج کشیده‌تر می‌باشد (شکل ۳-۹). شکل تابع موج برشی برای نمونه‌های بتنی و فیبر نخ‌دار در شکل‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ نشان داده شده است. همچنین نتایج سرعت امواج فشاری و برشی در جدول ۳-۵ موجود می‌باشد. به نظر می‌رسد نسبت بالای سرعت موج فشاری به برشی در نمونه فیبر نخ‌دار به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر فیبر نخ‌دار و در نتیجه نسبت پواسون بالای نمونه فیبر نخ‌دار نسبت به بتن باشد.



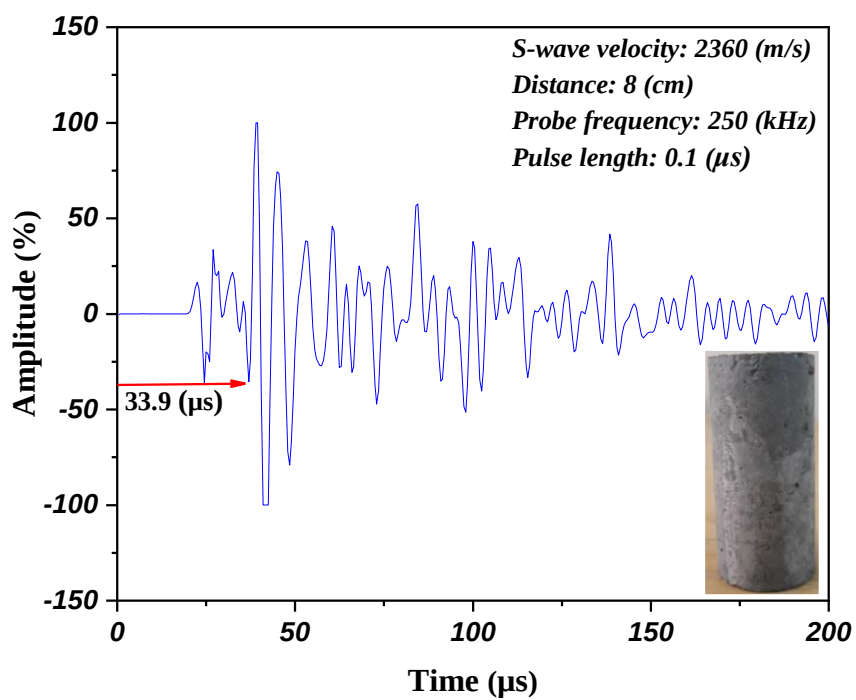
شکل (۳-۷) اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه PUNDIT Lab+ : (۱) بدنه اصلی دستگاه (۲) مبدل (۳) میله کالیبراسیون (۴) ژل التراسونیک (۵) صفحه نمایش



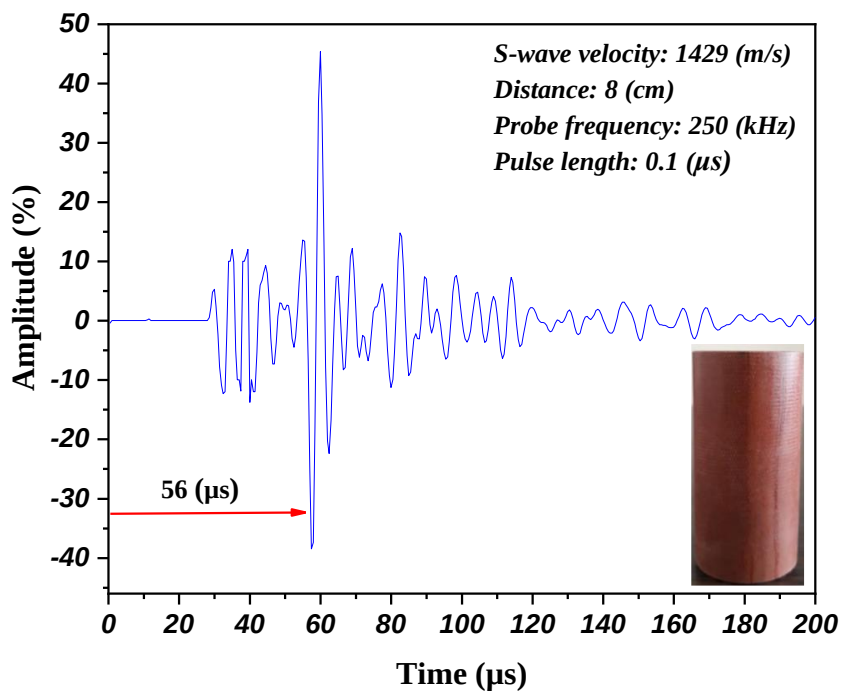
شکل (۳-۸) شکل موج فشاری مرتبط با نمونه بتنی



شکل (۳-۹) شکل موج فشاری مرتبط با نمونه فیبر نخ‌دار



شکل (۳-۱۰) شکل موج برشی مرتبط با نمونه بتنی



شکل (۳-۱۱) شکل موج برشی مرتبط با نمونه فیبر نخ‌دار

جدول (۳-۵) ویژگی سرعت امواج نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

نوع نمونه	موج فشاری m/sec	موج برشی m/sec
نمونه بتنی	۵۱۹۵	۲۳۶۰
نمونه فیبر نخ‌دار	۳۴۱۹	۱۴۲۹

۳-۴-۴ هدایت هیدرولیکی

از جمله پارامترهای دیگر در مطالعه تاثیر هندسه شکستگی‌ها بر میزان تراوایی، هدایت هیدرولیکی نمونه می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار از دستگاه اندازه‌گیری تراوایی طراحی شده در دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن استفاده شد (شکل ۳-۱۲). همچنین اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه اندازه‌گیری تراوایی به صورت دقیق در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. فرایند انجام آزمایش به این صورت است که پس از اشباع کردن نمونه‌ها با آب و قرار دادن آن‌ها در محفظه مغزه، با استفاده از پمپ تزریق آب، آب با دبی ۰/۲ میلی‌لیتر بر دقیقه (به منظور جلوگیری از ایجاد جریان مغشوش) به نمونه اعمال شد. با استفاده از پمپ تزریق روغن نیز فشار محصورکننده ۳ مگاپاسکال به اطراف نمونه اعمال شد. با اندازه‌گیری فشار ورودی و خروجی در دو طرف نمونه و همچنین با در اختیار داشتن طول و قطر نمونه، هدایت هیدرولیکی با استفاده از رابطه ۳-۲ محاسبه شد.

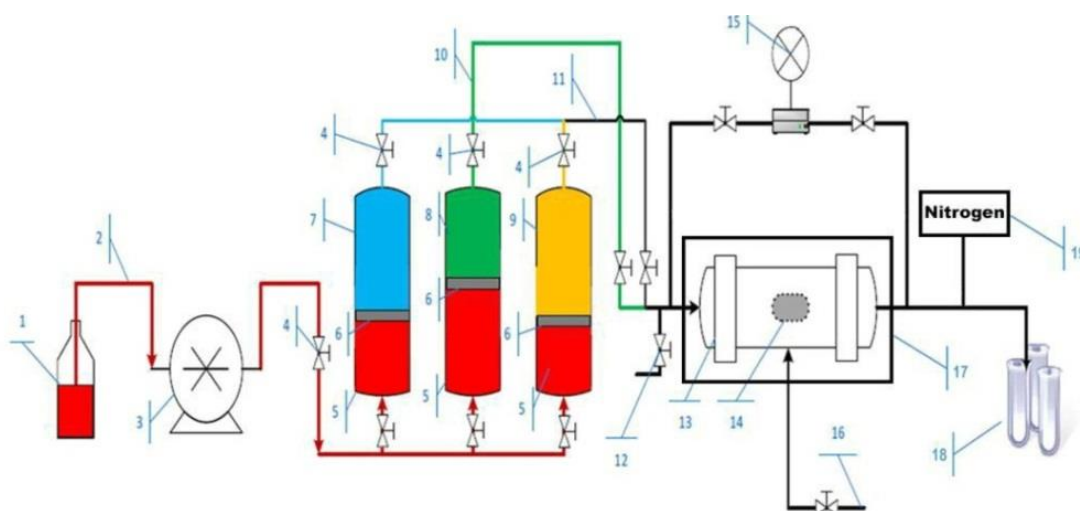
$$Q = k \frac{\Delta h}{L} A \quad (۳-۲)$$

در این رابطه Q دبی آب، k هدایت هیدرولیکی، Δh اختلاف هد آب در دو طرف نمونه، L و A به ترتیب طول و قطر نمونه می‌باشد.

این دستگاه با دارا بودن قابلیت اندازه‌گیری و پذیرفتن مغزه‌های ۱/۵ اینچی، میزان تراوایی نمونه‌های قرار گرفته در آن را اندازه‌گیری می‌کند. از جمله قابلیت‌های دیگر این دستگاه، اندازه‌گیری میزان تراوایی مطلق و نسبی در کنار سایر پارامترهای مهمی مانند میزان اشباع نفت و آب باقیمانده، سرعت، و فشار جریان می‌باشد. دقت تزریق پمپ آب ۰/۰۱ میلی‌لیتر بر دقیقه و دقت سنسورهای قرائت فشار آب و فشار محصورکننده اطراف نمونه ۱ واحد (psi) است. بر اساس اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده، میانگین هدایت هیدرولیکی برای نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. در واقع جذب کم آب و تخلخل ناچیز نمونه فیبر نخ‌دار سبب شده است که هدایت هیدرولیکی نمونه کاهش یابد. از این‌رو نمونه فیبر نخ‌دار به دلیل هدایت هیدرولیکی بسیار کم می‌تواند به عنوان نمونه مناسب به منظور بررسی اثر هندسه شکستگی‌ها بر میزان تراوایی انتخاب شود. در واقع میزان هدایت هیدرولیکی نمونه فیبر نخ‌دار نسبت به نمونه سنگ طبیعی بیشتر مخازن نفتی کمتر بوده که به خاطر یک‌دست بودن و کم بودن تخلخل نمونه فیبر نخ‌دار است ولی با توجه به مقایسه ای بودن و بررسی تاثیر جهت‌داری و فاصله‌داری بر هدایت هیدرولیکی در این پژوهش، تاثیری بر نتیجه کلی پژوهش نخواهد داشت.



