



تعیین تانسور هدایت هیدرولیکی توده سنگ ناهمسانگرد مغار سد رودبار لرستان

سجاد علیزاده کاکلر^۱، فرامرز دولتی ارده جانی^{*۲}

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران
۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

(دریافت ۱۳۹۷/۰۹/۰۷، پذیرش ۱۳۹۸/۰۲/۱۳)

چکیده

مغار به عنوان فضای زیرزمینی برای ذخیره‌سازی پسماندهای شیمیایی، رادیواکتیو، هیدروکربن‌ها و همچنین جانمای نیروگاه‌های برق آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساخت مغار دارای پیچیدگی‌های خاصی است و یکی از مهم‌ترین مشکلات مربوط به آن، نشت آب است. شبیه‌سازی نشت به این فضاها و تخمین دقیق مقدار آن به ارزیابی دقیق خواص فیزیکی منطقه به ویژه ضریب هدایت هیدرولیکی بستگی دارد. با وجود ناهمسانگردی توده سنگ‌های شکسته، در اغلب مطالعات از فرض ضریب هدایت هیدرولیکی همسانگرد استفاده می‌شود. در این مطالعه، هدف بررسی میزان ناهمسانگردی ضرایب هدایت هیدرولیکی با استفاده از مطالعه موردی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد رودبار لرستان است. برای این منظور، از مدل‌سازی سه‌بعدی شبکه شکستگی‌های گسسته برای محاسبه مقدار نشت استفاده شده است. مطالعه آماری بر روی داده‌های شیب و جهت شیب درزه‌ها، مشخص کرد که منطبق‌ترین توزیع آماری متناسب با آن‌ها توزیع توانی است. پارامتر آزمون واتسون- ویلیامز برای شیب و جهت شیب شبکه شکستگی‌های مدل شده به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۲۷ برآورد و در نتیجه مدل اعتبارسنجی شد. با بررسی اندازه المان نماینده به ابعاد ۱ تا ۱۲ متر، اندازه مناسب برای آن ۷ متر تعیین شده است. استخراج مولفه‌های تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد که ناهمسانگردی هیدرولیکی توده سنگ که ناشی از شکستگی‌های آن است، ممکن است منجر به تفاوت بیش از ۷ برابری ضریب هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف شود.

کلمات کلیدی

تانسور هدایت هیدرولیکی، توده سنگ ناهمسانگرد، مغار، توده سنگ شکسته.

۱- مقدمه

با پیشرفت جوامع بشری و افزایش جمعیت، در دهه‌های اخیر استفاده از فضاهاى زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. طراحی ایمن و اقتصادی فضاهاى زیرزمینی بسیار پیچیده و نیازمند به کارگیری دانش‌های مختلف مانند مکانیک سنگ، زمین‌شناسی، اقتصاد و آمار است. یکی از موارد مهم در ساخت این فضاها وجود آب زیرزمینی است. وجود آب زیرزمینی و نشت آن به داخل فضاهاى ساخته شده در اعماق زمین باعث آسیب رساندن به این فضاها و تاسیسات ساخته شده در آن می‌شود. لزوم پیشگیری از ورود آب به فضاهاى زیرزمینی باعث شده است که بخش مهمی از تحقیقات مربوط به این فضاها به نشت آب به آن‌ها اختصاص یابد.

در بسیاری از پروژه‌ها، مدل آبی زمین‌شناسی ساخته شده غیرقابل اعتماد است [۱] زیرا مسایل آب‌زمین‌شناسی، در عمل ناهمسانگرد و ناهمگن‌اند و این در حالی است که این فرض به دلیل سختی کار و نبود داده‌های کافی اعمال نمی‌شود. همچنین به دلیل هزینه‌های بالای حفاری، در اغلب مطالعات مربوط به برآورد مقدار هدایت هیدرولیکی، از تعداد گمانه‌های کمی استفاده می‌شود.

پارامتر هیدرولیکی مهم در تجزیه و تحلیل جریان آب از شکستگی، هدایت هیدرولیکی است [۲]. اغلب در مطالعات مختلف برای محاسبه نفوذپذیری محیط با استفاده از آزمون برجا و یا شبیه‌سازی، توده سنگ را همسانگرد در نظر می‌گیرند [۱]. در یکی از این مطالعات، با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی و قانون دارسی، هدایت هیدرولیکی همسانگرد مربوط به مخزن بالادست مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد پوشیه چین را تعیین کردند [۳]. آن‌ها از هدایت هیدرولیکی به دست آمده برای محاسبه مقدار نشت و طراحی پرده آب‌بند استفاده کردند. لین و همکاران به بررسی مقادیر هدایت هیدرولیکی تحت تاثیر توزیع تنش پرداختند [۴]. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار UDEC و معرفی یک رابطه هذلولی بین تنش قائم و مقدار بسته شدن شکستگی‌ها، مقادیر هدایت هیدرولیکی ناهمسانگرد دوبعدی را محاسبه کردند. سان و همکاران با تقسیم یک منطقه به ۴ قطعه افقی، اثر هدایت هیدرولیکی ناهمگن بر نشت را مورد مطالعه قرار دادند [۵]. آن‌ها برای محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی هر قطعه از روش اودا استفاده کرده و در نهایت به این نتیجه رسیدند که با دقت مناسبی می‌توان منطقه مورد نظر را به صورت همگن در نظر گرفت.

استفاده از شبکه‌های عصبی یکی از راه‌های موثر در تخمین مقادیر هدایت هیدرولیکی است. پینگ و همکاران با استفاده از داده‌های شش گمانه موجود و به کارگیری روش شبکه‌های عصبی، مقادیر هدایت هیدرولیکی دوبعدی را به سه‌بعد توسعه دادند [۶]. همچنین ژو به بررسی مقادیر هدایت هیدرولیکی در سه مرحله پیش، هنگام و پس از اتمام پروژه حفاری مغار سنگی همسانگرد پرداخت. او با استفاده از یک روش نیمه تحلیلی، داده‌های برداشت شده از منطقه و روش شبکه عصبی مقدار نشت آب به مغار را با دقت محاسبه کرد [۷].

یکی از کاربردهای مهم مغارها استفاده از آن‌ها برای مخازن نفتی است. یو و همکاران از داده‌های ۴ گمانه حفاری شده در یک مغار ذخیره‌سازی آب‌بندی شده نفت در چین، برای مدلسازی سه‌بعدی محیط با نرم‌افزار 3DEC استفاده کردند [۸]. ژو و همکاران از روش محاسبات برگشتی و اندازه‌گیری مقدار نشت به مغار، مقادیر هدایت هیدرولیکی را تعیین کردند [۹]. چن و همکاران به مدلسازی محیط پیوسته با استفاده از داده‌های برداشت شده از منطقه پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی مناطق آسیب دیده ناشی از حفاری و تغییرات هدایت هیدرولیکی در اطراف مغار برق آبی پرداختند [۱۰].

در ادامه، هوانگ و همکاران به بررسی تاثیر ساختار توده سنگ و فشار آب بر هدایت هیدرولیکی توده سنگ در حفاری‌های زیرزمینی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقادیر هدایت هیدرولیکی همسانگرد به شدت به توزیع فشار منفذی، آهنگ ورودی آب زیرزمینی و ساختار سنگ وابسته است [۱۱]. اوجه با آزمایش طیف گسترده‌ای از انواع سنگ‌ها و شرایط انسداد آن‌ها، روابطی را ارائه کرد که با استفاده از آن می‌توان در صورت مشخص بودن مقادیر RQD^۱، مقدار نفوذپذیری را در سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی تعیین کرد. او همچنین نتیجه گرفت که هدایت هیدرولیکی در توده‌های سنگی دارای پیچیدگی‌های زیادی است و از این رو انجام آزمایشات برجا بسیار با اهمیت است [۱۲]. ملکی با استفاده از روش تحلیلی آهنگ نشت آب زیرزمینی (GSR) و بر اساس ویژگی‌های درزه‌ها و پارامترهای شکستگی و هیدرولیکی (به صورت همسانگرد) به بررسی میزان جریان آب به تونل پرداخت. در این روش، مقدار جریان آب با استفاده از سطح درزه‌های موجود در توده سنگ نسبت به سطح داخلی خود تونل تخمین زده می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، دقت این روش در مقایسه با روش‌های تجربی مطلوب است [۱۳].

و در نتیجه میزان نفوذپذیری نیز کمتر خواهد بود [۱۴].

۲-۲- محیط‌های ناپیوسته

محیط‌های ناپیوسته خود به دو زیرگروه محیط ناپیوسته با شبکه شکستگی منظم و محیط ناپیوسته با شبکه شکستگی نامنظم تقسیم می‌شوند.

