



فصلنامه زمین‌ساخت
بهار ۱۳۹۸، سال سوم، شماره ۹

بررسی مکانیزم شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد تاج امیر نورآباد)

مهدی کماسی^۱، بهرنک بیرانوند^{۲*}

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد.
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره).

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹



تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵

چکیده

وقوع شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین مسائل ژئوتکنیکی در هسته رسی سدهای خاکی است. افزایش بیش از حد فشار آب حفره‌ای در اولین دوره آبگیری و در شرایط تراوش پایدار موجب کاهش شدید تنش موثر و در نتیجه کاهش مقاومت برشی مصالح هسته سدهای خاکی می‌شود که این امر می‌تواند باعث غلبه فشار آب بر تنش موثر شده و زمینه ساز ترک هیدرولیکی گردد. در این پژوهش به بررسی شکست هیدرولیکی سد تاج امیر در شرایط بارگذاری استاتیکی در مرحله پایان ساخت و تراوش پایدار توسط نرم‌افزار پلکسیس با مدل رفتاری موهر کولمب پرداخته شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقادیر فشار آب حفره‌ای (R_p) و تنش-کرنش در حد قابل قبول بوده است و مشکلی از نظر پایداری برای سد ایجاد نمی‌شود. همچنین مقدار قوس زدگی بحرانی برابر $0.53(47\%)$ که در یک سوم ارتفاع هسته از کف فونداسیون رخ داده، در حد متعارف است و گسیختگی هیدرولیکی حتی با وجود به وقوع پیوستن پدیده قوس زدگی در حد بحرانی در هسته سد، اتفاق نخواهد افتاد.

واژه‌های کلیدی: سد تاج امیر، شکست هیدرولیکی، فشار آب حفره‌ای، تنش موثر، پلکسیس.

۱. مقدمه

اندازه گیری فشار آب حفره‌ای در کنترل پایداری پی و جسم سازه‌های خاکی اهمیت ویژه‌ای دارد. شناخت تنش اولیه و خصوصیات مواد، نقش مهمی در شناخت رفتار و مدل‌سازی واقعی سدهای خاکی ایفا می‌کند. در واقع اهمیت بررسی تنش‌های داخلی هسته سدهای خاکی به این علت است که وضعیت نشست‌ها و نیز آسیب پذیری هسته یا پایداری آن تابعی از توزیع همین تنش‌ها است. تنش‌های داخلی قائم و افقی در هسته سد باید از فشار هیدرواستاتیکی بیشتر باشد. در مواقعی که تنش‌های قائم و به تبع آن تنش‌های افقی کم باشد خطر شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد. مقاومت اصطکاکی بین هسته و پوسته موجب تعلیق لایه‌ها و قوس زدگی^۱ می‌شود. از آن جا که پدیده قوس زدگی یکی از عوامل بسیار مهم در ناپایداری و تخریب سدهای خاکی است و عدم توجه به پدیده مذکور، خسارات جبران‌ناپذیری به سد خاکی و پایداری آن وارد می‌نماید بنابراین پیش‌بینی وضعیت قوس زدگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور کلی قسمت‌های مختلف سد به علت ویژگی‌های متفاوت، نشست‌های مختلفی دارند. همچنین انتقال تنش از توده‌ای با نشست بیشتر به توده مقاوم کناری خود با نشست کمتر، از طریق چسبندگی و مقاومت برشی انجام می‌شود و به عبارت دیگر توده نرم‌تر به توده سخت‌تر مجاور خود تکیه می‌کند. معمولاً تحلیل برگشتی به عنوان روشی که قابلیت کنترل پارامترهای سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن داشته باشد، بیان می‌شود. این روش به‌طور پیوسته در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. در تحلیل برگشتی ابتدا مقادیر جابجایی‌ها، کرنش و در صورت لزوم تنش توسط ابزار مورد نظر محاسبه شده و سپس در یک مدل مکانیکی فرضی قرار داده می‌شود؛ در نهایت پارامترهای تنش اولیه، خواص مکانیکی و شرایط مرزی تعیین می‌شود. شکست هیدرولیکی فرایند شروع یا توسعه یک جدایش فیزیکی کوچک، مانند، ترک است. در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای در اولین دوره آبیگری، افزایش فشار آب مخزن موجب می‌شود که حالت تنش در وجه بالادست هسته نفوذناپذیر با سازوکار برشی یا کششی به پوش گسیختگی نزدیک شود. در نتیجه، در بعضی نواحی از وجه بالادست هسته ممکن است ترک‌هایی ایجاد شود. اینگونه ترک‌ها را ترک‌های هیدرولیکی و فشار آب مورد نیاز برای ایجاد آن‌ها را فشار شکست هیدرولیکی می‌گویند (قنبری، ۱۳۹۳). (Lofquist, 1955) اولین کسی است

