

بررسی تأثیر رفتار هیدرومکانیکی درزه‌ها در ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی

سعید یزدانی (کارشناس ارشد)

محمود یزدانی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

ساخت‌گاه‌های سنگی که به‌منزله‌ی تکیه‌گاه و پی سدهای بتنی قوسی انتخاب می‌شوند، به‌علت شکل خاص این سازه‌ها و نحوه‌ی انتقال بارشان، بایستی دارای استحکام و سختی بالایی باشند. از طرفی سنگ‌های سخت به‌علت ماهیت شکننده‌ی خود معمولاً دارای تعدادی دسته درزه و ناپیوستگی هستند. وجود درزه‌ها به‌منزله‌ی صفحات ضعیف و تأثیرات مهم خصوصیات آن‌ها، می‌تواند پایداری این سازه‌های عظیم را با مخاطره همراه کند. به‌همین دلیل لازم است تا نقش ناپیوستگی‌ها بر روی پایداری سدهای بتنی قوسی کاملاً بررسی شود. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار UDEC، وضعیت پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی در دو حالت خشک و وجود جریان در درزه‌ها براساس دو روش افزایش پارامتر فشار آب پشت سد و روش کاهش پارامترهای مقاومتی درزه‌ها، SRF، ارزیابی شده است. در این راستا و برای مقایسه‌ی بهتر این دو حالت، مقادیر لغزش و بازشدگی در محل ناپیوستگی‌ها و میزان نشست آب از داخل آن‌ها ارزیابی شده است و از میزان گسترش آن‌ها در کل تکیه‌گاه به‌منزله‌ی شاخصی برای تخمین ایمنی تکیه‌گاه سد استفاده می‌شود. نتایج به‌خوبی لزوم لحاظ کردن جریان آب و پدیده‌ی هیدرومکانیکی را در بحث ارزیابی پایداری توده‌ی سنگ تکیه‌گاه این‌گونه سدها نشان می‌دهد به‌نحوی که عدم شبیه‌سازی جریان آب، علاوه بر پیش‌بینی‌های نادرست از مکانیزم‌های رفتاری توده سنگ تکیه‌گاه، ممکن است به نتایجی در خلاف جهت ایمنی سد بیانجامد.

yaz_saeed@yahoo.com
myazdani@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: هیدرومکانیک، توده سنگ درزه‌دار، سد بتنی قوسی.

۱. مقدمه

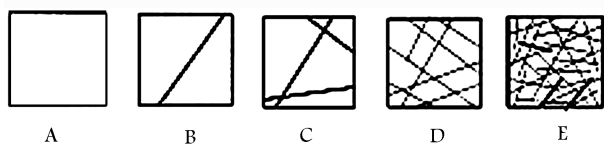
ساخت‌گاه‌های سنگی که برای احداث سدهای بتنی قوسی در نظر گرفته می‌شوند، معمولاً به‌دلیل شدت بارهای وارده بر آن‌ها، بایستی دارای استحکام و سختی بالایی باشند، از این جهت تکیه‌گاه و پی این سدها دارای حساسیت خاصی هستند. از آنجا که به‌دلایل سازه‌ی فقط توده‌های سنگی سخت برای تکیه‌گاه این‌گونه سدها انتخاب می‌شوند، می‌توان در مطالعه‌ی پایداری آن‌ها از هرگونه گسیختگی در سنگ سالم صرف‌نظر و فقط نقش درزه‌ها را در این ارتباط بررسی کرد. لذا لزوم بررسی نقش درزه‌ها به‌منزله‌ی یک جزء اصلی از توده سنگ در پایداری ژئوتکنیکی سدهای بتنی قوسی اهمیت فراوانی دارد.

این تذکر لازم است که بررسی نقش درزه‌ها به‌منزله‌ی تنها مجاری جریان، بر روی رفتار هیدرولیکی تکیه‌گاه این سازه‌ها نیز بسیار حیاتی است. وجود مخزن سد و حجم عظیم آب در تماس با تکیه‌گاه و پی در کنار هد زیاد آن، نشست جریان درون محیط توده سنگی تکیه‌گاه را به‌همراه دارد. حرکت آب درون توده سنگ علاوه بر آثار بسزایی که در پایداری آن دارد، مکانیزم‌های گسیختگی این محیط را نیز قوسی اهمیت فراوانی دارد.

این تذکر لازم است که بررسی نقش درزه‌ها به‌منزله‌ی تنها مجاری جریان، بر روی رفتار هیدرولیکی تکیه‌گاه این سازه‌ها نیز بسیار حیاتی است. وجود مخزن سد و حجم عظیم آب در تماس با تکیه‌گاه و پی در کنار هد زیاد آن، نشست جریان درون محیط توده سنگی تکیه‌گاه را به‌همراه دارد. حرکت آب درون توده سنگ علاوه بر آثار بسزایی که در پایداری آن دارد، مکانیزم‌های گسیختگی این محیط را نیز

بنابراین با توجه به پیچیدگی‌های خاصی که در هیدرولیک توده‌ی سنگ وجود دارد، نادیده‌نگاشتن جریان آب درون درزه‌ها می‌تواند تخمین نادرستی از مکانیزم‌های رفتاری و پایداری آن به‌همراه داشته باشد. از حوادث اتفاق افتاده در این زمینه می‌توان به شکست سد مالپاسه در فرانسه اشاره کرد که به علت ناپایداری گوه‌ی در اثر

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۱۲/۱۲، دوری ۱۳۸۷/۶/۲۲، پذیرش ۱۳۸۸/۱۰/۱



شکل ۱. شدت درزه‌داری در انواع توده سنگ.

نایبوستگی‌ها ممکن است باز یا بسته و یا با مواد پرکننده‌ی مثل رس پر شده باشند. نفوذپذیری نایبوستگی‌های پر شده معمولاً متأثر از عوامل مختلفی چون درصد رطوبت و نفوذپذیری ماده‌ی پرکننده، ضخامت و جنس آن و همچنین وضعیت تنش‌های پیرامونی است.^[۱۳] از آنجا که روش به‌کار رفته در این نوشتار بر اساس عبور جریان فقط از طریق درزه‌ها (و نه از داخل سنگ سالم) است، سعی می‌شود تا در این قسمت، مروری بر مطالعه‌های تجربی و تحلیلی سایر پژوهشگران بر روی تجزیه و تحلیل جریان مجرا^۲ (جریان فقط از طریق نایبوستگی‌ها) صورت گیرد. در این مرور آثار زبری سطح، اندازه‌ی شکاف درزو تغییرات تنش بر روی جریان ملاحظه می‌شود. در دو دهه‌ی اخیر کارهای تجربی و تحلیلی مهمی بر روی آثار متقابل تغییر شکل و جریان در توده سنگ درزه‌دار اشباع با لحاظ کردن روش‌های جریان نایبوستگی مجرا و محیط‌های متخلخل^۳ انجام شده است.^[۱۳-۱۵] استفاده از تحلیل محیط‌های متخلخل، فقط برای سنگ‌های با تخلخل زیاد مثل ماسه سنگ مناسب است. در این روش که تاکنون به‌طور گسترده‌ی در مکانیک خاک استفاده شده است، جریان و خواص انتقال جریان در سنگ با فرض محیطی پیوسته بررسی می‌شود. با این حال، مناسب‌ترین روش محاسبه‌ی جریان (مانند روش مجرا، پیوسته و یا ترکیبی از هر دوی آن‌ها) بسته به میزان در دسترس بودن اطلاعات زمین‌شناسی و دقت مورد نیاز در تخمین جریان، انتخاب می‌شود.

در حالت ایده‌آل جریان درون سنگ سالم (حالت A، شکل ۱)، جریان فقط از طریق حفره‌های به هم مرتبطی رخ می‌دهد که اندازه و شکل آن‌ها به سبب تنش‌های اعمالی در حال تغییر است. تحلیل جریان در این محیط با روش پیوسته و بر اساس مکانیک محیط‌های متخلخل انجام می‌گیرد. در سوی دیگر طیف، برای یک توده‌ی سنگی شدیداً درزه‌دار نیز (حالت E در شکل ۱)، جریان درون توده سنگ را می‌توان به بهترین شکل به‌وسیله روش‌های پیوسته ارزیابی کرد.^[۱۳-۱۶] در میان این دو حالت حدی (حالات B، C و D)، برای تحلیل جریان فقط باید از روش‌های نایبوسته استفاده کرد.

