

ارایه رابطه‌ای تجربی برای برآورد آبگذری در سازه‌های زیرزمینی

مقاله پژوهشی

سامان مشیری علی آباد^۱؛ سید محمد اسماعیل جلالی^۲؛ مهدی نوروزی^{۳*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، samanmoshiri1991@gmail.com

۲- استاد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalisme@gmail.com, jalalisme@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir, mnoroozi.mine@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

شماره صفحات: ۱۷۹ تا ۱۹۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.14743.1488

واژگان کلیدی	چکیده
شبکه شکستگی مجزا توده سنگ درزه‌دار آب‌گذری تحلیل هیدرولیکی سد مخزنی پارسیان	در توده‌های سنگی ناپیوسته، آب زیرزمینی از طریق ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود در توده‌سنگ به داخل فضا راه پیدا می‌کند و باعث بروز مشکلات فراوانی می‌شود. هدف اصلی این مقاله، ارایه رابطه تجربی برای تخمین مقدار جریان سیال بر مبنای پارامترهای بازشدگی و فاصله‌داری شکستگی‌های توده‌سنگ است. برای این منظور از روش شبکه شکستگی مجزا (DFN) برای مدل‌سازی شکستگی‌های توده‌سنگ و شبیه‌سازی جریان سیال، با کاربرد نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است. با تمرکز بر توده‌سنگ ساختگاه سد مخزنی پارسیان و بر اساس برداشت‌های میدانی انجام شده، توابع توزیع آماری مربوط به هر یک از مشخصات ناپیوستگی‌ها تعیین و یک مدل DFN که معرف شرایط واقعی زمین است، ساخته می‌شود. برای حذف تاثیر اندازه مدل و تعداد درزه‌ها بر اندازه نفوذپذیری، حجم المان معرف (REV) منطقه انتخاب شد. با تحلیل جریان سیال و اعتبارسنجی به وسیله آزمایش لوژان، مدلی واقعی از نفوذپذیری ساختگاه ارایه می‌شود. در ادامه یک مدل مکعبی که تنها بر اساس پارامترهای فاصله‌داری و بازشدگی ناپیوستگی‌ها است، توسعه داده می‌شود. با استفاده از این مدل مکعبی، تحلیل‌های حساسیت با تمرکز بر تاثیر پارامترهای بازشدگی و فاصله‌داری در مقدار جریان سیال انجام می‌شود و روابطی تجربی به منظور برآورد آب‌گذری توده‌سنگ ارایه خواهد شد. با استفاده از روابط تجربی به دست آمده می‌توان آب-گذری توده‌سنگ را بدون نیاز به مدل‌سازی‌های عددی وقت‌گیر و تنها در صورت وجود داده‌های مربوط به پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها در پروژه‌های مشابه پیش‌بینی کرد.

۱- مقدمه

یکی از مواردی که چنین تحلیل‌هایی را با عدم قطعیت همراه می‌کند وجود آب زیرزمینی است. در توده‌های سنگی ناپیوسته، آب زیرزمینی از طریق ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود در توده سنگ به داخل فضا راه پیدا می‌کند و باعث بروز مشکلات فراوانی از جمله تاثیر بر خواص ژئومکانیکی سنگ، کاهش ضریب پایداری ساختاری در توده سنگ‌های

طراحی و تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی نظیر تونل‌ها، مغارهای ذخیره‌سازی، پی و مغارهای نیروگاهی سدها، فضاهای مربوط به فعالیت‌های محیط زیستی مثل دفن زباله‌های خطرناک و باطله فعالیت‌های هسته‌ای، نفت و انرژی ژئوترمال همواره با مشکلات عدیده‌ای روبرو است.

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه دوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۵۵۰۹

طول شکستگی‌های توده سنگ و نیز رابطه همبستگی پارامترهای بازشدگی و طول اثر را بررسی کردند (Baghbanan & Jing, 2008). آنها با در نظر گرفتن تاثیر ارتباط درونی پارامترها به ویژه بین بازشدگی هیدرولیکی و طول اثر شکستگی به ارایه نفوذ پذیری معادل و تانسور نفوذپذیری پرداختند (Baghbanan & Jing, 2007). فرهمند (۱۳۹۰) نفوذپذیری توده سنگ وابسته به تنش را بررسی کرد (Farahmand, 2011). جواد و شریفزاده (۱۳۹۱) کد محاسباتی *FNETF* را برای ساخت شبکه شکستگی مجزا و تحلیل جریان سیال توسعه داده‌اند (Javadi & Sharifzadeh, 2012). شمس و همکاران (۱۳۹۲) به منظور افزایش سرعت محاسبات و کاهش پیچیدگی در مساله تحلیل جریان در شبکه شکستگی اطراف حفريات زیرزمینی، از روش اتومات سلولی به عنوان یک ابزار کمکی مفید در ترکیب با روش *DFN*، جریان ورودی به درون مغار نیروگاه و ترانسفورمر پروژه تلمبه ذخیره‌ای سیاه پيشه را مدل کردند (Shams et al., 2014). جعفری و باباداغلی بر روی تخمین عملی نفوذپذیری معادل شبکه شکستگی (*Equivalent Fracture Network*) (*Permeability (EFNP)*) با استفاده از نرم‌افزار تجاری *FRACA* تمرکز کردند. در این تحقیق بر اساس ویژگی‌های آماری و شبکه‌های شکستگی فراکتال، تعداد ۱۲ الگوی دو بعدی شکستگی که به صورت تصادفی تولید شدند، نسبت به نفوذپذیری آزمایش و رابطه‌های بین آنها به دست آمد (Jafari & Babadagli, 2012). جواد و همکاران (۲۰۱۶) به مدل‌سازی ناپیوسته تصادفی میدان نزدیک و تحلیل عدم قطعیت جریان آب زیرزمینی به داخل حفريات زیرزمینی با کاربرد مستقیم شبکه شکستگی مجزا پرداختند. داده‌های مورد نیاز از بررسی‌های میدانی در محل پروژه سیاه‌پيشه اخذ شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که ویژگی‌های هندسی درزه‌ها نسبت به ویژگی‌های هیدرولیکی سهم بیشتری در عدم قطعیت جریان آب زیرزمینی به داخل فضاهای زیرزمینی دارد (Javadi et al., 2016). کریمزاده و همکاران به پیش‌بینی جریان آب به داخل حفريات زیرزمینی در سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از مدل شبکه درزه‌های مجزا پرداختند (Karimzade et al., 2017). ژانگ و همکاران از یک مدل عددی نفوذپذیری دوگانه برای

اطراف تونل، سختی کار در شرایط آبدار برای کارکنان، اثرات زیست‌محیطی نشت آب به تونل‌ها یا فرار آب از تونل‌های تحت فشار می‌شود. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی رفتار هیدرولیکی توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود و بنابراین ضروری است فهم مناسبی از وضعیت هندسی و رفتار هیدرولیکی شبکه ناپیوستگی‌ها برآورد شود. یکی از روش‌های مدل‌سازی شکستگی‌های توده سنگ، روش شبکه شکستگی مجزا (*DFN: Discrete Fracture Network*) است. برای ساخت مدل *DFN* از روش‌های آماری برای ایجاد شکستگی‌ها در یک محدوده تعیین شده، استفاده می‌شود. در حالت کلی ساخت شبکه شکستگی مجزا با استفاده از پارامترهای هندسی شکستگی‌های موجود در منطقه، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود. در این روش، شکستگی‌ها با استفاده از توابع توزیع مربوط به پارامترهای هندسی شامل طول، جهت‌داری، فاصله‌داری، شدت و بازشدگی ساخته می‌شوند. بعد از ساخت مدل هندسی شبکه شکستگی، با اعمال قوانین رفتار هیدرولیکی بر روی شکستگی‌های موجود در محدوده، مدل ناپیوسته هیدرولیک توده سنگ حاصل می‌شود.