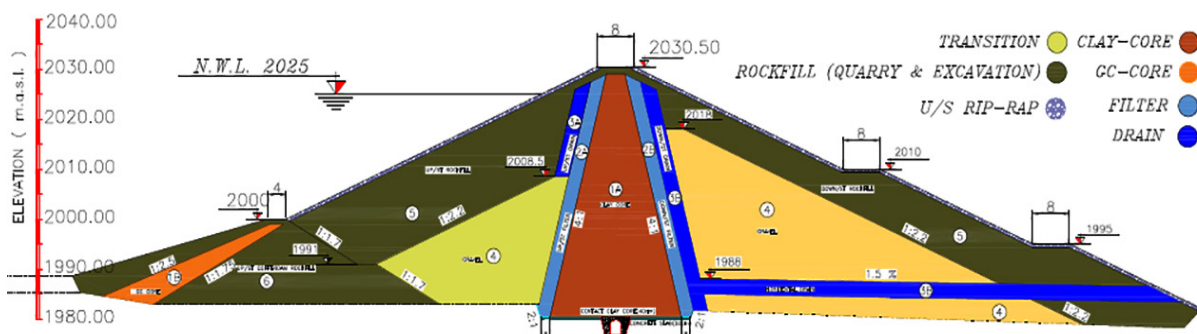
که مفهوم قوس زدگی در هسته سدهای خاکی را مطرح کرد و امکان وقوع ترک افقی را در اثر قوس زدگی بررسی نمود. (Sherard, 1986) با در نظر گرفتن زاویه اتساع به صورت تابعی از زاویه اصطکاک و فرض مدل رفتاری موهر کلمب، تحلیل‌هایی جهت تعیین نیروی لازم جهت وقوع شکست هیدرولیکی انجام داد. او معتقد است که شکست هیدرولیکی در هسته زمانی اتفاق می‌افتد که تنش اصلی کوچکتر (σ_3) در یک ارتفاع خاص کمتر از فشار آب در هسته در همان ارتفاع باشد. ماکسیموویک در پژوهشی مسأله قوس زدگی هسته سدهای خاکی را به روش اجزاء محدود بررسی نمود. وی در محاسبات خود رفتار مصالح را الاستیک و ساخت سد را یک مرحله‌ای فرض کرد. فرض ساخت یکباره سد و در نظر نگرفتن رفتار پلاستیک مصالح سبب شد که میزان قوس زدگی بیشتر از مقدار واقعی برآورد گردد (Maksimovic, 1973). همچنین (Kulhawy, 1976) پدیده قوس زدگی و شکست هیدرولیکی را در سدهای با هسته رسی قائم مورد مطالعه قرار داد. ایشان به این نتیجه رسید که پدیده انتقال تنش در سدهای خاکی غیرهمگن، در اثر تغییر سختی در ناحیه‌های مجاور به وقوع می‌پیوندد. (Wang et al., 2007)، (Soga et al., 2005)، (Sato and Yamaguchi 2009)، (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹)، (طبری و هاشم‌پور، ۱۳۹۶)، (منسوجیان و همکاران، ۱۳۹۶) و (مولوی و پرویشی، ۱۳۹۶) در پژوهش‌هایی جداگانه به بررسی شکست هیدرولیکی سدهای خاکی پرداختند. در مطالعه‌ای دیگر (خامسی و میرقاسمی، ۱۳۸۹) با بررسی هسته رسی سد گلابر، وقوع شکست هیدرولیکی را غیرمحمول دانستند. همچنین نتایج بررسی‌های (سالاری و همکاران، ۱۳۹۶) در مورد شکست هیدرولیکی در هسته رسی مایل سد سنگریزه‌ای در دره تنگ نشان داد که پدیده شکست هیدرولیکی می‌تواند از عوامل اصلی شروع فرسایش داخلی در هسته رسی سد بیدواز باشد. (عساکره، ۱۳۹۶) پارامترهای موثر در پدیده قوس زدگی در سد خاکی غیرهمگن را با مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Plaxis بررسی و بیان نمود که عرض هسته، ضخامت لایه فیلتر و تراکم پذیری پی به ترتیب بیشترین تأثیر را در قوس زدگی سدهای خاکی دارند. در این پژوهش با تحلیل عددی انجام شده توسط نرم‌افزار Plaxis به بررسی تغییرات آب حفره‌ای، تنش - کرنش و قوس زدگی سد خاکی تاج امیر نورآباد و امکان یا عدم امکان شکست هیدرولیکی با استفاده از تحلیل عددی پرداخته شده است.



۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مشخصات سد تاج امیر

ساختگاه سد تاج امیر در ۲۵ کیلومتری شهرستان نهاوند و بر روی رودخانه کی سله واقع شده است. این رودخانه یک رودخانه دائمی بوده که از کوه‌های گرین و مهاب سرچشمه گرفته و اراضی پایین دست را آبیاری می‌نماید. مازاد آب پس از پیوستن با آب چشمه‌های پایین دست به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندد. سد تاج امیر از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی می‌باشد. هدف از احداث این سد جمع‌آوری رواناب سطحی به منظور آبیاری اراضی پایین دست می‌باشد. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۴۵ متر، طول تاج ۲۲۶ متر، سنگ بستر ساختگاه سد عمدتاً از تناوب سنگ آهک و رادیولاریتی



شکل ۱. مقطع تیپ حداکثر بدنه سد تاج امیر (مهندسین مشاور آیفن)

مجموع می‌توان ضخامت متوسطی در حدود ۴ متر برای آبرفت بستر رودخانه در نظر گرفت. بیشترین ضخامت مواد پوششی در تکیه‌گاه راست با ضخامت ۹ متر مشاهده شده که از نوع آبخست‌های دامنه‌ای می‌باشد. در شکل ۱ مقطع تیپ حداکثر بدنه سد تاج امیر نشان داده شده است (مهندسین مشاور آیفن).

۲-۲. هندسه و مدل رفتاری مصالح بدنه سد تاج امیر

شکل ۲ مقطع عرضی بحرانی سد و شبکه المان محدود به کار رفته را نشان می‌دهد. کلیه قسمت‌ها بدنه شامل پوسته سنگریزه‌ای، پوسته مخلوط، پوسته فرازبند، هسته رسی، فیلتر بالادست و پایین دست، زهکش قائم، ناحیه انتقالی، زهکش افقی، پی سنگی در عمق کمتر از ۴۰ متر (نفوذپذیری بالا)، پی سنگی در عمق بیش از ۴۰ متر (نفوذپذیری پایین)، ناحیه تزریق نفوذپذیری و ناحیه تزریق تحکیمی به طور کامل مدل‌سازی شده است. تحلیل استاتیکی سد تاج امیر به روش المان محدود^۱ و با فرض کرنش

دائمی بوده که از کوه‌های گرین و مهاب سرچشمه گرفته و اراضی پایین دست را آبیاری می‌نماید. مازاد آب پس از پیوستن با آب چشمه‌های پایین دست به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندد. سد تاج امیر از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی می‌باشد. هدف از احداث این سد جمع‌آوری رواناب سطحی به منظور آبیاری اراضی پایین دست می‌باشد. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۴۵ متر، طول تاج ۲۲۶ متر، سنگ بستر ساختگاه سد عمدتاً از تناوب سنگ آهک و رادیولاریتی تشکیل شده که بر روی آنها سنگ‌های آتشفشانی از جنس آندزیت قرار گرفته است. مواد روبار محل سد را خاک‌های برجا، آبخست‌های دامنه‌ای و آبرفت‌های بستر رودخانه تشکیل داده است. آبرفت‌های بستر رودخانه در محل سد از گسترش چندانی برخوردار نیستند. بیشترین عمق این مواد مربوط به بخش‌های میانی بستر بوده که به سمت تکیه‌گاه‌ها به تدریج از ضخامت آن کاسته می‌شود. در

1. Finite Element Method

زاویه اصطکاک داخلی، C : چسبندگی و ϕ : زاویه اتساع علاوه بر این پارامترهای دیگری نیز جهت انجام تحلیل‌ها مورد نیاز می‌باشند که عبارتند از:

γ_{wet} : وزن مخصوص مرطوب (در قسمت‌هایی که خاک اشباع نمی‌باشد)

