مجله علمی- پژوهشی
«عمـران مـــدرس»
دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰

اهمیت مشخصات هندسی درزه‌ها در میزان ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی

سعید یزدانی[۱]، محمود یزدانی[۲*]، محمدتقی احمدی[۳]

۱- کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استادیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استاد، دانشکده عمران و محیط زیست ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

myazdani@modares.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۸٦/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۸/۲۵

چکیده– سدهای بتنی قوسی به‌خاطر ساختار خاص سازه‌ای و بارهای تقریباً زیاد ناشی از فشار هیدرواستاتیکی همواره بـه پـی و تکیه‌گاه با مقاومت زیاد نیاز دارند. علاوه بر آن میزان تراوش از داخل تکیه‌گاه‌ها و پی می‌بایست تا حد ممکـن کـم باشـد؛ از طرفـی توده‌های سنگی با سختی زیاد تحت تأثیر تنش‌های حرارتی و تکتونیکی در بستر زمان دچـار شکسـت شـده و معمـولاً بـا درجـات مختلفی دارای درزه‌اند. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که در بیش‌تر حالات ایـن درزه‌هـا هسـتند کـه بـر میـزان ایمنـی و نشـت از توده‌سنگ حاکمند. بنابراین لازم است نقش درزه‌ها در ارزیابی اولیه ساختگاه‌های سنگی به عنوان تکیه‌گاه این‌گونه سدها لحاظ شـود؛ هم‌چنین اندرکنش رفتارهای هیدرولیکی و مکانیکی درزه‌ها، رفتاری پیچیده از توده‌سنگ به‌وجود می‌آورد که لازم است در محاسبات پایداری و میزان نشت توده‌سنگ‌های اشباع درنظر گرفته شود. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار UDEC تـأثیر پارامترهـای هندسـی مختلف درزه‌ها شامل جهت‌یافتگی و اندازه شکاف اولیه آن‌ها بر ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی، مورد مطالعه قـرار گرفتـه اسـت. برای این کار با تمرکز روی تکیه‌گاه (بدون شبیه‌سازی بدنه سد)، مدلی دوبعدی با اعمال نیروهـای وارد شـده از طـرف بدنـه سـد و مخزن، شبیه‌سازی شده و ضمن لحاظ کردن جریان درون درزه‌ها، از سه شاخص بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش درزه‌ها و بیشینه‌ی دبـی عبوری از آن‌ها برای تشخیص گسیختگی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی هندسـی دسـته درزه‌هـا (شـیب و جهـت شیب) و اندازه شکاف اولیه آن‌ها عوامل بسیار تأثیرگذار بر روی ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی می‌باشند.

کلیدواژگان: توده‌سنگ درزه‌دار، سدهای بتنی قوسی، تکیه‌گاه و هیدرومکانیکی.

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت سازه‌های عظیمـی کـه در سـاختگاه‌هـای سنگی احداث می‌شـود لـزوم مطالعـه خـواص مکـانیکی و مقاومتی سنگ در ارتباط با پایداری این سازه‌ها کاملاً معلوم اسـت. در مهندسـی سـنگ، تـوده‌سـنگ بـه مجموعـه‌ای از بلوک‌های سنگی سالم گفته می‌شود که به‌وسیله‌ی صفحاتی موسـوم بـه ناپیوسـتگی‌هـا از یـک‌دیگـر جـدا شـده‌انـد. ناپیوستگی‌ها معمولاً مقاومت کششی ندارند. جابه‌جایی‌ها و

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

تغییرمکان‌ها در محیط‌های توده‌سنگی معمولاً شامل حرکت و دوران بلوک‌های سنگی سالم در امتداد یا حول درزه‌ها است. هرچند وجود ریزترکها در بلوک‌های سنگی سالم روی مقاومت توده‌سنگ مؤثر است، اما در سطوح کم تنش که بیش‌تر سازه‌ها بنا می‌شوند، بلوک‌های سنگی سالم تحت تأثیر میدان تنش ناشی از این سازه‌ها دچار گسیختگی نمی‌شوند؛ در صورتی که معمولاً حرکت یا دوران بلوک‌های سنگی سالم در امتداد یا حول درزه‌ها باعث گسیختگی توده‌سنگ و ناپایداری سازه‌های متکی بر آن‌ها می‌شود. بنابراین در بحث پایداری ساختگاه‌های توده‌سنگی و سازه‌های متکی به آن‌ها نگاه ویژه‌ای به نقش درزه‌ها و خواصشان وجود دارد.

بدیهی است با توجه به نوع جابه‌جایی‌ها در توده‌سنگ (لغزش یا دوران بلوک سنگی سالم)، الگوی هندسی درزه‌ها و زاویه‌ای که با هم می‌سازند تأثیر بسزایی برروی کمیت و کیفیت حرکت بلوک‌های سنگی خواهد داشت. بنابراین امتداد دسته درزه‌ها از پارامترهای هندسی مهم درزه‌ها در بحث پایداری توده‌سنگ درزه‌دار است.

عمده تراوش از توده‌سنگ از طریق درزه‌ها است و در بیش‌تر موارد درزه‌ها تنها مجاری محسوب می‌شوند[۱]؛ بنابراین درزه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان تراوش از توده‌سنگ خواهند داشت. از طرفی در شرایطی که آب در درزه‌ها جریان دارد نیرویی که بلوک‌های سنگی سالم به یکدیگر(تحت بارگذاری‌های خارجی) اعمال می‌کنند تغییر می‌کند. این تغییر بستگی به میزان نشت، دبی عبوری از درزه‌ها و خطوط هم‌پتانسیل جریان دارد. همه موارد بالا، با توجه به این‌که درزه‌ها عمده جریان را از خود عبور می‌دهند، بستگی به اندازه شکاف اولیه آنها دارند. با توجه به مطالب اخیر، اندازه شکاف اولیه درزه‌ها پارامتر هندسی دیگری است که بر نیروهای وارد بر بلوک‌های سنگی سالم و کیفیت و کمیت حرکت آن‌ها و در نهایت پایداری توده‌سنگ تأثیر می‌گذارد[۱].

سدهای بتنی قوسی به‌خاطر ساختار سازه‌ای خاصی که دارند همواره نیازمند تکیه‌گاه‌های سخت و مستحکم است. وجود ناپیوستگی‌ها به‌عنوان صفحات ضعف و جزء جدایی ناپذیر توده‌سنگ، لزوم بررسی آن‌ها را در ارتباط با پایداری تکیه‌گاه این سازه‌های عظیم ثابت می‌کند. جریان آب تحت فشار، بسته به میزان تنش‌های وارد از طرف بدنه سد به تکیه‌گاه و هم‌چنین جهت ناپیوستگی‌ها می‌تواند بر تنش‌های نرمال سطح تماس دیواره‌های ناپیوستگی غلبه کرده و با باز کردن بیش‌تر مجاری جریان، توزیع تنش‌ها در توده‌سنگ را تغییر دهد. تغییر میدان تنش خود می‌تواند بر تغییر شکل محیط (که بیش‌تر به شکل لغزش و بازشدگی در محل ناپیوستگی‌ها است) و در نتیجه نفوذپذیری توده‌سنگ تاثیر گذاشته که آن‌هم به‌نوبه خود باعث تغییر خطوط هم‌پتانسیل و شبکه جریان می‌شود. این تغییرات هیدرولیکی منجر به تغییر میدان تنش در اثر نیروهای تراوش می‌شود. این فرایند دوطرفه که از آن به عنوان اندرکنش هیدرومکانیکی تعبیر می‌شود، آنقدر ادامه می‌یابد تا محیط به تعادل برسد[۲]. بنابراین لزوم لحاظ کردن جریان درون درزه‌ها در تحلیل و طراحی این‌گونه سدها ضروری است.

