

بررسی روند نشت آب با استفاده از روش شبکه شکستگی‌های مجزا (مطالعه موردی: تونل گردنه رُخ)

الهام ملکی پور^۱، عنایت الله امامی میبدی^{۲*}، محمدرضا مشرفی فر^۳، رسول اجل لویان^۴

۱- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد

۲- استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه یزد

۳- استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه یزد

۴- استاد، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

en.emami@yazd.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۲/۱۷

تاریخ دریافت ۹۸/۱۲/۲۶

چکیده

بدون تردید مدل سازی جریان سیال در مطالعات سازه های زیرزمینی نقش بزرگی را ایفا می کند. در بسیاری از موارد در توده سنگ ها سیستم اصلی انتقال جریان سیال، شبکه شکستگی ها است. با توجه به اینکه اندازه گیری برجای تمامی خواص هندسی ناپیوستگی ها به ویژه تداوم که نقش اساسی در چگونگی جریان سیال در توده سنگ دارد، به روش دستی فرآیندی وقت گیر و غیرممکن است، استفاده از مدل سازی های تصادفی شکستگی های توده سنگ پیشنهاد می شود. عدم اطمینان در خصوص تخمین ویژگی های هندسی ناپیوستگی ها موجب شده است که از تحلیل های آماری برای تعریف دقیق تر ویژگی های هندسی استفاده شود. با توجه به طبیعت آماری ذاتی ویژگی های هندسی ناپیوستگی ها می توان به مدل دقیق تری با استفاده از توسعه مدل هندسی تصادفی سه بعدی درزه ها دست یافت. مهم ترین مرحله در مدل سازی توده سنگ تعریف دقیقی از شبکه ناپیوستگی هاست. این امر سبب فراهم آوردن نقطه شروع بهتر برای مدل سازی های عددی تحلیل های مکانیکی و هیدرولیکی خواهد شد. بدین منظور در مقاله ابتدا درزه های ورودی تونل گردنه رخ با استفاده از کد نوشته شده در نرم افزار Mathematica، با نام 3D-DFN مدل سازی شد. پس از اعتبارسنجی مقادیر برداشت شده و مدل سازی شده مشاهده شد که درصد هماهنگی بالای ۸۵ درصد است. این امر سبب شد تا از خروجی های مدل ساخته شده با اطمینان در مدل سازی هیدرولیکی تونل استفاده شود. این مقاله با هدف مدل سازی دوبعدی هیدرولیکی در محیط نرم افزاری UDEC صورت پذیرفته است. سیال مدل شده به صورت تک فازی در نظر گرفته شده و ناپیوستگی ها نیز به صورت دو بعدی مدل شده اند. مدل سازی هیدرولیکی با فراخوانی درزه ها از خروجی مقطع دو بعدی تهیه شده از برنامه 3D-DFN انجام شده است. مقایسه نرخ به دست آمده جریان خروجی در مقطع طولی با نرخ جریان واقعی هماهنگی بسیار خوبی را نشان می دهد. همچنین آنالیز حساسیت جریان سیال با توجه به مقادیر بیشترین و کمترین پارامترهای بازشدگی، تداوم و عدد فیشر بررسی شده است.

واژگان کلیدی: UDEC، مدل سازی جریان سیال، کد 3D-DFN، تونل گردنه رخ؛

۱- مقدمه

قطعیت های بسیاری باقی مانده اند. دانش اساسی مرتبط با

جریان در سنگ های شکسته شده از آزمایش های انجام گرفته

روی جریان سیال در آزمایشگاه، یا جریان تنش در

پدیده جریان سیال در توده سنگ های شکسته شده از دهه ۱۹۶۰

به طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی هنوز هم عدم

شکستگی‌های سنگ و تحت تنش‌های نرمال مختلف با برش و بدون برش، و تعیین نفوذپذیری توده‌های شکسته شده از طریق پمپ کردن و نیز آزمایش‌های ردیابی در مقیاس صحرایی به دست آمده‌اند. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری زمینه سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ بسیار ناچیز است و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند [1]. در حقیقت محیط جریان و انتقال سیال در بسیاری از بخش‌های پوسته زمین ناچیز بوده و در نتیجه رفتار سیال در چنین محیط‌هایی ناپیوسته خواهد بود [2]. توده‌سنگ‌های طبیعی دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که تاثیر قابل توجهی را در جریان سیالات در توده‌سنگ دارند. توده‌سنگ‌ها شامل ناپیوستگی‌های مختلف مانند گسل، درزه و شکستگی‌ها هستند [3]. برای مدل‌سازی رفتار پیچیده هیدرولیکی توده‌سنگ ابتدا لازم است پارامترها و عوامل موثر در رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ بررسی شود. به طور کلی در محیط‌های سنگی مسائل مربوط به انتقال و جریان سیال در چهار فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- انتقال و جریان سیال در داخل یک درزه یا تک شکستگی

- انتقال و جریان سیال از طریق شبکه شکستگی
- انتقال و جریان سیال از طریق محیط سنگی متخلخل
- عکس‌العمل بین محیط متخلخل و شکستگی‌ها

برای مدل‌سازی و بیان رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ از دو روش پیوسته و ناپیوسته استفاده می‌شود. در روش پیوسته با استفاده از خواص معادل توده‌سنگ، یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ به صورت کاربردی ارائه می‌شود. خواص معادل متخلخل و شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ با استفاده از آزمایش‌های برجا و یا به صورت غیرمستقیم با استفاده از روش‌های عددی و یا هندسی ساده تعیین می‌شود [4]. با توجه به ساده بودن روش‌های پیوسته مثل متخلخل دوگانه و نفوذپذیری دوگانه در بعد عملی این روش‌ها محدودیت‌هایی در رابطه با اعمال صحیح تاثیر هندسه

شکستگی‌ها در رفتار جریان دارند. درحقیقت متخلخل موثر هیدرولیکی که پارامتر اساسی مدل‌سازی است تحت تاثیر ارتباط و تقاطع شکستگی‌های موجود در دامنه است [5] و تقاطع بین شکستگی‌ها تابع پیچیده‌ای از فراوانی شکستگی‌داری (تعداد شکستگی در واحد سطح یا حجم)، اندازه (طول یا سطح) و جهت‌داری شکستگی‌های موجود در دامنه است [6]. سیستم ناپیوسته در مقابل سیستم پیوسته قرار می‌گیرد. در یک سیستم ناپیوسته از مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌شود و درستی آن از طریق محاسبات تحلیل می‌شود. طبیعت توده‌سنگ ناپیوسته بوده و استفاده از مدل‌های ناپیوسته تخمین بهتری از شرایط هیدرولیکی توده‌سنگ را فراهم می‌کند. از آنجا که توده سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله، جهت، پایایی و فاصله-داری دارای مقادیری پراکنده در توده سنگ باشند [7].