تلاش‌هایی نیز برای معادل کردن شبکه‌ی از درزه‌ها به صورت محیطی پیوسته انجام شده است. برخی پژوهشگران نشان داده‌اند که نتایج به‌دست آمده از این روش به اندازه‌ی نتایج روش نایبوستگی مجرا، واقعی و مطمئن نیستند.^[۱۶] از طرفی برای به‌کار بردن مدل نایبوستگی مجرا، لازم است تا خواص نایبوستگی‌ها مثل اندازه‌ی شکاف^۴ و جهت‌یافتگی^۵ تعیین شود. ضمن اینکه بیشتر روش‌های عددی تحلیل جریان در توده سنگ درزه‌دار با فرض اشباع بودن توده سنگ انجام می‌شوند، در حالی که جریان درون محیط‌های توده سنگی معمولاً غیراشباع (مانند آب و هوا، آب و مواد جامد و یا آب و هوا و مواد جامد) است.

۳. جریان از درون یک نایبوستگی

پارامترهای اصلی کنترل‌گر جریان آب از طریق یک درزه‌ی سنگی بدون پرشدگی عبارتند از زبری سطح درزه، اندازه‌ی شکاف متغیر، جهت‌یافتگی درزه‌ها، تنش نرمال و برشی و رفتار باربرداری و بارگذاری. در مطالعات اولیه‌ی پژوهشگران، جریان درون

پدیده‌ی هیدرومکانیکی در تکیه‌گاه چپ آن تخریب شد و خسارات مالی و جانی بسیاری به همراه داشت.^[۲]

بیشتر مطالعات انجام شده بر روی سدهای بتنی قوسی^[۱۸-۲۱] علی‌رغم اینکه به نقش نایبوستگی‌ها و پارامترهای مقاومتی و هندسی آن‌ها بر روی واکنش تکیه‌گاه و پایداری آن تأکید کرده‌اند، اما تأثیرات جریان سیال درون درزه‌ها و پدیده‌ی هیدرومکانیکی در پایداری تکیه‌گاه این سازه‌ها را کمتر مورد توجه قرار داده‌اند. در سایر موارد نیز با وجود شبیه‌سازی جریان در تکیه‌گاه و فونداسیون، مطالعات منسجم و هدفمندی برای ارزیابی تأثیرات نشست جریان در پایداری سد و تکیه‌گاه صورت نگرفته است، ضمن اینکه شبیه‌سازی‌های انجام شده در یک محیط پیوسته‌ی معادل انجام شده است. از طرفی هنوز مشاهده می‌شود که در طراحی سدهای بتنی قوسی، مهندسان طراح کامکان از روش‌های سنتی (مثل فرض یک محیط پیوسته‌ی معادل برای توده سنگ و وارد نکردن اندرکنش هیدرولیکی و مکانیکی در توده سنگ) استفاده کرده‌اند و تحلیل‌های واقعی‌تر که نقش نایبوستگی‌ها را در مکانیزم گسیختگی لحاظ می‌کنند، کمتر استفاده می‌شود. بنابراین با توجه به حوادث اتفاق افتاده در این زمینه (خرابی سد مالپاسه)، نواقص موجود در طراحی این سدها و گسترش احداث این سازه‌ها در کشورمان، لزوم بررسی مسئله‌ی پایداری و پارامترهای مؤثر در تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی بسیار حیاتی است.

با توجه به نواقص مطالعات قبلی که عمدتاً به دلیل عدم شبیه‌سازی جریان آب یا عدم بررسی هدفمند آثار آن به همراه شبیه‌سازی یک محیط پیوسته‌ی معادل به جای محیط نایبوسته‌ی توده‌ی سنگی تکیه‌گاه بوده است، در این تحقیق سعی شده است تا این ایرادها مرتفع شود.

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار UDEC که برای شبیه‌سازی محیط‌های نایبوسته‌ی دو بعدی بر اساس روش المان‌های مجرا تهیه شده است، آثار جریان آب و پدیده‌ی هیدرومکانیکی در پایداری تکیه‌گاه‌های این‌گونه سدها ارزیابی شده است. اگرچه وضعیت اعمال تنش‌ها در سدهای بتنی قوسی انجام تحلیل‌های سه بعدی را برای برآورد دقیق‌تر پاسخ سد و تکیه‌گاه‌ها ایجاب می‌کند، ولی به دلایلی در این تحقیق از تحلیل‌های دو بعدی استفاده شد. نخست اینکه انجام تحلیل‌های هیدرومکانیکی تکیه‌گاه سدها حتی در حالت دو بعدی مسئله‌ی نسبتاً جدید در مهندسی سد است. لذا برای درک بهتر رفتار هیدرومکانیکی در وضعیت سه بعدی و تفسیر آسان‌تر نتایج آن، منطقی است ابتدا این رفتار در حالت دو بعدی کاملاً شناسایی شود.

در این مطالعه از سه پارامتر بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش در امتداد درزه‌ها و همچنین بیشینه‌ی دبی عبوری از آن‌ها در حکم شاخصی برای گسیختگی تکیه‌گاه استفاده شده است. لذا برای تخمین کمی و کیفی ناپایداری در تکیه‌گاه از دو روش افزایش پارامتر فشار آب پشت سد و روش کاهش پارامترهای مقاومتی درزه‌ها (SRF) استفاده شده است. در هر دو روش، یک ضریب ایمنی برای تکیه‌گاه تعریف می‌شود.

۲. جریان در توده سنگ

در این بخش شرحی کلی بر بحث جریان آب از طریق سنگ‌ها که پژوهشگران مختلف انجام داده‌اند، عنوان می‌شود. تحقیقات انجام شده^[۹-۱۱] نشان داده که خواص فیزیکی و نفوذپذیری سنگ‌ها متأثر از هندسه‌ی نایبوستگی‌ها، اتصال^۱ بین آن‌ها و اندازه و شکل حفره‌ها است. یک توده سنگ شامل سنگ سالم و نایبوستگی‌هایی در شکل‌های مختلف است. برای سنگ‌های با نفوذپذیری کم جریان‌های آب و گاز عمدتاً از طریق شبکه‌ی از نایبوستگی‌های به هم مرتبط رخ می‌دهد. در عمل

جدول ۱. ضرایب λ و میزان دبی عبوری از یک درزه منفرد.

توضیحات	دبی	ضریب λ	نوع جریان
مقادیر دبی را بیشتر برآورد می‌کند و به شکل گسترده‌یی در روش‌های عددی به‌کار می‌رود.	$q = \frac{g}{12v} e^{\tau J}$	$\lambda = \frac{96}{R_c}$ (پواسیوله)	لايه‌بي
لازم است تا زبری هر یک از درزه‌ها تعیین شود.	$q = \left[\frac{g}{12v} \left(\frac{\tau}{v} \right)^{0.75} e^{\tau J} \right]^{\frac{4}{5}}$	$\lambda = 0.316 R_c^{-0.75}$ (بلاسیوس)	آشفته
		$\frac{1}{\lambda} = 2 \log \frac{k}{\tau v D_h}$ (نیکورادسه)	
اگر زبری درست تعیین شود نتایج بهتری نسبت به قانون مکعب حاصل می‌شود. مقادیر کمتری از دبی نسبت به قانون مکعب حاصل می‌شود.	$q = - \frac{g e^{\tau J}}{12v \left[1 + 4.8 \left(\frac{k}{D_h} \right)^{1.05} \right]}$	$\lambda = \frac{96}{R_c} \left[1 + 4.8 \left(\frac{k}{D_h} \right)^{1.05} \right]$ (لوئیز)	لايه‌بي
			$\frac{1}{\lambda} = 2 \log \frac{k}{1.48 D_h}$ (لوئیز)

و مقدار دبی را به ازاء مقادیر زبری نسبی مختلف برای هر دو جریان لایه‌بی و آشفته که پژوهشگران مختلف به‌دست آورده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است.^[۲۸] بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده شد که قانون مکعب برای تخمین جریان از میان درزه‌های مصنوعی اعتبار دارد؛^[۲۹] طبق تحقیقات انجام شده براساس مطالعات عددی نسبت دبی جریان (دبی جریان از طریق یک درزه زبر نسبت به دبی محاسبه‌شده از قانون مکعب) در مقابل اندازه‌ی شکاف مکانیکی رسم شد و نتایج به دست آمده نشان داد که برای اندازه‌ی شکاف‌های بزرگ انحراف از قانون مکعب بسیار کم است اما در اندازه‌ی شکاف‌های کوچک، دبی جریان واقعی ۴۰ تا ۷۰ درصد مقدار جریانی است که با قانون مکعب پیش‌بینی می‌شود.^[۲۰]

همچنین بر اساس مطالعات آزمایشگاهی نشان داده شد که قانون مکعب در درزه‌های طبیعی در شرایط تنش کمتر از ۲۰ مگاپاسکال معتبر است. نتایج اخیر نشان می‌دهد که زبری سطح، اهمیت زیادی در برآورد صحیح جریان عبوری از یک درزه دارد. با توجه به این محدودیت‌ها استفاده از قانون مکعب در مسائل عملی باید با احتیاط همراه باشد.^[۳۰]

