نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و هفتم /زمستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 27 / March 2021

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

عنایت الله امامی میبدی*[۱]
فرزاد گهرویی باجگیرانی[۲]

چکیده:

سد لیرو از سدهای بزرگ بتنی ــ 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 متصل‌به‌هم 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 ازلحاظ آماری معتبر بوده، گویای ویژگی‌های توده‌سنگ برجا باشد، به‌منظور تحلیل‌های هیدرولیک ضروری است. در بسیاری از مدل‌سازی‌های هندسی مؤلفه‌های هندسی درزه‌ها ازجمله پایایی، بازشدگی و جهت‌داری با فرض‌های غیرواقعی ساده کننده 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 درمجموع دو تکیه‌گاه برابر $m^3/Year$ ۱۳۵۴۱۵محاسبه 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 زمین شناسی. دانشگاه یزد. *en.emami@yazd.ac.ir*
۲-. کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی. دانشگاه یزد.

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹ /۱۰/۱۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

مقدمه

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 توده سنگ ا ست. از طرفی عدم قطعیت و تغییرپذیری در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در ارتباط با توده سنگ‌ها که از مواد طبیعی و ناهمگن ساخته شده‌اند اجتناب نا پذیر است. در بسیاری از ساختار های 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). توده سنگ‌ها دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که تاثیرات قابل توجهی را در جریان سیالات در توده سنگ دارند. توده سنگ‌ها شامل ناپیو ستگی‌های مختلف مانند گ سل،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 تاثیر گذار 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 نفوذ پذیری دوگانه در بعد عملی این روش ها 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 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 ا ستفاده از آنالیزهای آماری را ن شان می‌دهد (آدلر و ثوورت[۸]، ۱۹۹۹). در بسیاری از شیوه‌های مدل‌سازی توده‌سنگ، درزه‌ها با استفاده از بعضی فرض‌های غیرواقعی شبیه سازی می شوند، 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 شده‌ا ند ن مایش می‌د هد (پین[۱۰] و هم کاران، ۲۰۰۶). توسعه مدل سازی 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 سه‌بعد 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 ناپیوستگی های به هم مرتبط است. مدل های DFN می‌توانند بازه بزرگتری از تغییرات مقادیر جریان سیال را در مقایسه با مدل های معادل که مبتنی بر میانگین

۱ - Rapantova
۲ - Neuman and Trends
۳ - Wanga
۴ - Le Garzic
۵ - Gumede
۶ - Zhou
۷ - Xu
۸ - Adler and Thovert
۹ - Rogers
۱۰ - Pin

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

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 مدل‌سازی می‌کند.

با توجه به ماهیت توده‌سنگ درزه‌دار در این مقاله از روش المان مجزا[۲] (DEM) و نرم‌افزار UDEC[۳] استفاده‌شده است. در این مقاله ابتدا شبکه هندسه ناپیوستگی‌ها بر اساس پارامترها و توابع آماری به‌دست‌آمده از مؤلفه‌های هندسی برداشت‌شده مانند شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و تداوم ساخته‌شده است. پس‌ازاین مرحله مدل‌سازی هیدرولیکی انجام‌شده است. درمجموع هدف اصلی این مدل‌سازی، تخمین اولیه‌ای از نشت با توجه به شرایط درزه‌داری تکیه‌گاه‌ها بوده است. به‌عبارت‌دیگر این مدل پیش‌بینی کننده‌ی میزان نشت با توجه به ماهیت تصادفی پارامترهای هندسی تأثیرگذار درزه‌ها ازجمله ناپایا بودن است. همچنین هدف دیگر، رفع محدودیت‌های مدل‌سازی هندسی در نرم‌افزارهای عددی و عدم وابستگی به شرایط اولیه تعریف‌شده 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 انیشتین[۵] یک مدل تصادفی ارائه نمودند که با در نظر گرفتن تغییرات فاصله‌داری و پایایی ناپیوستگی، شبکه درزه واقعی‌تری را ایجاد می‌کرد (دراشویتز و انیشتین 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 انیشتین[۷] و مدل هندسی مکانیکی ارائه‌شده توسط مارتل[۸] و همکاران را می‌توان از دیگر نمونه‌های مدل‌های تصادفی توسعه داده شده دانست (ریس و انیشتین،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 مسیرهای 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). چسنائوکس[۱۱] با با استفاده از DFN نفوذپذیری آبخوان را براساس تغییر مقیاس برداشت به مقیاس منطقه‌ای تخمین زدند (چسنائوکس و همکاران، ۲۰۰۹). لیو[۱۲] به مطالعه بالازنندگی سدی در چین با استفاده از مدل کوپل هیدرومکانیکی با توسعه کدی به روش مدل‌سازی هندسی DFN پرداختند (لیو و همکاران، ۲۰۱۱). جوادی اصطهبانی و شریف‌زاده مدل‌سازی 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 تغییرشکل‌پذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل‌سازی 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). رِن[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