در واقع در روش‌های ناپیوسته تلاش بر این است که پیچیدگی هندسی توزیع فضایی شکستگی‌ها در محیط توده‌سنگ و تاثیر آن‌ها در رفتار هیدرولیکی به صورت صریح مدل‌سازی شود. در این حالت با ایجاد یک مدل‌سازی صریح هندسی از شکستگی‌ها (مانند روش شبکه شکستگی مجزا) که نشان دهنده مشخصات هندسی، تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در محیط است و اعمال قوانین جریان در شکستگی‌ها، رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ مدل‌سازی می‌شود. تصادفی بودن خواص شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ لزوم استفاده از آنالیزهای آماری را نشان می‌دهد [8].

شرط جریان سیال در توده‌سنگ وجود شبکه ناپیوستگی‌های به هم مرتبط است. برای مدل‌سازی هیدرولیکی توده‌سنگ این امر که درزه‌های مدل‌سازی شده تا حدود زیادی به واقعیت نزدیک باشد، اهمیت دارد. روش کلی که در نرم‌افزارهای عددی به صورت پیش‌فرض برای تمام پارامترهای هندسی دسته‌درزه‌ها در نظر گرفته می‌شود، تابع توزیع یکنواخت است. در واقع با توجه به الگوی

معین در هنگام تشکیل آن‌ها تقسیم‌بندی شده و در هر دسته توزیع احتمال مشخصی از طول، شیب، جهت‌شیب و مکان مرکز شکستگی در نظر گرفته می‌شود [9].

ونزیانو در سال ۱۹۷۸ اولین مطالعات را در زمینه مدل‌های تصادفی شبکه با رویکرد تعریف شبکه پواسن ناهمسانگرد انجام داد [12]. هادسون و لاپونته در سال ۱۹۸۰ اولین مطالعات را در زمینه استفاده از مدل‌های تصادفی در زمینه جریان سیال انجام دادند [13]. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ برای درزه‌های به هم مرتبط و مطالعه جریان سیال در آن‌ها تانسور نفوذپذیری تعریف کردند [14]. مطالعات ایندراواتنا و همکارانش [15] بر روی جریان آب تک‌فازی در شکاف سنگ و مطالعات گاتینونی [16] و همکارانش روی مدل‌سازی جریان آب در تک درزه همراه با نقاط تماس مختلف از جمله این مطالعات است. جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه را رن و همکارانش در سال ۲۰۱۷ انجام دادند. آن‌ها برای شبکه شکستگی مدل DFN معادل و DFN هدف را تعریف نمودند. این روش برای شبیه‌سازی توده‌سنگ ناهمگن مناسب است [17].

شریف‌زاده و همکاران در سال ۱۳۸۵ بیان کردند ناپیوستگی‌های درون توده‌سنگ مسیرهای اصلی جریان آب هستند و جریان سیال با افزایش عمق کاهش می‌یابد [18]. جوادی اصطهبانی و شریف‌زاده در سال ۱۳۹۳ مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی در محیط سنگی را بر اساس روش مبتنی بر DFN توسعه دادند [19]. مهاجرانی و همکارانش در سال ۱۳۹۶ در مطالعه کاربرد روش مش‌بندی بهینه برای تحلیل جریان در DFN الگوریتم جدیدی را طراحی نمودند [20].

با توجه به ماهیت توده‌سنگ درزه‌دار در این مقاله از روش المان مجزا و نرم‌افزار UDEC^۲ استفاده شده است. در این مقاله ابتدا شبکه هندسه ناپیوستگی‌ها به صورت سه‌بعدی با استفاده از کد نوشته شده‌ی 3D-DFN تهیه شده است. این مدل‌سازی بر اساس پارامترها و توابع آماری به دست آمده از اطلاعات برداشت شده مانند شیب، جهت‌شیب، فاصله‌داری و تداوم انجام شده است. خروجی این برنامه به صورت گرافیکی سه‌بعدی و رقومی است. همچنین این برنامه قابلیت ایجاد مقاطع دلخواه در هر نقطه از بلوک

پیچیده ناپیوستگی‌ها فرض ذکر شده با توزیع واقعی پارامترهای هندسه ناپیوستگی‌ها در طبیعت تشابهی ندارد. بنابراین تحلیل هیدرولیکی صورت گرفته در پروژه می‌تواند با نتایج دور از واقعیت همراه باشد. با توجه به اینکه طبیعت توده‌سنگ ناپیوسته بوده و الگوهای پیچیده در توده‌سنگ منجر به ویژگیهای متفاوت در پارامترهای هندسی خواهد شد، می‌توان با ارائه مدل شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN^۱) مدل‌سازی را به نتایج واقعی نزدیکتر کرد. کاربرد روش مدل‌سازی DFN برای دستیابی به داده‌های تصادفی و تولید مدل واقعی با استفاده از پارامترهای آماری و داده‌های جمع‌آوری شده می‌تواند مفید باشد. هدف در تولید شبکه‌های درزه تصادفی تولید یک و یا تعداد بیشتری هندسه درزه، در دو یا سه‌بعد است به شکلی که ویژگی‌های جمعیتی درزه‌های واقعی برداشت شده در توده‌سنگ را منعکس کند. درزه‌های مدل‌شده و نقشه‌برداری شده می‌توانند برای اعتبارسنجی و همچنین در صورت نیاز برای اصلاح مدل، مقایسه شوند [7].