تحلیل جریان سیال در توده سنگ و برآورد آنگذری سابقه دیرینه دارد. برای اولین بار مدل دو بعدی جریان توسط لانگ و همکاران توسعه داده شد (Long et al., 1982). لابسویچ و همکاران شبکه شکستگی‌های توده سنگ را به عنوان مسیرهای ذاتی جریان سیال در توده سنگ معرفی و بررسی کردند (Lapcevic et al., 1999). ایوارس با استفاده از نرم‌افزار *3DEC* به مطالعه تاثیر عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ژئومکانیکی به کار گرفته شده در مدل‌سازی عددی جریان آب ورودی به یک تونل پرداخت. او با تغییر پارامترهای ورودی در نرم‌افزار، میزان تغییرات نرخ جریان آب ورودی به یک تونل دایره‌ای سه بعدی را مورد بررسی قرار داد (Ivars, 2006). فرهادیان و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از روش‌های تحلیلی و المان مجزا عددی و استفاده از نرم‌افزار *UDEC* که قابلیت کاربرد در محیط ناپیوسته و انجام تحلیل هم‌زمان هیدرولیکی را دارد، میزان نشت آب زیرزمینی به تونل امیرکبیر را بررسی کرده است (Farhadian et al., 2009). باغبانان و جینگ (۲۰۰۸) تاثیر اندازه تنش روی نفوذپذیری و تغییرشکل توده سنگ و

بررسی تاثیر فشار آب با در نظر گرفتن ویژگی‌های ناهمسانگرد از جمله زاویه شیب و فاصله‌داری درزه‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش فشار آب و کاهش فاصله درزه منجر به افزایش جریان آب می‌شود (Zhang et al., 2021). هوانگ و همکاران تاثیر نرخ‌های مختلف اتصال درزه بر جریان آب زیرزمینی را بررسی کردند و نشان دادند که آب زیرزمینی عمدتاً از طریق شکستگی‌هایی با نفوذپذیری بالاتر جریان می‌یابد (Huang et al., 2021). لی و همکاران ثابت کرده‌اند که شبکه شکستگی‌ها تاثیر مهمی بر جریان آب ورودی در تونل دارد. آنها تاثیر عواملی مانند چگالی درزه، زاویه شیب، ناهمسانگردی تنش و بازشدگی درزه را بر نرخ جریان ورودی به تونل مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (Li et al., 2023). هو و همکاران یک مدل کوپلینگ هیدرومکانیکی مبتنی بر شبکه شکستگی مجزا برای پیش‌بینی جریان آب ورودی به تونل، با در نظر گرفتن تاثیر جریان غیرداری پیشنهاد کردند. در این کار اهمیت جریان غیرداری و شبکه‌های شکستگی برای پیش‌بینی دقیق جریان آب در تونل‌ها نشان داده شد (Hu et al., 2024).

با توجه به پیشینه مطالعات می‌توان بیان نمود که اغلب مدل‌های عددی که تاکنون ارائه شده‌اند، دو بعدی هستند و شکستگی‌ها را با طول نامحدود فرض کرده و ویژگی‌های قطعی برای پارامترهای هندسی آنها فرض می‌کنند، که سبب عدم انطباق این مدل‌ها با رفتار واقعی توده سنگ می‌شود. همچنین در نظر گرفتن تعداد بسیار محدود درزه‌ها، از دیگر مشکلات مدل‌های پیشین است. برای رفع این مشکلات، در این تحقیق رفتار هیدرولیکی شبکه شکستگی‌ها در پیرامون حفریات زیرزمینی با استفاده از روش مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در این مقاله، با تمرکز بر توده سنگ ساختگاه سد مخزنی پارسیان و بر اساس برداشت‌های میدانی انجام شده، توابع توزیع آماری مربوط به هر یک از مشخصات ناپیوستگی‌ها تعیین می‌شود. سپس با استفاده از مدل-سازهای DFN یک مدل DFN که معرف شرایط واقعی زمین در اطراف تونل یا سد است، ساخته می‌شود. در گام بعد، با تحلیل جریان سیال و اعتبارسنجی به وسیله آزمایش

لوژان، مدلی واقعی از نفوذپذیری ساختگاه سد ارائه می‌شود. در ادامه یک مدل ساده و منظم به عنوان مدل مکعبی که تنها بر اساس پارامترهای اندازه بلوک‌ها و بازشدگی ناپیوستگی‌ها باشد، به گونه‌ای ارائه می‌شود که در آن قابلیت هدایت هیدرولیکی سیال برابر با مدل DFN اصلی باشد. در نهایت، با استفاده از مدل مکعبی توسعه داده شده، تحلیل‌های حساسیت با تمرکز بر تاثیر پارامترهای بازشدگی و فاصله‌داری در مقدار جریان سیال، انجام می‌شود و روابطی تجربی به منظور برآورد آب‌گذری توده سنگ ارائه خواهد شد. در واقع هدف اصلی این مقاله، ارائه رابطه‌های تجربی برای تخمین مقدار جریان سیال بر مبنای چند پارامتر معرف شکستگی‌های توده سنگ است. با استفاده از این رابطه‌های تجربی می‌توان آب‌گذری توده سنگ را بدون نیاز به مدل-سازی‌های عددی وقت‌گیر و تنها در صورت وجود داده‌های مربوط به پارامترهای هندسی توده سنگ در پروژه‌های تونلی، مغار و سد پیش بینی کرد.

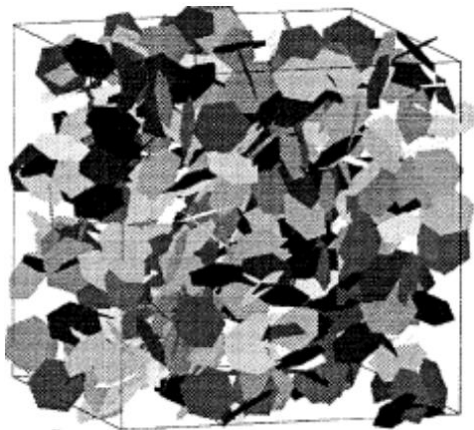
۲- مدل جریان شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN)

از بهترین روش‌هایی که به صورت متداول در شبیه‌سازی جریان سیال توده سنگ‌های درزه‌دار مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به روش تخلخل دوگانه و روش شبکه شکستگی مجزا اشاره نمود. روش تخلخل دوگانه هرچند روشی مناسب برای تشریح اندرکنش پیچیده بین ماتریکس شکستگی‌ها است، اما این روش محدودیت جدی در حل ساختار پیچیده شکستگی‌ها دارد. از سوی دیگر روش شبکه شکستگی مجزا در توصیف و تعریف ساختار پیچیده ناپیوستگی‌ها بسیار مفید است. مدل‌های DFN قابلیت بالاتری در توصیف و نشان دادن ارتباط بین شکستگی‌ها در توده سنگ، نسبت به روش تخلخل دوگانه دارند.