در بخش بعد مروری کامل بر مطالعات انجام شده برروی خواص هیدرولیکی درزه‌ها به عنوان مهم‌ترین عنصر در شناسایی خواص هیدرولیکی و مسئله نشت از توده‌سنگ درزه‌دار پیرامونی سدهای بتنی قوسی انجام می‌شود. همان‌طوری‌که گفته شد هیدرولیک توده‌سنگ تاثیر مستقیمی بر پایداری آن دارد. بیش‌تر مطالعات انجام شده روی سدهای بتنی قوسی، به اهمیت نقش درزه‌ها بر پایداری تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی قوسی تاکید دارند

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

(کرسمانویک (۱۹۷٤)[۳]، گودمن و اسکات (۱۹۹٤)[٤]، گونزالس و بلتران (۱۹۹٤)[٥]، مگابولوف (۱۹۹٥)[٦]، استماتیو، بوگناریو و کنستانتینسکو (۱۹۹٥)[۷]، آبراهامسون (۲۰۰۱)[۸] و هاملیتون۲۰۰۱[۹]). ولی ارتباط پارامترهای مختلف درزه‌ها با پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی به‌صورت کمی و کیفی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

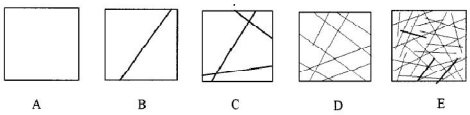
با توجه به نقش کلیدی درزه‌ها برروی سازوکار رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار UDEC که برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته براساس روش المان‌های مجزا تهیه شده و به‌خوبی نقش درزه‌ها و اندرکنش هیدرومکانیکی را در محیط‌های توده‌سنگی لحاظ می‌کند، تأثیر پارامترهای هندسی درزه‌ها (با در نظر گرفتن جریان درون توده‌سنگ تکیه‌گاه و پدیده هیدرومکانیکی) روی پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی ارزیابی می‌شود.

۲- جریان در توده‌سنگ

تحقیقات والش (۱۹٦٥)[۱۰]، باندیس و همکاران (۱۹۸۳)[۱۱] و بریس (۱۹۸۰)[۱۲] نشان داد که خواص فیزیکی و نفوذپذیری سنگ‌ها متأثر از هندسه ناپیوستگی‌ها، اتصال بین آن‌ها و اندازه و شکل حفرات است. یک توده سنگ شامل سنگ سالم و ناپیوستگی‌هایی در شکل‌های مختلف است. برای سنگ‌های با نفوذپذیری کم، جریانات آب و گاز بیش‌تر از طریق شبکه‌ای از ناپیوستگی‌های به‌هم مرتبط رخ می‌دهد. در این بخش تأثیرات زبری سطح، اندازه شکاف درز و تغییرات تنش بر جریان، بررسی می‌شود.

در دو دهه اخیر لانگ و ویترسپون (۱۹۸٥)[۱۳]، اودا (۱۹۸٥)[۱٤] و استیتل و همکاران (۱۹۹٦)[۱٥] کارهای تجربی و تحلیلی مهمی را روی تأثیرات متقابل تغییر شکل و جریان در توده سنگ درزه‌دار اشباع با لحاظ کردن روش‌های جریان ناپیوستگی مجزا[1] و محیط‌های متخلخل[2] انجام داده‌اند. استفاده از تحلیل محیط‌های متخلخل، تنها برای سنگ‌های با تخلخل زیاد مثل ماسه سنگ مناسب است. در این روش که تاکنون به‌طور گسترده‌ای در مکانیک خاک استفاده شده، جریان و خواص انتقال جریان در سنگ با فرض یک محیط پیوسته بررسی می‌شود. با این‌حال، مناسب‌ترین روش محاسبه جریان (مانند روش مجزا، پیوسته و یا ترکیبی از هردوی آن‌ها) بسته به میزان دسترسی به اطلاعات زمین‌شناسی و دقت موردنیاز در تخمین جریان، انتخاب می‌شود.

در حالت ایده‌آل، جریان درون سنگ سالم (حالت A، شکل ۱)، تنها از طریق حفرات به‌هم مرتبطی رخ می‌دهد که اندازه و شکل آن‌ها به‌وسیله‌ی تنش‌های اعمالی در حال تغییر است. تحلیل جریان در این محیط با روش پیوسته و براساس مکانیک محیط‌های متخلخل انجام می‌شود. در سوی دیگر طیف، برای یک توده‌ی سنگی شدیداً درزه‌دار نیز (حالت E در شکل ۲)، جریان درون توده‌سنگ را می‌توان به بهترین شکل به‌وسیله روش‌های پیوسته ارزیابی کرد (لانگ و ویترسپون ۱۹۸٥ و اودا ۱۹۸٥). در میانه این دو حالت حدی (حالات B، C و D)، برای تحلیل جریان تنها باید از روش‌های ناپیوسته استفاده کرد.



شکل (۱) شدت درزه‌دار بودن در انواع توده سنگ.

برای به‌کاربردن مدل ناپیوستگی مجزا، لازم است خواص ناپیوستگی‌ها مثل اندازه شکاف[3] و جهت یافتگی[4] تعیین شود. ضمن این‌که بیش‌تر روش‌های عددی تحلیل جریان

1- discrete flow analysis
2- porous medium
3- aperture
4- orientation

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

در توده‌سنگ درزه‌دار، با فرض اشباع بودن توده سنگ انجام می‌شوند؛ در حالی‌که جریان درون محیط‌های توده‌سنگی معمولاً غیراشباع است (مثلاً آب و هوا، آب و مواد جامد و یا آب و هوا و مواد جامد).

۳- جریان از درون یک ناپیوستگی

پارامترهای اصلی کنترل‌کننده جریان آب از طریق یک درزه سنگی بدون پرشدگی عبارتند از زبری سطح درزه، اندازه شکاف متغیر، جهت‌یافتگی درزه‌ها، تنش نرمال و برشی و رفتار باربرداری و بارگذاری. در مطالعات اولیه، جریان درون یک درزه همانند جریان از طریق یک کانال یا لوله که در آن هیچ‌گونه تغییرشکلی تحت تأثیر تنش‌های خارجی ایجاد نمی‌شود شبیه‌سازی می‌شد (لومیز،1951[۱۶]). در این راستا با اقتباس از قانون معروف پواسیوله[1] (۱۸٤۰)[۱۷] و [۱۸]. در مکانیک سیالات برای محاسبه دبی جریان سیال ویسکوز تراکم‌ناپذیر از طریق لوله‌ها، دبی جریان از طریق دو صفحه موازی به‌دست آمد که به‌دلیل وجود توان ۳ برای پارامتر اندازه شکاف، در مکانیک سنگ به قانون مکعب معروف شد:

$$Q = J\frac{\gamma}{12\mu}b^3 l \qquad (۱)$$

J: گرادیان هیدرولیکی؛

l: پهنای قطعات درزه؛

b: اندازه شکاف درزه در هر قطعه؛

μ: ویسکوزیته دینامیکی سیال؛

γ: وزن مخصوص سیال؛

- تأثیر زبری سطح

ایوای (۱۹۷٦)[۱۹] و ویترسپون و همکاران (۱۹۸۰)[۲۰] براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشنهاد کردند که قانون مکعب را می‌توان برای سطوح زبر و درزه‌های واقعی با تنش محدودکننده کم نیز استفاده کرد. با این حال باید توجه داشت که زبری سطح درزه‌ها باعث افت هد جریان درون درزه‌ها می‌شود. لوئیز (۱۹۷٦)[۲۱] برای بررسی تأثیرات زبری، تئوری‌های موجودی را که برای تحلیل جریان از میان یک مجرا به‌کار می‌روند بسط داد. برای لحاظ کردن تأثیرات زبری سطح، ضریب λ[2] که تابعی از عدد رینولدز Re و اندازه شکاف درزه است تعریف می‌شود. برای یک ناپیوستگی سنگی، لوئیز (۱۹۷٦) متوجه شد که بسته به مقدار ضریب λ، مدهای مختلف جریان مثل جریان لایه‌ای و آشفته می‌توانند رخ دهند. در حالت کلی λ تابعی از عدد رینولدز، زبری درزه (k) و اندازه شکاف هیدرولیکی (D_h) آن است. برای یک درزه صاف ($k/D_h \leq 0.033$) ضریب λ تنها تابعی از عدد رینولدز بوده و جریان نیز بشکل لایه‌ای درنظر گرفته می‌شود. تیل (۱۹۸۹)[۲۲] ضرائب λ و مقدار دبی را به ازاء مقادیر زبری نسبی مختلف برای هر دو جریان لایه‌ای و آشفته که به‌وسیله‌ی محققین مختلف به‌دست آمده‌اند ارائه کرد. انگلدر و اسکولز (۱۹۸۱)[۲۳] بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی نشان دادند که قانون مکعب برای تخمین جریان از میان درزه‌های مصنوعی اعتبار دارد. براون (۱۹۸۷) نیز بر اساس مطالعات عددی نسبت دبی جریان (دبی جریان از طریق یک درزه زبر نسبت به دبی محاسبه شده از قانون مکعب) را در مقابل اندازه شکاف مکانیکی رسم کرد. نتایج او نشان می‌دهد که برای اندازه شکاف‌های بزرگ، انحراف از قانون مکعب بسیار کم است اما در اندازه شکاف‌های کوچک، دبی جریان واقعی ٤۰ تا ۷۰ درصد مقدار جریانی است که به‌وسیله‌ی قانون مکعب پیش‌بینی می‌شود. پیراک-نولت و همکاران (۱۹۸۷)[۲٤] هم براساس

1- Poiseuille law

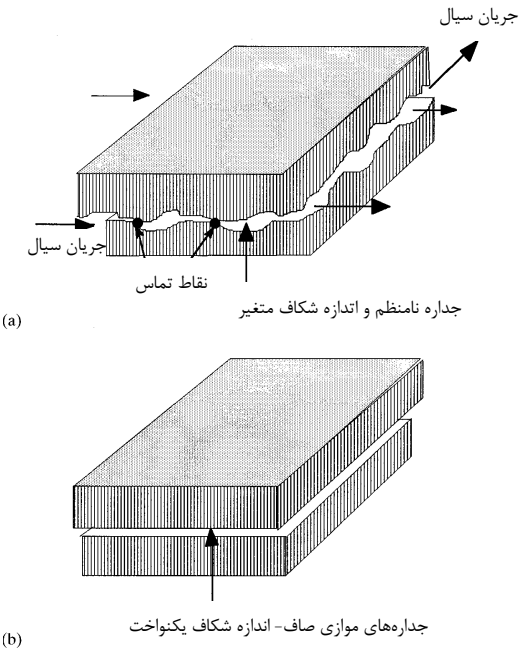
2- pressure drop coefficient

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که قانون مکعب در درزه‌های طبیعی در شرایط تنش کمتر از ۲۰ مگاپاسکال معتبر است.

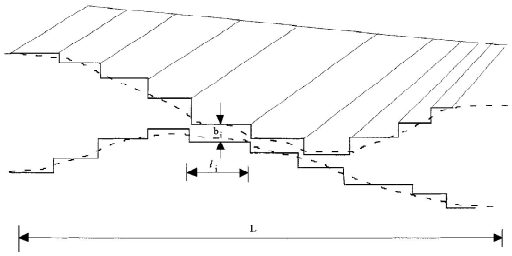
- اندازه شکاف متغیر

اندازه شکاف درزه یک پارامتر کلیدی برای تعیین خواص هیدرولیکی محیط توده‌سنگ درزه‌دار است. درزه‌های طبیعی معمولاً زبر و نامنظم با جداره‌های ناصاف هستند که باعث تشکیل نقاط تماس در چند نقطه مجزا از طول درزه می‌شوند (شکل ۲). در مدل‌های ریاضی برای ساده‌سازی، ناپیوستگی‌ها به صورت جداره‌هایی صاف و موازی شبیه سازی می‌شوند.



شکل (۲) جریان از میان یک ناپیوستگی، (a) درزه طبیعی (b) درزه ایده‌آل

نوزیل و تراسی (۱۹۸۱)[۲۵] برای وارد کردن تغییرات اندازه شکاف در محاسبات جریان، درزه‌های سنگی نامنظم را به‌وسیله قطعاتی از دیوارهای صفحه‌ای موازی آن‌چنان‌که در شکل ۳ نشان داده شده است شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با تعریف تابع توزیع فرکانسی تغییرات اندازه شکاف سعی کردند تا رابطه اصلاح شده‌ای برای قانون مکعب ارائه کنند.



شکل (۳) یک مدل مفهومی برای وارد کردن تغییرات اندازه شکاف یک درزه در محاسبات جریان (نوزیل و تراسی ۱۹۸۱).

- تأثیرات تنش برشی و نرمال روی یک درزه

اندازه شکاف یک ناپیوستگی، e_t، در همه زمان‌ها به‌وسیله $e_t = e_0 \pm \delta_n$ بیان می‌شود که e_0، اندازه شکاف اولیه، e_t اندازه شکاف در زمان t و δ_n بازشدگی یا بسته‌شدگی درز در خلال زمان t است. در مکانیک سنگ مؤلفه‌های تغییرشکل نرمال و برشی به‌وسیله برادی و براون (۱۹۹٤)[۲٦] بیان می‌شوند:

$$\delta_n = \frac{1}{k_n}[\sigma_1 \cos\beta + \sigma_3 \sin\beta] \qquad (۲)$$

$$\delta_s = \frac{1}{k_s}[\sigma_3 \cos\beta - \sigma_1 \sin\beta] \qquad (۳)$$

σ_1: تنش عمودی وارد بر درزه؛

σ_3: تنش افقی وارد بر درزه؛

k_n: سختی نرمال درزه؛

k_s: سختی برشی درزه؛

β: امتداد درزه؛

δ_n: بازشدگی نرمال درزه،

δ_s: جابه‌جایی افقی درزه.

با توجه به این‌که فشار آب، عمود بر سطح درزه عمل می‌کند، معادله ۲ را می‌توان به شکل زیر اصلاح کرد:

$$\delta_n = \frac{1}{k_n}[\sigma_1 \cos\beta + \sigma_3 \sin\beta - P_w] \qquad (٤)$$

P_w فشار آب درون درزه است.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

با این حال در عمل، در یک سطح مشخص از تنش، بسته شدن درزه‌ها متوقف شده و تغییر شکلی در درزه اتفاق نمی‌افتد. به اندازه شکاف درزه در این سطح تنش، بازشدگی باقیمانده[1] گویند که تابعی از وضعیت تنش‌های خارجی، پروفیل اولیه سطح درزه و خواص هندسی و فیزیکی آن‌هاست. این پارامتر (بازشدگی باقیمانده) قبلا به‌وسیله‌ی والش (۱۹۸۱) و ایندراراتنا و رانجیت (۱۹۹۹)[۲۷] با استفاده از آزمایشات سه محوری بررسی شده است. مطالعات آزماشگاهی دیگر محققین نیز نشان می‌دهد که مقادیر بازشدگی باقیمانده برای یک نوع سنگ مشخص بسته به اندازه شکاف هیدرولیکی اولیه متغیر است.