روش DFN هندسه و ویژگی‌های جریان در ناپیوستگی‌ها در مقیاس شکستگی را به طور مستقیم و با استفاده از داده‌های به دست آمده از برداشت میدانی ارائه می‌کند. به هر تک شکستگی در شبکه، پارامترهایی مثل مکان، جهت‌یابی، شکل هندسی فرضی و بازشدگی بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی نسبت داده می‌شود [9]. برای محاسبه جریان سیال در DFN تک‌شکستگی‌ها و معادلات جریان به صورت صریح در سرتاسر شبکه حل می‌شود [10]. مدل‌های DFN می‌توانند بازه بزرگتری از تغییرات مقادیر جریان سیال را در مقایسه با مدل‌های معادل که مبتنی بر میانگین حجمی است ارائه کند [11]. روش DFN سه بعدی شبکه را به صورت مجموعه‌ای از چندضلعی‌های متقاطع دوبعدی تعبیه شده در فضای سه‌بعدی مدل‌سازی می‌کند. بیشتر مدل‌های DFN شکستگی‌ها را به صورت مستطیلی یا بیضوی صفحه‌ای نشان داده و به دلیل عدم قطعیت در داده‌های برداشت شده زیرسطحی، پارامترهای مکان، جهت‌یابی و اندازه را به صورت آماری مدل می‌کند. شکستگی‌ها بیشتر به دسته‌های مرتبط با وقایع زمین‌شناسی

$$\begin{bmatrix} E_{ff} & E_{fc} \\ E_{cf} & E_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_f \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_f \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (۳)$$

اندیس f و c در معادله (۳) به ترتیب مربوط به گره آزاد (هد مجهول) و گره غیرآزاد (هد معلوم) است. مقدار درایه i ام بردار نرخ جریان $\{Q\}$ برای گره‌های مرزی با هد ثابت به صورت ی‌صفر و برای گره‌های داخلی صفر خواهد بود. برای معادله (۳) ماتریس E و هد کلی بر اساس گره‌های داخلی به صورت معادله (۴) مرتب‌سازی می‌شود:

$$[E_{ff}]\{H_f\} + [E_{fc}]\{H_c\} = \{Q_f\} \quad (۴)$$

تنها مجهول در معادله (۴) مقادیر هد کلی در گره‌های داخلی (بردار $\{H_f\}$) است که معمولاً با استفاده از یکی از روش‌های عددی حل معادلات محاسبه می‌شود.

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از نظر سنگ‌شناسی این منطقه به طور کلی از توالی‌های رسوبی آهکی زمان کرتاسه و اتوسن تشکیل شده که در برخی قسمت‌ها با سنگ‌های تخریبی همراه شده است. محور تونل در بخش ورودی و همچنین در بخش میانی تونل از آهک خاکستری کرتاسه میانی تشکیل شده است و از نظر مقاومت جزء ماده سنگ‌های با مقاومت متوسط هستند و طبق مطالعات سطح الارضی از پایداری به نسبت خوبی برخوردارند، بنابراین در این بخش حفاری به صورت انفجاری صورت می‌گیرد. بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی از محدوده تونل و بازدید صحرایی از سطح محل تونل نشانگر وجود یک لایه آهک برشی در محل است که تا اعماق نیز تداوم دارد. قسمت کوچکی از محدوده خروجی تونل از آهک مارنی سبز- خاکستری نازک لایه تشکیل شده، که با توجه به پوشیده بودن این منطقه توسط رسوبات آبرفتی کوارتز و نیز مقاطع رخنمون شده در این محدوده می‌توان استنباط کرد که سنگ‌های فوق از نظر مقاومت در دسته سنگ‌های ضعیف تا خیلی ضعیف قرار می‌گیرد که در این ناحیه احتمال لغزش در طول مسیر وجود دارد بنابراین عملیات حفاری به صورت گالری‌های چندگانه و اجرای پوشش حفاظتی اولیه به سرعت پس از حفاری صورت می‌گیرد [23]. شکل (۱) موقعیت تونل را نشان می‌دهد.

و دستیابی به فایل قابل ورود به نرم‌افزار UDEC را داراست. پس از این مرحله مدل‌سازی هیدرولیکی صورت گرفته و در انتها آنالیز حساسیت رفتار هیدرولیکی توده براساس پارامترهای اصلی تداوم، بازشدگی و تغییرات جهت‌داری انجام گرفته است.

۲- حل معادلات جریان سیال در شبکه کانالی

ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار جریان درون شکستگی (کانال)، فرض صفحات موازی به عنوان دیواره‌های شکستگی است. با استفاده از این فرض و ساده‌سازی معادلات حاکم، دبی جریان عبوری از شکستگی به صورت معادلات (۱-الف) و (۱-ب) محاسبه می‌شود:

$$Q_{ij} = -\frac{wb_h^3}{12\mu} \frac{\Delta H}{\Delta l} = c_{ij} (H_i - H_j) \quad (۱-الف)$$

$$c_{ij} = \frac{wb_h^3}{12\mu l_{ij}} \quad (۱-ب)$$

در رابطه فوق H_i هد کلی در گره i ام، Q_{ij} دبی جریان عبوری از کانال (شکستگی) حدفاصل بین گره‌های i و j که جریان از i به سمت j مثبت در نظر گرفته می‌شود، c_{ij} ضریب هدایت مربوط به کانال حدفاصل گره‌های i ، j ، b_h دهانه هیدرولیک کانال، μ ویسکوزیته دینامیک سیال، l_{ij} طول کانال و w عرض کانال است که برای مدل‌های دوبعدی برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. در رابطه فوق ارتباط بین دبی جریان و دهانه کانال به صورت توان سوم (مکعب) دهانه است که این رابطه قانون کوئیک گفته می‌شود [21]. برای هر گره از شبکه کانالی رابطه تعادل جرم با در نظر گرفتن جریان ورودی به صورت مثبت و جریان خروجی به صورت منفی اعمال می‌شود. در این حالت مسئله جریان در شبکه شکستگی به صورت ماتریسی و به شکل رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$[E]\{H\} = 0 \quad (۲)$$

ماتریس ضرایب E در معادله فوق یک ماتریس متقارن است که معمولاً تحت عنوان ماتریس هدایت گره نامیده می‌شود. بردار H بیان‌کننده هد کلی در گره‌هاست. مقدار i امین درایه قطری در ماتریس E برابر با حاصل جمع هدایت همه کانال‌های متصل به گره i و مقدار درایه‌های غیرقطری ij برابر با منفی هدایت کانال حدفاصل صفر در نظر گرفته می‌شود. معادله (۲) بر اساس درجه آزادی گره‌ها گسسته‌سازی شده که در نتیجه معادله ماتریسی به فرم رابطه (۳) نوشته می‌شود [22].

