مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۸۹، جلد سوم، شماره ۱ و۲، صفحه ۷۱ تا ۸۲

مطالعه عددی دوبعدی پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی با تاکید بر نقش درزه‌های سنگی و جریان آب در آنها

سعید یزدانی [۱]، محمود یزدانی [۲*]

دریافت مقاله: ۹۰/۳/۴ پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۵

چکیده

در سدهای بتنی قوسی، بخش عمده فشارهای هیدرواستاتیکی در اثر عملکرد قوسی و طره‌ای بدنه سد به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌شود. به همین دلیل در بررسی ایمنی این‌گونه سدها، ارزیابی درست از وضعیت پایداری تکیه‌گاه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ناپایداری تکیه‌گاه عموماً به شکل گسیختگی در راستای لایه‌های ضعیف یا دسته درزه‌های آن رخ می‌دهد. علاوه بر آن، فشار آب عبوری از درزه‌ها نیز لغزش و گسیختگی در امتداد صفحات ضعف مذکور را تسهیل می‌کند. این مقاله به بررسی اهمیت پارامترهای مقاومتی درزه‌ها و تأثیر جریان آب بر ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی می‌پردازد. اگرچه مطالعه دقیق این مسئله نیاز به انجام تحلیل‌های سه‌بعدی دارد، لیکن به دلیل پیچیدگی‌های زیاد در مدل‌سازی سه‌بعدی محیط‌های درزه‌دار، خصوصاً با در نظرگرفتن رفتار اندرکنش هیدرولیکی- مکانیکی، در این تحقیق از تحلیل‌های دوبعدی استفاده شد. با این‌حال به منظور افزایش اعتبار نتایج تحلیل‌های دوبعدی، توزیع نیروهای وارده بر مدل تحلیل دوبعدی از نتایج تحلیل‌های سه بعدی یک سد بتنی قوسی و توده‌سنگ ساختگاه آن استخراج شد. پایداری تکیه‌گاه سد مورد نظر با استفاده از دو روش افزایش تدریجی فشار آب مخزن و کاهش پارامترهای مقاومتی درزه‌ها و ضریب ایمنی SRF مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا از پنج پارامتر بیشینه بازشدگی و لغزش در امتداد درزه‌ها، شدت بازشدگی و شدت لغزش در سرتاسر تکیه‌گاه و همچنین بیشینه دبی عبوری در محل درزه‌ها به عنوان شاخص‌هایی جهت ارزیابی ایمنی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که فرض عدم عبور جریان آب از درزه‌ها، غالباً نادرست بوده و می‌تواند ضرایب ایمنی تکیه‌گاه را بسیار بالاتر از میزان واقعی آن نشان دهد. همچنین ایمنی تکیه‌گاه، حساسیت کمی نسبت به پارامترهای مقاومتی و مکانیکی درزه‌ها دارد.

کلید واژه‌ها: *سد بتنی قوسی، هیدرومکانیک، درزه سنگی، عددی، دو بعدی*

۱. کارشناس ارشد مکانیک خاک و پی- دانشگاه تربیت مدرس
۲. استادیار گروه مهندسی خاک و پی- دانشگاه تربیت مدرس myazdani@modares.ac.ir
* مسئول مکاتبات

مقدمه

در سدهای بتنی قوسی پایداری سد به علت شکل قوسی آن حاصل می‌شود. به علت عملکرد قوسی این‌گونه سدها، فشار هیدرواستاتیکی پشت سد تماماً به جداره‌های سنگی دره یا تکیه‌گاه‌های سد منتقل می‌شود. بنابراین تکیه‌گاه و فونداسیون این‌گونه سدها همواره نیروی قابل توجهی را تحمل می‌کنند. به‌همین دلیل لازم است توده‌سنگ تکیه‌گاه و فونداسیون از استحکام کافی برای تحمل نیروها برخوردار باشد. علاوه بر آن همانند دیگر سدها، مساله نشت از تکیه‌گاه و فونداسیون از اهمیت فراوانی برخوردار است. به‌نحوی‌که یک محل مناسب برای احداث سد بتنی قوسی، یک توده‌سنگی با حداقل نفوذپذیری است.

از طرفی سنگ‌ها عموماً درزه‌دارند و یافتن یک ساختگاه سنگی بدون هرگونه ناپیوستگی در اکثر موارد امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل معمولاً تکیه‌گاه و فونداسیون سدهای بتنی قوسی شامل تعدادی ناپیوستگی به اشکال مختلف است. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد(Goodman and scott 1944) که ناپیوستگی‌ها نقش اساسی در شکل‌پذیری و استحکام توده‌سنگ به عهده دارند و معمولاً لغزش و دوران بلوک‌هایی که از تقاطع چند درزه با هم به‌وجود می‌آیند باعث تخریب توده‌سنگ و سازه‌های مرتبط با آن می‌شوند. همچنین جریان عبوری از توده‌سنگ درزه‌دار عمدتاً از طریق ناپیوستگی‌های آن صورت می‌گیرد و سهم خلل و فرج و ریزترک‌های موجود در سنگ سالم در این ارتباط ناچیز است. مطالعات انجام شده دراین زمینه نیزنشان می‌دهد (Goodman and Scott, 1994) که تشکیل بلوک‌های ناپایدار (ناشی از فشار آب زیاد در گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها) در پی و تکیه‌گاه سد، یکی از اصلی‌ترین عوامل ناپایدار کننده این سدها است. بنابراین نادیده انگاشتن نقش ناپیوستگی‌ها بعضاً می‌تواند منجر به ارائه یک طرح غیر ایمن (یا حتی یک طرح غیر اقتصادی) شود. بنابراین شایسته است قبل از احداث سد و پیش‌بینی هرگونه روش بهسازی توده‌سنگ، پایداری توده‌سنگ تکیه‌گاه، متأثر از پارامترهای مختلف درزه‌های آن بررسی شود تا مناسب‌بودن ساختگاه سنگی موردنظر به‌طور مستقل ارزیابی شود.

مساله نشت در محیط‌های توده‌سنگی نیز از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. به‌نحوی‌که جریان عبوری از درزه‌ها، به‌عنوان تنها مجاری جریان در توده‌سنگ، کاهش تنش‌های مؤثر رابه همراه دارد که منجر به افزایش بازشدگی‌ها و لغزش‌ها در امتداد درزه‌ها می‌شود. علاوه بر آن رفتار درزه‌ها در یک توده‌سنگ اشباع، پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به رفتار آنها در یک محیط کاملاً خشک دارد. برای مثال، درزه‌ها متأثر از نیروهای خارجی تغییر شکل می‌یابند. این تغییر شکل‌ها که به صورت بازشدگی و لغزش رخ می‌دهد نفوذپذیری اولیه درزه و توده‌سنگ را تغییر می‌دهد. تغییرات نفوذپذیری، توزیع فشار آب حفره‌ای درون توده‌سنگ را تغییر می‌دهد و در نتیجه تنش‌های مؤثر در امتداد درزه‌ها نیز دچار تغییر خواهد شد. درمقابل، تغییرات تنش مؤثر تغییرشکل‌های جدیدی را رقم خواهد زد. این فرآیند دوطرفه که از آن به عنوان اندرکنش هیدرومکانیکی تعبیر می‌شود، آن‌قدر ادامه می‌یابد تا محیط به تعادل برسد. بنابراین به خوبی روشن است که برای تحلیل دقیق توده‌سنگ تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی لازم است تأثیرات جریان آب نیز مورد توجه قرار گیرد.