- تأثیرات بارگذاری و باربرداری

توجه به تغییرات جریان به علت بارگذاری و باربرداری بسیار مهم است. چنان‌چه تناوب بارگذاری به اندازه‌ای باشد که اندازه شکاف به کمترین مقدار خود برسد تغییرات جریان قابل‌توجه است. به‌عبارتی چنان‌چه سطوح تنش به اندازه‌ای نباشد که باعث شود جداره‌های درزه به هم تماس پیدا کنند و یا لهیدگی در جداره درزه رخ دهد، آن‌گاه پس از باربرداری، نفوذپذیری اولیه درزه حاصل خواهد شد. در مقابل اگر اندازه شکاف به کمترین مقدار خود برسد، پس از باربرداری مجدد، نفوذپذیری اولیه حاصل نخواهد شد (ایندراراتنا و رانجیتا (۱۹۹۹)). به‌نظر می‌رسد کرنش‌های بازگشت‌ناپذیر به علت اولین سیکل بارگذاری و باربرداری رخ می‌دهند.

۴- شبیه‌سازی درزه‌ها در توده‌سنگ

روش‌های پیوسته[2] (روش المان محدود، روش تفاضل محدود و ...) با ارائه یک محیط پیوسته معادل، اثر درزه‌ها را وارد می‌کند. این روش‌ها نمی‌توانند رفتار توده‌سنگ درزه‌دار را به‌خوبی نمایش دهند؛ چراکه جابه‌جایی‌های مربوط به محیط‌های درزه‌دار مثل لغزش، بازشدگی و چرخش حول درزه‌ها در این روش‌ها قابل نمایش نیست. به‌کارگیری المان‌های درز[3]، خطوط لغزش[4] یا المان‌های سطح مشترک[5] برای شبیه‌سازی درزه‌ها و رفع محدودیت‌های روش‌های محیط پیوسته مفید است. اما استفاده از این المان‌ها در شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته، یک سری محدودیت مثل تعداد درزه‌ها، اندازه درزه‌ها و بیشینه‌ی مقادیر جابه‌جایی درزه‌ها به دنبال دارد[۲۸].

روش‌های ناپیوسته، تکنیکهای عددی هستند که به‌طور ویژه برای آنالیز رفتار درزه‌ها به‌کار می‌روند. المان مجزا مشهورترین و پیشرفته‌ترین روش عددی است که براساس مد گسیختگی درزه‌ها تهیه شده است. روش المان مجزا براساس یک الگوریتم تکرارپذیر که معادلات حرکت مربوط به یک شبکه از بلوک‌های مجزا را به‌وسیله روش تفاضل محدود حل می‌کند، تهیه شده است. در این روش فرض می‌شود بلوک‌ها روی نقاطی مجزا که contact نامیده می‌شوند، نسبت به یک‌دیگر واکنش نشان می‌دهند. یک رابطه جابه‌جایی- نیرو که بیانگر رفتار درزه در هر contact است، برای به‌دست آوردن نیروهای وارد بر هر بلوک در گامهای زمانی بعدی استفاده می‌شود[۲۸].

برنامه UDEC یک برنامه عددی دوبعدی است که برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته براساس روش المان مجزا به‌کار می‌رود. این نرم‌افزار پاسخ محیط‌های ناپیوسته (مثل توده‌سنگ درزه‌دار) در مقابل بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی را شبیه‌سازی می‌کند. هرگونه الگوی هندسی از ناپیوستگی‌ها و دسته درزه‌ها را می‌توان به‌وسیله‌ی UDEC

1- residual aperture
2- Continuum Methods
3- Joint elements
4- Slide lines
5- Interface elements

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

شبیه‌سازی کرد. هم‌چنین UDEC با در نظر گرفتن فرض نفوذناپذیری بلوک‌ها قادر است جریان سیال میان ناپیوستگی‌ها و حفرات موجود در مدل را شبیه‌سازی کند، ضمن این‌که آنالیز کامل از اندرکنش میان رفتارهای هیدرولیکی و مکانیکی توده‌سنگ در این نرم‌افزار امکان‌پذیر است. این نرم افزار دارای یک زبان برنامه‌نویسی قدرتمند است که اجازه اضافه کردن توابع جدید و بسط این نرم‌افزار را می‌دهد[۲۹].

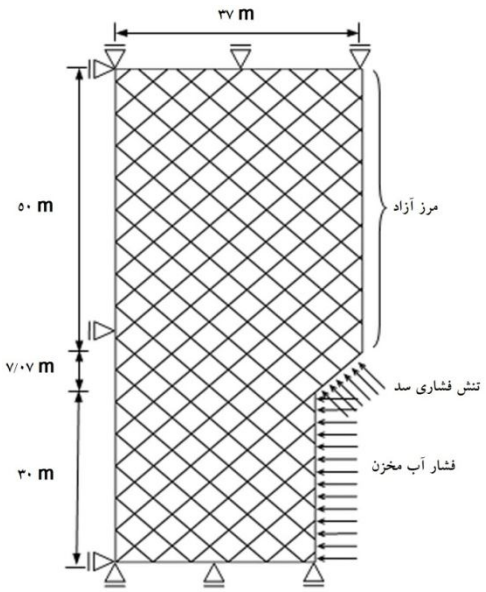
۵- شبیه‌سازی تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی

۵-۱- خصوصیات هندسی مدل

تکیه‌گاه سنگی مورد مطالعه، یک محیط فرضی است. در این شبیه‌سازی، هندسه‌ای با شکل ٤ لحاظ شده است که براساس آن ضخامتی از سد که با تکیه‌گاه در تماس است ۱۰ متر فرض شده است و در واقع به‌جای شبیه‌سازی بدنه سد، نیرویی را که بر تکیه‌گاه وارد می‌کند اعمال می‌کنیم. طولی از تکیه‌گاه که در تماس با آب پشت سد است ۳۰ متر فرض شده است و از طریق اعمال یک فشار مکانیکی به‌همراه هد هیدرولیکی، تأثیرات آب پشت سد شبیه‌سازی می‌شود.

در این مطالعه، ۱۰ دسته درزه متعامد با زوایای امتداد مختلف (۱۰ و ۸۰-)، (۲۰ و ۷۰-)، (۳۰ و ٦۰-)، (٤۰ و ۵۰-)، (٤۵ و ٤۵-)، (۵۰ و ٤۰-)، (٦۰ و ۳۰-)، (۷۰ و ۲۰-)، (۸۰ و ۱۰-) و (۹۰ و ۰) برای ارزیابی ایمنی تکیه‌گاه بررسی می‌شوند. به عنوان مثال در شکل ٤ دسته درزه‌های متعامد ٤۵ و ٤۵- درجه گنجانده شده است.

براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده از این سد فرضی در نرم‌افزار اجزاء محدود SAP، مقادیر تنش فشار سد و فشار آب پشت سد در بحرانی‌ترین تراز به‌ترتیب ۱۰ و ۲ مگاپاسکال تخمین زده شد. نتایج اولیه حاکی از آن است که دسته‌درزه‌های متعامد، بسیار بحرانی‌تر از سایر دسته درزه‌ها است. به‌همین دلیل در این مطالعه تنها از دسته درزه‌های متعامد استفاده شد. فاصله درزه‌ها از یکدیگر چهار متر فرض شده است.



شکل (٤) تکیه‌گاه شبیه سازی شده.

۵-۲- مشخصات هیدرولیکی و مکانیکی مدل

درزه‌های شبیه‌سازی شده در این مدل براساس مدل رفتاری موهر-کولمب الاستوپلاستیک کامل عمل می‌کنند. با تأکید بر نقش درزه‌ها در این پژوهش، بلوک‌ها به‌صورت الاستیک عمل می‌کنند.

خصوصیات مکانیکی همه دسته‌درزه‌های متعامد یکسان است. ضمن این‌که بازشدگی دسته‌درزه‌های ٦۰- ، ٤۵- ، ٤۰- ، ۳۰- ، ۱۵- ، ۵- و صفر درجه، صفر و در سایر دسته‌درزه‌ها ۰/۵ میلی‌متر است. جدول ۱ خصوصیات دسته درزه‌های متعامد (٤۵و ٤۵-) را نشان می‌دهد.

