

ارزیابی تنش کل و ضریب قوس زدگی به روش تحلیل برگشتی با رویکرد به ساخت مرحله‌ای سد (مطالعه موردی: سد مروک)

مهدی کماسی^۱، بهرنگ بیرانوند^۲، احمدرضا مظاهری^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

مقاله برگرفته از پایان نامه

چکیده

بروز پدیده قوس زدگی در هسته موجب کاهش تنش و ایجاد آبستگي رس و به دنبال آن تخریب سد می‌گردد، بنابراین همواره به عنوان یک مسأله مهم در سدهای خاکی مطرح است. در این پژوهش جهت بررسی تنش کل و ضریب قوس زدگی سد خاکی مروک از نرم افزار Geostudio استفاده شده است. در مدل سازی سد، از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده و تأثیر ساخت مرحله‌ای نیز لحاظ گردیده است. با تحلیل تنش- کرنش در دوره ساخت سد و تأثیر عملیات ساختمانی، نتایج تنش کل و ضریب قوس زدگی ارزیابی و با نتایج ایزاردقیق مقایسه گردید. به منظور تطبیق داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده از رگرسیون چند متغیره و از معیار ضریب تبیین استفاده شد و مقدار $R^2 = 0.9834$ به دست آمد که همخوانی بسیار خوبی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده از لحاظ قوس زدگی می‌باشد. نتایج بیانگر آنست که با افزایش خاکریزی تنش کل نیز افزایش می‌یابد و بیشترین درصد قوس زدگی از ابتدا تا پایان مرحله ساخت برابر ۵۸٪ و در یک سوم ارتفاع هسته از کف داده است. با توجه به تأثیر زیاد تحکیم بر شدت قوس زدگی، سرعت ساخت می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شود که قبل از اجرای لایه‌های فوقانی بخشی از تحکیم لایه‌های زیرین انجام شده باشد. همچنین می‌توان با انتخاب فیلتر مناسب بین هسته و پوسته و همچنین استفاده از مصالح با ضریب پواسون بالا میزان قوس زدگی را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل برگشتی، سد مروک، تنش، ضریب قوس زدگی، Geostudio

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، ۰۹۱۶۶۶۲۴۱۸۰، komasi@abru.ac.ir نویسنده مسئول

^۲ دانشجوی دکتری عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، ۰۹۱۱۶۷۵۲۱۰۱، behrang220@gmail.com

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، ۰۹۱۲۲۸۶۱۷۲۸، a.mazaheri@abru.ac.ir



