

مدل‌سازی عددی سه‌بعدی قوس‌زدگی تنش و تعیین نواحی با پتانسیل شکست در هسته سدهای خاکی در دره‌های تنگ (مطالعه موردی: سد رودبار لرستان)

امیرحسین امینی^۱؛ علیرضا کارگر^{۲*}؛ محمدحسین خسروی^۳؛ حسین بهزادی‌نژاد^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۴- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

(*نویسنده مسئول: ar.kargar@ut.ac.ir)

چکیده

وقوع قوس‌زدگی و کاهش سطح تنش در هسته سدهای خاکی یکی از عواملی است که می‌تواند منجر به ایجاد و رشد ترک شده و زمینه شکست هیدرولیکی را فراهم سازد. در سدهای خاکی احداث شده در دره‌های تنگ به دلیل اثر سه بعدی (طولی و عرضی) قوس‌زدگی تنش در هسته، مدل‌های دو بعدی نمی‌توانند نتایج صحیحی بدست دهند و تحلیل وضعیت توزیع تنش نیازمند مدل‌سازی سه بعدی است. تحقیق حاضر با هدف تعیین الگوی قوس‌زدگی تنش در هسته رسی سدهای خاکی واقع در دره‌های تنگ با استفاده از مدل سه بعدی و تعیین نواحی مستعد شکست با توجه به توزیع تنش موجود، صورت گرفته که به طور خاص از اطلاعات سد رودبار لرستان استفاده و اهداف مذکور برای این سد تعیین گردیدند. در این پژوهش، با مدل‌سازی سه‌بعدی سد رودبار لرستان واقع در دره‌ای تنگ (۷-شکل) در نرم‌افزار *PLAXIS 3D*، شدت پدیده قوس‌زدگی تنش هسته در مراحل پایان ساخت و آبیگری اولیه بررسی شد. نتایج نشان دادند که حداکثر میزان قوس‌زدگی پس از ساخت بدنه در $\frac{1}{8}$ ارتفاع سد از کف هسته رخ داده و با آبیگری سد پس از یکسال، شدت قوس‌زدگی تنش افزایش می‌یابد. همچنین وضعیت هسته از نظر نواحی با سطح تنش کم و در نتیجه وجود پتانسیل رشد ترک و شکستگی پس از تکمیل ساخت با دو معیار (۱) نواحی کششی و (۲) معیار اسکافیلد (۱۹۸۰) - بر پایه مکانیک خاک حالت بحرانی - بررسی و ابعاد گسترش این نواحی مشخص گردید که هر دو معیار بیان‌گر وجود نواحی مستعد شکست در ارتفاعات بالایی و مجاور تکیه‌گاه‌ها بودند.

سد خاکی با هسته رسی، قوس‌زدگی، مدل‌سازی عددی سه بعدی، *PLAXIS 3D*.

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

وقوع شکست هیدرولیکی و فرسایش داخلی پس از آبیگری سد می‌باشد. قوس‌زدگی و انتقال تنش از هسته به مصالح مجاور که به دلیل اختلاف نشست و در نتیجه ایجاد تنش برشی میان مصالح اجزای مختلف بدنه رخ می‌دهد، نقشی موثر در کاهش سطح تنش هسته و وقوع ترک خوردگی ایفا

کنترل ایمنی و پایداری سدهای خاکی در مراحل مختلف عمر آن به اندازه طراحی و اجرای آن‌ها دارای اهمیت است. ایجاد و رشد ترک در هسته رسی این نوع سدها یکی از دلایل اصلی

ثابت مانده که نشان‌دهنده حذف اثر دره بر انتقال تنش هسته است [۶]. حشمتی و یوسفی (۲۰۰۹) نیز با انجام تحلیل عددی دو بعدی سد دریک، بیان کردند افزایش در مدول الاستیسیته و ضریب پواسون هسته و کاهش در زاویه اصطکاک آن منجر به افزایش سطح تنش‌های قائم در هسته می‌گردد [۷]. در مطالعه درخشندی و همکاران (۲۰۱۳) با مقایسه تحلیل دو و سه بعدی سدهای سنگریزه‌ای در دره‌های تنگ مشخص شد میزان تنش کل قائم در هسته در مدل دو بعدی بیش از مدل سه بعدی بوده که نشان می‌دهد اثر قوس‌زدگی طولی ناشی از دره تنگ در نظر گرفته نشده است [۸]. بنابراین تحلیل سدهای خاکی در دره‌های تنگ نیازمند مدل‌سازی سه بعدی می‌باشد. در تحلیل پارامتریک طالبی و همکاران (۲۰۱۳) مشخص گردید افزایش در شیب بدنه سد، شیب هسته (و نازک‌تر شدن آن)، نسبت سختی پوسته به هسته و هسته قائم بجای مایل و همچنین کاهش در ضخامت لایه‌های فیلتر و تراکم‌پذیری پی منجر به انتقال بار بیشتر و افزایش پتانسیل شکست هیدرولیکی می‌شوند [۹]. در مطالعه پارامتریک دیگر، مرادی و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی قوس‌زدگی طولی، به این نتیجه رسیدند که افزایش شیب دره و سختی دره نسبت به هسته و کاهش در عرض دره موجب افزایش قوس‌زدگی در هسته می‌شود [۱۰]. نتایج مطالعه لیو و وانگ (۲۰۱۶) نشان می‌دهد موقعیت رخداد حداکثر میزان قوس‌زدگی با حداکثر میزان نشست هسته مرتبط بوده و دو نقطه مذکور نزدیک به هم و در محدوده میانی ارتفاع سد واقع شده‌اند. همچنین پس از مرحله آگیری، درصد قوس‌زدگی تنش در هسته نسبت به پایان ساخت افزایش می‌یابد که با دو عامل اثر نیروی شناوری آب و تغییر شکل مرطوب سنگریزه‌ها ناشی از اشباع پوسته بالادست و کاهش سختی مصالح سنگریزه‌ای در ارتباط است [۱۱]. جروادی و همکاران (۲۰۱۷) با مدل‌سازی دو بعدی، اثر پیکربندی و شکل هسته رسی سدهای سنگریزه‌ای در برابر شکست هیدرولیکی را بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند هرچه شیب بالادست هسته رسی بیش‌تر باشد، تمایل به ایجاد قوس‌زدگی در آن بیش‌تر می‌شود. همچنین سدی که نسبت ارتفاع به عرض پایه هسته در آن بزرگ‌تر از ۲ باشد احتمال تجربه شکست هیدرولیکی خیلی بیشتری دارد [۱۲]. در تحلیل عددی دو بعدی سد خاکی داریان توسط اسماعیل‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)، مشخص گردید افزایش