۲.۳. اندازه‌ی شکاف متغیر

اندازه‌ی شکاف درزه، پارامتری کلیدی برای تعیین خواص هیدرولیکی محیط توده سنگ درزه‌دار است. با این‌حال اندازه‌گیری توزیع اندازه‌ی شکاف یک درزه، کار بسیار مشکلی است. درزه‌های طبیعی معمولاً زبر و نامنظم با جداره‌های ناصاف هستند که باعث تشکیل نقاط تماس در چند نقطه‌ی مجزای از طول درزه می‌شوند (شکل ۲). در مدل‌های ریاضی معمولاً برای ساده‌سازی، ناپیوستگی‌ها به‌صورت جداره‌هایی صاف و موازی شبیه‌سازی می‌شوند.^[۳۱]

اندازه‌گیری اندازه‌ی شکاف درزه ممکن است مستقیم یا غیرمستقیم صورت گیرد. برای تخمین دقیق‌تر لازم است تا تغییرات اندازه‌ی شکاف در طول درزه محاسبه شود. اندازه‌ی شکاف مکانیکی که براساس اندازه‌گیری‌های مستقیم حاصل می‌شود معمولاً از اندازه‌ی شکاف‌های هیدرولیکی مؤثر به‌دست‌آمده از محاسبات معکوس جریان حالت دائمی با استفاده از قانون مکعب به دست آمده بزرگ‌تر است. مدل‌هایی نیز برای بیان تأثیر تغییرات اندازه‌ی شکاف در امتداد یک درزه در معادله‌ی قانون مکعب ارائه شده است.^[۳۲]

برای واردکردن تغییرات اندازه‌ی شکاف در محاسبات جریان، درزه‌های سنگی نامنظم با قطعاتی از دیوارهای صفحه‌یی موازی (شکل ۳) شبیه‌سازی شده است.^[۳۱] لذا با تعریف تابع توزیع بسامدی تغییرات اندازه‌ی شکاف سعی شد تا رابطه‌ی

یک درزه همانند جریان از طریق یک کانال یا لوله که در آن هیچ‌گونه تغییرشکلی تحت تأثیر تنش‌های خارجی صورت نمی‌گیرد شبیه‌سازی می‌شود.^[۱۷] در این راستا با اقتباس از قانون معروف پواسیوله^[۱۹،۱۸] در مکانیک سیالات برای محاسبه‌ی دبی جریان سیال لزج تراکم‌ناپذیر از طریق لوله‌ها، دبی جریان از طریق دو صفحه‌ی موازی به‌دست آمد که در آن به‌دلیل وجود توان ۳ برای پارامتر اندازه‌ی شکاف، در مکانیک سنگ به قانون مکعب معروف شد:

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

که در آن، J گرادیان هیدرولیکی؛ l پهناى قطعات درزه؛ b اندازه‌ی شکاف درزه؛ μ چسبندگی دینامیکی سیال؛ γ وزن مخصوص سیال است. اما در عمل، تغییرشکل ناشی از تنش‌های خارجی، میزان دبی عبوری از درزه را تغییر می‌دهد و فشارهای آب ایجادشده نیز تغییرشکل‌های بعدی ناپیوستگی را به‌دنبال دارد. در پژوهش‌های بعدی نشان داده شد که جریان عبوری از درزه تابعی از زبری سطح درزه، اندازه‌ی شکاف متغیر در امتداد درزه، مقدار بارهای خارجی و جهات آن‌ها نسبت به جهت‌یافتگی درزه و خواص مصالح پرکننده‌ی آن است.^[۲۰-۲۲]

۱.۳. تأثیر زبری سطح

جریان از طریق یک ناپیوستگی معمولاً به شکل قانون مکعب که براساس عبور جریان لایه‌بی از طریق صفحات موازی صاف تعریف شده است، بیان می‌شود. پژوهشگران براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشنهاد کردند که قانون مکعب را می‌توان برای سطوح زبر و درزه‌های واقعی با تنش محدودکننده‌ی کم نیز استفاده کرد.^[۲۳،۲۴]

با این حال باید توجه داشت که زبری سطح درزه‌ها باعث افت هد جریان درون درزه‌ها می‌شود. آثار زبری سطح بر روی نفوذپذیری درزه‌ها مطالعه شدند تا از این طریق رابطه‌ی قانون مکعب را اصلاح کنند.^[۲۵-۲۷] برای بررسی آثار زبری، تئوری‌های موجودی که برای تحلیل جریان از میان یک مجرا به‌کار می‌روند بسط داده شد.^[۲۵] برای لحاظکردن آثار زبری سطح، ضریب λ که تابعی از عدد رینولدز Re و اندازه‌ی شکاف درزه است تعریف می‌شود. برای یک ناپیوستگی سنگی بسته به مقدار ضریب λ ، مدلهای مختلف جریان مثل جریان لایه‌بی و آشفته می‌توانند رخ دهند. در حالت کلی λ تابعی از عدد رینولدز، زبری درزه (k) و اندازه‌ی شکاف هیدرولیکی (D_h) آن است. برای یک درزه‌ی صاف ($k/D_h \leq 0.33$)، ضریب λ فقط تابعی از عدد رینولدز است و جریان نیز به‌شکل لایه‌بی در نظر گرفته می‌شود.^[۲۵] ضرایب λ

۳.۳. تأثیرات تنش برشی و نرمال بر روی یک درزه

اندازه‌ی شکاف یک ناپوستگی، e_t ، در همه‌ی زمان‌ها با δ_n یا $e_t = e_0 \pm \delta_n$ (بازشدگی می‌شود که e_0 اندازه‌ی شکاف اولیه، e_t اندازه‌ی شکاف در زمان t و δ_n (بازشدگی یا بسته‌شدگی درزه) در خلال زمان t است. در مکانیک سنگ مؤلفه‌های تغییرشکل نرمال و برشی با رابطه‌های ۲ و ۳ بیان می‌شوند [۳۴]:

$$\delta_n = \frac{1}{k_n} [\sigma_1 \cos \beta + \sigma_2 \sin \beta] \quad (2)$$

$$\delta_s = \frac{1}{k_s} [\sigma_2 \cos \beta - \sigma_1 \sin \beta] \quad (3)$$

در رابطه‌های ۲ و ۳: σ_1 تنش عمودی وارد بر درزه؛ σ_2 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 جابجایی افقی درزه است. با توجه به اینکه فشار آب عمود بر سطح درزه عمل می‌کند، معادله‌ی ۲ را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۴ اصلاح کرد:

$$\delta_n = \frac{1}{k_n} [\sigma_1 \cos \beta + \sigma_2 \sin \beta - P_w] \quad (4)$$

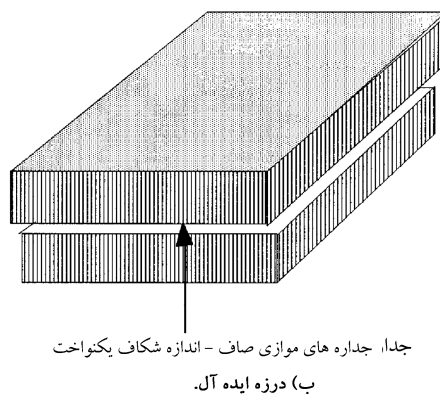
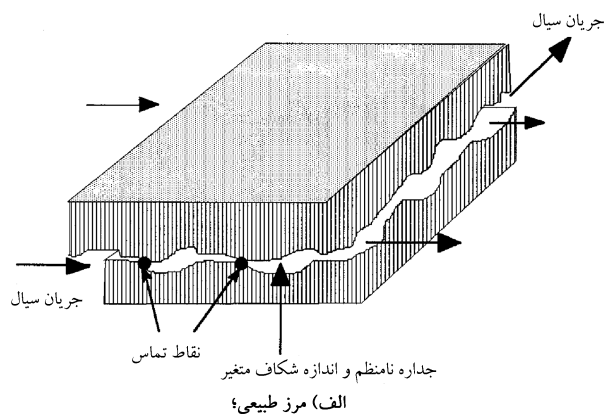
P_w ، فشار آب درون درزه است. مقادیر بازشدگی ناپوستگی‌ها بسته به مقدار تنش و جهت‌یافتگی درزه نسبت به جهات تنش، متغیر است. با این حال در عمل، در سطحی مشخص از تنش، بسته‌شدن درزه‌ها متوقف می‌شود و تغییرشکلی در درزه اتفاق نمی‌افتد. به اندازه‌ی شکاف درزه در این سطح تنش، «بازشدگی باقیمانده»^۸ می‌گویند که تابعی از وضعیت تنش‌های خارجی، پروفیل اولیه‌ی سطح درزه و خواص هندسی و فیزیکی آن‌هاست. این پارامتر (بازشدگی باقیمانده) قبلاً با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری بررسی شده است. [۳۵، ۳۶] دیگر مطالعات آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که مقادیر بازشدگی باقیمانده برای نوعی سنگ مشخص بسته به اندازه‌ی شکاف هیدرولیکی اولیه متغیر است.