مقدمه

بالا بودن هزینه ساخت و نیز شدت خسارات ناشی از شکست سدها و همچنین عدم قطعیت در پیش بینی رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی به لحاظ ماهیت خاص مصالح خاکی، لزوم مراقبت و رفتارنگاری سدهای خاکی را بیش از هر چیز آشکار می‌کند. به‌طور کلی رفتارنگاری از شروع ساخت سد آغاز و تا پایان عمر مفید آن ادامه می‌یابد. رفتارنگاری سدها معمولاً توسط نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد. به‌عبارتی اگر داده‌های حاصل از رفتارنگاری با نتایج حاصل از تحلیل برگشتی مطابقت داشته باشد می‌توان گفت تحلیل انجام شده گویای رفتار واقعی سد بوده و از نتایج به‌دست آمده می‌توان برای تأمین اطلاعات بخش‌هایی که در آنها ابزار رفتارنگاری وجود ندارد، استفاده نمود. در واقع اگر بتوان یک مدل رفتاری با پارامترهای واقع بینانه پیدا کرد که با نتایج ابزار دقیق تطابق خوبی داشته باشد، از این مدل می‌توان جهت پیش‌بینی رفتار آبی سد که هنوز توسط آن تجربه‌ای نشده است استفاده نمود. بنابراین علت رفتارنگاری سدها را می‌توان در بررسی مسایل ایمنی سدها، مقایسه عملکرد واقعی با پیش‌بینی‌های طراحی و تجربه برای طراحی سدها در آینده خلاصه نمود. رفتارسنجی سدها اصولاً منجر به ارزیابی پارامترهای طراحی، کاهش ریسک خطرپذیری، کنترل کیفیت در حین ساخت و نیز بررسی دقیق پایداری در دوران اولیه بهره‌برداری و بهره‌برداری دراز مدت می‌شود. با توجه به عدم حضور بارهای خارجی در دوران ساخت سنجش تغییرات تنش، فشار منفذی و نشست از مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند مورد ارزیابی قرار گیرند (Dunicliff, 1993). (Maksimovic (1973 در پژوهشی مسأله قوس‌زدگی هسته سدهای خاکی را به روش اجزاء محدود بررسی نمود. وی در محاسباتش 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 قوس‌زدگی بیشتر از مقدار واقعی برآورد گردد. همچنین Kulhawy (1976) پدیده قوس‌زدگی 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. پس از او Sherard (1986) با در نظر گرفتن زاویه اتساع به صورت تابعی از زاویه اصطکاک و فرض مدل رفتاری موهرکلمب، تحلیل‌هایی جهت تعیین نیروی لازم جهت وقوع شکست هیدرولیکی انجام داد. همچنین Szostak and Massie'ra (2004) با بررسی سد خاکی LG در شمال شهر کبک در کشور کانادا با تحلیل نتایج ابزار دقیق به کار رفته در این سد به بررسی قوس‌زدگی این سد خاکی پرداختند. (Gao and Chen (2012), Zhang (2012), He et al. (2016), Liu et al. (2016), Skibin and Chizh (2016) در مطالعاتی جداگانه به بررسی تأثیر دیوار آبنند بر توزیع تنش در فونداسیون سدهای خاکی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود پرداختند. یکی از عواملی که سلامت و پایداری سدهای خاکی را به مخاطره می‌اندازد، ایجاد و گسترش ترک در هسته اینگونه از سدها می‌باشد. بر اساس تحقیقات جمال و همکاران (۱۳۹۰) عوامل مختلفی می‌تواند در وقوع ترک‌ها نقش داشته باشند که یکی از این عوامل کاهش سطح تنش در هسته سد خاکی ناشی از انتقال بار از هسته به پوسته و در نتیجه بروز پدیده قوس‌زدگی می‌باشد. میر قاسمی و توللی (۱۳۷۹) تأثیر مقدار سختی مصالح هسته و پوسته، زاویه شیب دره و نیز عرض کف دره محل احداث سد را بر نسبت انتقال تنش در هسته سد، مورد بررسی قرار دادند. ایشان در مطالعات خود، رفتار مصالح را الاستیک خطی فرض کرده و جهت انجام تحلیل‌های سه بعدی از مدل‌های اجزاء محدود استفاده کردند. نتایج مطالعات ایشان بیانگر آن است که اختلاف در مدول الاستیسته مصالح هسته و پوسته بیش از دو عامل دیگر در کاهش سطح تنش مصالح هسته تأثیرگذار است. حشمتی و یوسفی (۱۳۸۹) به بررسی پدیده قوس‌زدگی در سدهای خاکی پرداختند. نوری قیداری و همکاران (۱۳۹۲) نیز در مطالعه‌ای دیگر با بررسی ضریب قوس‌زدگی و تنش‌های اصلی در سد خاکی گلابر با استفاده از نرم افزار Plaxis پرداختند و نهایتاً به این نتیجه رسیدند که هم‌خوانی مناسبی بین نتایج تحلیل عددی و مشاهداتی وجود دارد. عساکره (۱۳۹۶) پارامترهای موثر در پدیده قوس‌زدگی در سد خاکی غیرهمگن بافت را با شبیه‌سازی با نرم‌افزار Plaxis مورد بررسی قرار داد و بیان نمود که

مخزنی مروک از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با طول تاج ۴۸۶ متر، عرض تاج ۱۲ متر، ارتفاع ۶۸ متر از کف رودخانه، حجم مخزن ۱۲۰ میلیون مترمکعب، مساحت دریاچه مخزن سد ۶/۴۵ کیلومتر مربع و طول دریاچه ۴۵۰۰ متر در بیشینه تراز آب مخزن است. حجم کل خاکریزی بدنه سد ۳۶۷۰۰۰۰ مترمکعب بوده و متوسط حجم آب تنظیمی سالانه برابر ۵۰ میلیون مترمکعب است. سرریز سد از نوع آزاد دارای اوجی بوده و دبی طراحی سرریز ۱۲۵۰ مترمکعب در ثانیه می‌باشد و تراز تاج سرریز ۱۶۱۴ متر از سطح دریا است. مشخصات و مقطع سد مروک در جدول (۱) و شکل (۱) معرفی شده است.