از طرفی شبیه‌سازی، تحلیل و طراحی در مهندسی سنگ از پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به سایر زمینه‌های مهندسی برخوردار است. علت این موضوع، متغیر بودن خواص مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری، تنش‌های برجا و سایر پارامترهای مربوط به توده‌سنگ است. با این‌حال، در شرایطی که داده‌های ورودی لازم برای ارائه تحلیلی دقیق محدود هستند، تکنیک‌های عددی ابزارهایی بسیار سودمند و رایج در مهندسی سنگ هستند که به‌وسیله آنها می‌توان ارزیابی اولیه مناسبی از پایداری توده‌سنگ حاصل کرد. پس از حصول یک شناخت اولیه از رفتار سیستم (توده‌سنگ درزه‌دار)، مناسب است تا محاسبات ساده اولیه برای فرآیند طراحی بسط داده شود. البته در شرایطی که اطلاعات مناسبی مثل شناخت کامل از رفتار مصالح و داده‌های میدانی وجود داشته باشد، شبیه‌سازی‌های اولیه می‌تواند به‌طور مستقیم در طراحی‌ها به

کار رود. به عبارتی نتایج حاصله از این روش‌ها زمانی اعتبار دارند که برنامه‌ها با داده‌های مناسب اولیه همراه باشند.

بنابراین شبیه‌سازی‌های عددی می‌توانند در دو حالت پیش‌بینی کامل و یا یک آزمون عددی اولیه برای ارزیابی مفاهیم به‌کار برده شوند. توصیه می‌شود تحلیل مسائل مهندسی سنگ همواره با شبیه‌سازی‌های ساده شروع شود و مدل در ادامه، با مقیاس و جزئیات کامل‌تر شبیه‌سازی شود. این ساده‌سازی‌ها شامل استفاده از مدل‌های رفتاری ساده برای بلوک‌های سنگی و درزه‌ها، انتخاب روش‌های عددی دوبعدی و... می‌باشد. این روش‌ها یک نمای ساده از مکانیزم رفتاری سیستم فراهم می‌کند و نتایج حاصل از آن این امکان را به طراح می‌دهد تا نیاز به شبیه‌سازی‌های پیچیده یا ساده‌تر را برای درک بهتر رفتار واقعی‌تر سیستم تشخیص دهد.

اکثر مطالعات انجام شده برروی سدهای بتنی قوسی، به اهمیت نقش درزه‌ها بر پایداری تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی قوسی تاکید دارند (Goodman and Scott, 1994; Krsmanovic, 1974; Valencia and Beltran, 1994; Mgalobelov, 1995; Stematiu and Bugnariu, 1995; Abrahamson, 2001; Hamilton, 2001)

با این حال تحقیقات فوق عمدتاً بررسی تأثیرات جریان سیال درون درزه‌ها و پدیده هیدرومکانیکی برروی پایداری تکیه‌گاه و بررسی ارتباط پارامترهای مختلف درزه‌ها با مکانیزم‌های رفتاری و گسیختگی را در نظر نگرفته‌اند. لازم به ذکر است مولفین این مقاله پیش‌تر به بررسی تأثیرات پارامترهای مختلف درزه برروی پایداری و مساله نشت از تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی با استفاده از تحلیل‌های دوبعدی پرداخته‌اند (یزدانی و یزدانی (۱۳۸۹)). در آنجا نیروهای وارد بر تکیه‌گاه از طرف بدنه سد و مخزن، بر اساس تجربه مؤلفین در زمینه تحلیل و طراحی سدهای بتنی قوسی انتخاب شده‌اند. در تحقیق حاضر سعی شده است تا تمامی نکات مورد نظر در طراحی‌های مهندسی سنگ و روش‌های عددی، با محوریت رفع نواقص موجود در مطالعات قبلی لحاظ گردد. بنابراین در این مطالعه به بررسی پایداری یک سد بتنی قوسی واقعی که مشخصات آن در ادامه بیان خواهد شد، تحت تأثیر پارامترهای مکانیکی دسته‌درزه‌ها پرداخته خواهد شد. در این راستا از نرم‌افزار UDEC که برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته، با در نظر گرفتن نقش ناپیوستگی‌ها و براساس روش المان‌های مجزا تهیه شده استفاده خواهد شد.

جریان در توده‌سنگ

تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که اندازه و شکل حفرات سنگ سالم، درزه‌ها، خواص هندسی درزه‌ها و درهم قفل‌شدگی آنها بر نفوذپذیری توده‌سنگ حاکم است. برای سنگ‌های با نفوذپذیری کم، جریانات آب و گاز به طور عمده از طریق شبکه‌ای از ناپیوستگی‌های به‌هم مرتبط رخ می‌دهد. در سال‌های اخیر کارهای تجربی و تحلیلی مهمی بر روی آثار متقابل تغییر شکل و جریان در توده‌سنگ درزه‌دار اشباع با لحاظ کردن روش‌های جریان ناپیوستگی مجزا و محیط‌های متخلخل[3] انجام شده است. استفاده از تحلیل محیط‌های متخلخل، تنها برای سنگ‌های با تخلخل زیاد مثل ماسه سنگ مناسب می‌باشد. در این روش که تاکنون به‌طور گسترده‌ای در مکانیک خاک استفاده شده، جریان و خواص انتقال جریان در سنگ با فرض محیطی پیوسته بررسی می‌شود. با این‌حال، مناسب‌ترین روش محاسبه جریان، بسته به میزان در دسترس بودن اطلاعات زمین‌شناختی و دقت مورد نیاز در تخمین جریان، انتخاب می‌شود. برای مثال پارامترهای لازم در استفاده از روش‌های ناپیوستگی مجزا به منظور ارزیابی رفتار توده‌سنگ درزه‌دار، عبارتنداز بازشدگی و جهت‌یافتگی درزه‌ها، ضمن اینکه توزیع درزه‌ها و چگالی آنها در توده‌سنگ نیز در انتخاب روش تحلیل بسیار مؤثر است. در پایان اینکه اکثر روش‌های تحلیلی جریان در توده‌سنگ‌ها با فرض اشباع بودن محیط شکل گرفته‌اند؛ در صورتی‌که در واقعیت همواره با محیط کاملاً اشباع روبه‌رو نیستیم.