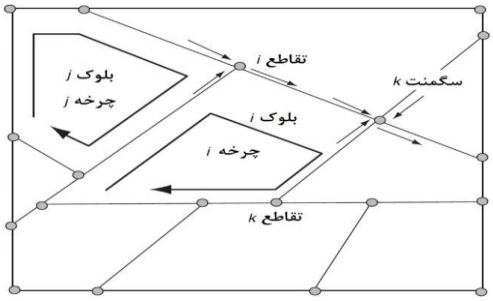
۱ - De Dreuzy
۲ -Distinct Element Method.
۳ -Universal Distinct Element Code
۴ - Hudson and La Pointe
۵ - Dershowitz and Einstein
۶ - Priest and Samaniego
۷ - Reyes and Einstein
۸ - Martel
۹ -Zhang
۱۰ - Gattinoni
۱۱- Chesnaux
۱۲ - Lio
۱۳ - Noorian Bidgoli and Jing
۱۴ -Ren
۱۵ -Li

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

از روش DFN مدل‌سازی کردند (لی و همکاران، ۲۰۱۸). زو[1] 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 سگمنت[2]های شکستگی، تقاطع‌ها و چرخه‌هاست. تقاطع‌ها محل هایی 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[3]، ۲۰۰۷). در شکل (۱) شبکه شکستگی ایده‌آل به همراه اجزای آن نشان داده‌شده است. ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار جریان درون شکستگی (کانال)، فرض صفحات موازی به‌عنوان دیواره‌های شکستگی است. با استفاده از این فرض و ساده سازی معادلات حاکم، دبی جریان عبوری از شکستگی به‌صورت معادلات (۱-الف) و (۱-ب) محاسبه می‌شود:



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

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

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

در رابطه فوق H_i هد کلی در گره iام، Q_{ij} دبی جریان عبوری از کانال (شکستگی) حدفاصل بین گره‌های i و j که جریان از i به سمت j مثبت در نظرگرفته می‌شود، c_{ij} ضریب هدایت مربوط به کانال حدفاصل گره‌های i و 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 کوبیک 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 به‌صورت ماتریسی و به شکل رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$[E]\{H\} = 0 \qquad (۲)$$

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 درنتیجه معادله ماتریسی به فرم رابطه (۳) نوشته می‌شود (رولئو و گاله[4]، ۱۹۸۷):

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

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

۱- Xu
۲ -Segment
۳ -Jing and Stephansson
۴ - Rouleau and Gale

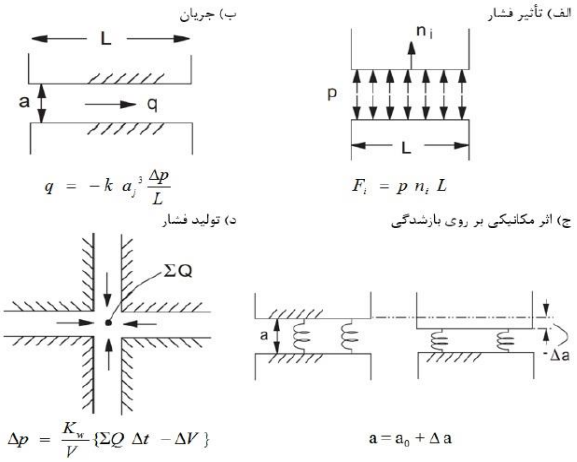
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

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

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

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.