عرض هسته، ضخامت لایه فیلتر و تراکم پذیری پی به ترتیب بیشترین تأثیر را در قوس زدگی سدهای خاکی دارند. در این پژوهش ضمن بررسی رفتار واقعی سد مروک که از نتایج ابزار دقیق به دست آمده با تحلیل عددی انجام شده توسط نرم‌افزار Geostudo به تحلیل تغییرات تنش- کرنش و قوس‌زدگی تحت تأثیر تحکیم لایه به لایه سد خاکی مروک پرداخته شده است.

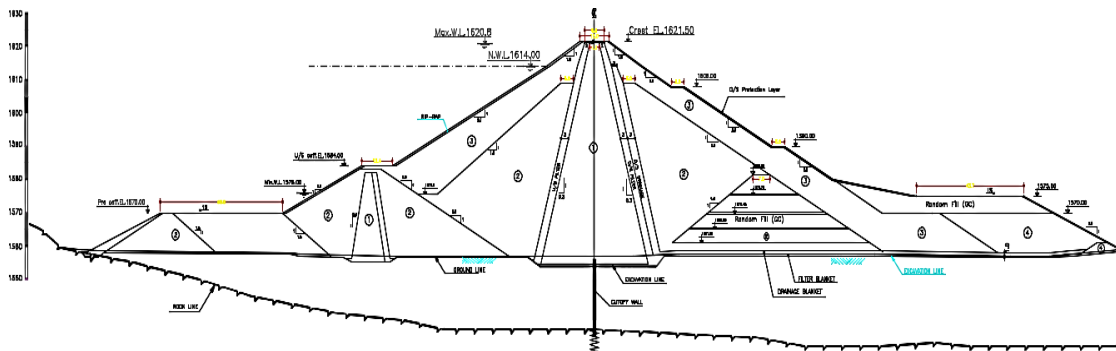
مواد و روش‌ها

مشخصات سد مروک

سد مخزنی مروک در فاصله حدود ۳۸ کیلومتری شهرستان دورود در استان لرستان واقع شده است. سد

جدول (۱): مشخصات کلی سد مروک (گزارش ابزار دقیق سد مروک، ۱۳۹۱)

نوع سد	ارتفاع از کف رودخانه (متر)	طول تاج (متر)	تراز پی سد (متر)	حجم هسته رسی (مترمکعب)	حجم مخزن در تراز (میلیون مترمکعب)	تراز نرمال آب (متر)	عرض تاج (متر)	ارتفاع فرازبند (متر)	ارتفاع نشیب بند (متر)
خاکی با هسته رسی	۶۷/۵	۴۵۱	۱۱۵۴	۴۵۳۰۰۰	۱۲۰	۱۶۱۷	۱۵	۳۶	۳۰



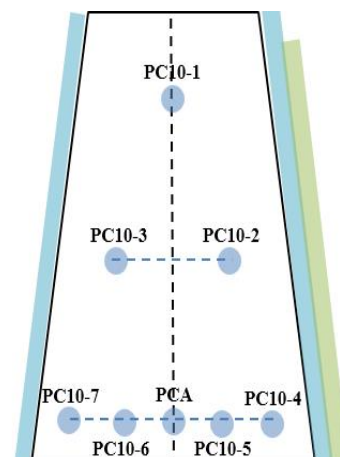
شکل (۱): ناحیه بندی سد در آنالیزهای تنش و کرنش (گزارش ابزار دقیق سد مروک، ۱۳۹۱)

آهک‌های بلورین تریاس و تریاس ژوراسیک، شیست‌های ژوراسیک، توده‌های آذرین بعد از کرتاسه در محدوده پروژه سد مروک رخنمون دارند. نهشته‌های کواترن در محدوده پروژه شامل رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای، پادگانه‌های بلند و کوتاه، مواد واریزه‌ای و خاک‌های برجا است که در شکل (۲) نشان داده شده است. سد مروک دارای ۷ مقطع عرضی ابزارگذاری است که در جدول (۲) درج شده‌اند و در ترازهای مختلفی عملیات نصب ابزار دقیق انجام شده است.

