

تأثیر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها بر رفتار هیدرولیکی و نشت آب از تکیه‌گاه‌های سنگی سدهای بتنی قوسی

سعید یزدانی^۱، محمود یزدانی^{۲*}، محمد تقی احمدی^۳

۱- کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

myazdani@modares.ac.ir

چکیده- یکی از مسائل مهم در طراحی سدهای بتنی قوسی، کنترل و محدودسازی میزان نشت جریان از بالادست به پایین‌دست از طریق تکیه‌گاه‌ها است. به دلیل شدت بارهای وارد شده از سد به تکیه‌گاه، معمولاً سدهای بتنی قوسی را در ساختگاه‌هایی بنا می‌کنند که توده‌سنگ تکیه‌گاه‌های آن از شرایط سختی و مقاومت کافی برخوردار باشند. با این حال سنگهای سخت و مقاوم به دلیل ماهیت شکننده، همواره حاوی تعدادی درزه یا ناپیوستگی هستند. از آنجا که این ناپیوستگی‌ها به‌عنوان مجاری جریان می‌توانند موجب تراوش زیاد آب از طریق تکیه‌گاه شده و حتی باعث ناپایداری تکیه‌گاه‌ها شوند، لذا باید از نظر هیدرولیکی و همچنین مکانیکی به‌طور کامل مورد بررسی قرار گیرند. در این تحقیق سعی شده است که تأثیر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها -مانند امتداد دسته درزه‌ها و میزان شکاف دهانه آنها- بر رفتار هیدرولیکی تکیه‌گاه و میزان نشت از داخل آن مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین تأثیر میزان شکاف دهانه ناپیوستگی‌ها -که پارامتری هیدرولیکی محسوب می‌شود- بر ایمنی تکیه‌گاه بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها تأثیر قابل ملاحظه و تعیین کننده‌ای بر میزان نشت از توده‌سنگ تکیه‌گاه داشته و در مواردی می‌توانند ایمنی تکیه‌گاه را نیز به خطر بیندازد.

کلید واژگان: سد بتنی قوسی، توده سنگ درزه‌دار، نشت، تکیه‌گاه سد، ناپیوستگی‌های سنگی.

۱- مقدمه

معمولاً بیشتر تراوش در توده‌سنگ از طریق ناپیوستگی‌های آن صورت می‌گیرد. سدهای بتنی قوسی به‌علت ساختار خاص سازه‌ای، همواره به تکیه‌گاه‌هایی با مقاومت و سختی زیاد نیاز دارند. از طرفی ساختار ناپیوستگی‌ها و جنس توده‌های سنگی نباید به‌گونه‌ای باشد که اجازه تراوش زیاد و غیرقابل کنترل آب از بالادست به پایین دست را از طریق تکیه‌گاه‌ها بدهد. اگرچه استفاده از روشهای بهسازی برای کنترل تراوش آب را همواره به‌عنوان یکی از راه‌حل‌ها

به‌طور معمول توده‌های سنگی، از قطعات سنگی بکری تشکیل می‌شوند که توسط ناپیوستگی‌ها از هم جدا شده‌اند. سنگ بکر جسم پیوسته و منسجم سنگ است که فاقد هرگونه ناپیوستگی مهم است. البته در مقیاس کوچک سنگ بکر می‌تواند حاوی ریزترکهایی باشد که در فرایند تشکیل سنگ به‌وجود آمده‌اند. تراوش از داخل توده سنگ از طریق ناپیوستگی‌ها و ریزترکه‌های موجود در سنگ سالم رخ می‌دهد.

می‌توان بررسی کرد. از آنجا که به دلایل سازه‌ای، فقط از توده‌های سنگی سخت به‌عنوان تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی استفاده می‌شود، در مطالعه جریان آب از داخل تکیه‌گاه می‌توان میزان تراوش از داخل سنگ را ناچیز و در حد صفر در نظر گرفته و بیشتر تراوش را از طریق کانالهای ناپیوستگی فرض کرد.

بر طبق قوانین مکانیک سیالات نشان داده می‌شود که با فرض عبور جریان لایه‌ای برای سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر از میان صفحات موازی، دبی جریان، با توان سوم فاصله میان صفحات متناسب است. لذا اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی پارامتری بسیار مهم در بحث تراوش از میان ناپیوستگی‌های سنگی است.

جریان آب تحت فشار، بسته به میزان تنش‌های وارد شده از طرف بدنه سد به تکیه‌گاه و همچنین جهت ناپیوستگی‌ها، می‌تواند بر تنش‌های نرمال سطح تماس دیوارهای ناپیوستگی غلبه کرده و با باز کردن بیشتر مجاری جریان، توزیع تنش‌ها در توده سنگ 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 توده سنگ تأثیر گذاشته که آن هم به‌نوبه خود باعث تغییر خطوط هم‌پتانسیل و شبکه جریان می‌شود. در مقابل، این تغییرات هیدرولیکی منجر به تغییر میدان تنش بر اثر نیروهای تراوش می‌شود. این فرایند دوطرفه که از آن به‌عنوان اندرکنش هیدرومکانیکی تعبیر می‌شود، آنقدر ادامه می‌یابد تا محیط به تعادل برسد. براساس تعریف فوق، جهت ناپیوستگی‌ها نسبت به امتداد نیروی وارد شده از طرف بدنه سد و همچنین نسبت به امتداد فشار آب مخزن، پارامتر هیدرولیکی دیگری است که به‌طور غیر مستقیم بر پاسخ هیدرولیکی و نشست از تکیه‌گاه این‌گونه سدها تأثیر می‌گذارد. این مسأله وقتی ملموس‌تر می‌شود که بدانیم در شبکه آبرسانی، شکل و الگوی قرارگیری لوله‌ها نسبت به یکدیگر بر میزان دبی خروجی بسیار مؤثر است.

فشار آب پشت سد که با عمق سد تغییر می‌کند، پارامتر هیدرولیکی دیگری است که بر مقادیر نشست از تکیه‌گاه تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی پارامترهای هیدرولیکی مذکور علاوه بر نشست، بر پایداری تکیه‌گاه نیز بسیار مؤثر است.

(Londe (1987) خرابی سد قوسی مالپاسه^۱ به ارتفاع ۶۲ متر واقع در جنوب فرانسه در نزدیکی مدیترانه را بررسی کرده است. در این تحقیق نشان داده شده که بر اثر فشردگی ناحیه پایین دست سد، زهکشی مناسب آب در این ناحیه انجام نشده و فشار آب در گسل‌های پی سد افزایش یافته و این به تشکیل یک بلوک ناپایدار سنگی، لغزش آن در تکیه‌گاه چپ و در نتیجه فروپاشی کل جناح چپ سد و دوران کل سازه سد حول تکیه‌گاه راست آن انجامیده است. (Mgalobelov (1995 در مطالعات خود بر روی تکیه‌گاه سه سد بتنی قوسی، وجود ناحیه خطرناک کششی در بالادست سد را -که بیشترین میزان نشست از آنجا رخ می‌دهد- نتیجه گرفت. این نشان از اهمیت نقش مسائل هیدرولیکی تکیه‌گاه بر ایمنی و پایداری سد دارد.