شکل (۳-۱۲) الف) شمای کلی دستگاه اندازه‌گیری تراوایی. ۱) پمپ تزریق آب ۲) پمپ روغن به منظور اعمال فشار محصورکننده ۳) آون و محفظه نگه‌دارنده مغزه، ب) قسمت درون آون



شکل (۳-۱۳) اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه تراوایی. ۱) سیال تزریق ۲) لوله مکش ۳) پمپ تزریق ۴) شیر ۵) سیال پشت پیستون ۶) پیستون ۷ و ۸ و ۹) هر سیالی که برای تزریق استفاده شود ۱۰ و ۱۱) مسیر تزریق ۱۲) شیر بای پس ۱۳) محفظه مغزه ۱۴) مغزه ۱۵) فشارسنج ۱۶) مخزن روغن ۱۷) آون ۱۸) محفظه خروجی ۱۹) گاز نیتروژن برای ایجاد *Back pressure* (Arianfar and Ramezanzadeh, 2020)

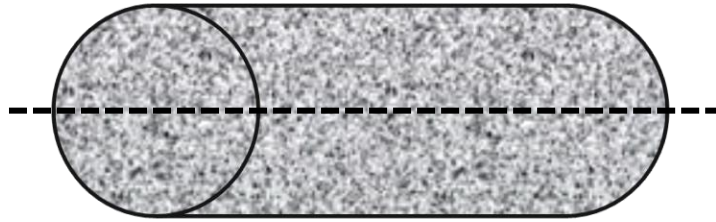
جدول (۳-۶) میانگین هدایت هیدرولیکی نمونه بتنی و فیبر نخلدار

نوع نمونه	تعداد نمونه	میانگین هدایت هیدرولیکی (m/sec)	انحراف معیار
بتنی	۲	$2/35 \times 10^{-7}$	3×10^{-8}
فیبر نخلدار	۲	$7/72 \times 10^{-10}$	8×10^{-12}

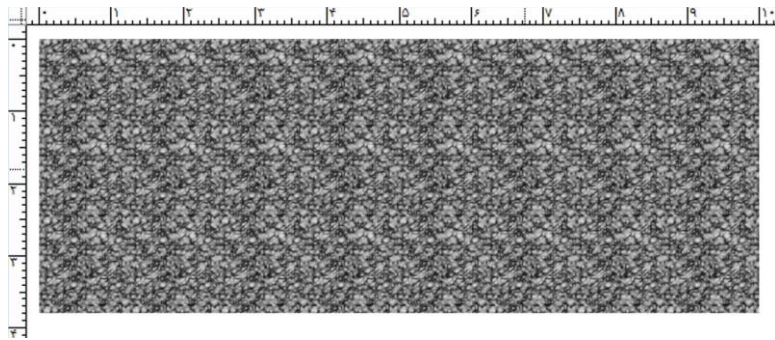
۳-۵ الگوی نمونه های مورد نیاز

برای اجرای ایده فاصله داری و جهت داری در شکستگی ها می بایست به گونه ای عمل کرد که بتوان اثر هر دو گزینه را در نتایج مشاهده نمود. برای این منظور، نمونه ها به صورت مصنوعی تهیه شدند. نمای شماتیک سه بعدی و بزرگ ترین سطح مقطع نمونه استاندارد همگن و بدون شکستگی در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. نمونه های مورد آزمایش از ایجاد شکستگی در نمونه استاندارد به دست آمدند. بر این اساس و با توجه به محدودیت طول و قطر نمونه، (به طور معمول نسبت طول به قطر ۲ الی ۳ در نظر گرفته می شود). در پنج جهت داری مختلف صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به خط عمود بر جریان (طول نمونه)، فاصله داری های ممکن طبق جداول ۳-۷، ۳-۸، ۳-۹، ۳-۱۰ و ۳-۱۱ طراحی شد. از دیگر محدودیت های تهیه نمونه ها، فرایند برش می باشد که باید به صورت دقیق صورت می گرفت و به همین دلیل در ابعاد فاصله داری خیلی کوچک قابل بررسی نمی باشد و در ابعاد طراحی شده نیز بسیار زمان بر و به سختی انجام شده است. تهیه نمونه ها به این صورت انجام شد که نمونه خام با دستگاه تراش با دقت بسیار بالا به صورت استوانه ای با قطر ۳۸/۵ میلی متر تراش داده شده و سپس به وسیله فرزکاری به صورت کاملاً صیقلی قطر نمونه به ۳۸ میلی متر تبدیل و نمونه استوانه ای نهایی با طول بین ۱۵ تا ۳۰ سانتی متر ساخته شد. نمونه های استوانه ای به این دلیل با طول بیشتر ساخته شدند تا بعد از ایجاد شکستگی ها طول نمونه با برش سر و ته به اندازه دقیق، به ۱۰ سانتی متر تبدیل شود. مرحله بعد ایجاد شکستگی با جهت داری و فاصله داری مطابق با مقادیر تعیین شده است. این فرایند به دلیل اینکه بدون کوچکترین لب پری بوده و به صورت کاملاً صیقلی و دقیق انجام شود، با برش انجام نشده است و با استفاده از دستگاه سی ان سی سر و ته هر قطعه از نمونه تراش خورده و سپس روی هم قرار گرفته است. به این صورت قطعات تراش خورده به صورت کاملاً مماس روی هم قرار گرفته و فاقد هرگونه زبری و ناهمواری و لب پریدگی به دست آمدند. در نهایت با قرار گرفتن قطعات روی هم، طول کلی نمونه با برش سر و ته به ۱۰ سانتی متر تبدیل شد. فاصله افقی شکستگی ها در جداول مذکور عبارت است از فاصله شکستگی ها در راستای طول نمونه که با روابط مثلثاتی محاسبه شده است.

الف

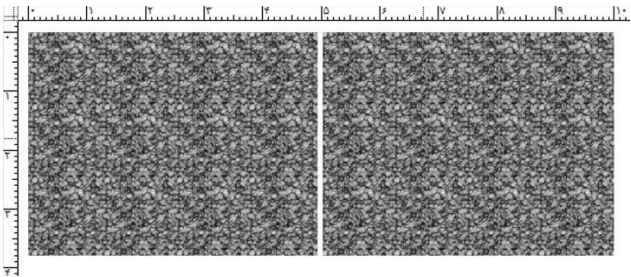
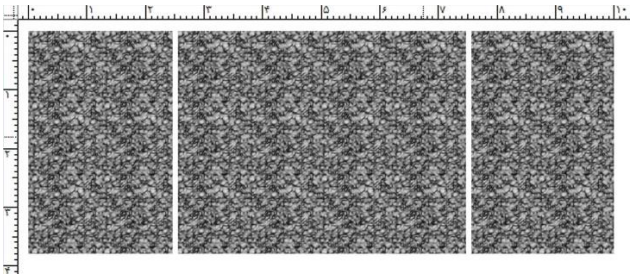
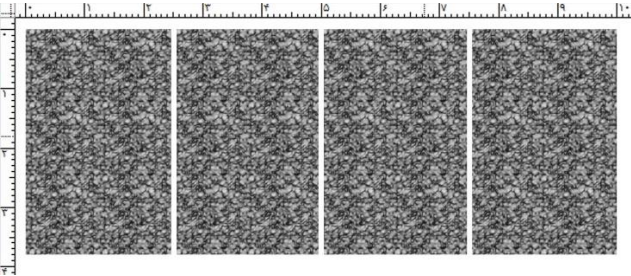
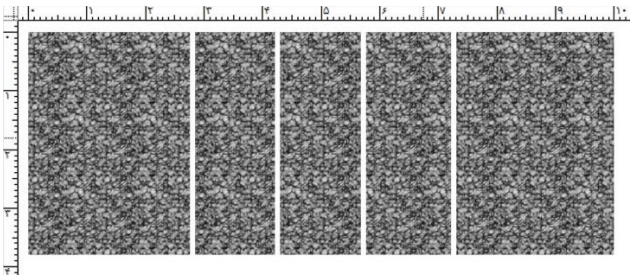


ب

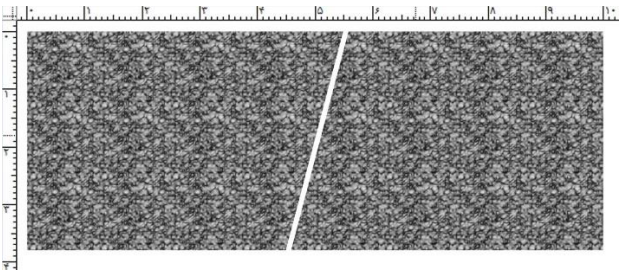
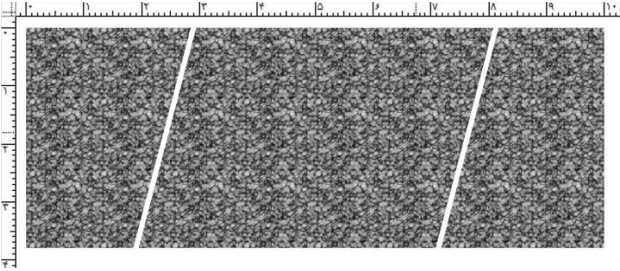
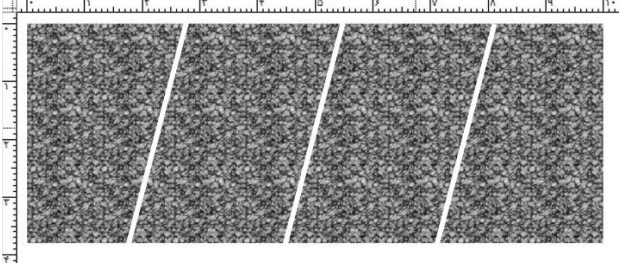
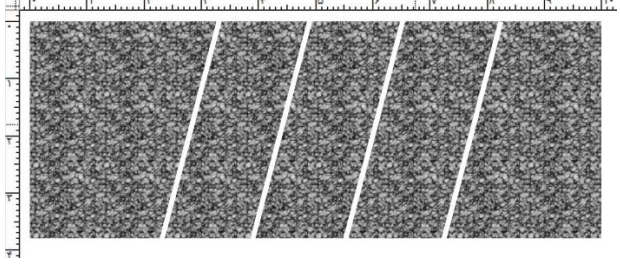


شکل (۳-۱۴) (الف) نمای شماتیک سه بعدی و محل تصاویر مقطع. (ب) بزرگ‌ترین سطح مقطع نمونه استاندارد مورد مطالعه (واحد ها به سانتی‌متر)

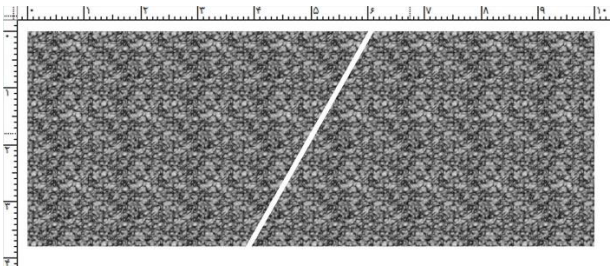
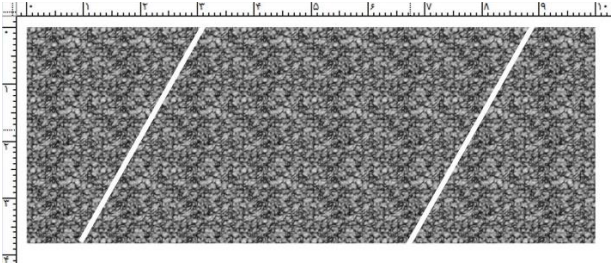
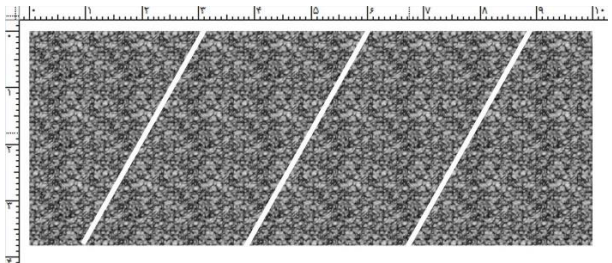
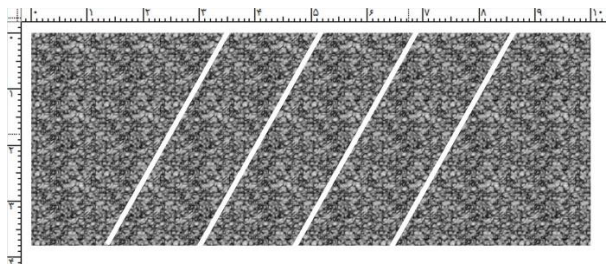
جدول (۷-۳) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری صفر درجه

فاصله افقی شکستگی (میلی‌متر)	تعداد شکستگی	فاصله‌داری (میلی‌متر)	جهت‌داری (درجه)	بزرگ‌ترین سطح مقطع مغزه نمونه (واحد‌ها به سانتی‌متر)
۵۰۸	۱	۵۰۸	۰	
۵۰	۲	۵۰	۰	
۲۵	۳	۲۵	۰	
۱۵	۴	۱۵	۰	

