

تحلیل نشت تکیه‌گاه‌های سد لیرو با استفاده از روش ترکیبی DFN-DEM

عنایت الله امامی میبدی^۱*

فرزاد گهروی باجگیرانی^۲

چکیده:

سد لیرو از سدهای بزرگ بتنی - دوقوسی کشور و در دست مطالعه در استان چهارمحال بختیاری است. هدف، بررسی و تخمین میزان نشت آب از درزه و شکستگی‌های موجود در تکیه‌گاه‌های سد با استفاده از روش عددی است. شکستگی‌های متصل به هم به‌عنوان مسیرهای اصلی جریان آب به داخل تکیه‌گاه‌ها و کنترل‌کننده رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ است. در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی پارامترهای هندسی درزه بخصوص پایایی درزه‌ها و ارائه مدلی واقعی‌تر که از لحاظ آماری معتبر بوده، گویای ویژگی‌های توده‌سنگ برجا باشد، به‌منظور تحلیل‌های هیدرولیک ضروری است. در بسیاری از مدل‌سازی‌های هندسی مؤلفه‌های هندسی درزه‌ها از جمله پایایی، بازشدگی و جهت‌داری با فرض‌های غیرواقعی ساده‌کننده به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود که باعث عدم تشابه مدل هندسی و رفتار هیدرولیکی توده سنگ با واقعیت خواهد شد. بنابراین، مدل هندسی شبکه درزه‌های گسسته (DFN) به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از کد نوشته‌شده 3D-DFN تهیه شد در این تحقیق کد قبلی به‌منظور تعیین دقیق مسیرهای جریان هیدرولیک توسعه داده شد. درنهایت پس از اعتبارسنجی مدل تصادفی شبکه درزه‌های ساخته شده با مقادیر برداشت شده مشخص شد، این انطباق به‌طور متوسط برای مؤلفه‌های مختلف هندسی و مقادیر شدت‌های درزه‌داری بیش از ۹۰ درصد است. این نتایج به‌عنوان ورودی قابل‌اطمینان مدل هندسی برای مدل‌سازی جریان هیدرولیک تکیه‌گاه‌های چپ و راست به روش المان‌های گسسته (DEM) در محیط نرم‌افزاری UDEC استفاده شد. میزان نشت در مجموع دو تکیه‌گاه برابر $m^3/Year$ ۱۳۵۴۱۵ محاسبه شد. در مقایسه با حجم مفید مخزن مجموع نشت از هر دو تکیه‌گاه ۰/۰۳ درصد از این حجم مفید را شامل می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

تحلیل نشت، تکیه‌گاه‌های سد لیرو، شبکه درزه گسسته، روش المان گسسته، UDEC

*-۱ استادیار گروه زمین‌شناسی. دانشگاه یزد. en.emami@yazd.ac.ir

-۲. کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی. دانشگاه یزد.

مقدمه

شکستگی‌های موجود در دامنه است (زو^۷ و همکاران، ۲۰۰۶). از آنجا که توده‌سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله، جهت، پایایی (تداوم) و فاصله‌داری دارای مقادیری پراکنده در توده‌سنگ باشند (گهرویی باجگیرانی و همکاران، ۱۳۹۷).

تصادفی بودن خواص شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ لزوم استفاده از آنالیزهای آماری را نشان می‌دهد (آدلر و ثوورت^۸، ۱۹۹۹). در بسیاری از شیوه‌های مدل‌سازی توده‌سنگ، درزه‌ها با استفاده از بعضی فرض‌های غیرواقعی شبیه‌سازی می‌شوند، برای مثال فرض درزه‌های با تداوم بینهایت که معمولاً در مدل‌سازی‌ها بکار می‌رود، ویژگی است که با شرایط واقعی و طبیعی توده‌سنگ تطابق ندارد (راجرز^۹ و همکاران، ۲۰۰۷). مدل‌های تصادفی شبکه درزه، طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از ارائه شبکه درزه به صورت عناصری گسسته در فضا با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به‌طور تصادفی تعریف شده‌اند نمایش می‌دهد (پین^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۶). توسعه مدل‌سازی تصادفی، پیشرفت چشم‌گیری در زمینه مدل‌سازی توده‌سنگ و بررسی رفتار آن محسوب می‌شود (راجرز و همکاران، ۲۰۱۴). هدف در تولید شبکه‌های درزه تصادفی تولید یک و یا تعداد بیشتری هندسه درزه، در دو یا سه بعد است بطوریکه ویژگی‌های جمعیتی درزه‌های واقعی برداشت شده در توده‌سنگ را منعکس کند (گهرویی باجگیرانی و همکاران، ۱۳۹۷).

شرط جریان سیال در توده‌سنگ وجود شبکه ناپیوستگی‌های به هم مرتبط است. مدل‌های DFN می‌توانند بازه بزرگتری از تغییرات مقادیر جریان سیال را در مقایسه با مدل‌های معادل که مبتنی بر میانگین

مطالعه رفتار جریان سیال در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، معدنی، نفت و گاز و زیست‌محیطی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برآورد رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ نیازمند درک مناسبی از رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها و مدلی دقیق از شبکه شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ است. از طرفی عدم قطعیت و تغییرپذیری در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در ارتباط با توده‌سنگ‌ها که از مواد طبیعی و ناهمگن ساخته شده‌اند اجتناب‌ناپذیر است. 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 (راپانتووا^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). توده‌سنگ‌ها دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که تاثیرات قابل توجهی را در جریان سیالات در توده‌سنگ دارند. توده‌سنگ‌ها شامل ناپیوستگی‌های مختلف مانند گسل، درزه و شکستگی‌ها هستند (نیومن و ترندس^۲، ۲۰۰۵). درزه‌ها متداول‌ترین نوع ناپیوستگی‌ها در میان ناپیوستگی‌های توده‌سنگ هستند (وانگا^۳ و همکاران، ۲۰۰۳). شبکه درزه‌های توده‌سنگ و ویژگی‌های هندسی آن از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار جریان سیالات (آب، نفت و گاز) (لگارزیک^۴ و همکاران، ۲۰۱۱) و مقاومت و پایداری توده سنگ است (گومده^۵ و همکاران، ۲۰۰۷).