UDEC 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. به‌وسیله‌ی نرم‌افزار تجزیه و تحلیل توأمان مکانیکی- هیدرولیکی انجام می‌شود، که در آن هدایت هیدرولیکی درزه و تغییر شکل مکانیکی دارای ارتباط دوسویه است. اثرات مدل شده در این نرم‌افزار در شکل (۲) خلاصه‌شده است.

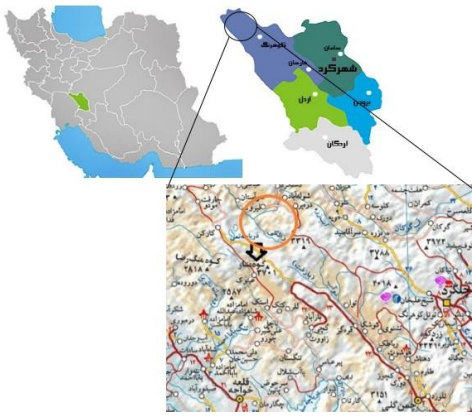


شکل (۲): اندرکنش سیال-جامد در ناپیوستگی (ایتاسکا[۱]، ۲۰۰۶)

در شکل (۲) a_0 باز شدگی درزه در تنش عمودی صفر و a بازشدگی 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: E ″۷ ′۳۱ °۴۹ و N ″۲۰ ′۳۳ °۴۳ می‌باشند (توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۵). در شکل (۳) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به ساختگاه سد لیرو قابل‌مشاهده است. محل محور سد در این تنگه قرار دارد، شکل (۴) دره محل محور سد لیرو در ساختگاه را از نمای روبرو نمایش می‌دهد. ازلحاظ 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 قرارگرفته 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 درواقع 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 میبدی و همکاران، ۱۳۹۵). درمجموع تعداد ده

۱ -ITASCA

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

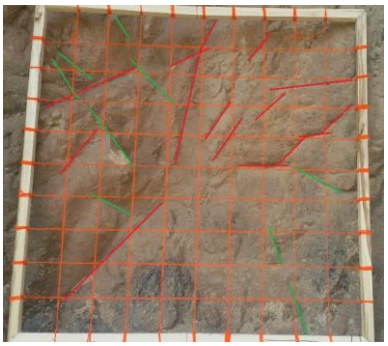
خط برداشت ۳۰ متری، بسته به امکان دسترسی و برداشت در بخش‌های مختلف دیواره‌های چپ و راست تکیه‌گاه سد لیرو برداشت شد. در شکل (۵) نمایی از یکی از خطوط برداشت نشان داده شده است. مؤلفه‌های مهم برداشت شده شامل، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، تداوم، فاصله‌داری، پایان‌یابی (مشخص بودن ابتدا و انتهای درزه) و چگالی درزه‌داری 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) (P_{20}) استفاده شد. با توجه به دسته‌درزه‌های قابل‌تفکیک در هر یک از ده ایستگاه برداشت، برمبنای مؤلفه‌های شیب و جهت شیب، مشخص شد که به‌طورکلی، دودسته درزه اصلی در این منطقه موجود است. بنابراین، برای تشخیص و تفکیک بهتر دسته‌درزه‌ها، همه‌ی درزه‌های موجود مطابق شکل (۷) و به‌صورت یکجا تحلیل‌شده 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 قرارگرفته‌اند. 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 به‌صورت 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. به‌عبارت‌دیگر 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 دسته‌درزه‌ی 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 فاصله‌ای نزدیک، تفکیک دقیق و کامل دسته‌درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی ممکن نبود و در بسیاری از موارد تداوم سطوح شکستگی برداشت‌شده به‌راحتی قابل برآورد نبود. به همین دلیل سطوح برداشت شده در قالب دود سته 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 برداشت شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال پیروی می‌کند یا خیر، از آزمون های بهترین برازش استفاده شد. به‌این‌ترتیب تابع چگالی احتمال شیب، جهت شیب، تداوم، فاصله‌داری، میزان بازشدگی و طول اثر درزه‌ها مشخص شد.