γ_{sat} : وزن مخصوص اشباع

K_x : ضریب نفوذپذیری در جهت x

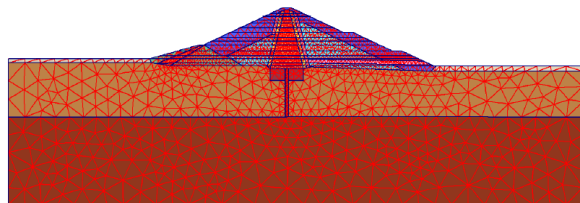
K_y : ضریب نفوذپذیری در جهت y

دو پارامتر آخر برای انجام تحلیل‌های تراوش در دوره آبیگری و همچنین تحلیل‌های مربوط به تحکیم مورد نیاز می‌باشد. شایان ذکر است که تحلیل تحکیمی در نرم افزار Plaxis با استفاده از تئوری بایوت (Biot) و قانون دارسی برای جریان سیال انجام می‌گیرد. در مورد هسته، فرض شده است که نفوذپذیری با تغییر تخلخل (e) تغییر می‌کند، به این منظور از رابطه (۱) استفاده شده است (رابطه تیلور).

$$(1) \frac{\Delta e \Delta e}{C_k C_k} = \log \frac{k}{K_0} \log \frac{k}{K_0}$$

در این رابطه، k : نفوذپذیری در تخلیه اولیه، K_0 : نفوذپذیری در تخلخل، $\Delta e \Delta e$: تغییر تخلخل نسبت به تخلیه اولیه و C_k : ضریب رابطه تیلور^۲ می‌باشد. همچنین فرض شده است که رفتار مصالح هسته بر خلاف سایر قسمت‌ها، زهکشی نشده باشد. در جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در تحلیل‌ها برای هر کدام از بخش‌های بدنه نشان داده شده است.

مسطح^۱ برای مقطع عرضی حداکثر سد انجام گرفته است. در این تحلیل ساخت لایه به لایه خاکریز سد و آبیگری مرحله به مرحله مخزن شبیه سازی گردیده است. تحلیل‌ها به روش تنش مؤثر و با استفاده از نرم افزار المان محدود v8.5 Plaxis انجام گردیده است. جهت ایجاد مدل المان محدود از المان‌های مثلثی با کرنش خطی که دارای ۱۵ گره می‌باشند، استفاده شده است. همچنین از شبکه اجزا محدود با ۲۷۴۹۷ گره و ۳۴۰۲ المان در مدل سازی استفاده شده است.



شکل ۲. مش بندی مدل سد تاج امیر

رفتار مصالح بدنه سد و پی در تحلیل‌های انجام گرفته، مدل الاستیک-پلاستیک کامل موهر کولب در نظر گرفته شده است. مدل موهر کولب به طور کلی دارای ۵ پارامتر می‌باشد که عمدتاً برای مهندسین ژئوتکنیک شناخته شده است و این پارامترها را می‌توان از آزمایش‌های رایج به دست آورد. این پارامترها عبارتند از:

E : مدول یانگ (مدول الاستیسیته)، U : نسبت پواسون، ϕ :

1. Plain Strain

2. Taylor

جدول ۱. پارامترهای رفتاری مورد استفاده در تحلیل‌های استاتیکی تنش و تغییر شکل بدنه سد تاج امیر

E kPa	γ_{wet} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c, c' (kPa)	ϕ, ϕ' ($^\circ$)	نوع مصالح	مدل	مصالح
۵۲۰۰	۱۹/۶	۱۹/۹	۱۰	۲۵	زهکشی نشده	موهر کلمب	هسته
۳۰۰۰۰	۱۹	۲۱	۰	۳۵	زهکشی شده	موهر کلمب	فیلتر بالادست
۳۰۰۰۰	۱۹	۲۱	۰	۳۵	زهکشی شده	موهر کلمب	فیلتر پایین دست
۳۵۰۰۰	۱۹/۶	۲۱/۹	۰	۳۶	زهکشی شده	موهر کلمب	پوسته مخلوط
۴۰۰۰۰	۲۰/۵	۲۱/۹	۰	۳۸	زهکشی شده	موهر کلمب	پوسته فراز بند
۵۰۰۰۰	۲۰/۴	۲۱/۹	۰	۴۰	زهکشی شده	موهر کلمب	پوسته سنگریز
۴۵۰۰۰	۲۱	۲۱	۲۰	۳۰	زهکشی شده	موهر کلمب	پی آبرفتی
۱×۱۰ ^۶	۲۶	۲۶	۵۰۰	۳۰	زهکشی شده	موهر کلمب	پی سنگی
۳۵۰۰۰	۱۹	۱۹	۰	۳۵	زهکشی شده	موهر کلمب	زهکش قائم
۳۵۰۰۰	۱۹	۱۹	۰	۳۵	زهکشی شده	موهر کلمب	زهکش افقی
۳/۵×۱۰ ^۶	۲۶	۲۶	۵۵۰	۳۰	زهکشی شده	موهر کلمب	پی تزریق شده

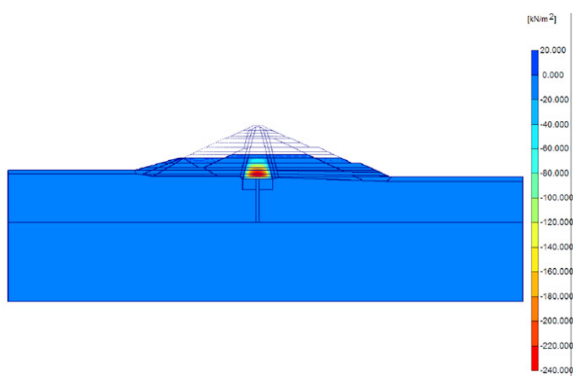


آبگیری در آخرین مرحله به ۰/۱ متر در روز رسیده است). مدت زمان آبگیری تا رقوم نرمال، ۲۵۰ روز در نظر گرفته شده است. پس از آبگیری تحلیل‌ها ادامه داده شده است تا فشارهای آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده ناشی از مراحل خاکریزی مستهلک شده و فشار آب منفذی تقریباً به حالت پایدار معادل تراوش پایدار از رقوم نرمال برسد و بدین ترتیب نشست‌های تحکیمی بعد از آبگیری تعیین گردیده است. براساس نتایج مدل‌سازی نرم‌افزار پلکسیس، پس از پایان ساخت و در حالت تراوش پایدار با فرض ثابت بودن تراز آب حدود دو سال زمان لازم می‌باشد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج تحلیل‌های آب حفره‌ای، تنش و پدیده قوس‌زدگی در مرحله ساخت سد

در پایان ساخت سد خاکی، به دلیل تغییر حجم مصالح با نفوذپذیری کم (هسته رسی) و عدم امکان زهکشی کامل در کوتاه مدت، فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه مراحل ساخت به همراه زمان تقریبی ساخت مدل شده‌اند، فشار آب حفره‌ای ایجاد شده از زمان اجرا نیز اندکی مستهلک می‌گردد. در صورتی که فشار آب حفره‌ای بیش از حد افزایش یابد، با کاهش تنش مؤثر ممکن است گسیختگی برشی ایجاد شود. نتایج تحلیل‌ها به صورت توزیع فشارهای آب حفره‌ای در هسته در نیمه و پایان ساخت در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که حداکثر فشار آب حفره‌ای در پایان ساخت سد در هسته سد برابر ۲۶۷ کیلو پاسکال می‌باشد. درصد اشباع مصالح هسته در طول ساخت سد به تدریج افزایش می‌یابد و بعد از مدتی به دلیل اثرات تحکیمی و خروج آب اضافی کاهش خواهد یافت.