اساس روش شبکه شکستگی مجزا بر این فرض است که جریان و انتقال آب در سنگ‌های بلوری بیشتر در شکستگی‌ها رخ می‌دهد. بنابراین این روش، شکستگی‌های مجزا موجود در سنگ را شبیه‌سازی و جریان را برای مجموعه‌ای از این شکستگی‌های به هم پیوسته حل می‌کند. مدل‌های مفهومی مختلفی برای بازتولید شبکه‌های

محدوده در ۱۳۵ کیلومتری شمال غربی شهر شیراز قرار دارد. در حوزه آبریز رودخانه شول که ساختگاه سد پارسیان بر روی آن قرار دارد، سنگ‌های گوناگون متعلق به سازنده‌های مختلف از دوران میان‌زیستی تا زمان حاضر رخنمون دارد. قدیمی‌ترین سنگ‌های شناخته شده در گستره طرح، آهک و آهک‌های دولومیتی هستند.

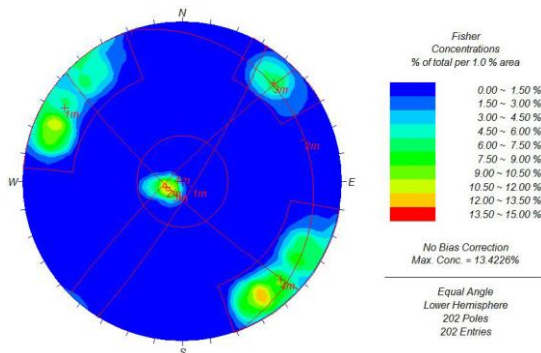
عملیات برداشت درزه و جمع‌آوری داده به روش‌های برداشت خطی (دیواره رخنمون و گمانه‌های اکتشافی) و برداشت پنجره‌ای انجام شده است. در ادامه به تعیین توابع توزیع مربوط به مهمترین پارامترهای هندسی شکستگی‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۲- مدل توسعه‌یافته‌ی بیچر (Huseby et al, 1997)

الف- جهت‌داری

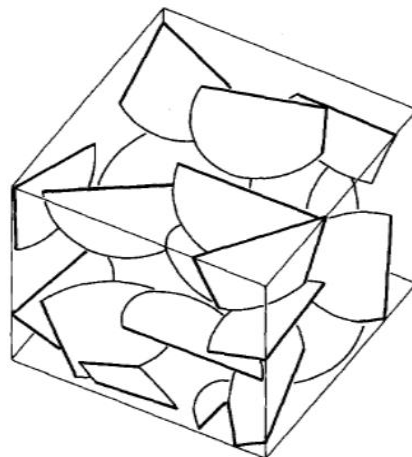
به‌منظور تحلیل داده‌های درزه‌نگاری مبتنی بر شیب و امتداد شیب از نرم‌افزار *Dips* استفاده شده است (شکل ۳).



شکل ۳- جدایش دسته‌درزه‌ها در شبکه اشمیت

بعد از تحلیل درزه‌ها در *Dips* مشخص شد که درزه‌های ساختگاه سد را می‌توان در ۴ دسته درزه

شکستگی مجزا تاکنون ارایه شده‌اند. یکی از مدل‌هایی که تاکنون به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته، مدل بیچر و همکاران است. بیچر و همکاران در سال ۱۹۷۷ بر اساس مدل بولین (Boolean)، اقدام به شبیه‌سازی شبکه شکستگی‌های مجزا نمودند. شکستگی‌ها به‌صورت دیسکی شکل و توسط قطر و جهت‌داری‌شان در فضا و به‌صورت تصادفی بر اساس توزیع پواسون تولید می‌شوند (شکل ۱). از آنجا که مشخصات شکستگی‌های تکی پارامترهای ورودی مدل هستند، توزیع آن‌ها به آسانی می‌تواند با داده‌های میدانی تطابق داشته باشد. در مدل‌های بولین، اندازه‌ی شکستگی‌ها، جهت‌داری‌ها و موقعیت‌ها مستقل بوده و دارای توابع تصادفی فضایی مشخصی هستند. به این صورت مفهوم همبستگی و ناهمگنی فضایی به آسانی نشان داده می‌شود. کاربردهای دیگر مدل دیسکی بولین در مطالعات لانگ و همکاران (Long et al., 1982) و اندرسون و ورس‌تورپ (Andersson & Dverstorp, 1987) آورده شده است.



شکل ۱- مدل بیچر (مدل بولین) (Dershowitz & Einstein, 1988)

هیوزبی و همکاران (Huseby et al., 1997) مدل بیچر را برای شکستگی‌های چندضلعی تصادفی یا منظم توسعه دادند (شکل ۲). این مدل‌های مفهومی اساس بسیاری از نرم‌افزارهای تولید شبکه شکستگی مجزا هستند.

۳- مطالعات میدانی و تحلیل‌های آماری

در این مقاله، توده سنگ اطراف سد مخزنی پارسیان واقع در استان فارس به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. این

درزه‌دار بر واحد حجم)، با استفاده از پارامتر P_{21} (شدت سطحی درزه‌ها: طول کلی درزه‌ها بر واحد سطح)، مطابق با داده‌های به دست آمده از روش برداشت پنجره‌ای و کاربرد روابط ژانگ و اینیشتین محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر عددی این پارامترها در مدل‌سازی DFN وارد می‌شود و نیازی به تعریف توابع توزیع آماری برای این دو پارامتر نیست.

ژانگ و اینیشتین (Zhang & Einstein, 2000)

رابطه‌ی زیر را برای محاسبه P_{32} پیشنهاد کردند:

$$P_{32} = \frac{N_T E(A)}{V} \quad (1)$$

در این رابطه، N_T تعداد کلی درزه‌های برداشت شده،

$E(A)$ مساحت متوسط درزه و V حجم واحد است.

$E(A)$ با رابطه‌ی زیر و با فرض دایره‌ای بودن درزه

محاسبه می‌شود.

$$E(D) = \frac{128\mu_l^3}{3\pi^3(\mu_l^2 + \sigma_l^2)} \quad (2)$$

در این رابطه، $E(D)$ قطر متوسط درزه، μ_l طول اثر

متوسط و σ_l برابر با انحراف استاندارد است.

با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده (شکل

۴) و کاربرد رابطه‌های ۴ و ۵ مقادیر P_{32} برای هر دسته‌درزه

به‌طور جداگانه محاسبه شده است (جدول ۳).



شکل ۴- نمایی از برداشت پنجره‌ای برای محاسبه P_{21}

جدول ۳- شدت شکستگی‌ها به تفکیک دسته درزه‌ها

دسته درزه	۱	۲	۳	۴
شدت شکستگی‌ها ($P_{32}(m^2/m^3)$)	۲/۰۹	۱/۹۵	۲/۲۳	۳/۰۲

تقسیم‌بندی کرد. مقادیر وزن‌دار شیب، جهت شیب و ثابت فیشر مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها در جدول ۱، آورده شده است. جهت‌یافتگی درزه‌ها دارای دو مولفه جهت شیب و زاویه شیب است. این دو مولفه به صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود در مدل DFN تولید می‌شوند. بیشتر تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است نشان داده که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند (Noroozi et al., 2015).

