

تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته و فراوانی ناپیوستگی‌های سنگ قبل و بعد از بهسازی با تزریق سیمان در میزان نفوذپذیری

معصوم محمدی قراگوز*^۱، حسن مومیوند^۲

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۵/۲۸

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۷/۱۴

چکیده

ناپیوستگی‌ها مهم‌ترین ویژگی توده سنگ برای کنترل نفوذپذیری هستند. در این تحقیق تأثیر ناپیوستگی‌های دارای جهت‌یافتگی، فراوانی و تعداد دسته‌های متقاطع در نفوذپذیری سنگ قبل و بعد از بهسازی با تزریق دوغاب سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های سنگ فاقد ناپیوستگی، دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آن‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی بوده در گروه‌های مختلف دارای زاویه شیب صفحه ناپیوستگی‌ها با جهت افقی به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در مجموع شامل ۲۰ گروه مختلف آماده‌سازی شده‌اند. میزان نفوذپذیری ۲۰ گروه نمونه‌های دارای ناپیوستگی با جهت‌یافتگی، تعداد دسته‌های متقاطع و فراوانی مختلف اندازه‌گیری شده است. ناپیوستگی‌های گروه‌های متعدد نمونه‌ها با استفاده از دوغاب سیمان بهسازی شده و میزان نفوذپذیری آن‌ها نیز اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روند تأثیر جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها بر نفوذپذیری با تغییر تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آن‌ها تغییر می‌نماید. در نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود برهم و یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی که مصداق سنگ به شدت درزه‌دار بوده، نفوذپذیری بیشتر متأثر از جهت یافتگی دسته دارای چهار ناپیوستگی موازی است. تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته‌درزه‌ها و فراوانی آن‌ها باعث شده که نفوذپذیری ۷۵۹۰۴۸ برابر تغییر نماید. با بهسازی نمونه‌ها با استفاده از تزریق دوغاب سیمان مقدار نفوذپذیری با کمترین تأثیر با ضریب ۹٪ تا بیشترین تأثیر با ضریب ۹۹٪ کاهش یافت. این نشان می‌دهد که جهت یافتگی، تعداد دسته‌درزه‌ها و فراوانی آن‌ها در کاهش نفوذپذیری بر اثر تزریق خیلی مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: جهت یافتگی، تعداد دسته، فراوانی، ناپیوستگی‌ها، نفوذپذیری، تزریق، سنگ.

مقدمه

نفوذ پذیری خاصیتی از مواد روزنه‌دار و یا دارای ناپیوستگی است که امکان جریان سیالی مانند آب و هوا از داخل فضاهای خالی آن‌ها وجود دارد. نفوذپذیری یکی از موضوعات اساسی در بررسی ژئوتکنیک و هیدرولیک در سازه‌های سنگی و در تعیین میزان نشت آب در توده سنگ، برآورد فرسایش پذیری سنگ، برآورد فشار بالابر آب، تعیین میزان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی، طراحی سیستم زهکشی و ارزیابی و کنترل کیفی تزریق توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. توده سنگ عموماً یک محیط ناپیوسته است که با صفحات شکستگی قطع شده و مجموعه‌ای از بلوک‌های چند وجهی سنگ بکر تشکیل شده - است. این صفحات ناپیوستگی سبب ایجاد مسیر- های جریان هیدرولیک بین بلوک‌های سنگ بکر می‌شوند. سنگ سالم فاقد ناپیوستگی می‌تواند نفوذ ناپذیرتر از مصالحی همچون بتن باشد که جهت جلوگیری از نفوذپذیری استفاده می‌شود. بنابراین ناپیوستگی‌ها مهم‌ترین ویژگی توده سنگ برای کنترل نفوذ پذیری هستند. تزریق به عنوان یکی از روش‌های بهسازی زمین عمدتاً برای کاهش نفوذپذیری استفاده می‌شود. با استفاده از میزان نفوذپذیری و با توجه به نوع سازه سنگی، نشان داده می‌شود که چه وقت تزریق لازم است (هولسبای، ۱۹۸۲). تزریق به عنوان بهسازی در انواع سازه‌های سنگی همچون پی سدها، تونل‌های راه، مغار نیروگاه‌ها و سایر سازه‌های متعدد زیرزمینی استفاده می‌شود طوری که انجام عملیات تزریق در سد سازی اجتناب‌ناپذیر است. بررسی‌های متعددی در مورد عوامل موثر بر نفوذپذیری سنگ سالم و توده سنگ به عمل آمده است. روزنه‌داری تأثیر قابل توجه‌ای در ضریب نفوذپذیری سنگ دارد (انجمن مهندسی نفت،