با توجه به ساده بودن روش‌های پیوسته مثل تخلخل دوگانه و نفوذپذیری دوگانه در بعد عملی این روش‌ها محدودیت‌هایی در رابطه با اعمال صحیح تاثیر هندسه شکستگی‌ها در رفتار جریان دارند. درحقیقت تخلخل مؤثر هیدرولیکی که پارامتر اساسی مدل‌سازی است تحت تاثیر ارتباط و تقاطع شکستگی‌های موجود در دامنه است (ژوو^۶ و همکاران، ۲۰۰۶). تقاطع بین شکستگی‌ها تابع پیچیده‌ای از فراوانی شکستگی‌داری، اندازه و جهت‌داری

۷ - Xu
۸ - Adler and Thovert
۹ - Rogers
۱۰ - Pin

۱ - Rapantova
۲ - Neuman and Trends
۳ - Wanga
۴ - Le Garzic
۵ - Gumede
۶ - Zhou

همکاران را می‌توان از دیگر نمونه‌های مدل‌های تصادفی توسعه داده شده دانست (ریس و انیشیتین، ۱۹۹۱، مارتل و همکاران، ۱۹۹۱). ژانگ^۹ و همکارانش برای درزه‌های به هم مرتبط و مطالعه جریان سیال در آن‌ها تانسور نفوذ پذیری تعریف کردند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۴). شریف‌زاده و همکاران در تحقیقی با استفاده از DFN بیان کردند ناپیوستگی‌های درون توده‌سنگ مسیره‌های اصلی جریان آب هستند و جریان سیال با افزایش عمق کاهش می‌یابد (شریف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵). گاتینونی^{۱۰} و همکاران به بررسی جریان آب ورودی به تونل از طریق مدل سازی عددی جریان از شکستگی‌های داخل سنگ پرداختند (گاتینونی و همکاران، ۲۰۰۹). چسناوکس^{۱۱} با استفاده از DFN نفوذپذیری آبخوان را براساس تغییر مقیاس برداشت به مقیاس منطقه‌ای تخمین زدند (چسناوکس و همکاران، ۲۰۰۹). لیو^{۱۲} به مطالعه بالازندگی سدی در چین با استفاده از مدل کوپل هیدرومکانیکی با توسعه کدی به روش مدل سازی هندسی DFN پرداختند (لیو و همکاران، ۲۰۱۱). جوادی اصطهبانی و شریف‌زاده مدل سازی رفتار هیدرولیکی در محیط سنگی را بر اساس روش مبتنی بر DFN توسعه دادند (جوادی اصطهبانی و شریف‌زاده، ۱۳۹۳). نوریان بیدگلی و جینگ^{۱۳} به بررسی اثر فشار آب بر تغییرشکل پذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل سازی DFN پرداختند (نوریان بیدگلی و جینگ، ۲۰۱۵). مهاجرانی در مطالعه‌ی کاربرد روش مش‌بندی بهینه برای تحلیل جریان در DFN الگوریتم جدیدی را طراحی نمودند (مهاجرانی و همکاران، ۱۳۹۶). رن^{۱۴} برای تعیین نفوذپذیری شبکه شکستگی، مدل DFN معادل و DFN هدف را تعریف نمود (رن و همکاران، ۲۰۱۷). لی^{۱۵} و همکاران یکی از مخازن گاز شیلی در چین را با استفاده

حجمی است ارائه کند (د دروزی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). این روش شبکه شکستگی‌های گسسته را به صورت مجموعه‌ای از چندضلعی‌های متقاطع دوبعدی تعبیه شده در فضای سه‌بعدی مدل سازی می‌کند. با توجه به ماهیت توده‌سنگ درزه‌دار در این مقاله از روش المان مجزا^۲ (DEM) و نرم‌افزار UDEC^۳ استفاده شده است. در این مقاله ابتدا شبکه هندسه ناپیوستگی‌ها بر اساس پارامترها و توابع آماری به دست آمده از مؤلفه‌های هندسی برداشت شده مانند شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و تداوم ساخته شده است. پس از این مرحله مدل سازی هیدرولیکی انجام شده است. در مجموع هدف اصلی این مدل سازی، تخمین اولیه‌ای از نشت با توجه به شرایط درزه‌داری تکیه‌گاه‌ها بوده است. به عبارت دیگر این مدل پیش‌بینی کننده‌ی میزان نشت با توجه به ماهیت تصادفی پارامترهای هندسی تأثیرگذار درزه‌ها از جمله ناپایا بودن است. همچنین هدف دیگر، رفع محدودیت‌های مدل سازی هندسی در نرم‌افزارهای عددی و عدم وابستگی به شرایط اولیه تعریف شده در این نرم‌افزارها بوده است.

پیشینه‌ی مطالعات

مطالعات هادسون و لاپونته^۴ در زمینه تراوایی و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد مدل‌های تصادفی دانست (هادسون و لاپونته، ۱۹۸۰). دراشویتز و انیشیتین^۵ یک مدل تصادفی ارائه نمودند که با در نظر گرفتن تغییرات فاصله‌داری و پایایی ناپیوستگی، شبکه درزه واقعی تری را ایجاد می‌کرد (دراشویتز و انیشیتین ۱۹۸۸). پریست و سامانیگو^۶ اقدام به توسعه این مفهوم در زمینه تحلیل پایداری بلوک نمودند (پریست و سامانیگو، ۱۹۸۸). ارائه‌ی مدل هندسی سلسله مراتبی در ارتباط با فرآیندهای پایه‌ای ایجاد درزه توسط ریس و انیشیتین^۷ و مدل هندسی — مکانیکی ارائه‌شده توسط مارتل^۸ و

۹ - Zhang

۱۰ - Gattinoni

۱۱ - Chesnaux

۱۲ - Lio

۱۳ - Noorian Bidgoli and Jing

۱۴ - Ren

۱۵ - Li

۱ - De Dreuzy

۲ - Distinct Element Method.

۳ - Universal Distinct Element Code

۴ - Hudson and La Pointe

۵ - Dershowitz and Einstein

۶ - Priest and Samaniego

۷ - Reyes and Einstein

۸ - Martel

$$c_{ij} = \frac{wb_h^3}{12\mu l_{ij}}$$

در رابطه فوق H_i هد کلی در گره A_m ، Q_{ij} دبی جریان عبوری از کانال (شکستگی) حدفاصل بین گره‌های A_j و A_i که جریان از i به سمت j مثبت در نظر گرفته می‌شود، c_{ij} ضریب هدایت مربوط به کانال حدفاصل گره‌های A_j و A_i 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 کوپیک گفته می‌شود (نوریان بیدگلی و جینگ، ۲۰۱۵). 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:

$$[E]\{H\} = 0 \quad (2)$$

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 (رولئو و گاله^۴، ۱۹۸۷):

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

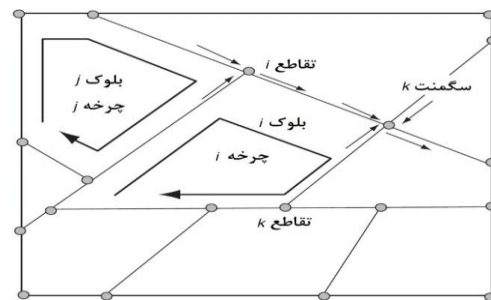
اندیس f و c در معادله (۳) به ترتیب مربوط به گره آزاد (هد مجهول) و گره غیرآزاد (هد معلوم) است. مقدار درایه i ام بردار نرخ جریان $\{Q\}$ برای گره‌های مرزی با هد ثابت به صورت غیر صفر و برای گره‌های داخلی صفر

از روش DFN مدل‌سازی کردند (لی و همکاران، ۲۰۱۸). (ب-۱)

زو^۱ و همکاران برای شبیه‌سازی حالت پایدار جریان سیال در شبکه شکستگی‌های سنگ با استفاده از یک فرآیند تکرار مدل‌سازی جریان، از مدل DFN در نرم‌افزار COMSOL استفاده کردند (زو و همکاران، ۲۰۱۸). شهبازی نیز در مقاله‌ای انواع روش‌های مختلف تعیین هدایت هیدرولیکی در توده سنگ‌های درزه‌دار را مرور نمود (شهبازی و همکاران، ۲۰۲۰).