رودخانه تیره در ۱/۲ کیلومتری سراب روستای مروک از تنگه‌ای به طول حدود ۲۰۰ متر از جهت شمال خاوری به سوی جنوب باختری جریان دارد و دره نامتقارنی را در تناوبی از هورنفلس، شیست و آهک بلورین ایجاد نموده است به گونه‌ای که بلندی‌های دو سوی تنگه را آهک‌های بلورین در جهت شمال باختری-جنوب خاوری به وجود آورده و سنگ بستر هسته سد خاکی-سنگریزه‌ای مروک را تشکیل می‌دهند. توده سنگ‌های آهکی و دولومیتی پرمین،

جدول (۲): ابزار دقیق فشارسنج سد مروک (گزارش ابزار دقیق سد مروک، ۱۳۹۱)

مقطع ۵		مقطع ۸		مقطع ۱۰		مقطع ۱۳	
تراز	تعداد	تراز	تعداد	تراز	تعداد	تراز	تعداد
۱۵۸۵	۲	۱۵۸۵	۲	۱۵۸۵	۲	۱۵۸۵	۲
۱۶۰۵	۱	۱۶۰۵	۱	۱۶۰۵	۱	۱۶۰۵	۱



شکل (۲): جانمایی فشار سنج در هسته سد مروک مقطع PC10

آنالیز و تحلیل نتایج

رفتار غیر خطی و غیر ارتجاعی مصالح سدهای خاکی در حالات زهکشی شده و زهکشی نشده لزوم استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب جهت مدل‌سازی رفتار دقیق خاک را ضروری می‌سازد. مدل‌های رفتاری ساده اگرچه نیاز به پارامترهای رفتاری را ندارند اما نتایج حاصل از تحلیل با این گونه مدل‌ها با نتایج واقعی ممکن است اختلاف زیادی داشته باشند. جهت تحلیل تنش و کرنش در این پژوهش از نرم‌افزار Geostudio بر اساس اجزای محدود و المان‌بندی بدنه سد استفاده شده است. این برنامه با فرض حاکم بودن قانون دارسی و برای جریان دو بعدی با کمک معادله لاپلاس عمل می‌کند. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل شامل محدود کردن تغییر مکان قائم بر روی سنگ بستر و محدود کردن تغییر مکان افقی در انتهای دو سمت مدل می‌باشد. در واقع شرایط مرزی شامل دبی عبوری صفر در مرزهای قائم پی و مرز افقی پائین پی می‌باشد. خط پتانسیل در پایین دست تراز کد کف روخانه تعریف شده است و برای بالادست با توجه به تراز آب مخزن خط پتانسیل در حالت تراز نرمال تعیین می‌شود. در تحلیل از تعداد ۲۹۳۹ المان و ۳۰۱۸ گره در بدنه سد استفاده شده است. در سد مروک با توجه به افزایش فشار آب حفره‌ای در

استفاده از سلول‌های فشار کل به منظور آگاهی از تنش کل خاک در یک ناحیه صورت می‌پذیرد. برای اندازه‌گیری فشارهای کل در قسمت‌های مختلف بدنه سد مروک از ۲۹ عدد فشار سنج، در سه تراز مختلف هسته در ۴ مقطع مورد بررسی استفاده شده است. یک فشار سنج الکتریکی هم در تراز زیرین فیلتر، در مقطع ۱۰ قرار داده شده است تا عملکرد فیلتر ارزیابی گردد. فشار کل اندازه‌گیری شده توسط سلول‌های فشاری از طریق کابل و علائم الکتریکی به دستگاه قرائت کننده در اتاقک‌های ترمینال فوق الذکر منتقل خواهد شد. آرایش فشارسنج‌ها در مقاطع مختلف مورد بررسی به شکلی می‌باشد که فشارها در نقاط مختلف توده بدنه سد قابل اندازه‌گیری است. در عمل سلول‌های نصب می‌گردد که صفحه آن عمود بر جهت عملکرد تنش اصلی باشد. یک خوشه از سلول‌ها را می‌توان طوری نصب نمود که اندازه‌گیری هر دو مولفه بزرگی و جهت تنش اصلی با اندازه‌گیری تنش در جهات مختلف را امکان‌پذیر سازد، هنگامی که فشار خاک بر پی، دیوار حائل یا ... وارد شود، سلول به طور مستقیم در بین سازه و خاکریز قرار داده می‌شود.