جریان از درون یک ناپیوستگی

پارامترهای اندازه شکاف اولیه، جهت یافتگی درزه‌ها، جهات و مقادیر بارگذاری وارد بر توده سنگ از عوامل اصلی حاکم

3. Porous Media

بر جریان عبوری از یک درزه است. روابط استفاده شده برای محاسبه جریان از طریق یک درزه به‌علت پارامترهای متغیر آن با فرضیات متعددی همراه بوده است. مهم‌ترین آنها رابطه معروفی است که با فرض عبور جریان لایه‌ای از طریق دو صفحه موازی و صاف (بدون در نظر گرفتن هرگونه تغییر شکل) ارائه شده است که در آن به دلیل وجود توان ۳ برای پارامتر اندازه شکاف، در مکانیک سنگ به قانون مکعب شهرت دارد :

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

J : گرادیان هیدرولیکی

l : پهنای قطعات درزه

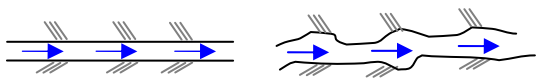
b: اندازه شکاف درزه در هر قطعه

μ: ویسکوزیته دینامیکی سیال

γ: وزن مخصوص سیال

تحقیقات Tsang and Stephansson (1996) نشان داد که جریان عبوری از درزه تابعی از زبری سطح درزه، اندازه شکاف متغیر در امتداد درزه، مقدار بارهای خارجی و جهات آنها نسبت به جهت یافتگی درزه و خواص مصالح پرکننده آن است. در این راستا Tsang and Witherspoon (1981) و Brown (1987) تحقیقاتی را برای وارد کردن تأثیرات زبری سطح در قانون مکعب انجام داده‌اند. برای لحاظ کردن تأثیرات زبری سطح، ضریب λ[۴] که تابعی از عدد رینولدز Re و اندازه شکاف درزه است تعریف می‌گردد. برای یک ناپیوستگی سنگی، Louis (1976) متوجه شد که بسته به مقدار ضریب λ، مدهای مختلف جریان مثل جریان لایه‌ای و آشفته می‌تواند رخ دهد. در حالت کلی λ تابعی از عدد رینولدز، زبری درزه (k) و اندازه شکاف هیدرولیکی (D_h) آن است. برای یک درزه صاف ($k/D_h \leq ۰/۰۳۳$) ضریب λ تنها تابعی از عدد رینولدز بوده و جریان نیز به شکل لایه‌ای درنظر گرفته می‌شود. با این حال Pyrak-Nolte et al. (1987) هم بر اساس مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که قانون مکعب در درزه‌های طبیعی در شرایط تنش کمتر از ۲۰ مگاپاسکال معتبر می‌باشد.

بر اساس قانون مکعب، اندازه شکاف درزه یک پارامتر کلیدی برای تعیین میزان دبی عبوری از آن است. معمولاً اندازه‌گیری توزیع اندازه شکاف یک درزه، کار مشکلی است. درزه‌های طبیعی معمولاً زبر با جداره‌های ناصاف و نامنظم هستند و بیان یک اندازه شکاف اولیه واحد برای درزه، کار بسیار مشکلی است. با این‌حال در مدل‌های ریاضی معمولاً برای ساده‌سازی، ناپیوستگی‌ها به صورت جداره‌هایی صاف و موازی شبیه‌سازی می‌شوند (شکل ۱).



ب الف

شکل ۱- شکل ناپیوستگی (الف) اندازه بازشدگی واقعی و متغیر (ب) اندازه بازشدگی معادل و ثابت

پارامتر مؤثر دیگر در محاسبات جریان درزه مقدار بازشدگی باقی‌مانده است. در این بازشدگی بسته شدن درزه‌ها متوقف شده و تغییر شکلی در درزه اتفاق نمی‌افتد. بازشدگی باقیمانده تابعی از وضعیت تنشهای خارجی، پروفیل اولیه سطح درزه و خواص هندسی و فیزیکی آنها است.

نرم‌افزار UDEC

نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی دوبعدی است که برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته بر اساس روش المان مجزا تهیه شده است. این نرم‌افزار پاسخ محیط‌های ناپیوسته (مثل توده‌سنگ درزه‌دار) را در مقابل بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. UDEC قابلیت شبیه سازی جریان سیال از میان درزه‌های یک سیستم نفوذپذیر را داشته و نرم افزار مناسبی است برای تحلیل هیدرومکانیکی جریان، مخصوصاً در مواردی که جریان از طریق شبکه‌ای از ناپیوستگی‌ها صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار بر اساس مدهای

4. pressure drop coefficient

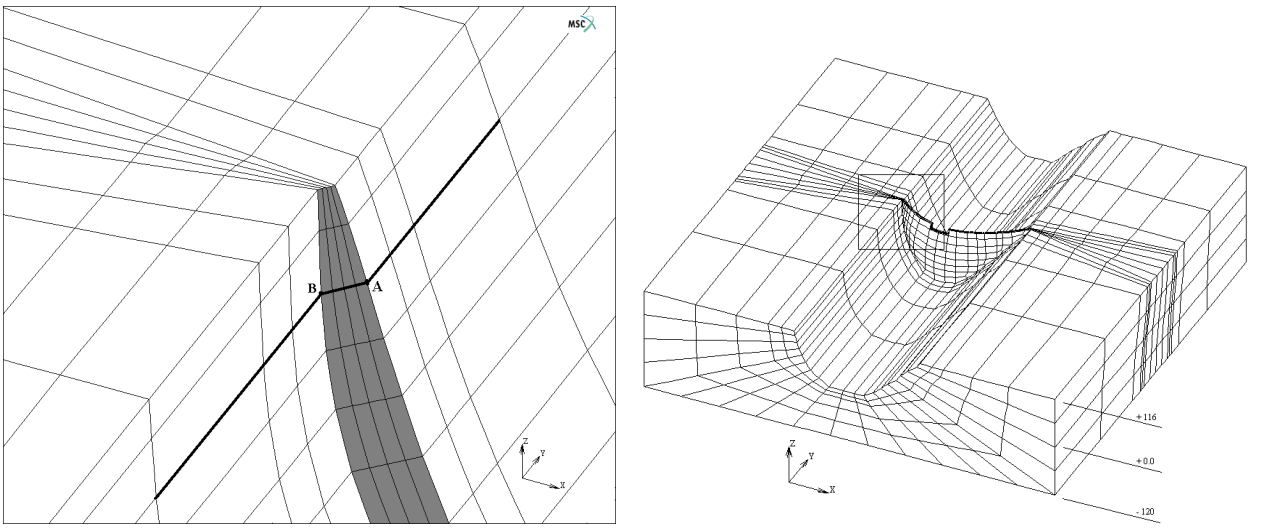
مختلف گسیختگی که به‌طور مستقیم با وجود ناپیوستگی‌ها در ارتباط است، تهیه شده است (UDEC Manual).