در این جدول K_n، K_s، φ، c، σ_t، Ψ و a_0 به‌ترتیب سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی، زاویه اتساع و اندازه شکاف اولیه ناپیوستگی‌ها است. E و υ نیز، به‌ترتیب مدول تغییرشکل و

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

ضریب پواسون بلوک‌های سنگی سالم است.

جدول (۱) مشخصات بلوک‌های سنگی و درزه‌ها

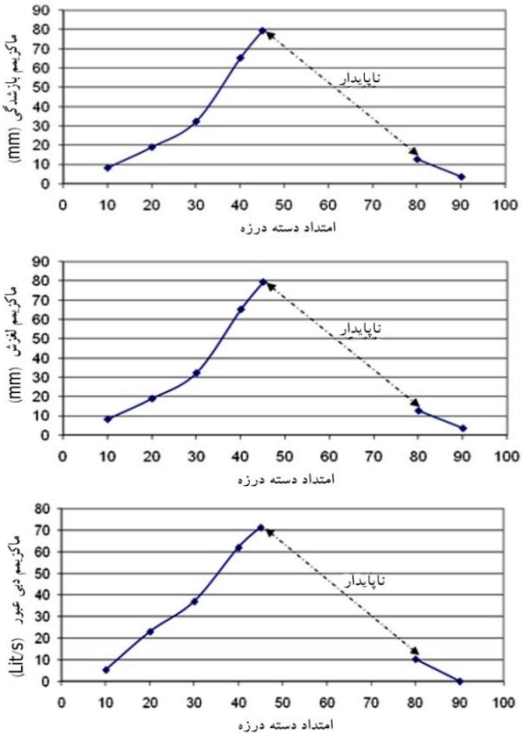
بلوک سنگی	دسته درزه ۴۵- درجه	دسته درزه ۴۵ درجه
$E_s = ۱۰ Gpa$	$K_n = ۱۰۰ \frac{Gpa}{m}$	$K_n = ۱۰۰ \frac{Gpa}{m}$
$\upsilon = ۰.۳$	$K_s = ۱۰۰ \frac{Gpa}{m}$	$K_s = ۱۰۰ \frac{Gpa}{m}$
$\gamma = ۲۷۰۰ \frac{kg}{m^۳}$	$\varphi = ۳۵$	$\varphi = ۳۵$
	$c = ۰.۱ Mpa$	$c = ۰.۱ Mpa$
	$\sigma_t = 0$	$\sigma_t = 0$
	$\Psi = 5$	$\Psi = 5$
	$a_0 = 0$mm	$a_0 = 0.5$ mm

۵-۳- تحلیل مدل

در این پژوهش تأثیرات پارامترهای هندسی درزه‌ها روی ایمنی تکیه‌گاه بررسی می‌شود.

الف- تأثیر امتداد (جهت‌یافتگی) دسته درزه‌ها:

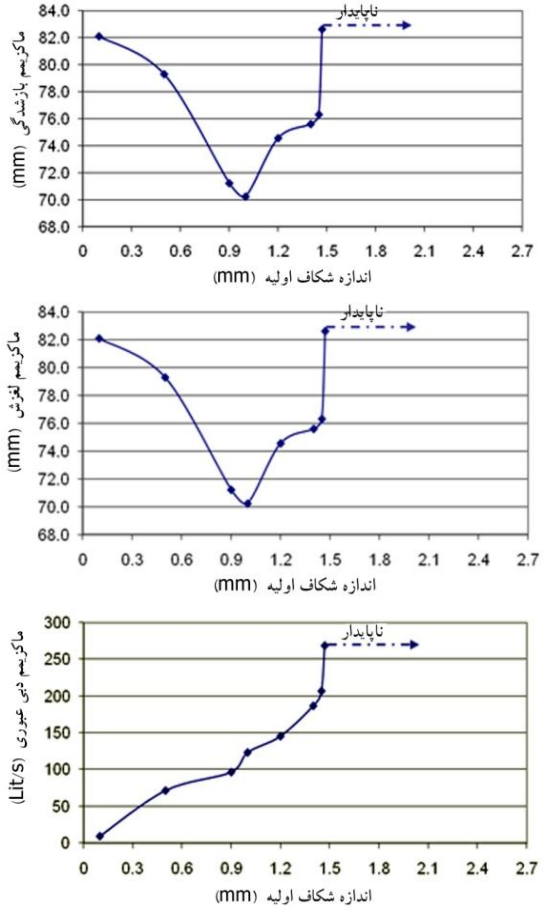
نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵)تغییرات شاخص‌های گسیختگی درمقابل امتداد دسته‌درزه‌ها.

در این قسمت از سه پارامتر بیشینه‌ی بازشدگی، لغزش و دبی عبوری در محل ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه به عنوان شاخص ایمنی تکیه‌گاه استفاده می‌کنیم.

بیشینه‌ی بازشدگی به بیش‌ترین جابه‌جایی نرمال جداره‌های ناپیوستگی نسبت به هم اطلاق می‌شود. بیشینه‌ی لغزش نیز بیش‌ترین جابه‌جایی افقی جداره‌های یک ناپیوستگی نسبت به هم تعریف می‌شود. بیشینه‌ی دبی عبوری بیش‌ترین دبی عبوری از محل یک ناپیوستگی است.



شکل (۶) تغییرات شاخص‌های گسیختگی در مقابل اندازه شکاف هیدرولیکی (دسته درزه‌های (۴۵ و ۴۵-)).

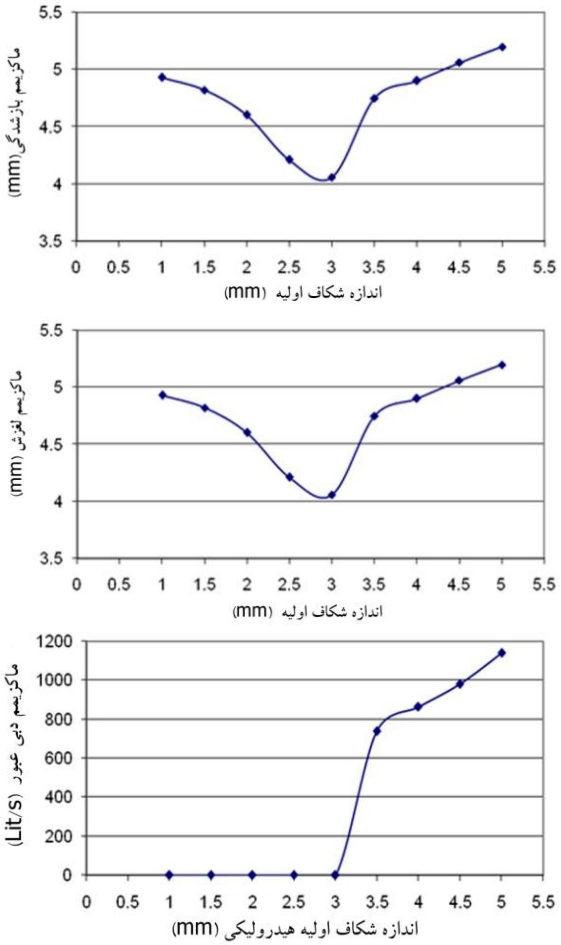
ب- تأثیر اندازه شکاف هیدرولیکی:

نتایج این تحلیل‌ها برای دسته‌درزه‌های متعامد (۴۵ و ۴۵-)

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

و هم‌چنین (۹۰ و ۰)، به‌ترتیب در اشکال ٦ و ۷ نمایش داده شده‌اند. دلایل استفاده از این دو دسته‌درزه شرح داده خواهد شد. در این قسمت نیز از سه پارامتر بیشینه‌ی بازشدگی، لغزش و دبی عبوری در محل ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه به عنوان شاخص ایمنی تکیه‌گاه استفاده می‌کنیم.