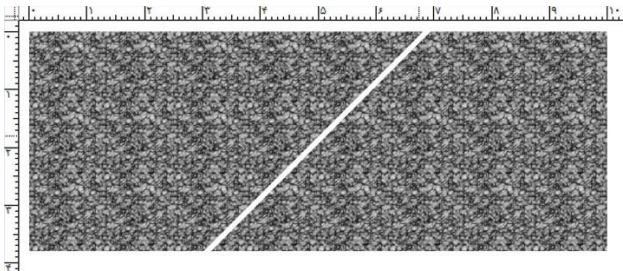
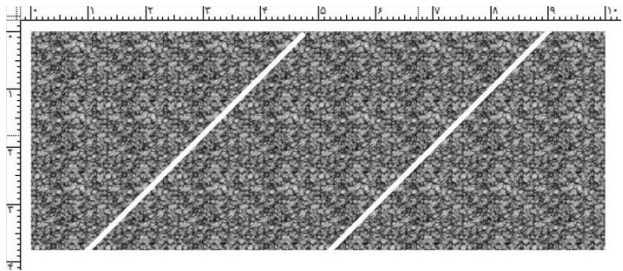
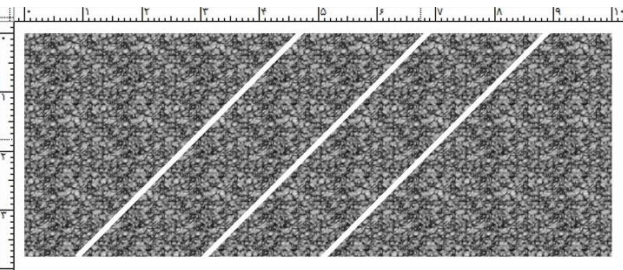
جدول (۳-۸) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۱۵ درجه

فاصله افقی شکستگی (میلی-متر)	تعداد شکستگی	فاصله‌داری (میلی‌متر)	جهت‌داری (درجه)	بزرگ‌ترین سطح مقطع مغزه نمونه (واحدها به سانتی‌متر)
۵۰۸	۱	۵۰۸	۱۵	
۵۲	۲	۵۰	۱۵	
۲۶	۳	۲۵	۱۵	
۱۶	۴	۱۵	۱۵	

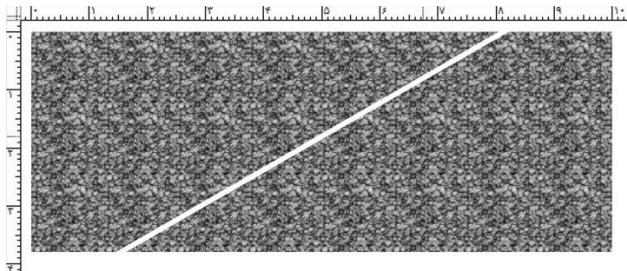
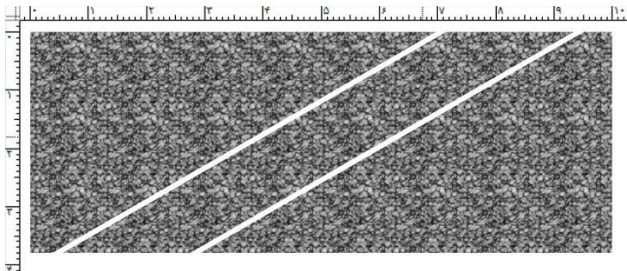
جدول (۳-۹) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۳۰ درجه

فاصله افقی شکستگی (میلی -)	تعداد شکستگی	فاصله‌داری (میلی متر)	جهت‌داری (درجه)	بزرگ‌ترین سطح مقطع مغزه نمونه (واحدها به سانتی متر)
۵۰۸	۱	۵۰۸	۳۰	
۵۸	۲	۵۰	۳۰	
۲۹	۳	۲۵	۳۰	
۱۷	۴	۱۵	۳۰	

جدول (۳-۱۰) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۴۵ درجه

فاصله افقی شکستگی (میلی-متر)	تعداد شکستگی	فاصله‌داری (میلی‌متر)	جهت‌داری (درجه)	بزرگ‌ترین سطح مقطع مغزه نمونه (واحد‌ها به سانتی‌متر)
۵۰ <	۱	۵۰ <	۴۵	
۴۲	۲	۲۰	۴۵	
۲۱	۳	۱۵	۴۵	

جدول (۳-۱۱) سطح مقطع و مشخصات نمونه‌های مغزه مورد استفاده در جهت‌داری ۶۰ درجه

فاصله افقی شکستگی (میلی-متر)	تعداد شکستگی	فاصله‌داری (میلی‌متر)	جهت‌داری (درجه)	بزرگ‌ترین سطح مقطع مغزه نمونه (واحد‌ها به سانتی‌متر)
۵۰ <	۱	۵۰ <	۶۰	
۲۴	۲	۱۲	۶۰	

۳-۶ ساخت تمام نمونه‌های مورد نیاز

با توجه به بررسی شرایط نمونه‌ها و انتخاب جنس و طراحی الگوها در مرحله آخر تمام نمونه‌های مورد نیاز ساخته شد. به این ترتیب که ابتدا با دستگاه سی ان سی از مواد خام استوانه‌هایی با طول حدود ۲۰ سانتی متر و قطر ۳/۸ سانتی‌متر ساخته شد. سپس به انجام برش طبق الگوهای تعریف شده پرداخته شد و در مرحله بعد به پولیش نمودن سطوح برش پرداخته شد تا سطوح برش به صورت کاملاً مماس روی هم قرار بگیرند و پارامتر بازشدگی روی مقایسه تراوایی بی‌تاثیر باشد. در مرحله نهایی به برش سر و ته نمونه‌های تولید شده برای دست‌یابی به طول استاندارد ۱۰ سانتی‌متر پرداخته شد. در شکل‌های ۳-۱۵ تا ۳-۱۸ تعدادی از نمونه‌های ساخته‌شده نشان داده شده است. توضیح اینکه برخی نمونه‌های موجود در تصاویر قبل از استاندارد سازی طول تصویر برداری شده‌اند.



الف



ب



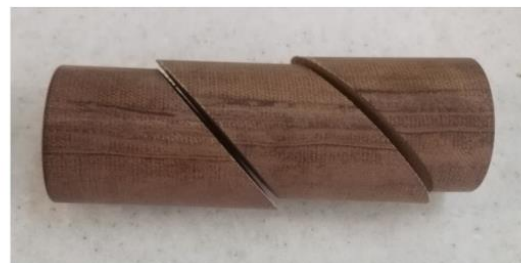
شکل (۳-۱۵) نمونه های تهیه شده با جهت داری ۶۰ درجه با (الف) یک شکستگی و (ب) دو شکستگی



الف



ب



ج



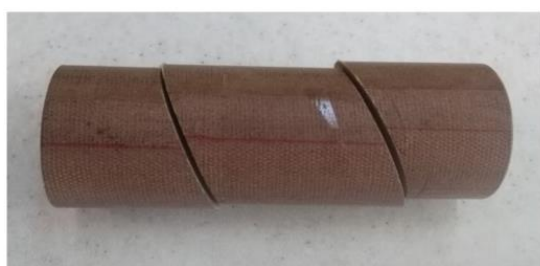
شکل (۳-۱۶) نمونه های تهیه شده با جهت داری ۴۵ درجه با (الف) یک شکستگی، (ب) دو شکستگی و (ج) سه شکستگی



الف



ج



د



ه



شکل (۳-۱۷) نمونه‌های تهیه شده با جهت‌داری ۳۰ درجه با (الف) یک شکستگی، (ب) دو شکستگی، (ج) سه شکستگی و (د) چهار شکستگی



شکل (۳-۱۸) نمونه‌های تهیه شده با جهت‌داری صفر درجه

۳-۷- نتیجه گیری فصل

در میان نمونه‌های طبیعی و مصنوعی در نظر گرفته شده و بر اساس انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی آن‌ها به منظور بررسی تاثیر شکستگی‌ها بر جریان سیال، نمونه مصنوعی فیبر نخ‌دار به دلیل تخلخل و تراوایی ناچیز و رفتار غیرشکننده، می‌تواند نمونه‌ای مناسب به شمار آید. هر چند استفاده از نمونه فیبر نخ‌دار به جهت تغییر شکل‌پذیری بالا، مناسب برای بررسی تاثیر شکستگی‌ها بر جریان سیال در گردپان‌های فشاری بالاتر نمی‌باشد. در نهایت جهت انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها با الگوهای تعیین شده ساخته شده است.

|

فصل ۴ : ارزیابی تأثیر سازه ناپوشی بر هدایت هیدرولیکی بر اساس نتایج

آزمایشگاهی

۴-۱ مقدمه

هدایت هیدرولیکی یا تراوایی یک ویژگی از مواد روزنه‌دار و یا دارای ناپیوستگی است که امکان جریان سیالی مانند آب و هوا از داخل فضاهای خالی آن‌ها را بیان می‌کند. هدایت هیدرولیکی با تراوایی یکی از موضوعات اساسی در بررسی ژئوتکنیک و هیدرولیک در سازه‌های سنگی و در تعیین میزان نشت آب در توده‌سنگ، برآورد فرسایش‌پذیری سنگ، برآورد فشار بالا بر آب، تعیین میزان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی، طراحی سیستم زه‌کشی و ارزیابی و کنترل کیفی تزریق توده‌سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. توده‌سنگ عموماً یک محیط ناپیوسته است که با صفحات شکستگی قطع شده و مجموعه‌ای از بلوک‌های چند وجهی سنگ بکر تشکیل شده است. این صفحات ناپیوستگی‌ها سبب ایجاد مسیرهای جریان هیدرولیک بین بلوک‌های سنگ بکر می‌شوند. سنگ سالم فاقد ناپیوستگی می‌تواند نفوذ ناپذیرتر از مصالحی همچون بتن باشد که جهت جلوگیری از تراوایی استفاده می‌شود. بنابراین ناپیوستگی‌ها مهمترین ویژگی توده سنگ برای کنترل تراوایی هستند.

مطالعه هندسه شکستگی‌ها بر میزان تراوایی در مقیاس آزمایشگاهی نیازمند انتخاب نمونه مناسب از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق نمونه‌های مصنوعی شامل بتن و فیبر نخل‌دار انتخاب شدند و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی، میزان جذب آب، تخلخل، سرعت موج فشاری و برشی، هدایت هیدرولیکی، مقاومت فشاری تک محوره اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه به منظور بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر میزان هدایت هیدرولیکی، تعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ شکستگی با فاصله‌داری در حدود بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر و با جهت‌یافتگی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به خط عمود بر جریان در نمونه به نحوی ایجاد شد که شکستگی‌ها تماسی با سطح مقطع نمونه نداشته باشند. این به این معنی است که هیچ یک از شکستگی‌ها سطح مقطع نمونه را قطع ننمایند.