بیشتر مطالعات عددی انجام شده بر روی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی با هدف ارزیابی پایداری توده‌سنگ تکیه‌گاه در شرایط مختلف انجام شده و نقش کمی و کیفی ناپیوستگی‌ها در ارتباط با پاسخ هیدرولیکی توده‌سنگ درزه‌دار، کمتر ارزیابی شده است. نگاه کلی به وضعیت تکیه‌گاههای سدهای بتنی قوسی در حال ساخت به ویژه در کشور ما نشان می‌دهد که هزینه‌های مربوط به کنترل نشست از تکیه‌گاهها -که شامل حفر گالریهای تزریق و اجرای پرده آبنده می‌شود- گاهی بسیار بیشتر از هزینه‌هایی است که ممکن است برای تأمین پایداری تکیه‌گاهها صرف شود. علاوه بر این، مشکلات هیدرولیکی، خود می‌تواند باعث ناپایداری تکیه‌گاهها شود؛ لذا بررسی مسأله تراوش و پارامترهای مؤثر بر آن در مورد تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی بسیار حیاتی است.

1. Malpasset

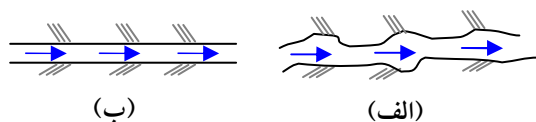
$$e_0 = \frac{JRC}{5} \left(\frac{0.2\sigma_c}{JCS - 0.1} \right) \quad (1)$$

که e_0 اندازه شکاف اولیه مکانیکی معادل بوده و JRC، σ_c و JCS به ترتیب ضریب زبری جدار ناپیوستگی، مقاومت فشاری جدار ناپیوستگی و مقاومت فشاری بلوک سنگی سالم است.

اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی معادل نیز برای محاسبات هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها از رابطه زیر تبعیت می‌کند (Barton et al., 1985):

$$a_0 = \frac{e_0^2}{JRC^{2.5}} \quad (2)$$

که a_0 اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی است.



شکل ۱ شکل ناپیوستگی الف) اندازه شکاف واقعی و متغیر ب) اندازه شکاف معادل و ثابت.

در حالتی که ناپیوستگی با مواد سست و ضعیف پر می‌شود، انتخاب صحیح پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی برای ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ بسیار مشکلی است. در این حالت خواص هیدرولیکی و مقاومتی ناپیوستگی‌ها، به ویژگیهای مواد پرکننده، جابه‌جایی برشی ایجاد شده، ماهیت سطح درزه و ضخامت مواد پرکننده بستگی دارد. برای مثال نفوذپذیری ناپیوستگی که با خاک رس پر شده برابر با نفوذپذیری رس است.

۳- شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی درزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار UDEC

UDEC نوعی نرم‌افزار محاسبات عددی دوبعدی است که برای شبیه‌سازی محیطهای ناپیوسته بر اساس روش المان مجزا به کار می‌رود. این نرم‌افزار پاسخ محیطهای ناپیوسته (مانند توده سنگ درزه‌دار) را برای بارگذارهای استاتیکی

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار UDEC که برای مدلسازی محیطهای ناپیوسته براساس روش المانهای مجزا تهیه شده و به‌خوبی نقش ناپیوستگی‌ها و اندرکنش هیدرومکانیکی را در محیطهای توده‌سنگی ملحوظ می‌کند، پاسخ هیدرولیکی و میزان نشت آب از تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی مطالعه شده است. همچنین تأثیر پارامترهای هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها بر روی ایمنی تکیه‌گاه و سازه سد ارزیابی شده است.

۲- رفتار هیدرولیکی درزه‌های سنگی

همان‌طور که در خاک، رابطه تجربی داری برای بیان شدت جریان و گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل برقرار است، به منظور تعیین خصوصیات هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها نیز آزمایشهای بسیار زیادی انجام شده تا رابطه‌ای بین شدت جریان و گرادیان هیدرولیکی با استفاده از روشهای تجربی و تحلیلی برای این محیط به‌دست آورد. مساله جریان درون ناپیوستگی را به‌وسیله معادلات مایعات لزج تراکم‌ناپذیر ناوراستوکس می‌توان توصیف کرد. معادلات دیفرانسیل ناور استوکس را در حالت کلی نمی‌توان حل کرد. بنابراین با فرض جریان لایه‌ای و با فرض اینکه سرعت عمود بر صفحه ناپیوستگی برابر صفر است: نفوذپذیری ناپیوستگی از رابطه $\frac{g(a)^3}{12\nu}$ به‌دست می‌آید (Barton et al., 1985)، که ν لزجت سینماتیکی سیال و a شکاف اولیه هیدرولیکی (بازشدگی اولیه هیدرولیکی) ناپیوستگی است.

ناپیوستگی‌های توده‌سنگ درزه‌دار معمولاً جدارهای ناهمواری دارند و اندازه شکاف اولیه در طول هر ناپیوستگی مقدار ثابتی نیست. در تحلیل مسائل هیدرولیکی (و مکانیکی) با توجه به نقش اساسی ناپیوستگی‌ها، از اندازه شکاف متوسط و معادل استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۱ اندازه شکاف مکانیکی معادل در طول ناپیوستگی از رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود (Barton and Bandis, 1987):