برای دسته‌درزه‌هایی که در بارگذاری‌های با مشخصات مذکور در این مقاله، ناپایدارند و در شکل ۵ نیز به آن‌ها اشاره شده است، انجام تحلیل‌های حساسیت اندازه شکاف اولیه، مفهومی نخواهد داشت.



شکل (۷) تغییرات شاخص‌های گسیختگی در مقابل اندازه شکاف هیدرولیکی (دسته درزه‌های (۹۰ و ۰)).

بنابراین از دسته‌درزه‌هایی استفاده خواهد شد که در شرایط بارگذاری موجود پایدارند. از این میان، دسته‌درزه‌های متعامد (٤٥ و ٤٥-) و (۹۰ و ۰) از موقعیت خاصی در شکل ۵ برخوردارند. این دو دسته درزه به ترتیب بحرانی‌ترین و ایمن‌ترین الگوهای هندسی پایدارند. به‌همین دلیل در این تحلیل از این دو دسته‌درزه برای ارزیابی تأثیرات پارامتر هندسی اندازه شکاف اولیه روی ایمنی تکیه‌گاه سنگی سدهای بتنی قوسی استفاده شده است. در این تحلیل‌ها تنها اندازه شکاف اولیه مربوط به دسته‌درزه‌های ٤٥+ و ۹۰ درجه تغییر داده می‌شوند و اندازه شکاف اولیه دسته‌درزه‌های ٤٥- و صفر درجه ثابت است.

در این تحلیل ۱۰ دسته‌درزه مذکور در بخش ٦-۱ شبیه‌سازی شدند. محور افقی این اشکال یک دسته درزه از زوج دسته‌درزه‌های متعامد را نشان می‌دهد؛ مثلاً دسته درزه ۵۰ درجه معرف دسته‌درزه‌های متعامد ۵۰ و ٤٠- درجه است.

۶- تفسیر نتایج

شکل ۵ نشان می‌دهد که دسته‌درزه‌های (۵۰ و ٤٠-)، (٦٠ و ۳۰-) و (۷۰ و ۲۰-) ناپایدارند. در بین دسته‌درزه‌های پایدار در این تحلیل، دسته‌درزه‌های (٤٥ و ٤٥-) بحرانی‌ترین دسته‌درزه را تشکیل می‌دهد، درحالی‌که دسته درزه (۹۰ و ۰) ایمن‌ترین الگوی هندسی دسته‌درزه‌هاست. شاخص‌های گسیختگی برای دسته‌درزه‌های متعامد (٤٥ و ٤٥-) به‌ترتیب عبارتند از ۷۹/۳ میلی‌متر، ۷۹/۳ میلی‌متر و ۷۱/۲۵ لیتر بر ثانیه. با این‌حال باید توجه داشت که اگرچه تکیه‌گاه خود پایدار است اما لغزش و بازشدگی زیاد درزه‌های آن در حد ۷۹ میلی‌متر خود می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های زیاد در بدنه سد و احتمالاً شکست آن شود که در این تحلیل به‌صورت مستقیم قابل نشان دادن نیست. از طرف دیگر برای ایمن‌ترین دسته درزه که (۹۰ و ۰)

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

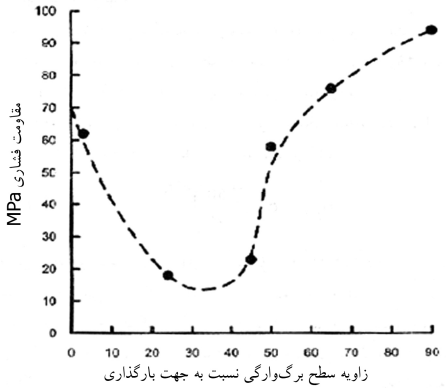
است، مقادیر شاخص‌های گسیختگی به‌ترتیب عبارتند از ۳/٦۲ میلی‌متر، ۳/٦۲ میلی‌متر و ۰/۰۰۸۲ لیتر بر ثانیه که از لحاظ تغییرشکل‌هایی که در بدنه سد ایجاد می‌کند و هم‌چنین میزان نشت از تکیه‌گاه در حد قابل قبول است.

در توجیه نمودار شکل ۵ باید گفت براساس مدل‌های رفتاری مختلف درزه‌ها، میزان لغزش جداره‌های یک درزه که با اتساع و بازشدگی آن‌ها نسبت به یکدیگر همراه است، تابعی از نسبت نیروهای نرمال به برشی درزه‌ها است. مقادیر نیروهای نرمال و برشی درزه‌ها تابعی از جهات درزه‌ها نسبت به امتداد بارگذاری‌های خارجی است. به‌نظر می‌رسد اندرکنش پارامترهای امتداد (جهت‌یافتگی) دسته‌درزه‌ها و نسبت نیروهای برشی و نرمال وارد بر جداره آن‌ها دلیل شکل‌گیری چنین رفتاری است.

در این راستا می‌توان به مجموعه‌ای از نتایج آزمایش مقاومت فشاری که در جهات مختلف روی سنگ‌های آنیزوتروپ[1] و برگواره‌ای[2] نظیر اسلیت‌ها، شیستها و فیلیت، به‌وسیله‌ی سالسدو[3] انجام شده اشاره کرد (شکل ۸). بنابراین شناخت کافی از الگوی هندسی دسته‌درزه‌ها نسبت به جهات بارگذاری‌های سد و مخزن در ارزیابی اولیه از وضعیت پایداری تکیه‌گاه و روش‌های پایداری آن بسیار مؤثر و تعیین‌کننده است.

با توجه به مطالب بالا، طراحی روش‌های بهسازی ژئوتکنیکی در تکیه‌گاه برای ایمن‌ترین و بحرانی‌ترین الگوی هندسی موجود یکسان نخواهد بود و بدین ترتیب می‌توان مدیریت مناسبی در هزینه‌های بعضا زیاد روش‌های بهسازی داشته باشیم. شکل ٦ نشان می‌دهد که روند تغییرات شاخص‌های بازشدگی و لغزش در مقابل شکاف هیدرولیکی، سهمی شکل با تقعری روبه بالاست به‌گونه‌ای که یک اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی، a^*، را می‌توان پیدا کرد که به ازای آن کمینه‌ی مقادیر برای شاخص‌های مذکور اختصاص می‌یابد. برای دسته‌درزه‌های (٤۵ و ٤۵-) به ازای شکاف اولیه ۱ میلی‌متر حداقل مقدار شاخص‌ها رخ می‌دهد درحالی‌که برای دسته‌درزه‌های متعامد (۹۰ و ۰) مطابق شکل ۷ کمینه‌ی مقدار شاخص‌های بازشدگی و لغزش در اندازه شکاف اولیه ۳ میلی‌متر به‌وجود می‌آید.

مقایسه نتایج شاخص‌های بازشدگی و لغزش در دسته‌درزه‌های متعامد (٤۵ و ٤۵-) در مقایسه با حالت (۹۰ و ۰) نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص‌ها در حالت اول به‌مراتب بیش‌تر از حالت دوم است. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که دسته‌درزه‌های متعامد (٤۵ و ٤۵-) از لحاظ پایداری وضعیت بحرانی‌تری برای تکیه‌گاه ایجاد می‌کند. برای مثال با توجه به روند تغییرات بسیار زیاد شاخص‌های بازشدگی و لغزش در اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ۱/٤۸ میلی‌متر می‌توان پیش‌بینی کرد که این مسئله به ناپایداری تکیه‌گاه خواهد انجامید.



شکل (۸) مقاومت فشاری تک محوری در مقابل زاویه سطح برگوارگی نسبت به جهت برگوارگی.