مطالعه پایداری تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی

مطالعات پایداری با استفاده از تحلیل‌های دوبعدی برروی نواری به ضخامت واحد از تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی سه بعدی، که توسط گروهی از محققین (NREA, 1997) برای انجام تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است، انجام می‌گیرد. شکل ۲(الف) یک مدل المان محدود سه بعدی از سد مذکور را نشان می‌دهد. تمامی المان‌ها از نوع آجری ۲۰ گرهی با ۸ نقطه گوسی می‌باشند.

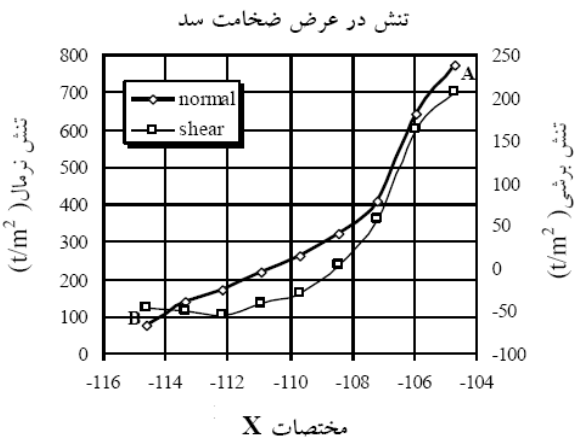
مدل در مجموع شامل ۸۴۹۰ گره و ۱۷۰۶ المان است (۳۷۶ المان مربوط به بدنه سد و ۱۳۳۰ المان مربوط به تکیه‌گاه‌ها و فونداسیون آن). ارتفاع و طول تاج سد به‌ترتیب ۱۱۶/۵ و ۳۰۰ متر با بیشترین ضخامت ۱۹/۶ متر در بستر و کمترین ضخامت ۵ متر در تاج می‌باشد.

بعد از تحلیل مدل المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار المان محدود MARC (که بدون در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها و فرض یک محیط پیوسته معادل صورت گرفت) و مشخص شدن توزیع نیروهای تماسی بدنه سد با تکیه‌گاه و فونداسیون پیرامونی، نواری به ضخامت واحد از تکیه‌گاه چپ سد، در بحرانی‌ترین تراز تکیه‌گاه، برای انجام تحلیل‌های دوبعدی برش زده شد. بحرانی‌ترین تراز، ترازی است که سهم قابل توجهی از تنش‌های نرمال و برشی بدنه سد بر آن اعمال می‌گردد. در این تحقیق تراز۹۰+ یکی از ترازهای بحرانی است که برای انجام تحلیل‌های دوبعدی انتخاب می‌شود. شکل ۲(ب) ترازی از تکیه‌گاه را نشان می‌دهد که برای تحلیل‌های دوبعدی استفاده خواهد شد. توزیع تنش‌های استاتیکی به علت بارگذاری هیدرواستاتیکی مخزن در مرز بدنه سد و تکیه‌گاه در بحرانی‌ترین تراز در شکل ۳ نشان داده شده است. تنش‌ها در این مرز به صورت تنش‌های نرمال و برشی در ۹ نقطه ارائه شده است. نقاط A و B نقاط ابتدای مرز مذکور است که در شکل ۲(ب) نیز نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۲- (الف) مدل المان محدود سه بعدی و (ب) مقطع بحرانی برای استفاده در تحلیل‌های دو بعدی



شکل۳- توزیع تنش در بحرانی‌ترین تراز تکیه‌گاه

انتخاب صحیح ابعاد توده‌سنگ پیرامونی سدهای بتنی قوسی در تحلیل دقیق این‌گونه سدها بسیار مهم است.

جدول ۱- خواص مصالح سد، تکیه‌گاه و فونداسیون

	سنگ	بتن
وزن واحد حجم (KN/m^3)	۲۷	۲۳/۷
مدول یانگ (MPa)	۱۰۰۰۰	۳۱۰۰۰
نسبت پواسون	۰/۲	۰/۱۷

جدول ۲- مشخصات فشار آب و رسوب

ارتفاع آب در بالادست (m)	۱۱۴
ارتفاع رسوب در بالادست (m)	۴۷
وزن مخصوص اشباع رسوب در بالادست(KN/m^3)	۲۱
نسبت فشار جانبی در رسوب (K_0)	۰/۴

قانون مشخصی در تعیین ابعاد اولیه فونداسیون و تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی وجود ندارد، اما این ابعاد بایستی به اندازه‌ای بسط داده شوند تا بیش از آن، تغییراتی در توزیع تنش و تغییرشکل ناشی از بارگذاری سد برروی تکیه‌گاه و فونداسیون حاصل نشود. ابعاد انتخاب شده برای مدل دوبعدی در شکل ۴ نشان داده شده است.

فشار آب پشت سد برای بحرانی‌ترین تراز ۰/۲۴ مگاپاسکال می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده دو دسته درزه با امتداد ۲۰و ۷۰- درجه نسبت به افق لحاظ شده است. شبیه‌سازی‌های اولیه نشان می‌دهد که دسته‌درزه‌های متعامد نسبت به دسته درزه‌های با زاویه تند و منفرجه وضعیت بحرانی‌تری دارند. به‌همین دلیل در این تحقیق از دسته‌درزه‌های متعامد استفاده شد. مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها و سنگ سالم مطابق جدول ۳ است. فرض این است که درزه‌ها بر اساس مدل رفتاری موهر-کولمب خمیری کامل عمل می‌کنند. با تاکید بر نقش ناپیوستگی‌ها در این تحقیق، بلوک‌ها به صورت ارتجاعی کامل عمل می‌کنند. فاصله درزه‌ها از یکدیگر ۱۰ متر فرض شده است.

جدول ۳- مشخصات بلوک‌های سنگی و درزه‌ها

بلوک	دسته درزه	دسته درزه
سنگی	۷۰- درجه	۲۰ درجه
$E_s = 10\,Gpa$	$K_n = 100\,Gpa/m$	$K_n = 100\,Gpa/m$
$\upsilon = 0.3$	$K_s = 100\,Gpa/m$	$K_s = 100\,Gpa/m$
$\gamma = 2700\,kg/m^3$	$\varphi = 35$	$\varphi = 35$
	$c = 0.1Mpa$	$c = 0.1Mpa$
	$\sigma_t = 0$	$\sigma_t = 0$
	$\Psi = 5$	$\Psi = 5$
	$a_0 = 0.1$ mm	$a_0 = 0.5$

شاخص‌های ایمنی تکیه‌گاه

ارزیابی کمی و کیفی گسیختگی و رفتار تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی به‌وسیله روش‌های عددی، مستلزم استفاده از شاخص‌های ایمنی مرتبط با محیط‌های توده‌سنگی درزه‌دار است. جابه‌جائی‌ها در توده‌سنگ درزه‌دار شامل لغزش و بازشدگی در امتداد درزه‌ها و چرخش بلوک‌ها حول درزه‌ها است. به‌همین دلیل و با توجه به اهمیتی که این جابه‌جائی‌ها در بحث پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی دارند، از دو شاخص ماکزیمم بازشدگی و لغزش در امتداد درزه‌ها استفاده می‌شود. این دو شاخص به‌ترتیب به عنوان بیشترین بازشدگی و بیشترین لغزش در امتداد یک درزه تعریف می‌شوند. ضمن اینکه دو پارامتر شدت بازشدگی و شدت لغزش در سطح تکیه‌گاه نیز قابل استفاده‌اند. این دو پارامتر به ترتیب مجموع میزان بازشدگی‌ها ضرب‌در طول درزه مربوطه و مجموع میزان