جدول ۱- پارامترهای جهت‌داری دسته‌درزه‌ها برداشت‌شده

دسته درزه‌ها	جهت‌داری دسته‌درزه		ثابت توزیع فیشر (k)
	شیب	جهت شیب	
۱	۸۱	۱۲۲	۳۱/۵
۲	۱۱	۷۱	۵۰/۵
۳	۸۰	۲۲۳	۹۶
۴	۸۱	۳۱۵	۳۴/۵

ب- اندازه شکستگی (پایایی)

برای مشخص شدن توابع توزیع حاکم بر پارامتر پایایی مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها، توابع ذکر شده در نرم‌افزارهای *Easy_fit* و *Minitab* تحلیل شدند. این نرم‌افزارها مناسب‌ترین توابع توزیع مربوط به هر کدام از پارامترهای هندسی را بر اساس آزمون‌های کولموگروف-اسمینوروف، اندرسون-دارلینگ و کای-اسکویر ارائه می‌دهند. متداول‌ترین تابع توزیع برای پایایی، بررسی و آزموده شدند. مقادیر مربوط به پایایی و نتایج برازش توابع توزیع هر یک از دسته درزه‌ها در جدول ۲، نشان داده شده است.

جدول ۲- متوسط پایایی و مناسب‌ترین تابع توزیع آماری مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها

دسته درزه‌ها	متوسط پایایی (m)	تابع توزیع مناسب
۱	۳/۵	لاگ نرمال
۲	۱۴/۷	نرمال
۳	۴/۴	لاگ نرمال
۴	۳/۲	لاگ نرمال

ب- چگالی و شدت

پارامتر P_{32} (شدت حجمی درزه‌ها: مساحت کلی سطح

ت- بازشدگی

بازشدگی شکستگی‌ها با توجه به تاثیر بسزایی که در هدایت جریان در مدل دارد، باید به‌طور کاملا دقیق اندازه‌گیری و در مدل لحاظ شود. در این تحقیق، متوسط داده‌های مربوط به بازشدگی مغزه‌های گمانه‌های حفاری شده و بازشدگی مربوط به برداشت خطی میدانی (جدول ۴)، انتخاب شده و در نرم‌افزارهای آماری تحلیل و در نهایت در مدل‌های *DFN* وارد شده است.

به‌منظور بررسی و تعیین مناسب‌ترین تابع توزیع، توابع توزیع لاگ‌نرمال، نرمال، توانی و یکنواخت در نرم‌افزارهای *Easy_fit* و *Minitab* تحلیل و در نهایت تابع توزیع نرمال به عنوان مناسب‌ترین تابع برای پارامتر بازشدگی انتخاب شد.

جدول ۴- بازشدگی مربوط به برداشت‌های میدانی و گمانه‌ها

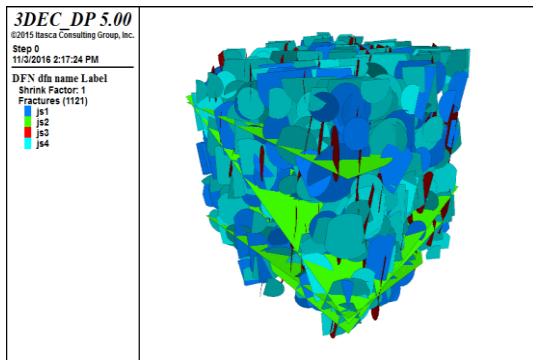
دسته درزه‌ها	متوسط بازشدگی (mm)	
	گمانه‌ها	برداشت خطی
۱	۲/۱	۲/۹
۲	۲/۱	۳/۶
۳	۲/۱	۲/۵
۴	۲/۱	۳/۵

۴- ساخت مدل هیدرولیکی *DFN* در نرم‌افزار *3DEC*

نرم‌افزار *3DEC* یک برنامه سه‌بعدی است که بر اساس روش اجزای مجزا، برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته، به کار می‌رود. این نرم‌افزار قابلیت تولید *DFN* را دارد. هر *DFN* مجموعه‌ای از دیسک‌ها است که در آن هر شکستگی یک المان نامیده می‌شود. در *3DEC* مشخصات هندسی درزه‌ها به‌وسیله توزیع‌های آماری اندازه شکستگی، جهت‌داری، بازشدگی و شدت دریافت می‌شوند. سپس بر اساس توزیع پواسونی موقعیت، مدل‌های تصادفی *DFN* ایجاد می‌شود (*Itasca Consulting Group, 2015*).

بر اساس داده‌های ورودی، مدل *DFN* منطقه که ویژگی‌های دسته درزه‌های آن در حد قابل توجهی به شرایط واقعی ساختگاه سد نزدیک است، ساخته شد. مدل ایجاد شده متشکل از ۱۱۲۱ درزه در شکل ۵، نمایش داده شده

است.

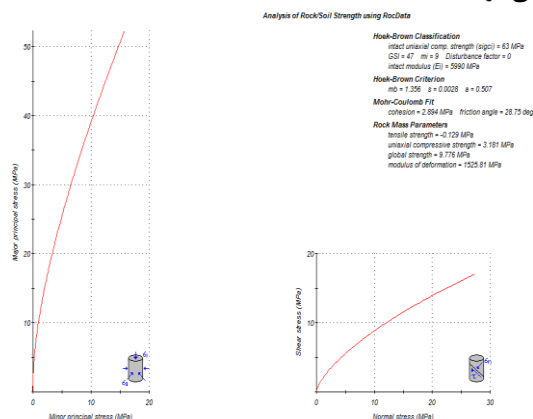


شکل ۵- مدل *DFN* متشکل از ۱۱۲۱ درزه در بلوک ۱۰ مترمکعبی

مترمکعبی

سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اتساع، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سطح درزه‌ها به‌عنوان خواص مکانیکی درزه‌های توده سنگ، در مدل لحاظ می‌شوند. مقادیر عددی مقاومت فشاری تک‌محوره، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی سطح درزه‌ها و مدول الاستیسیته‌ی ماده سنگ در آزمایشگاه و توسط شرکت مهندسی مشاور لار تعیین شده‌اند. مقادیر سختی برشی و سختی نرمال با استفاده از پارامترهای مدول الاستیسیته سنگ بکر، مقاومت فشاری تک‌محوره و برخی پارامترهای دیگر نظیر *GSI* در نرم‌افزار *Roc Data*، مطابق شکل ۶، محاسبه شدند. در جدول ۵، مقادیر این پارامترها ارایه شده است.

در ادامه‌ی روند مدل‌سازی، خواص سیال (آب) از جمله مدول بالک، ویسکوزیته و دانسیته که مقادیر آن‌ها در جدول ۶، ارایه شده، در نرم‌افزار وارد و در مدل‌ها لحاظ می‌شوند.



شکل ۶- تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ با

استفاده از *Roclab*

مدل مورد بررسی (کمتر از ۱۰۰ متر) و در نظر گرفتن اعتبار روابط، سه رابطه‌ی شیوری (۱۹۹۴)، شیوری (۲۰۰۱) و رومل (۲۰۰۲) مورد بررسی قرار گرفته است.