نمایش تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده، جابه‌جایی و سرعت در نقاط مختلف نیز نشان می‌دهد که تکیه‌گاه در آستانه گسیختگی است؛ در صورتی‌که در حالت دسته‌درزه‌های

1- Anisotropic Rock
2- Foliated Rock
3- Salcedo

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

متعامد (۹۰ و ۰) به سختی می‌توان ناپایداری تکیه‌گاه را به ازای اندازه شکاف اولیه خاص مشاهده کرد. برای مثال در شکل ٦ و در لحظه گسیختگی (اندازه شکاف اولیه ۱/٤۸ میلی‌متر) مقدار شاخص‌های گسیختگی بیشینه‌ی لغزش و بازشدگی، ۸۲/۷ میلی‌متر است، در حالی‌که در شکل ۷ و در اندازه شکاف اولیه ۵ میلی‌متر تکیه‌گاه پایدار است و شاخص‌های گسیختگی بالا مقدار ۵/۲٤ میلی‌متر را دارند.

اشکال ٦ و ۷ نشان می‌دهند که شاخص بیشینه‌ی لغزش نیز رفتاری کاملا مشابه با شاخص بیشینه‌ی بازشدگی دارد. به‌طور کلی در شبکه‌های متعامد دسته‌درزه‌ها، بازشدگی در یک دسته درزه مستلزم لغزش در دسته‌درزه مجاور، به همان میزان خواهد بود.

تغییرات دبی با اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی در هر دو حالت دسته‌درزه‌های متعامد (٤۵ و ٤۵-) و (۹۰ و ۰) نشان می‌دهد که مقادیر دبی با افزایش شکاف اولیه هیدرولیکی روندی کاملاً صعودی دارند. هم‌چنین در شکل ٦ می‌توان مشاهده کرد که شاخص بیشینه‌ی دبی عبوری در اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ۱/٤۸ میلی‌متر رفتاری مشابه با شاخص‌های گسیختگی بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش دارد و با افزایش ناگهانی و شدید خود نشان از ناپایداری تکیه‌گاه دارد. در صورتی‌که در شکل ۷ برای دسته‌درزه‌های (۹۰ و ۰) چنین روندی وجود ندارد.

تغییرات بیشینه‌ی دبی در شکل ۷ نشان می‌دهد که میزان دبی به ازای شکاف‌های هیدرولیکی کمتر از ۳ میلی‌متر در حد بسیار جزئی است. این مطلب می‌تواند نشان از بسته شدن درزه‌ها در اثر ترکیب فشارهای هیدرولیکی و مکانیکی مخزن و بدنه سد به تکیه‌گاه باشد.

مقایسه هر سه شاخص نشان می‌دهد که اگر چه این شاخص‌ها بیانگر کمیت‌های مختلفی است ولی هر سه، وضعیت ناپایداری تکیه‌گاه را به‌صورت همزمان (در یک شکاف هیدرولیکی خاص) نشان می‌دهند.

یک بررسی کلی از نمودارهای شکل ٦ برای دسته‌درزه (٤۵ و٤۵-) نشان می‌دهد که تقریباً به‌ازای تمام مقادیر اندازه شکاف‌های هیدرولیکی اولیه، مقادیر بیشینه‌ی لغزش و بازشدگی، زیاد و در حد کمینه‌ی ۷۰ میلی متر است، که احتمالاً شرایط مناسب و پایداری را برای بدنه سد ایجاد نخواهد کرد. ضمن این‌که مقادیر نشت از تکیه‌گاه نیز حتی به ازای مقادیر کم اندازه شکاف هیدرولیکی اولیه، زیاد است.

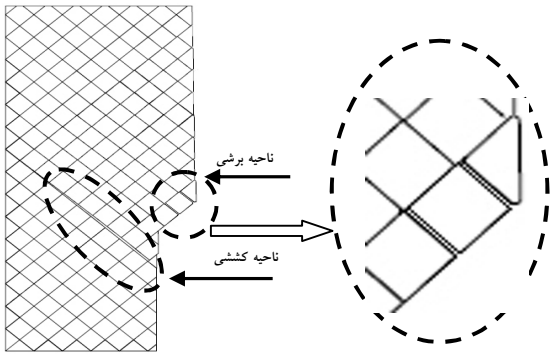
بررسی کلی نمودارهای شکل ۷ برای دسته درزه‌های متعامد (۹۰ و ۰) نیز نشان می‌دهد که مقادیر شاخص‌های گسیختگی بیش‌ترین بازشدگی و لغزش، تقریباً به ازای تمام مقادیر اندازه شکاف اولیه، کم است و شرایط مناسبی را از لحاظ پایداری تکیه‌گاه و هم‌چنین پایداری بدنه پیش‌بینی می‌کند. البته باید توجه داشت که شرایط این تکیه‌گاه در مقابل نشت برای اندازه شکاف‌های اولیه کمتر از ۳ میلی‌متر بسیار مناسب بوده و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر روندی شدیداً صعودی دارد که مثلاً در شکاف اولیه ۳/۵ میلی‌متر منجر به دبی برابر ۸۰۰ لیتر بر ثانیه تنها از یک درزه خواهد شد؛ پس در اندازه شکاف‌های بیش‌تر از ۳/۵ میلی‌متر، تکیه‌گاه از لحاظ پایداری مناسب ولی از لحاظ نشت نامناسب است و بنابراین راهکارهای جلوگیری از نشت همچون تزریق و ایجاد پرده آببند را الزامی می‌کند.

بنابراین در انتخاب یک ساختگاه مناسب به عنوان تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی، لازم است تا دو پارامتر میزان تراوایی و ایمنی آن به شکل همزمان مورد توجه قرار گیرند. شکست سد مالپاسه یک مصداق عملی از نادیده انگاشتن این پدیده ساده اما مهم است. این مسئله در پژوهش انجام شده به‌وسیله‌ی لونده (۱۹۸۷)[۳۰] و بوروس (۲۰۰۵)[۳۱] تأیید شده است.

شکل گسیختگی کلی تکیه‌گاه کاملاً وابسته به الگوی

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

هندسی دسته‌درزه‌ها است که خود بحث جدایی دارد. برای مثال شکل گسیختگی برای دسته‌درزه‌های متعامد (٤٥ و ٤٥-) مطابق شکل ۹ است. بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش در یک ناحیه کششی در بالادست سد اتفاق می‌افتد. ضمن این‌که بلوک‌های در تماس با بدنه سد نیز دچار لغزش می‌شوند که پایداری بدنه سد را به مخاطره خواهند انداخت.



شکل (۹) محل ماکزیمم بازشدگی و لغزش.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با تأکید بر نقش ناپیوستگی‌ها، پایداری تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی در ارتباط با پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

- شاخص‌های بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش درزه‌ها به‌خوبی شرایط پایداری و ناپایداری توده‌سنگ را بیان می‌کنند، چرا که در لحظه گسیختگی کلی تکیه‌گاه، به‌شدت افزایش می‌یابند.
- الگوی هندسی دسته درزه‌ها (شیب و جهت شیب) و اندازه شکاف اولیه آن‌ها، عوامل بسیار تأثیرگذار روی ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی است، به‌گونه‌ای که به ازای مقادیری از آن‌ها لغزش و بازشدگی درزه‌ها و یا دبی عبوری از تکیه‌گاه آنقدر زیاد می‌شود که عملاً نشان‌دهنده ناپایداری تکیه‌گاه و یا نشت شدید از داخل آن است.
- روند تغییرات شاخص‌های گسیختگی، لغزش و بازشدگی به ازای تغییرات اندازه شکاف هیدرولیکی اولیه تقریباً به‌صورت سهمی شکل است، به‌گونه‌ای که غالباً به ازای یک مقدار مشخص اندازه شکاف هیدرولیکی اولیه، مقادیر این شاخص‌ها کمینه خواهند بود.
- نتایج نشان می‌دهد که بعضاً در حالی‌که مقادیر شاخص‌های لغزش و بازشدگی کم است [که حاکی از شرایط پایداری تکیه‌گاه است] ولی، مقدار دبی عبوری از درزه‌ها بسیار زیاد است. پس در بررسی مناسب بودن شرایط تکیه‌گاه برای ساخت سد قوسی لازم است تا علاوه بر معیارهای پایداری تکیه‌گاه مثل مقادیر لغزش و بازشدگی درزه‌ها، مسئله نشت نیز به‌دقت ارزیابی شود.