شکل ۱. موقعیت تونل گردنه رخ



Fig. 1. Gardaneh rokh tunnel position

۴- سیستم درزه نگاری منطقه مورد مطالعه

درزه نگاری یکی از بخش‌های مهم در مطالعات ویژگی‌های مهندسی توده سنگ است و از مهمترین مراحل تهیه داده‌ها برای مدل‌سازی هندسی محسوب می‌شود. این عملیات شامل برداشت، تفکیک دسته درزه‌ها و تحلیل آماری است. اطلاعات جمع‌آوری شده در این مقاله در مورد کلیه ناپیوستگی‌های با مقیاس درزه با استفاده از دو روش خط برداشت و پنجره برداشت به دست آمده است. با توجه به موقعیت تونل و زمین‌شناسی منطقه مشخص شده است که تونل در یک یال چین واقع شده است. برداشت درزه‌ها در خروجی و ورودی تونل صورت گرفته است که بر مبنای شیب، امتداد و جهت شیب مشخص شد. تمرکز دسته‌ها و چگالی آن‌ها در ورودی تونل بیشتر از خروجی تونل است. برای تشخیص و تحلیل بهتر موقعیت تونل و ناپیوستگی دسته درزه‌های ورودی و خروجی به صورت مجزا تحلیل شده است. براساس تحلیل‌های انجام شده در نرم‌افزار Dips چهار دسته درزه در ورودی و خروجی تونل قابل تشخیص است. در ورودی تونل ۱۸۴ درزه برداشت شده است. با توجه به برداشت‌های میدانی درزه‌ها در بخش ورودی و خروجی تونل و تحلیل آن‌ها، روند کلی درزه‌ها تا حد زیادی مشابه بوده‌اند پس برای تحلیل هیدرولیکی، ۴۵۰ متر ورودی تونل انتخاب شد، زیرا در این متر از تونل، نشت آب به داخل تونل

به دلایلی از جمله تمرکز دسته درزه‌ها و وجود محسوس گسل بیشتر بوده است، همچنین میزان نشت در این بخش از تونل اندازه‌گیری شده و داده‌های آن موجود بوده است. تحلیل آماری انجام شده بر روی پارامترهای مختلف ناپیوستگی‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شده و توابع توزیع هر پارامتر نیز بررسی شده است. شکل (۲) موقعیت دسته درزه‌های ورودی تونل را نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌ای از فرم برداشت منطقه در جدول (۱) آمده است. لازم به ذکر است که درزه‌ها به سه گروه تقسیم شده‌اند. درزه‌هایی که هر دو انتهای آن‌ها دیده می‌شود (n)، درزه‌هایی که فقط یک انتهای آن‌ها دیده می‌شود (m) و درزه‌هایی که هیچ یک از دو انتهای آن‌ها دیده نمی‌شود (p). نوع پرشدگی درزه‌های برداشت شده بیشتر از نوع کلسیت و در برخی موارد با مواد رسی و سیلتی هستند.

شکل ۲. موقعیت دسته درزه‌های ورودی تونل

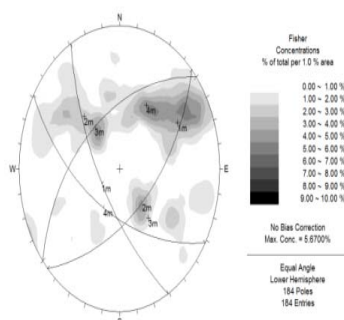


Fig. 2. Counter p lot of tunnel entrance joints

که زاویه δ برای کل درزه‌ها یکسان در نظر گرفته نمی‌شود. همان‌گونه که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، ضریب ثابت فیشر مقدار پراکندگی توزیع را نشان می‌دهد به طوریکه هر چه مقدار k بزرگتر باشد تجمع داده‌ها بیشتر و پراکندگی داده‌ها کمتر خواهد بود. این ضریب عددی بین ۷۰۰ تا ۰ بوده اما در علم مکانیک سنگ و تحلیل جهت‌داری دسته درزه‌ها معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰۰ است. با توجه به شکل عمومی تابع توزیع فیشر روش‌های تحلیلی و عددی متعددی برای تعیین مقدار k ضریب ثابت فیشر وجود دارد [24]. مدل هندسی ارایه شده با استفاده از روش دوم ساخته شده است. برای ساخت مدل شبکه درزه‌ها، اولین مرحله تعیین ابعاد مناسب مدل است. مدل ساخته شده باید در مقایسه با واقعیت دارای اعتبار کافی باشد. با توجه به طول درزه‌های برداشت شده مدلی با ابعاد $100 \times 450 \times 120$ (برحسب متر) ساخته شده که در شکل (۴) مدل ساخته شده کلی دسته درزه‌ها نشان داده شده است.

شکل ۳. تابع چگالی احتمال توزیع فیشر با مقادیر ۲۰، ۴۰، ۱۰۰ k [24]

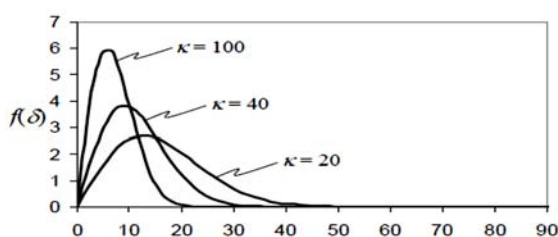


Fig.3. Probability density function of Fisher distribution

ورودی برنامه شامل مختصات منطقه مورد مطالعه و اطلاعات آماری مربوط به دسته درزه‌هاست. اطلاعات درزه‌ها شامل میانگین و انحراف معیار شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، تداوم و عدد فیشر (شاخص پراکندگی) چهار دسته درزه مربوط به تونل به برنامه داده شده و مدل سه بعدی آن‌ها ترسیم شده است. مقاطع عمودی نیز از مدل تهیه شده که در شکل (۵) مشاهده می‌شود. اطلاعات خروجی به دست آمده از این مدل‌سازی شامل بلوک‌هایی است که در اثر برخورد درزه‌ها به وجود می‌آید. این امر دید واضح‌تری از ناپیوستگی‌ها را برای تحلیل‌های هیدرولیکی و مکانیکی فراهم می‌آورد. خلاصه تحلیل آماری پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده در ۴۵۰ متر ابتدایی تونل در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱. نمونه فرم برداشت شده

Dip(degree)	Opening (mm)	Type of joint	Spacing(m)	Dip direction
65	1	m	20	300
87	1	n	32	245
40	1	n	40	10
30	2	n	48	130
38	1.5	m	54	194
20	2.5	n	62	305
84	2	m	60	348
86	1	n	110	247
52	1	p	128	220