۲-۲-۱- محیط با شبکه شکستگی منظم

این نوع محیط دارای دسته شکستگی‌های موازی نامحدود و اساس اغلب روش‌های تحلیلی است.

۲-۲-۲- محیط با شبکه شکستگی نامنظم

این نوع محیط‌ها نسبت به محیط با شبکه شکستگی منظم عمومیت بیشتری دارند و به واقعیت شبکه شکستگی‌های موجود در طبیعت نزدیک‌تر است. این محیط، شبکه شکستگی را مجموعه‌ای از تمام شکستگی‌ها با طول محدود و نامحدود و با حالات موازی یا غیرموازی در نظر می‌گیرد [۱۵].

شبکه شکستگی‌ها ساختار پیچیده‌ای دارند و ساخت مدل‌های معین و کلی برای آن‌ها به آسانی امکان‌پذیر نیست. اغلب مدل‌هایی که برای توصیف شبکه شکستگی‌ها به کار می‌روند دارای نقص‌های عمومی‌اند. مهم‌ترین این نقص‌ها فرض طول نامحدود برای تمامی شکستگی‌ها و موازی بودن آن‌ها است [۱۴، ۱۶]. این دو فرض باعث عدم انطباق این مدل‌ها با شبکه شکستگی‌های موجود در طبیعت می‌شود، بنابراین مدل شبکه شکستگی گسسته که اجازه ورود شکستگی با طول محدود را نیز می‌دهد انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارد. همچنین، مدل شبکه شکستگی مجزا، مفیدترین روش برای مطالعات جریان در توده سنگ شکسته است که تعیین مدل پیوسته برای آن‌ها مشکل است [۱۷]. نخستین مدلسازی دوبعدی شبکه شکستگی مجزا حدود سی سال پیش توسط لانگ و همکارانش [۱۸] انجام شد. بهینه‌سازی و توسعه این مدل‌ها تا به امروز نیز ادامه داشته است.

۳- معادلات حاکم بر نشت

۳-۱- تئوری بیوت

بر اساس تئوری بیوت، ارتباط بین فشار هیدرولیکی P و ضریب هدایت هیدرولیکی K_{ij} به شکل رابطه ۱ است [۱۹]:

با مروری بر تحقیقات انجام شده می‌توان بیان داشت که با وجود مطالعات گسترده در ارتباط با هدایت هیدرولیکی توده سنگ شکسته، هنوز موضوع ناهمسانگردی در آن به خوبی تفهیم نشده است و به نظر می‌رسد که نتایج حاصل تقریبی است. در این تحقیق، هدف به دست آوردن مقادیر تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی و بررسی میزان ناهمسانگردی شکستگی‌های موجود در سنگ با استفاده از این ضرایب در منطقه مورد مطالعه است. این مطالعه موردی می‌تواند میزان انطباق فرض همسانگردی توده سنگ شکسته در مطالعات نشت را با واقعیت ارزیابی کند. به این منظور، از مفهوم شبکه شکستگی‌های مجزا و نرم‌افزار 3DEC در محاسبه مقدار نشت آب از توده سنگ استفاده می‌شود. همچنین، در ساخت و صحت‌سنجی مدل شبکه شکستگی مجزا توزیع‌های آماری و آزمون واتسون- ویلیامز مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با مدلسازی بلوک اندازه المان نماینده با اندازه‌های مختلف و محاسبه مقدار نشت، اندازه مناسب المان نماینده تعیین شد. اعمال هد فشاری در سه راستای x ، y و z به مدل REV باعث به دست آمدن مقادیر نشت می‌شود. با استفاده از مقدار نشت می‌توان سرعت جریان را به دست آورد. در نهایت، از مقادیر سرعت به دست آمده تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی با استفاده از روابط میان مولفه‌ها حاصل شد.

۲- انواع محیط نشت

تاکنون طبقه‌بندی‌های متفاوتی از دیدگاه‌های مختلف برای محیط‌های انتقال‌دهنده سیال در زمین و توده سنگ‌ها ارائه شده است. شاید بتوان گفت کاربردترین و عمومی‌ترین طبقه‌بندی، تقسیم این محیط‌ها به دو دسته پیوسته و ناپیوسته است.

۲-۱- محیط‌های پیوسته

محیط پیوسته به محیطی گفته می‌شود که تقریباً فاقد درز و شکاف باشد و انتقال سیال با استفاده از تخلخل موثر اولیه انجام گیرد. اغلب خاک‌ها و توده‌های متخلخل مثال‌هایی از این دسته محیط‌اند. در محیط پیوسته، نفوذپذیری به شکل، ابعاد، نوع دانه‌بندی و نحوه قرارگیری ذرات نسبت به هم بستگی دارد. هر چه فضاهای خالی موجود، بیشتر به هم مرتبط باشند نفوذپذیری بیشتر می‌شود. همچنین در این نوع محیط، هر چه دانه‌ها ریزتر باشند، عموماً اندازه متوسط حفره‌ها کوچکتر است

بستگی داشته و در عمل مقدار پیش فرض آن ۱/۱۲ است. هدایت هیدرولیکی معادل یک تک شکستگی با صفحات موازی و میزان بازشدگی t به شکل رابطه ۵ قابل بیان است [۲۱]:

$$K = \frac{\rho_w g t^2}{12\mu} \quad (5)$$

که در آن:

ρ_w : چگالی آب است.

۴- زمین شناسی منطقه

ساختگاه مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان بر روی رودخانه رودبار، در کوه‌های زاگرس استان لرستان در حدود ۱۵۰ کیلومتری غرب اصفهان و ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهر الیگودرز قرار دارد (شکل ۱). طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان در زیر پهنه زاگرس مرتفع واقع شده است. با توجه به ویژگی‌های ساختاری معرفی شده برای این پهنه، مشاهده گسل به ویژه از نوع راندگی، حذف یا تکرار سازندهای مختلف، ایجاد شرایط توپوگرافی خشن (دره‌های باریک و مرتفع)، خردشدگی و ناپایداری در محل سازندهای سخت و مقاوم و نیز تشکیل تاقدیس و ناودیس‌های مکرر در سازندهای نرم‌تر در این ناحیه امری بدیهی است [۲۲].

با توجه به این موضوع و از طرفی رویکرد ساده‌سازی (تا حد امکان) در مطالعات مرحله دوم طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان تلاش شد تا با تکیه بر زمین‌شناسی ساختاری موجود و از طرفی افزایش دقت شرایط چینه‌شناسی و مشاوره با اساتید و کارشناسان ذیصلاح، مدل کلی ساختار این محل تهیه شود. بر این اساس، مدل کلی گستره طرح متشکل از یک ناودیس کلی، روراندگی مختلف و تاقدیس و ناودیس‌های متعدد (با راستای شمال‌غرب- جنوب‌شرق) به ویژه در قسمت‌های سطحی و نزدیک به هسته ناودیس و در سازندهای نرم و فرسایش‌پذیر خانه‌کت و گرو است (شکل ۲).

با توجه به اهمیت شناخت ناپیوستگی‌های موجود در محدوده طرح، اطلاعات درزه‌نگاری حاصل از گمانه‌های اکتشافی شامل شکل، سطح، زبری، پرشدگی، هوازدگی و بازشدگی مورد توجه قرار گرفته است. مطابق با جدول ۱، سطح درزه‌ها اغلب نامنظم و درزه‌های یکسان دارای فراوانی کمتری است. زبری درزه‌ها به عنوان یک پارامتر در مقاومت برشی سطح ناپیوستگی اهمیت دارد. با توجه به نتایج آماری، در حدود ۷۰ درصد سطوح درزه‌ها زبر و مابقی دارای سطوح صاف و برخی خشن لغزنده‌اند.

$$K_{ij} \nabla^2 P = 0 \quad (1)$$

که در آن، K_{ij} تانسور متقارن ضرایب هدایت هیدرولیکی با شش مولفه مستقل و به صورت رابطه ۲ قابل نمایش است:

$$[K_{ij}] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

اندیس اول مولفه‌های تانسور هدایت هیدرولیکی نشان‌دهنده راستای هد فشاری و اندیس دوم مربوط به راستای نشت است. به عنوان مثال، مولفه K_{xy} بیانگر هدایت هیدرولیکی در راستای y ناشی از وجود هد فشاری در راستای x است.