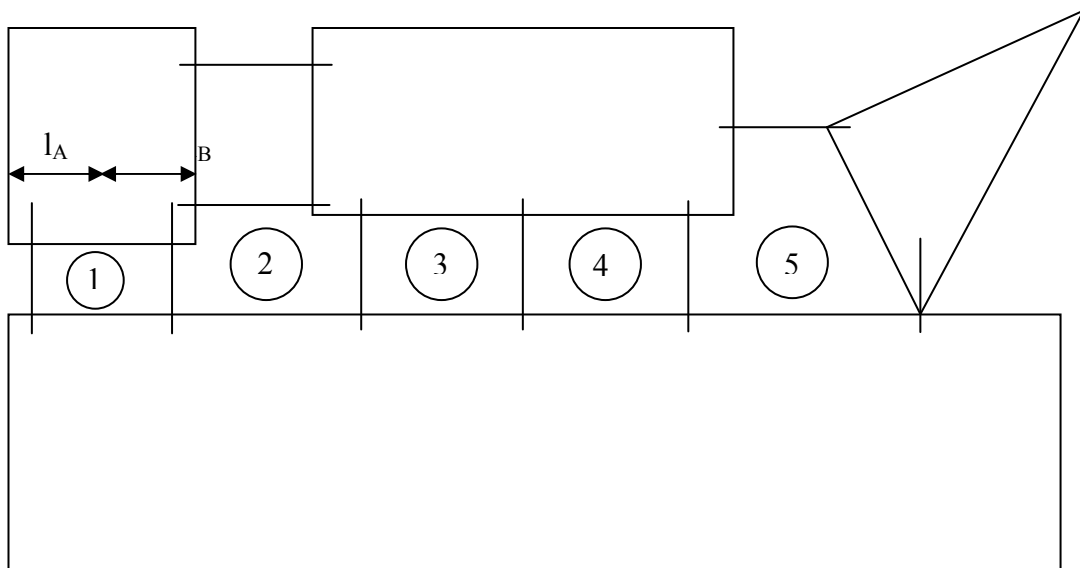
درزه‌های بین دو بلوک توسط دو دامنه ۳ و ۴ شبیه‌سازی می‌شود. اگر شبکه‌بندی ریزتری مورد نظر باشد باید از تعداد بیشتری دامنه در مجاورت هم استفاده شود. در غیاب نیروی جاذبه فرض می‌شود که فشار سیال به‌طور یکنواخت پخش می‌شود. در مسائلی که نیروی جاذبه وجود دارد، فرض می‌شود که فشار هیدرواستاتیکی حاکم است. به بیان دیگر فشار سیال مربوط به هر دامنه در راستای جاذبه به صورت خطی تغییر می‌کند و فشار سیال مربوط به هر دامنه برابر با فشار وسط آن است. جریان به علت تفاوت فشار سیال در دو دامنه مجاور ایجاد می‌شود. نرخ جریان، بسته به نوع نقطه تماس به دو طریق محاسبه می‌شود. برای هر نقطه تماس نرخ جریان (از یک دامنه با فشار P_1 به یک دامنه با فشار P_2) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q = k_c \Delta p \quad (3)$$

که k_c پارامتر نفوذپذیری نقطه تماس است و $\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1)$ (۴) که چگالی سیال و g شتاب ثقل است (که فرض می‌شود در خلاف جهت y عمل می‌کند). y_1 و y_2 مختصات مراکز دامنه‌های مجاور است.

و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. UDEC قابلیت شبیه‌سازی جریان سیال از میان درزه‌های سیستم نفوذپذیر را داشته و نوعی تحلیل هیدرومکانیکی کامل در آن انجام می‌شود که در طی آن نفوذپذیری درزه‌ها، به تغییر شکل مکانیکی آنها بستگی دارد. همچنین رفتار مکانیکی درزه‌ها، بر اساس تنش موثر تحلیل می‌شود.

در این نرم‌افزار روشی خاص برای نمایش دوبعدی ناپوستگی بین بلوکهای سنگی به کار می‌رود. ناپوستگی‌ها در واقع شبکه‌ای از حفره‌های به هم پیوسته و کانالها هستند که با عنوان دامنه معرفی می‌شوند. در شکل ۲ دامنه‌ها از ۱ تا ۵ شماره‌گذاری شده‌اند. شماره‌های ۱، ۳ و ۴ نشان دهنده درزه‌ها، شماره ۲ محل تقاطع دو درزه و شماره ۵ بیانگر حفره است. دامنه‌ها توسط نقاط تماس از یکدیگر جدا می‌شوند. این نقاط تماس بیانگر نیروهای ناشی از اندرکنش مکانیکی بلوکهای سنگی می‌باشند. قابلیت شکل‌پذیری بلوکها توسط المانهای سه گوش مدل‌سازی می‌شود. نقاط تماس ممکن است در محل نقاط شبکه بلوکها یا در امتداد لبه‌ها و در نقاط دیگر باشند. برای مثال در شکل ۲ نقطه D این خصوصیات را دارد.



شکل ۲ تعاریف دامنه مورد استفاده در UDEC

در لبه‌ها اعمال می‌شود، به‌دست می‌آید. این نیرو را می‌توان با سایر نیروها مانند نیروی مکانیکی و بارهای خارجی (مرزی) جمع کرد تا تنش مؤثر در هر نقطه تماس حاصل شود.

۴- شاخص‌های هیدرولیکی و ایمنی توده‌سنگ درزه‌دار

ارزیابی کمی و کیفی پاسخ هیدرولیکی و مکانیکی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی به‌وسیله روشهای عددی، مستلزم استفاده از شاخص‌های هیدرولیکی و ایمنی مرتبط با محیط‌های توده‌سنگی درزه‌دار است. در همین راستا و برای ملموس شدن فرایند، از سه شاخص هیدرولیکی بیشینه دبی عبوری، بیشینه بازشدگی و نشت استفاده شده است. نشت به‌صورت حجم کل آبی که در واحد زمان در پایین‌دست سد از تکیه‌گاه خارج می‌گردد تعریف می‌شود. بیشینه دبی، عبوری و بیشینه بازشدگی به‌ترتیب بیشترین حجم آب گذرنده در واحد زمان و بیشترین بازشدگی ناپیوستگی‌ها است که در محل ناپیوستگی ایجاد می‌شود. البته محل ناپیوستگی (نقاط تماس) مربوط به بیشینه دبی، الزاما بر محل مربوط به بیشینه بازشدگی منطبق نیست. برای بررسی پایداری تکیه‌گاه نیز از شاخص گسیختگی به نام بیشینه لغزش ناپیوستگی‌ها استفاده شده است. در این مورد نیز منظور، حداکثر میزان لغزشی است که در کل ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه رخ داده و مربوط به یک نقطه تماس است. با توجه به اینکه نشت زیاد یا دبی زیاد عبوری از یک ناپیوستگی، خود می‌تواند باعث ناپایداری تکیه‌گاه شود، لذا شاخص‌های هیدرولیکی به‌طور غیرمستقیم، خود نوعی شاخص ایمنی نیز می‌تواند باشند.

۵- تحلیل تراوش از تکیه‌گاه سد بتنی قوسی

در این تحقیق نوعی محیط توده‌سنگی دوبعدی به عنوان تکیه‌گاه سد بتنی قوسی فرضی شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی هندسه‌ای به صورت شکل ۳ در نظر