حل معادله جریان در سیستم شکستگی‌های متصل

تحلیل جریان شبکه شکستگی‌ها، بر اساس اجزای سگمنت‌های شکستگی، تقاطع‌ها و چرخه‌هاست. تقاطع‌ها محل‌هایی هستند که در آنجا دو یا تعداد بیشتری از شکستگی‌ها به هم می‌رسند و مهم‌ترین ویژگی یک شبکه برای هدایت جریان است. بخشی از شکستگی بین دو تقاطع مجاور را سگمنت، و مجموعه سگمنت‌های شکستگی‌هایی که تشکیل یک بلوک کامل را می‌دهند، یک چرخه شکستگی نامیده می‌شوند (جینگ و استفانسون^۳، ۲۰۰۷). در شکل (۱) شبکه شکستگی ایده‌آل به همراه اجزای آن نشان داده شده است. 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 (الف) و (ب-۱) محاسبه می‌شود:



(۳)

شکل (۱): شبکه شکستگی ایده‌آل دوبعدی برای تحلیل جریان (جینگ و استفانسون، ۲۰۰۷)

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

۳ -Jing and Stephansson

۴ - Rouleau and Gale

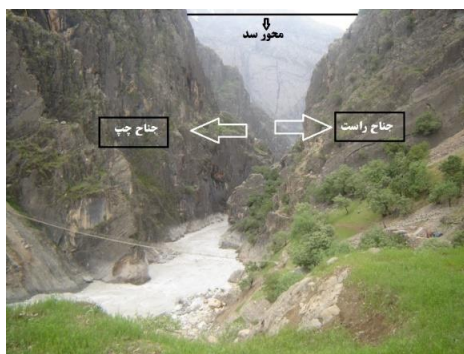
۱- Xu

۲ -Segment

می‌باشند (توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۵). در شکل (۳) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به ساختگاه سد لیرو قابل مشاهده است. محل محور سد در این تنگه قرار دارد، شکل (۴) دره محل محور سد لیرو در ساختگاه را از نمای روبرو نمایش می‌دهد. از لحاظ زمین‌ریخت‌شناسی گستره طرح یک منطقه کوهستانی با کوه‌های بلند است. آهک تله‌زنگ که ساختگاه سد لیرو بر روی آن قرار دارد یک ساختار تک شیب است که در زیر سازند کشکان و در روی سازند امیران قرار گرفته است (گهرویی و همکاران، ۱۳۹۷).



شکل (۳): موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به سد لیرو



شکل (۴): دره محل محور سد در آهک‌های تله‌زنگ دید به سمت جنوب

این ساختار تک شیب در واقع قسمتی از یال جنوب‌غربی طاق‌دیس بزرگ فرسایش یافته‌ی پز است (شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۱۳۷۹).

درزه‌نگاری منطقه

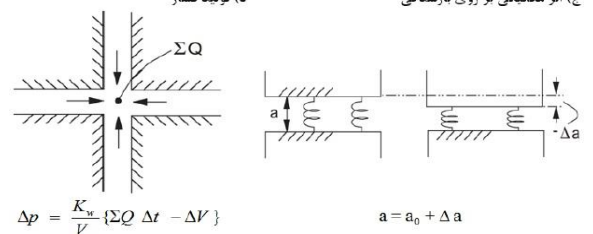
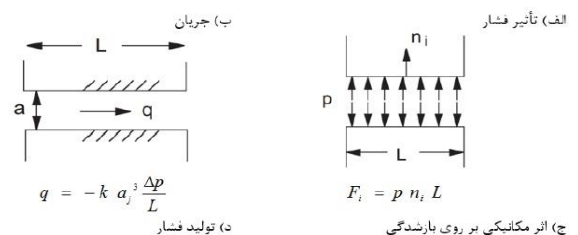
عملیات درزه‌نگاری را می‌توان به سه زیربخش برداشت، ترسیم و تفکیک دسته‌درزه‌ها و تحلیل آماری تقسیم کرد (امامی میبیدی و همکاران، ۱۳۹۵). در مجموع تعداد ده

خواهد بود. برای معادله (۳) ماتریس E و هد کلی بر اساس گره‌های داخلی به صورت معادله (۴) مرتب‌سازی می‌شود:

$$[E_{ff}]\{H_f\} + [E_{fc}]\{H_c\} = \{Q_f\} \quad (4)$$

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.

UDEAC یک نرم‌افزار عددی دوبعدی بر پایه روش المان گسسته است. این نرم‌افزار قابلیت انجام تجزیه و تحلیل جریان سیال از طریق یک سیستم شکستگی در بلوک‌های نفوذناپذیر را دارد. به وسیله‌ی نرم‌افزار تجزیه و تحلیل توأمان مکانیکی- هیدرولیکی انجام می‌شود، که در آن هدایت هیدرولیکی درزه و تغییر شکل مکانیکی دارای ارتباط دو سویه است. اثرات مدل شده در این نرم‌افزار در شکل (۲) خلاصه شده است.



شکل (۲): اندرکنش سیال-جامد در ناپیوستگی (ایتاسکا، ۲۰۰۶)

در شکل (۲) باز شدگی درزه در تنش عمودی صفر و باز شدگی هیدرولیکی است.

مشخصات کلی، موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده سد

سد لیرو با ۲۴۰ متر ارتفاع از پی و طول تاج ۲۹۵ متر با حجم مخزن کل ۶۷۵ و حجم مفید ۳۹۷ میلیون مترمکعب یکی از سد‌های بزرگ از نوع بتنی دوقوسی به‌شمار می‌رود. طول و عرض جغرافیایی نقطه احداث بدنه سد لیرو به ترتیب: $49^{\circ} 31' E$ و $33^{\circ} 20' N$

دسته درزه‌ی برشی است. جهت شیب سطوح لایه‌بندی چین‌خورده با جهت شیب دسته‌درزه‌ی برشی و دسته‌درزه‌ی کششی هم امتداد با محور سد، تقریباً یکسان است. همچنین مقدار شیب سطوح لایه‌بندی بین شیب دسته‌درزه‌ی برشی و دسته‌درزه‌ی کششی و نزدیک به شیب دسته‌درزه‌ی برشی است. با توجه به صعب‌العبور بودن و نبود دسترسی به سطوح برداشت زیاد و حتی نبود امکان تهیه تصویر باکیفیت و مناسب از فاصله‌های نزدیک، تفکیک دقیق و کامل دسته‌درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی ممکن نبود و در بسیاری از موارد تداوم سطوح شکستگی برداشت‌شده به راحتی قابل برآورد نبود. به همین دلیل سطوح برداشت‌شده در قالب دودسته درزه کلی تفکیک‌شده‌اند و سعی شد تا با توابع توزیع آماری مناسب گستره‌ی تغییرات جهت‌داری و تمرکز آن در دسته‌درزه‌ها در مدل هندسی لحاظ شود. با استفاده از نرم‌افزار آماری Easyfit، تابع چگالی احتمال مؤلفه‌های هندسی برداشت‌شده برآورد شد. برای آزمودن این فرضیه که توزیع داده‌های برداشت‌شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال پیروی می‌کند یا خیر، از آزمون‌های بهترین برازش استفاده شد. به این ترتیب تابع چگالی احتمال شیب، جهت شیب، تداوم، فاصله‌داری، میزان بازشدگی و طول اثر درزه‌ها مشخص شد.