شکل(۵): نمایی از خط برداشت شماره۲ در تکیه‌گاه سمت راست سد؛ دید در جهت حرکت رودخانه (جنوب)

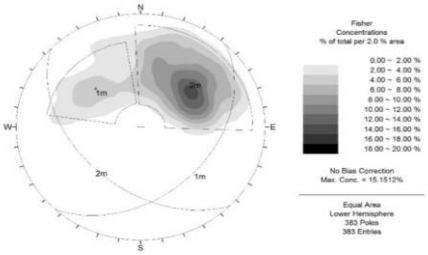
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

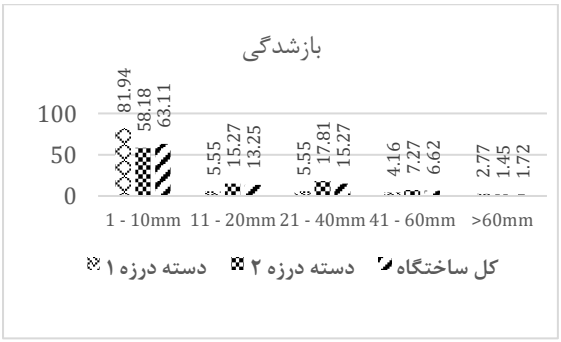


شکل (۶): اندازه‌گیری چگالی درزه‌داری سطحی (P20) با استفاده از پنجره مشبک

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

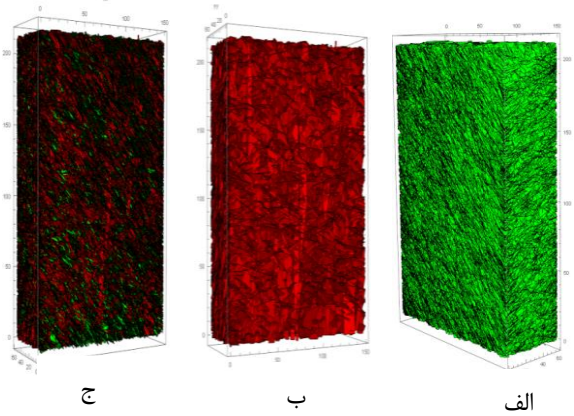


شکل(۸): آنالیز آماری بازشدگی ناپیوستگی‌ها در ساختگاه

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 ، مدل هندسی با ابعاد ۲۱۰ ×۱۵۰ ×۶۰ (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 به‌صورت کلی نشان داده‌شده است. با توجه به قابلیت‌های تعریف‌شده در کد 3D-DFN، پس از اجرای هر دفعه مدل سازی برای یک د سته‌درزه، امکان محا سبه و تعیین تمامی مشخصات آماری مؤلفه‌های هندسی درزه‌های شبیه‌سازی‌شده وجود دارد. همچنین با توجه به قابلیت تکرار مدل‌سازی 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)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

دسته‌درزه	برداشت‌شده			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

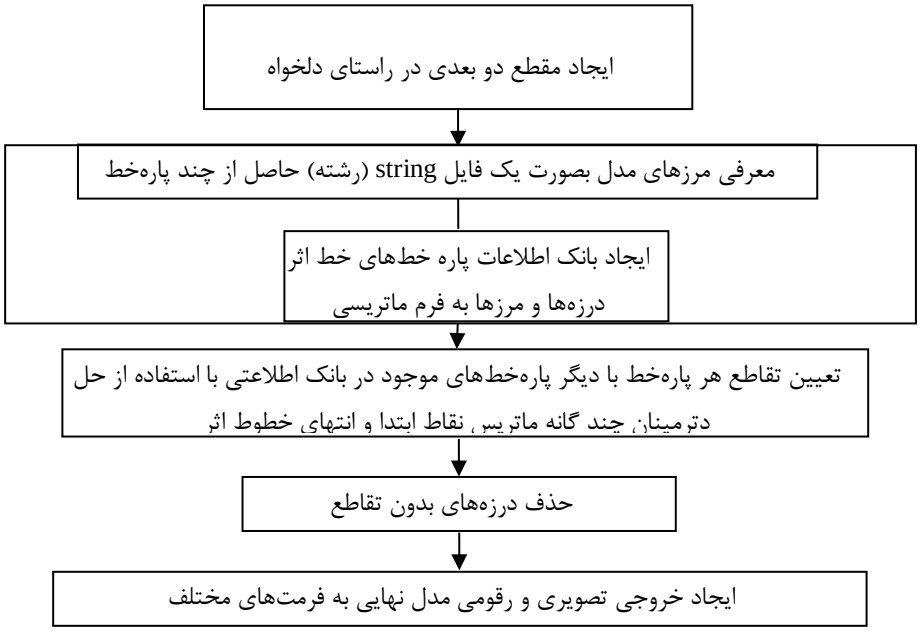
جدول (۲): مقایسه داده‌های شدت درزه‌داری ورودی و خروجی مدل