Table 1. Sample of the collected form

۵- مدل‌سازی شبکه شکستگی‌های مجزا و ارزیابی کد 3D-DFN

با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار ممتیکا، با نام 3D-DFN درزه‌های ورودی تونل مدل‌سازی شده است. در کد تهیه شده دو حالت کلی برای مدل‌سازی تصادفی جهت‌داری (شیب و جهت شیب) درزه‌ها در نظر گرفته شده است. در حالت اول توابع توزیع شیب و جهت شیب به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود و برای ساخت هر صفحه درزه به صورت تصادفی از روی توابع توزیع عددی برای شیب و عددی برای جهت شیب لحاظ خواهد شد. ولی در روش دوم تابع توزیع همزمان این دو مولفه هندسی در قالب تابع توزیع فیشر در نظر گرفته شده است. تابع توزیع فیشر در سال ۱۹۵۳ توسط فیشر پیشنهاد شد و رایج‌ترین و مناسب‌ترین روش برای مدل کردن بردار نرمال ناپیوستگی‌ها در فضا است. این روش، توزیع زاویه‌ای جهت‌داری را بر اساس سه پارامتر توصیف می‌کند. δ ، ϕ و k که به ترتیب نشانگر میانگین شیب، جهت شیب و ضریب فیشر هستند تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت رابطه (۵) است:

$$f(\delta) = \frac{k \sin \delta e^{k \cos \delta}}{e^{k-1}} \quad 0 < \delta < \pi \quad (5)$$

در این رابطه δ مقدار انحراف زاویه‌ای از مقدار میانگین قطب فیشر بوده و k ضریب ثابت فیشر است که عددی مثبت بوده و درجه پراکندگی توزیع را نشان می‌دهد. بایست توجه داشت

شکل ۴: خروجی کل دسته درزه‌ها

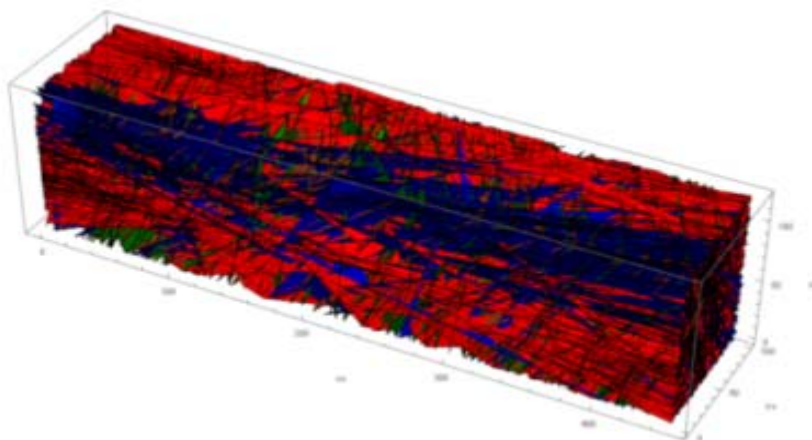


Fig. 4. Total output of joints system

جدول ۲: خلاصه مشخصات آماری پارامترهای هندسی دسته‌درزه‌های برداشت شده در ورودی تونل

Entrane joints systems				characteristics	
Joint set4	Joint set3	Joint set2	Joint set1		
26.52	14.39	23.24	31.70	Fisher Number K_f	
Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Distribution function	Trace Length (Meter)
0.050	0.018	0.012	0.045	Position function parameter (μ)	
0.76	0.88	0.82	1.05	Scale function parameter (σ)	
10.47	27.50	4.22	10.60	Mean	Orientation (Degree)
4.20	8.20	8.40	5.30	standard deviation	
Normal	Normal	Normal	Normal	Distribution function	
53.75	54.02	45.74	69.61	Mean	Dip
7.21	15.80	13.86	11.82	standard deviation	
Normal	Normal	Normal	Normal	Distribution function	
208	138	314	241	Mean	Opening (mm)
13.79	17.68	12.50	8.16	standard deviation	
Normal	Normal	Normal	Normal	Distribution function	
1.59	1.34	1.28	1.2	Mean	Spacing
0.64	0.53	0.46	0.44	standard deviation	
Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Distribution function	
0.782	0.529	0.947	0.716	Mean	
0.381	0.205	0.283	0.102	standard deviation	

Table 2. Summary of statistical characteristics of geometric parameters of tunnel Entrane joints systems

شکل ۵: مقطع عمودی کل دسته درزه‌ها

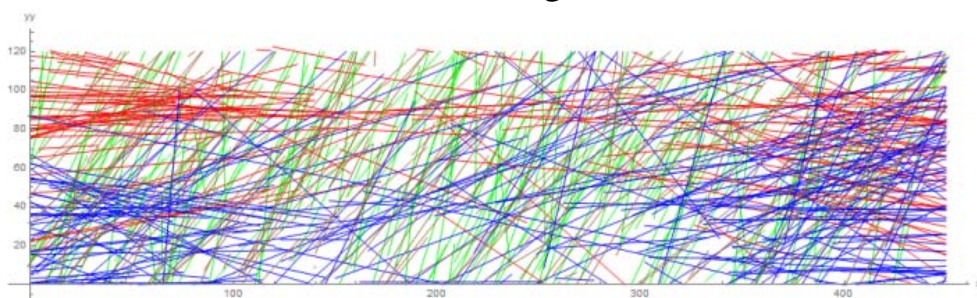


Fig. 5 Vertical section of total joints system

جدول ۳. مقایسه شدت‌های درزه‌داری برداشت شده و حاصل از مدل‌سازی

P ₃₂			P ₂₁			P ₁₀			joint
Percentage of compliance	Modeled	surveying	Percentage of compliance	Modeled	surveying	Percentage of compliance	Modeled (Out put)	Surveying (Input Data)	
96.70	0.209	0.216	93.95	0.233	0.248	89.70	0.220	0.245	1
87.84	0.253	0.288	93.69	0.223	0.238	92.42	0.500	0.541	2
98.40	0.520	0.528	89.02	0.357	0.401	75.50	0.130	0.172	3
92.30	0.181	0.196	95.52	0.192	0.201	99.34	0.153	0.154	4
87.18	0.163	1.334	89.82	1.006	1.120	95.05	0.558	0.587	total

Table 3. Comparison of the surveying joint intensity with joint intensity from modeling

توپوگرافی دبی خروجی کل برابر ۳۶۲ لیتر بر دقیقه برآورد شده است. نتایج خروجی نشان می‌دهد که در ۱۵۰ متر آخر تونل مقدار آب نفوذی به درون تونل مقادیر کمتری نسبت به ۳۰۰ متر اول را دارا است. این میزان از اختلاف به دلیل وجود تعداد گسل‌های بیشتر در محدوده ۳۰۰ متر اول است. همچنین در ۳۰۰ تا ۴۰۰ متری این منطقه وجود یک لایه رس در فاصله ۷۵ متری از سطح مشاهده شده که همین امر از دیگر عواملی است که سبب کاهش نرخ جریان در این محدوده می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که بازشدگی‌ها در نزدیک سطح زمین بیشتر است و هرچه عمق بیشتر شود میزان بازشدگی کمتر و فشار سیال افزایش می‌یابد. شکل (۶) مقطع طولی مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد.