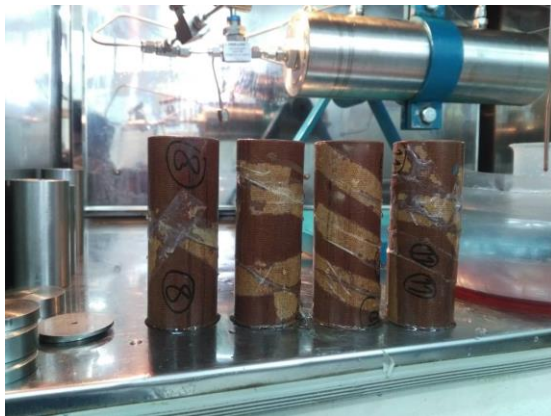
۴-۲ بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکستگی‌ها بر میزان هدایت هیدرولیکی

۴-۲-۱ انجام آزمایش‌ها و نتایج اولیه

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد به منظور بررسی اثر هندسه شکستگی‌ها بر میزان هدایت هیدرولیکی، ناپیوستگی‌هایی با زاویه ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به خط عمود بر جریان انتخاب شد. همچنین شکستگی‌ها با فاصله‌داری متفاوت با استفاده از دستگاه (CNC) و تراش بر روی نمونه به نحوی ایجاد شد که شکستگی‌ها سطح مقطع نمونه را قطع نکنند. از این‌رو، در نمونه‌ها با جهت‌داری ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه به

ترتیب ۱، ۲، ۳ و ۴ شکستگی با فاصله‌داری در حدود بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر، در نمونه‌ها با جهت‌داری ۴۵ درجه به ترتیب ۱، ۲ و ۳ شکستگی با فاصله‌داری در حدود بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر، در نمونه‌ها با جهت‌داری ۶۰ درجه به ترتیب ۱ و ۲ شکستگی با فاصله‌داری بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر و ۱۲ میلی‌متر ایجاد شد. در مجموع ۱۷ حالت جهت بررسی اثر هندسه شکستگی‌ها بر میزان هدایت هیدرولیکی در نظر گرفته شد شکل ۴-۵. در تمامی نمونه‌ها میزان دهانه بازشدگی شکستگی یکسان می‌باشد و تنها عامل اصلی تأثیرگذار بر میزان هدایت هیدرولیکی، جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها خواهد بود. برای هر دسته، دو مرتبه آزمایش در دبی‌های ۰/۲ و ۰/۴ میلی لیتر بر دقیقه تکرار شده است. در کلیه آزمایشات فشار جانبی ثابت و برابر با ۳ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

ب



الف



د



ج





شکل (۱-۴) هندسه ناپیوستگی ها، الف: جهت داری صفر درجه، ب: جهت داری ۱۵ درجه، ج: جهت داری ۳۰ درجه، د: جهت داری ۴۵ درجه، هـ: جهت داری ۶۰ درجه

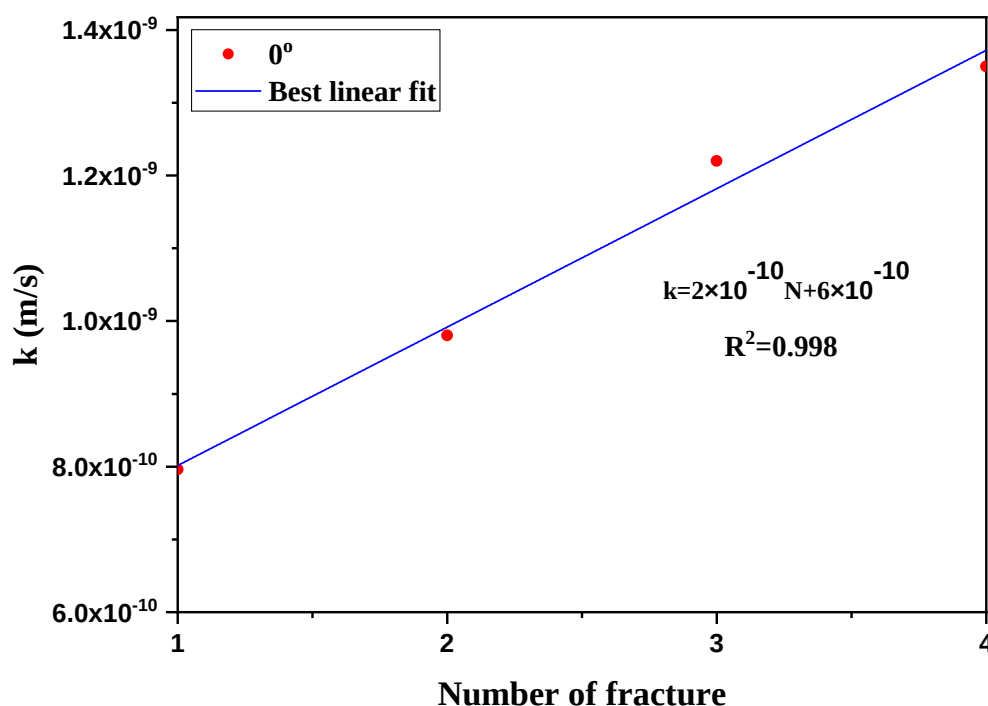
جدول ۱-۴: میانگین هدایت هیدرولیکی و انحراف از معیار بر اساس تعداد شکستگی و جهت داری

زاویه تعداد شکستگی	۰ (انحراف معیار)	۱۵ (انحراف معیار)	۳۰ (انحراف معیار)	۴۵ (انحراف معیار)	۶۰ (انحراف معیار)
۱	$7/96 \times 10^{-10}$	$8/55 \times 10^{-10}$	$9/50 \times 10^{-10}$	$1/09 \times 10^{-9}$	$1/5 \times 10^{-9}$
	$1/5 \times 10^{-11}$	9×10^{-12}	4×10^{-12}	9×10^{-11}	3×10^{-11}
۲	$9/8 \times 10^{-10}$	$1/1 \times 10^{-9}$	$1/27 \times 10^{-9}$	$1/56 \times 10^{-9}$	$2/23 \times 10^{-9}$
	9×10^{-12}	4×10^{-11}	7×10^{-11}	8×10^{-11}	8×10^{-11}
۳	$1/22 \times 10^{-9}$	$1/35 \times 10^{-9}$	$1/6 \times 10^{-9}$	$2/14 \times 10^{-9}$	
	3×10^{-11}	5×10^{-11}	2×10^{-11}	3×10^{-11}	
۴	$1/35 \times 10^{-9}$	$1/51 \times 10^{-9}$	$1/96 \times 10^{-9}$		
	6×10^{-11}	5×10^{-11}	6×10^{-11}		

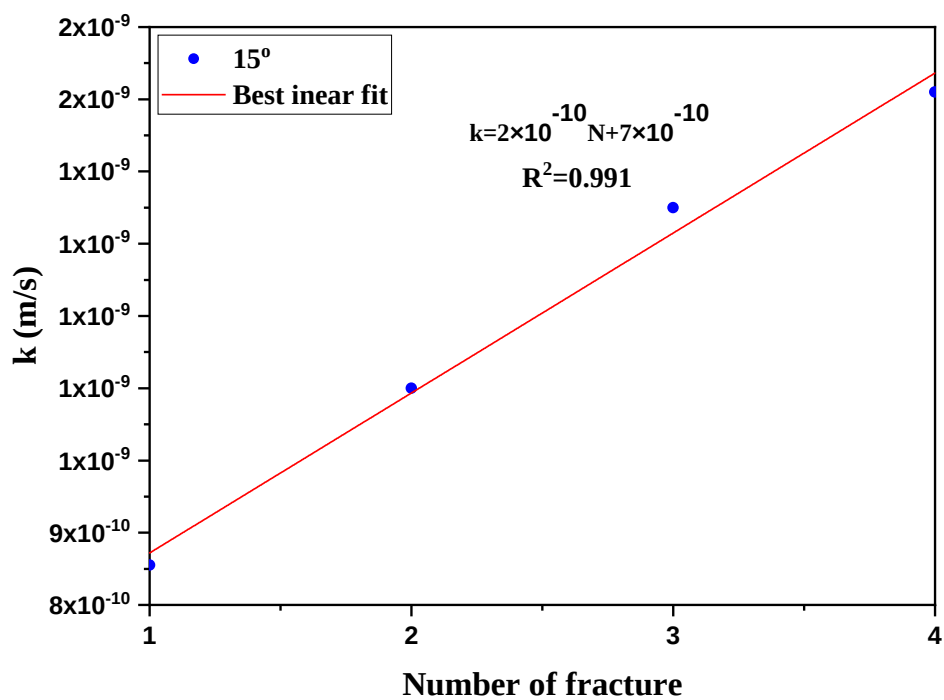
۴-۲-۲ بررسی آماری نتایج

در این بخش به کمک تکنیک آماری تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی و با استفاده از داده‌های آموزش روابطی تجربی برای پیش‌بینی میزان تراوایی ارائه شده است. پیش از توسعه روابط چند متغیره خطی الزام است ارتباط بین هر یک از پارامترهای ورودی با پارامترهای خروجی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از ۴ فرم متداول رگرسیون ساده یعنی خطی، لگاریتمی، نمایی و توانی بهره گرفته شد و ارتباط بین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر دو پارامتر ورودی ارتباط معناداری با پارامتر خروجی دارند. از این‌رو از هر دوی آن‌ها می‌توان در مراحل بعدی برای توسعه روابط چند متغیره بهره برد. همچنین

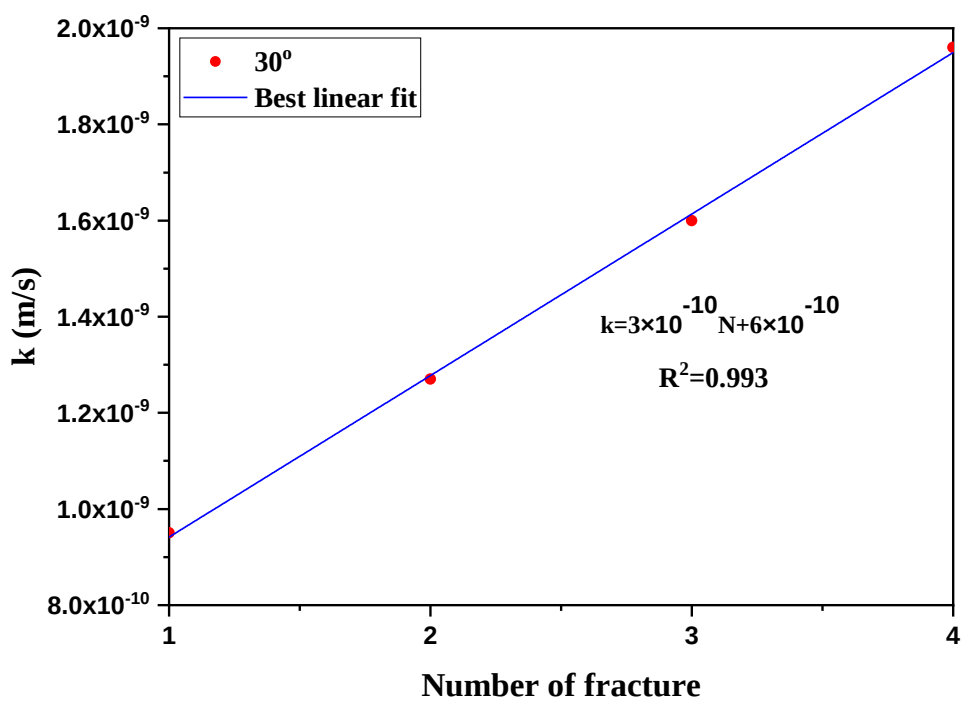
مناسب‌ترین ارتباط بین جهت‌داری شکستگی‌ها با میزان هدایت هیدرولیکی از نوع نمایی با ضریب تعیین بین ۰/۹۵-۰/۹۱ می‌باشد. این ارتباط به طور مستقیم بوده، یعنی با افزایش تعداد شکستگی یا کاهش فاصله‌داری میزان هدایت هیدرولیکی سنگ افزایش می‌یابد. این افزایش برای شکستگی‌ها با جهت‌داری بزرگتر از ۳۰ درجه بیشتر است (شکل‌های ۳-۴ تا ۶-۴). قابل ذکر است که شکل ۴-۶ با توجه به داشتن فقط دو داده فاقد معنی رگرسیونی است و فقط جهت مقایسه آورده شده است. همچنین مناسب‌ترین ارتباط بین تعداد شکستگی‌ها با میزان هدایت هیدرولیکی از نوع خطی با ضریب تعیین ۰/۹۸-۱ می‌باشد. این ارتباط نیز به طور مستقیم بوده و روند آن در شکل‌های ۴-۷ تا ۴-۱۰ قابل مشاهده است.