مؤلفه‌های مقایسه شده	درصد انطباق	داده‌ها			
		وردی مدل‌سازی		خروجی مدل‌سازی	
		دسته‌درزه ۱	دسته‌درزه ۲	دسته‌درزه ۱	دسته‌درزه 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

توسعه کد 3D-DFN و تحلیل هیدرولیکی تکیه‌گاه‌ها

به‌منظور 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 به‌خوبی مشخص می‌گردد. این بخش قابلیت شناسایی درزه‌ها تا اتصال آن‌ها به مرزها را دارد و درزه‌هایی که درنهایت دو سر آن‌ها به داخل مدل محدودشده و به درزه‌های دیگر و به مرزها نمی‌رسند حذف خواهد شد. روند نمای الگوریتم اضافه‌شده به‌صورت خلاصه در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

مقطع تهیه‌شده 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.



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

در مدل‌سازی هیدرولیکی تنها درزه‌هایی که به یکدیگر متصل و درنهایت به مرزهای مدل و صل هستند در نظر

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

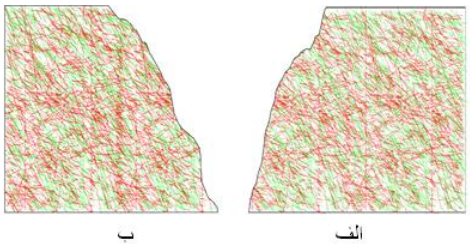
گرفته می‌شـــود چراکه تنها این نوع از درزه‌ها باعث ایجاد تخلخل ثانویه مؤثر در توده سنگ خواهند شد. این مرحله توسط الگوریتم توسعه داده شده در کد 3D-DFN انجام می‌شـــود. به‌عنوان نمونه در شـــکل (۱۲) درزه‌های مؤثر مقطع تکیه‌گاه چپ نشـان داده‌شـده اسـت. ابعاد کلی هر مقطع برابر با ۲۱۲×۱۵۰ متر اســـت. ماده‌ســـنگ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

$$K_j = \frac{1}{12\mu} \qquad (۵)$$

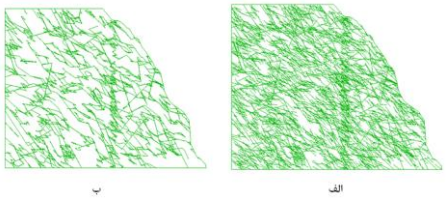
Kj : فاکتور نفوذپذیری درزه برحسب (1/pa.s)، μ : ویســـکوزیته دینامیک ســـیال که در مورد آب برابر با $۱۰^{-۳}$pas.s است.