مقادیر به دست آمده برای k توسط هر کدام از سه رابطه ذکر شده، به ترتیب برابر با ۱/۰۳، ۱/۳۹ و ۱/۷۶ به دست می‌آید. در نهایت مقدار k برابر با ۱/۳۹ که به نوعی می‌تواند میانگین مقادیر ذکر شده نیز باشد، انتخاب و در مدل‌ها وارد شد. مهم‌ترین توجیه برای انتخاب این مقدار این است که مدل در عمقی نزدیک به سطح زمین واقع شده، در نتیجه انتظار می‌رود مقدار k بیشتر از ۱ باشد. بر این اساس مقدار تنش‌های اولیه افقی اعمال شده بر مدل به عنوان شرایط مرز اولیه برابر $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 2.28 \text{ MPa}$ است.

۵- اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی DFN

استفاده از عدد لوژان و تعیین REV

برای محاسبه نفوذپذیری و مقایسه با عدد لوژان باید تانسور نفوذپذیری محاسبه شود. به منظور محاسبه‌ی تانسور نفوذپذیری، در روند مدل‌سازی، جریان در جهت‌های مختلف اعمال می‌شود. در برخی پژوهش‌های انجام شده برای محاسبه‌ی نفوذپذیری، مدل‌های DFN با یک زاویه چرخش ثابت چرخانده شده و تحت اعمال فشار هیدرولیکی قرار می‌گیرند که این روش بیشتر در مدل‌سازی‌های دوبعدی به کار می‌رود. روش متداول در محاسبه تانسور نفوذپذیری مدل‌های سه‌بعدی DFN، ثابت نگه داشتن مدل و اعمال فشار ناشی از جریان به مرزهای مدل است. در تحلیل‌های هیدرولیکی فشار وارد بر مرزهای مدل توسط محاسبه‌ی فشار ناشی از روباره و سیال در نظر گرفته می‌شود. اعمال فشار بر مدل DFN به منظور محاسبه‌ی هر کدام از درایه‌های تانسور نرخ جریان به ترتیب در جهت‌های xx ، yy ، zz ، xy ، yz ، xz و zy صورت می‌گیرد. نمونه‌ای از اعمال فشار جریان سیال در جهت xx و اندازه‌گیری نرخ جریان در شکل ۷، نشان داده شده است. تانسور نرخ جریان با کاربرد رابطه‌ی دارسی به تانسور نفوذپذیری تبدیل می‌شود.

بدیهی است که اندازه تانسور نفوذپذیری برابر با دترمینان ماتریس است، لذا عدد نفوذپذیری برابر با دترمینان ماتریس نفوذپذیری است. با استفاده از رابطه ۵ و

جدول ۵- خواص مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی (Lar)

(Consultant Engineers Co., 2013)

دسته درزه	سختی نرمال (GPa/m)	سختی برشی (GPa/m)	زاویه اتساع (درجه)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (MPa)
۱	۸/۵۲	۲/۹۸	۳	۳۳	۰/۰۳۳
۲	۷/۰۵	۲/۴۶	۳	۳۳	۰/۰۳۳
۳	۱۲/۷۸	۴/۴۶	۳	۳۳	۰/۰۳۳
۴	۱۴/۱	۴/۹۳	۳	۳۳	۰/۰۳۳

جدول ۶- ویژگی‌های هیدرولیکی سیال (Itasca)

(Consulting Group, 2015)

خواص سیال	مدول بالک (GPa)	ویسکوزیته (Pa.s)	دانسیته (kg/m ³)
مقادیر	۲	۰/۰۰۳	۱۰۰۰

تاثیر تنش‌های برجای موجود در زمین، با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود در مدل‌ها لحاظ گردد. تنش قائم توسط رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (3)$$

که در این رابطه، σ_v تنش عمودی (Pa)، γ مخصوص طبقات بالایی (N/m^3) و z عمق از سطح زمین (m) است. مدل در عمق ۶۵ متری از سطح زمین واقع شده و تنش اولیه ناشی از وزن طبقات بالایی برابر $1/63 \text{ MPa}$ بر روی مدل اعمال شده است. همچنین سطح آب زیرزمینی هم‌تراز با مرز بالایی مدل در نظر گرفته شده است.

تنش‌های افقی با ضریب k (نسبت تنش افقی به تنش عمودی) به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود.

$$\sigma_h = k \sigma_v = k \gamma z \quad (4)$$

برای تعیین مقدار k روابطی پیشنهاد شده که در جدول ۷، بیان شده است.

جدول ۷- روابط تجربی برای تعیین مقدار k (Hudson, 2005)

منبع	مقدار k بر اساس عمق
Sheorey (1994)	$k = 0.25 + 7E_h \left(\frac{0.001 + \frac{1}{z}}{z} \right)$
Sheorey (2001)	$k = 0.33 + 9/5 E_h \left(\frac{0.001 + \frac{1}{z}}{z} \right)$
Rummel (2002)	$0.66 + \frac{72}{z} < k < 1/3 + \frac{110}{z}$

در این مقاله، برای تعیین مقدار k ، با توجه به عمق

سد پارسیان، مقدار تانسور نفوذپذیری، همان‌طور که در رابطه‌ی ۶ نشان داده شده است، برابر با $10^{-6} \times 4,2$ متر بر ثانیه محاسبه شده است.

$$[k] = \begin{bmatrix} 2.285 & 0.161 & 0.143 \\ 0.227 & 2.285 & 2.227 \\ 0.638 & 0.836 & 1.638 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \quad (۶)$$

$$Det|k| = 4.2 \times 10^{-6} (m/s)$$

بر اساس گزارش شرکت مهندسی مشاور لار (۱۳۹۳)، عدد لوژان مربوط به پروژه‌ی سد پارسیان در رده‌ی متوسط (۱۰ تا ۳۰) اندازه‌گیری شده است (Lar Consultant Engineers Co., 2013). با توجه به رابطه‌ی ارایه شده توسط فرانسون (رابطه ۷) که به منظور معادل‌سازی اندازه تانسور نفوذپذیری با عدد لوژان ارایه شده، مشاهده می‌شود که عدد لوژان مربوط به مدل ارایه شده در همین رده قرار می‌گیرد. طبق تحقیقی که رضی و همکاران در سال ۱۳۹۲ انجام دادند، این رابطه از بهترین روابط در تعیین میزان نفوذپذیری توده‌سنگ بر اساس نتایج آزمایش لوژان است (Razi et al., 2013).

$$k = 1.635 \times 10^{-7} \times N \quad (۷)$$

در این رابطه N عدد لوژان بر حسب لیتر بر دقیقه بر متر و k نفوذپذیری بر حسب متر بر ثانیه است. در نتیجه می‌توان بیان کرد که مدل ارایه شده و نتایج تحلیل‌های آب‌گذری از دقت قابل قبولی برخوردار است و می‌تواند به عنوان مبنای مطالعات و تحلیل‌های حساسیت پارامترهای موثر در آب‌گذری مورد استفاده قرار گیرد.

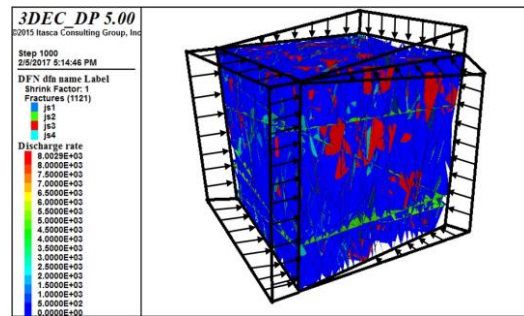
۶- توسعه مدل مکعبی معادل با مدل DFN

در این بخش به ارایه یک مدل ساده‌ی مکعبی دو پارامتری (شامل بازشدگی و اندازه ریز بلوک‌ها که به‌نوعی توسط فراوانی یا فاصله‌داری تعیین می‌شود) معادل با مدل DFN چند پارامتری پرداخته می‌شود. در این مدل مکعبی، تاثیر کل پارامترهای دخیل در آب‌گذری با دو پارامتر بازشدگی و اندازه ریز بلوک‌ها معادل‌سازی می‌شود (شکل ۹).