۲۰۱۶). با افزایش اندازه دانه‌ها، مقدار روزنه‌داری افزایش ولی نفوذپذیری کاهش می‌یابد (لوسیا، ۱۹۹۹). پژوهش‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که تنش تأثیر قابل توجه در نفوذپذیری سنگ دارد (بریس و همکاران، ۱۹۶۸؛ گنجی، ۱۹۷۸؛ کرانز و همکاران، ۱۹۷۹؛ اودا و همکاران، ۱۹۸۴؛ ایندراواتنا و همکاران، ۱۹۹۹؛ رانجیث، ۲۰۰۰). نفوذپذیری با افزایش فشار جانبی (σ_3) کاهش می‌یابد اما با کاهش فشار جانبی نفوذپذیری بازیابی نمی‌شود (روپلا و جیند، ۲۰۱۶). جریان سیال از ناپیوستگی‌ها توسط پژوهشگران مختلفی نظیر هویت (۱۹۵۶)، اسنو (۱۹۶۸)، لوییس (۱۹۶۹)، شارپ (۱۹۷۰) و هوک و بری (۱۹۸۱) مطالعه شده است. هوک و بری (۱۹۸۱) نشان دادند که برای یک دسته ناپیوستگی موازی صاف، نفوذپذیری با افزایش اندازه دهانه افزایش می‌یابد. نفوذپذیری در درزه‌هایی که دارای جهت یافتگی بحرانی (تقریباً هم جهت با جهت اعمال تنش حداکثر) هستند خیلی بیشتر از بقیه درزه‌ها است که این حالت باعث ناهمسانگردی نفوذپذیری توده سنگ می‌شود (مین، ۲۰۰۴). افزایش درجه حرارت باعث تغییرات حجمی مواد سنگی و در نتیجه کاهش بازشدگی هیدرولیکی ناپیوستگی و سرانجام کاهش در میزان نفوذپذیری کلی توده سنگ می‌شود (مور و همکاران، ۱۹۹۴؛ پولک و همکاران، ۲۰۰۳). بررسی‌های به عمل آمده توسط پولک و همکاران (۱۹۹۷) نشان می‌دهد که بازشدگی هیدرولیکی ناپیوستگی‌های طبیعی با افزایش دما از $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ تا $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ با گذشت زمان در یک دوره‌ی ۹۰۰ ساعت تحت فشار مؤثر ثابت $3/5$ مگاپاسکال از $12\text{ }\mu\text{m}$ تا $27\text{ }\mu\text{m}$ کاهش می‌یابد. بارتن و لینگل (۱۹۸۲) با انجام یک سری آزمایش برجا روی گنایس خرد شده، نتیجه گرفتند که با افزایش دما تا $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ نفوذپذیری تا

درزه دار قبل و بعد از بهسازی با تزریق سیمان در میزان نفوذ پذیری مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌های سنگ درزه دار و انجام آزمایش‌ها مصالح، تجهیزات آماده‌سازی و آزمایش شامل: بلوک‌های سنگ آهک نقده، اره بزرگ الماسه برای بریدن نمونه‌های بزرگ، دستگاه کرگیری جهت تهیه مغزه‌های استوانه‌ای، اره کوچک الماسه مغزه بر و سایر تجهیزات جانبی ساخته شده برای ایجاد نمونه‌های دارای جهت-یافتگی، دسته‌های ناپیوستگی متقاطع دارای فراوانی مختلف و سیستم دستگاه آزمایش نفوذپذیری هستند. بلوک‌های همگن سنگ آهک که بتوان نمونه‌های مناسبی از آنها تهیه نمود از معدن سنگ آهک نقده به آزمایشگاه مکانیک سنگ آورده شد. نمونه‌های استوانه‌ای فاقد ناپیوستگی، دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها دارای چهار ناپیوستگی موازی در گروه‌های مختلف دارای زاویه شیب صفحه ناپیوستگی‌ها با جهت افقی به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه آماده سازی شدند. در کل تعداد ۲۰ گروه نمونه-های استوانه‌ای دارای جهت یافتگی، فراوانی و تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع بر اساس استاندارد انجمن آزمایش و مصالح آمریکا (۱۹۹۹) مطابق شکل ۱ آماده سازی شدند. از هر گروه سه نمونه و در مجموع تعداد ۶۰ نمونه آماده سازی شد. آماده سازی نمونه‌های به ویژه دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته از آنها دارای چهار ناپیوستگی موازی است کاری حجیم و مشکل بوده به طوری که هر نمونه متشکل از تعداد ۲۰ قطعه در کنار هم است (شکل ۱). چنین