قبل از انجام مدل‌سازی، صحت سنجی کارآیی نرم‌افزار با استفاده از مدل‌سازی مثال‌های تحلیل هیدرولیک موجود در راهنمای نرم‌افزار انجام شـــد که جواب‌ها به‌طور کامل مشـــابه با جواب‌های موجود در راهنمای نرم‌افزار بود. در مرحله‌ی بعد برای اعتبارســـنجی مدل‌ســـازی هیدرولیکی انجام‌شـــده، با فرض اینکه جریان صـــرفاً در شـــبکه شکستگی‌های به هم مرتبط توده سنگ اتفاق خواهد افتاد در صـورت داشـتن مدل هندسـی تا حد امکان نزدیک به واقعیت، می‌توان از صـــحت 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 به‌صـــورت پیش‌فرض بلوک‌های ســـنگی (ماده سنگ) تغییرشکل‌ناپذیر (بدون مش‌بندی) و درزه‌ها تغییرشکل‌پذیر 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 سطح درزه‌ها و باز و بسته شدن درزه‌ها در اثر وزن و فشار سـیال مدنظر بوده اسـت. بلوک‌های چسـبیده 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 نشـــت غیرواقعی مدل نشـــود باید نفوذناپذیر در نظر گرفته شـود. فاصـله مرزهای کناری تا مرز آزاد (ســـطح تکیه‌گاه‌های ســـد در تماس با آب) باید به‌گونه‌ای انتخاب شـود که فشـار سـیال تا رسـیدن به مرزهای کناری تقریباً به صـفر برسـد. با سـعی و خطا در مدل عددی این فاصـله ۱۵۰ متر از کف برای هردو 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 سـیال وارده به تکیه‌گاه را نشـان دهد، همچنین زمان به تعادل رسـیدن مدل را می‌توان از روی ثابت و یا به صـفر رسـیدن نرخ جریـان در این نقـاط تعیین کرد. بـا اجرای چرخـه‌ی محاسباتی و به تعادل رسیدن مدل، نمودارهای ثبت نرخ جریان آب خروجی گرفته شـد. داده‌های واردشـده به نرم‌افزار برای تحلیل هیدرولیکی در جدول (۳) ارائه شـده اسـت. شـکل های (۱۴ -الف) و (۱۴- ب) به ترتیب نمودارهای ثبت جریان آب به ترتیب به داخل تکیه‌گاه‌های راسـت و چپ در نقاط مختلف نسـبت به زمان را نشـان می‌دهد.



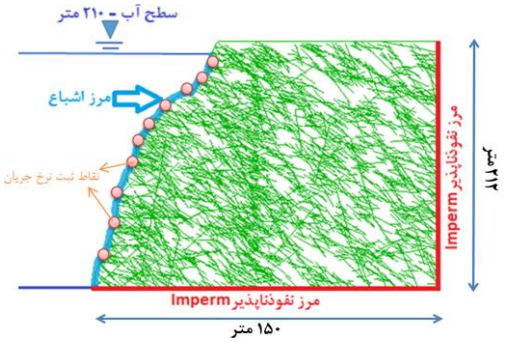
شکل (۱۱): مقطع تکیه‌گاه‌ها، خروجی 3D-DFN



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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]



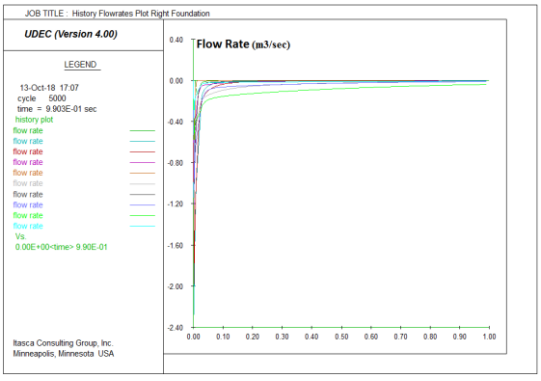
شکل (۱۳): نمایش شرایط مرز هیدرولیک در تکیه‌گاه راست

بعد از به تعادل رسیدن جریان در مدل و اتمام مدل‌سازی، نمودارهای نرخ جریان به صورت خطی صاف قابل‌مشاهده 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 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 باگذشت زمان و کاهش گرادیان هیدرولیکی مقدار جریان ورودی به ناپیوستگی ثابت می‌شود. پس از اجراشدن 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.