می‌نماید. همچنین احداث سد در دره‌های تنگ (شکل ۷) سبب تشدید این پدیده می‌شود؛ چراکه علاوه بر نواحی انتقالی مجاور هسته در مقطع عرضی، تکیه‌گاه‌های دره در مقطع طولی بدنه نیز باعث انتقال تنش هسته می‌شوند. لافکوئیست (۱۹۵۵) از اولین کسانی بود که متوجه اهمیت قوس‌زدگی در سدهای خاکی شد. او با اندازه‌گیری‌های فشار متوجه شد که کاهش قابل ملاحظه‌ای در فشارهای جانبی و قائم هسته نازک سدهای سنگریزه‌ای وجود دارد؛ کاهش فشار با نشست‌های زیاد هسته نسبت به پوسته و در نتیجه انتقال بار از هسته به پوسته مرتبط است و همچنین احتمال ایجاد ترک‌های افقی را افزایش می‌دهد [۱]. نانویلر و آناگنوستی (۱۹۶۱) تئوری وضعیت تنش‌ها در هسته را با نشست آن نسبت به پوسته شرح و بسط دادند. ایشان اشاره کردند که پدیده انتقال تنش نه تنها بین هسته و پوسته، بلکه با توجه به شکل مقطع دره بین دو تکیه‌گاه نیز می‌تواند اتفاق بیفتد [۲]. کلاف و وودوارد (۱۹۶۷) با بررسی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در ساخت تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای (لایه‌ای) سد خاکی، بیان کردند بین تنش‌های حاصل از دو روش مذکور اختلاف چندانی وجود ندارد ولی اختلاف تغییرشکل‌ها قابل توجه می‌باشد. لذا برای دستیابی به نتایج واقع‌بینانه از مدل‌سازی عددی، ساخت سد مطابق واقعیت باید به شکل لایه‌ای در نظر گرفته شود [۳]. در بررسی رفتار غیر عادی سد هیته‌جووت در نروژ توسط وود و همکاران (۱۹۷۶)، مشخص شد عامل اصلی شکست هیدرولیکی در هسته سد موردنظر، وقوع قوس‌زدگی شدید به دلیل کاهش عرض ناگهانی هسته بوده که با توجیه افزایش سرعت پخش فشار آب منفذی اضافی انجام شده بود [۴]. شرارد (۱۹۸۶) نیز بیان کرد که شکست هیدرولیکی با نشست تفاضلی و انتقال تنش درونی و در نتیجه ایجاد نواحی با تنش کل کم در سد، ممکن می‌شود. کاهش سطح تنش موثر در توده خاک باعث می‌شود مقدار فشار لازم برای ایجاد و توسعه ترک کاهش یابد [۵]. در مطالعه میرقاسمی و توللی (۲۰۰۰) با تحلیل سه بعدی، اثر هر دو عامل دره و پوسته با رفتار الاستیک خطی مصالح بر نسبت انتقال تنش در هسته سد بررسی شد. در نتیجه افزایش در نسبت سختی بین پوسته و هسته و شیب دره و کاهش در عرض دره موجب افزایش انتقال تنش می‌شود. همچنین با افزایش عرض دره از یک حد مشخص، تنش قائم در هسته

مستعد شکست در هسته شناسایی می‌شوند.

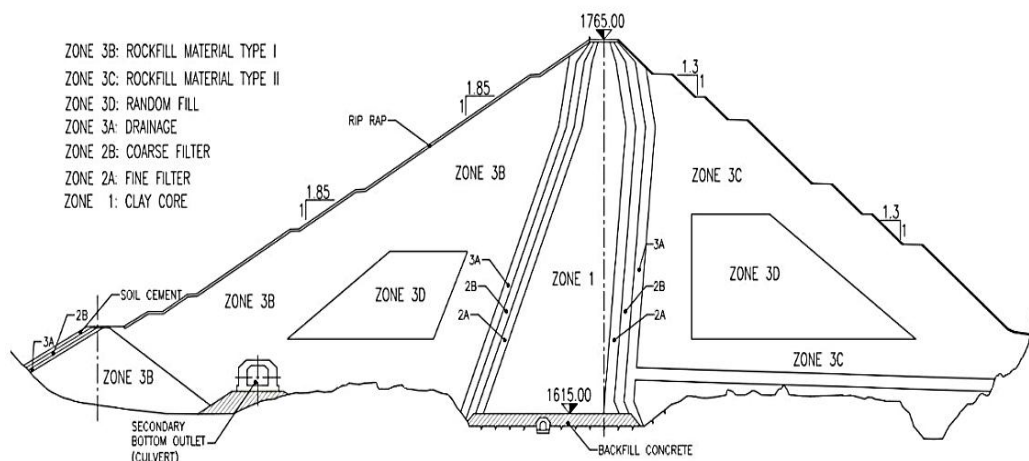
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات سد رودبار لرستان

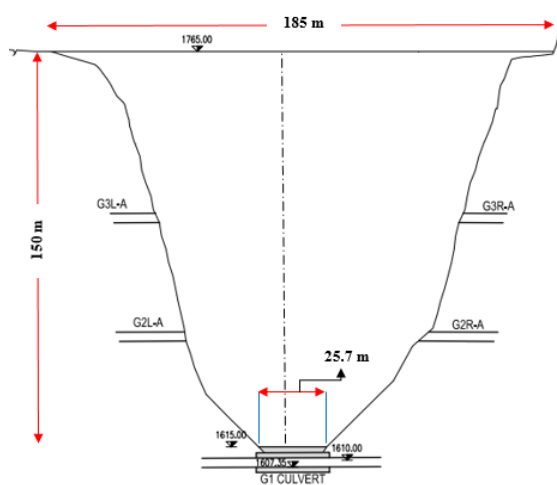
سد رودبار لرستان، یک سد خاکی- سنگریزه‌ای با هسته رسی مایل می‌باشد که در دره‌ای تنگ (شکل ۷) بر روی رودخانه رودبار در جنوب شرق استان لرستان و رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است. ارتفاع سد از بستر در بزرگ‌ترین مقطع حدود ۱۵۰ متر و طول و عرض تاج سد به ترتیب ۱۸۵ و ۱۵ متر است. بزرگ‌ترین مقطع عرضی سد رودبار به همراه اجزای مختلف بدنه و مقطع طولی گذرنده از مرکز هسته، به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱، دو لایه فیلتر ریز و درشت دانه و یک لایه زهکش در طرفین هسته رسی (GC) تعبیه شده است. ناحیه رندوم (zone 3D) درون پوسته‌های بالا و پایین دست نیز حاوی سنگ‌های شکننده‌تر نسبت به مصالح پوسته‌ها بوده که در اثر حمل و تراکم می‌شکنند و نفوذپذیری و مقاومت برشی کمتری دارند. اما در صورتی که از نظر پایداری و تراوش مشکل‌ساز نباشند، برای ساخت بدنه قابل استفاده هستند. خصوصیات مصالح اجزای بدنه در جدول ۱ نشان داده شده است.