در مواردی که تماس لبه به لبه وجود دارد می‌توان نوعی طول تماس را تعریف کرد (برای مثال در شکل ۲، L_A و L_B طول تماس A و B را نشان می‌دهد). در این مورد قانون مکعب می‌تواند در مورد جریان در ناپیوستگی‌های دوبعدی به‌کار رود. در این حالت دبی جریان با رابطه ذیل توصیف می‌شود:

$$q=ba^3\Delta p/l \quad (5)$$

که در آن b پارامتر نفوذپذیری است (مقدار تئوری آن $1/12\mu$ است که μ لزجت دینامیکی سیال است). a و l به‌ترتیب بازشدگی هیدرولیکی در نقطه تماس و طول تعریف شده برای نقطه تماس در دامنه است. در UDEC کاربر می‌تواند b را تعریف کند و از توان غیر ۳ استفاده نماید. در حالت کلی بازشدگی هیدرولیکی عبارت است از:

$$a=a_0+u_n \quad (6)$$

که a_0 و u_n به‌ترتیب بازشدگی اولیه درزه در محل نقطه تماس تحت تنش صفر و تغییر مکان نرمال درزه در اثر بارگذاری است. قابل ذکر است که بازشدگی با علامت مثبت و بسته شدن با علامت منفی منظور می‌شود. برنامه UDEC روش خاصی را برای حل معادلات حرکت و دینامیک سیستم به‌کار می‌برد. این الگوریتم دینامیکی برای مسائل شبه دینامیکی نیز قابل استفاده است. در هر گام محاسباتی مکانیکی، هندسه سیستم مشخص می‌شود؛ بنابراین پارامترهای هندسی (بازشدگی و لغزش) در هر نقطه تماس، مقادیر جدیدی پیدا کرده و حجم دامنه‌ها در هر گام محاسبه می‌شود. فشار دامنه نیز در هر گام به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$P=P_0+k_w Q\Delta t/V-k_w\Delta V/V_m \quad (7)$$

که P_0 ، Q و k_w به‌ترتیب فشار دامنه در اولین گام، مجموع دبی‌های گذرنده از نقاط تماس مجاور دامنه و مدول بالک سیال است. همچنین $\Delta V=V-V_0$ و $V_m=(V+V_0)/2$ که V و V_0 حجم دامنه در دو گام متوالی محاسباتی است. با محاسبه فشار جدید در هر دامنه، نیرویی که توسط سیال

درزه‌های متعامد $+20^\circ$ و -70° درجه، $+30^\circ$ و -60° درجه، $+45^\circ$ و -45° درجه، $+60^\circ$ و -30° درجه، $+80^\circ$ و -10° درجه، $+90^\circ$ و صفر درجه نسبت به افق ملحوظ می‌شود. به‌عنوان مثال در شکل ۳ دسته درزه‌های متعامد $+45^\circ$ و -45° درجه نشان داده شده است. ناپیوستگی‌های شبیه‌سازی شده در این مدل بر اساس مدل رفتاری موهر-کولمب الاستوپلاستیک کامل عمل می‌کنند. با تأکید بر نقش ناپیوستگی‌ها در این تحقیق، رفتار مکانیکی بلوک‌ها نیز به‌صورت الاستیک فرض می‌شود. در همه حالتها دسته‌درزه‌های متعامد نسبت به دسته‌درزه‌های با زاویه تند و منفرجه، بحرانی‌ترین حالت را تشکیل می‌دادند، به همین دلیل در این تحقیق از دسته‌درزه‌های متعامد استفاده شد. با این حال اثر جهت‌یافتگی (زاویه امتداد) ناپیوستگی‌ها به تنهایی و متعامد و غیر متعامد بودن آنها نسبت به جهت جریان آب، شکل و موقعیت هندسی تکیه‌گاه و جهت بار فشاری سد به تکیه‌گاه نیز قابل بررسی و تفسیر است.

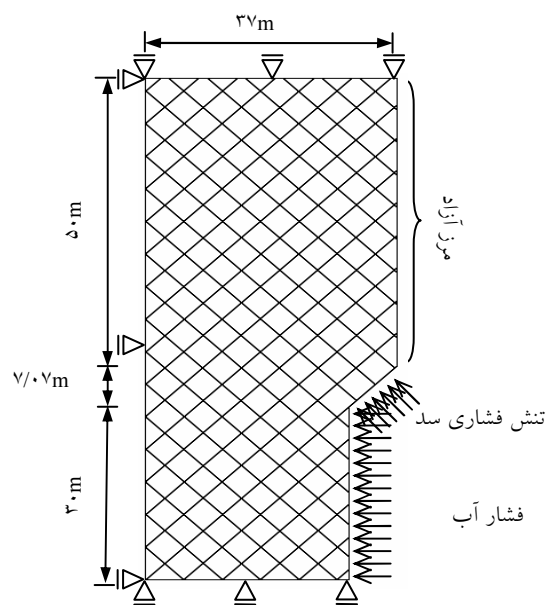
در ضمن بازشدگی اولیه دسته درزه‌های $+20^\circ$ ، $+30^\circ$ ، $+45^\circ$ ، $+60^\circ$ ، $+80^\circ$ و $+90^\circ$ برابر $0/5$ میلی‌متر و دسته‌درزه‌های متعامد متناظر آنها یعنی -70° ، -60° ، -45° ، -30° ، -10° و صفر درجه برابر صفر است. سایر خصوصیات مکانیکی همه دسته درزه‌های متعامد همان‌طور که در جدول ۱ آمده، یکسان فرض شده است.

که k_n ، k_s ، ϕ ، c ، σ_t و ψ به ترتیب سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی و زاویه اتساع ناپیوستگی‌ها بوده و E و ν نیز به ترتیب مدول تغییر شکل و ضریب پواسن بلوک سنگی است.

۶- نتایج تحلیلیها

در این تحقیق دو گروه تحلیل انجام شده است. در گروه اول تحلیلیها، تأثیر پارامترهای هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها (اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی و الگوی هندسی دسته درزه‌ها) بر شاخص‌های هیدرولیکی تکیه‌گاه مانند بیشینه

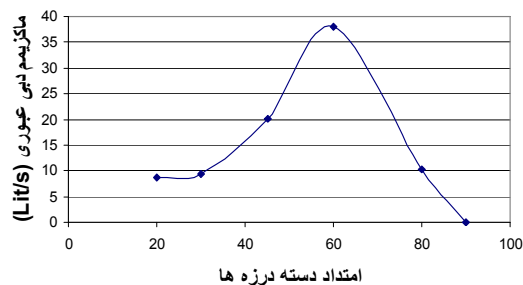
گرفته شده که بر اساس آن ضخامتی از سد که با تکیه‌گاه در تماس است ۱۰ متر منظور شده و به‌جای شبیه‌سازی بدنه سد، نیرویی را که بر تکیه‌گاه وارد می‌کند اعمال می‌کنیم. طولی از تکیه‌گاه که در تماس با آب پشت سد است ۳۰ متر فرض شده و از طریق اعمال فشار مکانیکی همراه با هد هیدرولیکی، تأثیر آب پشت سد شبیه‌سازی می‌شود.