شکل ۳. فشار آب حفره‌ای در نیمه ساخت سد تاج امیر

1. End of Construction
2. Steady State

۳-۲. بارگذاری و مدل‌سازی سد تاج امیر

بررسی فشار آب حفره‌ای در سد تاج امیر در دو مرحله دوران ساخت^۱ و تراوش پایدار^۲ مخزن سد انجام گردیده است.

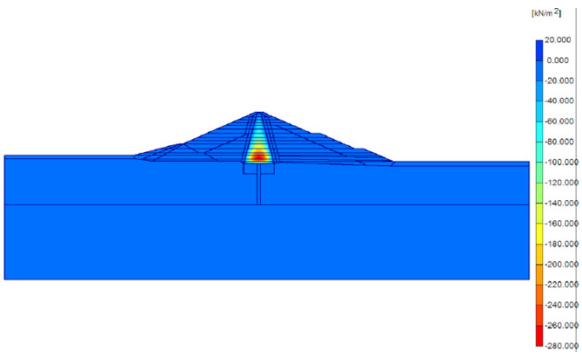
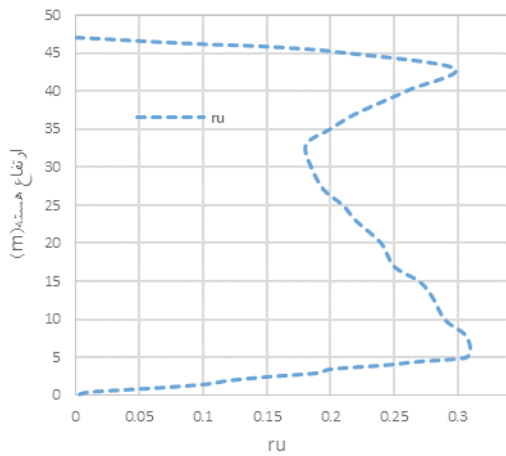
۳-۱. مدل‌سازی در مرحله ساخت سد

برای در نظر گرفتن مراحل ساخت بدنه سد، ساخت سد در ۲۰ مرحله (لایه) مدل‌سازی شده است. تعداد لایه‌های استفاده شده برای مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی یکی از ملاحظات است که در طراحی به عنوان پارامتری تأثیرگذار مورد توجه واقع می‌شود. اولین بار (Brown and Goodman (1963) و سپس Clough and Woodward (1967) اثر ساخت لایه‌به‌لایه را برای سدهای خاکی بررسی کرد. محققان مذکور تحلیل یک لایه‌ای و چندلایه‌ای را برای یک سد همگن بر روی پی صلب ارزیابی نموده و به این نتیجه رسیدند که اختلاف بسیار فاحشی در مورد تغییر شکل‌ها در بدنه سدهای مدل‌سازی شده وجود دارد. قبل از شبیه‌سازی ساخت بدنه سد، تنش‌های اولیه پی توسط تحلیل انجام گرفته تعیین گردیده و از نتایج آن در مراحل بعدی استفاده شده است. برای مدل‌سازی مراحل ساخت بدنه سد، ساخت سد کلاً در ۲۰ مرحله شبیه‌سازی شده است. مدت زمان ساخت هر لایه با توجه به حجم خاکریزی لایه و صعوبت‌های اجرایی در نظر گرفته شده است. در هر مرحله فرض شده است که خاکریزی پوسته سنگریزه‌ای یک گام عقب‌تر از سایر قسمت‌ها انجام گرفته است. پس از اتمام ساخت سد و صفر کردن تغییر شکل‌های ایجاد شده (به علت جبران آنها در حین مراحل ساخت) تحلیل تا زمان مستهلک شدن کامل فشارهای آب منفذی جهت تعیین نشست‌های تحکیمی دراز مدت و تعیین گرده ادامه داده شده است. همزمان با اجرای لایه‌های خاکریز، در لایه‌های زیرین پدیده تحکیم رخ می‌دهد و اجرای خاکریز و ایسته به زمان بوده و آنی نمی‌باشد. براساس نتایج مدل‌سازی نرم‌افزار پلکسیس در مرحله پایان ساخت سد و قبل از آبگیری حدود شش سال زمان لازم است تا فشارهای آب حفره‌ای ایجاد شده طی ساخت مرحله به مرحله بدنه سد، مستهلک گردد.

۳-۲. مدل‌سازی در مرحله تراوش پایدار

در تحلیل دیگری، تراوش پایدار پس از پایان ساخت سد در ۱۱ مرحله شبیه‌سازی شده است. نرخ آبگیری (بالا آمدن تراز آب مخزن در ترازهای اولیه ۰/۲ متر در روز در نظر گرفته شده و در مراحل بعدی با بالا آمدن سطح آب و گسترش مخزن، نرخ

صفر نزدیک شده و در نتیجه آن ضریب فشار آب حفره‌ای نیز به سمت یک میل کند که سد تاج امیر با این مساله در هنگام ساخت روبرو نبوده است.

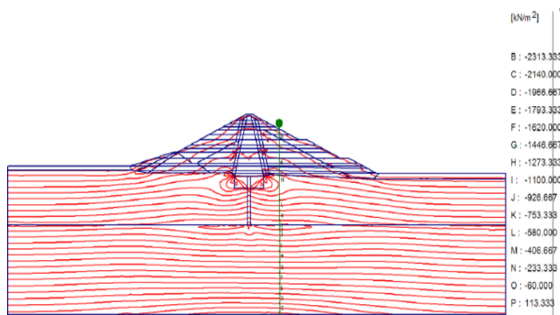


شکل ۴. فشار آب حفره‌ای در پایان ساخت سد تاج امیر

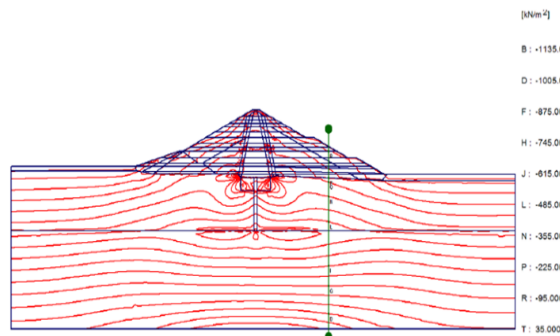
در شکل ۵ تغییرات فشار آب حفره‌ای در ارتفاع هسته، در پایان ساخت نسبت به ارتفاع هسته رسم شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین فشار آب حفره‌ای در ارتفاع حدود ۶ متری از کف هسته رخ می‌دهد.