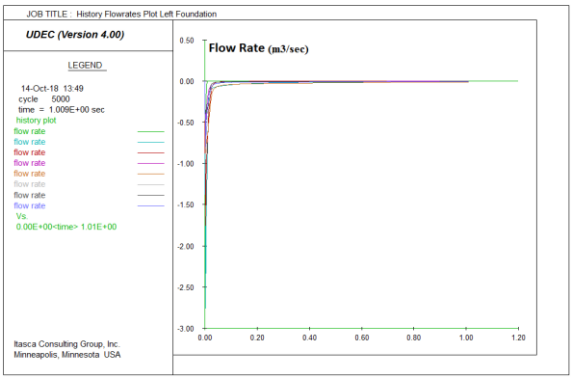
جدول (۳): مشخصات داده‌های ورودی به نرم‌افزار جهت اجرای مدل هیدرولیکی

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

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



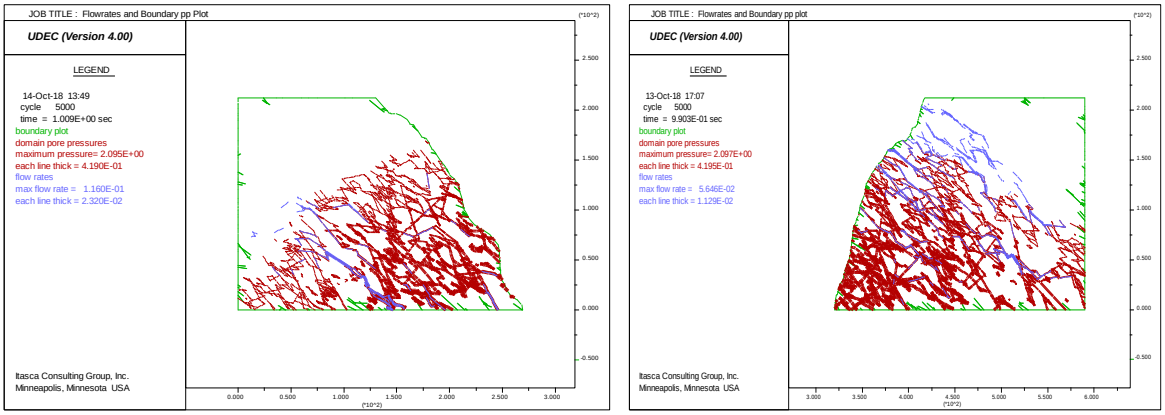
الف



ب

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]



ب الف

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

نتیجه‌گیری

جریان سیال در تکیه‌گاه‌های سنگی سد به‌صورت عمده از طریق ناپیوستگی‌های متصل‌به‌هم کنترل می‌شود. درنتیجه برای برر سی رفتار هیدرولیکی توده سنگ باید از روش ناپیو سته ا ستفاده کرد. بدین منظور کد محا سباتی 3D-DFN در محیط نرم افزار مَتِماتیکا[۳۱] برای ساخت شبکه شکستگی گسسته تهیه و توسعه داده شده است. ابتدا فرآیند مدل سازی هند سه ناپیو ستگی‌ها تو سط کد محاسباتی مذکور انجام‌شده و سپس حل معادلات جریان سیال در شبکه با ا ستفاده 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 مدل سازی هند سی ا ستفاده شد. درنهایت با توجه به ارزیابی‌های انجام شده در تحلیل جریان سیال نتایج زیر ارائه‌شده است:

الف) روش شبکه شکستگی مجزا برای تحلیل هیدرولیکی در حالت ناپیوسته قابل‌استفاده 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 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 نرم‌افزار های عددی به‌منظور تحلیل های پایداری و هیدرولیکی استفاده نمود.

مراجع

۱- امامی میبدی، ع.، جلالی، م، و یاراحمدی بافقی، ع.، ۱۳۹۵. "مدل سازی شبکه ناپیو ستگی گسسته به‌منظور برآورد خرد شوندگی 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.

۳۱ - Mathematica

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

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 میبدی،ع.، مهرنهاد، ح.، (۱۳۹۷)."مدل سازی هندسی درزه‌ها به روش شبکه شکستگی‌های گسسته سه‌بعدی (مطالعه موردی ساختگاه سد لیرو) "، مقاله نشریه انجمن زمین شناسی 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 Mannual".

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 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, pages971–985

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". 5thAustralia-New Zealand Conference on Geomachanics, (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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

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.

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". 242. 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.7.1]