ساختگاه در اثر وزن لایه‌ها محاسبه می‌گردد. نتایج این مرحله به‌عنوان تنش‌های اولیه برای تحلیل مرحله بعد کارآیی دارد. گرچه خروجی نرم‌افزار شامل تنش و تغییر مکان برای نقاط مختلف مدل خواهد بود، با این حال مقادیر تنش‌ها به مرحله بعد منتقل نمی‌شود. برای ساختگاه‌هایی که از لایه‌های افقی خاک تشکیل شده‌اند، مقدار تنش اولیه در هر نقطه به عمق h تقریباً مساوی γh است. همچنین مسأله در وضعیت هسته و پوسته در حالت آنالیز خطی می‌باشد. در این قسمت بررسی آنالیز تنش و تغییرشکل پی پیش از اجرای خاکریز سد و بررسی تغییرات پارامترهایی نظیر تنش‌های قائم و افقی و تنش کل و قوس‌زدگی انجام می‌گیرد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

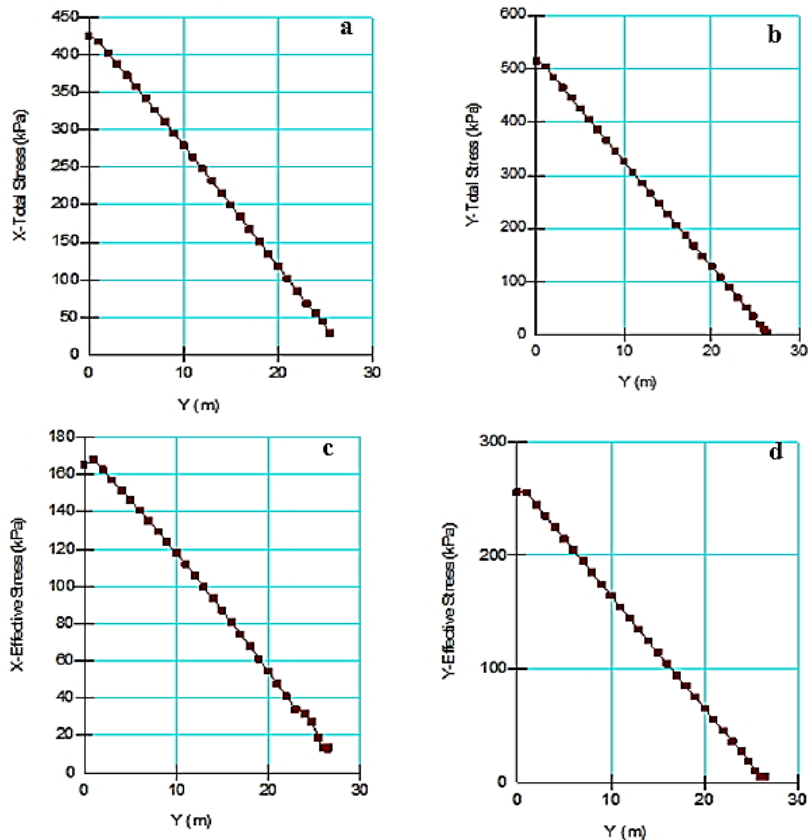
هسته سد و همچنین وجود دیوار آبنند در ترازهای مختلف، شبکه المان‌ها در هسته و دیوار آبنند ریزتر از سایر نقاط در نظر گرفته شده است. همچنین از المان‌های مربعی در شبکه اجزاء محدود و از شرایط مرزی استاندارد موجود در برنامه برای مرزهای مدل استفاده شده است. به عنوان قانون عمومی، المان‌های معمولی برای مدل‌های الاستیک خطی کافی می‌باشد زیرا در یک مدل الاستیک خطی خواص مصالح تابعی از توزیع تنش‌های محاسبه شده نبوده در نتیجه ضعف توزیع تنش در روی تغییر شکل‌های محاسباتی، اثر ناچیزی دارد. برای مدل‌های کامل و غیرخطی خاک خواص مصالح، تابعی از توزیع تنش می‌باشد. بنابراین توزیع تنش معقول در المان ضروری بوده و از المان‌های درجه بالاتر بایستی استفاده شود. خصوصاً درحالتی که المان تحت خمش بوده، همانند قرار گرفتن لبه‌های پی روی یک دیوار حائل، استفاده از المان‌های درجه بالاتر ضروری است. در حالتی که تغییرات تنش و کرنش کوچک باشد استفاده از المان‌های معمولی کفایت. جهت شبیه‌سازی سد و بررسی پارامترهای مختلف از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. در پژوهش حاضر مقطع ۱۰ سد مروک با توجه به اینکه دارای بیشترین تعداد ابزار دقیق و طول بیشینه نسبت به سایر مقاطع به عنوان شبیه‌سازی انتخاب گردیده است.

