

مقاله پژوهشی

## ساخت نمونه‌های مصنوعی به منظور بررسی اثر پارامترهای شکستگی بر نفوذپذیری

محمد فائز<sup>۱\*</sup>؛ بهزاد تخم‌چی<sup>۲</sup>؛ احمد رمضان زاده<sup>۳</sup>؛ سیدرضا قوامی ریابی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکترای تخصصی؛ اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2022.283223.1138

واژگان کلیدی	چکیده
نفوذپذیری بتن شکستگی فیبر نخ‌دار نمونه مصنوعی	هندسه شکستگی‌ها شامل جهت‌داری، فاصله‌داری، دهانه بازشدگی و غیره از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر میزان نفوذپذیری در سنگ‌ها می‌باشد. مطالعه اثر جهت‌داری و فاصله‌داری بر میزان نفوذپذیری در مقیاس آزمایشگاهی نیازمند انتخاب نمونه مناسب از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشد. از این رو در این تحقیق نمونه‌های مصنوعی شامل بتن و فیبر نخ‌دار انتخاب شدند و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی، میزان جذب آب، تخلخل، سرعت موج فشاری و برشی، نفوذپذیری، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیک اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که نمونه بتنی به دلیل میزان تخلخل، جذب آب، نفوذپذیری نسبتاً بالا و شکننده بودن نمی‌تواند نمونه مناسبی برای این تحقیق باشد. از طرف مقابل نمونه ساخته‌شده از فیبر نخ‌دار نه تنها از ویژگی‌های مناسب فیزیکی و مکانیکی برخوردار می‌باشد، بلکه به دلیل رفتار غیرشکننده و منعطف بودن، مطلوب برای ایجاد شکستگی‌ها با زوایای متفاوت، دهانه بازشدگی یکسان و فاصله‌داری‌های مختلف است.

### ۱. پیش‌گفتار

مطالعات پیرامون شکستگی‌ها همواره موضوعی جذاب برای محققین و شرکت‌های بزرگ بوده است که در دهه‌های اخیر به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است؛ چراکه علی‌رغم جایگاه علمی، یک مسئله کاربردی نیز می‌باشد. در مخازن شکافدار، مطالعه شکستگی‌ها در اکتشاف، بهره‌برداری و طراحی عملیات ازدیاد برداشت بسیار تعیین‌کننده است. نقشه‌های ساختاری در مقیاس میکرو و ماکرو، آنالیزهای هندسی و ژئومکانیکی، مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی و مطالعه رفتار توده سنگ، از جمله موضوعاتی هستند که مورد توجه بوده‌اند. در رابطه با اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری، مطالعات متنوعی توسط محققان انجام شده است. در سال ۲۰۰۵ شدید با انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی اثر جهت‌داری درزه‌ها و شکستگی‌ها در عملیات ازدیاد برداشت

پرداخت. در این آزمایش‌ها که از آب و پلیمر به‌عنوان سیالات تزریق‌کننده استفاده شده، پس از انتخاب نمونه‌های کربناته، شکاف‌هایی در جهات مختلف نسبت به جریان سیال در نمونه‌ها ایجاد شده است. وی از انجام آزمایش‌های خود نتیجه گرفت که در دمای اتاق، کمترین بازیافت نفت مربوط به حالت بدون درزه است. پس‌از آن، از درزه‌های افقی تا تدریجاً قائم نسبت به جهت جریان، بیشترین مقادیر بازیافت را از خود نشان دادند. این در حالی است که در مورد تزریق پلیمر، بهترین ضریب بازیافت در مورد شکاف با زاویه 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 دی‌اکسید کربن به‌صورت دقیق‌تر بررسی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین ضریب بازیافت مربوط به مغزه‌ی

جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها بر نفوذپذیری با تغییر تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آن‌ها تغییر می‌کند (محمدی قراگوز و مومیوند، ۲۰۱۸). در سال ۲۰۲۰ پنگ و همکاران به بررسی اثر دما بر نفوذپذیری به صورت آزمایشگاهی و تئوری پرداختند. مطالعات بر روی نمونه‌های گرانیته با ایجاد تک درزه درون آن انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما تحت فشار جانبی ثابت، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین در دمای ثابت و فشار جانبی ثابت با افزایش زمان و در اثر پدیده خزش نفوذپذیری روندی کاهشی خواهد داشت (Peng et al., 2020). در سال ۲۰۲۱ گائو و همکاران به بررسی نفوذپذیری 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 مؤثر، نفوذپذیری کاهش می‌یابد و تحت تنش مؤثر ثابت، با افزایش فشار حفره‌ای نفوذپذیری به صورت نمایی کاهش می‌یابد (Gao et al., 2021). در سال ۲۰۲۰ ژیانگ و همکاران به بررسی تأثیر شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری تحت آزمایش سه محوره واقعی پرداختند. در این تحقیق از نمونه‌های ماسه سنگ استفاده شده است. نتایج نشان داد که میزان نفوذپذیری، وابسته به تنش، جهت شکستگی‌ها و جهت تنش‌ها می‌باشد (Jiang et al., 2020). در سال ۲۰۲۰ آریان فر و رمضان زاده به بررسی تأثیر تنش جانبی مؤثر بر میزان نفوذپذیری بر روی نمونه‌های آهک پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش فشار جانبی میزان نفوذپذیری به دلیل بسته شدن خلل و فرج موجود در سنگ کاهش می‌یابد (Arianfar & Ramezanzadeh, 2020). در سال ۲۰۱۹ ژانگ و همکاران به مطالعه ویژگی نفوذپذیری شکستگی‌ها در اثر فرایند شکست هیدرولیکی بر روی نمونه‌های گرانیته پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش دما فشار لازم برای ایجاد شکستگی در نمونه‌های گرانیته کاهش می‌یابد و نرخ جریان سیال نقش مهمی در ایجاد شکستگی‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند (Zhang et al., 2019). در سال ۲۰۱۸ کانگبین آزمایش‌هایی در ارتباط با نفوذپذیری شکستگی‌های القایی در نمونه‌های شیلی انجام داد. در این تحقیق شکستگی‌های بسته القایی با زبری بالا ایجاد شد که می‌تواند نفوذپذیری مخازن

بدون شکاف بوده است؛ اما برخلاف روش تزریق آب و البته مشابه با آنچه از تزریق پلیمر حاصل شده بود، در صورت وجود شکاف، بیشترین ضریب بازیافت نفت مربوط به مغزه‌ای بوده که جهت شکستگی آن با جهت جریان، زاویه‌ی ۳۰ درجه بسازد (Shedid, 2009). یک سال بعد (سال ۲۰۱۰) فرزانه و همکاران نسبت به بررسی عوامل گوناگون و مؤثر در استحصال حداکثر نفت به روش تزریق محلول در مقیاس میکروسکوپی بر روی میکرو مدل‌های شیشه‌ای اقدام نمودند. از جمله پارامترهایی که در تحقیق آن‌ها مورد توجه واقع شده، وجود شکاف در سنگ بوده است. طبق گزارش ارائه شده توسط این محققین، زمانی که زاویه‌ی شکاف نسبت به جریان سیال برابر با ۴۵ درجه گردد، بیشترین میزان بازیافت نفت در حالت شکافدار به دست می‌آید (Farzaneh et al., 2010). در سال ۲۰۱۴ صانعیان با بررسی جهت‌داری درزه‌ها و شکستگی‌ها در مخازن شکافدار طبیعی، نقش آن‌ها را در میزان ازدیاد برداشت مورد مطالعه قرار داد. برای این منظور با ایجاد شکستگی‌ها تحت زوایای خاص و مشخص، آن‌ها را با استفاده از دستگاه سیلاب زنی، تحت تزریق آب‌شور با دبی‌های متفاوت قرار داد. نتایج نشان داد نمونه‌هایی که شکستگی آن‌ها موازی با جهت جریان سیال بوده است، بالاترین میزان بهره‌وری در عملیات ازدیاد برداشت را به همراه داشته است (صانعیان، ۲۰۱۴). در سال ۲۰۱۵ چن و هوانگ به منظور مطالعه در خصوص انتقال املاح از طریق مدل‌سازی عددی به روش ویژگی‌های المان محدود<sup>۱</sup> بررسی‌های خود را به صورت آزمایشگاهی 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 زاویه‌ی 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 مسئله‌ی انتقال املاح با توجه به قوانین همرفت و میزان پراکندگی اقدام کردند (Chen & Huang, 2015). در سال ۲۰۱۸ محمدی قراگوز و مومیوند به بررسی تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته و فراوانی ناپیوستگی‌های سنگ‌های آهک قبل و بعد از بهسازی با تزریق سیمان در میزان نفوذپذیری پرداختند. نتایج نشان داد که روند تأثیر