شکل ۶. تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای (Ru) در ارتفاع هسته

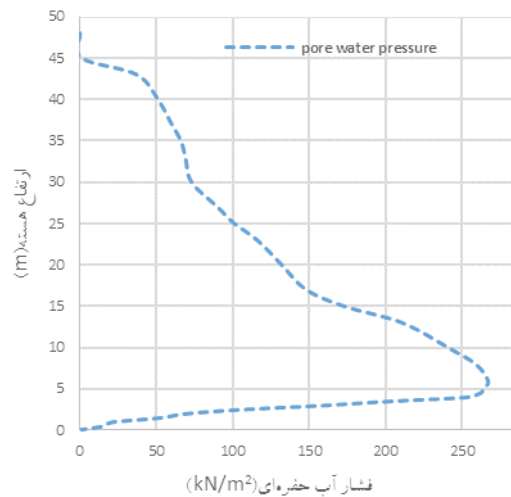
توزیع تنش‌های کل و مؤثر افقی در خاتمه ساخت سد، به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ همچنین توزیع تنش‌های کل و مؤثر قائم به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. تنش‌های کل و مؤثر قائم در هسته افت زیادی را نسبت به مقادیر تنش قائم در پوسته نشان می‌دهد.



شکل ۷. توزیع تنش کل افقی بعد از تحکیم دراز مدت



شکل ۸. توزیع تنش مؤثر افقی بعد از تحکیم دراز مدت



شکل ۵. تغییرات فشار آب حفره‌ای در ارتفاع هسته

یک شاخص مهم در ارزیابی فشار آب حفره‌ای، ضریب فشار آب حفره‌ای می‌باشد که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$(1) R_u = \frac{P}{\sigma_v \sigma_p}$$

که R_u : نسبت فشار آب حفره‌ای، P : فشار آب حفره‌ای و $\sigma_v = \gamma \cdot h$ فشار قائم است.

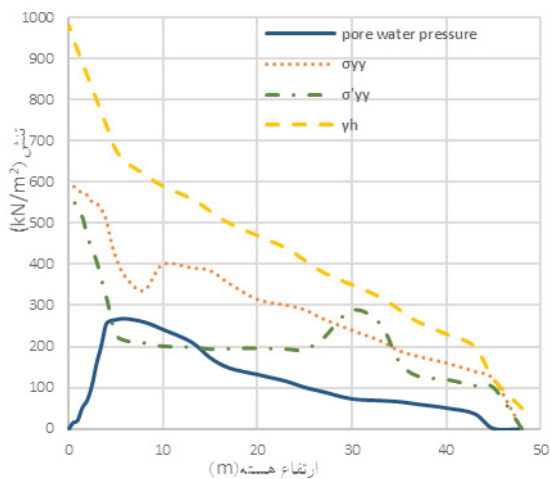
در شکل ۶ نسبت فشار آب حفره‌ای (R_u) نسبت به ارتفاع هسته برابر با نسبت فشار حفره‌ای اضافی به فشار سربار می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار (R_u) برابر ۰/۳۱ و در ارتفاع ۶ متری از کف هسته اتفاق افتاده است. یکی از دلایل وقوع گسیختگی هیدرولیکی این است که تنش مؤثر به

ضریب و میزان قوس زدگی درون هسته خاکی از روابط ۲ و ۳ به دست می آید:

$$\text{ضریب قوس زدگی} = \frac{\sigma_v \sigma_v}{\gamma \cdot h \cdot \gamma \cdot h} \quad (2)$$

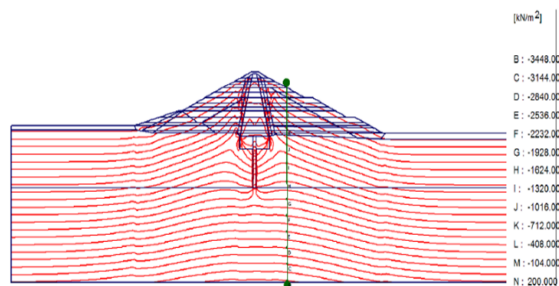
$$\text{میزان قوس زدگی} = (1 - \text{ضریب قوس زدگی}) \times 100 \quad (3)$$

که در آن σ_v تنش موثر قائم درون هسته، γ وزن مخصوص هسته و h ارتفاع خاکریز می باشد. مقدار ضریب قوس زدگی بین صفر و یک می باشد و هرچه ضریب قوس زدگی بیشتر شود میزان قوس زدگی (درصد قوس زدگی) کمتر خواهد شد (قنبری، ۱۳۹۳). همچنین هرچه مقدار درصد قوس زدگی بیشتر باشد، قوس زدگی موثرتر است و کاهش سطح تنش بیشتر اتفاق می افتد. در صورتی که تنش ها در رقوم ارتفاعی در اثر قوس زدگی به مقادیری کمتر از فشار آب در همان ارقام کاهش پیدا کند ممکن است به شکست هیدرولیکی یا تشکیل ترک های ناشی از فشار آب زیاد منجر گردد و در این صورت امکان رگاب وجود دارد.

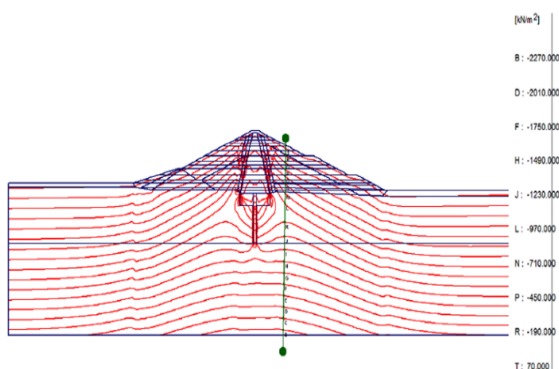


شکل ۱۱. تغییرات تنش کل و موثر قائم، تغییرات فشار آب حفره ای اضافی و γh در ارتفاع هسته (مرکز هسته)