۳-۲- تئوری اودا

یک بلوک توده‌سنگ متخلخل با فرض خواص همگن و ناهمسانگرد و جریان آب آرام از قانون دارسی تبعیت می‌کند (رابطه ۳) [۲۰]:

$$v_i = -K_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (3)$$

که در آن:

v_i : سرعت ظاهری

ϕ : مجموع هد هیدرولیکی

n : طول شکستگی

t : مقدار بازشدگی آن در زمان t است.

مولفه‌های تانسور هدایت هیدرولیکی K_{ij} می‌تواند تابعی از جهت‌گیری شکستگی باشد.

اودا در سال ۱۹۸۵ با لحاظ فرضیات هر شکستگی به صورت صفحات موازی با بازشدگی ثابت t ، نفوذناپذیری ماتریکس، توزیع یکنواخت گرادیان هیدرولیک در توده سنگ و جریان آرام در شکستگی‌ها، رابطه ۴ را برای تعیین مولفه‌های هدایت هیدرولیکی ارائه داد [۲۰]:

$$K_{ij} = \lambda \frac{g}{\mu} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (4)$$

که در آن:

g : شتاب گرانش

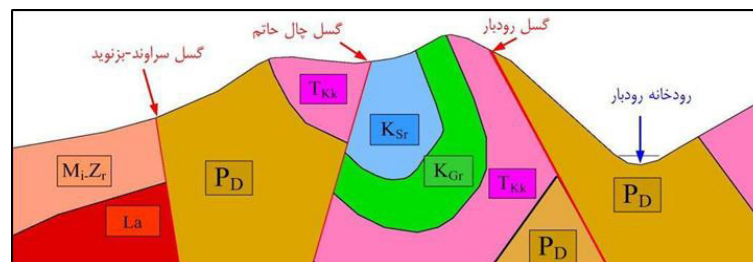
μ : ویسکوزیته سینماتیک

P_{ij} : فشار هیدرولیک

λ : اسکالر بدون بعدی است که به میزان اتصال بین درزه‌ها



شکل ۱: موقعیت طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد رودبار لرستان [۲۲]



شکل ۲: مدل ساختاری کلی در راستای جنوب غرب- شمال شرق گستره طرح [۲۲]

جدول ۱: مشخصات ناپیوستگی‌های برداشت شده در گمانه‌های گالری اکتشافی مغار نیروگاه [۲۲]

گمانه	عمق (متر)	شکل			زبری			پرشدگی				هوازدگی			بازشدگی (متر)		
		نامنظم	موجدار	مستوی	صاف	زبر	خشن لغزه	لوم	کلیتیت	پتروپتین	پتروپتین-کلیتیت	تازه	خیلی کم	متوسط	۰-۰.۵	۰.۵-۲.۵	۲.۵-۱۰
BH-232	۶۰	۶۷	۱۵	۱۸	۱۹	۷۸	۴	۰	۳۷	۳۷	۲۶	۳۷	۹۳	۰	۳۷	۶۳	۰
BH-233	۶۰	۶۹	۱۰	۲۱	۲۷	۶۷	۶	۰	۳۷	۳۷	۵۲	۱۲	۷۵	۰	۲۵	۲۹	۰
BH-234	۵۰	۸۱	۶	۱۳	۲۱	۷۷	۲	۰	۶۳	۶۳	۱۷	۱۹	۶۵	۱۷	۱۷	۲۳	۱۷
BH-235	۱۰۰	۸۱	۵	۱۴	۲۴	۷۶	۰	۰	۳۶	۳۶	۵۰	۱۴	۴۵	۱۹	۳۶	۲۱	۷
D-1	۶۱/۵	۶۹	۸	۲۳	۳۴	۶۰	۶	۰	۳۵	۳۵	۲۳	۴۲	۷۱	۰	۴۸	۱۳	۳
D-2	۵۰	۸۱	۳	۱۶	۱۹	۸۱	۰	۰	۶۸	۶۸	۱۶	۱۶	۵۲	۰	۴۸	۱۰	۰
D-3	۵۰	۴۷	۱۷	۳۷	۵۱	۳۹	۱۰	۰	۵۲	۵۲	۱۹	۲۹	۴۳	۱۸	۳۹	۳۳	۱۷
HF-1	۱۰۰	۹۶	۱	۳	۲۴	۷۴	۲	۰	۵۸	۵۸	۱۸	۲۴	۷۵	۹	۱۶	۱۸	۲
HF-2	۴۶/۶	۸۹	۱۱	۰	۷	۸۵	۷	۰	۷۸	۷۸	۱۵	۷	۳۰	۳۳	۳۰	۳۳	۲۲
RG-1	۷۵	۸۹	۶	۵	۲۳	۷۴	۳	۰	۵۰	۵۰	۳۸	۱۲	۶۲	۸	۶۲	۱۷	۰

احتمال وجود این مقادیر را با هم مقایسه می‌کند. توابع توزیع احتمال برای هر جامعه‌ای (مانند جامعه شکستگی‌های یک سنگ) جزو مشخصات ذاتی آن محسوب می‌شود. در شناخت ویژگی‌های جوامع مورد بررسی، سعی می‌شود کمیت مورد نظر آن چنان از تابع توزیع احتمال به دست آید که تا حد ممکن مشابه با تابع توزیع احتمال واقعی یا ذاتی مجموعه کل نمونه برداری باشد.

۵-۲- تحلیل آماری داده‌های درزه نگاری

از ساختگاه مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد رودبار لرستان ۱۵۷ داده درزه‌نگاری برداشت شده است. از بین این تعداد، ۴۵ داده مربوط به لایه‌بندی منطقه است و ۱۱۲ داده باقیمانده مربوط به دسته درزه‌های مختلفی است که بر مبنای شیب به دو دسته شبه عمودی (درزه‌هایی که دارای شیب بالای ۴۵ درجه) و شبه افقی (درزه‌های با شیب کمتر از ۴۵) تقسیم‌بندی شده‌اند. طول خط برداشت در حدود ۶۰ متر است. بعد از تحلیل فراوانی داده‌ها به کمک نرم‌افزار Dips، در درزه‌های شبه افقی دو دسته درزه و در درزه‌های شبه عمودی سه دسته درزه مشاهده می‌شود. این ۵ دسته درزه به همراه یک دسته درزه لایه‌بندی، تشکیل شش دسته درزه برداشت شده در طول مغار را می‌دهد که شیب و جهت شیب آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، نمودارهای منحنی تراز دسته درزه‌های برداشت شده در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های آماری دسته درزه‌های حاصل از نرم‌افزار Dips

نوع درزه	شماره دسته درزه	شیب	جهت شیب
شبه عمودی	۱	۶۸٫۰۵	۳۳٫۸۹
	۲	۶۲٫۹۸	۲۵٫۲۶
	۳	۶۸٫۳۲	۱۴۱٫۴۸
شبه افقی	۱	۳۵٫۵۵	۲۳۷٫۲۱
	۲	۳۹٫۸۰	۵۸٫۶۲
لایه‌بندی	۱	۷۲٫۰۵	۳۰٫۳۴

برای تعیین توزیع احتمال مناسب با اثر طول درزه‌ها که قرار است به صورت دایره‌هایی در مدل بلوکی با نرم‌افزار 3DEC تولید شود، از نرم‌افزار آماری R استفاده شد. اعداد مربوط به اندازه دسته درزه‌ها به تفکیک لایه‌بندی، دو دسته درزه شبه افقی و سه دسته درزه شبه عمودی با توزیع‌های

به استثنای سه گمانه BH-234، D3 و HF-2 که در انتهای گالری اکتشافی (مغار نیروگاه) نزدیک به نواحی گسله حفر شده‌اند، بازشدگی درزه‌های ثبت شده در سایر گمانه‌های اکتشافی، در بازه ۰٫۱ تا ۲٫۵ میلی‌متر قرار دارد. درزه‌ها عمدتاً به وسیله کلسیت و بیتمین پر شده‌اند و اثری از مصالح لوم در درزه‌ها گزارش نشده است که احتمالاً ناشی از شستن آن‌ها در حین حفاری است [۲۲].

۵- تحلیل داده‌های منطقه

شبکه شکستگی‌های گسسته راهی برای نمایش پیکره توده سنگ، به وسیله توابع توزیع احتمال و ساخت تصادفی شکستگی‌ها در فضای دو یا سه‌بعدی است. این روش تغییرات فضایی پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد و توزیع آماری پارامترهای جهت‌یابی، بازشدگی و نظایر آن را به کمک مدل انتخابی برای ساخت شکستگی‌ها مد نظر قرار می‌دهد. در واقع، شکستگی گسسته مجموعه‌ای از پلی‌گون‌ها است که موقعیت، جهت شیب و زاویه شیب آن‌ها به وسیله پارامترهای توابع توزیع احتمال خاص این پارامترها که از داده‌های صحرایی حاصل می‌شود، تولید شده است.