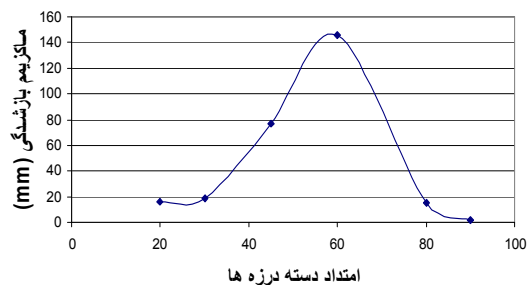
شکل ۳ تکیه‌گاه شبیه سازی شده

برای تخمین نیروهای وارد بر تکیه‌گاه از طرف سد و مخزن، قسمتی از سد با طول قوس ۱۰۰ متر، ضخامت ۱۰ متر و ارتفاع واحد در نرم‌افزار المان محدود SAP همراه تکیه‌گاه‌های آن شبیه‌سازی شد. مدل شبیه‌سازی شده، در عمق ۲۰۰ متری سطح نرمال ایستایی آب مخزن فرض شده که فشاری برابر $P_0=2\text{MPa}$ بر بدنه سد ایجاد می‌کند. برای آنکه نتایج به حالت سه‌بعدی و واقعی نزدیک شود، در تراز مربوط وزن روباره با توجه خصوصیات سنگ بکر در جدول ۱ محاسبه و استفاده شد. بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار SAP، تنش وارد بر تکیه‌گاه از طرف بدنه سد برابر ۱۰ مگاپاسکال برآورد شد. در این تحقیق زوج دسته

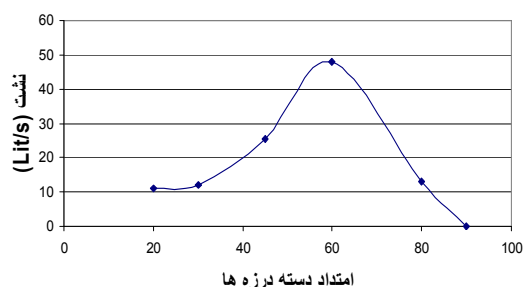
امتداد دسته درزه از دسته درزه‌های متعامد را نشان می‌دهد؛ برای مثال دسته درزه +۴۵ درجه معرف دسته درزه‌های متعامد +۴۵ و -۴۵ درجه است.



الف- حداکثر بازشدگی



ب- حداکثر دبی عبوری



ج- نشت

شکل ۴ تغییرات شاخص‌های هیدرولیکی

در مقابل امتداد دسته درزه‌ها

شکل ۴ نشان می‌دهد که شاخص‌های هیدرولیکی تکیه‌گاه سد، تابعی غیرخطی از امتداد دسته درزه‌ها هستند. این شکل نشان می‌دهد که وضعیت دسته درزه متعامد +۶۰ و ۳۰- بحرانی‌تر از دیگر دسته درزه‌های متعامد است. برای مثال در این دسته درزه میزان بیشینه دبی عبوری، بیشینه بازشدگی و نشت کل، به ترتیب برابر ۳۸ لیتر بر ثانیه، ۱۴۵ میلی‌متر و ۴۸ لیتر بر ثانیه است که حدود دو برابر مقادیر

دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها، بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها و نشت ارزیابی شده است. در گروه دوم تحلیلها برای ارزیابی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی دسته درزه‌ها بر ایمنی تکیه‌گاه و سازه سد، تأثیر اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی دسته درزه‌ها بر شاخص گسیختگی تکیه‌گاه بررسی شده است.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی بلوکهای سنگی و درزه‌ها*

دسته درزه ۴۵ درجه	دسته درزه -۴۵ درجه	بلوک سنگی
$k_n=100 \text{ Gpa/m}$	$k_s=100 \text{ Gpa/m}$	$E_s=10 \text{ Gpa}$
$k_n=100 \text{ Gpa/m}$	$k_s=100 \text{ Gpa/m}$	$\nu=0.3$
$\phi=35$	$\phi=35$	$\gamma=2700 \text{ kg/m}^3$
$c=0.1 \text{ Mpa}$	$c=0.1 \text{ Mpa}$	
$\sigma_t=0$	$\sigma_t=0$	
$\psi=5$	$\psi=5$	

* گردآوری شده از:

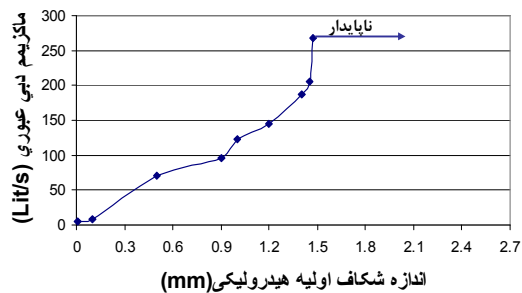
Manual of UDEC, User's Guide, Section 1, "Introduction".

لازم است ذکر شود که مطالعه جداگانه‌ای نیز توسط نگارندگان بر روی تأثیر اندازه مدل بر شاخصهای هیدرولیکی انجام شده که شرح آنها در [۹] آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه ابعاد مدل می‌تواند بر نتایج تأثیر بگذارد اما در روند و کیفیت تغییرات پارامترها کمترین اثر را دارد.

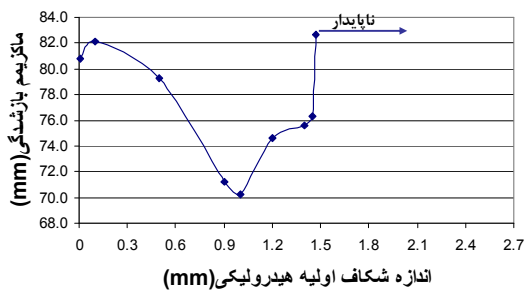
۱-۶- گروه اول تحلیلها

بعد از اعمال بارگذاری‌ها بر تکیه‌گاه شبیه‌سازی شده در شکل ۳، پارامترهای بیشینه دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها، بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها و نشت جریان از تکیه‌گاه به‌عنوان شاخصی برای عبور جریان از تکیه‌گاه استخراج شد.

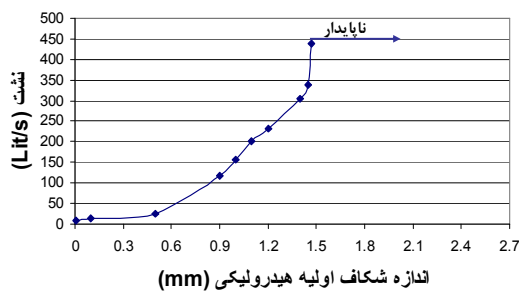
شکل ۴ تأثیر امتداد دسته درزه‌ها را بر بیشینه دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها، بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها و میزان نشت از تکیه‌گاه نشان می‌دهد. محور افقی این شکلها



الف- حداکثر دبی عبوری



ب- حداکثر بازشدگی



ج- نشت

شکل ۵ تغییرات شاخص‌های هیدرولیکی به ازای تغییر اندازه اولیه (برای دسته درزه‌های متعامد +۴۵ و -۴۵ درجه)

۶-۲- گروه دوم تحلیلها

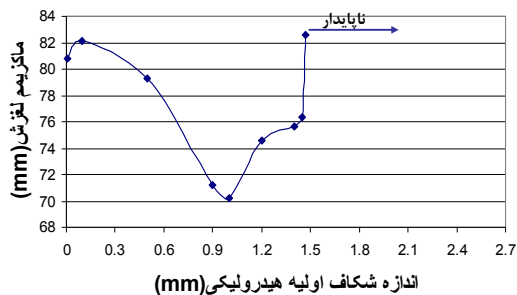
برای ارزیابی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی دسته درزه‌ها بر ایمنی تکیه‌گاه و سازه سد، فقط تأثیر اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی دسته درزه‌ها بر ایمنی تکیه‌گاه بررسی شد. در این حالت نیز دسته درزه‌های متعامد +۴۵ و -۴۵ درجه و +۹۰ و صفر درجه مدنظر قرار گرفت. نتایج این تحلیل در شکلهای ۷ و ۸ نشان داده شده است.