شکل ۶. مقطع طولی تونل همراه با جریان سیال ورودی

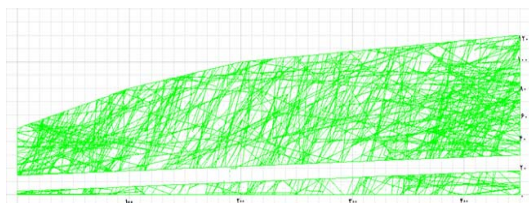


Fig. 6. Longitudinal section of tunnel with fluid flow lines

۷- آنالیز حساسیت جریان سیال نسبت به بازشدگی، طول اثر و عدد فشر

ویژگی‌های تاثیرگذار بر روند جریان آب که در این پژوهش در نظر گرفته شده است شامل بازشدگی، طول اثر (تداوم) و عدد فشر است. پس برای اطمینان از درستی برداشت‌ها و همچنین ارزیابی تاثیرپذیری نشت از تغییر در این پارامترهای سه‌گانه تحلیل حساسیت انجام شده است. اثرگذاری این پارامترها بر اساس ماکزیمم و مینیمم مقادیر برداشت شده انتخاب شده

در نهایت مقادیر شدت‌های درزه‌داری خطی، سطحی و حجمی (P₁₀، P₂₁ و P₃₂) از مقطع طولی دو بعدی تهیه شده هم‌راستا با سطوح برداشت و مدل سه بعدی محاسبه شد و با مقادیر برداشت شده واقعی مقایسه شد.

P₁₀ شامل تعداد ناپیوستگی‌ها در واحد طول برداشت است که شدت خطی را بیان می‌کند. P₂₁ شدت درزه در دو بعد به عنوان طول کلی درزه در داخل مساحت داده شده تعریف می‌شود. P₃₂ به صورت مساحت کلی سطح درزه‌ها بر واحد حجم تعریف می‌شود که در واقع پارامتر حجمی است [25]. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مقادیر در مجموع برای چهاردرسته درزه اصلی بیش از ۸۵٪ انطباق را نشان می‌دهد. بنابراین نتایج این مدل‌سازی می‌تواند به عنوان ورودی قابل اطمینان برای مدل‌سازی جریان هیدرولیک به داخل تونل مورد استفاده قرار گیرد.

۶- تحلیل هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی فقط مدل‌سازی جریانات جوی در نظر گرفته شده است. نرخ میزان بارندگی به صورت باران در یک سال پرباران به ۱۲۰ میلی‌متر و بارش برف به ۸ تا ۱۲ سانتی‌متر در یک شبانه‌روز می‌رسد.

پس از به دست آوردن نتایج خروجی مقطع طولی، تونل به همراه ناپیوستگی‌های همراه آن مدل‌سازی شد و ابعاد مدل ۲۰۰×۴۵۰ (برحسب متر) در نظر گرفته شده است. مسیر حرکت آب از بین درزه‌های باز بوده و کوتاه‌ترین مسیر برای خروج سیال از مدل توسط نرم‌افزار انتخاب می‌شود. پس از اعمال فشار آب در مختصات‌های تعریف شده در سطح

در نظر گرفته شد. با توجه به شکل (۹) با افزایش عدد فیشر مقدار جریان آب کاهش می‌یابد. هنگامی که عدد فیشر افزایش می‌یابد، پراکندگی دسته درزه‌ها کمتر شده و نرخ جریان کاهش می‌یابد. مقدار نرخ جریان در عدد فیشر ۱۰ به ۴۱۰ لیتر بر دقیقه، در عدد فیشر ۱۵ به ۳۸۲ لیتر بر دقیقه، در عدد فیشر ۲۰ به ۳۳۸ و در عدد فیشر ۲۵ به ۲۹۰ لیتر بر دقیقه کاهش می‌یابد.

شکل ۹. تاثیر عدد فیشر بر جریان ورودی به تونل

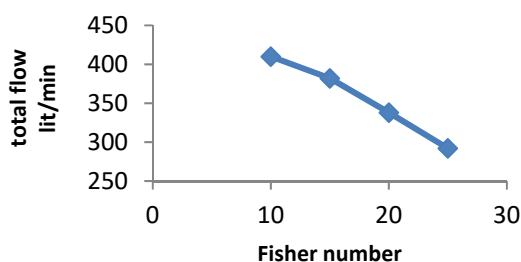


Fig. 9. effects of Fisher number on input flow to the tunnel

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی روند نشت آب در تونل با استفاده از روش شبکه شکستگی مجزا انجام شده است. بدین منظور کد محاسباتی 3D-DFN در محیط متمتیکا برای ساخت شبکه شکستگی مجزا توسعه داده شده است. ابتدا فرآیند مدل‌سازی هندسه ناپیوستگی‌ها توسط کد محاسباتی مذکور انجام شده و سپس حل معادلات جریان سیال در شبکه با استفاده از روش المان محدود صورت گرفته است. داده‌های میدانی برداشت شده مربوط به هندسه ناپیوستگی‌ها به دلیل عدم دسترسی کافی به تمام سطح تونل، بر اساس برداشت‌های سطحی انجام شد. روند جریان سیال در تونل به صورت عمده از طریق ناپیوستگی‌های متصل به هم کنترل می‌شود که در نتیجه برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ باید از روش ناپیوسته استفاده کرد. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده در تحلیل جریان سیال با استفاده از کد محاسباتی 3D-DFN نتایج زیر ارائه شده است:

روش شبکه شکستگی مجزا برای تحلیل هیدرولیکی در حالت ناپیوسته قابل استفاده است. نکته مهم در مدل‌سازی هندسه ناپیوستگی‌ها دستیابی به مدل واقعی‌تر از منطقه و برآورد

است. همچنین لازم به ذکر است که این مقادیر برای هر چهار دسته درزه یکسان تعریف شده است.