زاویه اصطکاک داخلی هسته و نسبت ضخامت هسته به ضخامت فیلترها منجر به کاهش قوس‌زدگی می‌شود. افزایش شیب هسته، شیب دره و ارتفاع سد به عرض دره باعث افزایش قوس‌زدگی می‌گردد. همچنین، چسبندگی اثر قابل توجهی بر روی قوس‌زدگی ندارد [۱۳]. بیرانوند و کاماسی (۲۰۲۱) با مطالعه بر روی سد سنگریزه‌ای مروک بیان کردند وجود فیلتر با ضخامت و نسبت پواسون بالا بین هسته و پوسته بهترین راه برای کاهش درصد قوس‌زدگی است [۱۴]. نتایج مطالعه توپچو و سیریک (۲۰۲۳) نیز نشان می‌دهد که افزایش پارامترهای تغییر شکل هسته رسی (مدول الاستیک و نسبت پواسون) باعث کاهش قوس‌زدگی می‌شود [۱۵]. سروش و پورا کبر (۲۰۲۲)، با ارزیابی سه‌بعدی نواحی کم تنش و مستعد ترک‌خوردگی در هسته سدهای سنگریزه‌ای، مشاهده کردند نواحی با سطح تنش پایین و یا دارای تنش کششی، هر دو در ارتفاعات بالایی هسته و در مجاورت تکیه‌گاه‌ها توسعه یافته‌اند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای شکست هسته در این نواحی می‌باشد. تشدید نشست‌های تفاضلی و پدیده انتقال تنش در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها و کاهش سطح تنش روباره در ارتفاعات بالایی، عامل اصلی ایجاد این نواحی است [۱۶].

در تحقیق حاضر پدیده قوس‌زدگی در هسته رسی سدهای خاکی در دره‌های تنگ بررسی می‌شود. بدین منظور از داده‌های سد روبار لرستان استفاده گردید. با تعیین الگوی قوس‌زدگی پس از بهره‌برداری و در طی دوره‌های آبگیری نواحی



شکل ۱- بزرگ‌ترین مقطع عرضی سد رودبار لرستان و مصالح سازنده آن.



شکل ۲- مقطع طولی سد رودبار گذرنده از مرکز هسته.

جدول ۱- خصوصیات مصالح و پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده برای اجزای بدنه سد

| مصالح | P_{ref} (kPa) | ψ (°) | ϕ' (°) | c' (kPa) | E_{ur}^{ref} (MPa) | E_{oed}^{ref} (MPa) | E_{50}^{ref} (MPa) | k (cm/s) | γ_{sat} (kN/m ³) | γ_{unsat} (kN/m ³) |
|------------------|--------------------|---------------|----------------|---------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|--|
| هسته | ۱۰۰ | ۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۱۰۸ | ۳۰ | ۲۶ | 5×10^{-8} | ۲۲/۴ | ۲۲/۱ |
| فیلتر ریزدانه | ۱۰۰ | ۵ | ۳۹ | ۰ | ۱۸۱/۵ | ۵۵ | ۶۰/۵ | $4/5 \times 10^{-5}$ | ۲۱/۹ | ۲۰ |
| فیلتر درشت‌دانه | ۱۰۰ | ۵ | ۳۹ | ۰ | ۱۸۱/۵ | ۵۵ | ۶۰/۵ | $2/5 \times 10^{-4}$ | ۲۲/۲ | ۲۰/۵ |
| زهکش | ۱۰۰ | ۱۱ | ۴۵ | ۰ | ۱۸۱/۵ | ۵۵ | ۶۰/۵ | 2×10^{-2} | ۲۲/۲ | ۲۲ |
| پوسته بالادست | ۱۰۰ | ۱۱ | ۴۵ | ۰ | ۱۷۱/۶ | ۵۲ | ۵۷/۲ | $9/5 \times 10^{-3}$ | ۲۲/۵ | ۲۲/۵ |
| پوسته پایین‌دست | ۱۰۰ | ۱۲ | ۴۶ | ۰ | ۱۸۱/۵ | ۵۵ | ۶۰/۵ | $9/5 \times 10^{-3}$ | ۲۲/۲ | ۲۲ |
| ناحیه رندوم (3D) | ۱۰۰ | ۸ | ۴۲ | ۰ | ۱۳۲ | ۴۰ | ۴۴ | 7×10^{-3} | ۲۲/۹ | ۲۱/۵ |

۲-۲- مدل‌سازی عددی

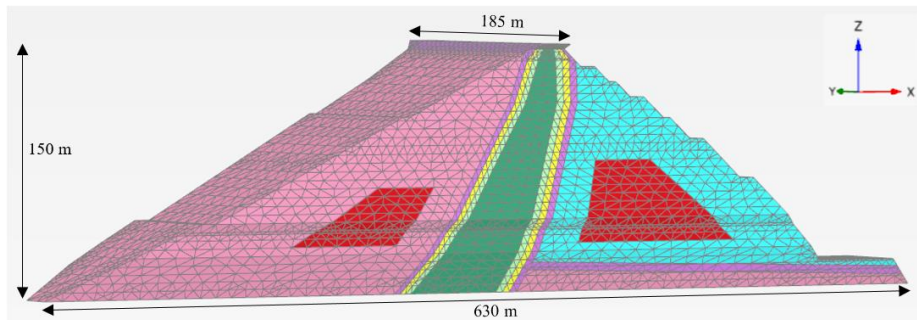
در این تحقیق از نرم‌افزار *PLAXIS 3D* استفاده شده است. پلکسیس یک نرم‌افزار اجزاء محدود می‌باشد که به صورت گسترده توسط مهندسين ژئوتکنیک برای تحلیل مسائل مرتبط بکار گرفته می‌شود. تحلیل سد به صورت سه بعدی و در شرایط استاتیک انجام گرفت. فاصله مرزهای مدل از سازه در جهات مختلف، از این جهت که اثر جابجایی‌های ایجاد شده ناچیز گردد، به اندازه کافی دور در نظر گرفته شده است. همچنین برای مصالح اجزای بدنه، مدل رفتاری خاک سخت‌شونده و برای مصالح سنگی پی و تکیه‌گاه‌ها، مدل هوک-براون بر اساس نتایج آزمایشات مکانیک سنگی موجود در گزارش‌های احداث سد، مورد استفاده قرار گرفت. مدل خاک سخت‌شونده یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار انواع خاک‌ها بوده که اثر سطوح تنش محصورکننده و کرنش

را بر مدل تغییرشکل خاک در نظر می‌گیرد. به علاوه، این مدل رابطه تنش و کرنش را در محدوده پلاستیک نیز فرموله کرده، تغییرات حجمی ناشی از اتساع را محاسبه و در خاک‌های غیرچسبنده از یک کلاهیک تسلیم در فضای تنش‌های اصلی برای تعریف شکست حجمی استفاده می‌کند. با توجه به توانمندی این مدل در تعیین رفتار انواع خاک‌ها در شرایط مختلف، مدلی مناسب و دقیق برای اهداف مدل‌سازی می‌باشد.