نظیر در دسته درزه +۴۵ و -۴۵ با مقادیر ۲۰ لیتر بر ثانیه، ۷۵ میلی‌متر و ۲۶ لیتر بر ثانیه است.

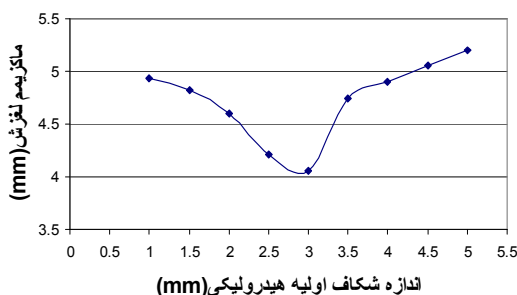
در ادامه تحلیل‌های گروه اول، تأثیر اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ناپوستگی‌ها بر سه شاخص هیدرولیکی: میزان بیشینه دبی عبوری و بیشینه بازشدگی که در یک درزه اتفاق می‌افتد و همچنین میزان نشت کل از تمام تکیه‌گاه بررسی می‌شود. شکلهای ۵ و ۶ تغییرات این سه شاخص را به ازای اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی به-ترتیب برای دسته درزه‌های متعامد +۴۵ و -۴۵ درجه و +۹۰ و صفر درجه نشان می‌دهند.

لازم است توضیح داده شود که شکاف اولیه هیدرولیکی دسته‌درزه‌های -۴۵ و صفر درجه ثابت و برابر صفر در نظر گرفته شده و فقط مقادیر مربوط به دسته‌درزه‌هایی +۴۵ و +۹۰ تغییر داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است در حالت دسته‌درزه‌های متعامد +۴۵ و -۴۵ درجه و اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ۱/۴۸ میلی‌متر مقادیر هر سه شاخص به‌نحوی غیرقابل کنترل روندی افزایشی پیدا می‌کنند. با توجه به این روند می‌توان پیش‌بینی کرد که این اندازه شکاف هیدرولیکی اولیه (۱/۴۸ میلی‌متر) بحرانی بوده و به ازای آن ناپایداری در تکیه‌گاه به‌وجود خواهد آمد.

در صورتی‌که در دسته درزه متعامد +۹۰ و صفر درجه چنین روندی مشاهده نمی‌شود. در عوض مقادیر بیشینه دبی و نشت کل در این دسته درزه از دسته درزه +۴۵ و -۴۵ بسیار بیشتر است. به‌طور کلی در دسته درزه متعامد +۹۰ و صفر برای بازشدگی‌های اولیه بیشتر از ۲ میلی‌متر، مشکل نشت بسیار شدید است. به‌عنوان مثال برای بازشدگی اولیه ۳/۵ میلی‌متر میزان نشت از یک تکیه‌گاه سد بیشتر از ۲/۵ مترمکعب به‌دست آمده است. با توجه به اینکه این میزان نشت مربوط به یک متر ارتفاع سد است، میزان کل نشت در تمام ارتفاع سد می‌تواند بسیار زیاد باشد که راهکارهای آبنندی را ضروری می‌سازد.



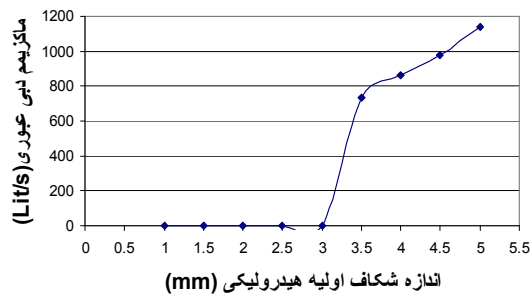
شکل ۷ تغییرات شاخص گسیختگی به ازای تغییر اندازه شکاف اولیه (برای دسته درزه‌های متعامد $+45^\circ$ و -45° درجه)



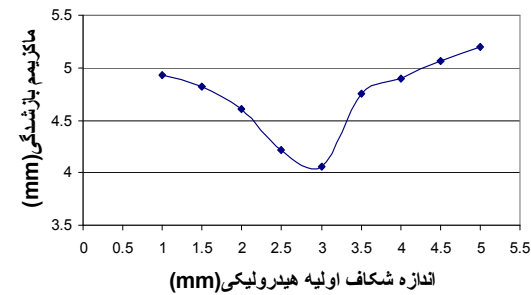
شکل ۸ تغییرات شاخص گسیختگی در مقابل اندازه شکاف اولیه (برای دسته درزه‌های متعامد $+90^\circ$ و 0° درجه)

البته همان‌طور که در گروه اول تحلیلها مشخص شد، باید توجه داشت که در خصوص نشت، وضعیت در دسته درزه‌های $+90^\circ$ و صفر درجه بحرانی‌تر است. همچنین دیده می‌شود که بین شاخص گسیختگی لغزش و پارامتر هیدرولیکی اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی، رابطه‌ای غیرخطی وجود دارد که در قسمتی از آن شاخص گسیختگی روند نزولی و در قسمت دیگر روندی صعودی دارد. برای دسته درزه‌های 90° و صفر درجه نیز نتایج مشابهی به دست آمده است.

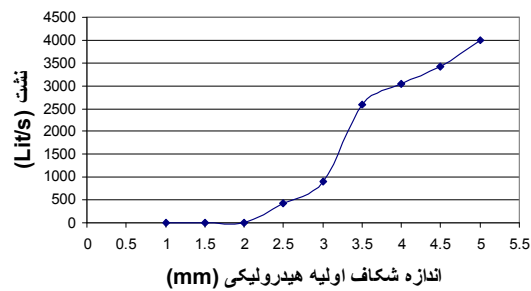
لازم است ذکر شود که در این قسمت از تحلیل برای مشخص شدن روند گسیختگی کلی چند دستور در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار UDEC اضافه شد. با استفاده از این دستورها، بر اساس مشاهده جابه‌جایی و سرعت نقاط مختلف، گسیختگی کلی تکیه‌گاه و ناحیه‌ای که گسیختگی کلی در آن صورت می‌گیرد قابل مشاهده است.