۸- مراجع

[1]Barton; N; Bandis; B; Bakhtar; K; "Strength Deformation and Conduct ivy of Rock joints"; *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*; 22(3), 1985, 121-143.

[2]Stephansson; O; "The Role of Hydromechanical Coupling in Fractured Rock Engineering"; *Hydrogeology Journal*; 42(3), 2002, 95-123.

[3]Krsmanovic; D; "The Behaviour of the Horizontal Arch Dam Supporting Some Type of Discontinuum"; *Advanced in Rock mechanics*; Volume 1, Part A, Colorado, 1974, Page 187.

[4]Goodman; R.E; Scott; G.A; "Rock Mechanics Dam Safety Studies for Sominoe Arch Dam"; *proceedings of the 1st North American Rock Mechanics symposium*; the University of Texas at Austin, 1994.

[5]Valencia; F.G; Beltran; C.M; "Long-Term Stability of the Santa Roza Dam Left Abutment"; *proceedings of the 1st North American Rock Mechanics symposium*; the university of Texas at Austin, 1994.

[6]Mgalobelov; Yu.B; "ComputationalStudies of Rock Foundation of Arch Dams"; *proceedings of international congress on Rock Mechanics*; Tokyo, Japan, 1995.

[7]Stematiu; D; Bugnariu; T; Constantinesco; AL; "Rock Mechanics problems Related to Three Arch Dams Founded on Faulted Rocks";

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

proceedings of second international conference on the mechanics of jointed and faulted Rock_MJFR_2; Vienna, Austria, 1995.

[8]Abrahamson; N; "Time Histories for Cushman Dam"; *Report to Steve Fischer*; January 14, 2001.

[9]Hamilton; D.H; "Evaluation of the Engineering Geology of the Right Abutment of Cushman Dam"; No. 1 Cushman Project, FERC No. 462, Mason County, Washington, January 2001.

[10]Walsh; J.B; "The effect of cracks on the compressibility of rocks"; *J. of Geophysical Research*; 70(2), 1965, 381–389.

[11]Bandis; S.C; Lumsden; A.C; and Barton; N.R; "Fundamentals of rock joint deformation"; *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci* Geomech Abstr; 20(6), 1983, 249–268.

[12]Brace; W.F; "Permeability of crystalline and argillaceous rock"; *Int. J. of Rock Mech & Min. Sci. Geomech. Abstr;* 17, 1980, 241–250.

[13]Long; J.C.S; and Witherspoon; P.A; "The relationship of the degree of interconnectivity to permeability of fracture networks"; *J. Geophysical Research*; 90(B4), 1985, 3087–3098.

[14]Oda; M; "Permeability tensor for discontinuous rock mass"; *Geotechnique*; 35(4), 1985, 483–495.

[15]Stietel; A; Millard; A; Treille; E; Vuillod; E; Thoraval; A; and Ababou; R; "Continuum Representation of Coupled Hydro-mechanical Process of Fractured Media Homogenisation and Parameter Identification, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process of Fractured Media"; *Elsevier*; 1996.

[16]Lomize; G.M; "Filtratsia v treshchinovatykh"; *Gosudarstvennoe Energetitcheskoe Izdatelstvo;* Moskva, 1951.

[17] Sutera; S. P; Skalak; R; "The history of Poiseuille's law"; *Annual Review of Fluid Mechanics*; Vol. 25, 1993, pp. 1-19.

[18]Brown; S.R; "Fluid flow through rock joints"; *J. of Geophysical Research*; 92(B2), 1987, 1337–1347.

[19]Iwai; K; "Fundamental studies of fluid flow through single fracture"; PhD Thesis, University of California, Berkeley, 1976.

[20]Witherspoon; P.A; Wang; J.S.Y; Iwai; K; and Gale; J.E; "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture"; *Water Resources Research*: 16(6), 1980, 1016–1024.

[21]Louis; C; "Introduction `a l'hydraulique des roches"; PhD Thesis, Paris, 1976.

[22]Thiel; K; "Rock Mechanics in HydroEngineering"; *Elsevier*; 1989.

[23]Engelder; T; and Scholz; C.H; "Fluid flow along very smooth joints at effective pressures up to 200 MPa in mechanical behavior of crustal rocks"; *Am. Geophysics* 24, 1981, 147–152.

[24]Pyrak-Nolte; L.J; Myer; L.R; Cook; N.G.W; and Witherspoon; P.A; "Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock"; *International Congress on Rock Mechanics (ISRM);* Montreal, Canada, 1987, pp. 225–231.

[25]Neuzil; C.E; and Tracy; J.V; "Flow through fractures"; *Water Resources Research*: 1(3), 1981, 191–199.

[26]Brady; B.H.G; and Brown; E.T; "Rock Mechanics for Underground Mining"; *2nd edn, Chapman & Hall*; 1994.

[27]Indraratna; B; and Ranjith; P; "Deformation and permeability characteristics of rocks with interconnected fractures"; *9th International Congress on Rock Mechanics*; Paris, Vol. 2, 1999, pp. 755–760.

[28]Sharma; V.m; Sexena; K.R; Woods; R.D; "*Distinct Element Modeling in Geomechanics*"; Rotterdam, 1990.

[29]ITSCA Consulting Group (1996) UDEC-Universal Distinct Element Code, Version 3.0, Vol. 1, 2 and 3, User's Manual.

[30]Londe; P; "*The Malpasset Dam Failure*"; *Engineering Geology*; 24(1), 1987, 295-329.

[31]Burrows; S; "*The Malpasset Dam Failure*"; *international congress on BEng (Hons) Engineering Geology & Geotechnics*; USA, 2005.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]

Importance of Joint Geomerical Parameters on the Safety of Concrete Arch Dam Abutments

S. Yazdani[1], M. Yazdani[2*], M.T. Ahmadi[3]

1-Student of Msc. Geotechnical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3- Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

myazdani@modares.ac.ir

Abstract:

Concrete arch dams often need sound and strong foundation and abutments due to the usually large hydrostatic pressure imposed on the abutments. Moreover, it is required to limit the water leakage through the abutments and foundation. On the other hand, a hard rock mass often contains joints and discontinuuites, wich are partially created during the thermal and techtonical activities. Several researches have shown that in most cases, the stability and permeability of rock masses are governed by the joints. Therefore, it is necessary to consider the joint roles for preliminary evaluation of a rock mass as abutment and foundation of a concrete arch dam. In addition, the interaction of hydraulic and mechanical behaviour of joints causes the saturated rock masses to act more complicated, hence, it must be considered in the estimation of stability and leakage. In this paper, the effects of geometrical parameters of joints including joint orientations and initial apertures on the safety of a concrete arch dam were evaluated using UDEC software. A two-dimentional model including the waterflow through the joints and a loading from dam and the reservoir was simulated in the analyses. In this study, the dam stresses imposed on the abutment were applied instead of dam body modeling. In all analyses, the hydromechanical interaction effects were considered. The values of maximum sliding, maximum opening and the maximum resulting waterflow along the discontinuities were adopted as criteria for estimating the dam abutment safety. The results demonstrate that the joint sets pattern and initial hydraulic aperture of joints dominate the stability of arch dam abutments.

Keywords: Jointed rock mass, Concrete arch dam, Abutment, Hydromechanical.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-30]