شرط معادل شدن مدل‌ها این است که مقدار نرخ جریان یا به عبارتی نفوذپذیری هرکدام از درایه‌ها در تانسور نفوذپذیری مدل DFN با درایه متناظر در تانسور نفوذپذیری مدل مکعب برابر باشد. در طی روند معادل‌سازی، بازشدگی مدل مکعب در هر کدام از جهت‌های xx ، xy ، xz ، yx ، yx ، yx ،

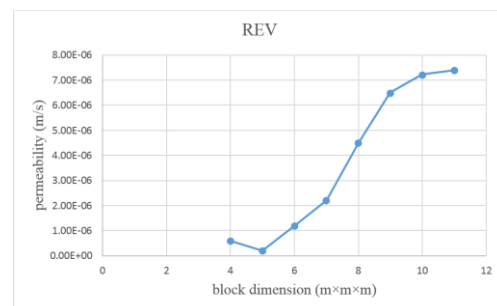
نیز کاربرد قابلیت دترمینان‌گیری در نرم‌افزار اکسل، اندازه تانسور نفوذپذیری محاسبه می‌شود.

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (۵)$$



شکل ۷- نرخ جریان در مدل DFN بعد از اعمال جریان سیال در جهت xx

یکی از موارد مهم در تحلیل‌های جریان که در مطالعات قبلی نادیده گرفته شده، تاثیر اندازه مدل و تعداد درزه‌ها بر اندازه نفوذپذیری یا به عبارت دیگر تعیین حجم المان معرف (REV) است. شرط رسیدن مدل به حجم المان معرف این است که در این اندازه و بزرگ‌تر از آن، تغییر محسوسی در مقدار تانسور نفوذپذیری ایجاد نشود. در این مقاله، به منظور رسیدن به REV منطقه‌ی مورد بررسی، ابتدا مدل‌هایی با اندازه‌های $4 \times 4 \times 4$ ، $5 \times 5 \times 5$ ، $6 \times 6 \times 6$ ، $7 \times 7 \times 7$ ، $8 \times 8 \times 8$ ، $9 \times 9 \times 9$ ، $10 \times 10 \times 10$ و $11 \times 11 \times 11$ مترمکعب ساخته شده و سپس تانسور نفوذپذیری مربوط به هر کدام از این ابعاد محاسبه می‌شود. نتایج این روند در نمودار شکل ۸، آورده شده است. بر اساس این نمودار و طبق تعریف REV، مدل با ابعاد ۱۰ متر مکعب به‌عنوان REV منطقه انتخاب شده است.

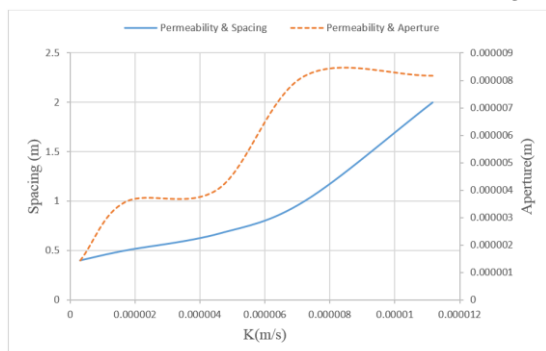


شکل ۸- تعیین اندازه REV

برای مدل DFN ساخته شده در اندازه REV منطقه

همانطور که بیان شد، در بررسی تاثیر پارامتر بازشدگی بر نفوذپذیری، مدل مکعب مینا دارای فاصله‌داری برابر با یک ($l=1$)، یعنی وجود ۱۰ درزه در طول ۱۰ متر در هر کدام از جهت‌های x ، y و z بود. برای بررسی تاثیر فاصله‌داری بر نفوذپذیری، تحلیل‌های حساسیت در فاصله‌داری‌های ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶۷، ۱ و ۲ انجام می‌شود.

نتیجه تحلیل حساسیت بازشدگی و فاصله‌داری درزه‌ها در مدل مکعبی معادل، در شکل ۱۰، به صورت نموداری نشان داده شده است.



شکل ۱۰- ارتباط بازشدگی و فاصله‌داری با نفوذپذیری در

مدل مکعبی

بر این اساس، رابطه‌ی بین نفوذپذیری و فاصله‌داری در مدل مکعبی به صورت زیر معرفی می‌شود.

$$[k] = 7 \times 10^{-6} \ln(l) + 7 \times 10^{-6} \quad (8)$$

در این رابطه، l برابر با فاصله‌داری و برحسب متر است. رابطه‌ی بین فاصله‌داری و بازشدگی مدل مکعبی که لازمی‌ارایه‌ی رابطه‌ی نهایی است، به صورت رابطه‌ی ۸ ارایه شده است.

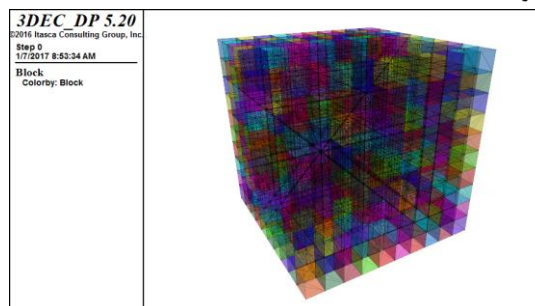
$$[e] = -6 \times 10^{-6} l^2 + 2 \times 10^{-5} l - 6 \times 10^{-6} \quad (9)$$

در این رابطه $[e]$ ، تانسور بازشدگی شکستگی‌ها است. در نهایت، رابطه‌ی بین تانسور نفوذپذیری، تانسور بازشدگی شکستگی‌های مدل مکعبی و فاصله‌داری شکستگی‌ها به صورت رابطه‌ی ۹ ارایه می‌شود. این رابطه با استفاده از روش رگرسیون‌گیری توسط نرم‌افزار *Minitab* به دست آمده است.

$$[k] = -2 \times 10^{-6} + 2 \times 10^{-6} l + 0.661[e] \quad (10)$$

لازم به ذکر است که روابط دو پارامتری ارایه شده برای تخمین نفوذپذیری از دقت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. رابطه‌ی ارایه شده به نوعی شامل کل پارامترهای موثر

yz ، xz ، xy و zz با استفاده از آزمون و خطا تغییر داده می‌شود تا این که نفوذپذیری درایه‌ها در مدل‌های *DFN* و مکعبی برابر شود. با انجام این معادل‌سازی‌ها، بازشدگی در جهت‌های مذکور مقادیر مختلفی به خود می‌گیرد. در نتیجه ضروری است یک تانسور بازشدگی برای مدل مکعب ارایه شود.