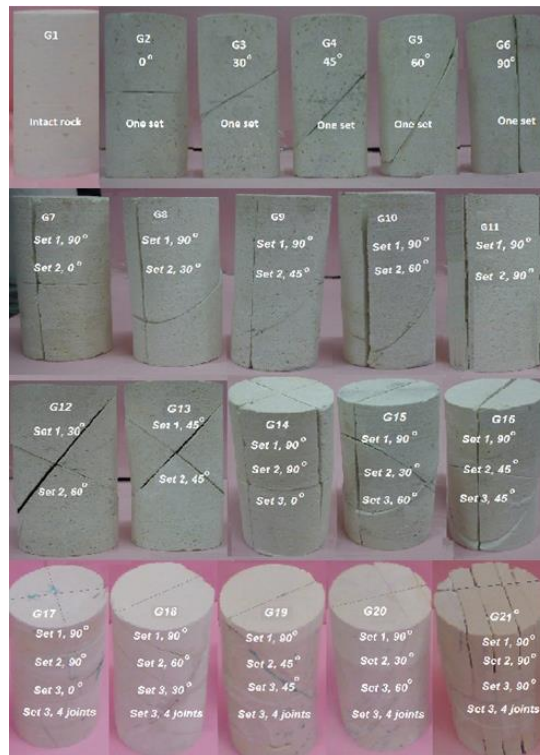
ده برابر کاهش می‌یابد. ارتباط داخلی ناپیوستگی‌ها یکی از مهم‌ترین عواملی است که روی نفوذپذیری توده سنگ‌ها تأثیرگذار است. از آنجا که همه ناپیوستگی‌ها از لحاظ طولی محدود هستند، یک ناپیوستگی در صورتی ممکن است در مسیر جریان تأثیر داشته باشد که به طور کامل در عرض منطقه‌ی مؤثر گسترش یافته یا با دیگر ناپیوستگی‌های هادی جریان تقاطع داشته باشد. مک کرای (۱۹۸۲) عنوان نمود که فقط حدود ۲۰٪ ناپیوستگی‌های مشاهده شده در طی زمان ساخت تونل‌های بزرگراه منا، عربستان، پتانسیل عبور جریان آب را دارند. اندرسون و همکاران (۱۹۸۸) دریافتند که فقط ۱۰-۴۰٪ ناپیوستگی‌ها در پروژه‌های براندان در سوئد قابلیت هدایت آب داشتند. وجود ناپیوستگی‌های به صورت متعدد دارای جهت‌یافتگی، فراوانی و تعداد دسته‌های متقاطع در توده‌های سنگ در برگیرنده سازه‌های سنگی اجتناب ناپذیر است. با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها، سنگ به سمت توده‌های خرد شده میل می‌کند. ویژگی‌های بارز تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع دارای فراوانی و جهت یافتگی مختلف مصداق تمایز میزان خرد شدگی توده‌های سنگ از سنگ یک پارچه هستند. به رغم اهمیت فوق‌العاده چنین موضوعی تاکنون تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها در نفوذ پذیری مورد بررسی قرار نگرفته است. هم‌چنین تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها بعد از بهسازی به روش تزریق دوغاب سیمان تاکنون نامشخص است. در این تحقیق به رغم سخت و طاقت فرسا بودن آماده سازی نمونه‌های درزه دار تأثیر جهت یافتگی، فراوانی و تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع، ۲۰ گروه نمونه سنگ

روش‌های مرسوم بهسازی سنگ درزه‌دار روش تزریق سیمان در داخل درزه است. برای بهسازی با تزریق از سیمان پرتلند تیپ ۱، سطح مخصوص ۲۸۸۱ سانتی‌متر مربع بر گرم، درصد CaO برابر ۶۴.۱۲٪ و مقاومت فشاری ۱۴ روزه برابر ۳۰ مگاپاسکال استفاده شد. پس از انجام مرحله تعیین نفوذپذیری ۱۹ گروه نمونه‌های درزه‌دار بدون تزریق، در مرحله بعد ۱۹ گروه نمونه‌های درزه‌دار مطابق شکل ۱ با استفاده از تزریق دوغاب سیمان در بین ناپیوستگی‌ها بهسازی شدند. نفوذپذیری نمونه‌های بهسازی نیز بعد از گذشت زمان ۵ هفته تعیین شد.

نتایج

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای یک دسته ناپیوستگی با افزایش زاویه جهت‌یافتگی، نفوذپذیری افزایش می‌یابد (شکل ۴). کمترین نفوذپذیری در زاویه جهت‌یافتگی صفر درجه اتفاق افتاده که مقدار آن به نفوذپذیری سنگ سالم نزدیک است (نمونه G2 شکل ۱). بیشترین نفوذپذیری در حالتی است که زاویه جهت‌یافتگی صفحه ناپیوستگی ۹۰ درجه (صفر درجه نسبت به محور نمونه یا همان جهت جریان آب) است (نمونه G6 شکل ۱). در نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع شامل یک دسته قائم با افزایش زاویه جهت‌یافتگی صفحه ناپیوستگی دسته دیگر (نمونه‌های G7 تا G11) نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد (شکل ۵).

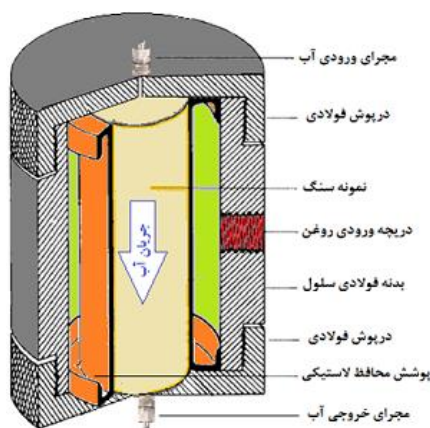
نمونه‌هایی مصداق سنگ به شدت درزه دار بوده و حجم عملیات آماده سازی آنها چندین برابر نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های منفرد است. به رغم سخت و طاقت فرسا بودن آماده سازی نمونه‌ها پروژه به مرحله اجرا در آمد. نفوذپذیری ۲۰ گروه نمونه‌ها به روش بار هیدرولیکی ثابت و براساس استاندارد انجمن آزمایش و مصالح آمریکا (۱۹۹۹) تعیین شد. در این آزمایش از سیستم سلول هوک به عنوان محفظه (شکل ۲) به همراه جک هیدرولیکی برای اعمال فشار جانبی و سیستم الکتروپمپ روغن برای تولید فشار ثابت از طریق فاز آب-روغن استفاده می‌شود (شکل ۳). با استفاده از پمپ فشار جانبی شکاف بین سطح جانبی نمونه استوانه‌ای سنگ با سطح داخلی استوانه پلاستیکی سلول بسته می‌شود. به این منظور فشاری جانبی برابر ۷۰۰ کیلوپاسکال و فشار آب ۵۰۰ کیلوپاسکال اعمال شد، تا این که آب تحت فشار کمتر، از بین سطح جانبی نمونه استوانه‌ای سنگ و سطح داخلی استوانه پلاستیکی خارج نشود و تنها از محیط سنگ جریان یابد. آب خروجی از انتهای نمونه توسط بورت استوانه‌ای مدرج طی گذشت زمان اندازه‌گیری شد. پس از گذشت زمانی که جریان ورودی و خروجی برابر شدند و جریان پایدار حاصل شد، حجم آب خروجی در واحد زمان اندازه‌گیری شد. سنگ آهک بکر مورد تحقیق دارای میانگین روزه‌داری مؤثر ۱۰/۴۵ درصد، وزن واحد حجم خشک ۲/۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، وزن واحد حجم اشباع ۲/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ضریب نفوذپذیری $10^{-10} \times 9/35$ متر بر ثانیه است. یکی