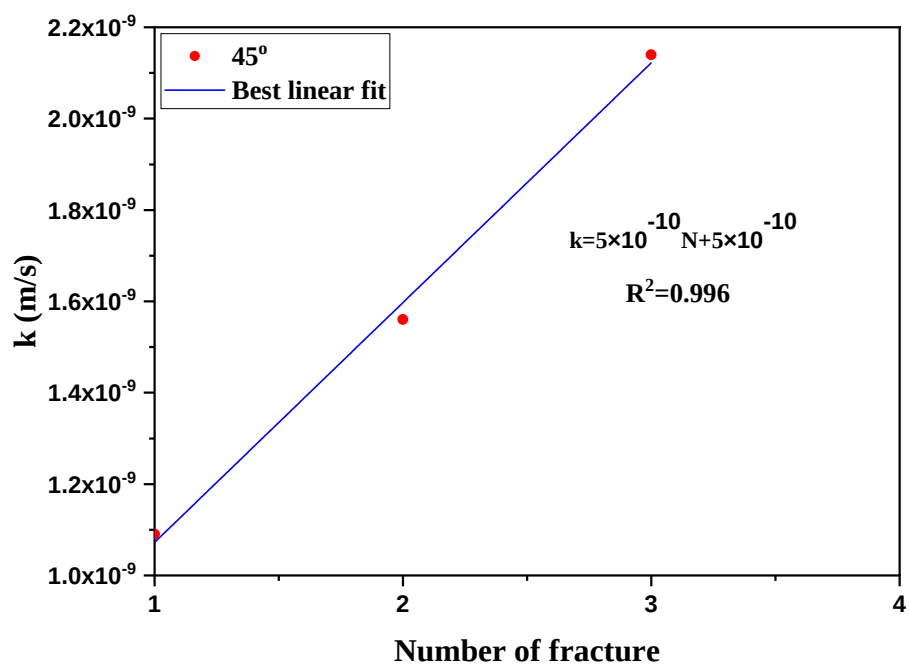
شکل (۴-۲) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری صفر درجه



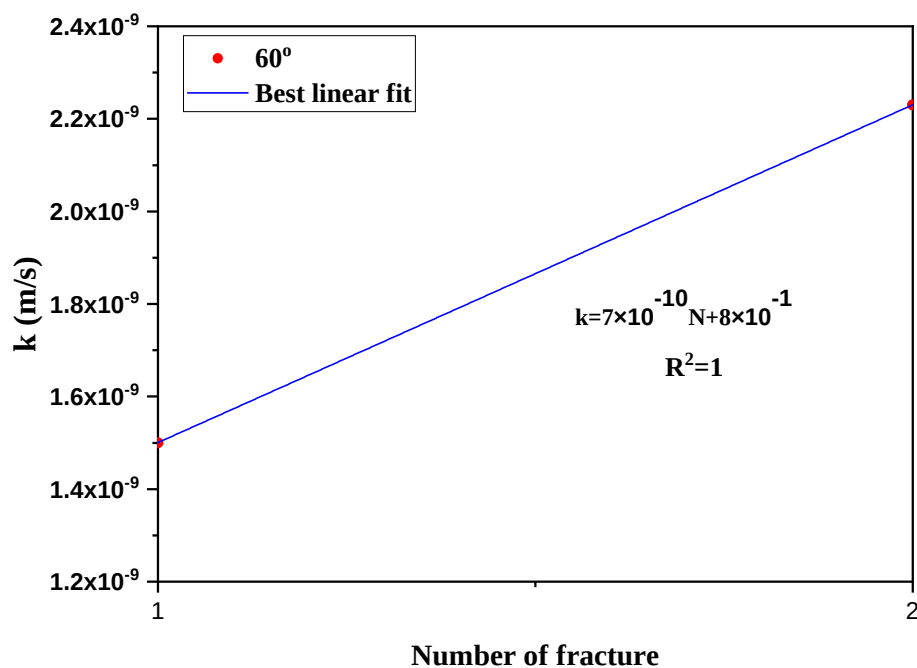
شکل (۳-۴) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۱۵ درجه



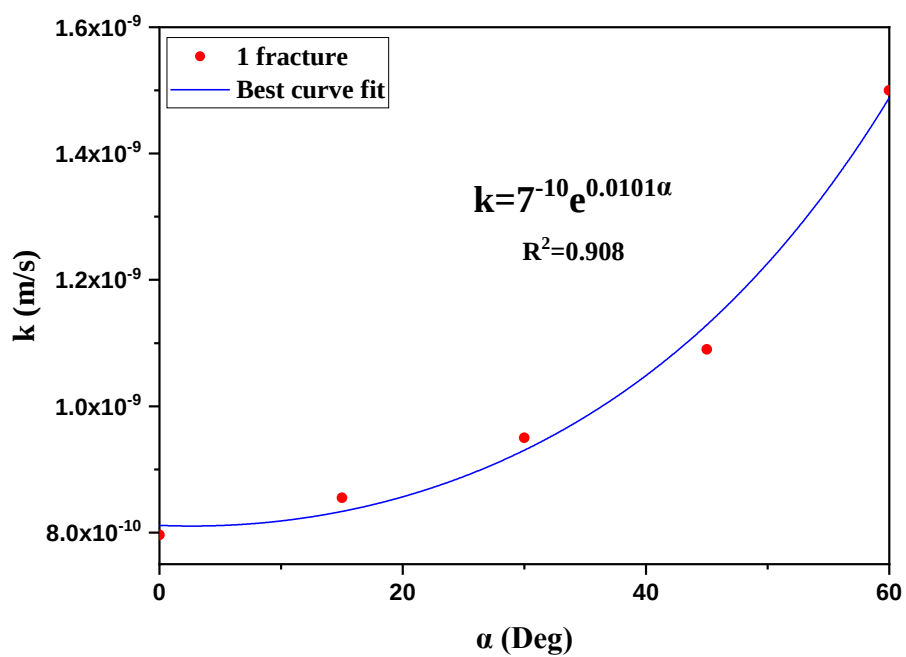
شکل (۴-۴) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۳۰ درجه



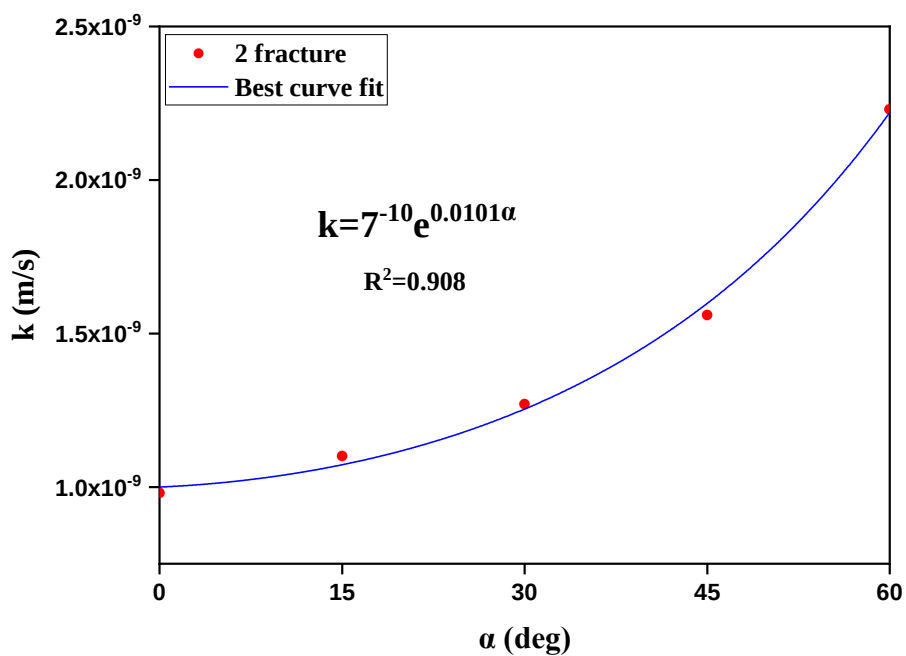
شکل (۴-۵) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۴۵ درجه



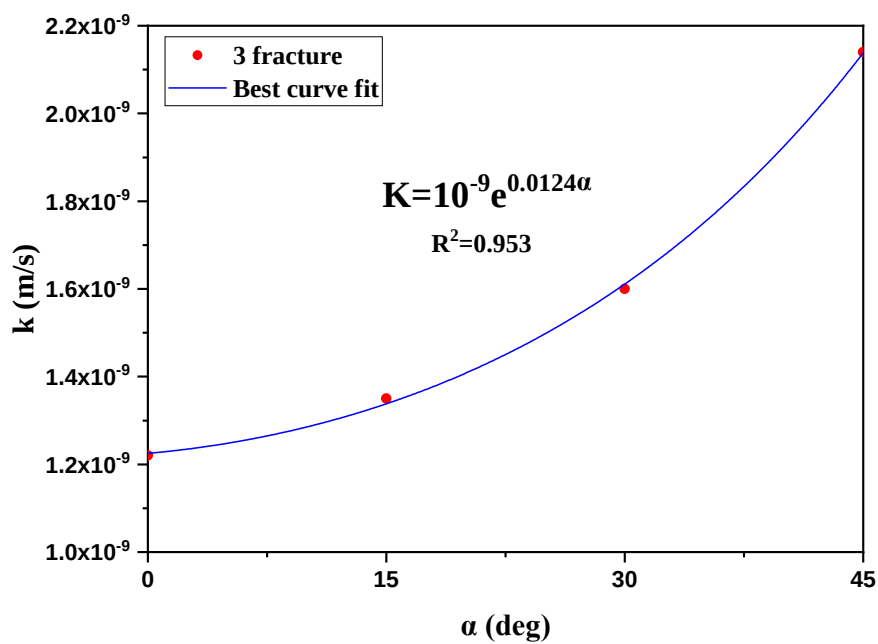
شکل (۴-۶) ارتباط تعداد شکستگی با هدایت هیدرولیکی در جهت‌داری ۶۰ درجه



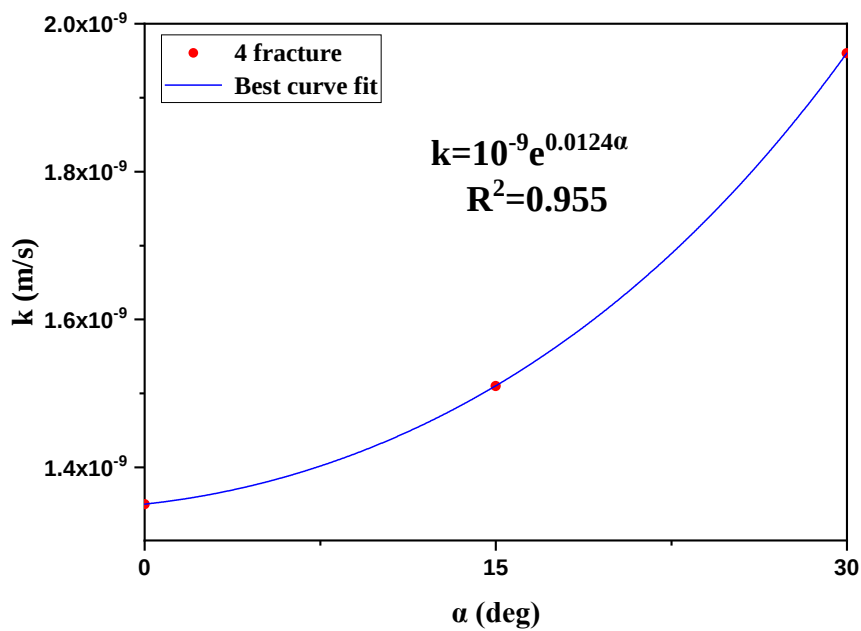
شکل (۷-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با یک شکستگی



شکل (۸-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با دو شکستگی



شکل (۹-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با سه شکستگی



شکل (۱۰-۴) ارتباط جهت‌داری با هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ها با چهار شکستگی

۴-۲-۱ تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی

در رگرسیون چند متغیره خطی، ارتباط بین پارامترهای ورودی متغیرهای مستقل و پارامتر خروجی متغیر وابسته به شکل زیر است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (4-1)$$

که در این رابطه X_1, X_n متغیرهای مستقل و متغیرهای مستقل و $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل و Y متغیر وابسته می‌باشد. با وارد کردن داده‌های آموزش به نرم افزار SPSS و انجام تحلیل رگرسیونی چند متغیره می‌توان ضرایب رگرسیون را تعیین کرد. در این تحلیل هدایت هیدرولیکی به عنوان پارامتر وابسته و تعداد شکستگی‌ها و جهت‌داری شکستگی‌ها به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شدند و رابطه خطی زیر با ضریب تعیین 0.865 برای پیش‌بینی میزان هدایت هیدرولیکی توسعه یافت:

$$k = 2.99 \times 10^{-10} Fracture(x) + 2.82 \times 10^{-10} (\alpha) + 1.69 \times 10^{-10} \quad (4-2)$$

که در این رابطه k به عنوان میزان هدایت هیدرولیکی، $Fracture(x)$ ، تعداد شکستگی و α جهت‌داری شکستگی بر حسب رادیان می‌باشد.