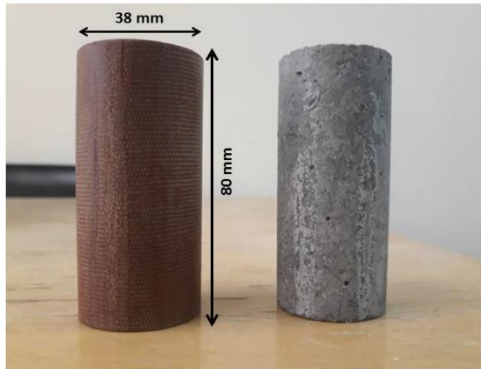
<sup>1</sup> Characteristics Finite Element Method (CFEM)

نمونه‌های گرانیت، آهک، زغال، شیل، ماسه‌سنگ به‌عنوان نمونه‌های سنگی و نمونه‌هایی مانند بتن، ماسه‌سنگ مصنوعی به‌عنوان نمونه‌های مصنوعی، به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای شکستگی بر نفوذپذیری استفاده شده است. همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی اثر شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری به دلیل مشکلات آماده‌سازی نمونه‌ها محدود می‌باشد. هدف از این تحقیق، انتخاب نمونه‌ای است که میزان تخلخل در بررسی تأثیر پارامترهای شکستگی بر نفوذپذیری اندک باشد. لذا در این تحقیق سعی بر آن شده است که با انتخاب نمونه مناسب از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، شرایط لازم برای بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری میسر شود؛ بنابراین دو نوع نمونه مصنوعی شامل بتن و فیبر نخ‌دار برای این منظور در نظر گرفته شد و خصوصیات فیزیکی شامل چگالی نمونه‌ها، میزان جذب آب، تخلخل، سرعت امواج فشاری و برشی، شکل موج فشاری، نفوذپذیری و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیک و رفتار منحنی تنش-کرنش مورد مطالعه قرار گرفت. در ضمن، نوع ماده‌ای که در ساخت نمونه مصنوعی فیبر نخ‌دار استفاده شده است در مطالعات پیشین وجود ندارد.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق در وهله اول به‌منظور بررسی اثر جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها در مقیاس آزمایشگاهی نمونه مصنوعی ساخته‌شده از بتن انتخاب شد. انتخاب طرح اختلاط بتن از جمله فاکتورهای مهم به‌منظور تهیه نمونه بتنی مناسب می‌باشد. از این رو سعی بر آن شد 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 نشان داده شده است. در این طرح، ماسه‌های رودخانه‌ای با اندازه دانه بین ۰-۵ میلی‌متر و شن شکسته با اندازه ۴/۷۵-۹/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فوق‌روان کننده استفاده‌شده از نوع (Structuro 335) محصول شرکت FOSROC می‌باشد. پس‌از این مرحله، ملات مورد نظر در استوانه‌هایی با قطر ۳۸ میلی‌متر و طول ۸۰ میلی‌متر قالب‌گیری شدند و در انتها به مدت ۲۸ روز به‌منظور رسیدن