در شکل ۱۲ نسبت قوس زدگی در هسته (نسبت تنش قائم به سربار در نقطه، مورد نظر $(\frac{\sigma_v \sigma_v}{\gamma h \gamma h})$) به ارتفاع هسته ترسیم شده است، مشاهده می شود بیشترین قوس زدگی (کمترین مقدار نسبت قوس زدگی) برابر $0/53$ می باشد که در حدود یک سوم ارتفاع هسته از کف رخ داده است. توزیع تنش مؤثر و کل افقی در ارتفاع سد در پایان ساخت سد، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



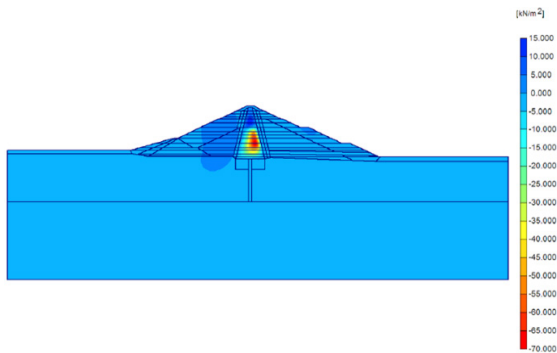
شکل ۹. توزیع تنش کل قائم بعد از تحکیم دراز مدت



شکل ۱۰. توزیع تنش موثر قائم بعد از تحکیم دراز مدت

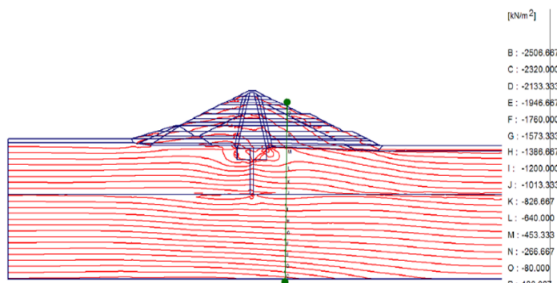
پدیده قوس زدگی به دلیل تفاوت سختی هسته و پوسته و نشست بیشتر هسته نسبت به پوسته می باشد که موجب انتقال بار از هسته به پوسته در قسمت های فوقانی می گردد. در صورت قوس زدگی بیش از حد، احتمال ایجاد ترک هسته و بالارفتن پتانسیل وقوع ترک هیدرولیکی در ارتفاعی از هسته که بیشترین افت تنش در آن دیده می شود، می رود. همچنین تنش های قائم در پوسته سنگریز بالادست و پایین دست تقریباً مشابه هم بوده و از شرایط تنش های هم فاصله از سطح خاکریز (γh) پیروی می کند. در نواحی مجاور با پوسته های مخلوط، افزایش کمی در تنش ها نسبت به شرایط تنش های هم فاصله از سطح خاکریز وجود دارد؛ این پدیده ناشی از قوس زدگی بین دو ناحیه نرم و سخت (پوسته مخلوط و پوسته سنگریز) می باشد که با توجه به شیب ملایم این دو لایه و عدم لزوم آب بندی آنها، اهمیت چندانی ندارد. در شکل ۱۱ تغییرات تنش قائم کل و مؤثر، تغییرات فشار آب حفره ای و γh نسبت به ارتفاع هسته رسم شده است. افت تنش های مؤثر و کل قائم نسبت به γh به علت پدیده قوس زدگی می باشد. افت تنش مؤثر قائم به مراتب بیشتر از تنش کل قائم می باشد، چراکه در این حالت فشار آب حفره ای اضافی ایجاد شده در اثر مراحل ساخت نیز از تنش کل کم می شود.

که مشاهده می شود، حداکثر فشار آب حفره‌ای اضافی برابر ۶۸ کیلو پاسکال می باشد.

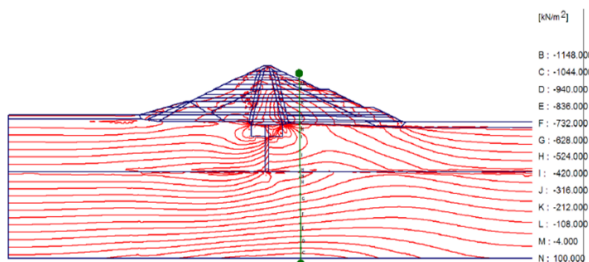


شکل ۱۴. اضافه فشار آب حفره‌ای پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار

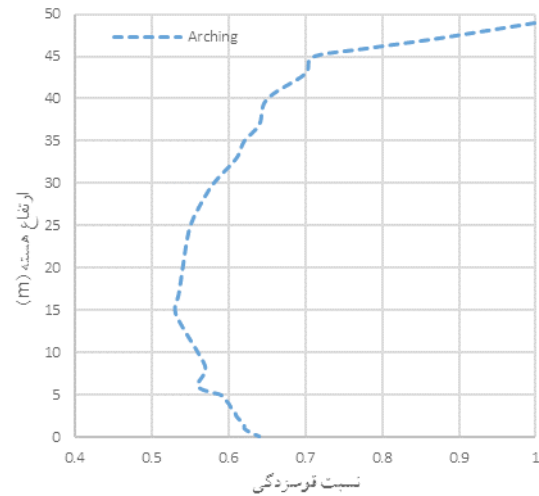
در شرایط آبیگری سد، به دلیل فشار هیدرواستاتیک آب، تنش‌های کل در بالادست بدنه سد افزایش می یابند، چرا که در این حالت تنش کل از دانسیته اشباع مصالح به دست می آید. توزیع تنش‌های کل افقی و قائم و تنش‌های مؤثر افقی و قائم در خاتمه آبیگری مخزن در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است.



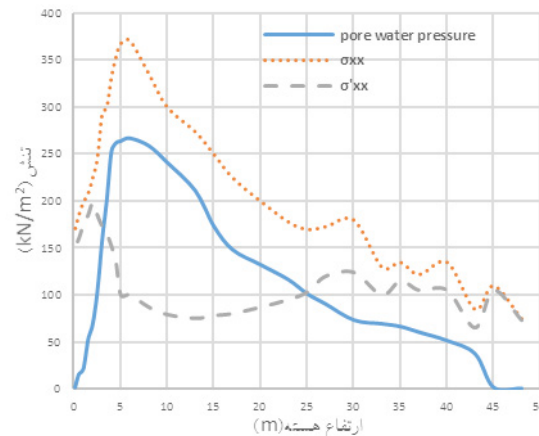
شکل ۱۵. توزیع تنش کل افقی پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار



شکل ۱۶. توزیع تنش مؤثر افقی پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار



شکل ۱۲. تغییرات ضریب قوس زدگی در ارتفاع هسته (مرکز هسته)



شکل ۱۳. تغییرات تنش کل و مؤثر افقی و تغییرات فشار آب حفره‌ای در ارتفاع هسته (مرکز هسته)

همان‌طور که ملاحظه می گردد، تنش مؤثر افقی در هیچ نقطه‌ای از هسته برابر صفر نخواهد بود.