۴-۳ تحلیل نتایج

نتایج ارائه شده در شکل ۴-۱۱، ۴-۱۲ و ۴-۱۳ نشان می‌دهد که افزایش تعداد شکستگی‌ها یا به عبارت دیگر کاهش فاصله‌داری تأثیر قایل توجه‌ای بر میزان هدایت هیدرولیکی به خصوص در نمونه‌ها با شکستگی‌هایی با جهت‌داری بزرگتر دارد. قابل ذکر است که در تصویر ۴-۱۲ برای نمونه‌ها با جهت‌داری 60° درجه به جهت وجود فقط دو داده مفهوم رگرسیون بی‌معنی است ولی فقط جهت مقایسه آورده شده است. بیشترین تأثیر جهت‌داری و فاصله‌داری مربوط به نمونه‌ها با جهت‌داری شکستگی 60° درجه و تعداد ۲ شکستگی یا فاصله‌داری ۱۲ میلی‌متر و کم‌ترین تأثیر مربوط به نمونه‌ها با جهت‌داری شکستگی صفر درجه و تعداد ۱ شکستگی یا فاصله‌داری بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در واقع با افزایش جهت‌داری شکستگی میزان جریان سیال درون شکستگی‌ها به صورت محلی افزایش می‌یابد و کاهش فاصله‌داری سبب تأثیرپذیری بیشتر شکستگی‌ها بر یکدیگر شده و به انتقال بیشتر جریان کمک خواهد کرد. بنابراین تأثیر هر دو پارامتر جهت‌داری و فاصله‌داری با یکدیگر انتقال بیشتر جریان را به همراه دارد. در ضمن تغییرات میزان هدایت هیدرولیکی با افزایش تعداد شکستگی برای شکستگی با جهت‌داری بزرگتر از 30° درجه به دلیل اختلاف گرادیان هیدرولیکی قابل ملاحظه‌تر است. میزان تغییرات هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای یک شکستگی و جهت‌داری 15° ، 30° ، 45° و 60° نسبت به نمونه‌ی دارای یک شکستگی و جهت‌داری صفر

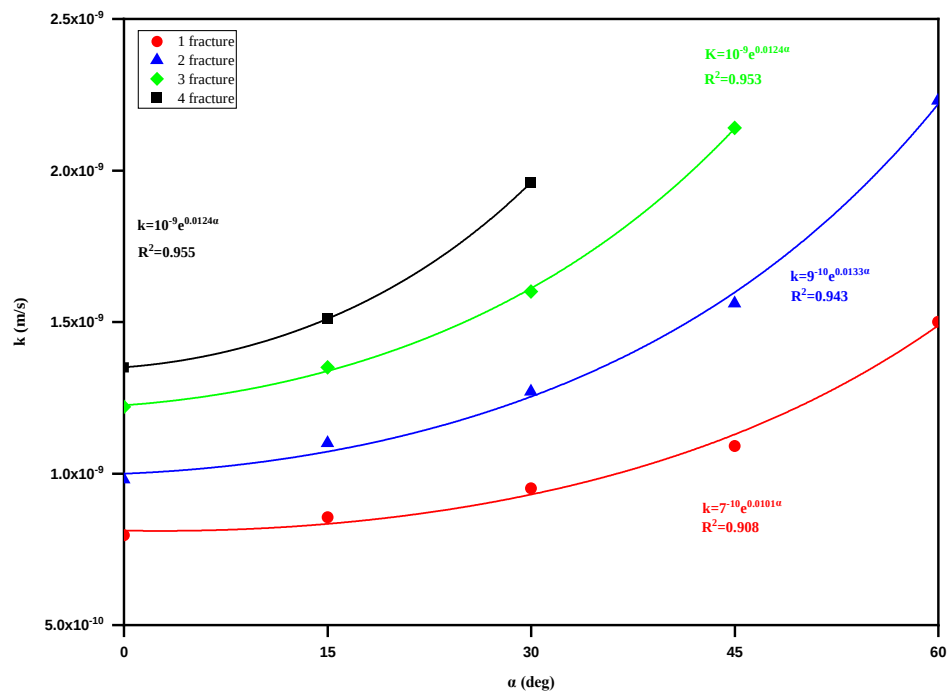
درجه به ترتیب برابر با ۷، ۱۹، ۳۷ و ۸۸ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای دو شکستگی و جهت‌داری ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نسبت به نمونه‌ی دارای دو شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۱۲، ۳۰، ۵۹ و ۱۲۷ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای سه شکستگی و جهت‌داری ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نسبت به نمونه‌ی دارای سه شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۱۱، ۳۱ و ۷۵ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای چهار شکستگی و جهت‌داری ۱۵ و ۳۰ نسبت به نمونه‌ی دارای چهار شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۱۲ و ۴۵ درصد است.

میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری صفر درجه و تعداد شکستگی‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به نمونه دارای یک شکستگی و جهت‌داری صفر، ۲۳، ۵۳ و ۷۰ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۱۵ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به نمونه دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۱۵ درجه، ۲۸، ۵۸ و ۷۷ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۳۰ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به نمونه دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۳۰ درجه، ۳۴، ۶۸ و ۱۰۶ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۴۵ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲ و ۳ نسبت به نمونه دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۴۵ درجه، ۴۳ و ۹۶ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۶۰ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲ نسبت به نمونه دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۶۰ درجه، ۴۹ درصد است.

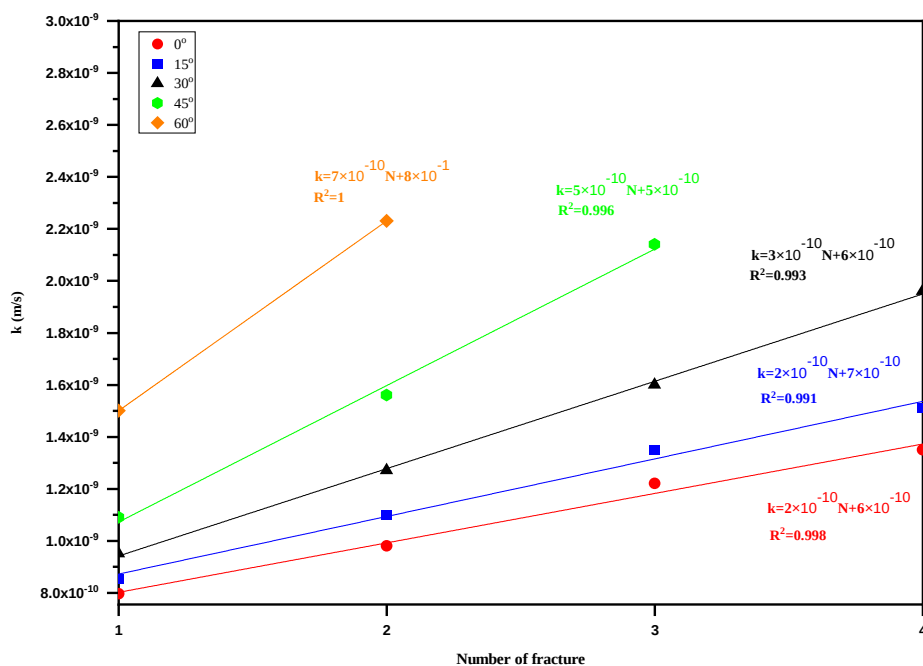
برای نمونه‌های دارای یک شکستگی، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی نسبت به نمونه بدون شکستگی، برای جهت‌داری صفر درجه ۳ درصد، جهت‌داری ۱۵ درجه در حدود ۱۱ درصد، جهت‌داری ۳۰ درجه، ۲۳ درصد، جهت‌داری ۴۵ درجه، ۴۱ درصد و برای جهت‌داری ۶۰ درجه، ۹۴ درصد است. برای نمونه‌ها با دو شکستگی، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی به ترتیب برای جهت‌داری صفر درجه، ۱۵ درجه، ۳۰ درجه، ۴۵ درجه و ۶۰ درجه برابر با ۲۷ درصد، ۴۲ درصد، ۶۴ درصد، ۱۰۲ درصد و ۱۸۸ درصد است. برای نمونه‌های دارای سه شکستگی، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری صفر درجه، ۵۸ درصد، برای جهت‌داری ۱۵ درجه، ۷۵ درصد، برای جهت‌داری ۳۰ درجه، ۱۰۷ درصد، برای جهت‌داری ۴۵ درجه، ۱۷۷ درصد است. برای نمونه‌های دارای چهار شکستگی، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری صفر درجه، ۷۵ درصد، برای جهت‌داری ۱۵ درجه، ۹۵ درصد و برای جهت‌داری ۳۰ درجه، ۱۵۳ درصد است.

برای نمونه‌هایی با جهت‌داری صفر درجه، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی نسبت به نمونه بدون شکستگی، برای یک شکستگی، ۳ درصد، برای دو شکستگی، ۲۷ درصد، برای سه شکستگی، ۵۸ درصد و برای چهار شکستگی، ۷۵ درصد است. برای نمونه‌هایی با جهت‌داری ۱۵ درجه، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای یک شکستگی، ۱۱ درصد، برای دو شکستگی، ۴۲ درصد، برای سه شکستگی، ۷۵ درصد و برای چهار شکستگی، ۹۵ درصد است. برای نمونه‌هایی با جهت‌داری ۳۰ درجه، میزان تغییرات هدایت

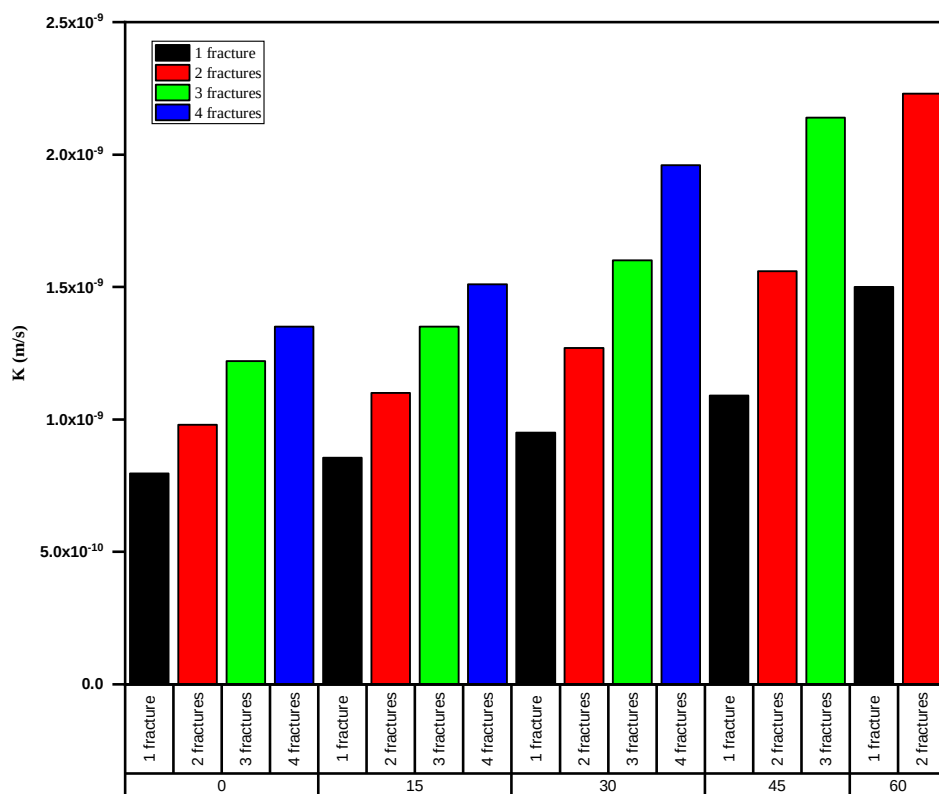
هیدرولیکی برای یک شکستگی، ۲۳ درصد، برای دو شکستگی، ۶۴ درصد، برای سه شکستگی، ۱۰۷ درصد و برای چهار شکستگی، ۱۵۳ درصد است. برای نمونه‌هایی با جهت‌داری ۴۵ درجه، میزان تغییرات به ترتیب برای یک، دو و سه شکستگی برابر با ۴۱ درصد، ۱۰۲ درصد، ۱۷۷ درصد است. همچنین برای نمونه‌هایی با جهت‌داری ۶۰ درجه، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای ۱ شکستگی، ۹۴ درصد، برای دو شکستگی، ۱۸۸ درصد است.