شیلی را بدون تزریق پروپانت افزایش دهد (Congbin, 2018). در سال ۲۰۱۷ چن و همکاران ویژگی‌های هندسه شکستگی شامل دهانه بازشدگی، نسبت سطح تماس شکستگی و نحوه توزیع فضاهای خالی و نقش آن بر نفوذپذیری برای سه نوع ماسه‌سنگ با دانه‌بندی کوچک، متوسط و بزرگ را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش فشار جانبی، دهانه بازشدگی برای نمونه ماسه‌سنگ با دانه‌بندی کوچک نسبت به سایر نمونه‌ها کاهش بیشتری دارد (Chen et al., 2017). در سال ۲۰۱۵ شریفی گلوپیک و همکاران به بررسی نفوذپذیری نسبی به روش پایا روی مغزه‌های ترکیبی کربناته با استفاده از پرتو ایکس جهت تعیین اشباع درجا پرداختند. در این مطالعه برای تشکیل مغزه ترکیبی، نمونه‌های پلاگ یک گروه سنگی به هم متصل شده است (شریفی گلوپیک و همکاران، ۲۰۱۵). در سال ۲۰۲۰ هابن و همکاران به بررسی میزان نفوذپذیری در اثر شکستگی در نمونه‌های گل‌سنگ پرداختند. هدف از انتخاب نمونه گل‌سنگ، ضریب نفوذپذیری ناچیز این نمونه است (Maartje et al., 2020). در سال ۲۰۲۱ آرین فر و همکاران به‌صورت 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 به‌تنهایی قادر به بررسی رفتار هیدرولیکی درزه‌ها نمی‌باشد و پارامترهای دیگر به‌صورت هم‌زمان نیازمند آزمایش و تحلیل می‌باشد (Arianfar et al., 2021). در سال ۲۰۱۹ لطفی و تخم‌چی به بررسی ساخت مغزه‌های مصنوعی شکسته با الگوی زبری برای آزمایش در شرایط مخزن پرداختند (لطفی و تخم‌چی، ۲۰۱۹). در سال ۲۰۱۷ امیری و مومیوند اقدام به ساخت ماسه‌سنگ مصنوعی با حوزه وسیعی از تخلخل به‌منظور مطالعه در مخازن نفتی پرداختند (امیری و مومیوند، ۲۰۱۷). در مطالعه‌ای مشابه در سال ۲۰۱۵ لی و همکاران به ساخت و مطالعه ماسه‌های مصنوعی ساخته‌شده از سیمان پرتلند پرداختند (Li et al., 2015). در سال ۲۰۲۱ لی و همکاران به ارزیابی نفوذپذیری بر روی سنگ‌های مصنوعی با توجه به تغییرات دهانه بازشدگی شکستگی و بر اساس روش مقاومت الکتریکی پرداختند (Lee et al. 2021). در مطالعات پیشین با توجه به اهداف تحقیق نیازمندی‌ها و مطالعه موردی بودن آن‌ها از نمونه‌های مختلف شامل



شکل ۱. نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

به حداکثر مقاومت، درون آب قرار داده شدند. 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 ۸۰ میلی‌متر برش داده شدند. شکل ۱ نمونه‌های مصنوعی بتنی و فیبر نخ‌دار تهیه شده را نشان می‌دهد. ویژگی مقاومتی فیبر نخ‌دار در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن مورد مطالعه

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

جدول ۲. ویژگی‌های مقاومتی فیبر نخ‌دار

مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	مقاومت در برابر ضربه (ژول بر متر)	مقاومت الکتریکی (اهم)	تحمل ولتاژ عمود بر صفحه (کیلوولت)	مقاومت حرارتی به مدت نیم ساعت (درجه سانتی‌گراد)
۵۴	۱۰۴	۱۱۲/۳۱	۱۰ <sup>۱۰</sup>	۵	۱۶۰-۱۵۰

### ۳. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

#### ۱.۳ چگالی، تخلخل و جذب آب

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار 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 نشان داده شده 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. میانگین خصوصیات فیزیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

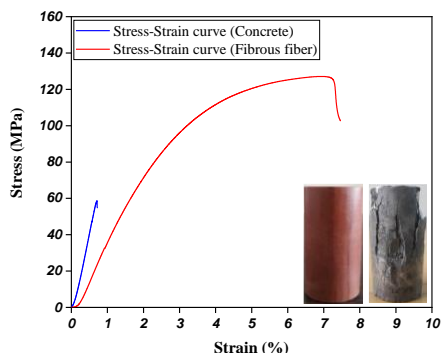
نوع نمونه	تعداد نمونه	چگالی خشک $gr/cm^3$	چگالی اشباع $gr/cm^3$	میزان تخلخل (%)	جذب آب (%)	درصد پوکی (%)
نمونه بتنی	۳	۲/۳۲	۲/۳۹	۷/۲	۳/۱۲	۷/۷۶
نمونه فیبر نخ‌دار	۱	۱/۵	۱/۵	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۲۵

### ۲.۳ رفتار منحنی تنش-کرنش

ایجاد شکاف 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 ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲. دستگاه بارگذاری خودکار



شکل ۳. منحنی تنش-کرنش مرتبط با نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