الف - حداکثر دبی عبوری



ب - حداکثر بازشدگی



ج - نشت

شکل ۹ تغییرات شاخص‌های هیدرولیکی در مقابل اندازه شکاف اولیه (برای دسته درزه‌های متعامد $+90^\circ$ و 0° درجه)

این شکلها به ترتیب نتایج مربوط به دسته درزه‌های متعامد $+45^\circ$ و -45° درجه و $+90^\circ$ و صفر درجه را نشان می‌دهد. برای الگوی هندسی اول و در لحظه گسیختگی (اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی $1/48$ میلی‌متر) شاخص گسیختگی $82/7$ میلی‌متر است. در حالی که برای الگوی هندسی دوم در اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی 5 میلی‌متر نیز تکیه‌گاه پایدار است و شاخص گسیختگی برابر $5/24$ میلی‌متر. این نتایج به وجود شرایط پایدار در دسته درزه‌های $+90^\circ$ و صفر درجه نسبت به دسته‌درزه‌های $+45^\circ$ و -45° درجه اشاره دارد.

هر یک از سه شاخص هیدرولیکی در امتدادهای مختلف رفتاری کاملاً مشابه دارند، به نحوی که برای دسته درزه‌های متعامد $+90^\circ$ و صفر درجه کمترین مقدار و برای دسته درزه‌های $+60^\circ$ و -30° درجه بیشترین مقدار شاخص‌های هیدرولیکی به دست می‌آید. به همین دلیل این دو الگوی هندسی در شرایط اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی $0/5$ و صفر میلی‌متر برای هر زوج دسته درزه به ترتیب دارای کمترین و بیشترین تراوایی هستند. این موضوع می‌تواند کمک شایانی در تشخیص اهمیت مسأله نشت از تکیه‌گاه‌های سد بتنی قوسی با ناپیوستگی‌های از پیش موجود داشته باشد.

در شکل ۵ با توجه به روند تغییرات بسیار زیاد شاخص‌های هیدرولیکی در اندازه بحرانی شکاف اولیه هیدرولیکی $1/48$ میلی‌متر می‌توان پیش‌بینی کرد که این مسأله به ناپایداری تکیه‌گاه خواهد انجامید. در واقع در حالت دسته درزه‌های $+45^\circ$ و -45° درجه شاخص‌های هیدرولیکی، خود شاخص گسیختگی نیز هستند. به علاوه مقایسه دو شاخص هیدرولیکی میزان نشت و بیشینه دبی عبوری نشان می‌دهد که هر دو شاخص، رفتاری مشابه داشته و بیشتر جریان نیز فقط از طریق یک ناپیوستگی انجام می‌شود. نتایج تراوش از میان ناپیوستگی‌ها همچنین نشان می‌دهد که محل ناپیوستگی با حداکثر دبی، در بالادست سد و در مجاورت مخزن است. بر طبق قانون مکعب نفوذپذیری ناپیوستگی‌ها و توده‌سنگ با مکعب اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی مرتبط است؛ به همین دلیل رفتارهای مشاهده شده از شاخص‌های نشت و بیشینه دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها قابل انتظار است.

در شکل ۵ دیده می‌شود که شاخص هیدرولیکی بیشینه بازشدگی در قسمتی از مسیر، همزمان با افزایش دو شاخص هیدرولیکی دیگر، افت پیدا می‌کند. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از این شاخص برای توصیف پاسخ هیدرولیکی تکیه‌گاه مناسب نباشد. در توجیه رفتار شاخص بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها باید گفت، در

نکته مهم آن است که ممکن است مقادیر مربوط به شاخص‌های هیدرولیکی و گسیختگی ارائه شده در این بخش غیر متعارف بوده و در عمل مشاهده نشود. یکی از مهمترین دلایل این مطلب، فرض آب‌بند نبودن درزه‌ها و تکیه‌گاه سد است که در عمل چنین نیست. از طرفی شاید به صراحت نتوان ناپایداری تکیه‌گاه سد را بر اساس مدل شبیه‌سازی شده، در عمل نتیجه گرفت، زیرا مدل دوبعدی و در صفحه افقی است. در صورتی که مسأله ناپایداری در تکیه‌گاه سدهای قوسی، پدیده‌ای کاملاً سه بعدی است. هر چند تأثیرات روباره برای نزدیک شدن نتایج به حالت سه بعدی ملحوظ شده است.

در توجیه استفاده از مدل‌های دو بعدی و عدم شبیه‌سازی پرده آب‌بند در این تحقیق باید گفت که طبیعت توده سنگ درزه‌دار از نظر ساختار و وضعیت تنش موجود در آن، تا حد زیادی ناشناخته است. به همین دلیل شبیه‌سازی دقیق رفتار توده‌سنگ درزه‌دار مشکل و در مواردی ناممکن بوده و شبیه‌سازی هندسی سه بعدی و واقعی آن -جز در موارد خاص- امکانپذیر نیست. در این حالت استفاده از روش‌های دوبعدی برای درک مهندسی بهتر از اثرات نسبی پدیده‌های مختلف در طراحی‌های مکانیک سنگ مؤثر است. از این طریق طراح می‌تواند محدوده خطر را (از نظر بارگذارهای نامناسب یا شرایط گسیختگی) حدس بزند. از طرفی با توجه به حاکم بودن نقش درزه‌ها بر طبیعت رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار، شایسته است قبل از پیش‌بینی و طراحی هرگونه روش بهسازی مانند تزریق پرده آب‌بند، شناختی کلی از خصوصیات هیدرولیکی و مقاومتی توده‌سنگ تکیه‌گاه تحت تأثیر پارامترهای مختلف درزه‌ها (بدون در نظر گرفتن پرده آب‌بند) حاصل شود.

۷- تفسیر نتایج

شکل ۴ نشان می‌دهد که به ازای اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی $0/5$ و صفر میلی‌متر برای هر زوج دسته درزه،

بیشینه مقادیر لغزش و بازشدگی در ناحیه بالادست و در مجاورت محل تماس سد با تکیه‌گاه رخ می‌دهند که پایداری سازه سد را به مخاطره خواهد انداخت. زیرا بلوک‌های موجود در این ناحیه در حال لغزش و جدائی از سایر بلوک‌ها هستند.

شکل ۸ نیز رفتاری شبیه به شکل ۷ دارد و نشان می‌دهد که در هر دو الگوی هندسی از دسته درزه‌ها مقادیر اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها به‌عنوان مهمترین پارامتر هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار، تأثیر مشابهی بر شاخص گسیختگی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی دارد. همچنین نتایج این بخش نشان می‌دهد که الگوی هندسی دسته درزه‌ها تعیین کننده نوع پدیده کنترل کننده طراحی تکیه‌گاه از نظر پایداری و نشست است. به‌عنوان مثال در حالت دسته درزه‌های $+45$ و -45 درجه هر دو مسأله نشست و ناپایداری مهم و تعیین کننده هستند، در حالی که برای دسته درزه‌های $+90$ و صفر درجه فقط مسأله نشست حاکم بر طرح است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با شبیه‌سازی تکیه‌گاه سد بتنی قوسی و با تأکید بر نقش ناپیوستگی‌ها، میزان نشست و پاسخ هیدرولیکی تکیه‌گاه همراه با تأثیرات آنها بر ایمنی تکیه‌گاه بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