لغزش‌ها ضرب در طول درزه مربوطه در کل محیط تکیه‌گاه تعریف می‌شوند. از طرفی با توجه به اینکه میزان نشت از یک تکیه‌گاه یکی از عوامل مهم در ارزیابی تکیه‌گاه سد بوده و می‌تواند به صورت غیرمستقیم روی پایداری کلی توده‌سنگ تکیه‌گاه نیز تأثیر بگذارد، شاخص دیگری برای ارزیابی ایمنی تکیه‌گاه با عنوان بیشینه‌ی دبی عبوری تعریف می‌کنیم که بیشترین دبی عبوری در محل یک ناپیوستگی است.

تحلیل‌ها و نتایج

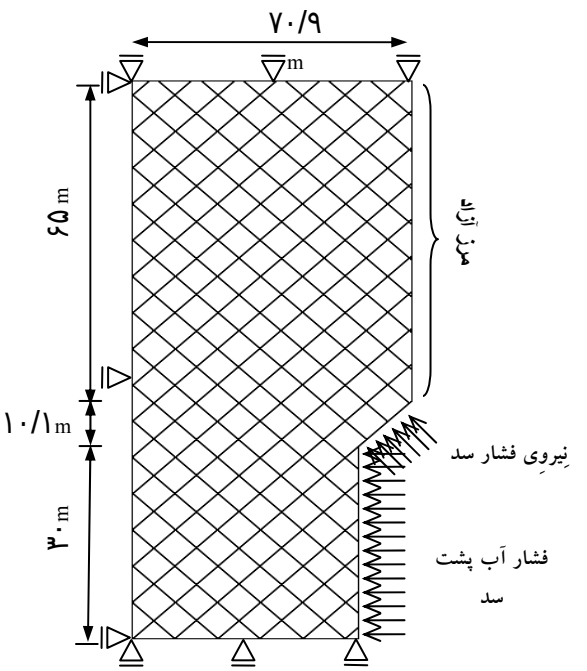
تحلیل افزایش فشار آب:

در این دسته تحلیل‌ها فشار آب پشت سد تا رسیدن به نقطه گسیختگی افزایش پیدا می‌کند. برای تشخیص گسیختگی تکیه‌گاه، تاریخچه تغییرمکان‌ها و حداکثر نیروهای نامتعادل کننده در نقاط مختلف مدل پایش می‌شود. در ابتدا تحلیل‌ها با این فرض که آب در درزه‌ها جریان دارد انجام می‌شود. سپس فرض می‌شود هیچ‌گونه جریانی درون محیط توده‌سنگی تکیه‌گاه اتفاق نمی‌افتد و تنها یک فشار مکانیکی به اندازه فشار هیدرواستاتیک مخزن سد بر تکیه‌گاه اعمال می‌گردد. نتایج این تحلیل‌ها در اشکال ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این تحلیل‌ها از نمودار نیمه لگاریتمی برای مشاهده هر چه بهتر تغییرات شاخص‌های گسیختگی استفاده شده است. بدین ترتیب در این نمودارها به‌جای مقادیر فشار آب، لگاریتم این مقادیر لحاظ گردید.

تحلیل کاهش پارامترهای مقاومتی درزه

در این تحلیل پارامترهای مکانیکی و مقاومتی درزه‌ها تا رسیدن به گسیختگی تکیه‌گاه کاهش می‌یابد. هر چند که در روش مذکور معمولاً تنها پارامترهای مقاومتی کاهش می‌یابد اما به‌دلیل اینکه سختی و مقاومت مصالح با یکدیگر متناسب هستند سختی درزه‌ها نیز کاهش داده شد.

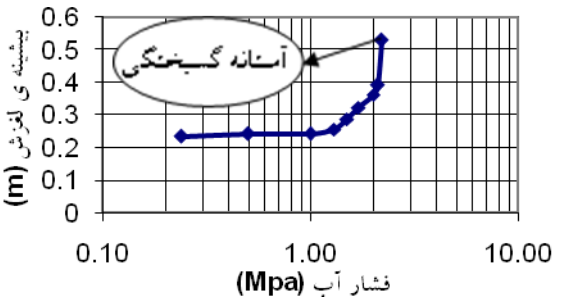
در این تحلیل‌ها با تغییر مقادیر SRF[5]، بر طبق روابط ذیل پارامترهای مقاومتی و سختی کاهش می‌یابد و در هر تحلیل وضعیت پایداری محیط بررسی می‌شود:

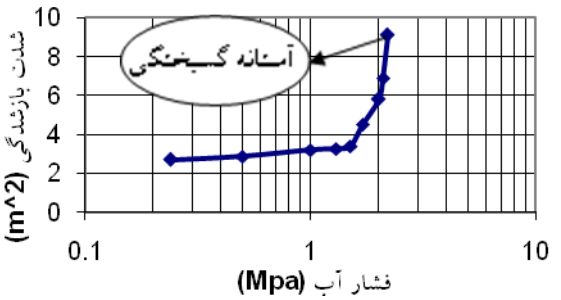


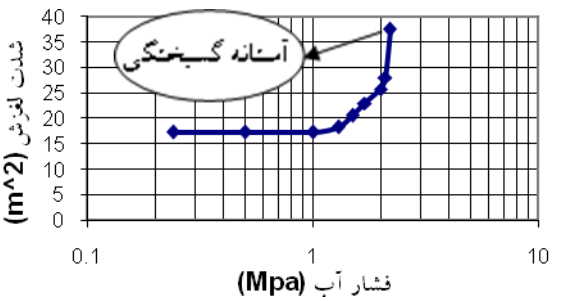
شکل۴- مدل دوبعدی تکیه‌گاه در بحرانی‌ترین تراز (۹۰+)