شکل ۱: نمونه‌های استوانه‌ای فاقد ناپیوستگی، دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها دارای چهار ناپیوستگی موازی دارای جهت یافتگی به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه.

۴). در این حالت یک ناپیوستگی در راستای مسیر جریان قرار دارد. نفوذی ناپیوستگی عمود بر هم و در خلاف جهت هم دارای زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه (یک گروه نمونه G12) یکسان است.

برای نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم کمترین مقدار نفوذپذیری در نمونه‌های دارای جهت‌یافتگی ناپیوستگی ۴۵ و ۴۵ درجه (G13) و بیشترین مقدار نفوذپذیری در جهت یافتگی ۰ و ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد (شکل



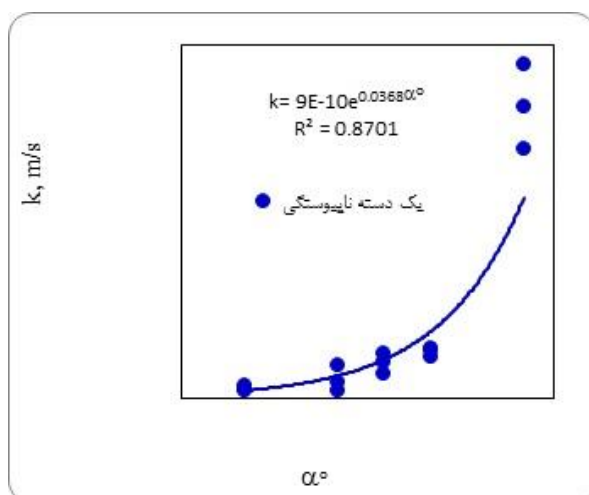
شکل ۲: قسمت‌های سلول نفوذپذیری شامل: بدنه استوانه‌ای فولادی، درپوش فولادی، دریچه ورودی روغن هیدرولیک، پوشش لاستیکی انعطاف پذیر و نمونه سنگ، مجاری ورودی و خروجی آب



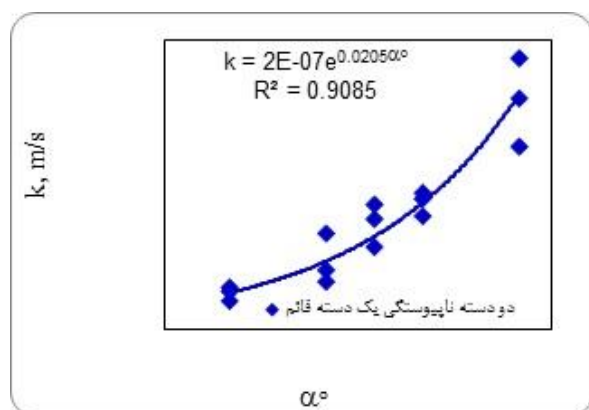
شکل ۳: دستگاه آزمایش نفوذپذیری

منفرد دارای زاویه ۶۰ و ۹۰ درجه که چهار ناپیوستگی دارای زاویه ۳۰ درجه را قطع نموده از طریق آن‌ها آب به شبکه ناپیوستگی‌های دارای زاویه ۳۰ درجه جریان می‌یابد. این نشان می‌دهد که با افزایش دسته ناپیوستگی و فراوانی آنها نحوه عملکرد ناپیوستگی‌ها در ارتباط با هم در یک شبکه ناپیوستگی دارای اهمیت می‌باشد. جهت-یافتگی، تعداد دسته درزه‌ها و فراوانی آنها نقش بسیار مهمی در میزان نفوذپذیری دارند. برای کل ۲۰ گروه نتایج کمترین مقدار نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های دارای یک دسته درزه صفر درجه برابر $1/05 \times 10^{-9}$ متر بر ثانیه و بیشترین نفوذپذیری مربوط به نمونه دارای سه دسته ناپیوستگی یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی با زاویه ۹۰ درجه برابر $7/97 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه بوده طوری که نفوذپذیری ۷۵۹۰۴۸ برابر تغییرات دارد. رابطه بین نسبت نفوذپذیری سنگ درزه‌دار به نفوذپذیری سنگ سالم و جهت یافتگی نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. این نسبت تا ۸۵۲۲۷۲ می‌رسد. هرچه فراوانی و یا تعداد ناپیوستگی‌های متقاطع افزایش یابد میزان نفوذپذیری به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).