۴.۳. تأثیرات بارگذاری و باربرداری

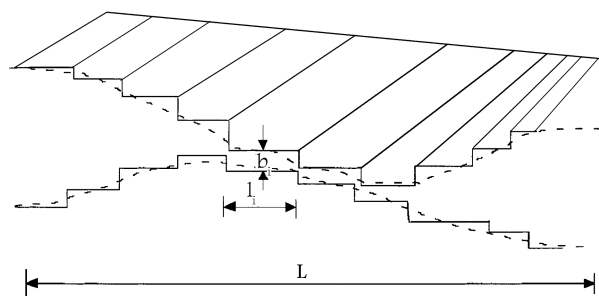
توجه به تغییرات جریان به علت بارگذاری و باربرداری بسیار مهم است. چنانچه تناوب بارگذاری به اندازه‌ی بی باشد که مقدار اندازه‌ی شکاف به کمترین مقدار خود برسد تغییرات جریان قابل توجه است. به عبارتی چنانچه سطوح تنش به اندازه‌ی بی نباشد که باعث تماس جداره‌های درزه به هم شود و یا لهیدگی در جداره‌ی درزه رخ دهد، آنگاه پس از باربرداری، نفوذپذیری اولیه‌ی درزه حاصل خواهد شد. در مقابل اگر میزان اندازه‌ی شکاف به کمترین مقدار خود برسد، پس از باربرداری مجدد، نفوذپذیری اولیه حاصل نخواهد شد. [۳۵] میزان دبی عبوری از درزه به نحو قابل توجهی در حین افزایش تنش محدودکننده در دوره‌ی اول بارگذاری کاهش پیدا می‌کند. زمانی که تنش محدودکننده به 10^6 مگاپاسکال برسد، تغییرات اندکی در میزان جریان رخ می‌دهد. توجه به این نکته مهم است که دومین و سومین دوره‌ی بارگذاری و باربرداری نقشی در تغییرات جریان عبوری ندارند. به نظر می‌رسد کرنش‌های بازگشت‌ناپذیر به علت اولین دوره‌ی بارگذاری و باربرداری رخ می‌دهند.

۴. جریان درون شبکه‌ی بی از ناپوستگی‌ها

برخی پژوهشگران نشان دادند که وقتی جریان سیال در یک توده سنگ تحت تأثیر ناپوستگی‌هاست، اتصال و میزان چگالی آن‌ها در توده سنگ نقش بسیار



شکل ۲. جریان از میان یک ناپوستگی.



شکل ۳. مدلی مفهومی برای واردکردن تغییرات اندازه‌ی شکاف یک درزه در محاسبات جریان. [۲۱]

اصلاح شده‌ی بی برای قانون مکعب ارائه شود. مقایسه‌ی نتایج رابطه‌ی اصلاح شده‌ی به دست آمده با رابطه‌ی معمول قانون مکعب براساس تابع توزیع تغییرات اندازه‌ی شکاف پیشنهادی در مطالعه‌ی آزمایشگاهی شارپ [۳۴] نشان داد که در اندازه‌ی شکاف‌های کوچک، تفاوت این دو رابطه زیاد است. بدون شک قانون مکعب در وضعیت تنش‌های کم دقت خوبی دارد ولی در تنش‌های زیاد، اعتبار آن اصولاً بستگی به ایجاد نقاط تماس جدید بین دیواره‌های درزه و خردشدن دانه‌ها و در نتیجه باقیماندن مصالح پرکننده در فضای درزه دارد.

در پژوهشی تأثیر اندازه‌ی شکاف متغیر بر دبی عبوری از درزه با استفاده از جریان الکتریکی بررسی [۳۳] و نشان داده شد که پیچ و خم درزه (اندازه‌ی شکاف متغیر) و همچنین زبری سطح آن می‌تواند تأثیرات مهمی بر دبی عبوری از یک درزه داشته باشد. در این حالت هد هیدرولیکی و زبری سطح به ترتیب معادل پتانسیل هیدرولیکی و مقاومت الکتریکی مسیر جریان الکتریکی هستند.

به همین دلیل و با توجه به اهمیتی که این جابه‌جایی‌ها در پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی دارند، از دو شاخص بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش در امتداد درزه‌ها استفاده می‌کنیم. این دو شاخص به‌ترتیب با عنوان بیشترین بازشدگی و بیشترین لغزش در امتداد یک درزه تعریف می‌شوند. از طرفی با توجه به اینکه جریان درون ناپیوستگی تابعی از بازشدگی آن است، شاخص سومی برای ارزیابی ایمنی تکیه‌گاه با عنوان بیشینه‌ی دبی عبوری (بیشترین دبی که از مجرای یک ناپیوستگی عبور می‌کند) تعریف می‌کنیم. لزوماً مقادیر این سه شاخص در یک نقطه رخ نمی‌دهند.

افزایش یک‌باره و ناگهانی هریک از این سه شاخص در مقابل افزایش پارامتر فشار آب و ضریب SRF^۱، معادل گسیختگی تکیه‌گاه تعبیر می‌شود. در این حالت فشار آب و ضریب SRF به‌ترتیب با $P_{failure}$ و $SRF_{failure}$ نمایش داده می‌شوند. برای تخمین کُتی پایداری در هر دو تحلیل از ضرایب ایمنی به این روش استفاده می‌کنیم: در تحلیل اول از ضریب $P_{failure}/P_0$ استفاده می‌کنیم که $P_0 = 2 \text{MPa}$ فشار آب در لحظه‌ی گسیختگی است و $P_0 = 2 \text{MPa}$ فشار آب میناء است که شبیه‌سازی اولیه بر اساس آن صورت گرفته است. در تحلیل دوم مقدار ضریب SRF در لحظه‌ی گسیختگی، $SRF_{failure}$ ، با عنوان ضریب ایمنی تکیه‌گاه تعریف می‌شود.

۷. روش تخمین پایداری تکیه‌گاه

در این تحقیق برای بررسی تأثیر جریان آب درون درزه‌ها و همچنین تأثیر وقوع پدیده‌ی هیدرومکانیکی در پایداری تکیه‌گاه و سازه‌ی سد، دو نوع تحلیل انجام می‌شود:

الف) تحلیل افزایش بار: در این تحلیل فشار آب پشت سد تا رسیدن به نقطه‌ی گسیختگی افزایش پیدا می‌کند. در حالت اول، نشت آب به داخل محیط توده سنگی تکیه‌گاه شبیه‌سازی و اجازه‌ی عبور آب از درون درزه‌ها داده می‌شود. در حالت دوم، فرض می‌شود هیچ‌گونه جریانی از درون محیط توده سنگی تکیه‌گاه عبور نمی‌کند.

ب) تحلیل کاهش مقاومت: در این تحلیل با استفاده از روش کاهش مقاومت، SRF ، پارامترهای مقاومتی و سختی درزه‌ها تا رسیدن به گسیختگی کاهش می‌یابند، هرچند که در روش مذکور معمولاً فقط پارامترهای مقاومتی کاهش پیدا می‌کنند. اما به‌دلیل اینکه سختی و مقاومت مصالح عمدتاً با یکدیگر متناسب و تقریباً دارای رابطه‌ی خطی هستند، در این مطالعه سختی درزه‌ها نیز به همان نسبت کاهش داده می‌شوند. در این تحلیل با تغییر مقادیر SRF طبق رابطه‌های زیر، پارامترهای مقاومتی و سختی کاهش می‌یابد و وضعیت پایداری محیط بررسی می‌شود:

$$K_{nd} = (K_{n0}/SRF)$$

$$K_{sd} = (K_{s0}/SRF)$$

$$\Psi_d = (\Psi_0/SRF)$$

$$\varphi_d = \tan^{-1}(\tan \varphi_0/SRF)$$

$$c_d = (c_0/SRF)$$

که در آن، K_{n0} ، K_{s0} ، Ψ_0 ، φ_0 و c_0 به‌ترتیب سختی نرمال، سختی برشی، زاویه‌ی اتساع، زاویه‌ی اصطکاک برشی و چسبندگی اولیه‌ی ناپیوستگی‌ها هستند.

مهمی را بر میزان دبی عبوری دارند و نفوذپذیری توده سنگ با افزایش اتصال میان ناپیوستگی‌ها افزایش می‌یابد.^[۳۶، ۳۳، ۳۶] از طرفی پایداری توده سنگ نیز با افزایش اتصال و ارتباط درزه‌ها با یکدیگر کاهش پیدا خواهد کرد. مثلاً در سازه‌های زیرزمینی چنانچه ناپیوستگی‌ها، آب فراوانی را با فشار زیاد منتقل کنند؛ تنش مؤثر در مرز فضای حفاری کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ممکن است باعث گسیختگی آن‌ها شود.