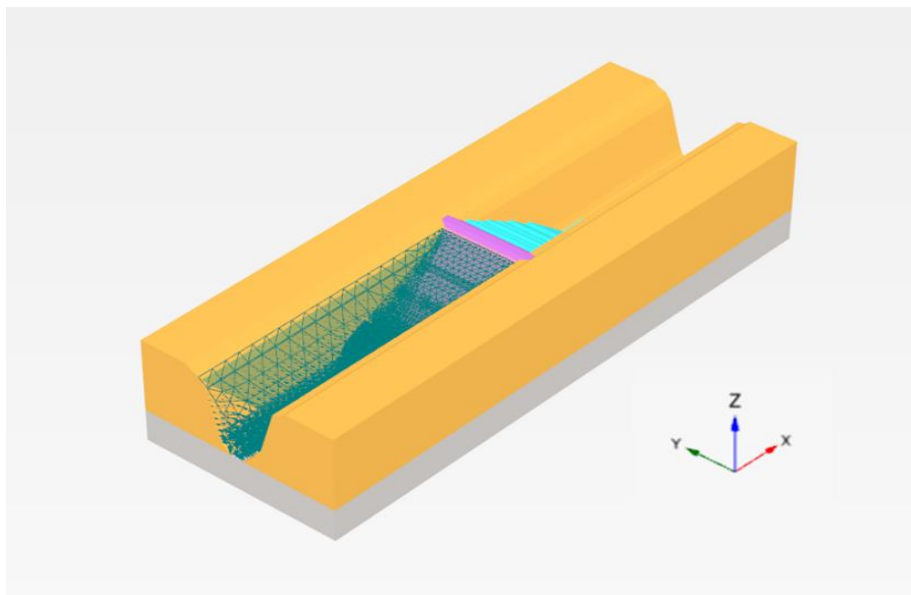
جهت مدل‌سازی بدنه از بزرگ‌ترین مقطع عرضی سد (شکل ۱) و برای شبیه‌سازی دره مطابق شکل ۲ از مقطع طولی گذرنده از مرکز هسته استفاده شده است. المان‌های مش سه بعدی مدل از نوع چهاروجهی ۱۰ گرهی هستند. نمایی از شبکه مش بندی تولید شده برای بدنه سد در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۴ نیز هندسه سد، پی و تکیه‌گاه‌های آن

بدنه، جریان در راستای عمود بر همه سطوح مرزی بسته و سرعت هیدرولیکی صفر می‌باشد؛ اما در مرحله آبیگری، مرزها در جهت امتداد دره (و رودخانه) باز گذاشته شده و در سایر جهات بسته فرض می‌گردند.

به همراه تراز نرمال آب مخزن (۱۴۱ متر نسبت به کف دره) را نشان می‌دهد. به منظور تنظیم شرایط مرزی مناسب، تغییرشکل مرز زیرین مدل در همه جهات، ثابت و مرزهای جانبی نیز در راستای عمود بر سطح مرزی، ثابت قرار داده شده‌اند. همچنین از نظر جریان آب زمین برای مرحله ساخت



شکل ۳- مش‌بندی روش اجزاء محدود برای بدنه سد. (نما از تکیه‌گاه راست)



شکل ۴- هندسه سه بعدی سد، پی و تکیه‌گاه‌ها به همراه تراز نرمال آب مخزن.

۲-۳- تعیین میزان قوس‌زدگی

با توجه به واقع شدن سد رودبار در دره تنگ، اثر قوس‌زدگی در هر دو راستای عرضی و طولی هسته سد وجود دارد. برای بررسی شدت این پدیده از پارامتر ضریب قوس‌زدگی (رابطه ۱) استفاده شده است. با توجه به این رابطه هرچه مقدار ضریب قوس‌زدگی کم‌تر باشد، شدت انتقال تنش از هسته به مصالح

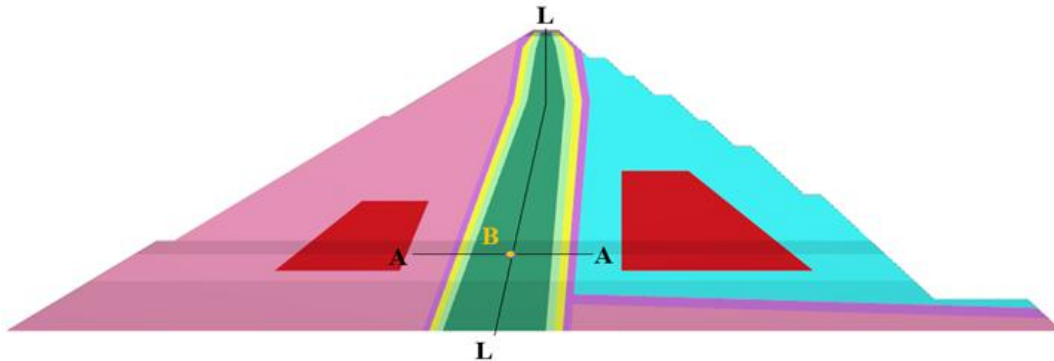
برای در نظر گرفتن اثر ساخت مرحله‌ای (لایه‌ای)، سد در ۳۰ لایه با ضخامت ۵ متری شبیه‌سازی و بر اساس مدت زمان ساخت واقعی و نتایج ابزار دقیق، تحکیم لایه‌ها و پخش فشار آب منفذی اضافی در مدل اعمال گردید. سپس با استفاده از اطلاعات سطح آب مخزن، آبیگری سد تا یکسال پس از آغاز آن که سطح آب در حداکثر مقدار خود قرار داشت، انجام شد.

خاک و h ارتفاع ستون خاک در بالای این نقطه می‌باشد. مطابق شکل ۵ اندازه‌گیری ضریب قوس‌زدگی در هسته در امتداد دو خط $L-L$ و $A-A$ در مقطع مرکزی عرضی سد و همچنین خط $B-B$ در راستای مقطع طولی سد انجام شده است.

سخت مجاور و در نتیجه شدت قوس‌زدگی تنش بیش‌تر خواهد بود.

$$\text{ضریب قوس‌زدگی} = \frac{\sigma_v}{\gamma h} \quad (1)$$

σ_v تنش کل قائم موجود در نقطه مورد نظر، γ وزن مخصوص

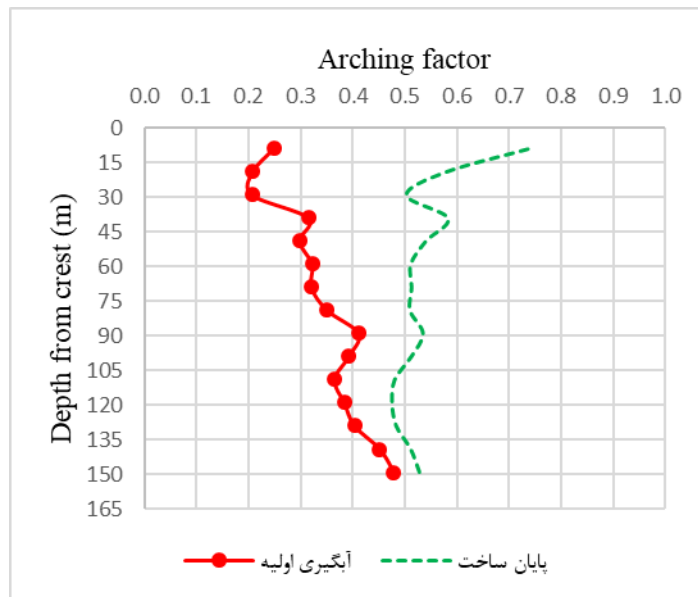


شکل ۵- خطوط مورد استفاده برای اندازه‌گیری ضریب قوس‌زدگی در مقطع عرضی میانی و طولی سد