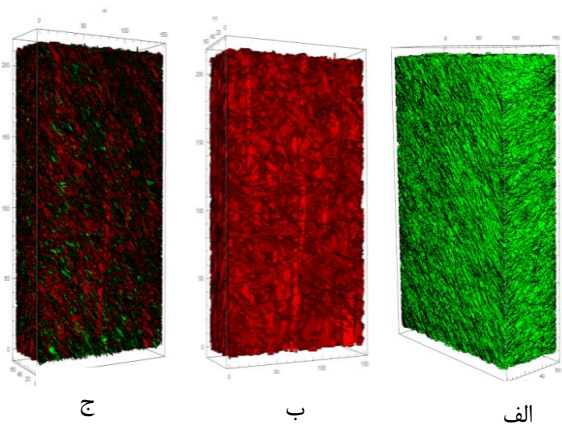


شکل (۵): نمایی از خط برداشت شماره ۲ در تکیه‌گاه سمت راست سد؛ دید در جهت حرکت رودخانه (جنوب)

خط برداشت ۳۰ متری، بسته به امکان دسترسی و برداشت در بخش‌های مختلف دیواره‌های چپ و راست تکیه‌گاه سد لیرو برداشت شد. در شکل (۵) نمایی از یکی از خطوط برداشت نشان داده شده است. مؤلفه‌های مهم برداشت‌شده شامل، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، تداوم، فاصله‌داری، پایان‌یابی (مشخص بودن ابتدا و انتهای درزه) و چگالی درزه‌داری می‌باشند. همچنین از پنجره برداشت، مانند شکل (۶) طراحی و ساخته شده با ابعاد ۱ متر در یک متر و چشمه‌های ۱۰ سانتیمتری برای تعیین چگالی درزه‌داری سطحی (تعداد درزه‌ها در واحد سطح) (P₂₀) استفاده شد. با توجه به دسته‌درزه‌های قابل تفکیک در هر یک از ده ایستگاه برداشت، بر مبنای مؤلفه‌های شیب و جهت شیب، مشخص شد که به‌طور کلی، دودسته درزه اصلی در این منطقه موجود است. بنابراین، برای تشخیص و تفکیک بهتر دسته‌درزه‌ها، همه‌ی درزه‌های موجود مطابق شکل (۷) و به‌صورت یکجا تحلیل شده است. در مورد سیستم درزه و شکستگی این منطقه ذکر این نکته ضروری است که هر دو تکیه‌گاه چپ و راست در انتهای یال جنوب غربی طاق‌دیس پز قرار گرفته‌اند. همچنین محور سد با طاق‌دیس که روندی شمال‌غربی-جنوب شرقی دارد هم امتداد است. سطوح لایه‌بندی در این دو دیواره دارای جهت شیب N210 و شیب تقریبی ۵۵ درجه هستند (شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۱۳۷۹). در تاق‌دیس‌ها معمولاً دو دسته‌درزه‌ی کششی با امتداد موازی و عمود بر امتداد محور طاق‌دیس و دو دسته‌درزه‌ی برشی به صورت مزدوج هم امتداد با محور طاق‌دیس وجود دارند. با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت که دو دسته‌درزه‌ی کششی، یک دسته‌درزه‌ی برشی و همچنین جهت‌داری سطوح لایه‌بندی در درزه‌های برداشت‌شده که به‌صورت کلی به دودسته درزه تفکیک‌شده‌اند، وجود دارد. به عبارت دیگر درزه‌های موجود در دسته‌درزه‌ی شماره‌ی یک بیشتر از نوع درزه‌های کششی عمود بر محور سد و طاق‌دیس هستند و درزه‌های تفکیک‌شده در قالب دسته‌درزه‌ی شماره‌ی دو شامل درزه‌های کششی هم امتداد با محور سد و طاق‌دیس، سطوح لایه‌بندی و یک

مدل هندسی با ابعاد $210 \times 150 \times 60$ (برحسب متر) ساخته شد، با استفاده از کد تهیه‌شده‌ی 3D-DFN، مدل شبکه درزه‌ها تهیه شد. یک نمونه از مدل ساخته‌شده در شکل (۹) به تفکیک هریک از دسته‌درزه‌ها و به صورت کلی نشان داده‌شده است. با توجه به قابلیت‌های تعریف‌شده در کد 3D-DFN، پس از اجرای هر دفعه مدل سازی برای یک دسته‌درزه، امکان محاسبه و تعیین تمامی مشخصات آماری مؤلفه‌های هندسی درزه‌های شبیه‌سازی‌شده وجود دارد. همچنین با توجه به قابلیت تکرار مدل سازی تصادفی، می‌توان شبیه‌سازی را به تعداد دلخواه تکرار نمود و درنهایت از بین مدل‌های ساخته‌شده، مدلی با بیشترین انطباق آماری با داده‌های ورودی را به‌عنوان مدل شبیه‌سازی نهایی انتخاب کرد.

به‌عنوان نمونه آماره‌های مربوط به مخلفه شیب هر دودسته درزه حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های ورودی در جدول (۱) نشان داده‌شده است. مؤلفه‌های شدت درزه‌داری خطی، سطحی و حجمی (P_{10} ، P_{21} و P_{32}) نیز پس از محاسبه در مدل نهایی خروجی با مؤلفه‌های برداشت شده مقایسه شده‌اند. P_{10} تعداد درزه‌ها در واحد طول خط برداشت است. شدت درزه در دو بعد، P_{21} به‌عنوان طول کلی درزه در داخل مساحت داده‌شده تعریف می‌شود. پارامتر سه‌بعدی شدت درزه، P_{32} به‌صورت مساحت کلی سطح درزه‌دار بر واحد حجم تعریف می‌شود. نتایج در جدول (۲) ارائه شده است.

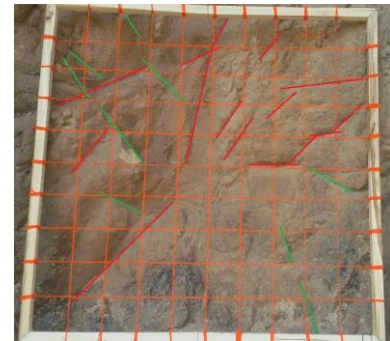


شکل (۹): خروجی مدل ساخت شبکه درزه‌ها (الف) دسته‌درزه ۱.