شکل ۹- نمایی از مدل مکعب معادل با مدل *DFN*

هدف از توسعه مدل مکعبی حذف پارامترهای چگالی و شدت از روند تحلیل هیدرولیکی و دیدن تاثیر این پارامترها در قالب دو پارامتر بازشدگی و فاصله‌داری است. دلیل ضرورت حذف پارامترهای چگالی و شدت آن است که امکان تحلیل حساسیت این پارامترها در اندازه *REV* تعیین شده وجود ندارد و نیاز به مدلی با اندازه بزرگتر است که پیچیدگی محاسباتی آن فراتر از توانایی کامپیوترهای موجود است.

۷- تحلیل حساسیت و ارایه روابط تجربی

در این بخش به هدف اصلی این پژوهش که ارایه رابطه‌ی تجربی بین نفوذپذیری نسبت به فاصله‌داری و بازشدگی شکستگی‌ها در مدل مکعبی است، پرداخته می‌شود. مدل مکعبی مینا، مدل معادل مدل *DFN* ارایه شده از ساختگاه سد که به وسیله داده‌های آزمایش لوژان اعتبار سنجی شده است، می‌باشد. اساس کار، تحلیل حساسیت پارامترهای مدنظر است. روش اتخاذ شده در تحلیل حساسیت پارامتر بازشدگی، افزایش و کاهش ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصدی پارامتر و ثابت نگه‌داشتن پارامتر فاصله‌داری است. در این حالت در مدل‌های مکعبی فاصله‌داری برابر با یک در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب می‌توان درجه حساسیت پارامتر بازشدگی را به طور جداگانه در نرخ جریان عبوری و در نهایت نفوذپذیری مدل‌ها بررسی و تعیین کرد.

نرم‌افزارهای آماری *Easy_fit* و *Minitab* انجام شده است. نتایج تحلیل‌های آماری شکستگی‌ها نشان می‌دهد که چهار دسته درزه در منطقه با شدت متوسط $2/32$ مترمربع بر مترمکعب وجود دارد. جهت شیب و زاویه شیب شکستگی‌ها به ترتیب از توزیع یکنواخت و توزیع فیشر پیروی می‌کنند و پایایی شکستگی‌ها از توزیع‌های لاگ‌نرمال و نرمال تبعیت می‌کند. تحلیل‌های هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار *3DEC* انجام شده است. اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده توسط نتایج آزمایش لوژان صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که عدد لوژان مربوط به مدل در رده عدد لوژان اندازه‌گیری شده در پروژه‌ی سد پاریسیان (رده‌ی کم (۳ تا ۱۰) تا متوسط (۱۰ تا ۲۰)) قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان ادعا کرد که مدل ارایه شده و نتایج تحلیل‌های آب‌گذری از دقت قابل قبولی برخوردار است. برای حذف تاثیر اندازه مدل و تعداد درزه‌ها بر اندازه نفوذپذیری، حجم المان معرف (*REV*) منطقه‌ی مورد بررسی برابر $10 \times 10 \times 10$ مترمکعب انتخاب شد. برای مدل *DFN* ساخته شده در اندازه *REV* منطقه سد پاریسیان، مقدار تانسور نفوذپذیری، برابر با $10^{-6} \times 7,22$ متر بر ثانیه محاسبه شده است. از آنجا که امکان تحلیل حساسیت پارامترهای چگالی و شدت در اندازه *REV* تعیین شده وجود ندارد، به منظور حذف این پارامترها از روند تحلیل هیدرولیکی و دیدن تاثیر این پارامترها در قالب دو پارامتر بازشدگی و فاصله‌داری، مدل مکعبی معادل مدل *DFN* اعتبارسنجی شده، توسعه داده شد. با تحلیل حساسیت پارامترهای بازشدگی و فاصله‌داری با استفاده از مدل مکعبی توسعه داده شده، رابطه تجربی تعیین نفوذپذیری بر اساس بازشدگی و فاصله‌داری شکستگی‌ها ارایه شد. رابطه تجربی ارایه شده در محدوده‌ی چگالی برابر 1 تا 2 درزه بر متر و شدت درزه برابر 2 تا 3 متر مربع بر مترمکعب صادق است. با استفاده از این رابطه می‌توان آب‌گذری توده‌سنگ را در پروژه‌های مشابه پیش‌بینی کرد. برخی ویژگی‌های این پژوهش از جمله سه بعدی بودن مدل، ابعاد نسبتاً مناسب مدل *REV* (یک بلوک $10 \times 10 \times 10$ مترمکعبی) و تعداد قابل ملاحظه درزه (۱۱۲۱ درزه) را می‌توان از تفاوت‌های این پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی دانست.

بر جریان سیال در مدل *DFN* است، زیرا پارامترهای مدل *DFN* شامل جهت‌داری، پایایی، بازشدگی، چگالی و شدت در قالب دو پارامتر بازشدگی و فاصله‌داری ساده شده است. به عبارت دیگر روابط ارایه شده در محدوده تغییرات مقادیر چگالی و شدت مدل *DFN* اعتبارسنجی شده، معتبر هستند. بنابراین، روابط تجربی ارایه شده در محدوده‌ی چگالی برابر 1 تا 2 درزه بر متر و شدت درزه برابر 2 تا 3 متر مربع بر مترمکعب صادق هستند.

برای اعتبارسنجی، رابطه ارایه شده بر روی مورد مطالعاتی توده‌سنگ جناح راست سد تنگاب فیروزآباد پیاده‌سازی و نتایج آن مقایسه شده است. در این مورد مطالعاتی، فاصله‌داری متوسط درزه‌ها برابر $0/46$ متر و متوسط *RQD* برابر 98 درصد است. به عبارت دیگر، چگالی درزه‌داری در این توده‌سنگ، در حدود 2 درزه در متر است. مقدار لوژان میانگین در عمق‌های مختلف از توده سنگ دیواره سد، در حدود $0/7$ اندازه‌گیری شده است. بر اساس رابطه فرانسون (رابطه ۷)، مقدار نفوذپذیری توده سنگ برابر $10^{-7} \times 1,2$ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. رابطه ارایه شده در این مقاله (رابطه ۱۰)، مقدار نفوذپذیری را در حدود $10^{-7} \times 1,9$ متر بر ثانیه برآورد می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود هم‌خوانی خوبی بین نفوذپذیری برآورد شده توسط رابطه تجربی ارایه شده در این مقاله و مقدار اندازه‌گیری شده آن در توده‌سنگ جناح راست سد تنگاب فیروزآباد، برقرار است که نشان از اعتبار رابطه ارایه شده دارد.