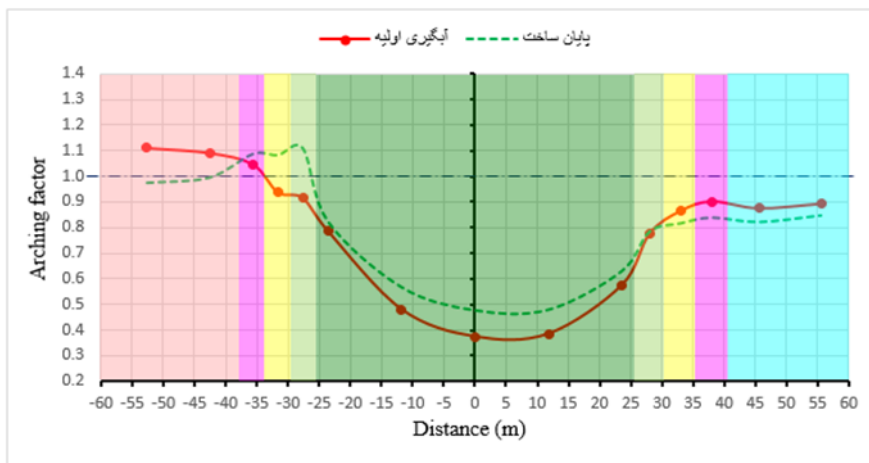
شدت قوس‌زدگی تنش هسته در شکل ۷ با روند نشست آن مطابقت دارد یعنی حداکثر میزان هر دو پارامتر در مرکز هسته نسبت به طرفین رخ می‌دهد. همچنین با توجه به این شکل در هسته‌های مایل، ضریب قوس‌زدگی در طرف بالادست هسته مقادیر بیش‌تری نسبت به سمت پایین‌دست دارد که نشان‌دهنده کم‌تر بودن شدت قوس‌زدگی در این جناح است و می‌تواند ناشی از شرایط هندسی مرزی متفاوت بین هسته و فیلترها در دو طرف باشد. در شکل ۸ به نظر می‌رسد روند قوس‌زدگی در هسته برعکس باشد اما در واقع به دلیل اختلاف زیاد سختی هسته و دره و نیز تندی شیب دره، قوس‌زدگی تنش در مجاورت تکیه‌گاه‌ها به صورت محلی تشدید شده است. همچنین مشاهده می‌شود که شدت انتقال تنش در تکیه‌گاه چپ بیش‌تر از سمت راست است که به دلیل شیب تندتر تکیه‌گاه چپ در این تراز است.

در ادامه مقادیر ضریب قوس‌زدگی در راستای خطوط مذکور، در دو مرحله اساسی پایان ساخت بدنه و یکسال پس از آبگیری اولیه در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است. بر اساس نمودار شکل ۶ بیش‌ترین میزان قوس‌زدگی درون هسته در پایان ساخت در ارتفاع ۲۰ تا ۴۰ متری نسبت به کف هسته با ضریب قوس‌زدگی ۴۸ درصد رخ می‌دهد. این مقدار با آبگیری سد پس از یکسال، تقریباً در همان ناحیه به ۳۶ درصد می‌رسد. همچنین اختلاف مقادیر ضریب قوس‌زدگی در نیمه بالایی ارتفاع سد بیش‌تر بوده که می‌تواند ناشی از زمان ساخت دیرتر لایه‌های فوقانی و در نتیجه وقوع نشست و تحکیم بیش‌تر در این لایه‌ها باشد.

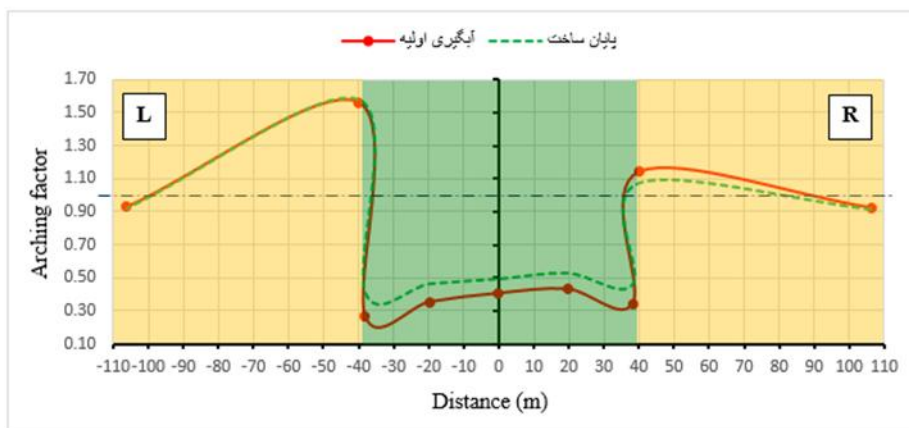
با توجه به شکل ۷ و ۸ در مقاطع افقی عرضی $A-A$ و طولی $B-B$ مقدار ضریب قوس‌زدگی پس از آبگیری تقریباً بطور یکنواخت و به میزان ۱۰٪ کاهش یافته است. روند تغییرات



شکل ۶- ضریب قوس‌زدگی هسته سد در امتداد خط (L-L) پس از آبگیری یکساله



شکل ۷- ضریب قوس‌زدگی در امتداد خط عرضی (A-A) در مراحل پایان ساخت و آبگیری اولیه یکساله



شکل ۸- ضریب قوس زدگی در امتداد خط طولی (B-B) در مراحل پایان ساخت و آبیگری اولیه یکساله

نزدیکی مرز بین دره و هسته تقریباً موازی با جهت شیب دره می‌باشد. نشست‌های تفاضلی مقاطع عرضی سد در ارتفاعات مختلف هرچند که مطلوب نیستند اما اجتناب ناپذیرند. جابجایی‌های هسته در عرض دره، به سمت مرکز دره، ناشی از این نشست‌های تفاضلی باعث ایجاد نواحی کششی در نزدیک تکیه‌گاه‌ها می‌شود. علاوه بر این، پدیده قوس زدگی در هسته به طور هم‌زمان سطح تنش‌ها را کاهش داده و به توسعه نواحی تنش کششی کمک می‌کند.