برای بیان ارتباط بین ناپیوستگی‌ها، در ابتدا لازم است تا طول درزه، جهات و موقعیت آن‌ها تعیین شود. یک شبکه‌ی ناپیوستگی از چندین درزه‌ی به‌هم مرتبط تشکیل شده است. بعضی از ناپیوستگی‌ها ممکن است به‌علت ناکافی بودن جهت یافتگی، موقعیت یا طولشان برای اتصال به شبکه‌ی موجود، از دیگر درزه‌ها منفک باشند. بنابراین حجم آب عبوری از شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها تابعی از میزان اتصال و اندازه‌ی شکاف درزه‌ها است. در سال ۱۹۸۵ پژوهشگران پی بردند که چگونه نفوذپذیری در یک شبکه‌ی ناپیوستگی با درجات مختلف به‌هم پیوستگی تغییر می‌کند.^[۳۴] مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد که نفوذپذیری با افزایش ارتباط درزه‌ها شدت می‌یابد.^[۳۷] همچنین تأثیرات جهت‌یافتگی و نسبت تنش برجا بر میزان جریان ورودی به یک تونل در محیط توده سنگی با استفاده از نرم افزار المان محدود UDEC انجام شد.^[۳۸]

۵. نرم افزار UDEC

نرم‌افزار UDEC یک برنامه‌ی عددی دو بعدی است که برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته بر اساس روش المان مجزا تهیه شده است. این نرم‌افزار پاسخ محیط‌های ناپیوسته (مثل توده سنگ درزه‌دار) را در مقابل بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. UDEC قابلیت شبیه‌سازی جریان سیال از میان درزه‌های یک سیستم نفوذپذیر را دارد و نرم‌افزار مناسبی برای تحلیل هیدرومکانیکی جریان است، خصوصاً در مواردی که جریان از طریق شبکه‌ی بی‌ناپیوستگی‌ها صورت می‌گیرد. رفتار مکانیکی درزه‌ها نیز بر اساس تنش مؤثر است.

این نرم‌افزار بر اساس مدهای مختلف گسیختگی که مستقیماً با وجود ناپیوستگی‌ها در ارتباط است، تهیه شده است. هرگونه الگوی هندسی از ناپیوستگی‌ها و دسته درزه‌ها را می‌توان با UDEC شبیه‌سازی کرد. در این نرم‌افزار چندین مدل رفتاری برای بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته شده است.^[۳۹] مدل لغزش کولمب از ساده‌ترین مدل‌های موجود است که سختی کشسانی، زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی و پارامترهای اتساع را به یک درزه نسبت می‌دهد. مدل‌های دیگر مثل مدل درز تسلیم پیوسته^۹ و مدل بارتون باندیس نیز برای شبیه‌سازی رفتار درزه‌ها وجود دارد.^[۳۹] ضمن اینکه این نرم‌افزار دارای یک زبان برنامه‌نویسی قدرتمند است که اجازه‌ی اضافه‌کردن دستورات جدید و در نتیجه افزایش کارایی این نرم‌افزار را می‌دهد. چندین پژوهشگر از این نرم‌افزار برای ارزیابی جریان از میان محیط‌های توده‌ی سنگی استفاده کرده‌اند.^[۴۰]

۶. شاخص‌های ایمنی تکیه‌گاه

ارزیابی کُتی و کیفی مکانیزم گسیختگی و رفتار تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی با روش‌های عددی، مستلزم استفاده از شاخص‌های ایمنی مرتبط با محیط‌های توده‌سنگی درزه‌دار است. همان‌طور که بیان شد، جابه‌جایی‌ها در توده سنگ درزه‌دار شامل لغزش و بازشدگی در امتداد درزه‌ها و چرخش بلوک‌ها حول درزه‌هاست.

جدول ۲. مشخصات بلوک سنگی و درزه‌ها.

بلوک سنگی	دسته‌ی درزه‌ی ۴۵- درجه	دسته‌ی درزه‌ی ۴۵ درجه
$E_s = 10 \text{ GPa}$	$K_n = 100 \frac{\text{GPa}}{\text{m}}$	$K_n = 100 \frac{\text{GPa}}{\text{m}}$
$\nu = 0.3$	$K_s = 100 \frac{\text{GPa}}{\text{m}}$	$K_s = 100 \frac{\text{GPa}}{\text{m}}$
$\gamma = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\varphi = 35$	$\varphi = 35$
	$c = 1 \text{ MPa}$	$c = 1 \text{ MPa}$
	$\sigma_t = 0$	$\sigma_t = 0$
	$\Psi = 5$	$\Psi = 5$
	$a_s = 0.5 \text{ mm}$	$a_s = 0 \text{ mm}$

تحلیل اخیر نیز یک بار با در نظر گرفتن جریان آب درون درزه‌ها و وقوع پدیده‌ی هیدرومکانیکی و یک بار بدون در نظر گرفتن جریان آب انجام می‌شود تا تأثیرات نشت جریان از داخل تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی بر پایداری این‌گونه سازه‌ها معلوم شود. با توجه به مکانیزم رفتاری محیط‌های توده سنگی که در مقدمه نیز بدان اشاره شد، برای ارزیابی وضعیت پایداری تکیه‌گاه، علاوه بر پیغام‌های نرم‌افزار، تاریخچه‌ی جابجایی‌ها، سرعت و نیروهای نامتعادل‌کننده‌ی نقاط مختلف نیز کنترل شد و بر اساس آن‌ها ایمنی یا گسیختگی تکیه‌گاه بررسی شد.

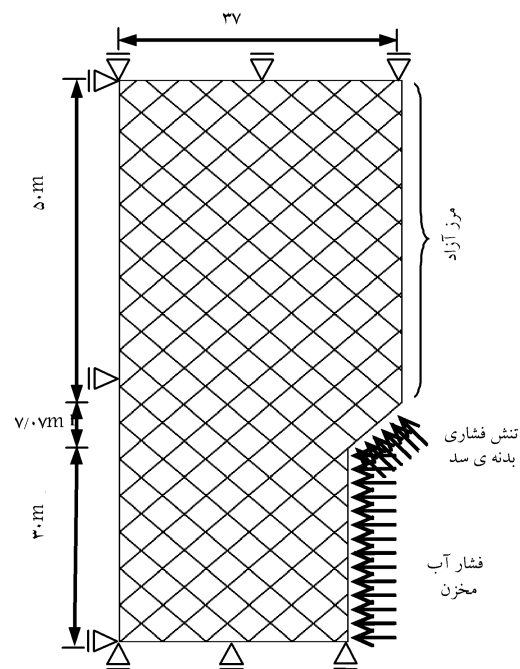
۸. مطالعه‌ی رفتار هیدرومکانیکی تکیه‌گاه یک سد

بتنی قوسی

۱.۸. خصوصیات هندسی و بارگذاری مدل

تکیه‌گاه سنگی مورد مطالعه محیطی فرضی است. در این شبیه‌سازی هندسی که با شکل ۴ لحاظ شده است، بر اساس آن ضخامتی از سد که با تکیه‌گاه در تماس است ۱۰ متر فرض شده است و در واقع به‌جای شبیه‌سازی بدنه‌ی سد، نیرویی را که بر تکیه‌گاه وارد می‌کند اعمال می‌کنیم. طولی از تکیه‌گاه که در تماس با آب پشت سد است نیز ۳۰ متر فرض شده است و از طریق اعمال یک فشار مکانیکی به‌همراه هد هیدرولیکی، تأثیر فشار آب پشت سد شبیه‌سازی می‌شود.

به‌منظور 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 به‌همراه تکیه‌گاه‌های آن شبیه‌سازی شد. مدل شبیه‌سازی‌شده، در عمق ۲۰۰ متری سطح نرمال ایستایی آب مخزن فرض شده است که فشاری معادل $P_s = 2 \text{ MPa}$ بر بدنه‌ی سد ایجاد می‌کند. نهایتاً بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار SAP، تنش وارد بر تکیه‌گاه از طرف بدنه‌ی سد ۱۰ مگاپاسکال برآورد شد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده دو دسته درزه با امتداد ۴۵ و ۴۵- درجه نسبت به افق لحاظ شده است.



شکل ۴. مدل دو بعدی پلان تکیه‌گاه چپ.