- زاویه امتداد ناپیوستگی‌ها و بازشدگی اولیه آنها اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان نشست از تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی دارند.
- اثر جهت‌یابی زاویه امتداد ناپیوستگی‌ها به‌تنهایی و متعامد و غیر متعامد بودن آنها نسبت به جهت جریان آب، شکل و موقعیت هندسی تکیه‌گاه و جهت بار فشاری سد به تکیه‌گاه قابل بررسی و تفسیر است.
- شاخص بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها نمی‌تواند معیار مناسبی برای رفتارهای هیدرولیکی تکیه‌گاه باشد، زیرا همانند دو شاخص هیدرولیکی مهم بیشینه دبی عبوری

ناپیوستگی‌های با اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی کم، سیال برای عبور از کانالهای ناپیوستگی، فشار زیادی به جدارهای آن اعمال می‌کند. این موجب افزایش بازشدگی ناپیوستگی‌ها می‌شود. در ادامه با افزایش اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی شرایط برای عبور سیال از ناپیوستگی‌ها مساعدتر می‌شود. به همین دلیل فشار کمتری به جدارها وارد شده و بازشدگی ناپیوستگی‌ها کمتر دچار تغییر می‌شوند. با افزایش بیشتر اندازه شکاف اولیه، میزان نشست به شدت رشد می‌کند، به‌نحوی که در پایان به ناپایداری و افزایش میزان بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها منجر می‌شود.

مقایسه دو شاخص هیدرولیکی نشست و بیشینه دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها در شکل ۶ نشان می‌دهد که در حالت دسته‌درزه‌های $+90$ و صفر درجه، بیشتر تراوش از سه ناپیوستگی رخ می‌دهد. محل این ناپیوستگی‌ها نیز در بالادست سد و در مجاورت مخزن است. به‌عنوان مثال به ازای اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ۴ میلی‌متر، مقدار دبی حداکثر عبوری برابر ۸۶۳ لیتر بر ثانیه و مقدار کل نشست برابر ۳۰۴۰ لیتر بر ثانیه است؛ ضمن اینکه باز هم شاهد تفاوت رفتاری شاخص بیشینه بازشدگی با دو شاخص هیدرولیکی دیگر هستیم. همچنین نتایج تحلیلهای مربوط به تغییرات شاخص‌های هیدرولیکی، وجود یک ناحیه کششی خطرناک در بالادست - که بیشترین میزان نشست و دبی از آنجا رخ می‌دهد - تأیید کرده و لزوم اقدامات لازم برای آبنند کردن آن قسمت را روشن می‌سازد.

در شکل ۷ شاخص گسیختگی بیشینه لغزش ناپیوستگی‌ها رفتاری کاملاً مشابه با شاخص هیدرولیکی بیشینه بازشدگی در شکل ۴ دارد. در محیطهای ناپیوسته با ناپیوستگی‌های متقاطع، بازشدگی در یک ناپیوستگی مستلزم لغزش در ناپیوستگی دیگر است. این نکته در توجیه تشابه رفتاری میان نمودارهای بیشینه بازشدگی و لغزش در مقابل تغییرات اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها می‌تواند مفید باشد. بنابراین بیشینه بازشدگی ناپیوستگی‌ها می‌تواند شاخص گسیختگی نیز محسوب شود.

σ_c	مقاومت فشاری بلوک سنگی سالم
σ_t	مقاومت کششی ناپیوستگی
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال
ν	ویسکوزیته سینماتیکی سیال

و نشت رفتار نمی‌کند. این شاخص در کنار شاخص پیشینه لغزش بیشتر می‌تواند رفتار گسیختگی تکیه‌گاه را نشان دهد.

- در حالتی که شاخص‌های هیدرولیکی نشان‌دهنده تراوش زیاد و روبه بینهایت باشند به دلیل ایجاد ناپایداری برای تکیه‌گاه این شاخص‌ها می‌توانند خود نیز نوعی شاخص ایمنی باشند.

- بسته به امتداد دسته‌درزه‌ها نسبت به جهت بارگذاری، بیشتر تراوش می‌تواند از طریق یک یا چند ناپیوستگی در بالادست اتفاق بیفتد. این مسأله خطر تشکیل یک ناحیه کششی خطرناک در بالادست را - که بیشترین نشت در آنجا رخ می‌دهد - در پی دارد.

- شاخص گسیختگی پیشینه لغزش به خوبی وضعیت پایداری یا ناپایداری محیط توده سنگی تکیه‌گاه را توصیف می‌کند.

- پارامترهای هیدرولیکی تأثیر به‌سزایی بر رفتار مکانیکی توده سنگ درزه‌دار مانند بازشدگی و لغزش دارند. این مطلب به خوبی اهمیت ملحوظ کردن اندرکنش هیدرومکانیکی در تحلیل محیط‌های توده سنگی را نشان می‌دهد.

۹- فهرست علائم

a	ناپیوستگی
a_0	اندازه شکاف اولیه هیدولیکی
C	چسبندگی جداره ناپیوستگی
E	مدول تغییر شکل بلوک سنگی
e_0	اندازه شکاف اولیه مکانیکی معادل ناپیوستگی
JRC	ضریب زبری جداره ناپیوستگی
JCS	مقاومت فشاری جداره ناپیوستگی
k_s	سختی برشی ناپیوستگی
k_n	سختی نرمال ناپیوستگی
ψ	زاویه اتساع ناپیوستگی
φ	زاویه اصطکاک جداره ناپیوستگی

۱۰- منابع

یزدانی کچوئی، س. (۱۳۸۵). "بررسی تأثیر رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ درزه دار بر پایداری تکیه‌گاههای سدهای بتنی قوسی". پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.

Barton, N., Bandis, B. and Bakhtar, K. (1985). "Strength deformation and conductivity of rock joints". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences., 22(3), pp. 121-143.

Londe, P. (1987). "The Malpasset Dam Failure". Engineering Geology, 24(1), pp. 295-329.

Manual of UDEC, (2003). User's Guide, Section 1, "Introduction".

Mgalobelov, Yu.B. (1995). "Computational Studies of Rock Foundation of Arch Dams". Proc. Int. Conf. Rock Mechanics, Tokyo, Japan, pp. 75-87.

Savich, A.I., Bronshtein, V.I., Andreev, M., Gorshkov, Yu.M., Youndina, I.V. and Turina, I.A. (1993). "Comprehensive Monitoring in River Bed Portion of Ingury Dam Foundation". Proc. Int. Sym. Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul, Turkey.

Stematiu, D., Bugnariu, T. and Constantinesco, A.L. (1995). "Rock Mechanics Problems Related to Three Arch Dams Founded on Faulted Rocks". Proc. MJFR_2, Int. Conf. The Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, Austria.

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

Thomas, H.H. and Rutqvist, J. (1976). The Engineering of Large Dams. John Wiley, New York, USA.