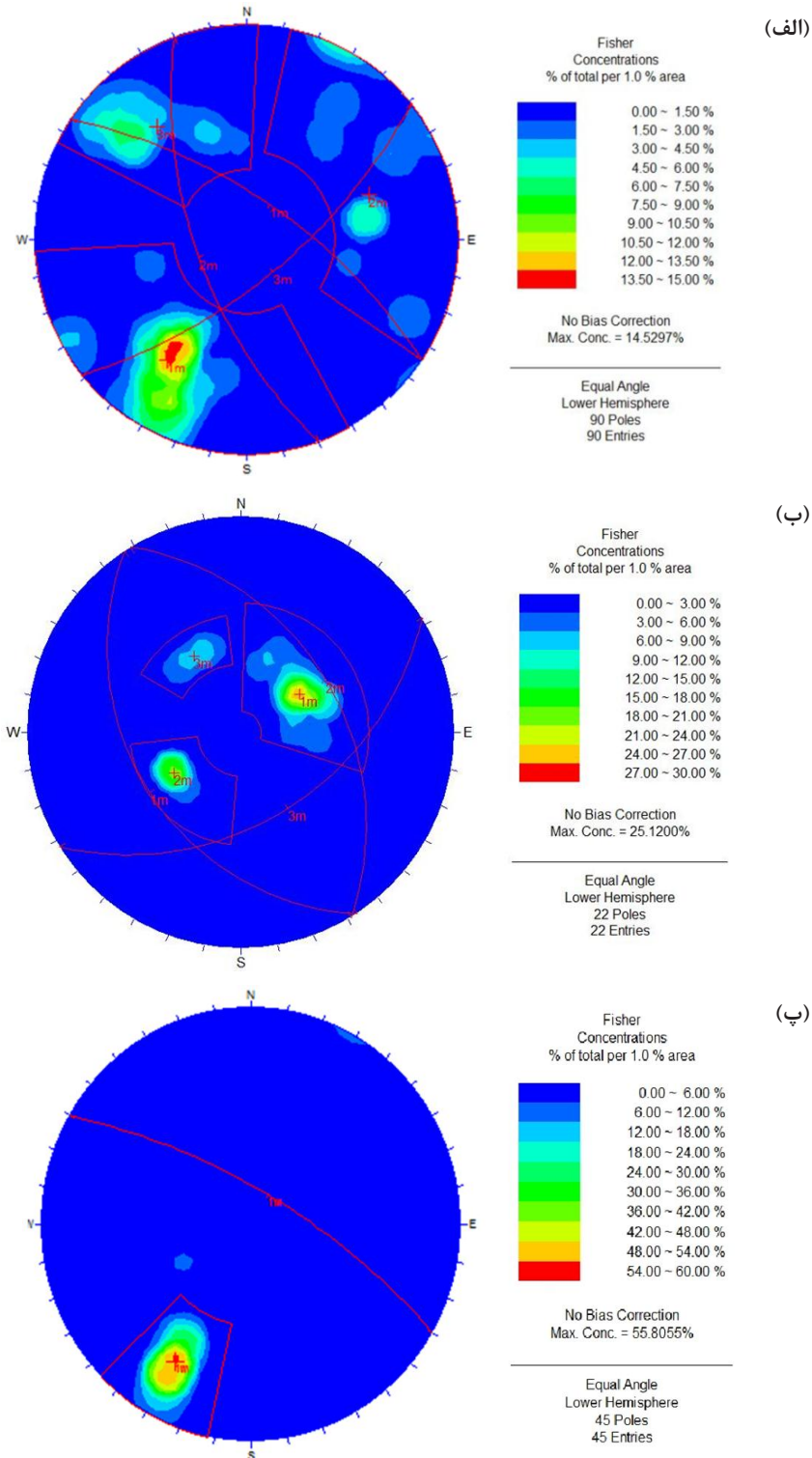
مدلسازی شبکه شکستگی‌های گسسته مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو است. شبیه‌سازی‌های مونت کارلو به دلیل اتکای آن بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی، اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شود که با کامپیوتر اجرا شود. روش‌های مونت کارلو برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی‌های آن‌ها وجود دارد، مفید است. گرایش به استفاده از این روش‌ها زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد. در شبیه‌سازی مونت کارلو به علت این که مبحث تصادفی بودن بعضی پارامترها همیشه مطرح است، نیاز است که از میان مدل‌های ساخته شده با الگوریتم‌های موجود، مدل یا مدلی به عنوان مدل قطعی‌تر و مطلوب‌تر برای استفاده‌های بعدی معرفی و پارامترهای آن مشخص شود [۲۳]. برای دستیابی به این مهم، لازم است که تطابق مدل‌های ساخته شده با داده‌های مورد آزمایش، مورد بررسی قرار گیرد.

۵-۱- توابع توزیع احتمال

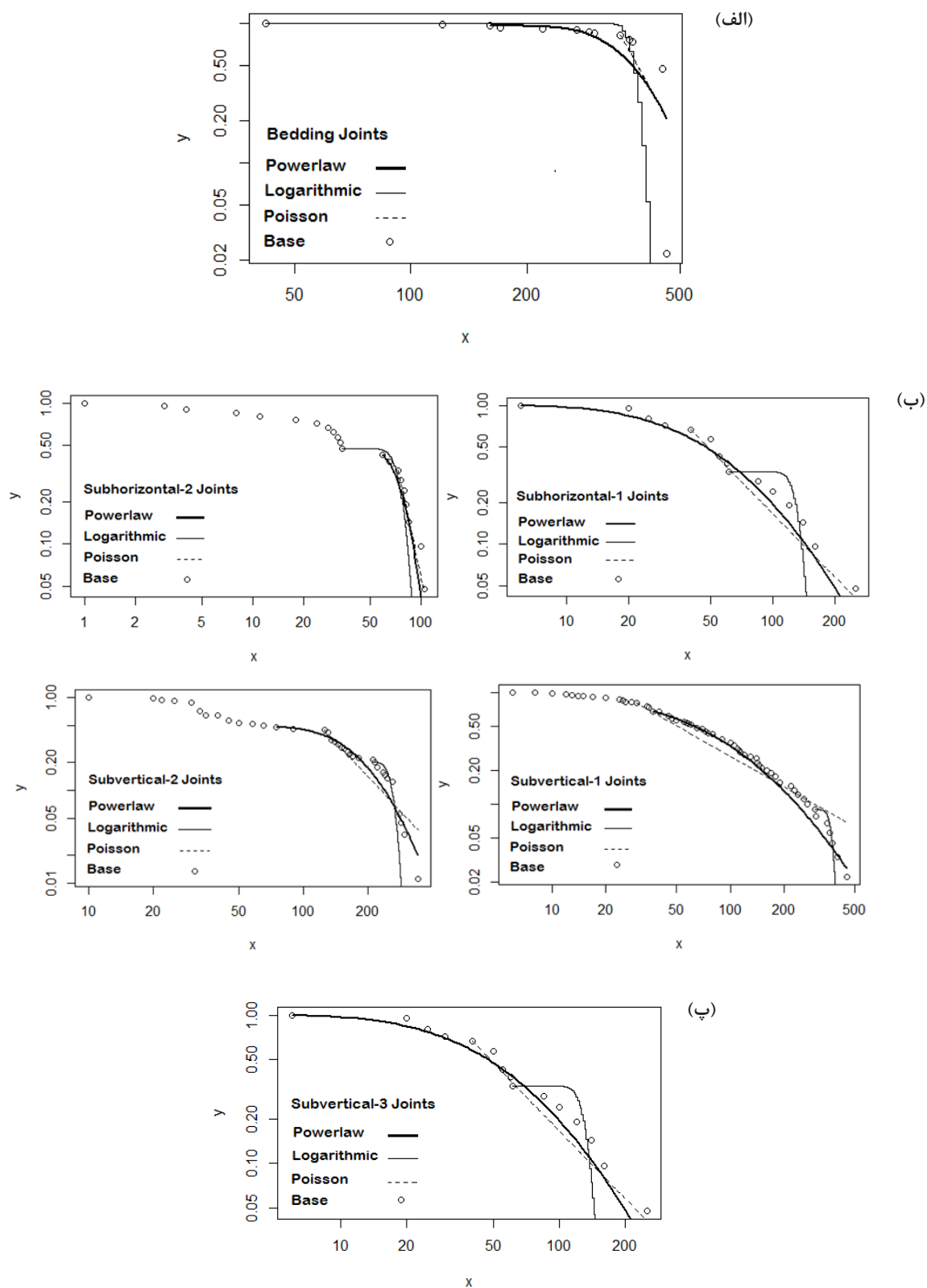
تابع توزیع احتمال رخداد یک مقدار معین از کمیت مورد نظر در جامعه نمونه برداشت شده را محاسبه و از نظر فراوانی،

مدلسازی توده سنگ شکسته از آن استفاده خواهد شد.