(ب) دسته‌درزه ۲. (ج) دسته‌درزه‌های ۱ و ۲

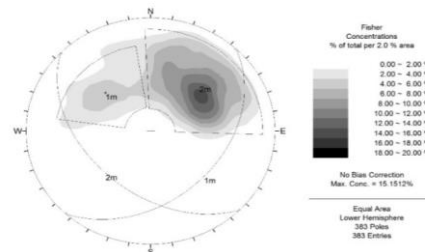
جدول (۱): مؤلفه‌های آماری شیب دسته‌درزه‌ها، برداشت‌شده و پس از مدل‌سازی به‌وسیله‌ی 3D-DFN

شیب (درجه)	

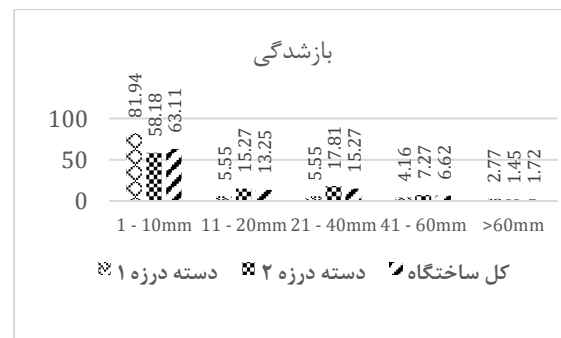


شکل (۶): اندازه‌گیری چگالی درزه‌داری سطحی (P_{20}) با استفاده از پنجره مشبک

به‌عنوان نمونه دسته‌بندی بازشدگی درزه‌ها به تفکیک هر دسته‌درزه و در کل ساختگاه در شکل (۸) نشان داده‌شده است.



شکل (۷): تفکیک دسته‌درزه‌های برداشت‌شده از بخش‌های مختلف دیواره‌های چپ و راست تکیه‌گاه سد لیرو



شکل (۸): آنالیز آماری بازشدگی ناپیوستگی‌ها در ساختگاه

ساخت مدل هندسی به روش DFN و اعتبارسنجی با توجه به توابع توزیع طول خط اثر درزه‌های برداشت‌شده، ارتفاع دیواره‌های تکیه‌گاه‌ها و برآورد اولیه‌ای از حداکثر عمق نفوذ آب در تکیه‌گاه‌ها در تحلیل‌های هیدرولیکی،

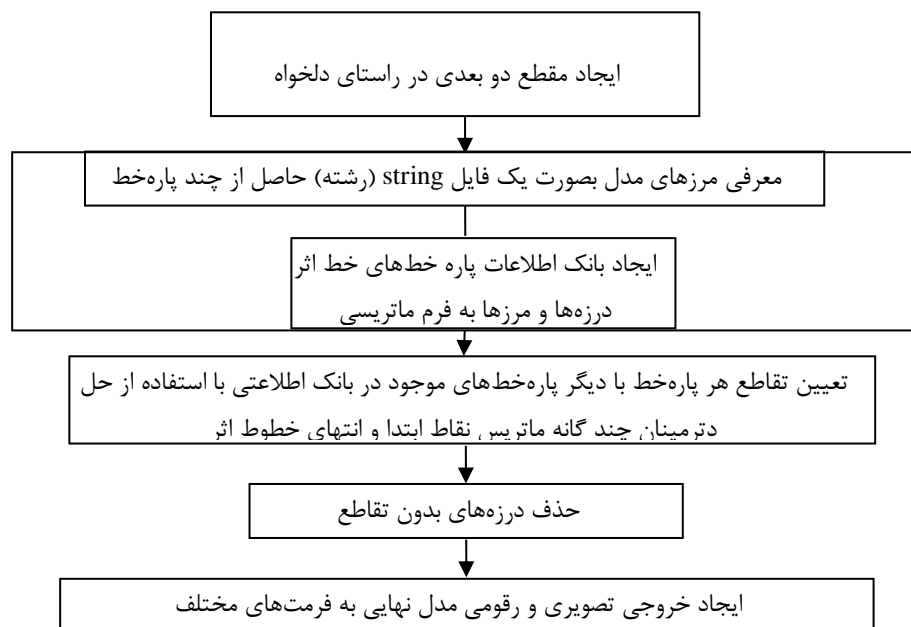
دسته درزه	برداشت شده			خروجی مدل 3D-DFN		
	میانگین	انحراف استاندارد	تابع توزیع	میانگین	انحراف استاندارد	تابع توزیع
۱	۴۲/۹	۱۱/۵۹	نرمال	۴۱/۸	۱۰/۶۸	نرمال
۲	۴۹/۷	۱۴/۲۳	نرمال	۴۹/۳	۱۳/۴۷	نرمال

جدول (۲): مقایسه داده‌های شدت درزه‌داری ورودی و خروجی مدل

مؤلفه‌های مقایسه شده	درصد انطباق	داده‌ها			
		ورودی مدل‌سازی		خروجی مدل‌سازی	
		دسته درزه ۱	دسته درزه ۲	دسته درزه ۱	دسته درزه ۲
P10	>:۹۰	۰/۷	۲/۸۵	۰/۷	۲/۹۳
P21	>:۷۵	۱/۱۸	۲/۵۸	۱/۸۹	۳
P32	>:۹۰	۱/۲۹	۴/۱۳	۱/۹۵	۴/۰۵

مرزها نمی‌رسند حذف خواهد شد. روند نمای الگوریتم اضافه شده به صورت خلاصه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقطع تهیه شده توسط کد 3D-DFN در محل تکیه‌گاهها به فرمت نرم‌افزار عددی خروجی گرفته شد. در شکل (۱۱) خط اثر درزه‌ها در مقطع دوبعدی به همراه هندسه‌ی تکیه‌گاه‌های چپ و راست قبل از اعمال الگوریتم توسعه یافته جدید مشاهده می‌گردد.

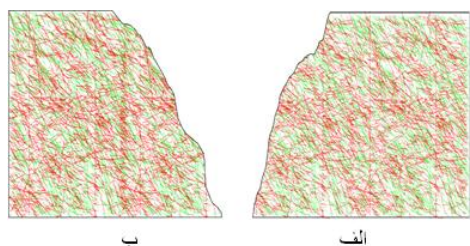
توسعه کد 3D-DFN و تحلیل هیدرولیکی تکیه‌گاهها
به منظور بهینه کردن خروجی کد 3D-DFN برای استفاده در تحلیل‌های هیدرولیکی، الگوریتم جدیدی به آن اضافه شد، با استفاده از این الگوریتم درزه‌های به هم متصل که می‌توانند مسیر جریان باشند به خوبی مشخص می‌گردد. این بخش قابلیت شناسایی درزه‌ها تا اتصال آن‌ها به مرزها را دارد و درزه‌هایی که در نهایت دو سر آن‌ها به داخل مدل محدود شده و به درزه‌های دیگر و به



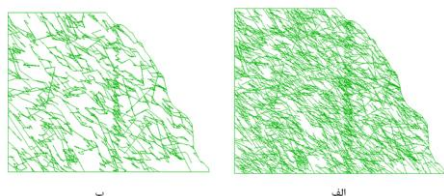
شکل (۱۰): روند نمای الگوریتم توسعه کد 3D-DFN

در مدل‌سازی هیدرولیکی تنها درزه‌هایی که به یکدیگر متصل و در نهایت به مرزهای مدل وصل هستند در نظر