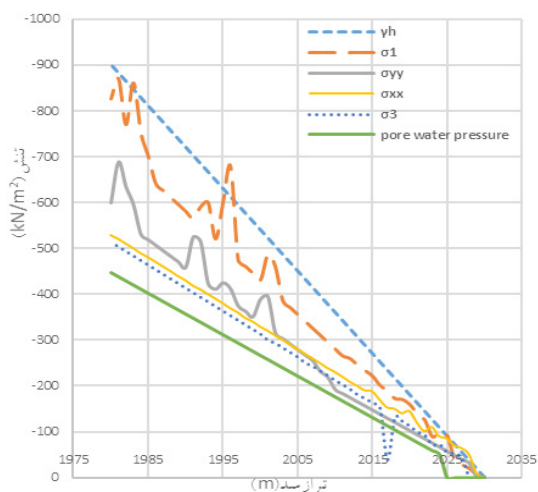
۲-۴. نتایج تحلیل‌های آب حفره‌ای، تنش و پدیده قوس زدگی در حالت تراوش پایدار

در این بخش نتایج تحلیل‌های پس از آبیگری سد و تراوش پایدار و تحکیم دراز مدت بعد از آن شامل فشارهای آب بررسی می شود. همچنین امکان گسیختگی هیدرولیکی در هسته رسی نیز بررسی می گردد. توزیع فشارهای آب حفره‌ای اضافی بعد از آبیگری در شکل ۱۴ نشان داده است. همان‌طور

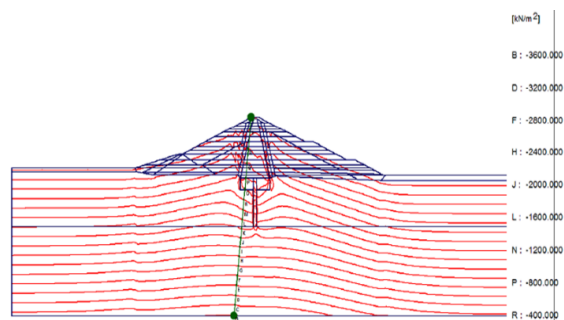


۵. بررسی پدیده شکست هیدرولیکی

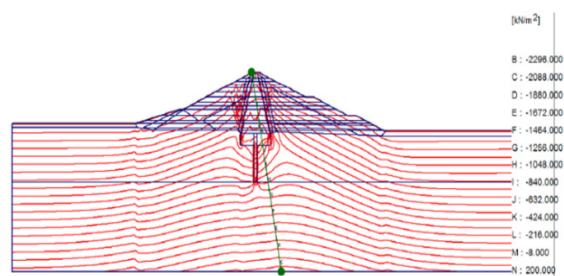
پدیده گسیختگی هیدرولیکی به معنی بروز ترک در اثر فشار آب می‌باشد. این پدیده پس از آبیگری مخزن و اعمال فشار در المان آبنند سد (هسته رسی مرکزی) در نقاطی که فشار آب از تنش کل اصلی حداقل بیشتر گردد دارای احتمال وقوع می‌باشد. برای بررسی این پدیده لازم است که در کلیه نقاط المان آب‌بند سد، فشار آب با تنش اصلی حداقل مقایسه گردد. از آنجائیکه در اولین آبیگری سد، به ویژه زمانی که سرعت آبیگری زیاد باشد، فرصت نفوذ آب در هسته فراهم نمی‌گردد، عموماً نقاط بحرانی در بالادست هسته واقع می‌باشند، این نقاط محلی است که احتمال نفوذ آب وجود دارد. بنابراین محافظه کارانه است که فرض شود فشار هیدرواستاتیک کامل در پشت هسته (اولین المان هسته در بالادست) وجود دارد. در صورتی که این المان‌ها بتوانند فشار آب را تحمل نمایند، عملاً رابطه، بالادست و پایین دست هسته قطع شده و ترک هیدرولیکی رخ نخواهد داد، بنابراین حاشیه ایمنی لازم تامین خواهد گردید. برای بررسی این پدیده، نمودار تنش‌های افقی، قائم، حداقل و حداکثر در المان‌های بالادست هسته در مقابل ارتفاع هسته در شکل ۲۰ رسم شده است، همچنین تغییرات فشار آب در مقابل ارتفاع هسته سد در همان نمودار ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تنش‌های قائم و افقی حداکثر و حداقل در تمام رقوم بیش از فشار آب بوده و بنابراین گسیختگی هیدرولیکی در هسته این سد اتفاق نمی‌افتد. در هر صورت به علت ضخامت زیاد هسته در سد تاج امیر، نگرانی چندانی در مورد پدیده گسیختگی هیدرولیکی وجود ندارد.



شکل ۲۰. ارزیابی پدیده گسیختگی هیدرولیکی در هسته

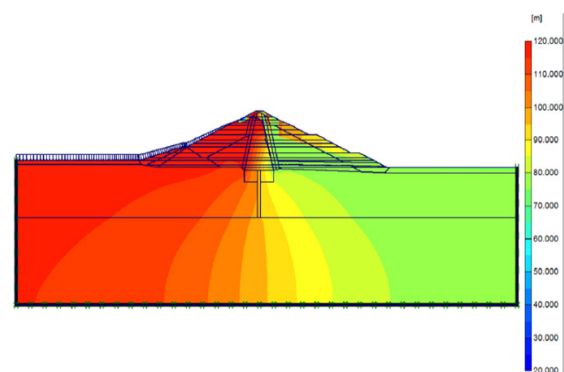


شکل ۱۷. توزیع تنش کل قائم پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار



شکل ۱۸. توزیع تنش موثر قائم پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تنش‌های کل در مقایسه با مقادیر اتمام ساخت در بالادست نسبت به پایین دست افزایش یافته‌اند در حالی که تنش‌های مؤثر به دلیل اشباع شدن مصالح بالادست از کاهش چشم‌گیری برخوردارند. خطوط هم‌پتانسیل پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۹. خطوط هم‌پتانسیل پس از آبیگری و رسیدن به حالت تراوش پایدار



۶. نتیجه گیری

است. گسیختگی هیدرولیکی حتی با وجود به وقوع پیوستن پدیده قوس زدگی در حد بحرانی در هسته سد، اتفاق نخواهد افتاد. بر این اساس، مقدار فشار آب حفره‌ای حداکثر به $2/7$ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌رسد و نسبت فشار آب حفره‌ای حدود $0/31$ به دست آمده است. بنابراین نتایج تحلیل رفتار مناسب بدنه سد را در برابر فشار آب حفره‌ای در مرحله ساخت و در مرحله آبیگری را تأیید می‌نماید. همچنین تنش‌ها در حد قابل قبول بوده و پایداری سد بر اساس آنالیزهای تنش- کرنش نیز تأمین شده است. به طور کلی با توجه به نتایج تحلیل‌ها رفتار بدنه سد تاج امیر در شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی مناسب و در حد متعارف است.