به منظور بررسی رفتار منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها، از دستگاه بارگذاری خودکار ژئوتک<sup>۲</sup> با ظرفیت ۶۰ تن و نرخ بارگذاری ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. همچنین نوع بارگذاری به صورت استاتیک می‌باشد. (شکل ۲). نمودار تنش-کرنش نمونه بتنی و نمونه فیبر نخ‌دار در شکل ۳ 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 انعطاف‌پذیری 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 مگا پاسکال خطی بوده و پس از آن تا لحظه شکست رفتار منحنی به صورت پلاستیک و غیرخطی می‌باشد. به دلیل رفتار شکننده نمونه بتنی، زاویه صفحات شکست شکل گرفته پس از گسیختگی نمونه به صورت قائم می‌باشد که نشان‌دهنده وجود شکستگی‌های کششی می‌باشد (شکل ۳). بر اساس رابطه بین صفحه شکست و زاویه اصطکاک داخلی به صورت رابطه ۱، زاویه اصطکاک داخلی نمونه بتنی قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\beta$  زاویه صفحه شکست و  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی نمونه بتنی می‌باشد. شکننده نبودن نمونه فیبر نخ‌دار باعث خواهد شد تا در هنگام

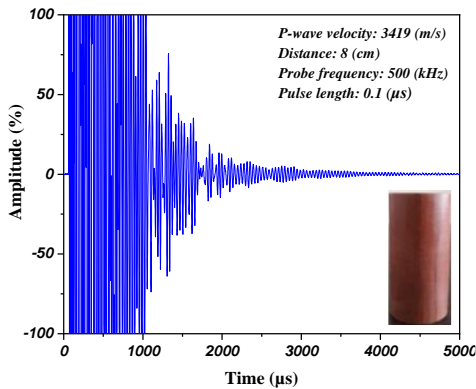
جدول ۴. میانگین خصوصیات مکانیکی نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

مدول تانژانتی	مدول سکانتی	مقاومت فشاری تک‌محوره	تعداد نمونه	نوع نمونه
GPa	GPa	MPa		
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

<sup>2</sup>Geotech

### ۳.۳ 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. اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج به همراه نمونه‌های بتنی و فیبر نخ‌دار در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، سرعت موج فشاری و برشی و شکل امواج فشاری و برشی اندازه‌گیری شد. 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 ۵). به عبارت دیگر به دلیل تغییر شکل پذیری کم نمونه بتنی، رفتار الاستیک، شکننده بودن و چگالی بیشتر نسبت به نمونه فیبر نخ‌دار، دامنه موج با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و در مدت‌زمان کمتر تعداد پالس‌های بیشتری ثبت شده است. در مقابل برای نمونه تهیه‌شده از فیبر نخ‌دار شکل موج کشیده‌تر می‌باشد (شکل ۶). نتایج سرعت امواج فشاری و برشی در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۶. شکل موج فشاری مرتبط با نمونه فیبر نخ‌دار

جدول 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

### ۴.۳ ضریب نفوذپذیری

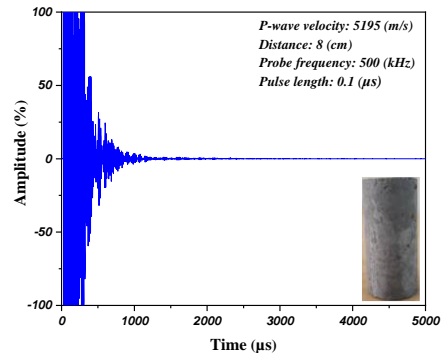
از جمله پارامترهای دیگر در مطالعه تأثیر هندسه شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری، ضریب نفوذپذیری نمونه می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار از دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری طراحی شده در دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن استفاده شد (شکل ۷). همچنین اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری به صورت دقیق در شکل ۸ 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 مگا پاسکال 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، نفوذپذیری با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$Q = k \frac{\Delta h}{L} A \quad (2)$$

در این رابطه  $Q$  دبی آب،  $k$  ضریب نفوذپذیری،  $\Delta h$  اختلاف هد آب در دو طرف نمونه،  $L$  و  $A$  به ترتیب طول و سطح مقطع نمونه می‌باشد.