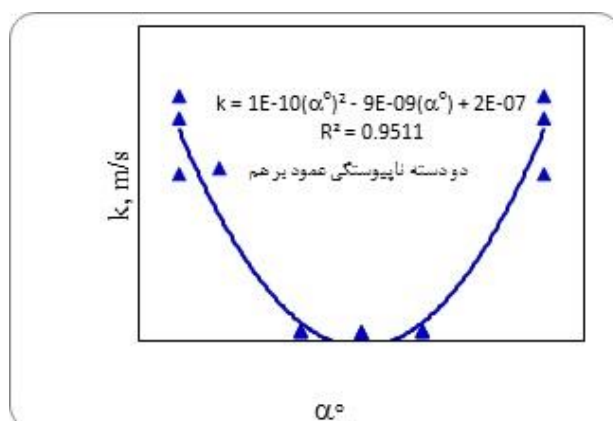
روند تغییرات میزان نفوذپذیری نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی منفرد متقاطع و عمود برهم با زاویه جهت یافتگی، شبیه نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی منفرد متقاطع و عمود برهم بوده اما افزایش دسته ناپیوستگی سوم باعث افزایش قابل توجه نفوذپذیری شده است (شکل ۷). در نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی که یکی از دسته‌های آن دارای چهار ناپیوستگی موازی است، نفوذپذیری به شدت افزایش می‌یابد طوری که تا $7/97 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه ($7/97 \times 10^{-2}$ سانتی‌متر بر ثانیه) می‌رسد. در این بخش از نتایج، رابطه بین نفوذپذیری و جهت یافتگی دسته ناپیوستگی که دارای چهار درزه موازی است مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه‌هایی که دارای دسته ناپیوستگی با جهت یافتگی صفر درجه دارای چهار ناپیوستگی است، دارای کمترین مقدار نفوذپذیری است (شکل ۸). با افزایش جهت‌یافتگی از ۳۰ تا ۶۰ میزان نفوذپذیری کاهش یافته سپس از ۶۰ تا ۹۰ درجه افزایش می‌یابد طوری که بیشترین مقدار نفوذپذیری در نمونه‌هایی است که دسته ناپیوستگی ۹۰ درجه و موازی مسیر جریان آب دارند. نفوذپذیری گروه نمونه‌های دارای ناپیوستگی با زاویه ۳۰ درجه مقدار بیشتری نسبت به گروه با زاویه ۶۰ درجه نشان دهد. دلیل آن می‌تواند چنین باشد که چون ناپیوستگی‌های



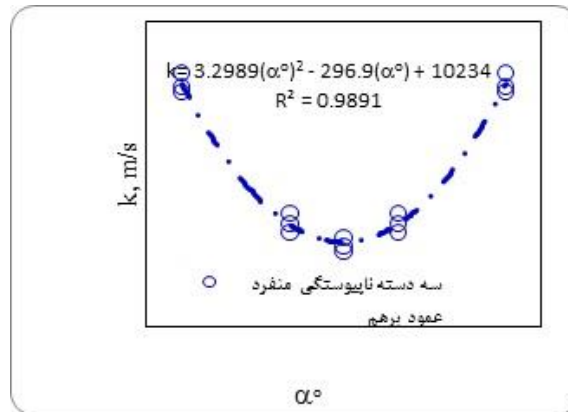
شکل ۴: رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای یک دسته ناپیوستگی با جهت یافتگی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق



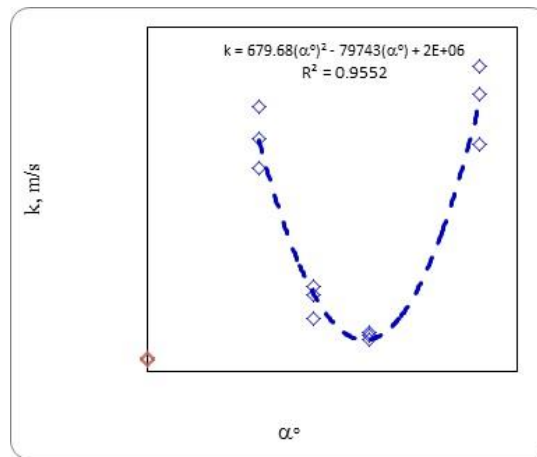
شکل ۵: رابطه بین جهت یافتگی و (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع شامل یک دسته قائم



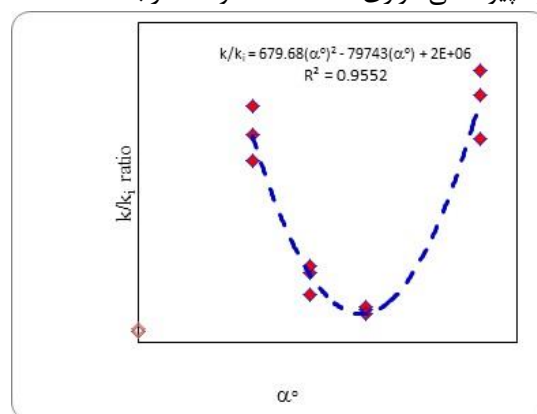
شکل ۶: رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل گروه نمونه‌های G7، G11 و G12 (نمونه‌های دارای جهت یافتگی ۰ و ۹۰ درجه (G7) و هم‌چنین ۳۰ و ۶۰ درجه (G11) یکسان هستند).