سطح درزه‌ها و باز و بسته شدن درزه‌ها در اثر وزن و فشار سیال مدنظر بوده است. بلوک‌های چسبیده به مرزهای کناری و کف ثابت شده‌اند. با توجه به اینکه مرز کف طبق اصول سدسازی از لحاظ هیدرولیکی نفوذناپذیر است. مرز کناری برای اینکه نشت غیرواقعی مدل نشود باید نفوذناپذیر در نظر گرفته شود. فاصله مرزهای کناری تا مرز آزاد (سطح تکیه‌گاه‌های سد در تماس با آب) باید به گونه‌ای انتخاب شود که فشار سیال تا رسیدن به مرزهای کناری تقریباً به صفر برسد. با سعی و خطا در مدل عددی این فاصله ۱۵۰ متر از کف برای هر دو تکیه‌گاه تعیین گردید. تعداد ده نقطه به‌عنوان ثبت‌کننده نرخ جریان بر روی مرزهای اشباع هر تکیه‌گاه انتخاب شد، تا بعد از اجرای مدل تغییرات نرخ جریان سیال وارده به تکیه‌گاه را نشان دهد، همچنین زمان به تعادل رسیدن مدل را می‌توان از روی ثابت و یا به صفر رسیدن نرخ جریان در این نقاط تعیین کرد. با اجرای چرخه‌ی محاسباتی و به تعادل رسیدن مدل، نمودارهای ثبت نرخ جریان آب خروجی گرفته شد. داده‌های واردشده به نرم‌افزار برای تحلیل هیدرولیکی در جدول (۳) ارائه شده است. شکل‌های (۱۴-الف) و (۱۴-ب) به ترتیب نمودارهای ثبت جریان آب به ترتیب به داخل تکیه‌گاه‌های راست و چپ در نقاط مختلف نسبت به زمان را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): مقطع تکیه‌گاه‌ها، خروجی 3D-DFN



شکل (۱۲): تکیه‌گاه چپ (الف) قبل از حذف درزه‌های بی‌تأثیر (ب) بعد از حذف درزه‌های بی‌تأثیر در جریان هیدرولیک

گرفته می‌شود چراکه تنها این نوع از درزه‌ها باعث ایجاد تخلخل ثانویه مؤثر در توده سنگ خواهند شد. این مرحله توسط الگوریتم توسعه داده شده در کد 3D-DFN انجام می‌شود. به‌عنوان نمونه در شکل (۱۲) درزه‌های مؤثر مقطع تکیه‌گاه چپ نشان داده شده است. ابعاد کلی هر مقطع برابر با ۱۵۰×۲۱۲ متر است. ماده سنگ کاملاً نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود و نفوذپذیری مربوط به ناپیوستگی‌ها است، این مقدار با توجه به راهنمای نرم‌افزار عددی از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$K_j = \frac{1}{12\mu} \quad (5)$$

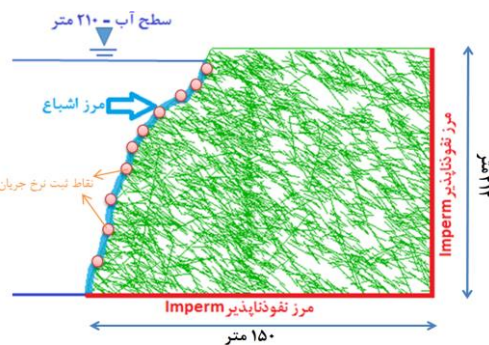
K_j : فاکتور نفوذپذیری درزه برحسب (۱/pa.s)، μ :

ویسکوزیته دینامیک سیال که در مورد آب برابر با 10^{-3} pas.s است.

قبل از انجام مدل‌سازی، صحت سنجی کارایی نرم‌افزار با استفاده از مدل‌سازی مثال‌های تحلیل هیدرولیک موجود در راهنمای نرم‌افزار انجام شد که جواب‌ها به‌طور کامل مشابه با جواب‌های موجود در راهنمای نرم‌افزار بود. در مرحله‌ی بعد برای اعتبارسنجی مدل‌سازی هیدرولیکی انجام‌شده، با فرض اینکه جریان صرفاً در شبکه شکستگی‌های به هم مرتبط توده سنگ اتفاق خواهد افتاد در صورت داشتن مدل هندسی تا حد امکان نزدیک به واقعیت، می‌توان از صحت نتایج تحلیل هیدرولیک اطمینان داشت. این صحت سنجی در بخش تهیه‌ی مدل هندسی انجام شد.

مرز بالای مدل به‌عنوان مرز آزاد، مرز کف و کناره هر مدل به‌عنوان مرز نفوذناپذیر و مرز منتهی به دره به‌عنوان مرز اشباع با اعمال فشار آب در نظر گرفته شده است. به‌عنوان نمونه ابعاد، شرایط مرزی و سطح آب برای تکیه‌گاه راست در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در نرم‌افزار عددی UDEC قابلیت تحلیل با و بدون مش‌بندی وجود دارد. در این نرم‌افزار به‌صورت پیش‌فرض بلوک‌های سنگی (ماده سنگ) تغییر شکل‌ناپذیر (بدون مش‌بندی) و درزه‌ها تغییر شکل‌پذیر هستند. در این نوع تحلیل تنها بلوک‌های سنگی چسبیده به مرزهای کف و کنار ثابت خواهند شد و تأثیری در تحلیل هیدرومکانیکی بقیه‌ی توده نخواهند داشت. در تحلیل انجام‌شده حرکت بلوک‌های سنگی روی

محور افقی زمان در این نمودارها زمان واقعی نیست بلکه زمان اجرای گام‌های محاسباتی در نرم‌افزار است. هر نمودار بیانگر و معرف مقدار نرخ جریان در هر سری از ناپیوستگی‌های به هم مرتبط است که از مرز اشباع شروع می‌شود. با شروع مدل‌سازی نمودار نرخ جریان از صفر حرکت کرده و به حداکثر دبی می‌رسد. بعد از مدتی اندکی از آن کاسته و با گذشت زمان و کاهش گرادینان هیدرولیکی مقدار جریان ورودی به ناپیوستگی ثابت می‌شود. پس از اجرا شدن و رسیدن به حالت تعادل نشت از تکیه‌گاه‌ها ارزیابی شد. در شکل‌های (۱۵-الف) و (۱۵-ب) به ترتیب مناطق تحت تأثیر فشار آب در تکیه‌گاه‌های راست و چپ همراه با خطوط جریان سیال در مدل را می‌توان مشاهده کرد.