معیار اسکافیلد (۱۹۸۰)

در این معیار نواحی که در آن ترکیبی از نسبت تنش و شاخص روانی - بر پایه اصول مکانیک خاک حالت بحرانی - می‌تواند باعث شکست در خاک گردد، مشخص می‌شود. شکل ۱۰ (الف) سه ناحیه را نشان می‌دهد که بسته به ترکیبی از مقادیر شاخص روانی (رابطه ۲) و p' (میانگین تنش مؤثر محصورکننده) خاک در آن‌ها تسلیم شکل‌پذیر، گسیختگی یا شکست رخ می‌دهد. لازم به ذکر است معیار مذکور نسبت به معیار اول کارایی بیش‌تری دارد، زیرا هم شرایط تنش و هم محتوای آب (رطوبت) خاک را در نظر می‌گیرد؛ چراکه رفتار مکانیکی خاک‌های چسبنده ریزدانه تحت تاثیر میزان رطوبت آن‌ها می‌باشد.

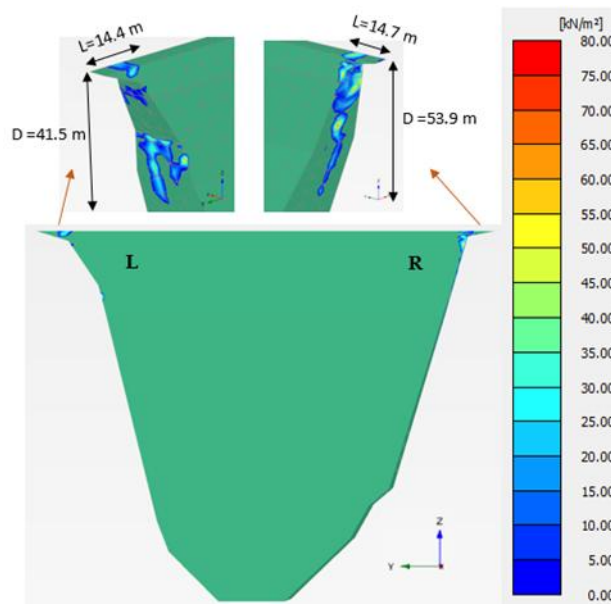
۲-۴- تعیین نواحی با سطح تنش کم و مستعد

شکست

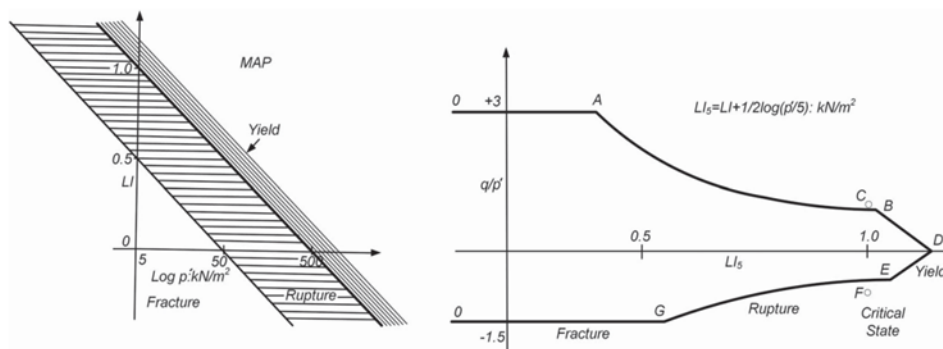
با توجه به اینکه هسته سدهای خاکی به ویژه در دره‌های تنگ، مستعد نشست‌های تفاضلی و به دنبال آن توزیع مجدد تنش‌ها و کرنش‌ها و بروز پدیده انتقال تنش و قوس زدگی هستند، احتمال ایجاد ترک و سپس فرسایش داخلی پس از آبیگری سد در آن‌ها وجود دارد. در این بخش به بررسی وجود نواحی کم‌تنش یا با سطح تنش پایین و در نتیجه مستعد شکست در هسته، بر اساس دو معیار تنش‌های کششی و معیار اسکافیلد (بر پایه اصول مکانیک خاک حالت بحرانی) در مرحله پایان ساخت پرداخته شده است. این ارزیابی با استفاده از تحلیل تنش مؤثر سه‌بعدی صورت گرفته است.

نواحی کششی

در این معیار نواحی که در آن تنش مؤثر اصلی حداقل تحت شرایط کشش باشد - صرف نظر از اثرات رطوبت هسته - مد نظر قرار دارند. حداکثر ابعاد این نواحی در راستای قائم (D) و افق (L)، با توجه به معیار $\sigma_3' > 0$ (تنش‌های کششی دارای علامت مثبت) که در هسته و در پایان ساخت گسترش یافته‌اند، در شکل ۹ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که نواحی دارای تنش کششی در بخش‌های بالایی هسته و نزدیک به تکیه‌گاه‌ها توسعه یافته‌اند. راستای این تنش‌ها در



شکل ۹- کانتورهای تنش موثر اصلی حداقل و گسترش نواحی تنش کششی در هسته پس از پایان ساخت. (دید از بالادست سد)



شکل ۱۰- نمودارهای تعیین حالات مختلف تسلیم، گسیختگی و شکست: (الف) نمودار LI در مقابل $\log p'$ و (ب) نمودار معیار شکست برای یک مقدار p' ثابت [۱۷]

مرزهای مربوط به نواحی شکست، گسیختگی و شکل‌پذیری به ترتیب با $LI_5 < 0.5$ ، $0.5 < LI_5 < 1.0$ و $LI_5 > 1$ نشان داده شده‌اند. حد پایداری در این معیار به $q/p' < 3$ در فشار و $q/p' > -1.5$ در کشش محدود شده است. کاربرد گام به گام معیار مذکور برای تشخیص نواحی شکست به صورت یک فلوجارت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل H_{eq} ارتفاع معادل (حداقل ارتفاع موثر روباره مورد نیاز برای جلوگیری از شکست در هر ارتفاع مشخص از هسته

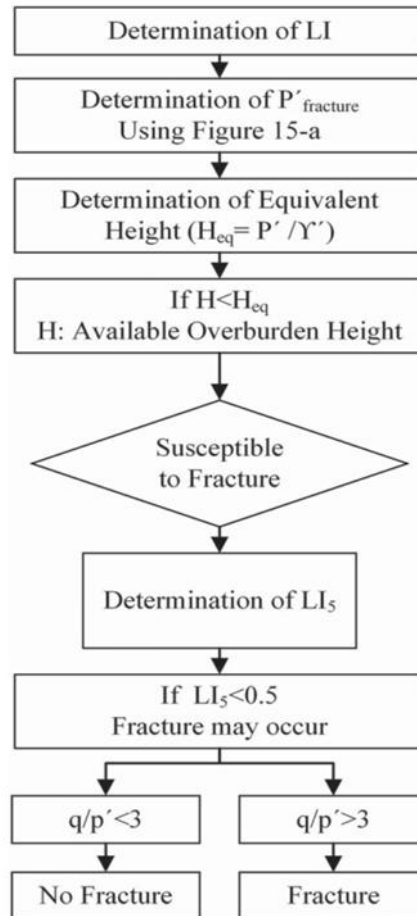
$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \quad (2)$$

که ω میزان محتوای آب (رطوبت) می‌باشد. شکل ۱۰ (ب) همان سه ناحیه را در صفحه q/p' در مقابل LI_5 نشان می‌دهد، که در آن:

q : انحراف تنش و $LI_5 = LI$ تعریف طبق رابطه ۳ [۱۷].

$$LI_5 = LI + 0.5 \log(p'/5) \quad (3)$$

سد) می‌باشد. این ارتفاع بر اساس مقدار p' به دست آمده از است [۱۷].
شکل ۱۰(الف) تعیین شده و H نیز ارتفاع روباره موجود



شکل ۱۱- فلوچارت تشخیص نواحی شکست در خاک بر اساس مکانیک خاک حالت بحرانی و معیار اسکافیلد [۱۷]

شکل ۱۰(ب) شرط $q/p' < 1.5$ نیز برای تعیین نقاط مستعد شکست مدل در نظر گرفته شد. با توجه به روند گام به گام شکل ۱۱ در ادامه، محاسبه پارامترهای لازم برای بررسی پتانسیل شکست در هسته انجام و در جدول ۲ نمایش داده شده است.