شکل (۴-۱۱) میزان هدایت هیدرولیکی در برابر جهت‌داری شکستگی‌ها و تعداد شکستگی‌ها



شکل (۴-۱۲) میزان هدایت هیدرولیکی در برابر تعداد شکستگی ها و جهت داری شکستگی ها



شکل (۴-۱۳) تغییرات هدایت هیدرولیکی متناسب با جهت داری و فاصله داری شکستگی ها

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادات

نتایج حاصل از بررسی تأثیر هندسه ناپیوستگی بر میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش آزمایشگاهی نشان داد که:

۱- برای نمونه فیبر نخ‌دار در فشارهای کم، طبق نمودار تنش کرنش، میزان تغییر شکل قابل ملاحظه نیست. بنابراین به منظور اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، گرادیان فشار باید در محدوده کم به نمونه اعمال شود.

۲- مخازن نفتی متعددی وجود دارد که از تخلخل و تراوایی ماتریکس ناچیز برخوردار هستند و نقش اصلی جریان سیال در این مخازن به عهده پارامترهای شکستگی‌ها مانند فاصله‌داری، جهت‌داری، دهانه بازشدگی و غیره است. بنابراین انتخاب نمونه فیبر نخ‌دار که دارای ماهیت تراوایی و تخلخل ماتریکس کم است می‌تواند گزینه مناسبی برای بررسی تأثیر پارامترهای شکستگی بر تراوایی میدان‌های نفتی دیگر دارای شرایط مشابه باشد.

۳- بررسی پارامترهای فیزیکی شامل میزان جذب آب و درصد تخلخل و پارامترهای مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوره و رفتار منحنی تنش-کرنش انجام شده و محاسبه هدایت هیدرولیکی بر روی دو نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار نشان داد که نمونه فیبر نخ‌دار به دلیل انعطاف پذیری بالا، رفتار الاستیک-پلاستیک، قابلیت جذب کم آب و هدایت هیدرولیکی کم می‌تواند نمونه‌ای مناسب به منظور ارزیابی هندسه شکستگی‌ها بر میزان تراوایی باشد.

۴- بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر روی نمونه‌های فیبر نخ‌دار نشان داد که افزایش جهت‌داری و کاهش فاصله‌داری میزان هدایت هیدرولیکی را به صورت نمایی افزایش می‌دهد و این افزایش برای شکستگی‌ها با جهت‌داری بزرگتر از ۳۰ درجه بیشتر است. به‌طوری‌که میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به نمونه‌ی دارای یک شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۷، ۱۹، ۳۷ و ۸۸ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای دو شکستگی و جهت‌داری ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نسبت به نمونه‌ی دارای دو شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۱۲، ۳۰، ۵۹ و ۱۲۷ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای سه شکستگی و جهت‌داری ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به نمونه‌ی دارای سه شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۱۱، ۳۱ و ۷۵ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های دارای چهار شکستگی و جهت‌داری ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به نمونه‌ی دارای چهار شکستگی و جهت‌داری صفر درجه به ترتیب برابر با ۱۲ و ۴۵ درصد است.

۵- تأثیر فاصله‌داری بر میزان هدایت هیدرولیکی برای شکستگی‌ها با جهت‌داری بزرگتر از ۳۰ درجه به دلیل افزایش جریان درون شکستگی‌ها و در نتیجه تأثیر بیشتر جریان ناپیوستگی‌ها بر یکدیگر قابل ملاحظه‌تر است.

۶- رابطه بین میزان هدایت هیدرولیکی و تعداد شکستگی به صورت خطی می‌باشد و برای شکستگی با جهت‌داری ۰ و ۱۵ درجه با افزایش تعداد شکستگی نرخ تغییرات میزان هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد و به نظر می‌رسد این روند برای سایر جهت‌داری‌ها و با افزایش تعداد شکستگی به وجود آید. در واقع با افزایش تعداد شکستگی، روند نمودار به صورت خطی نیست.

۷- تغییرات میزان هدایت هیدرولیکی با افزایش تعداد شکستگی برای شکستگی با جهت‌داری بزرگتر از ۳۰ درجه قابل ملاحظه‌تر است. به طوری که میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری صفر درجه و تعداد شکستگی‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به نمونه‌ی دارای یک شکستگی و جهت‌داری صفر، ۲۳، ۵۳ و ۷۰ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۱۵ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به نمونه‌ی دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۱۵ درجه، ۲۸، ۵۸ و ۷۷ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۳۰ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به نمونه‌ی دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۳۰ درجه، ۳۴، ۶۸ و ۱۰۶ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۴۵ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲ و ۳ نسبت به نمونه‌ی دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۴۵ درجه، ۴۳ و ۹۶ درصد است. میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی برای جهت‌داری ۶۰ درجه و تعداد شکستگی‌های ۲ نسبت به نمونه دارای یک شکستگی و جهت‌داری ۶۰ درجه، ۴۹ درصد است.

پیشنهادهات

۱- به نظر می‌رسد که با افزایش تعداد شکستگی‌ها و کاهش فاصله‌داری، میزان هدایت هیدرولیکی ثابت باقی بماند. از این رو، پیشنهاد می‌شود نمونه‌هایی با تعداد شکستگی‌های بیشتر از این تحقیق تهیه شود و تأثیر آن بر تراوایی بررسی شود.

۲- در حین انجام آزمایشات، برای شکستگی با جهت‌داری بزرگتر از ۳۰ درجه، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان هدایت هیدرولیکی ایجاد شده است. پیشنهاد می‌شود که در محدوده جهت‌داری ۲۰ تا

۴۰ درجه، بررسی هدایت هیدرولیکی بر اساس تغییرات جهت‌داری در بازه ۵ درجه و یا کمتر انجام شود.

۳- پیشنهاد می‌شود با به کار گیری نمونه از جنس‌های مختلف سنگی و مقایسه با نمونه های مصنوعی، اثر ناهمگنی احتمالی و تاثیر زمینه هر جنس سنگ به دست آید.

مراج

امیری، م.، مومیوند، ح.، (۱۳۹۶)، "ساخت ماسه‌سنگ مصنوعی با حوزه وسیعی از تخلخل"، نشریه علمی-پژوهشی ژئومکانیک نفت، شماره ۱، صفحات ۸۵-۹۹.

پرهام، س.، کمالی، م. ر.، (۱۳۹۱)، "بررسی انواع تخلخل، عوامل موثر بر آن و زون‌بندی مخزن دالان بالایی در برش کوه سرمه و خلیج فارس"، مجله علوم زمین، شماره ۹۲، ص ۹۳-۱۰۴.

درستکار، م. ج.، محبی، ع.، صرافی، ا.، سلطانی‌گوهریزی، ع.، (۱۳۸۸)، "بررسی آزمایشگاهی تزریق غیرامتزاجی متناوب آب گرم و گاز دی اکسیدکربن گرم در ازدیاد برداشت نفت در یک مدل شکاف‌دار"، مجله مهندسی شیمی ایران، سال هشتم، شماره ۴۳ (شماره ویژه)، ص ۱۳۹-۱۴۸.

رسولی‌منش، ر.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد: "بررسی اثر بنتونایت بر خواص رئولوژی سیال پلیمری و کاهش تراوایی در مغزه‌ی کربناته"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

شریفی‌گلوپیک، ح.، آلوکی‌بختیاری، ح.، اصفهانی، م. ر.، ولی، ج.، صدیقی، ح.، (۱۳۹۴)، "مطالعه تراوایی نسبی به روش پایا روی مغزه‌های ترکیبی کربناته با استفاده از پرتو ایکس جهت تعیین اشباع درجا"، ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۲۸، صفحات ۴۳-۵۰.

فرهمند، ک.، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد: "آنالیز حساسیت تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار"، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

صانعیان، س.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد: "بررسی نقش جهت‌گیری درزه‌های طبیعی در عملیات ازدیاد برداشت توسط تزریق آب شور در مخازن کربناته بوسیله‌ی سیلاب‌زنی مغزه در مطالعه‌ی آزمایشگاهی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

عباسی، س.، شهرآبادی، ع.، حشمتی، م.، قره‌شیخلو، ع. ا.، (۱۳۹۳)، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی فرایند تزریق آب به نمونه‌ی سنگ مخزن ماسه‌ای با رویکرد اثر شکاف بر اندازه‌گیری آسیب‌دیدگی سازند"، مجله‌ی پژوهش نفت، شماره ۸۰، ص ۴۱-۵۳.

لطفی، م.، تخم‌چی، ب.، (۱۳۹۸)، "ارایه رویکرد نوینی برای ساخت مغزه‌های مصنوعی شکسته با الگوی زبری تعریف شده برای آزمایش در شرایط مخزن"، نشریه مهندسی منابع معدنی، شماره ۳، صفحات ۸۵-۶۷.

محمدی قراگوز، م.، مومیوند، ح. (۱۳۹۷)، بررسی تأثیر جهت‌یافتگی، تعداد دسته و فراوانی ناپیوستگی‌های سنگ قبل و بعد از بهسازی با تزریق سیمان در میزان تراوایی، پژوهش‌های دانش زمین، سال نهم، شماره ۳۶، صفحات ۱۱۴-۱۲۷

Ahr, W.M., (2008), *Geology of carbonate reservoirs*, Wiley publication.

Alzayer, Y., Eichhubl, P., laubach, S. E., (2015), “Non-linear growth kinematics of opening-mode fractures”, **Journal of Structural Geology** 74, pp.31–44.

Anders, M. H., Laubach, S. E., Scholz, C. H., (2014), Microfractures: A Review, **Journal of Structural Geology** 69, pp. 377–394.

Apaydin, O. G., Ozkan, E., Raghavan, R., (2012), Effect of discontinuous microfractures on ultratight matrix permeability of a dual-porosity medium. **SPE Reservoir Evaluation and Engineering**. 15, pp. 473-485.

Arianfar, A., Ramezanzadeh, A. (2020). “Numerical study of limestone permeability changes in terms of effective confining stress, case study: South pars reservoir limestone” **International journal of special topic and reviews in porous media.**, 11, pp.435-452 .

Arianfar, A., Ramezanzadeh, A., Khalili, M., (2021), “Numerical modeling of closure effect of natural fracture surfaces of rock on behavior of fluid flow” **Journal of Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 80, pp.2335-2348.

Azizmohammadi, S., Sedaghat, M., (2020). “The impact of stress orientation and fracture roughness on the scale dependency of permeability in naturally fractured rocks” **Journal of Advances in Water Resources**” 141, pp.103579.

Bisdom, K., Bertotti, G., Bezerra, F.H. (2017), “Inter-well scale natural fracture geometry and permeability variations in low deformation carbonate rocks” **Journal of Structural Geology.**, 97, pp.23-36.

Bisdom, K., Bertotti, G., Nick, H.M., (2016) “The impact of in-situ stress and outcrop-based fracture geometry on hydraulic aperture and upscaled permeability in fractured reservoirs” **Journal of Tectonophysics.**, 690, pp.63-75.

Blount, D., Moore, C. H., (1969) “Depositional and non-depositional carbonate breccias”., **Chiantla Quadrangle Guatemala. Geol. Soc. Am. Bull.**, 80. pp.429-442.