۲.۸. مشخصات هیدرولیکی و مکانیکی مدل

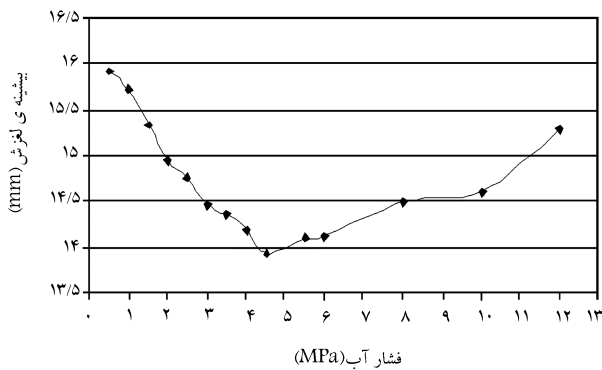
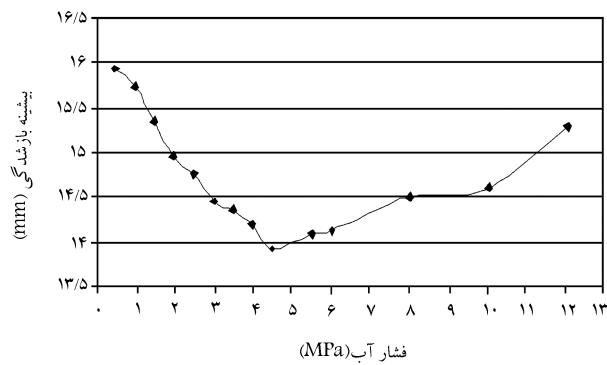
مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها و سنگ سالم مطابق جدول ۲ اختیار شده است. $[10]$ $k_n, k_s, c, \varphi, \sigma_t, \Psi$ و a_s به ترتیب سختی نرمال، سختی برشی، زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی، زاویه‌ی اتساع و بازشدگی اولیه‌ی درزه‌ها و E و ν نیز به ترتیب مدول تغییرشکل و ضریب پواسون سنگ سالم هستند. فرض این است که درزه‌ها بر اساس مدل رفتاری موهر-کولمب ارتجاعی -خمیری کامل عمل می‌کنند و بلوک‌ها نیز رفتار ارتجاعی دارند.

۳.۸. نتایج تحلیل‌ها

نتایج تحلیل حالت الف در شکل‌های ۵ و ۶ و نتایج تحلیل حالت ب نیز در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است. در اشکال ۵ و ۷، با در نظر گرفتن جریان آب درون درزه‌ها، تغییرات شاخص‌های گسیختگی به ترتیب به‌ازاء افزایش فشار آب و کاهش مقاومت، نشان داده شده است. در اشکال ۶ و ۸ تغییرات این شاخص‌ها بدون در نظر گرفتن جریان آب درون درزه‌ها به‌نمایش درآمده است که آهنگی کاملاً متفاوت با حالت نمودارهای ۵ و ۷ دارد. مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۷ نشان می‌دهد که آهنگ تغییرات شاخص‌های گسیختگی در دو حالت افزایش فشار آب و افزایش ضریب SRF، روندی نسبتاً مشابه و تصاعدی دارد. با توجه به اینکه در شکل ۵، در بیشینه‌ی فشار آب ۴۶ مگاپاسکال مقادیر شاخص‌های گسیختگی به سمت بی‌نهایت میل می‌کنند؛ مقدار ضریب ایمنی به‌دست آمده با تعریف انجام‌شده در بخش ۶ برابر است با $(2.3 = 46 \div 2)$. از طرفی مقدار ضریب ایمنی به‌دست‌آمده از روش کاهش مقاومت در نمودارهای شکل ۷ نیز که در نقطه‌ی $SRF=2.55$ شاخص‌های آن به سمت بی‌نهایت میل کرده است، برابر ۲.۵۵ است.

۹. تفسیر نتایج

نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که در ابتدا با افزایش فشار آب پشت سد، روند تغییرات مقدار شاخص بیشینه‌ی بازشدگی حالتی صعودی داشته است تا اینکه در نزدیکی فشار ۴۶ مگاپاسکال مقدار این شاخص به شکل ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. در واقع می‌توان گفت که تکیه‌گاه سد در نزدیکی این فشار ناپایدار است و دچار گسیختگی می‌شود و به تبع آن پایداری سازه‌ی سد را نیز به مخاطره خواهد انداخت. در این حالت با توجه به افزایش هد هیدرولیکی آب پشت سد و به‌دنبال آن افزایش میزان دبی عبوری از ناپیوستگی‌ها به‌منزله‌ی تنها مجاری عبوری جریان، افزایش

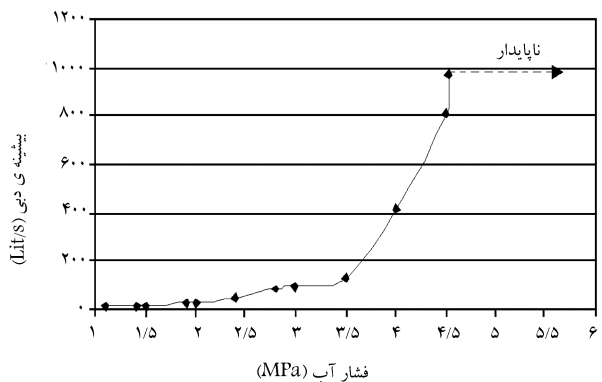
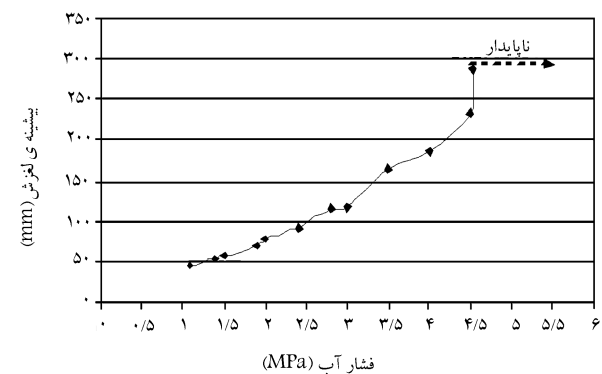
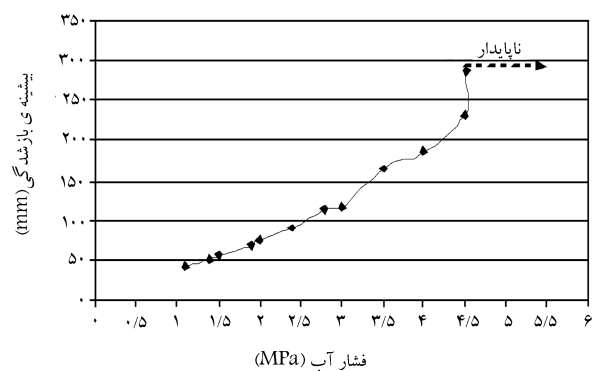


شکل ۶. تغییرات اندیس‌های گسیختگی در مقابل تغییرات فشار آب بدون در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها.

که اولاً این مقادیر در فشارهای آب بسیار بالا به دست آمده‌اند که چون بیشینه ارتفاع سدهای بتنی قوسی دنیا در حدود ۳۰۰ متر است، عملاً چنین فشارهایی وجود ندارند. ثانیاً همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقادیر شاخص گسیختگی به صورت موضعی و در تعداد محدودی درزه و نه در درزه‌های زیاد اتفاق می‌افتند. همچنین خاطرنشان می‌شود که تحلیل‌های انجام شده دو بُعدی‌اند و در صورت استفاده از تحلیل‌های سه بُعدی مقادیر لغزش و بازشدگی درزه‌ها قطعاً کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر باید گفت که در مدل شبیه‌سازی شده هیچ‌گونه راهکار بهسازی همانند استفاده از تزریق و پرده‌ی آب‌بند به کار نرفته است. با توجه به اینکه غالباً در تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی از این‌گونه راهکارها برای کاهش میزان نشست استفاده می‌شود، می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت وجود پرده‌ی آب‌بند در مدل شبیه‌سازی شده، مقادیر شاخص گسیختگی کاهش قابل‌ملاحظه‌ی نشان خواهند داد.