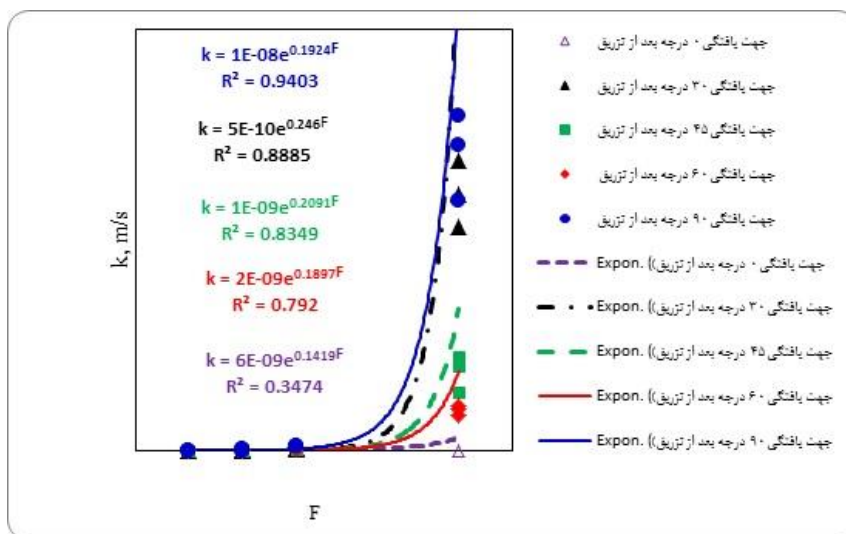
شکل ۷: رابطه بین جهت یافتگی (α^0) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع شامل گروه نمونه‌های G13، G14 و G15 (نمونه‌های دارای جهت یافتگی ۰ و ۹۰ درجه (G13) و هم‌چنین ۳۰ و ۶۰ درجه (G15) یکسان هستند).



شکل ۸: رابطه بین جهت یافتگی (α^0) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود برهم یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه.



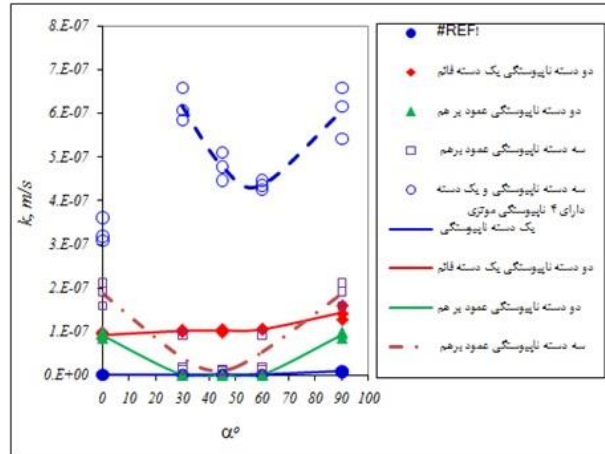
شکل ۹: رابطه بین جهت یافتگی (α^0) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود برهم یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه.



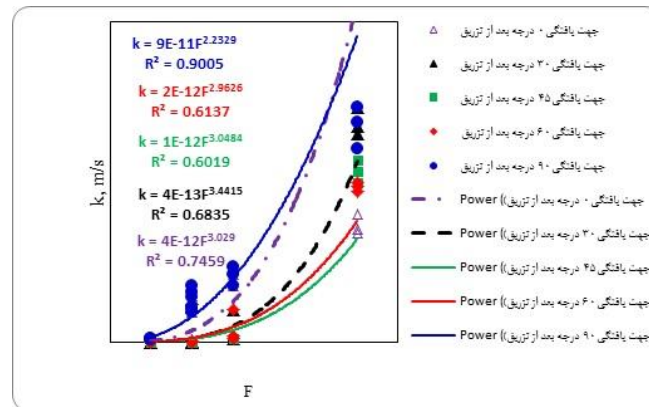
شکل ۱۰: رابطه بین نفوذپذیری (k) و فراوانی (F) ناپیوستگی به صورت تعداد در طول متر برای جهت یافتگی ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه.

فراوانی آنها در نفوذ پذیری نمونه‌های درزه‌دار بعد از بهسازی با تزریق دوغاب سیمان شبیه نمونه‌های فاقد بهسازی است (شکل ۱۱). به رغم کاهش شدید میزان نفوذپذیری تا ضریب ۰.۹۹٪، تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته‌درزه‌ها و فراوانی آنها در میزان نفوذپذیری حتی بعد از تزریق اجتناب ناپذیر است (شکل ۱۱ و ۱۲). رابطه بین جهت یافتگی ناپیوستگی و نفوذ پذیری قبل و بعد از بهسازی برای نمونه‌های دارای یک دسته، دو دسته، سه دسته منفرد و سه دسته که یک دسته آنها دارای چهار ناپیوستگی موازی است به ترتیب در شکل‌های (۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷) جهت مقایسه نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۶ و ۱۷) به علت اینکه مقدار نفوذپذیری قبل از تزریق بسیار بیشتر از مقدار آن بعد از تزریق است، مقدار نفوذپذیری بعد از تزریق در یک مقایسه به سختی قابل مشاهده است.