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

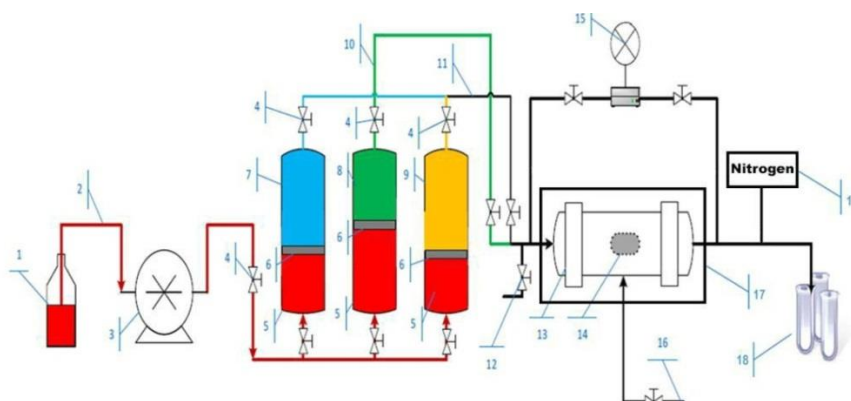


شکل ۵. شکل موج فشاری مرتبط با نمونه بتنی



شکل ۷. الف) شمای کلی دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری. ب) پمپ تزریق آب (۲) پمپ روغن به منظور اعمال فشار محصورکننده (۳) آون و محفظه نگهدارنده مغزه، ب) قسمت درون آون

این دستگاه با دارا بودن قابلیت اندازه‌گیری و پذیرفتن مغزه‌های ۱/۵ اینچی، میزان تراوایی نمونه‌های قرارگرفته 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 ۰/۱ میلی‌لیتر بر دقیقه و دقت سنسورهای قرائت فشار آب و فشار محصورکننده اطراف نمونه ۱ پی اس آی است. بر اساس اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده، میانگین ضریب نفوذپذیری برای نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار در جدول ۶ نشان داده‌شده است. در واقع جذب کم آب و تخلخل ناچیز نمونه فیبر نخ‌دار سبب شده است که نفوذپذیری نمونه کاهش یابد. از این‌رو نمونه فیبر نخ‌دار به دلیل ضریب نفوذپذیری بسیار کم می‌تواند به‌عنوان نمونه مناسب به‌منظور بررسی اثر هندسه شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری انتخاب شود.



شکل ۸. اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه نفوذپذیری. 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)

#### ۴. بحث و نتایج

ساخت نمونه‌های مصنوعی می‌تواند ابزاری مفید به‌منظور بررسی اثر پارامترهای شکست بر میزان نفوذپذیری باشد. برای این منظور بررسی و مطالعه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مصنوعی ساخته‌شده از اهمیت بسزایی برخوردار

جدول ۶: میانگین نفوذپذیری نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار

نوع نمونه	تعداد نمونه	نفوذپذیری (m/sec)
بتنی	۲	$2/35 \times 10^{-10}$
		$3 \times 10^{-10}$
فیبر نخ‌دار	۲	$7/72 \times 10^{-10}$
		$8 \times 10^{-10}$

الاستیک-پلاستیک، قابلیت جذب کم آب و ضریب نفوذپذیری بسیار کم می‌تواند نمونه‌ای مناسب به منظور ارزیابی جهت‌داری و فاصله‌داری شکستگی‌ها بر میزان نفوذپذیری باشد. همچنین به دلیل رفتار غیرشکننده فیبر نخ‌دار در مقایسه با نمونه بتنی، امکان ایجاد شکستگی‌ها با دهانه باز شدگی یکسان بیشتر خواهد بود. در واقع نمونه‌ای برای بررسی پارامترهای شکست مانند شیب و زاویه‌داری شکستگی‌ها مناسب است که علاوه بر تخلخل به میزان کم، رفتار غیر شکننده نیز به منظور جلوگیری از ایجاد آسیب در حین برش نمونه دارا باشد. لازم به ذکر است نمونه فیبر نخ‌دار به دلیل تغییر شکل‌های قابل توجه در فشارهای زیاد، برای گردایان فشاری کم کارایی بهتری دارد. در مجموع، مخازن نفتی متعددی وجود دارد که از تخلخل و نفوذپذیری ماتریکس ناچیز برخوردار هستند مانند میدان نفتی (Giddings) در ایالت تگزاس. پارامتر تأثیرگذار بر نفوذپذیری در این مخزن بر عهده شکستگی‌ها است؛ بنابراین انتخاب نمونه فیبر نخ‌دار که از نفوذپذیری و تخلخل ماتریکس کمی برخوردار است می‌تواند گزینه مناسبی برای بررسی تأثیر پارامترهای شکستگی بر نفوذپذیری چنین میداین نفتی باشد.