۷-۱ نقش بازشدگی درزه بر روند جریان هیدرولیکی

برای بررسی این پارامتر مقدار بازشدگی به $1/2$ ، $3/7$ و 5 میلی‌متر تغییر داده شد. نتایج این تغییر در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار مشخص است با افزایش میزان بازشدگی به 5 میلی‌متر نرخ آب ورودی به تونل به 530 لیتر بر دقیقه می‌رسد. این میزان در بازشدگی $1/2$ میلی‌متر به 172 لیتر بر دقیقه کاهش می‌یابد.

شکل ۷. تاثیر بازشدگی بر جریان ورودی به تونل

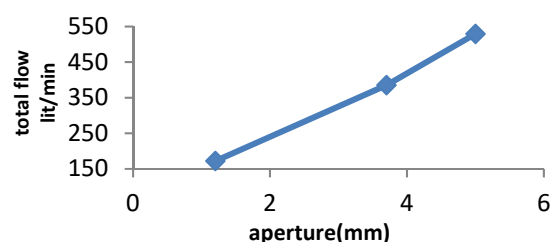


Fig. 7. effects of aperture change in joints on input flow of tunnel

۷-۲ نقش تداوم درزه بر روند جریان هیدرولیکی

برای بررسی این پارامتر نرخ تداوم به مقدار 10 و 22 و 27 تغییر یافت. نتایج این تغییر در شکل (۸) نشان داده شده است. در نتیجه این بررسی نرخ جریان در تداوم 27 متر به 523 لیتر بر دقیقه، در تداوم 22 متر به 488 لیتر بر دقیقه و در تداوم 10 متر به 354 لیتر بر دقیقه کاهش می‌یابد.

شکل ۸. تاثیر تداوم بر جریان ورودی به تونل

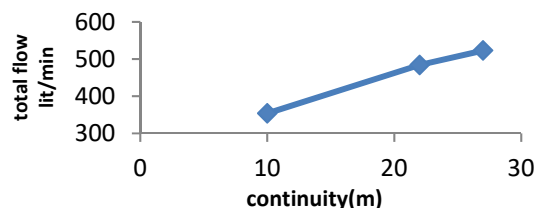


Fig.8. continuity(trace length) effects on input flow of tunnel

۷-۳ نقش عدد فیشر بر روند جریان هیدرولیکی

همان‌گونه که اشاره شد، ثابت فیشر معیاری برای بیان پراکندگی جهت‌داری سطوح درزه‌های موجود در یک دسته درزه است. برای تعیین اثر این پارامتر مقدار عدد فیشر 10 ، 15 ، 20 و 25

- through fractured rocks, *Hydrogeol*", J., 13, pp. 124-147.
- [4] Snow, D. T., 1969. "Anisotropic permeability of fractured media", *Water Resour. Res.* 5(6), 1273-1289.
- [5] Zhou, Q., Salve, R., Liu, H., Wang, J. S. Y., Hudson, D., 2006. "Analysis of a mesoscale infiltration and water seepage test in unsaturated fractured rock: Spatial variabilities and discrete fracture patterns", *Journal of Contaminant Hydrology*, 87, 96-122.
- [6] Xu, C., Dowd, P. A., Mardia, K. V., Fowell, R. J., 2006. "A Connectivity Index for Discrete Fracture Networks", *Mathematical Geology*, 38(5), 611-634.
- [7] Gahrue bajgirani F., Emami Meybodi E., Mehrnahad H., 2018, "Geometric Modeling of Joints in 3D Discrete Fracture Network (Case Study: Liroo Dam construction site)", *Scientific quarterly journal of Iranian association of engineering geology*, Volume 11, Issue 3, pages 29-46. , (In Persian).
- [8] Adler, P., Thovert, J., 1999. "Fractures and fracture network.", Kluwer academic Publisher, Dordrecht. 428 P.
- [9] Priest S D., 2012, "Discontinuity analysis for rock engineering", Springer Science & Business Media; Dec 6.
- [10] De Dreuzy J R, Mèheust Y, and Pichot G., 2012 "Influence of fracture scale heterogeneity on the flow properties of three-dimensional discrete fracture networks (DFN)", *J. Geophys. Resid. Sol. Earth*, 117, B11207.
- [11] Painter S, and Cvetkovic V., 2005, "Upscaling discrete fracture network simulations: An alternative to continuum transport models", *Water Resour. Res.*, 41, W02002.
- [12] Veneziano, D., 1978, "Probabilistic models of joints in rock. Research report", Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [13] Hudson, J. A., & LaPointe, P. R., 1980, "Printed Circuits for Studying Rock Mass Permeability," *International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts*, Technical Note, 17(5), 297-301, 1980.
- [14] Zhang. F., Zhou. Z., Huang. Y, and. Chen. Z, 2004, "Determining the permeability of خواص مناسب هندسه شکستگی هاست. با استفاده از کد محاسباتی 3D-DFN شکل های کاملاً ناشناخته (بی شکل) برای بلوک ها در نظر گرفته می شود. این امر در حالی است که استفاده مستقیم از نرم افزار UDEC اشکال منتظمی را برای ناپیوستگی ها در نظر می گیرد که می تواند نتایج به دست آمده را از واقعیت دور نماید.
- در نرم افزار UDEC روش کلی که به صورت پیش فرض برای تمام پارامترهای هندسی در نظر می گیرد تابع توزیع یکنواخت است. با توجه به ویژگی های آماری ناپیوستگی ها فرض ذکر شده در نرم افزار با واقعیت موجود در طبیعت تشابهی ندارد.
- مدل سازی هیدرولیکی انجام شده به صورت مستقیم با استفاده از نرم افزار UDEC دبی را ۲۵۰ لیتر در دقیقه محاسبه می کند، این میزان دبی با استفاده از کد محاسباتی 3D-DFN به ۳۶۲ لیتر بر دقیقه می رسد. با توجه به دبی گزارش شده در منطقه که ۳۷۵ لیتر بر دقیقه است، نشان می دهد که استفاده از روش شبکه شکستگی مجزا می تواند نتایج به دست آمده را تا درصد بالایی با واقعیت تطابق دهد.
- با توجه به قابلیت های ذکر شده از کد 3D-DFN می توان از آن برای تعریف دقیق تر هندسه ناپیوستگی ها استفاده کرد و پس از اعتبارسنجی نتایج، خروجی آن را می توان با اطمینان در نرم افزار استفاده نمود. در مجموع هدف از این مقاله بومی سازی مدل سازی هندسی از برداشت های انجام شده، رفع محدودیت های نرم افزارهای عددی مانند UDEC و عدم وابستگی به شرایط اولیه تعریف شده در این نرم افزارها بوده است.