این معیار نشان می‌دهد تحت شرایط تنش مربوط به بارگذاری فشاری سه محوری، مناطقی از خاک با نسبت تنش $q/p' > 3$ بسته به مقادیر LI_5 خود ممکن است دچار شکستگی شوند. با یک فرض تقریبی قابل قبول، می‌توان شرایط تنش در هسته سد را نزدیک به بارگذاری فشاری سه محوری فرض کرد؛ بنابراین می‌توان از این معیار استفاده کرد. البته با توجه به

جدول ۲- محاسبه پارامترهای مورد نیاز برای تعیین نواحی با پتانسیل شکست

| LI5 | Heq (m) | γ' (kN/m ³) | $p'_{fracture}$ (kPa) | LI | پارامتر |
|------|---------|--------------------------------|-----------------------|-------|---------|
| ۰/۴۵ | ۳۵/۷ | ۱۳/۶ | ۵۰۰ | -۰/۵۵ | مقدار |

در نرم‌افزار وجود ندارد، مقادیر آن برای نقاط گرهی در محدوده مورد نظر بررسی و مشابه معیار قبل، حداکثر عمق (D) و گسترش افقی (L) نواحی حاوی نقاط مستعد شکست نسبت به گوشه‌های تکیه‌گاهی تعیین می‌گردد. نتایج هر دو معیار به طور خلاصه در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به شروط $H < H_{eq}$ و $Ll_5 < 0.5$ ، باید وضعیت نسبت تنش q/p' در $35/7$ متری بخش بالایی هسته برای تعیین وضعیت پتانسیل شکست بررسی شود (۱ متر از روباره، مصالح سنگریز تاج است که از ارتفاع معادل بدست آمده کسر می‌شود). از آنجا که امکان نمایش کانتوری مستقیم این نسبت

جدول ۳- حداکثر ابعاد گسترش نواحی کم تنش و مستعد شکست بر اساس دو معیار در پایان ساخت (بر حسب متر)

| $\sigma'_3 > 0$ | | | | $q/p' > 3$ | | | |
|-----------------|-----------|----------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|
| D (Left) | D (Right) | L (Left) | L (Right) | D (Left) | D (Right) | L (Left) | L (Right) |
| ۴۱/۵ | ۵۳/۹ | ۱۴/۴ | ۱۴/۷ | ۳۵/۷ | ۳۵/۷ | ۲۶/۱ | ۱۹ |

تحقیق و سایر مطالعات، موقعیت محدوده حداکثر شدت قوس‌زدگی با حداکثر نشست هسته مرتبط بوده و نزدیک به آن شکل می‌گیرد. ضمناً با وجود هسته مایل، میزان قوس‌زدگی تنش در سمت پایین‌دست بیش‌تر از طرف مقابل است. در مقطع طولی نیز با نزدیک شدن به تکیه‌گاه‌ها، شدت قوس‌زدگی تنش بطور موضعی افزایش می‌یابد.

• پس از آنگیزی یکساله سد میزان قوس‌زدگی در هسته افزایش می‌یابد. این تغییر می‌تواند هم با افزایش نشست تفاضلی هسته در اثر گذشت زمان و وقوع تحکیم و از طرفی با کاهش سطح تنش کل قائم به دلیل اشباع پوسته بالادست سد و در نتیجه اثر نیروی شناوری بر کاهش وزن مرتبط باشد. این تغییر در مقاطع افقی تقریباً یکنواخت بوده و حدود ۱۰٪ با مرحله پایان ساخت اختلاف دارد. اما در راستای قائم و در نیمه بالایی هسته، با نزدیک شدن به تاج، اختلاف میزان قوس‌زدگی بین این دو مرحله بیش‌تر می‌گردد. بر اساس دو معیار مورد استفاده در این تحقیق، با بروز تنش‌های کششی و ایجاد نواحی با سطح تنش کم، احتمال ترک‌خوردگی در ارتفاعات بالایی هسته سد و نزدیک به تکیه‌گاه‌ها وجود دارد. بنابراین در صورتی که ارتفاع آب در مخزن سد به حداکثر مقدار خود برسد، ممکن است بخشی از این نواحی به زیر آب

همان‌طور که نتایج آنالیزها نشان می‌دهد، هسته سد در ارتفاعات بالایی و در مجاورت تکیه‌گاه‌ها بر اساس هر دو معیار از نظر پایداری در وضعیت خطرناک و دارای پتانسیل شکست هستند. در تحقیق سه بعدی مشابهی بر روی نواحی کم تنش و مستعد ترک‌خوردگی در هسته سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان، سروش و پوراکبر (۲۰۲۲) مشاهده کردند نواحی با سطح تنش پایین و یا دارای تنش کششی، در ارتفاعات بالایی هسته و در مجاورت تکیه‌گاه‌ها توسعه یافته‌اند که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی داشته و نشان‌دهنده پتانسیل بالای شکست هسته در این نواحی می‌باشد [۱۶].

۳- نتیجه‌گیری

موارد زیر به عنوان نتایج مهم این مطالعه بیان می‌شود:

- تنگ بودن دره در ساخت سدهای خاکی، تاثیر مستقیم بر الگوی توزیع تنش و شدت قوس‌زدگی در هسته داشته و لذا برای دستیابی به نتایج صحیح، مدل‌سازی سه بعدی ضروری می‌باشد. در این شرایط، مدل دو بعدی به دلیل حذف کامل اثر قوس‌زدگی طولی از دقت کافی برخوردار نخواهد بود.
- بررسی ضریب قوس‌زدگی در مقطع عرضی میانی سد در هسته نشان می‌دهد حداکثر شدت قوس‌زدگی در ارتفاع ۲۰ تا ۴۰ متری سد و در مرکز هسته رخ داده و با حرکت به طرفین، از شدت آن کاسته می‌شود. با توجه به نتایج این

سیاس گزاری

نویسندگان از حمایت های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران در تامین داده های مورد نیاز در طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان تشکر و قدردانی می نمایند.

رفته و هسته در معرض نشت قرار گیرد. متعاقبا اگر ترکها گسترش یافته و فیلتر پایین دست نتواند نقش خود را به درستی ایفا کند، احتمال بروز فرسایش داخلی زیاد خواهد بود.