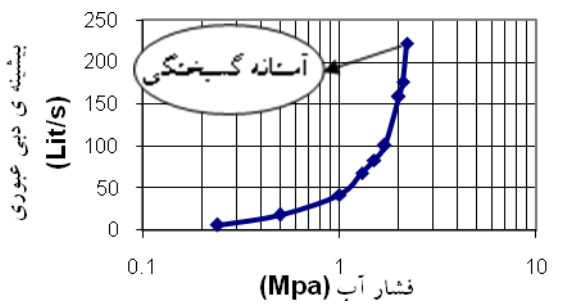
$K_{nd}=(K_{n0}/SRF)$، $K_{sd}=(K_{s0}/SRF)$، $\psi_d=(\psi_0/SRF)$، $c_d=(c_0/SRF)$ و $\varphi_d=\tan^{-1}(\tan\varphi_0/SRF)$ که K_{n0}، K_{s0}، ψ_0، φ_0 و c_0 به ترتیب سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اتساع، زاویه اصطکاک برشی و چسبندگی اولیه ناپیوستگی‌ها مطابق با جدول ۳ می‌باشند. هدف از این تحلیل ارزیابی تأثیرات پارامترهای مقاومتی درزه‌ها بر پایداری تکیه‌گاه است. نتایج این تحلیل‌ها در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. در نهایت برای تخمین کمی ایمنی در هر دو دسته تحلیل از ضرائب ایمنی به شکل زیر استفاده شد: در تحلیل اول از ضریب $P_{failure}/P_0$ استفاده می‌کنیم که $P_{failure}$ فشار آب در لحظه گسیختگی است و P_0 برابر ۰/۲۴ مگاپاسکال است. در تحلیل دوم مقدار ضریب SRF در لحظه گسیختگی به عنوان ضریب ایمنی تکیه‌گاه تعریف می‌گردد.

5. Strength Reduction Factor

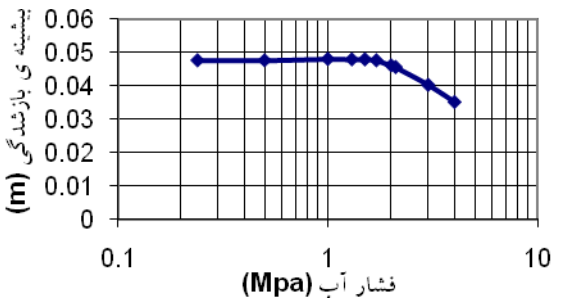


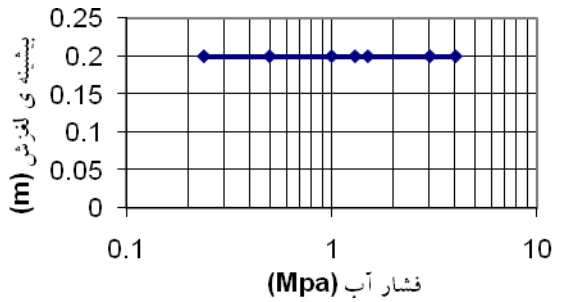


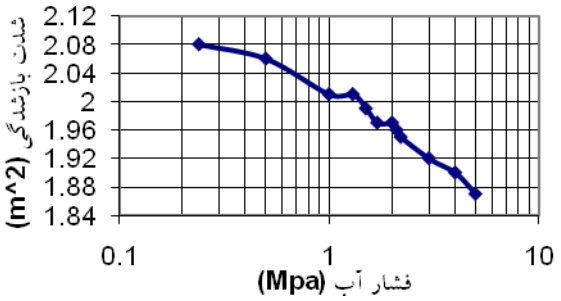


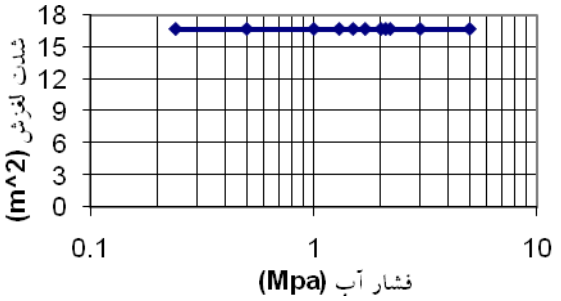


شکل ۵- تغییرات شاخص‌های گسیختگی در مقابل تغییرات فشار آب مخزن با در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها

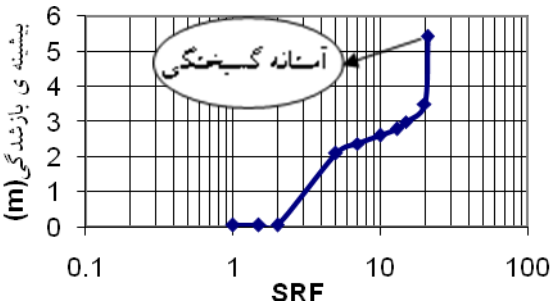


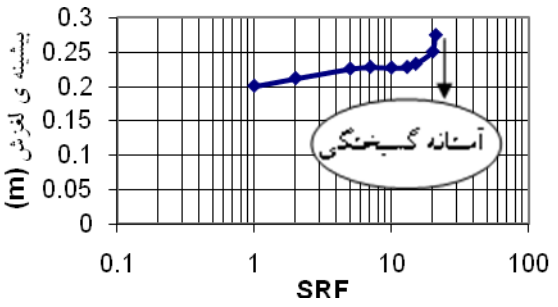


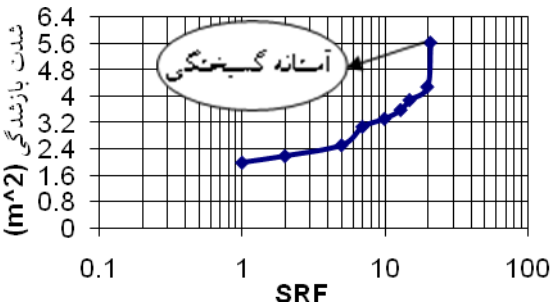


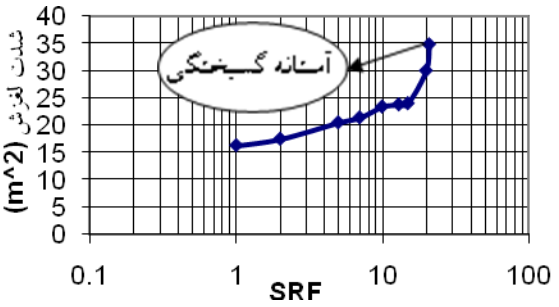


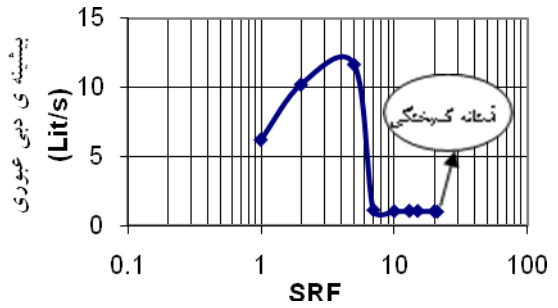
شکل ۶- تغییرات شاخص‌های گسیختگی در مقابل تغییرات فشار آب مخزن بدون در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها



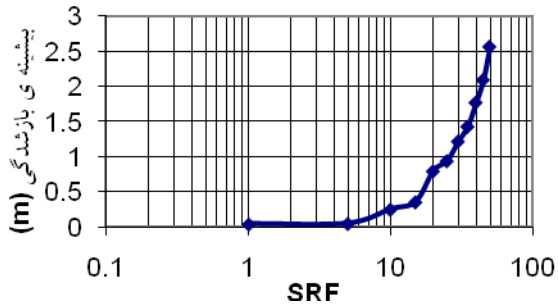


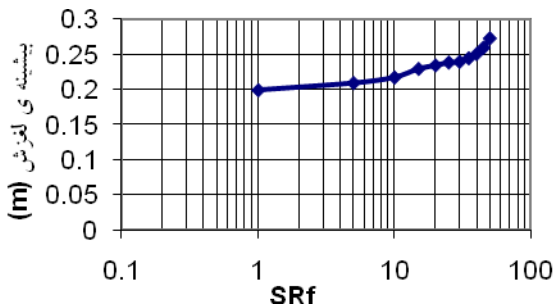


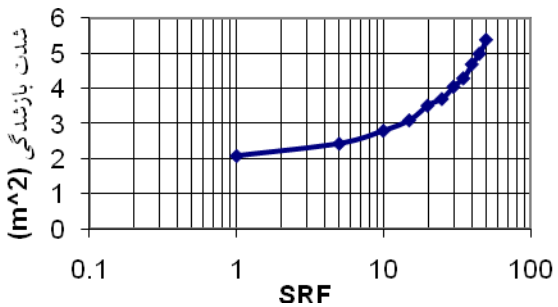


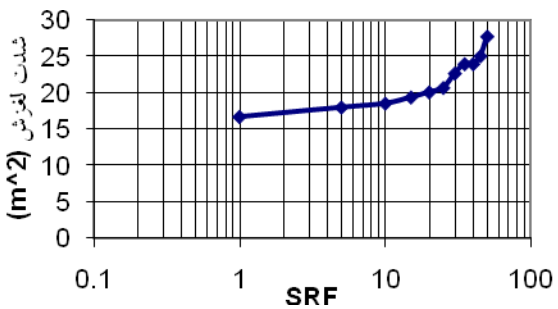


شکل ۷- تغییرات شاخص‌های گسیختگی در مقابل تغییرات SRF با در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها









شکل ۸- تغییرات شاخص‌های گسیختگی در مقابل تغییرات SRF بدون در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها

تفسیر نتایج

تغییرات ناگهانی و زیاد مقادیر بیشینه‌ی بازشدگی در نزدیکی فشار ۲/۲ مگاپاسکال در شکل ۵ نشان از ناپایداری تکیه‌گاه در این لحظه دارد. ضمن اینکه تغییرات بیشینه‌ی بازشدگی بعد از فشار ۱/۳ مگاپاسکال با نرخ بیشتری صورت می‌گیرد. در این حالت افزایش ارتفاع آب مخزن، افزایش گرادیان هیدرولیکی را به دنبال دارد که موجب می‌شود میزان دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها بیشتر شود.

بنابراین افزایش بیشینه مقادیر بازشدگی قابل انتظار است (بر اساس قانون مکعب، دبی عبوری از یک درزه تابعی از توان سوم بازشدگی آن درزه است).

پارامتر بیشینه‌ی لغزش، رفتاری مشابه با شاخص بیشینه‌ی بازشدگی دارد. مقادیر این شاخص در فشارهای ۱/۳ و ۲/۲ مگاپاسکال به ترتیب برابر است با ۲۵/۶ و ۵۳ سانتی‌متر. با توجه به اینکه در یک محیط درزه‌دار، لغزش در یک درزه همراه با بازشدگی در درزه دیگر است، شباهت رفتاری دو پارامتر اخیر قابل توجیه است. مقادیر بیشینه‌ی لغزش و بازشدگی در پایین دست سد و در ناحیه‌ای نزدیک به محل تماس بدنه سد با تکیه‌گاه و مرز آزاد، اتفاق می‌افتند (هر چند شکل گسیختگی به شکل و امتداد دسته درزه‌ها ارتباط دارد).

با توجه به اینکه محل مقادیر بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش در ناپیوستگی‌های نزدیک به مرز آزاد مدل اتفاق می‌افتد (مرزی که معمولاً در واقعیت با تمهیداتی خاص مسلح می‌شود و امکان جابه‌جائی درزه‌ها در آن کم است) ممکن است این دو پارامتر، شاخص مناسبی جهت ارزیابی ایمنی تکیه‌گاه نباشند. استفاده از شاخص‌های شدت بازشدگی‌ها و شدت لغزش‌ها این عیب احتمالی را مرتفع خواهد ساخت.

روند تغییرات پارامتر شدت بازشدگی‌ها در مقابل فشار آب مخزن، در شکل ۵، بسیار شبیه به تغییرات شاخص بیشینه‌ی بازشدگی درزه‌ها در همین شکل است. این شاخص در فشارهای ۰/۲۴ و ۲/۲ مگاپاسکال (در دو سر طیف فشار آب) به ترتیب مقادیر ۲/۷۱ و ۹/۱ مترمربع را اخذ می‌کند. برای پارامتر شدت لغزش نیز مقادیر ۱۷/۲ و ۳۵/۶ متر مربع در دو فشار ۰/۲۴ و ۲/۲ مشاهده می‌شود.

پارامتر بیشینه‌ی دبی عبوری نیز رفتاری یکسان با شاخص‌های گسیختگی مذکور دارد. به‌نحوی‌که با تغییرات زیاد خود در نزدیکی فشار ۲/۲ مگاپاسکال نشان از ناپایداری تکیه‌گاه دارد. این شاخص در دو سر طیف فشار آب مخزن به ترتیب مقادیر ۶/۲۲ و ۲۲۲ لیتر بر ثانیه را اخذ می‌کند.

همان‌طوری که نشان داده شد تکیه‌گاه در فشار ۲/۲ مگاپاسکال در آستانه گسیختگی قرار می‌گیرد. بنابراین طبق تعریف، ضریب ایمنی در این‌حالت ۹/۱۶ $(\frac{2.2}{0.24})$ می‌باشد. این تحلیل نشان می‌دهد تکیه‌گاه سد در وضعیت ایمنی خوبی به سر می‌برد و طبق تعریف، فشار آبی بیش از آن‌چه به آن اعمال می‌گردد، قادر به تحمل است. از نگاهی دیگر می‌توان اشاره کرد که پایداری تکیه‌گاه سد بتنی قوسی مورد نظر حساسیت زیادی نسبت به ارتفاع آب مخزن و یا فرایند آبگیری مخزن ندارد.

در ادامه این دسته از تحلیل‌ها نمودارهای شکل ۶ با فرض یک محیط خشک برای تکیه‌گاه به دست آمده است. در این تحلیل هیچ‌گونه آبی درون ناپیوستگی‌ها جریان ندارد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود تفاوت‌هایی میان حالتی که از جریان آب درون ناپیوستگی‌ها صرف نظر شود با حالتی که در تحلیل‌ها لحاظ می‌شود، وجود دارد که بایستی در ارزیابی پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی مورد توجه قرار گیرند. در این حالت رفتار شاخص‌های گسیختگی در مقابل تغییرات فشار آب مخزن کاملاً متفاوتند. همچنین مقادیر آنها نیز در قیاس با حالت اشباع بسیار کمتر است. به نحوی‌که در فشار ۲/۲ مگاپاسکال مقادیر شاخص شدت بازشدگی درزه‌ها برای دو حالت به ترتیب ۹/۱ و ۱/۹۵ مترمربع می‌باشند. بنابراین پیش‌بینی و تحلیل پایداری تکیه‌گاه در حالت خشک اصولاً قابل اعتماد نمی‌باشد و لازم است همواره جریان آب درون ناپیوستگی‌ها درنظر گرفته شود.