در ادامه‌ی تحلیل‌های حالت الف، نمودارهای شکل ۶ بدون در نظر گرفتن مؤلفه‌ی هیدرولیکی فشار آب پشت سد به دست آمده است. به عبارتی در این تحلیل هیچ‌گونه آبی درون ناپوستگی‌ها جریان ندارد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود تفاوت‌هایی میان صرف نظر کردن از جریان آب درون ناپوستگی‌ها با لحاظ کردن آن در تحلیل‌ها وجود دارد که عبارتند از:

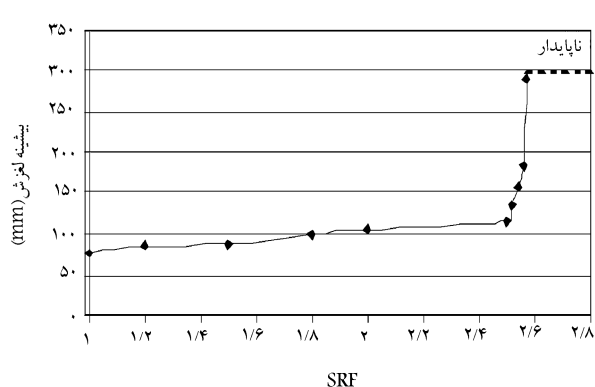
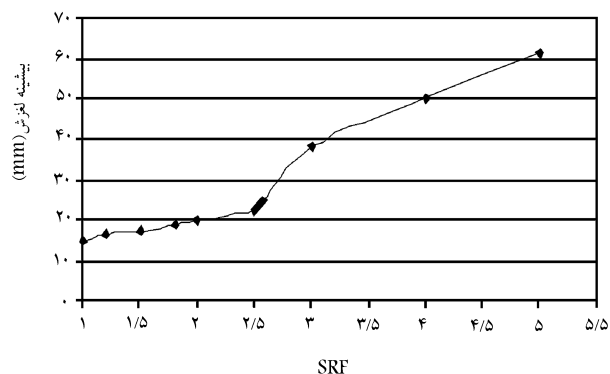
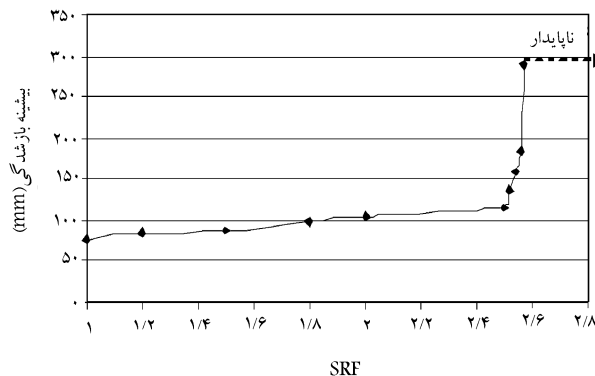
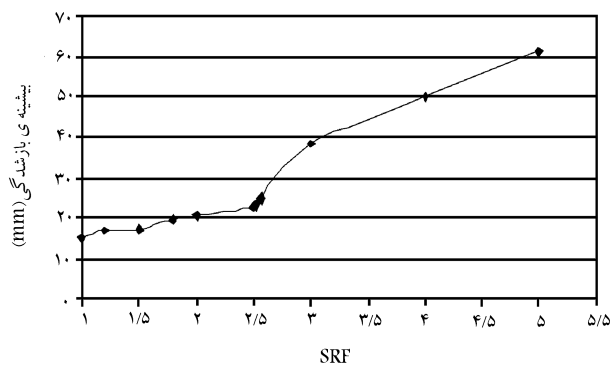
- رفتار شاخص‌های گسیختگی در مقابل تغییرات فشار آب کاملاً متفاوت است. بنابراین پیش‌بینی رفتارهای مکانیکی و هیدرولیکی و مکانیزم گسیختگی توده سنگ در این حالت (بدون آب) ممکن است کاملاً غیر واقعی و اشتباه باشد.
- مقادیر شاخص بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش در قیاس با حالت قبلی بسیار کمتر هستند، به نحوی که در فشار ۱/۵ مگاپاسکال مقادیر شاخص بازشدگی (یا لغزش)



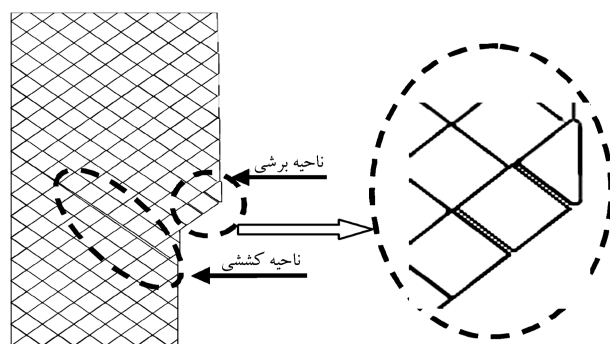
شکل ۵. تغییرات اندیس‌های گسیختگی در مقابل تغییرات فشار آب با در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها.

بیشینه‌ی مقادیر بازشدگی قابل انتظار است. این تذکر لازم است که بر اساس قانون مکعب، دبی عبوری از یک درزه، تابعی از توان سوم بازشدگی آن درزه است. شاخص بیشینه‌ی لغزش نیز رفتاری مشابه با شاخص بیشینه‌ی بازشدگی دارد. به طور کلی در محیط‌های ناپوسته با درزه‌های متقاطع، بازشدگی در یک درزه مستلزم لغزش در درزه‌ی دیگر است. شاخص بیشینه‌ی دبی عبوری نیز رفتاری یکسان با دو شاخص دیگر دارد. با توجه به اینکه گسیختگی تکیه‌گاه در فشار نزدیک به ۴/۶ مگاپاسکال رخ می‌دهد، در این حالت ضریب ایمنی طبق تعریف مساوی ۲/۳ است. همان‌طوری که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقادیر بیشینه‌ی لغزش و بازشدگی در ناحیه‌ی کششی بالادست اتفاق می‌افتند. ضمن اینکه بلوک‌ها در تماس با بدنه‌ی سد نیز دچار لغزش می‌شوند و یک ناحیه‌ی برشی را به وجود می‌آورند که ناپایداری بدنه‌ی سد را به دنبال خواهد داشت.

در تفسیر مقادیر نسبتاً زیاد شاخص‌های گسیختگی در شکل ۵ باید یادآور شد



شکل ۸. تغییرات اندیس‌های گسیختگی در مقابل تغییرات SRF بدون در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها.



شکل ۹. محل بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش.

همین مشاهدات برای شاخص بیشینه‌ی لغزش نیز صادق است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که به‌ازاء این مقدار کاهش مقاومت، تکیه‌گاه سد در آستانه‌ی گسیختگی و ناپایداری قرار می‌گیرد. مقادیر بیشینه‌ی بازشدگی و لغزش که باعث گسیختگی تکیه‌گاه می‌شوند، در ناحیه‌ی کششی که در شکل ۹ نشان داده شده است، اتفاق می‌افتد. شاخص بیشینه‌ی دبی عبوری رفتاری مشابه با دو شاخص قبلی دارد. به‌نظر می‌رسد این رفتار متأثر از کاهش مقادیر سختی نرمال و زاویه‌ی اتساع باشد که به‌خوبی رابطه‌ی میان پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ را آشکار می‌سازد. ضریب ایمنی در این حالت معادل ۲/۵۵ است.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که حتی به‌ازاء ضریب $SRF=5$ نیز هیچ‌گونه گسیختگی در تکیه‌گاه رخ نداده و ایمنی تکیه‌گاه سد تقریباً دو برابر حالتی است که جریان درون درزه‌ها شبیه‌سازی می‌شود $SRF=2/55$ (شکل ۷). این مقایسه همانند مقایسه‌ی نتایج شکل‌های ۵ و ۶ اهمیت تأثیر رفتار هیدرومکانیکی ناشی از جریان آب درون درزه‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۷. تغییرات اندیس‌های گسیختگی در مقابل تغییرات SRF با در نظر گرفتن جریان درون درزه‌ها.

درزه‌ها برای دو حالت به ترتیب ۵° و ۱۵/۵ میلی‌متر هستند. به عبارتی در حالتی که از جریان درون ناپیوستگی‌ها صرف‌نظر می‌شود نتایج تحلیل می‌تواند بسیار خوشبینانه و در نتیجه بر خلاف جهت ایمنی باشد.

• گسیختگی تکیه‌گاه در حالت دوم در فشار بسیار بالای ۱۲ مگاپاسکال روی می‌دهد. این حالت از تحلیل، سطح ایمنی را بسیار بالا و ضریب ایمنی را دست‌کم برابر ۶ نشان می‌دهد. حال آن‌که با در نظر گرفتن جریان آب، ضریب ایمنی برابر ۲/۳ به دست می‌آید. بنابراین نتایج تحلیل بدون جریان در تخمین پایداری می‌تواند بسیار دست پایین و بر خلاف جهت ایمنی باشد.

همان‌طور که از نمودار شکل ۷ مشخص است، در حالتی که جریان آب درون درزه‌ها شبیه‌سازی می‌شود مقدار بیشینه‌ی بازشدگی به‌منزله‌ی یک شاخص گسیختگی همزمان با افزایش ضریب SRF افزایش پیدا می‌کند، به‌نحوی که در مقدار نزدیک به $SRF=2/55$ شاخص بیشینه‌ی بازشدگی شدیداً افزایش پیدا می‌کند.