تحلیل نتایج پیش از اجرای خاکریز سد

به منظور انجام تحلیل تنش و کرنش مدل همانند شرایط ساخت سد، ابتدا یک مدل برای در نظر گرفتن نشست‌های لایه آبرفت محل ساخت سد (بر روی سنگ بستر) تحت اثر وزن خود لایه ساخته شد سپس بارگذاری اضافی به وجود آمده در اثر احداث سد بر روی این لایه اعمال گردیده و تنش-کرنش‌های به وجود آمده ثبت گردید. پس از انجام شبیه‌سازی، پارامترها و مشخصات مصالح را به پی اختصاص داده و همچنین یک نوع مصالح سومی با مشخصات خاکریز تعریف کرده تا صرفاً بتوان خاکریز را به صورت نمادین شبیه‌سازی کرد و به این ترتیب در آنالیزهای بعدی، پس از خاکریزی گره‌های خاکریز برای مسأله تعریف شده باشد (جدول ۳). در قسمت اول که هنوز خاکریز مورد تحلیل قرار نگرفته وزن خاکریز بایستی صفر در نظر گرفته شود. در این مرحله تنش‌های موجود در

جدول (۳): مشخصات مصالح مورد استفاده در سد مروک (گزارش ابزار دقیق سد مروک، ۱۳۹۱)

مصالح	مدل (موهر کولمب)	نوع مصالح	E(MPa)	K(m/s)	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ν	c (kPa)	ϕ ($^{\circ}$)
هسته	الاستو پلاستیک	زهکشی نشده	۵۰	1×10^{-9}	۱۷	۲۰	۲۱	۰/۳	۴۳	۱۱
		زهکشی شده							۳۰	۲۵
پوسته	الاستو پلاستیک	زهکشی شده	۲۰۰	1×10^{-5}	۲۲/۵	۲۳/۸	۲۴/۵	۰/۲	-	۳۸
فیلتر	الاستو پلاستیک	زهکشی شده	۱۰۰	1×10^{-6}	۱۹	۲۱	۲۲	۰/۲۵	-	۳۰
زهکش	الاستو پلاستیک	زهکشی شده	۱۵۰	1×10^{-4}	۲۰/۵	۲۲	۲۳	۰/۲۰	-	۳۵
پی	الاستیک	زهکشی شده	۴۰۰۰	1×10^{-8}	۲۵	-	۲۵/۵	۰/۱۰	-	۴۲



شکل (۴): تغییرات تنش‌های قائم و افقی کل و تنش‌های قائم و افقی موثر. a. تنش افقی کل، b. تنش قائم کل، c. تنش افقی موثر، d. تنش قائم موثر

از شکل (۴) نتیجه می‌شود که با افزایش عمق پی از سطح پی به انتهای لایه آبرفت) میزان تنش‌های افقی و قائم افزایش می‌یابد.