شکل ۷ نشان می‌دهد که تغییرات شاخص بیشینه‌ی بازشدگی با نرخ بیشتری بعد از SRF=۲ صورت می‌گیرد. سپس با تغییرات ناگهانی و زیاد خود در ضریب SRF=۲۱ نشان از ناپایداری تکیه‌گاه دارد. پارامتر بیشینه‌ی لغزش در همین شکل، رفتاری مشابه با پارامتر بیشینه‌ی بازشدگی دارد. هرچند که مقادیر این شاخص در مقابل شاخص بیشینه‌ی بازشدگی کمتر است. نسبت

مقادیر این پارامتر در دو سر طیف نمودار (ضرائب ۱ و ۲۱) کمتر از ۲ است. پارامتر شدت بازشدگی در ضرائب SRF=۱ و SRF=۲۱ به‌ترتیب مقادیر ۲ و ۵/۶۴ مترمربع را اخذ می‌کند. پارامتر شدت لغزش نیز رفتاری مشابه با پارامتر بیشینه‌ی لغزش دارد. هرچند که به نظر می‌رسد نرخ تغییراتش بیش از پارامتر بیشینه‌ی لغزش است. با اینحال به‌خوبی بحرانی شدن وضعیت ایمنی تکیه‌گاه را در لحظه گسیختگی نشان می‌دهد. با توجه به کاهش پارامتر سختی نرمال درزه، به عنوان پارامتری تعیین کننده بر میزان تراوایی درزه‌ها، افزایش اولیه میزان بیشینه‌ی دبی عبوری قابل پذیرش است. با این‌حال تثبیت مقادیر این پارامتر در ادامه سئوال برانگیز است.

طبق تعریف ضریب ۲۱ ضریب ایمنی تکیه‌گاه بر اساس تحلیل‌های کاهش مقاومت است که ایمنی تکیه‌گاه را بسیار بالا برآورد می‌کند و نشان می‌دهد ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی حساسیت کمی نسبت به پارامترهای مقاومتی درزه‌ها دارد.

نتایج تحلیل‌های کاهش مقاومت نیز نشان می‌دهد که استفاده از یک محیط خشک جهت بررسی پایداری توده‌سنگ بایستی با احتیاط بسیار همراه باشد. نتایج در این حالت بسیار فریبنده بوده و در اکثر موارد ایمنی، بسیار بالا نشان داده می‌شود. هر چند هر دو حالت خشک و اشباع، ایمنی را بسیار بالا نشان می‌دهند. کلیه تحلیل‌های ارائه شده، لزوم لحاظ کردن جریان سیال را در تحلیلهای عددی و به منظور ارزیابی پایداری تکیه‌گاه بیش از پیش معلوم می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام تحلیل‌های دوبعدی برروی بحرانی‌ترین تراز تکیه‌گاه یک سد بتنی قوسی واقعی که از تحلیل‌های سه‌بعدی تعیین شده بود، به بررسی نقش ناپیوستگی‌ها و جریان آب بر پایداری تکیه‌گاه این‌گونه سدها پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این مطالعه به شرح زیر است :

- استفاده از محیط خشک در تحلیل پایداری توده‌سنگ تکیه‌گاه ضریب ایمنی را بسیار بالاتر از مقدار واقعی آن تخمین می‌زند که بسیار فریبنده است.
- مکانیزم‌های رفتاری و گسیختگی تکیه‌گاه در حالت خشک متفاوت با حالت اشباع آن است. تفسیر نتایج تحلیل‌های پایداری تکیه‌گاه در این حالت گمراه کننده است. بنابراین در همه موارد توصیه می‌شود تأثیرات جریان بر پایداری تکیه‌گاه مدنظر قرار گیرد.
- پارامترهای مقاومتی درزه‌ها معمولاً نقش کم‌رنگی بر پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی دارند. ضمن اینکه پارامترهای مذکور نیز نقش قابل توجهی بر میزان دبی عبوری و مساله نشت از تکیه‌گاه ندارند.

با توجه به اینکه درزه‌ها بر رفتار توده‌سنگ‌ها مؤثر هستند به نظر می‌رسد پارامترهای هندسی درزه‌ها (همچون جهات و فاصله درزه‌ها و میزان بازشدگی دهانه آنها) تأثیرات پارامترهای مکانیکی آن را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند.

منابع

سعید یزدانی و محمود یزدانی، "بررسی تاثیر رفتار هیدرومکانیکی درزه‌ها در ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی"، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۲۶، ص۶۹-۷۸، مهر و آبان ۱۳۸۹.

Abrahamson; N; “Time Histories for Cushman Dam”; Report to Steve Fischer; January 14, 2001.

Brown, S.R. (1987) Fluid flow through rock joints: effects of surface roughness. J. of Geophysical Research 92(B2), 1337–1347.

Goodman, R.E., Scott, G.A. 1994. Rock Mechanics Dam Safety Studies for Sominoe Arch Dam, Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics symposium, the University of Texas at Austin.

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.

Krsmanovic, D., 1974, The Behaviour of the Horizontal Arch Dam Supporting Some Type of Discontinuum, Advanced in Rock Mechanics, Volume 1, Part A, Page 187, Colorado.

Louis, C. (1976) Introduction `al'hydraulique des roches. PhD Thesis, Paris.

Manual of udec, User's Guide, Section 1,"Intruduction".

Mgalobelov,Yu.B.,1995,Computational Studies of Rock Foundation of Arch Dams, Proceedings of International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Japan.

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

Research Report on Ultimate Bearing Capacity of Dams during Earthquake (1997). Ministry of Economic, Trade and Industry of Japan, National Resources and Energy Agency, Electric Power Civil Engineering Association, (in Japanese).

Stematiu, D., Bugnariu,T., 1995. Constantinesco, AL. Rock Mechanics problems Related to Three Arch Dams Foundated on Faulted Rocks, Proceedings of Second International Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock_MJFR_2, Vienna, Austria.

Tsang, C.F. and Stephansson, O. (1996) A Conceptual Introduction to Coupled Thermo-Hydro-Mechancial Processes in Fractured Rocks, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process of Fractured Media, Elsevier.

Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A. (1981) Hydromechanical behaviour of a deformable rock fracture subject to normal stress. J. Geophysical Research 86(B10), 9287–9298.

Valencia, F.G., Beltran, C.M., 1994, 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.