و یا کاهش پارامترهای مقاومتی درزه‌ها، شاخص‌های بسیار مناسبی برای بیان مکانیزم گسیختگی محیط توده سنگی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی هستند. این مقادیر در ناحیه‌یی که گسیختگی رخ می‌دهد اتفاق می‌افتند.

● آهنگ تغییرات بازشدگی و لغزش درزه‌ها به‌ارزاء افزایش فشار آب و یا کاهش مقاومت، در دو حالت مختلف عبور جریان و عدم عبور جریان درون درزه‌ها (نادیده انگاشتن نقش پدیده‌ی هیدرومکانیکی) کاملاً متفاوت است. به‌نحوی‌که می‌توان گفت در تحلیل پایداری تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی، عدم در نظر گرفتن جریان آب درون درزه‌ها و صرف نظر کردن از تأثیرات هیدرومکانیکی منجر به درک نادرست از مکانیزم‌های گسیختگی تکیه‌گاه‌ها خواهد شد.

● با تعریف ضریب کاهش مقاومت SRF به‌منزله‌ی یک ضریب ایمنی، عدم در نظر گرفتن جریان آب درون درزه‌ها می‌تواند ضریب ایمنی را بسیار بیشتر از حالتی به‌دست دهد که جریان آب و پدیده‌ی هیدرومکانیکی منظور می‌شود (در مدل فرضی این تحقیق تقریباً دو برابر به‌دست آمده است). لذا طراحی براساس فرض عدم وقوع پدیده‌ی هیدرومکانیکی می‌تواند بسیار نا ایمن و خطرناک باشد.

نکته‌ی قابل تأمل دیگر تشابه رفتاری نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ در نزدیکی ضریب $SRF=2/55$ است، به‌نحوی‌که هردو نمودار در این محدوده دچار تغییر مسیر ناگهانی می‌شوند. این تغییر ناگهانی در تحلیل‌هایی که جریان نیز در آن‌ها شبیه‌سازی نمی‌شود می‌تواند بیان‌گر وضعیت بحرانی تکیه‌گاه باشد. آن‌چنان‌که در همین محدوده و در شرایطی که جریان شبیه‌سازی می‌شود تکیه‌گاه سد به مرز گسیختگی می‌رسد. کلیه‌ی موارد بیان شده از تفاوت نتایج حاصل از اشکال ۵ و ۶ نیز در این حالت مصداق دارد و لزوم لحاظ کردن جریان سیال را بیش از پیش معلوم می‌کند.

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با نگاه ویژه به نقش ناپیوستگی‌ها در گسیختگی تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی قوسی، یک تکیه‌گاه فرضی شبیه‌سازی و تأثیر لحاظ کردن جریان آب درون ناپیوستگی‌ها و پدیده‌ی هیدرومکانیکی بر روی ایمنی آن بررسی شد. بعد از انجام تحلیل‌های مختلف نتایج زیر به‌دست آمد:

● مقادیر بیشینه‌ی بازشدگی، لغزش و دبی عبوری در شرایط تغییر فشار آب مخزن

پانویس

1. interconnectivity
2. discrete flow analysis
3. porous medium
4. aperture
5. orientation
6. Poiseuille law
7. pressure drop coefficient
8. residual aperture
9. continuously yielding joint model
10. strength reduction factor

منابع

1. Stephansson, O. "The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering", *Hydrogeology Journal*, **11**(1) pp. 7-40 (2002).
2. Londe, P. "The malpasset dam failure", *Engineering Geology*, **24**, pp. 295-329 (1987).
3. Thomas, H.H. and Rutqvist, J. "The engineering of large dam", part 1, *John Wiley Sons*, New York (1976).
4. Krsmanovic, D. "The behaviour of the horizontal arch dam supporting some type of discontinuum", *Advanced in rock mechanics*, **1**, Colorado, Part A, p. 187 (1974).
5. Goodman, R.E. and Scott, G.A. "Rock mechanics dam safety studies for seminoe arch dam", *proceedings of the 1st North America rock mechanics symposium*, the University of Texas at Austin (1994).
6. Valencia, F.G. and 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).
7. Mgalobelov, Yu.B. "Computational studies of rock foundation of arch dams", *proceedings of international congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan (1995).
8. Stematiu, D.; Bugnariu, T. and Constantinesco, AL. "Rock mechanics problems related to three arch dams founded on faulted rocks", *proceedings of second international conference on the mechanics of jointed and faulted Rock-MJFR-2*, Vienna, Austria (1995).
9. Walsh, J.B. "The effect of cracks on the compressibility of rocks", *Journal of Geophysical Research*, **70**(2), pp. 381-389 (1965).
10. Bandis, S.C.; Lumsden, A.C. and Barton, N.R. "Fundamentals of rock joint deformation", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **20**(6), pp. 249-268 (1983).
11. Brace, W.F. "Permeability of crystalline and argillaceous rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **17**, pp. 241-250 (1980).
12. Priest, S.D. "Discontinuity analysis for rock engineering", *Chapman & Hall*, London (1993).
13. Long, J.C.S. and Witherspoon, P.A. "The relationship of the degree of interconnectivity to permeability of fracture networks", *Journal Geophysical Research*, **90**(B4), pp. 3087-3098 (1985).
14. Oda, M. "Permeability tensor for discontinuous rock mass", *Geotechnique*, **35**(4), pp. 483-495 (1985).
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, Amsterdam, *Elsevier Science*, **79**, pp. 135-164 (1996).
16. Tsang, C.F. and Stephansson, O. "A conceptual introduction to coupled thermo-hydro-mechanical processes in fractured rocks" Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process of Fractured Media, *Elsevier Science* (1996).
 17. Lomize, G.M. "Filtratsia v treshchinovatykh ", *Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatelstvo*, Moskva-Leningrad (1951).
 18. Sutura, S.P. and Skalak, R. "The history of poiseuille's law", *Annual Review of Fluid Mechanics*, **25**, pp. 1-19 (1993).
 19. Pfitzner, J. "Poiseuille and his law", *Anaesthesia*, **31**(2), pp. 273-275 (March 1976).
 20. Brown, S.R. "Fluid flow through rock joints: effects of surface roughness", *Journal of Geophysical Research*, **92**(B2), pp. 1337-1347 (1987).
 21. Neuzil, C.E. and Tracy, J.V. "Flow through fractures", *Water Resources Research*, **1**(3), pp. 191-199 (1981).
 22. Tsang, Y.W. "The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture", *Water Resources Research*, **20**(9), pp. 1209-1215 (1984).
 23. Iwai, K. "Fundamental studies of fluid flow through single fracture" *PhD Thesis*, University of California, Berkeley (1976).
 24. 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), pp. 1016-1024 (1980).
 25. Louis, C. "Introduction à l'hydraulique des roches", *PhD Thesis*, Paris (1976).
 26. Walsh, J.B. "Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability", *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomech*, **18**, pp. 429-434 (1981).
 27. Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A. "Hydromechanical behaviour of a deformable rock fracture subject to normal stress", *Journal Geophysical Research*, **86**(B10), pp. 9287-9298 (1981).
 28. Thiel, K. "Rock mechanics in hydro engineering", *Elsevier* (1989).
 29. 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**, pp. 147-152 (1981).
 30. 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, pp. 225-231 (1987).
 31. *ITSCA Consulting Group*, UDEC-Universal Distinct Element Code, Version 3.0, **1, 2 and 3**, User's Manual (1996).
 32. Sharp, J.C., Fluid flow through fissured media. Phd.Thesis, imperial College of Science and Technology, London (1970).
 33. Tsang, Y.W. "The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture", *Water Resources Research*, **20**(9), pp. 1209-1215 (1984).
 34. Brady, B.H.G. and Brown, E.T. "Rock mechanics for underground mining", 2nd edn, *Chapman & Hall* (1994).
 35. Indraratna, B. and Ranjith, P. "Deformation and permeability characteristics of rocks with interconnected fractures", *9th International Congress on Rock Mechanics*, Paris, **2**, pp. 755-760 (1999).
 36. Herbert, A.W. "Modelling approaches for discrete fracture network flow analysis", Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process of Fractured Media, *Elsevier* (1996).
 37. Zhang, X.; Sanderson, D.J.; Harkness, R.M. and Last, N.C. "Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock mass". *International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences*, **33**(1), pp. 17-37 (1996).
 38. Indraratna, B.; Ranjith, P.G. and Aziz, N. "Numerical prediction of inflow to underground cavity using a coupled hydro-geomechanical model", *International conference on Geomechanics/Ground Control in Mining and Underground Construction*, Australia, **2**, pp. 63-71 (1998).
 39. Manual of UDEC, User's Guide, Section 1, "Introduction".
 40. Liao, Q.H. and Hencher, S.R. "Numerical modelling of the hydro-mechanical behaviour of fractured rock masses", *International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences*, NYRocks's 97, **34**(3-4), paper no. 117 (CDROM) (1997).