#### ۶. سپاس‌گزاری

از شرکت آزمون فولاد بابت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی مکانیک سنگ قدردانی و سپاسگزاری می‌شود.

است. دو نمونه مصنوعی ساخته‌شده در این تحقیق شامل نمونه بتنی و نمونه فیبر نخ‌دار، هرکدام دارای ویژگی‌های متفاوتی می‌باشند. نمونه بتنی از جذب آب و تخلخل نسبتاً بالایی برخوردار است در حالی که نمونه فیبر نخ‌دار تخلخل و جذب آب کمی دارد. نمونه بتنی به دلیل چگالی بالاتر نسبت به نمونه فیبر نخ‌دار سرعت موج فشاری و برشی بیشتر و تابع موج فشاری فشرده‌تری دارد در حالی که در نمونه فیبر نخ‌دار، تابع موج فشاری تشکیل‌شده بازتر و کشیده‌تر است. از نظر مکانیکی، نمونه بتنی رفتاری الاستیک و شکننده دارد در صورتی که نمونه فیبر نخ‌دار از رفتار الاستیک-پلاستیک یا غیرخطی و انعطاف‌پذیرتر برخوردار است. بررسی میزان نفوذپذیری دو نمونه نشان می‌دهد که نمونه فیبر نخ‌دار، نفوذپذیری بسیار کمتری نسبت به نمونه بتنی دارد. از این رو نمونه فیبر نخ‌دار می‌تواند نمونه مناسب‌تری نسبت به نمونه بتنی به منظور بررسی اثر پارامترهای شکست مانند فاصله‌داری، زاویه صفحات شکست و باز شدگی دهانه شکست بر میزان نفوذپذیری باشد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بررسی پارامترهای فیزیکی شامل میزان جذب آب و درصد تخلخل و پارامترهای مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره و رفتار منحنی تنش-کرنش انجام‌شده و محاسبه ضریب نفوذپذیری بر روی دو نمونه بتنی و فیبر نخ‌دار نشان داد که نمونه فیبر نخ‌دار به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، رفتار

#### ۷. مراجع

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*, Vol 50, pp 285-292.

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*, Vol 48, pp 29-36

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*, Vol 49, pp 36-43

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

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 Mechanics and Mining Sciences*, Vol 131



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*, Vol 200.

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*, Vol 200.

Arianfar, A., Ramezanzadeh, A., (2020), "Numerical study of limestone permeability changes in terms of effective confining stress, case study: SOUTH PARS RESERVOIR LIMESTONE", *An International Journal of Special Topics & Reviews in Porous Media*. Vol 11, PP 435-452.

Houben, M.E., Van Eeden, J.C.M., Barnhoorn, A., Hangx, S.J.T., (2020), "Fracture-Induced Permeability in Whitby Mudstone", *Environmental science & Technology*, Vol 54, pp 9564-9572

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*, Vol 80, pp 2335-2348.

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*, Vol 140, pp 615-624.

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

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*, Vol 98, pp 121-140.

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

Lee, H., Lee, J.W., Oh, T.M., (2021), Permeability evaluation for artificial single rock fracture according to geometric aperture variation using electrical resistivity, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol 13, pp 787-797.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), (1978) "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics Abstract*, Vol 15, pp 99-103.

صانعیان، س.، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی نقش جهت گیری درزه های طبیعی در عملیات ازدیاد برداشت توسط تزریق آب شور در مخازن کربناته به وسیله سیلاب زنی مغزه در مطالعه آزمایشگاهی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدی قراگوز، م.، مومیوند، ح. (۱۳۹۷)، "بررسی تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته و فراوانی ناپیوستگی های سنگ قبل و بعد از بهسازی با تزریق سیمان در میزان نفوذپذیری"، پژوهش های دانش زمین، سال نهم، شماره ۳۶، صفحات ۱۱۴-۱۲۷.

شریفی گلویک، ح.، آلوکی بختیاری، ح.، اصفهانی، م.ر.، ولی، ج.، صدیقی، ح.، (۱۳۹۴)، "مطالعه نفوذپذیری 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.

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

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