گسسته توانی، لگاریتمی و پواسون مقایسه شد (شکل ۴). بهترین برازش مربوط به داده‌های توزیع توانی است که در



شکل ۴: نمودار منحنی تراز دسته درزه‌های الف) شبه عمودی، ب) شبه افقی، پ) لایه‌بندی



شکل ۴: نتایج تطبیقی پایایی اندازه درزه‌ها با توزیع‌های آماری (توانی، لگاریتمی و پواسون) برای درزه‌های الف) لایه‌بندی، ب) شبه افقی، پ) شبه عمودی

۶- مدلسازی توده سنگ شکسته ناهمسانگرد

۶-۱- مدل شبکه شکستگی گسسته

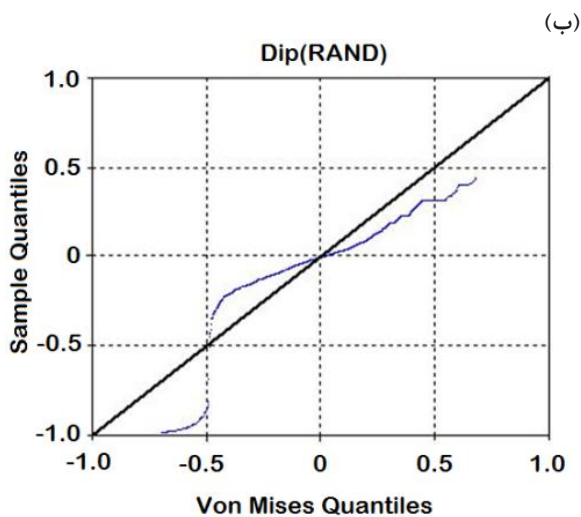
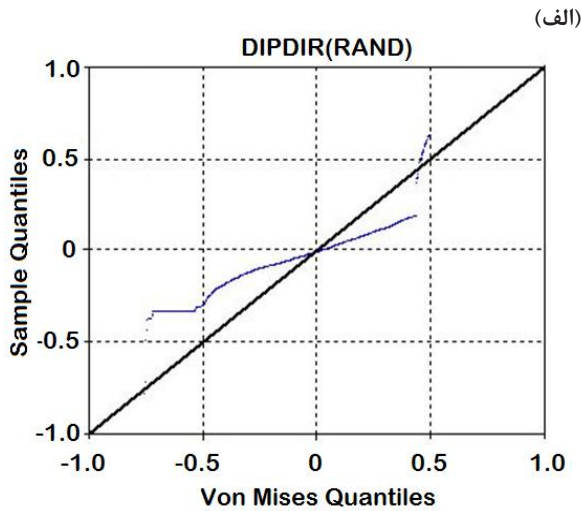
برای مدلسازی توده سنگ شکسته از نرم افزار المان گسسته 3DEC استفاده شده است. در این نرم افزار که مناسب برای تحلیل محیط‌های ناپیوسته است، ساختمان محیط ناپیوسته به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های جداگانه با مرزهای ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از روش شبکه شکستگی گسسته و توزیع توانی ویژگی‌های درزه‌ها، ۱۲ بلوک سه‌بعدی از شکستگی‌ها به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ متر ساخته شده است. برای ارزیابی مدل‌های شبکه شکستگی گسسته ساخته شده و انتخاب بهترین نتیجه و نزدیک‌ترین شبکه شکستگی گسسته به محیط واقعی زمین‌شناسی منطقه، می‌توان از آزمون واتسون- ویلیامز استفاده کرد. شرط استفاده از آزمون واتسون- ویلیامز انطباق داده‌های آماری مورد آزمون بر یکی از دو توزیع ون مایسز و یکنواخت است. این انطباق برای مدل‌های شبکه شکستگی گسسته مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌ای از تطبیق داده‌های جهت شیب و شیب تولید شده بر توزیع ون مایسز در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۳ نتایج آزمون واتسون- ویلیامز مربوط به بهترین مدل شبکه شکستگی گسسته را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، انحراف معیار نمونه‌های آزمایش شده مقادیر بسیار پایینی دارد. در جدول ۳، F مقدار انحراف معیار از توزیع فیشر را نشان می‌دهد، d_f مقدار درجه آزادی دو نمونه‌ای است که با هم مقایسه می‌شوند و P مقداری است که باید بیشتر از 0.05 باشد تا دو دسته داده قابل انطباق با هم باشند. شکل ۶ مدل بلوکی شبکه شکستگی گسسته ساخته و ارزیابی شده را نشان می‌دهد.

۶-۲- حل مدل و تعیین اندازه المان نماینده

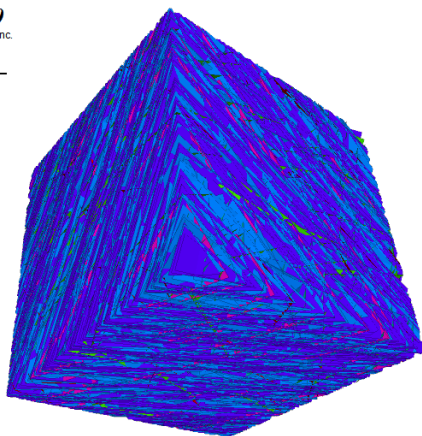
در حل عددی مسایل نشت، ابعاد مش اثر زیادی در اعتبار نتایج حل دارد و باید مستقل از شبکه مورد بررسی قرار گیرد. برای مش‌بندی مدل از المان شش‌وجهی در اندازه‌های مختلف استفاده شده است. شکل ۷ مولفه K_{xx} تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی به دست آمده را برحسب اندازه المان نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر شکل ۷، المان با اندازه 0.4 متر برای همگرایی نتایج مناسب است و المان‌های کوچکتر از آن تنها زمان حل را افزایش می‌دهند. مدل بلوکی سه‌بعدی مش‌بندی



شکل ۵: تطبیق داده‌های تولید شده به صورت تصادفی با توزیع ون مایسز (الف) جهت شیب، (ب) شیب

3DEC DP 5.00
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 0
2/1/2018 9:51:38 AM

DFN	dfn	name	Label
1	background		
2	sub_horizontal1		
3	sub_horizontal2		
4	sub_vertical1		
5	sub_vertical2		
6	sub_vertical3		



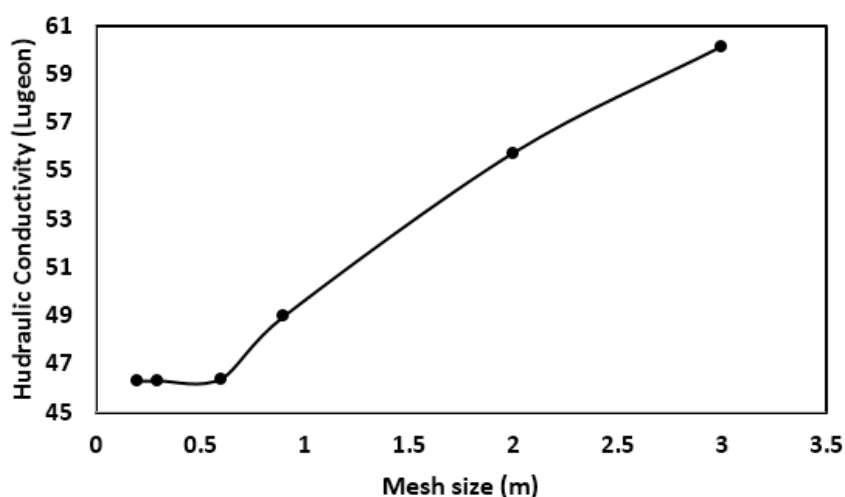
شکل ۶: نمایی از مدل بلوکی سه‌بعدی شبکه شکستگی گسسته

دست آوردن مقادیر مولفه‌های تانسور K ، هد هیدرولیکی در سه راستای x ، y و z به صورت مجزا به عنوان شرایط مرزی اعمال شده است. محاسبه دبی جریان در سه راستای مختلف،