تحلیل‌های استاتیکی تنش و کرنش سد تاج امیر در مرحله ساخت و تراوش پایدار در حدی است که مشکلی از نظر پایداری برای سد ایجاد نمی‌شود. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تنش‌های قائم و تنش‌های اصلی حداکثر در محدوده اتصال هسته و پوسته افت نموده و دارای تغییرات ناگهانی می‌باشد. این افت نشانگر وقوع پدیده قوس زدگی می‌باشد. البته مقدار قوس زدگی بحرانی $0/53/47\%$ است که در حد متعارف است. شایان ذکر است مقدار قوس زدگی پس از مرحله ساخت و در حالت تراوش پایدار افزایش یافته است. همچنین مقادیر فشار آب حفره‌ای و نسبت فشار حفره‌ای (R_{II}) در حد قابل قبول بوده



منابع

◀ عساکره، ع. و آهنگ، م. ۱۳۹۶. بررسی عددی پدیده قوس زدگی در هسته سد خاکی غیرهمگن بافت واقع در استان کرمان. مهندسی عمران مدرس. مقاله ۱۴، دوره ۱۷، شماره ۵، ۱۶۱-۱۶۸

◀ قنبری، ع. ۱۳۹۳. اصول مهندسی سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه خوارزمی، ۲۸۶-۲۸۳.

◀ منسوجیان، م. ر.، اسماعیلی، م. ر. و کوهزادیان، ی. ۱۳۹۶. بررسی شکست هیدرولیکی در هسته سد و سازه‌های آبی با استفاده از نرم‌افزار SIGMA/W. پنجمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی و سومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران.

◀ مولوی، ع. ر.، و پرویشی، ع. ر. ۱۳۹۶. بررسی شکست هیدرولیکی سد خاکی تحت تأثیر زلزله حوزه نزدیک. پنجمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری. تهران.

◀ خامسی، س. ا. و میرقاسمی، ع. ا. ۱۳۸۹. بررسی شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دوره ۴۴، شماره ۲، ۱۹۱-۱۸۱.

◀ رضایپور طبری، م. و هاشم پور، م. ۱۳۹۶. بررسی پارامترهای موثر در شکست هیدرولیکی سد، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی. تهران.

◀ سالاری، م.، اخترپور، ع. و اکرامی فرد، ا. ۱۳۹۶. وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در هسته رسی مایل یک سد سنگریزه‌ای بلند واقع شده در دره تنگ. مهندسی عمران مدرس، دوره ۱۷، شماره ۵، ۱۰۲-۱۰۹.

◀ عباسی، ب.، اسماعیلی، ک. و ابریشمی، ج. ۱۳۸۹. مدل سازی آزمایشگاهی همزمانی شکست هیدرولیکی سد با ورود سیلاب سریع به مخزن. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۱، ۸۳-۷۵.

References:

- Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation, *Journal of Applied Physics*, (12): 155-164.
- Brown, C. B., Goodman, L. E., 1963. Gravitational stresses in accreted bodies. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A (276)*: 571-576.
- Clough, R. W., Woodward, R., 1967. Analysis of Embankment Stresses and Deformations. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE (93)*: 529-549.
- Ghanbari, A. and Rad, S.S., 2015. Development of Empirical Criterion for Predicting the Hydraulic Fracturing in the Core of Earth Dams. *Acta Geotechnical*, 10(2): 243-254.
- Jaworski, G. W., Duncan, J. M. and Seed, H. B., 1981.

- Laboratory study of Hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107(6): 713-732.
- Kulhawy, F.H., 1976. Load Transfer and Hydraulic Fracturing in Zoned Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, (9): 963-967.
- Lofquist, B., 1955, Discussion of Cracking in dams, 5th ICOLD, Paris, Vol. 3, pp: 21-33
- Maksimovic, M., 1973. Optimal Position of Central Clay Core of Rock-Fill Dam in Respect to Arching and Hydraulic Fracture. *International Congress on Large Dam*, 789-800.
- Satoh H., Yamaguchi Y., 2009. Laboratory Hydraulic Fracturing Tests for Core Materials using Large Size Hollow Cylindrical Specimens. 1st International Symposium on Rock fill Dams.



- Sherard, J.L., 1986. Hydraulic Fracturing in Embankment Dam. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(10): 905–927.
- Sherard, J.L., 1973. Embankment Dam Cracking, *Embankment Dam Engineering*. Casagrande, Wiley, New York, 271–353.
- Soga K., Ng MYA, and Gafer K., 2005. Soil Fractures in Grouting. In: Barla, G., Barla, M. (Eds.), Proc. 11th International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics, Tornio, Italy.
- Taylor D. W., 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 110-114.
- Wang J. Zhu, J.G., Mroueh, H., Chiu, C.F, 2007. Hydraulic Fracturing of Rock-Fill dam. *Int. Jul. of Multiphase* 1(2): 199–219.

Study of Hydraulic Failure Mechanism in Core of Earth Dam (A Case Study: Taj-Amir Norabad Dam)

Mehdi Komasi¹, Behrang Beiranvand^{*2}

1- Assistant Professor, Water Engineering and Hydraulic Structure Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujer Iran.

2- Ms. Graduated, Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd Iran .

Abstract

The occurrence of hydraulic failure is one of the most important geotechnical problems in the core of dams. Excessive water pressure increase during the first impounding period results in a significant reduction in the effective stress and consequently reducing the shear strength of the core materials of the earth's dams, which can overcome the water pressure on the effective stress and the underlying hydraulic cracking. In this research, the hydraulic failure of Taj-Amir earth dam with static loading conditions was completed at the end of construction and the steady state period was studied by Plaxis software with Mohr-Coulomb behavioral model. The analyses show that water pressure ratio (R_u) and stress-strain values are acceptable and there is no problem in terms of failure of dam. Also, the critical ratio of arching is 0.53(47%), which is about one-third the height of the core from the foundation, it is conventional, and the hydraulic failure does not occur even with the occurrence of an arching phenomenon at the core of the dam.

Keywords: Taj-Amir Earth Dam, Hydraulic Failure, Pore Water Pressure, Effective Stress, Plaxis.

*behrang220@gmail.com