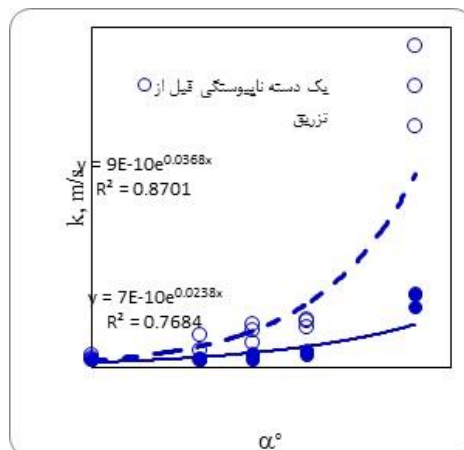
نفوذ پذیری نمونه‌های بهسازی شده نسبت به حالت بهسازی نشده به شدت کاهش یافته است. تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته‌های ناپیوستگی‌های متقاطع و فراوانی آنها در نفوذپذیری نمونه‌های درزه‌دار بعد از بهسازی با تزریق دوغاب سیمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. پس از بهسازی کمترین مقدار نفوذپذیری مربوط به نمونه دارای یک دسته درزه صفر درجه برابر $10^{-10} / 556$ متر بر ثانیه و بیشترین نفوذپذیری نمونه دارای سه دسته ناپیوستگی یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی با زاویه ۹۰ درجه برابر $10^{-7} / 59$ متر بر ثانیه است که در این دو حالت نفوذپذیری به ترتیب با ضریب ۰.۹٪ و ۰.۹۹٪ کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که تعداد دسته‌درزه‌ها، فراوانی و جهت یافتگی آنها در کاهش نفوذپذیری بر اثر تزریق خیلی مؤثر است. روند تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته‌درزه‌ها و



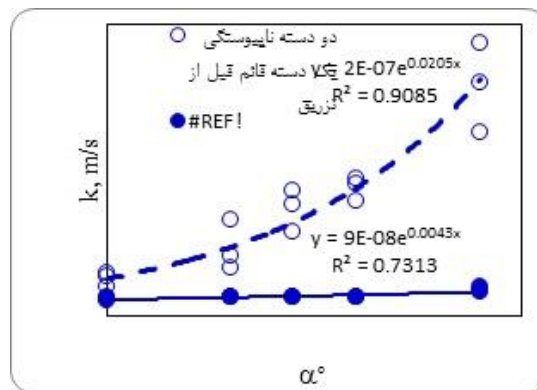
شکل ۱۱: رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها دارای چهار ناپیوستگی موازی بعد از بهسازی با تزریق دوغاب سیمان.



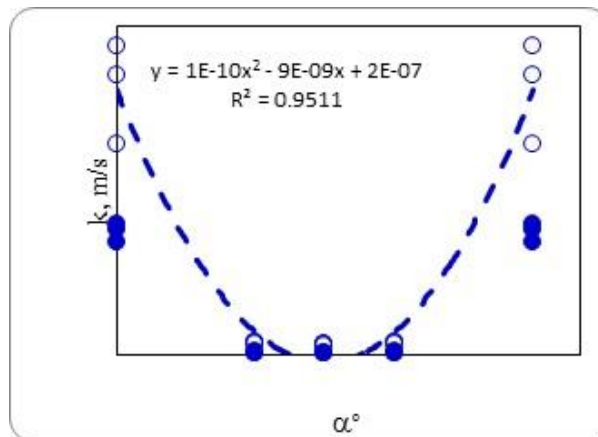
شکل ۱۲: رابطه نفوذپذیری (k) و فراوانی (F) ناپیوستگی به صورت تعداد در طول متر برای جهت یافتگی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه بعد از بهسازی با تزریق دوغاب سیمان.



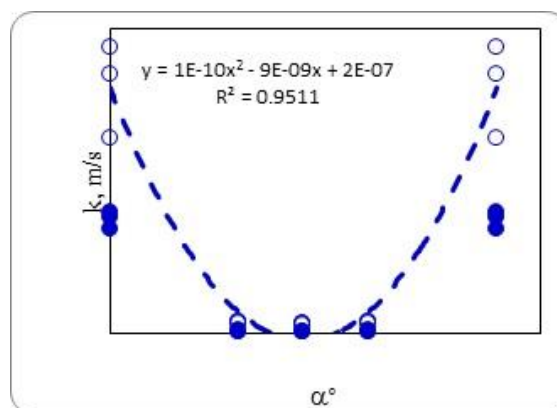
شکل ۱۳: مقایسه رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای یک دسته ناپیوستگی با جهت یافتگی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق قبل و بعد بهسازی.



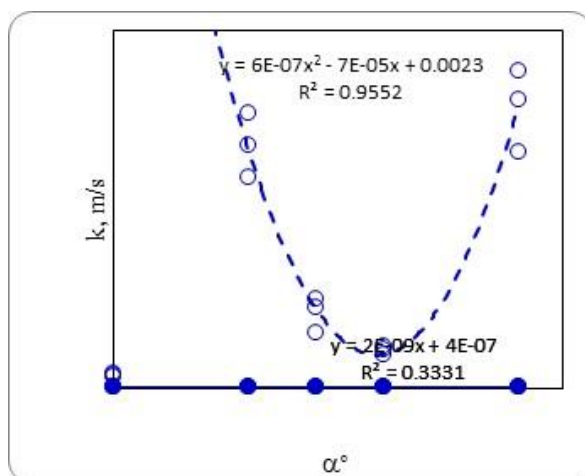
شکل ۱۴: مقایسه رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع شامل یک دسته قائم قبل و بعد بهسازی.



شکل ۱۵: مقایسه رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم قبل و بعد بهسازی.



شکل ۱۶: مقایسه رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و منفرد قبل و بعد بهسازی.