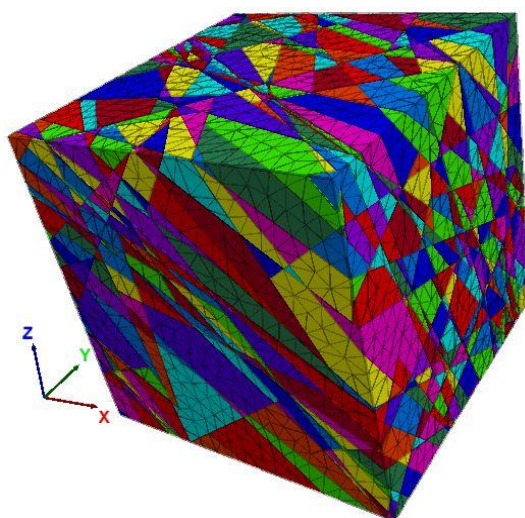
شده که در آن اندازه مش‌ها برابر با 0.4 متر است، در شکل ۸ نشان داده شده است. برای محاسبه ضرایب هدایت هیدرولیکی مدل بلوکی و به

جدول ۳: نتایج آزمون واتسون-ویلیامز

متغیر آزمایش شده	F	P	df ₁	df ₂	میانگین تخمینی
$DIP(Rand) \& DIP(20610 \& 157)$	۰,۳۷۱	۰,۵۴۳	۱	۱۷۱۸	۳۸,۸۷۲
$DIPDIR(Rand) \& DIPDIR(20610 \& 157)$	۱,۲۱۵	۰,۲۷	۱	۱۷۱۸	۶۷,۹۹۱



شکل ۷: نمودار مقادیر هدایت هیدرولیکی بر حسب اندازه مش

شکل ۸: بلوک سه‌بعدی مش‌بندی شده با اندازه المان 0.4 متر برای بلوک مکعبی 5 متری

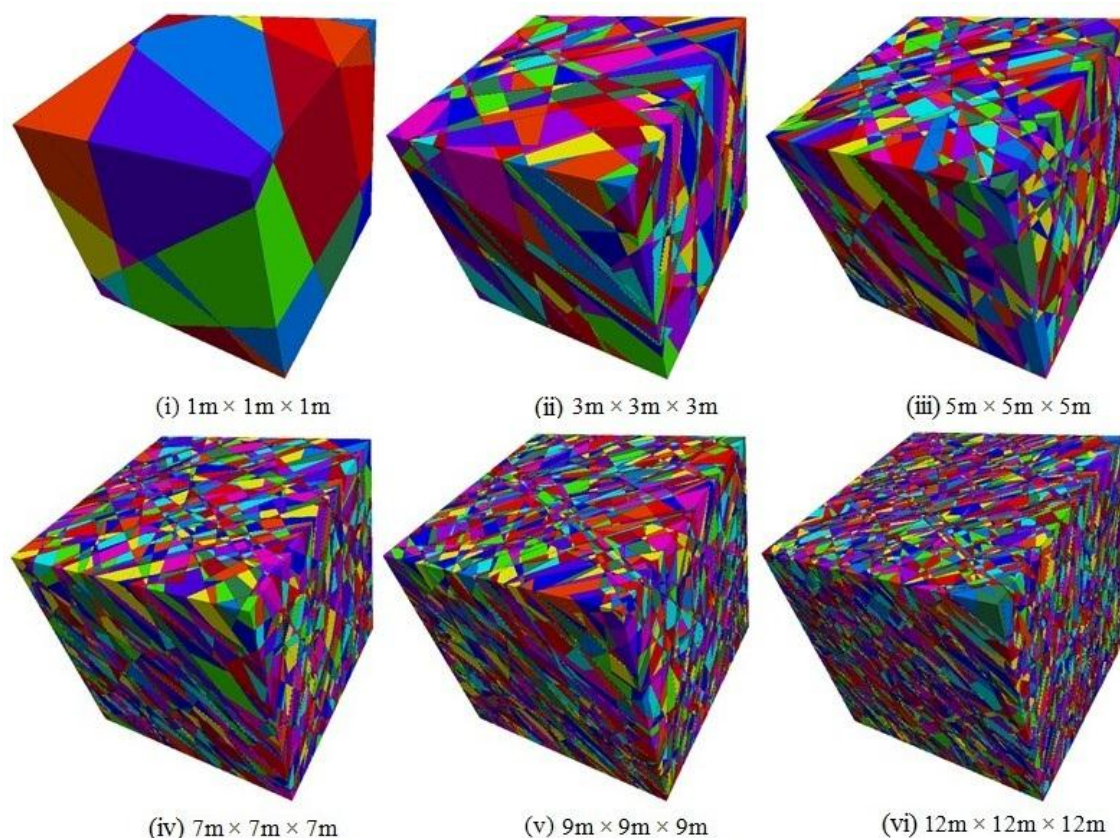
گسسته اذعان می‌کنند که مدل‌سازی در محیط‌های گسسته برعکس محیط پیوسته دارای پیچیدگی‌های خاص خود است که در این مورد ابعاد مدل و اندازه مش تاثیر بسزایی را در زمان اجرای مدل و رسیدن به نتایج دارد. تعدادی از این بلوک‌ها در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.

برای ساخت المان نماینده بهینه، ۱۲ مدل بلوکی با ابعاد ۱، ۲، ۳، ...، ۱۲ متر انتخاب شد (شکل ۱۰). شکل ۱۰ مولفه K_{xxx} محاسبه شده برای ۱۲ بلوک با ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، تا قبل از رسیدن ابعاد المان نماینده به ۷ متر مقدار K_{xxx} در حال کاهش است ولی پس از آن، با بزرگتر شدن ابعاد مدل، مقدار آن تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. بنابراین، برای تعیین مولفه‌های تانسور هدایت هیدرولیکی از مدل بلوکی المان نماینده با ابعاد ۷ متر استفاده شده است.

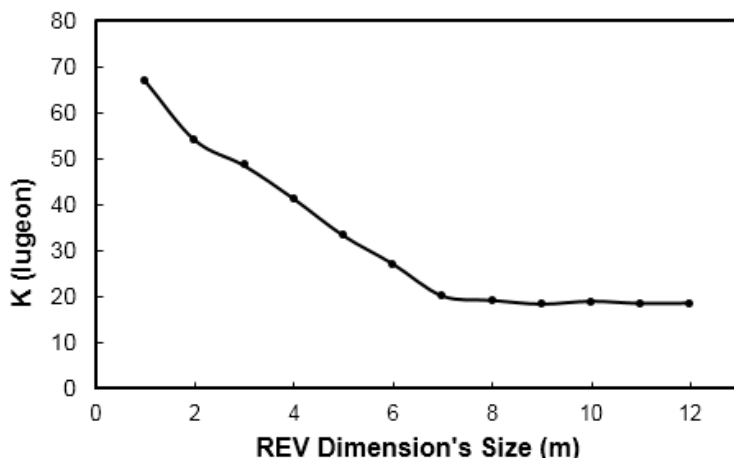
در این تحقیق، برای اجرای مدل و به دست آوردن نتایج مورد نظر از کدهای 3DEC استفاده شده است که این کدها

ضرایب هدایت هیدرولیکی محیط شکسته را با استفاده از رابطه ۴ نتیجه می‌دهد. با اعمال هدایت هیدرولیکی در راستای x ، مولفه‌های K_{xxx} ، K_{xy} و K_{xz} از تانسور K تعیین می‌شود. این مقادیر با استفاده از رابطه ۴ و بر اساس اختلاف فشار اعمال شده به راحتی قابل محاسبه است. به طور مشابه، اعمال هدایت هیدرولیکی در راستای y منجر به محاسبه مولفه‌های K_{yy} ، K_{yx} و K_{yz} از تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی می‌شود. در نهایت سه مولفه باقیمانده از ضرایب هدایت هیدرولیکی از اعمال هدایت هیدرولیکی در راستای z و محاسبه دبی جریان در سه راستای x ، y و z نتیجه خواهد شد.

ابعاد المان نماینده در حجم محاسبات و مدت زمان انجام آن به ویژه در حالت سه‌بعدی تاثیر بسزایی دارد. بنابراین، ساخت مدلی با حداقل ابعاد که بتواند گویای خواص منطقه باشد بسیار مهم است. این مساله را هم می‌توان در ابعاد مش مورد استفاده دید، هم می‌توان در ابعاد اندازه المان نماینده به خوبی مشاهده کرد. نویسندگان بر اساس تجربه کار در محیط‌های پیوسته و



شکل ۹: مدل بلوکی سه‌بعدی شبکه شکستگی‌ها با ابعاد مختلف ۱ تا ۱۲ متر، برای اختصار تنها ۶ مورد نشان داده شده است



شکل ۱۰: نمودار تغییرات K_{xx} با ابعاد المان نماینده برحسب مقادیر لوژن

ضریب هدایت هیدرولیکی یک عدد به جای تانسور در نظر گرفته شود، این مقدار چیزی بین ۵/۴ و ۱۸ است. در صورتی که به ۵/۴ نزدیکتر باشد، باعث می‌شود از عدد ۱۸ فاصله گرفته شده و چنانچه به ۱۸ نزدیک شود از ۵/۴ فاصله گرفته می‌شود. این مساله باعث می‌شود در هر دو حالت از مقدار واقعی فاصله گرفته شود و این تغییرات می‌تواند تا بیش از سه برابر اتفاق افتد که این عدد از تقسیم عدد ۱۸ بر ۵/۴ حاصل می‌شود.