۴- فهرست نمادها

| نماد | واحد | شرح |
|----------|-------|----------------------------------|
| σ | kPa | تنش |
| p' | kPa | میانگین تنش موثر محصورکننده |
| q | kPa | دومین نامتغیر تانسور تنش انحرافی |
| LI | | شاخص روانی |
| ω | | محتوای آب |

۵- منابع ها

- [1] B. Lofquist, "Discussion of cracking in dams," in *Proc. of the 5th ICOLD Congr.*, Paris, France, Jun. 1955, pp. 21-22.
- [2] E. Nonveiller and P. Anagnosti, "Stresses and deformations in cores of rockfill dams," in *Proc. of the 5th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, Paris, France, Jul. 1961, pp. 673-680.
- [3] R. W. Clough and R. J. Woodward III, "Analysis of embankment stresses and deformations," *J. of the Soil Mechanics and Found. Division*, vol. 93, no. 4, pp. 529-549, Jul. 1967.
- [4] D. M. Wood, B. Kjaernsli, and K. Höeg, "Thoughts concerning the unusual behaviour of Hyttejuvet Dam," in *Proc. of the 12th Int. Congr. on Large Dams*, Mexico City, Mexico, 1976, pp. 391-414.
- [5] J. L. Sherard, "Hydraulic fracturing in embankment dams," *J. of Geotechnical Engineering*, vol. 112, no. 10, pp. 905-927, Oct. 1986.
- [۶] میرقاسمی، علی اصغر و توللی، عباس، "تحلیل سه بعدی انتقال تنش در هسته رسی سدهای خاکی واقع در دره های تنگ"، چهارمین کنفرانس سدسازی/ایران، تهران، ایران، دی ۱۳۷۹، صفحات ۹۵۴-۹۶۰.
- [۷] حشمتی، علی اکبر و یوسفی، مجتبی، "تحلیل عددی سد دریک و تاثیر پارامترهای مدل موهر-کلمب بر تنش های نرمال هسته رسی آن"، *مجله علمی دانشجویان دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی شریف*، دوره ۳۸، شماره ۲، صفحات ۶۱-۶۸، ۱۳۸۸.
- [8] M. Derakhshandi, M. Honarmand, and A. H. Sadeghpour, "A Comparison of Three and Two-Dimensional Analyses of Rock-fill Dams in Narrow Valleys (A Case Study: The Vanyar Dam)," in *Proc. of the 7th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Eng.*, Chicago, USA, May 2013.
- [9] M. Talebi, F. Vahedifard, and C. L. Meehan, "Effect of geomechanical and geometrical factors on soil arching in zoned embankment dams," in *Geo-Congr. 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, San Diego, USA, Mar. 2013, pp. 1056-1065.
- [10] M. Moradi, V. Shirgir, and A. Ghanbari, "An approximate equation for the estimation of arching due to the shape and hardness of valley in earth dams," *Electronic J. of Geotechnical Eng.*, vol. 19, pp. 6343-52, 2014.
- [11] Z. Liu and C. Wang, "The analysis of stress, deformation and arch effect of the Lianghekou earth-rockfill dam," *Indian Geotechnical J.*, vol. 46, pp. 77-84, Mar. 2016.
- [12] D. Djarwadi, K. B. Suryolelono, B. Suhendro, and H.C. Hardiyatmo, "Effect of clay core configuration of the rock-fill dams against hydraulic fracturing," *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 492-501, Jan 2017.

- [13] M. Esmailzadeh, M. Talkhablou, and K. Ganjalipour, "Arching parametric study on earth dams by numerical modeling: a case study on darian dam," *Indian Geotechnical J.*, vol. 48, pp. 728-745, Dec. 2018.
- [14] B. Beiranvand and M. Komasi, "Study of the arching ratio in earth dam by comparing the results of monitoring with numerical analysis (Case Study: Marvak Dam)," *Iranian J. of Science and Technology, Transactions of Civil Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 1183-1195, Jun. 2021.
- [15] S. Topçu and E. Seyrek, "The Effect of Deformation Parameters of Clay-Core on Arching Behaviour of Rockfill Dam," *J. of Civil Engineering and Urbanism*, vol. 13, no. 4, pp. 42-49, Dec. 2023.
- [16] A. Soroush and M. Pourakbar, "Evaluation of Low Stress and Cracking Zones in the Core of a High Rock-fill Dam in a Relatively Narrow Canyon Using 3D Numerical Modeling," *Int. J. of Geomechanics*, vol. 22, no. 3, p. 04021299, Mar. 2022.
- [17] A. N. Schofield, "Cambridge geotechnical centrifuge operations," *Geotechnique*, vol. 30, no. 3, pp. 227-268, Sep. 1980.



Three-dimensional Modeling of Stress Arching and Determination of Zones with Fracture Potential in Rock-fill Dams in Narrow Valleys (Case Study: Lorestan Roodbar Dam)

A.H. AMINI ¹; A.R. KARGAR ²; M.H. KHOSRAVI ³; H. BEHZADINEZHAD ⁴

1- M.Sc. Student, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran. Iran.

2- Assistant Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran. Iran.

3- Associate Professor, Department of Mining Engineering, College of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

4- Senior Rock Mechanics Expert, Iran Water and Power Resources Development Company, Iran.

Received: 04. February. 2025 Accepted: 17. March. 2025

(*Corresponding author: ar.kargar@ut.ac.ir)

Keywords

Embankment dam with clay core
Arching
Numerical modelling
PLAXIS 3D

Final English Abstract

The existing statistics on the failure of embankment dams worldwide emphasize the importance of regular monitoring of their behavior to assess the safety and stability of their various zones, both during construction and in operation. The occurrence of arching and a reduction in stress levels within the core of embankment dams is one of the factors that can lead to the initiation and development of cracks, posing a risk to the dam's stability. In analyzing the state of stress distribution in embankment dams located in narrow valleys due to the three-dimensional effect (longitudinal and transverse) of stress arching within the core, two-dimensional models cannot yield accurate results, and this work is only possible with three-dimensional modeling. This research was conducted with the aim of determining the stress arching pattern within the clay core of embankment dams located in narrow valleys using a three-dimensional model and determining the zones prone to fracture according to the existing stress distribution, specifically, the data of the Lorestan Roodbar Dam was used and the mentioned objectives were determined precisely for this dam.

In this study, at first the three-dimensional modelling of the Lorestan Roodbar rock-fill dam, located in a narrow valley, was carried out using PLAXIS 3D V.22 software. Then, the intensity of arching phenomenon within the core was investigated at the end of construction and initial impounding stages. The maximum amount of arching was observed to occur at one fifth of the dam's height above the core base at the end of construction, and the intensity of arching increased after one year of dam impounding. In addition, the condition of the core in terms of tensile zones and, consequently, the potential for crack development and fracture at the end of construction was investigated. The dimensions of the expansion of these zones were determined, and indicated the presence of tensile zones in the upper elevations, around fifty meters from the crest, and near the abutments.