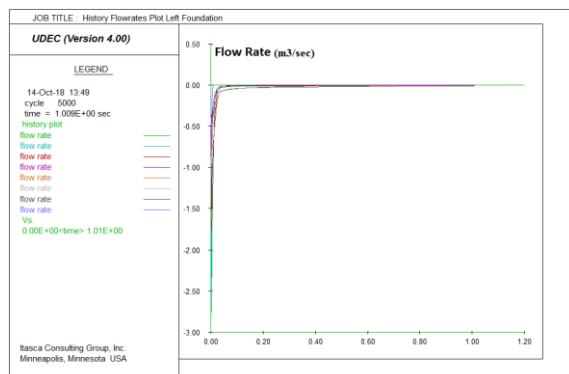


شکل (۱۳): نمایش شرایط مرز هیدرولیک در تکیه‌گاه راست بعد از به تعادل رسیدن جریان در مدل و اتمام مدل‌سازی، نمودارهای نرخ جریان به صورت خطی صاف قابل مشاهده هستند. محور عمودی نمودار، نشان‌دهنده میزان دبی ناپیوستگی یا درزه برحسب مترمکعب بر ثانیه و محور افقی بیانگر زمان است. باید به این نکته توجه داشت که

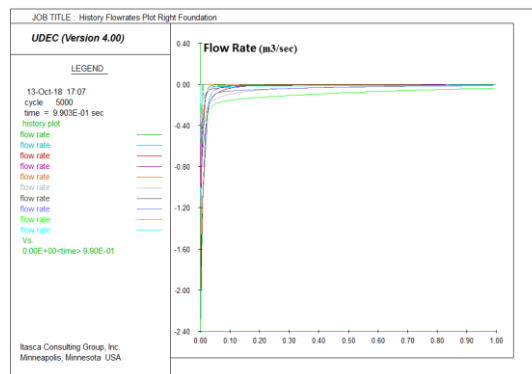
جدول (۳): مشخصات داده‌های ورودی به نرم‌افزار جهت اجرای مدل هیدرولیکی

حداکثر	دانسیته آب (kg/m^3)	بازشدگی (M)		نفوذپذیری درزه ($\text{pas}^{-1}\text{sec}^{-1}$)	شرایط مرزی			گروایته (m/s^2)	سطح آب (m)
		ثانویه	اولیه		اشباع	ثابت	نفوذناپذیر		
۰/۰۲۰	۱۰۰۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۵	۱۰۰	منتهی به دره	کف	کف	-۱۰	۲۱۰
						کناره‌ها	کناره‌ها		

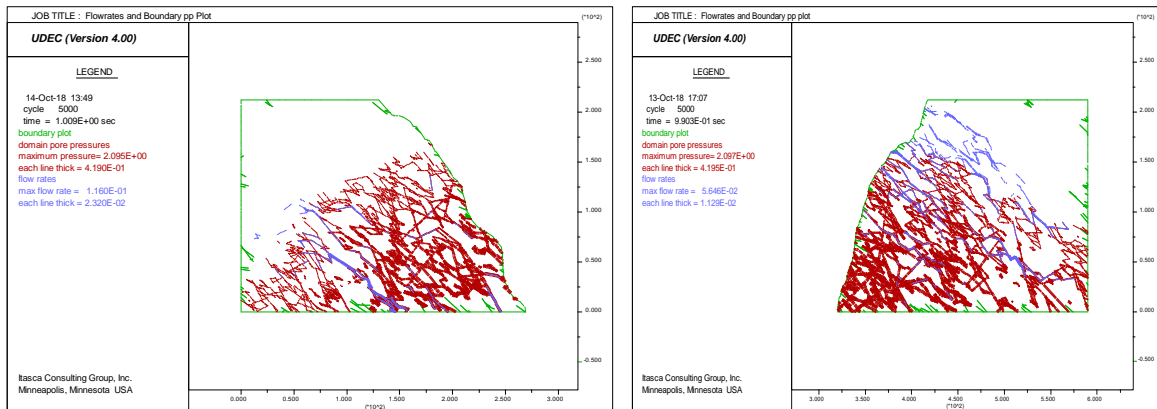
شکل (۱۴): نمودار ثبت تغییرات جریان آب در تکیه‌گاه‌ها (الف) تکیه‌گاه راست (ب) تکیه‌گاه چپ



ب



الف



ب

الف

شکل (۱۵): منطقه تحت تأثیر فشار آب به همراه خطوط جریان سیال (الف) تکیه‌گاه راست (ب) تکیه‌گاه چپ

نتیجه‌گیری

۱۳۵۴۱۵ مترمکعب در سال برابر با ۰/۰۲ درصد حجم کل و ۰/۰۳۴ درصد از حجم مفید مخزن را شامل می‌شوند.

(ج) میزان نشت در تکیه‌گاه راست نسبت به تکیه‌گاه چپ بیشتر تخمین زده شد. این امر به دلیل جهت شیب درزه‌ها نسبت به تکیه‌گاه‌ها است. در تکیه‌گاه راست جهت شیب درزه‌ها به گونه‌ای است که آب راحت‌تر نفوذ می‌کند، اما برای تکیه‌گاه چپ نفوذ آب درون درزه‌ها در مناطق نزدیک به سطح آب میسر نیست و در عمق که فشار سیال بالا است نشت اتفاق می‌افتد.

(د) با توجه به قابلیت‌های ذکرشده از کد 3D-DFN می‌توان از آن برای تعریف دقیق‌تر هندسه ناپیوستگی‌ها استفاده کرد و پس از اعتبارسنجی نتایج، خروجی آن را با اطمینان در نرم‌افزارهای عددی به منظور تحلیل‌های پایداری و هیدرولیکی استفاده نمود.

مراجع

- ۱- مامی میبدی، ع.، جلالی، م. و یاراحمدی باقی، ع.، ۱۳۹۵. "مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی گسسته به منظور برآورد خرد شونده‌گی برجای توده سنگ در روش‌های استخراج تخریبی." مقاله نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران. دوره ۹ شماره ۱۲ صفحه ۴۴-۲۷
- ۲- جوادی اسطهبانی، م.، شریفزاده، م. (۱۳۹۳). "مدل‌سازی جریان سیال در محیط ناپیوسته با استفاده از شبکه شکستگی مجزا"، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۲۰-۲، شماره ۳، صفحه ۱۱۶-۱۰۷.

جریان سیال در تکیه‌گاه‌های سنگی سد به صورت عمده از طریق ناپیوستگی‌های متصل به هم کنترل می‌شود. در نتیجه برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده سنگ باید از روش ناپیوسته استفاده کرد. بدین منظور کد محاسباتی 3D-DFN در محیط نرم‌افزار مَتِمَتیکا^{۳۱} برای ساخت شبکه شکستگی گسسته تهیه و 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 گسسته صورت گرفته است. پس از تجزیه و تحلیل و انجام آزمون‌های آماری، بهترین برازش تابع توزیع بر مؤلفه‌های هندسی برداشت شده تعیین و برای مدل‌سازی هندسی استفاده شد. در نهایت با توجه به ارزیابی‌های انجام شده در تحلیل جریان سیال نتایج زیر ارائه شده است:

(الف) 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 خواص مناسب هندسه شکستگی‌هاست. (ب) پس از اجرای مدل هیدرولیکی نرخ جریان سیال در تکیه‌گاه چپ برابر با ۳۶۸۶۵ مترمکعب در سال و نرخ جریان در تکیه‌گاه راست برابر با ۹۸۵۵۰ مترمکعب در سال برآورد شد. در کل میزان نشت از این دو تکیه‌گاه