اگر تنها هدایت هیدرولیکی در راستای عمود بر صفحات مختصات در نظر گرفته شود، باز هم هدایت هیدرولیکی عمود بر صفحه YZ حدود دو برابر هدایت هیدرولیکی عمود بر صفحه XY خواهد بود ($K_{xx} = 2K_{zz}$).

با توجه به مولفه‌های تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی، اندازه هدایت هیدرولیکی معادل از صفحه‌های YZ، XZ و XY به ترتیب ۲۰، ۱۵/۲ و ۱۴/۲ لوژن محاسبه می‌شود. بنابراین، هدایت هیدرولیکی دو صفحه عمودی در منطقه (YZ و XZ) ۳۳ درصد تفاوت را نشان می‌دهد. این تفاوت در آزمون‌های برجا نیز قابل ارزیابی است.

با تعیین دستگاه مختصات اصلی تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی می‌توان مقادیر بیشینه و کمینه ضریب هدایت هیدرولیکی و راستای مربوط به آن‌ها را محاسبه کرد. مولفه‌های تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی در دستگاه مختصات اصلی به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$K = \begin{bmatrix} 27.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

بر اساس مدل مورد مطالعه تغییر یافته و بخش‌هایی به آن‌ها افزوده شده است. همچنین، از آنجایی که در این نرم‌افزار با استفاده از کد باید خروجی‌های مورد نیاز را دریافت کرد به این منظور از دستورات مختلفی استفاده شده است.

۷- ارزیابی نتایج و بحث پیرامون آن‌ها

تانسور هدایت هیدرولیکی محاسبه شده برای توده سنگ شکسته مغار برق آبی سد رودبار لرستان بر حسب لوژن به شکل رابطه ۶ است.

$$K = \begin{bmatrix} 18 & 5.4 & 7 \\ 6.3 & 12.3 & 6.35 \\ 8 & 7 & 9.5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

همچنین، مقادیر این تانسور برحسب متر بر ثانیه به صورت رابطه ۷ ارزیابی می‌شود.

$$K = \begin{bmatrix} 2.34E-6 & 7.02E-7 & 9.01E-7 \\ 8.19E-7 & 1.60E-6 & 8.26E-7 \\ 1.04E-6 & 9.01E-7 & 1.24E-6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

با فرض هدایت هیدرولیکی همسانگرد، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی در تمام جهات یکسان در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، پراکندگی مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف برای منطقه مورد مطالعه بین ۵/۴ تا ۱۸ لوژن است. به عبارت دیگر، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی از صفحه YZ در جهت X بیش از سه برابر ضریب هدایت هیدرولیکی از صفحه YZ در جهت Y است. چنانچه برای

گرفته شود. از این رو، تحلیل همسانگرد نشد در منطقه ممکن است خطای زیادی را در بر داشته باشد. همچنین، تعریف ضریب هدایت هیدرولیکی معادل پس از به دست آوردن آن به صورت ناهمسانگرد می‌تواند در ارزیابی نتایج خطا را تا حد بسیاری پایین آورد.

۹- مراجع

- [1] Sun, J., and Zhao, Z. (2010). "Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(5): 629-637.
- [2] Xiong, X., Zhang, C., and WANG, E. (2009). "A review of steady state seepage in a single fracture of rock [J]". *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(9): 1839-1847.
- [3] Li, P., Lu, W., Long, Y., Yang, Z., and Li, J. (2008). "Seepage analysis in a fractured rock mass: the upper reservoir of Pushihe pumped-storage power station in China". *Engineering Geology*, 97(1-2): 53-62.
- [4] Lin, H. I., and Lee, C. H. (2009). "An approach to assessing the hydraulic conductivity disturbance in fractured rocks around the Syueshan tunnel, Taiwan". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2): 222-230.
- [5] Sun, J., and Zhao, Z. (2010). "Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(5): 629-637.
- [6] Sun, J., Zhao, Z., and Zhang, Y. (2011). "Determination of three dimensional hydraulic conductivities using a combined analytical/neural network model". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2): 310-319.
- [7] Xu, Z., Zhao, Z., Sun, J., and Lu, M. (2015). "Determination of hydraulic conductivity of fractured rock masses: A case study for a rock cavern project in Singapore". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(2): 178-184.
- [8] Yu, C., Deng, S. C., Li, H. B., Li, J. C., and Xia, X. (2013). "The anisotropic seepage analysis of water-sealed underground oil storage caverns". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38: 26-37.
- [9] Xu, Z., Zhao, Z., Sun, J., He, L., and Nie, W. (2015). "Back-analysis approach for the determination of hydraulic conductivity in rock caverns". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47: 233-238.
- [10] Chen, Y. F., Zheng, H. K., Wang, M., Hong, J. M., and

مولفه‌های اصلی تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد که ضریب هدایت هیدرولیکی بیشینه در یک نقطه از توده سنگ $7/5$ برابر ضریب هدایت هیدرولیکی کمینه در همان نقطه است (این مقدار از تقسیم عدد $27,2$ بر $3,6$ بدست می‌آید). این نسبت بالا نشان‌دهنده خطای بالای تحلیل نشد در این منطقه با فرض توده سنگ همسانگرد است. برای تحلیل همسانگرد نشد در هر منطقه شاید بتوان ابتدا تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی را استخراج کرد و سپس یک ضریب هدایت هیدرولیکی معادل تعریف و تعیین کرد. منظور این است که هنگامی که ضریب هدایت هیدرولیکی از ابتدا به صورت همسانگرد در نظر گرفته می‌شود از آنجایی که مقدار ناهمسانگرد آن مشخص نیست، باعث می‌شود، نتوان گفت این مقدار آیا به مقدار بیشینه نزدیکتر است یا به مقدار کمینه، ولی وقتی مقدار آن را به صورت تانسور رابطه‌های 6 و 7 ارزیابی می‌شود، در این صورت می‌توان گفت چه مقداری در نظر گرفته شود تا همسانگرد بودن تاثیر جدی بر روی نتایج نداشته باشد. بدین ترتیب از یک طرف از پیچیدگی پدیده نشد کاسته می‌شود و از طرف دیگر مقدار نشد محاسبه شده به واقعیت میدانی نزدیک خواهد بود. البته نحوه تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی معادل می‌تواند محل مناقشه باشد.

۸- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین میزان نشد به فضاهای زیرزمینی که خود متاثر از خواص فیزیکی توده سنگ شکسته مانند بازشدگی، زبری، طول دسته درزه و تعداد دسته درزه است، هدایت هیدرولیکی است. در این مطالعه، با مدلسازی سه‌بعدی توده سنگ شکسته مغار سد رودبار لرستان به روش شبکه شکستگی گسسته، تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی محاسبه شد. از این تانسور می‌توان در تعیین میزان دقیق نشد و طراحی عملیات تزریق تحکیم استفاده کرد. تفاوت بین مقادیر هدایت هیدرولیکی در حالت همسانگرد و ناهمسانگرد قابل ملاحظه است و نمی‌توان به دلیل سهولت از فرض ناهمسانگرد بودن صرف نظر کرد. مقدار بیشینه ضریب هدایت هیدرولیکی در حالتی که این مقادیر در تانسور به صورت مقادیر اصلی تبدیل شده‌اند $7/5$ برابر مقدار کمینه است. این مساله از این جهت حایز اهمیت است که در صورت فرض همسانگرد برای توده سنگ شکسته مقدار هدایت هیدرولیکی ممکن است تا بیش از 7 برابر متفاوت و دور را واقعیت در نظر