Capuano, R. M., (1993), Evidence of fluid flow in microfractures in geopressed shales. **American Association Petroleum Geologist Bulletin.** 77 (8), pp. 1303–1314

Caulk, R. A., Ghazanfari, E., Perdrial, J. N., Perdrial, N., (2016), Experimental investigation of fracture aperture and permeability change within Enhanced Geothermal Systems, **Geothermics** 62, pp. 12–21.

Chen, J., Li, T., Zhang, Y., (2015) "Application of the unstructured grids in the numerical simulation of fractured horizontal wells in ultra-low permeability gas reservoirs" **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 22, pp.580–590.

Chen, L., Huang, Y., (2015) "Experimental study and characteristic finite element simulation of solute transport in a cross-fracture" **Geoscience Frontiers**, pp.1–5.

Chen, Y., Lian, H., Liang, W., Yang, J., Nguyen, V. P., Bordas, S.P.A. (2019) "The influence of fracture geometry variation on non-Darcy flow in fractures under confining stresses" **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 113, pp.59-71.

Chen, Y., Liang, W., Lian, H., Yang, J., Yang, V.P., (2017) "Experimental study on the effect of fracture geometric characteristics on the permeability in deformable rough-walled fractures", **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 98, pp.121-140.

Congbin, Y., (2018) "Test and analysis on the permeability of induced fractures in shale reservoirs" **Journal of Natural Gas Industry**, 5, pp.513-522.

Cooper, S.P., Lorenz, J.C., PhD. Thesis, (2010) "Studies in Naturally Fractured Reservoirs for Improved EOR", Report on EORI, University of Wyoming.

Farzaneh, S. A., Kharrat, R., Ghazanfari, M. H., (2010) "Experimental study of solvent flooding to heavy oil in fractured five-spot micro-models: The role of fractured geometrical characteristics" **Journal of Canadian Petroleum Science**, 49, 3, pp.36.

Fourar, M., Bories, S., (1995) "Experimental study of air–water two-phase flow through a fracture (narrow channel)" **Int. J. Multiphase Flow**, 21, 4, pp. 621–637.

Fourar, M., Bories, S., Lenormand, R., Persoff, P., (1993) "Two-phase flow in smooth and rough fractures: measurement and correlation by porous-medium and pipe flow models" **Water Resour. Res.**, 29, pp.3699–3708.

Fourar, M., Lenormand, R., (2001), "A new model for two-phase flows at high velocities through porous media and fractures" **J. Pet. Sci. Eng.**, 30, pp.121–127.

Gale, J. F. W., Lander, R. H., Reed, R. M., Laubach, S. E., (2010), Modeling fracture porosity evolution in dolostone. **J. Struct. Geol.** 32 (9), pp. 1201–1211.

Gao, Zh., Li, B., Li, J., Wang, B., Ren, Ch., Xu, J., Chen, Sh., (2021) "Coal permeability related to matrix-fracture interaction at different temperatures and stresses" **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 200, pp.108428.

Groshong, R.H., (1988), Low-temperature deformation mechanisms and their interpretation. **Geology Society. Am. Bull.** 100, 1329-1360.

Hadgu, T., Kalinina, E., Lowry, T. S., (2016) “Modeling of heat extraction from variably fractured porous media in Enhanced Geothermal Systems” **Geothermics.**, 61, pp.75–85.

Hadgson, R.A., (1961), Classification of structures on joint roughness, **American Journal of Science.**, 259, pp. 493-502

Hicks, H., (1884), On the Cambrian conglomerates resting upon and in the vicinity of some pre-Cambrian rocks (the so-called intrusive masses) in Anglesey and Caernarvonshire, **Geology Society. Lond. Q. J.** 40, pp. 187–199.

Hooker, J. N., Laubach, S. E., Marrett, R., (2014), A universal power-law scaling exponent for fracture apertures in sandstone, **Geology Society.**

Jiang, T., Yao, W., Sun, X., Qi, Ch., Li, X., Xia, K., Zhang, J., Nasser, M.H.B., (2020) “Evolution of anisotropic permeability of fractured sandstones subjected to true-triaxial stresses during reservoir depletion” **Journal of Petroleum Science and Engineering.**, 1016, pp.108238.

Koning, E. J. L., PhD. Thesis, (1988) “Water flooding under fracturing condition” TR diss 1664, Delft University of Technology.

Lang, P.S., Paluszny, A., Nejati, M., Zimmerman, R.W. (2018) “Relationship Between the Orientation of Maximum Permeability and Intermediate Principal Stress in Fractured Rocks” **Journal of Water Resources Research.**, 54, pp.8734-8755 .

Latham, J.P., Xiang, J., Belayneh, M., Nick, H.M., Tsang, C.F., Blunt, M.J. (2013) “Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures” **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.**, 57, pp.100-112.

Lash, G. G., Engelder, T., (2005), An analysis of horizontal microcracking during catagenesis: example from the Catskill delta complex. **American Association Petroleum Geologist Bulletin.** 89, pp. 1433-1449.

Lee, K., Huh, C., Sharma, M. M., (2011) “Impact of fracture growth on well injectivity and reservoir sweep during waterflood and chemical EOR process” SPE 146778, Technical conference and exhibition held in Denver, Colorado.

Li, D., Liu, X., Liu, X., (2015) “Experimental Study on Artificial Cemented Sand Prepared with Ordinary Portland Cement with Different Contents” **Journal of materials.**, 8, pp.3960-3974.

Laubach, S.E., (2003), Practical approaches to identifying sealed and open fractures, **American Association of Petroleum Geologist- Bullitan.** 87 (4), pp. 561–579.

Moore, C. H., (1989) “Carbonate Diagenesis and Porosity” **Elsevier, Amsterdam**, pp.338.

Morel, D., Bourbiaux, B., Latil, M., Thiebot, B., (1993) “Diffusion effects in gas flooded light-oil fractured reservoirs” **SPE Advanced Technology Series.**, 1(02), pp.100–109.

Parvazdavani, M., Abbasi, S., Zare-Reisabadi, M. R., (2016) “Experimental study of gas–oil relative permeability curves at immiscible/near miscible gas injection in highly naturally fractured reservoir” **Egyptian Journal of Petroleum.**, 26, 1, pp.171-180.

Peng, H., Zhao, Zh., Chen, W., Chen, Y., Fang, J., Li, B., (2020) “Thermal effect on permeability in a single granite fracture: Experiment and theoretical model” **International Journal of Rock echanics and Mining Sciences.**, 131, pp.104358.

Priest, S.D. (1993) Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman & Hall, London

Priest, S.D., Hudson, J.A., (1981), Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Survey. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, vol. 18, pp. 183-197.

Schlumberger images services, <http://www.slb.com>.

Shedid, S.A., (2005) “Influences of fracture orientation on oil recovery by water and polymer flooding processes: An experimental approach” **Journal of Petroleum Science and Engineering.**, 50, 2, pp.285.

Shedid, S.A., (2009) “Influences of Different Modes of Reservoir Heterogeneity on Performance and Oil Recovery of Carbon Dioxide Miscible Flooding” **Journal of Canadian Petroleum Science.**, 48, 2, pp.29.

Shiflett, D., Simlote, V., Burns, S., Thompson, T., (2003) “Water flood conformance in a highly faulted Carbonate reservoir” SPE 81545, SPE 13th Middle East Oil show and conference in Bahrain.

Singh, K. K., Singh, D. N., Gamage, R. P., (2016) “Effect of sample size on the fluid flow through a single fractured granitoid” **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, pp.1–12.

Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P., (2010), Applied Hydrogeology of fractured rocks, second edition, springer

Sorkhabi, R., (2014), Fracture, fracture everywhere part I, **Energy geoscience magazine**, 11

Tuttle, O. F., (1949), Structural petrology of planes of liquid inclusions. **Journal of Geology**. 57, 331-356.

Wang, Sh., Elsworth, D., Liu, J. (2011) “Permeability evolution in fractured coal: The roles of fracture geometry and water-content” **International Journal of Coal Geology**., 87, pp.13-25.

Wong, R. C. K., Pan, Z., Maini, B. B., (2008) “Correlation between pressure gradient and phase saturation for oil-water flow in smooth- and rough-walled parallel-plate models”. **Water Resour. Res.**, 44, 2.

Yao, C., Jiang, Q.H., Shao, J.F. (2015) “A Numerical Analysis of Permeability Evolution in Rocks with Multiple Fractures” **Journal of Transport in Porous Media**., 108, pp.289-311.

Zahid, A., PhD. Thesis, (2012) “Smart Waterflooding in Carbonate Reservoirs” Technical University of Denmark, pp.31.

Zhang, C-L., (2016) “The stress–strain–permeability behaviour of clay rock during damage and recompaction” **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**., 8, pp.16–26.

Zhang, T., He,X., Liu, Y., Zhao, Y., Yang, K., Yu, X. (2020) “Experimental study on permeability response in fractured rock to the effect of hydro-mechanical coupling, fracture geometry, and component content” **Journal of Natural Hazards**., 105, pp.1439-1451.

Zhang, Y., Ma, Y., Hu, Zh., Lei, H., Bai, L., Lei, Zh., Zhang, Q., (2019) “An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite” **Journal of Renewable Energy**., 140, pp.615-624.

Abstract

Studies on rock fractures, especially those hosting oil reservoirs, have always been a fascinating topic for researchers and companies active in the oil and mineral fields, and have increased significantly in recent decades; Because despite its scientific status, it is also a practical issue. In fractured reservoirs, the study of fractures is crucial in the exploration, exploitation and design of enhanced recovery. One of the main objectives in the study of reservoir fractures is to study the fluid behavior and the relationship between flow rate and the most important geomechanical properties of fractures including aperture, continuity, orientation, fracture length and surface roughness. Also, by knowing the effect of each of the mentioned cases on the hydraulic conductivity of the fluid, a more accurate prediction can be made in the desired goal. According to previous studies in this field, in this study, the effect of spacing and orientation on the hydraulic conductivity of the fluid was investigated. Studying the effect of fracture geometry on hydraulic conductivity or permeability on a laboratory scale requires the selection of a suitable sample in terms of physical and mechanical properties. Therefore, in this study, in the first place, in order to investigate the effect of fracture geometry on a laboratory scale, an artificial sample made of concrete was selected. The choice of concrete mixing plan is one of the important factors for preparing a suitable concrete sample. In addition to concrete samples, other synthetic samples made of flax fiber and phenolic resin known as fibrous fiber were also considered. The sample was cut into cylinders with a diameter of 38 millimeters and a length of 100 millimeters using CNC technology. Also, the physical and mechanical parameters of the samples, including density, water absorption, porosity, compressive and shear wave velocity, hydraulic conductivity, uniaxial compressive strength were measured and compared with each other. The measurement of hydraulic conductivity is based on the Darcy relation and in the vertical direction. The results of the experiments showed that the concrete sample could not be a suitable sample for this study due to its porosity, water absorption, high hydraulic conductivity and fragility. On the other hand, the sample made of fibrous fiber not only has desirable physical and mechanical properties to study the effect of orientation and spacing, but also due to its more flexible behavior, to create fractures with different angles and different spacings is suitable. After making samples and performing experiments, the results showed that increasing the number of fractures or in other words reducing the spacing has a significant effect on the amount of hydraulic conductivity, especially for larger oriented fractures. The highest effect of orientation and spacing is related to the samples with 60 ° fracture orientation and the number of two fractures or when spacing is 12 millimeters and the lowest effect is related to the samples with zero-degree fracture orientation and the number of one fracture or spacing is greater than 50 millimeters. Also, with increasing orientation and decreasing spacing, the amount of hydraulic conductivity increases exponentially. This increase is greater for fractures larger than 30 degrees.

Keywords: hydraulic conductivity, Fracture geometry, Fibrous fiber, Orientation, Spacing.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D Thesis in Mine Exploration

Laboratory investigations on the effect of orientation and spacing of fractures on fluid flow in reservoir condition

By: Mohamad Faez

Supervisor:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Dr Reza Ghavami Riabi

Advisor:

Dr. Behzad Tokhmchi

February, 2022