شکل ۱۷: مقایسه رابطه بین جهت یافتگی (α°) و نفوذپذیری (k) برای نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود برهم یکی از دسته‌ها دارای چهار ناپیوستگی موازی قبل و بعد بهسازی.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نفوذپذیری گروه‌های نمونه‌های دارای یک دسته ناپیوستگی و دو دسته ناپیوستگی متقاطع با یک دسته در راستای قائم با افزایش زاویه جهت یافتگی نسبت به راستای عمود بر مسیر جریان آب افزایش می‌یابد. اما برای نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و سه دسته ناپیوستگی منفرد متقاطع و عمود بر هم رابطه بین جهت یافتگی از صفر تا ۹۰ درجه و نفوذپذیری به صورت سهمی‌گون است و حداقل نفوذپذیری در زاویه ۴۵ درجه اتفاق می‌افتد. در نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی که یکی از دسته آن دارای چهار ناپیوستگی موازی است، نفوذپذیری به شدت افزایش می‌یابد. نمونه‌هایی که دارای دسته ناپیوستگی با جهت یافتگی صفر درجه دارای چهار ناپیوستگی است، دارای کمترین مقدار نفوذپذیری است. با افزایش جهت یافتگی از ۳۰ تا ۶۰ میزان نفوذپذیری کاهش یافته سپس از ۶۰ تا ۹۰ درجه افزایش می‌یابد. بهسازی با استفاده از تزریق

دوغاب سیمان برای کاهش نفوذپذیری به ویژه با افزایش دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها به شدت مؤثر است. اما روند تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته‌درزه‌ها و فراوانی آنها در نفوذ پذیری نمونه‌های درزه‌دار بعد از بهسازی با تزریق دوغاب سیمان شبیه نمونه‌های فاقد بهسازی است. تأثیر جهت یافتگی، تعداد دسته‌درزه‌ها و فراوانی آنها در میزان نفوذپذیری حتی بعد از تزریق اجتناب ناپذیر است. نتایج نشان داد که با تزریق دوغاب سیمان در ناپیوستگی‌ها مقدار نفوذپذیری با کمترین تأثیر از ضریب ۹٪ تا بیشترین تأثیر با ضریب ۹۹٪ کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که جهت یافتگی، تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها به شدت در کاهش نفوذپذیری بر اثر تزریق مؤثر است. به رغم کاهش فزاینده مقدار نفوذپذیری در محیط به شدت درزه‌دار بر اثر تزریق، چنین محیطی پس از تزریق دارای مقداری نفوذپذیری نسبت به محیط دارای درزه کمتر است.

منابع

- Andersson, J.E., Ekman, I. and Winberg, A., 1988. Detailed hydraulic characterization of a fracture zone in the Brandan area, Finnsjon, Sweden, Proc. 4th Canadian/American Conference on Hydrogel, Dulin, Ohio, p. 32-39.
- Barton, N. and Lingle, R., 1982. Rock mass classification for nuclear waste repositories in jointed rock Rock Mechanics: Caverns and Pressures Shafts, ISRM, Syposium, Acchen, p. 3-18.
- Brace, W.F., Walsh, J.B. and Frangos, W.T., 1968. Permeability of granite under high pressure, Journal of Geophysic Research, v. 73, p. 2225-2236.
- Ghanghi, A.F., 1978. Variation of whole and fractured porous rocks permeability with confining pressure, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 15, p. 335-354.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981. Rock Slope Engineering, 3rd Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. and Franklin, J.A., 1968. Simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, v. 77, p. A22- A26.
- Houlsby, A.C., 1982. Optimum water: cement rations for rock grouting, Grouting in Geotechnical Engineering, Proceedings of Conference sponsored by the Geotechnical Engineering Division, ASCE, New Orleans, p. 371-331.
- Huitt, J.L., 1956. Fluid flow in simulated fracture, Journal of American Institute of Chemical Engineering, v. 2., p. 259-264.
- Indrarathna, B., Ranjith, P. and Gale, W., 1999. Deformation and permeability characteristics of rocks with with interconnected fractures, 9th international Congress on Rock Mechanics, v. 2, p. 755-760.
- Oda, M., Susuki, K. and Maeshibu, T., 1984. Elastic compliance for rock-like materials with random cracks, Soil and Found, Tokyo, Japan, v. 24, p. 27-40.
- Kranz, R.L., Frankel, A.D., Engelder, T. and Scholz, C.H., 1979. The permeability of whole and jointed barre granite, International Journal of Rock Mechanics and geomechanics Abstract, v. 16, p. 225-234.
- Louis, C.A., 1969. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence of the stability of rock masses, Rock Mechanics Research Report 10, Imperial College, London.
- Lucia, F.J., 1999. Carbonate Reservoir Characterization, Berlin, Springer.
- Lugeon, M., 1933. Barrage et Géologie, Dunod, Paris.
- Min, K.B., Rutqvist, J., Tsang, C.F. and Jing, L., 2004. Stress-dependent permeability of fracture rock masses: a numerical study, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.41, p. 1191-1210.
- Moore, D.E., Lockner, D.A. and Byerlee, J.A., 1994. Relation of permeability in granite at elevated temperatures, Science, New Series, v. 265, p. 1558-15610.
- Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grader, A.S. and Halleck, P.M., 2003. Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids, Geophysical Research Letters, v. 30(20).
- Ranjith, P.G., 2000. Analytical and Numerical investigation of water and air flow through rock media, Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, University of Wollongong, Australia.
- Ruila, L. and Jinde, F., 2016. Deformation characteristics of low

permeability rocks under confining pressure, www.seiofbluemountain.com.
-Sharp, J.C., 1970. Fluid flow through fissured media, Ph.D. thesis, imperial college of science and technology London.

-Snow, D.T., 1968. Rock Fracture spacing, openings and porosities, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, v. 94, p. 73-91.