- Research, 21(8): 1105-1115.
- [19] Lai, W. M., Rubin, D. H., Krempl, E., and Rubin, D. (2009). "Introduction to continuum mechanics". Butterworth-Heinemann, 223-240.
- [20] Sun, J., Zhao, Z., and Zhang, Y. (2011). "Determination of three dimensional hydraulic conductivities using a combined analytical/neural network model". Tunnelling and Underground Space Technology, 26(2): 310-319.
- [21] Witherspoon, P. A., Wang, J. S., Iwai, K., and Gale, J. E. (1980). "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture". Water Resources Research, 16(6): 1016-1024.
- [۲۲] گزارش زمین‌شناسی مهندسی؛ ۱۳۹۳؛ "مطالعات مرحله دوم طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد رودبار لرستان". شرکت مهتاب قدس، ص ۱۳۵-۱۲۲.
- [۲۳] کفایتی، ص؛ ۱۳۸۹؛ "تحلیل احتمالاتی عددی پایداری استاتیکی و دینامیکی شیروانی سنگی تکیه گاه سمت راست سد و نیروگاه کارون ۴". پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۸۳-۷۹.
- [۲۴] حسنی پاک، ع. ا.، شرف‌الدین، م؛ ۱۳۸۰؛ "تحلیل داده‌های اکتشافی". انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ایران، ص ۳۷۰-۳۵۴.
- [25] Itasca 3DEC manuals Minneapolis, (2014). Itasca Consulting group Inc, Version 5 Users Manual, 123-130.
- Zhou, C. B. (2015). "Excavation-induced relaxation effects and hydraulic conductivity variations in the surrounding rocks of a large-scale underground powerhouse cavern system". Tunnelling and Underground Space Technology, 49: 253-267.
- [11] Huang, Z., Jiang, Z., Zhu, S., Wu, X., Yang, L., and Guan, Y. (2016). "Influence of structure and water pressure on the hydraulic conductivity of the rock mass around underground excavations". Engineering Geology, 202: 74-84.
- [12] Öge, İ. F. (2017). "Assessing Rock Mass Permeability Using Discontinuity Properties". Procedia Engineering, 191: 638-645.
- [13] Maleki, M. R. (2018). "Groundwater Seepage Rate (GSR); a new method for prediction of groundwater inflow into jointed rock tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology, 71: 505-517.
- [14] Oda, M. A. S. A. N. O. B. U. (1985). "Permeability tensor for discontinuous rock masses". Geotechnique, 35(4): 483-495.
- [۱۵] باغبانان ع.، جولایی ا.؛ ۱۳۸۹؛ "تولید شبکه شکستگی مجزا در فضای سه بعدی". چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی، ارومیه، ایران، ص ۵۹-۵۰.
- [16] Snow, D. T. (1969). "Anisotropic permeability of fractured media". Water Resources Research, 5(6): 1273-1289.
- [17] Jing, L., and Hudson, J. A. (2002). "Numerical methods in rock mechanics". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(4): 409-427.
- [18] Long, J., Gilmour, P., and Witherspoon, P. A. (1985). "A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures". Water Resources

¹ Rock quality designation

² Groundwater seepage rate



DOI: 10.30479/jmre.2019.9616.1199

Determining Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Rock Mass in Cavern of Roudbar Dam, Lorestan, Iran

Alizadeh Kaklar S.¹, Doulati Ardejani F.^{2*}

1- Ph.D Candidate, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
s_alizadeh_k@yahoo.com

3- Professor, Dept. of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Iran
fdoulati@ut.ac.ir

(Received: 28 Nov. 2018, Accepted: 03 May 2019)

Abstract: The importance and necessity of using underground spaces in the present era is not overlooked. Caverns are used as an important bunch of underground spaces for the storage of radioactive waste, hydrocarbons, and hydroelectric power plant projects. Construction of caverns has particular complexity and water seepage into the caverns is one of the most important problems. The purpose of the present study was to investigate the 3D modeling of the fracture network of a cavern for the pumped storage power plant of Rudbar Lorestan dam by using DFN method and 3DEC software and then determining the tensor of hydraulic conductivity by using the model. To achieve the goal, statistical analyses were performed on the in situ data extracted from the area. Power law distribution was determined as a suitable statistical distribution proportional to the data. Then, the DFN model was created and validated using the Watson-Williams test. In the following, a block model of DFN made from the fractures was constructed to determine the Representative Elementary Volume for different dimensions from 1 to 12 m. It was found that a 7-meter model was appropriate. Furthermore, the tensor of hydraulic conductivity was determined by using a hydraulic head on a generated REV.

Keywords: Hydraulic conductivity tensor, Anisotropic, Fractured rock mass, Cavern, DFN.

INTRODUCTION

In many projects, the hydrogeological models are unreliable. There are many reasons for this, some of which are: 1) Hydrogeological environments are anisotropic and heterogeneous, while this assumption is not applied due to the complexity and lack of adequate data. 2) Due to high drilling costs, limited numbers of boreholes are used in most studies concerning the estimation of hydraulic conductivity.

Hydraulic conductivity is an important parameter in the analysis of water flow in fractures [1]. Rock mass is considered isotropic on the permeability of the environment in different studies [2].

Caverns have been used for the storage of crude oil and other petroleum products. Yu et al. [2] used 4 drilled boreholes data in China for 3D modeling of the environments using 3DEC package. Zhou et al [3] determined the hydraulic conductivity using back analysis calculation and measurement of leakage to a cavern.

The aim of this study was to determine the tensor of hydraulic conductivity coefficients and investigate the rock fractures anisotropy using these coefficients in the study area. For this purpose, the concept of separated fracture network applying 3DEC software was used to calculate the amount of water leakage from rock mass. Also, in developing and verifying the separate fracture network model, various statistical distributions and the Watson-Williams test was used. Using the predicted leakage amount, the flow rate can be obtained. Finally, the velocity values achieved from the tensor of hydraulic conductivity was determined using the relationships between the components.

METHOD

The fracture network method was used to determine the hydraulic conductivity. For this purpose, the DFN block model was initially constructed using the characteristics of the surveyed fractures. The model was used to determine the size of the REV (Representative elementary volume). Then, using the pressure heads in the three directions of x, y and z, the constructed values of the tensor of hydraulic conductivity were obtained. Watson-Williams test and in-situ data were used to validate the model, .

RESULT

Hydraulic conductivity tensor calculated for the fractured rock mass of hydroelectric cavern of the Roudbar Dam was obtained as follows:

$$K = \begin{bmatrix} 18 & 5.4 & 7 \\ 6.3 & 12.3 & 6.35 \\ 8 & 7 & 9.5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

In addition, the values of this tensor in m/s are given as follows:

$$K = \begin{bmatrix} 2.34E-6 & 7.02E-7 & 9.01E-7 \\ 8.19E-7 & 1.60E-6 & 8.26E-7 \\ 1.04E-6 & 9.01E-7 & 1.24E-6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Based on the results, the distribution of hydraulic conductivity coefficients in different directions of the study area is between 4.5 and 18 lugeons. In other words, the value of the hydraulic conductivity coefficients of yz plane in the x direction is more than three times the hydraulic conductivity of the yz plane in the y direction. If the hydraulic conductivity considered to be perpendicular to the coordinate planes, then the hydraulic conductivity perpendicular to the yz plane will be approximately twice the hydraulic conductivity perpendicular to the xy plane ($K_{xx} = 2K_{zz}$).

The tensor components of hydraulic conductivity coefficients in the main coordinate system are calculated as follows:

$$K = \begin{bmatrix} 27.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

The main components of the hydraulic conductivity coefficients tensor show that the maximum hydraulic conductivity coefficient at one point is $27.2 / 3.6 = 7.5$ times the minimum hydraulic conductivity coefficient at the same point. This high ratio indicates the high error rate of leakage analysis in this region with the assumption of isotropic rock mass.

CONCLUSIONS

Hydraulic conductivity is one of the most important factors in determining the amount of leakage to underground spaces, which is influenced by the physical properties of fractured rock mass such as opening, roughness, joint length, and number of joints. The difference between values of hydraulic conductivity in

isotropic and anisotropic conditions is considerable and cannot be ignored. The maximum value of the hydraulic conductivity coefficient is 7.5 times the minimum value in the situation when these values in the tensor are main values. It is important since in the case of isotropic assumption for fractured rock mass, the hydraulic conductivity can be assumed up to 7 times more than the actual value.

REFERENCES

- [1] Sun, J., and Zhao, Z. (2010). "Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns". Tunnelling and Underground Space Technology, 25(5): 629-637.
- [2] Sun, J., Zhao, Z., and Zhang, Y. (2011). "Determination of three dimensional hydraulic conductivities using a combined analytical/neural network model". Tunnelling and Underground Space Technology, 26(2): , 310-319.
- [3] Lei, S. (1999). "An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel". Journal of Groundwater, 37(1): 23-26.