۹- منابع

- [1] Rapantova, N., Grmela, A., Vojtec, D., Halir, J., Michalek, B., 2007, "Ground Water Flow Modelling Applications in Mining Hydrogeology", *Mine Water Environ.*, 26, 264-270.
- [2] Eaton, T., T., 2006. "On the importance of geological heterogeneity for flow simulation", *Sedimentary Geology*, 184, 187-201.
- [3] Neuman S P. Trends, 2005, "prospects and challenges in quantifying flow and transport

- [21] Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K., Gale, J.E., 1980, "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture", *Water Resources Research* 16(6), 1016-1024.
- [22] Rouleau, A., Gale, J.E., 1987. "Stochastic Discrete Fracture Simulation of Groundwater Flow into an Underground Excavation in Granite"., *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 24 (2), 99-112.
- [23] Barinde Consulting Engineers, 1385, "Second Phase Studies at the Tunnel of Gardaneh Rokh Tunnel", Road and Transportation Directorate of Chaharmahal & Bakhtiari Province, (In Persion).
- [24] Fisher, R. A., 1953, "Dispersion on a sphere" *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 217: 295-305.
- [25] Dershowitz, W. S., Herda, H. H. 1992. "Interpretation of fracture spacing and intensity". In: *Proceedings of 33rd US Symposium on Rock Mechanics*. Rotterdam: Balkema; p. 757-766.
- fractured rocks based on joint mapping," *Ground Water*, vol. 42, no. 4, p. 509.
- [15] Indraratna, B., Ranjith, P. G., & Gale, W. (1999). Single Phase Water Flow Through Rock Fractures. *Geotechnical & Geological Engineering*, 17(3-4), 211-240. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008922417511>.
- [16] Gattinoni, P., Scesi, L., & Terrana, S. 2009. "Water Flow in Fractured Rock Masses: Numerical Modeling for Tunnel Inflow Assessment", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. 468). Bibliographic Code: 2009EGUGA..11..468G.
- [17] Ren, F. Ma, G., Fan, L., Wang, Y., Zhu, H., 2017. "Equivalent discrete fracture networks for modelling fluid flow in highly fractured rock mass", *International Journal of Engineering Geology*. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.09.013
- [18] Sharifzadeh. M., Kargar. S., Torabi. A., 1385, "Hydraulic-mechanical analysis of masses around the tunnel using a separate element method", *Seventh Iranian Tunnel Conference*, Tehran, Iran Tunnel Association, sharif university, (In Persion).
- [19] Javadi Stahbani. M., Sharifzadeh. M., 1393, "Modeling fluid flow in a discontinuous medium using a separate fracture network", *Sharif Civil Engineering Journal*, Volume 2-20, number 3, page 107-116, (In Persion).
- [20] Mohagerani, S., Jalali, M., Torabi, R., Frohandeh, F. 2017a. "Application of an Optimal Meshing Method for Analyzing Flow Flow in a Separate Fraction Network Three-dimensional", 2nd. International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Design 31 Aug., Kasem Bundit University, Bangkok, Thailand.

Investigation of the process of water leakage using discrete fracture network method Case Study: (Gardaneh rokh tunnel)

¹Elham Malekipoor, ^{2*} Enayat Allah Emami, ³ Mohamadreza Moshrefyfar⁴, Rassoul Ajalloeian⁵

1: Yazd university, Masters student, Faculty of Science, Department of Geology

2: Yazd university, Assistant Professor, Faculty of Science, Geology Group

3: Yazd university, Assistant Professor, Faculty of Science Geology Group

4: Esfahan university, Professor, Faculty of Science, Department of Geology

Abstract

Undoubtedly, fluid flow modeling plays an important role in underground structures studies. In many cases, the main system for fluid flow in rock mass is the fractures network. Because of that the measurement of the geometric properties of the discontinuities is a time-consuming process and for some properties like persistence is impossible, the use of stochastic modeling for rock mass is suggested. Uncertainty about the geometric properties of discontinuities has led to use of statistical analysis for more accurately define geometric features. Because of intrinsic statistical nature of the geometric features of discontinuities, a more precise model can be obtained from the development of stochastic three-dimensional geometric models of discontinuities. The most important step in rock mass modeling is the exact definition of the discontinuity network. This makes it possible to provide a better starting point for numerical modeling in mechanical and hydraulic analysis. The Gardaneh-Rokh tunnel with a length of 1300 meters and a maximum volume of 200 meters is located in Chaharmahal Bakhtiary province. The purpose of this study was to investigate the water leakage from joints and fractures in the tunnel and the effect of surface water in the amount of water leakage into the tunnel using analytical and numerical methods. This modeling has been done to increase the understanding of the hydraulic behavior of the massive discontinuity system. In this study, the fractures connected to each other as the main paths of water flow into the tunnel and the control of the hydraulic behavior of the mass are assumed, and the roughness of the joints is neglected. To this paper, joint sets in Gardaneh Rokh tunnel was modeled using the 3D-DFN code written in the Mathematica software, after validation of the surveyed and modeled values, it was observed that the percentage of conformance is above 85%. This has led to the use of model outputs with confidence in the hydraulic modeling of the tunnel. This paper is designed with the aim of two-dimensional hydraulic modeling in the UDEC software environment. The modeling fluid is considered as monophasic, and discontinuities are modeled as two-dimensional. Hydraulic modeling is done by calling the joints from the 3D-DFN program output. Comparison of the obtained results shows good matching between the flow rate in the model with the actual flow rate. The resulting total flow rate is estimated to be 362 liters per minute, which is actually set at 375 liters per minute, which is a good match. Also, the sensitivity analysis of fluid flow has been investigated with respect to the maximum and minimum values of apertures, continuity (trace length) and Fisher numbers. With an opening of 5 mm, the water rate to the tunnel will reach 530 liters per minute. This rate is reduced to 172 liters per minute at opening of 1.2mm. The flow rate arrives in continuity of 27 meters to 523 liters per minute, in a trace length of 22 meters to 488 liters per minute and in trace length of 10 meters to 354 liters per minute. The flow rate in Fisher's number is reduced to 410 liters per minute and in Fisher's number 25 to 290 liters per minute.

Key words: UDEC, Fluid flow modeling, 3D-DFN Code, Gardaneh rokx tunnel