۸- نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف ارایه رابطه‌ی تجربی برای برآورد آبگذری در توده‌سنگ اطراف سازه‌های زیرزمینی با تمرکز بر مورد مطالعاتی ساختگاه سد مخزنی پاریسیان با استفاده از مدل‌سازی عددی ارایه شده است. روش شبکه شکستگی‌های مجزا به عنوان شیوه شبیه‌سازی جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار انتخاب شده است. داده‌های موردنیاز بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و برداشت‌های میدانی با کاربرد روش‌های برداشت خطی (دیواره رخنمون و گمانه‌های اکتشافی) و برداشت پنجره‌ای به دست آمده است. برازش توابع توزیع آماری بر ویژگی‌های مختلف شکستگی‌ها توسط

۹- مراجع

- Andersson, J., & Dverstorp. B., (1987). Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. *Water Resource Res*, 23, 1876–1886.
- Baghbanan, A., & Jing, L., (2007). Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 704-719.
- Baghbanan, A., & Jing, L., (2008). Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45 (8), 1320-1334, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.015>.
- Chen, R., & Tonon, F., (2012). Fracture Cluster Modeling for Groundwater Inflow Prediction into Rock Tunnels Using Geostatistics. In *GeoCongress 2012@ sState of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, ASCE, 2372-2381.
- Dershowitz, W. S., & Einstein, H. H., (1988). Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21, 21–51.
- Farahmand, K., (2011). Sensitivity analysis of the effect of different parameters on the hydromechanical behavior of jointed rock mass, Master's thesis, *College of Engineering, Isfahan University of Technology*.
- Farhadian, H., Katibeh, H., Hassanpour, J., & Aalianvari, A., (2009). Amirkabir tunnel site rating from groundwater hazard point of view using SGR and comparison with analytical method 3rd Iranian *Mining Engineering Conference*, Yazd.
- Hu, K., Yao, L., Liao, J., Wang, H., Luo, J., & Xu, X., (2024). Predicting Water Inflow in Tunnel Construction: A Fracture Network Model with Non-Darcy Flow Considerations. *Water*, 16 (13), 1885. <https://doi.org/10.3390/w16131885>.
- Huang, Z., Zhao, K., Li, X., Zhong, W., & Wu, Y., (2021). Numerical characterization of groundwater flow and fracture-induced water inrush in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 116, 104119.
- Hudson, J.A., (2005). Engineering Properties of Rocks. Vol 4, *Lexinton MA*, USA, p. 290.
- Huseby, O., Thovert, J.F., & Adler, P.M., (1997). *Journal of Physics A: Mathematical and General* 30(5), 1415.
- Itasca, 3. D. E. C., "Version 5.0." (2015).
- Jafari, A., & Babadagli, T., (2012). Estimation of equivalent fracture network permeability using fractal and statistical network properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 92, 110-123, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.007>.
- Javadi, M., & Sharifzadeh, M., (2012). Near Field Fluid Flow Modelling in Discontinues Fractured Media. *Water Flow and Pollution National Conference*, University of Tehran, Iran.
- Javadi, M., Sharifzadeh, M., & Shahriar, K., (2016). Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh

- pumped storage project, *Iran. Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 424-438, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.003>.
- Karimzade, E., Sharifzadeh, M., Zarei, H.R., Shahriar, K., & Cheraghi Seifabad, M., (2017). Prediction of water inflow into underground excavations in fractured rocks using a 3D discrete fracture network (DFN) model. *Arabian Journal of Geosciences* 10 (9).
- Lapcevic, P. A., Novakowski, K. S., & Sudicky, E. A., (1999). The interpretation of a tracer experiment conducted in a single fracture under conditions of natural groundwater flow. *Water Resources Research*, 35(8), 2301-2312, <https://doi.org/10.1029/1999WR900143>.
- Lar Consultant Engineers Co., (2013). General Geological and Engineering Report of the Parsian Dam Construction Site.
- Li, G., Li, C., Liao, J., & Wang, H., (2023). A New Hydro-Mechanical Coupling Numerical Model for Predicting Water Inflow in Karst Tunnels Considering Deformable Fracture. *Sustainability*, 15, 14703.
- Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., & Witherspoon, P. A. (1982). Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, 18 (3), 645-658.
- Noroozi, M., Jalali, S.E., & Kakaie, R., (2015). Three-dimensional geometrical simulation of rock mass discontinuities network in the access tunnel of Rudbar Lorestan dam & hydropower plant. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 4(1), 53-68.
- Priest, S.D., (1993). Discontinuity Analysis for Rock Engineering. *Chapman and Hall, London*.
- Razi, P., Masoudi, M., & Soltani Mohammadi, S., (2013). Selecting the optimal relationship between the Lugeon number and the equivalent permeability value in the grouting operation of the Seymareh Dam foundation. *The First Iranian Conference on Geotechnical Engineering, Ardebil*.
- Shams, G., Sharifzadeh, M., & Javadi, M., (2014). Identifying the main flow pathways around underground excavation by using combination of cellular automata with DFN. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 8(21), 66-75.
- Zhang, K., Xue, Y., Xu, Z., Su, M., Qiu, D., & Li, Z., (2021). Numerical study of water inflow into tunnels in stratified rock masses with a dual permeability model. *Environmental Earth Sciences*, 80 (7), 260, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09550-5>
- Zhang, L., & Einstein, H.H., (2000). Estimating the Intensity of Rock Discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37, 819-837.

Developing an empirical equation for estimating water flow in underground structures

S. Moshiri Aliabad¹; S. E. Jalali²; M. Noroozi^{3*}

1- MSc Graduated; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, samanmoshiri1991@gmail.com

2- Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, jalalisme@shahroodut.ac.ir, Jalalisme@gmail.com

3- Assistant Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir, mnoroozi.mine@gmail.com

Received: 7 Jul 2024; Accepted: 3 Jan 2025

DOI: 10.22044/tuse.2025.14743.1488

Keywords

Discrete fracture network
Jointed rock mass
Permeability
Hydraulic analysis
Parsian reservoir dam

Extended Abstract

Summary

The main objective of this paper is to present an empirical equation for estimating the amount of fluid flow based on the parameters of the aperture and spacing of rock mass discontinuities. For this purpose, the discrete fracture network (DFN) method and three-dimensional numerical method have been used to model rock mass discontinuities and simulate fluid flow, respectively. Using the obtained empirical equation, the water permeability of the rock mass in similar projects can be predicted without performing time-consuming numerical modeling and only using the geometric parameters of discontinuities.

Introduction

In discontinuous rock masses, groundwater enters the underground space through discontinuities and causes many problems. Various numerical models have been developed to predict water flow into underground spaces. Most of the numerical models presented so far are in two-dimensional form and assume that the length of fractures is infinite, and also, the geometric parameters of the fractures are deterministic. In this research, the hydraulic behavior of the fracture network around underground excavations has been examined using the 3D-DFN method by applying 3DEC software.

Methodology and Approaches

Focusing on the Parsian reservoir dam rock mass and based on field surveys, probability distribution functions related to each of the discontinuity set characteristics were determined and a DFN model representing the actual ground conditions has been constructed. To eliminate the influence of model size and number of joints on permeability, the representative element volume (REV) of the study area has been selected. By numerical analysis of the fluid flow model and validating it by Lugeon test, a realistic model of the site permeability has been presented. Next, a cubic model based only on the spacing and aperture parameters of discontinuities has been developed. Using this cubic model, sensitivity analyses focusing on the effect of the aperture and spacing parameters have been performed on the amount of fluid flow and empirical equations have been presented to estimate the permeability of the rock mass. The obtained empirical equations is valid in the range of density of 1 to 2 joints/m and joint intensity of 2 to 3 m²/m³.

Results and Conclusions

Using the proposed approach, the permeability of the rock mass can be predicted in similar projects. Some features of this research, including the three-dimensionality of the model, the relatively appropriate dimensions of the REV model (a 10×10×10 cubic meter block), and the considerable number of joints (1121 joints), can be considered as differences

of this research compared to previous similar researches. To validate the obtained equations, the right-sided rock mass of the Tangab Dam in Firuzabad has been considered as a case study, and the obtained equations has been implemented on it. There is a good agreement between the permeability estimated by the empirical equations presented in this paper and the measured value of permeability in the right-sided rock mass of the Tangab Dam that indicates the validity of the presented equations.