- Extensional Fracture Systems in the Proterozoic Basement of Yemen, Tectonic interpretation and fluid flow implications". *Journal of Structural Geology*, 33(4), 519-536. DOI:10.1016/j.jsg.2011.01.012.
- 16- Li, L., Huang, B., Li, Y., Hu, R., Li, X. (2018). "Multi-scale modeling of shale laminas and fracture networks in the Yanchang formation, Southern Ordos Basin, China". *Engineering Geology*, Volume 243, 4 September 2018, Pages 231-240.
- 17- Liu, X., Wang, S., Wang, E. (2011). "A study on the uplift mechanism of Tongjiezi dam using a coupled hydro-mechanical model" *Engineering Geology*, Volume 117, Issues 1-2, 10 January 2011, Pages 134-150
- 18- Martel, S., Hestir, K., Long, J.C.S., (1991). "Generation of Fracture Patterns Using Self-Similar Function Concepts. Earth Sciences Division Annual Report", Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, California, 52-56.
- 19- 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
- 20- Neuman S P. Trends. (2005), "prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, *Hydrogeol*", J., 13, pp. 124-147.
- 21- Noorian Bidgoli, M., Jing, L. (2015) "Water Pressure Effects on Strength and Deformability of Fractured Rocks Under Low Confining Pressures", *Rock Mechanics and Rock Engineering* volume 48, pages 971-985
- 22- Pine R.J., Coggan, J.S., Flynn, Z., Elmo, D., (2006). "The development of a comprehensive numerical modelling approach for pre-fractured rock masses". *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 39. 5: 395-419.
- 23- Priest, S.D., Samaniego, J.A., (1988). "The Statistical Analysis of Rigid Block Stability in Jointed Rock Masses". 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, (pp. 398-403), Barton, A.C.T.: Institution of Engineers, Australia, Sydney. ISBN: 0858254271 & 0858254085.
- 24- 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.
- 25- 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
- 26- Reyes, O., Einstein, H. H., (1991). "Failure Mechanics of Fractured Rock - A Fracture
- ۳- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، سامانه اطلاعات سدها. ۱۳۹۵، "شناسه فنی سد لیرو"
- ۴- شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۱۳۷۹، گزارش زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی محدوده طرح سد لیرو.
- ۵- شریفزاده، م. کارگر، س. ترابی، ا. (۱۳۸۵)، "تحلیل هیدرومکانیکی توده سنگ اطراف تونل با استفاده از شبکه شکستگی مجزا"، هفتمین کنفرانس ملی تونل، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف.
- ۶- گهرویی باجگیرانی، ف.، امامی میبیدی، ع.، مهرنهاد، ح. (۱۳۹۷). "مدلسازی هندسی درزه‌ها به روش شبکه شکستگی‌های گسسته سه‌بعدی (مطالعه موردی ساختگاه سد لیرو)". مقاله نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران. دوره ۱۱ شماره ۳ صفحه ۴۶-۲۹.
- 7- Adler, P., Thovert, J. (1999). *Fractures and fracture networks: theory and applications of transport in porous media*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- 8- Chesnaux, R., Allen, D.M., Jenni, S. (2009). "Regional fracture network permeability using outcrop scale measurements". *Engineering Geology*, Volume 108, Issues 3-4, 8 October 2009, Pages 259-271.
- 9- Dershowitz, W.S., Einstein, H.H., (1988). "Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models". *Rock Mechanics and Rock Engineering* 21(1), 21-51. DOI:10.1007/BF01019674.
- 10- 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.
- 11- Gumede, H., & Stacey, T. R. (2007). "Measurement of Typical Joint Characteristics in South African Gold Mines and the Use of These Characteristics in the Prediction of Rock Falls". *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107, 335-344. ISSN: 0038-223X/3.00.
- 12- Hudson, J.A., La Pointe, 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. DOI:10.1016/0148-9062(80)90812-8.
- 13- ITASCA Consluting Group Ins., (2006), "UDEC Manual".
- 14- Jing, L., Stephansson, O. (2007), "Fluid Flow and Coupled Hydro-Mechanical Behavior of Rock Fractures in Developments" *Geotechnical Engineering*, vol. 85, Elsevier, pp. 111-144.
- 15- Le Garzic, E., & L'Hamaide, T., & Diraison, M., & et al. (2011). "Scaling and Geometric Properties of

- 31- Wanga, C.; Tannant, D. D.; Lilly, P. A., (2003), "Numerical analysis of the stability of heavily jointed Rock slopes using PFC2D". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 415–424
- 32- 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.
- 33- Xu, Ch., Fidelibus, C., Dowd, P., Wang, Z., Tian, Z., (2018) . "An iterative procedure for the simulation of the steady-state fluid flow in rock fracture networks". pp160-168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.005>
- 34- Zhang, F., Zhou, Z., Huang, Y, and. Chen, Z.,(2004), "Determining the permeability of fractured rocks based on joint mapping," *Ground Water*, vol. 42, no. 4, p. 509.
- 35- 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.
- Coalescence Model". 7th International Society for Rock Mechanics, A.A. Balkema. Permission to Distribute –
- 27- Rogers, S. F., Kennard, D. K., Dershowitz, W. S., vanas, A. (2007), "Characterising the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach", *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands - Eberhardt, Stead & Morrison (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44401-9.*
- 28- Rogers, S.F., Elmo, D., Catalan, A., (2014). "Volumetric Fracture Intensity Measurement for Improved Rock Mass Characterisation and Fragmentation Assessment in Block Caving Operations". *International Journal of Rock Mechanics Rock Engineering*, 44(5), 704– 719.
- 29- 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.
- 30-Shahbazi, A., Saeidi, A., Chesnaux, R. (2020). "A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass", *Engineering Geology*, Volume 265, February 2020, 105438.

Liroo dam abutments leakage analysis using DFN-DEM hybrid method

Enayatallah Emami Meybodi*^۱

farzad gahrue bajgirani^۲

Abstract:

The Liroo Dam is one of the largest concrete dams in the country under study. The objective is to investigate and estimate the amount of water leakage from joints and fractures in dam abutments using numerical method. Interconnected fractures are the main pathways of water flow into the abutments and control the rock hydraulic behavior. Considering the stochastic properties of the geometric parameters of the joints, especially the persistence of the joints, and the presentation of a more realistic model is essential for hydraulic analysis. Therefore, geometric model of discrete fractures network (DFN) was prepared in 3D using 3D-DFN written code. Finally, after validation of DFN model constructed with the extracted values, it is found that the average fit for the different geometrical components and the values of the joints intensities are over 90%. These results were used as reliable inputs of the geometrical model for modeling the hydraulic flow of the left and right abutments using the Discrete Element Method (DEM) in the UDEC software. The total leakage rate was calculated to be 135415 m³ / year. Compared to the useful volume of the reservoir, the total leakage from both supports comprises 0.03% of this useful volume.

Key words:

Leakage Dam abutments, Discrete fracture Network, Discrete Element Method, UDEC

۱. Assistant Professor, Geological group, Yazd University. Email: en.emami@yazd.ac.ir

۲. Master graduate of Engineering Geology, Yazd University.