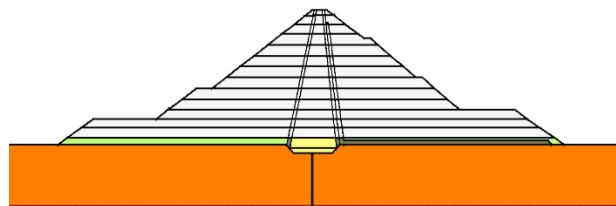
استفاده شده برای مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی یکی از ملاحظات است که در طراحی به‌عنوان پارامتری تأثیرگذار مورد توجه واقع می‌شود. محققان تحلیل یک لایه‌ای و چندلایه‌ای را برای یک سد همگن بر روی پی صلب ارزیابی نموده و به این نتیجه رسیدند که اختلاف بسیار فاحشی در مورد تغییر شکل‌ها در بدنه سدهای مدلسازی شده وجود دارد. ساخت مرحله‌ای سد، با تقسیم ارتفاع سد برای بزرگترین مقطع به ۱۴ لایه شبیه‌سازی شده که به طور میانگین هر لایه در ۵۰ روز با ارتفاع تقریباً ۵ متر در نظر گرفته شده است. وزن این لایه‌ها در محاسبه تنش‌ها و تغییر مکان‌ها لحاظ می‌گردد. با توجه به اینکه نتایج ایزاردقیق سد براساس زمان در اختیار می‌باشند بنابراین میزان تنش‌ها در انتهای دوره ساخت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مرحله تنش‌های قائم و موثر پس از هر اجرای لایه های خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل سد پس از احداث لایه خاکریزی ۱

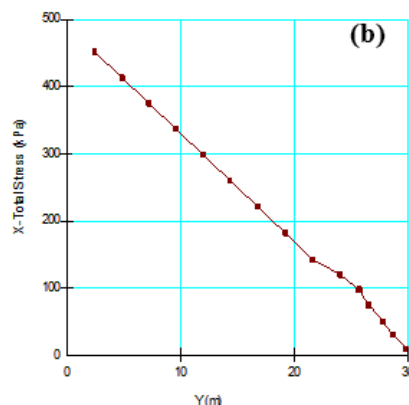
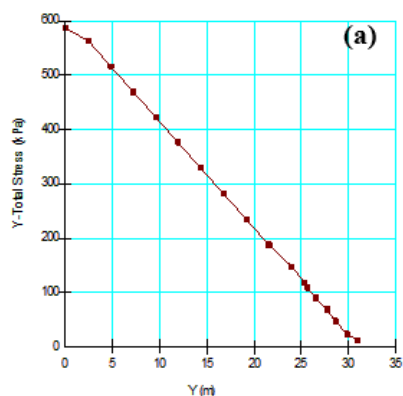
با توجه به احداث بدنه سد در ۱۴ لایه در این قسمت سد در تعدادی از لایه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد نتایج تحلیل لایه اول مطابق شکل‌های (۵) و (۶) می‌باشد. با توجه به شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش لایه‌های خاکریزی و ساخت سد میزان تنش قائم وافقی افزایش می‌یابد

تحلیل مرحله به مرحله خاکریز سد در مرحله ساخت

باتوجه به اجرای لایه‌به‌لایه سدهای خاکی و با در نظر گرفتن اثر تراکم در تغییر خواص مصالح، کاملاً واضح است که برای حصول نتایج دقیق باید سد خاکی به‌صورت لایه به لایه مدل گردد و بعد از اعمال هر لایه، لایه بعدی به‌صورت نیروی وزن روی بخش پیش‌ساخته قرار گیرد. در صورتی که تحلیل یک سد خاکی نظیر یک ساختمان یا یک سد بتنی به‌صورت یک مرحله‌ای انجام شود، تنش‌های حاصله غیر واقعی خواهند بود. برای شبیه‌سازی ساخت سد به‌صورت لایه به لایه، ابتدا تنش‌های موجود در پی سد به‌عنوان شرایط اولیه تعیین شده و سپس با صفر منظور کردن جابجایی پی، که ناشی از وزن پی است، شبیه‌سازی لایه‌های مورد نظر آغاز می‌گردد. نکته قابل توجه در این مرحله آن است که بدنه سد باید با تعداد لایه مناسبی شبیه‌سازی گردد. در عملیات اجرای واقعی ساخت لایه به لایه سدهای خاکی بسته به نوع خاک از تعداد زیادی لایه که معمولاً ضخامت ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر دارند، استفاده می‌گردد. اما در شبیه‌سازی عددی مرحله ساخت با المان‌های محدود، امکان در نظر گرفتن کلیه این لایه‌ها به دلیل وقت‌گیر بودن فرآیند شبیه‌سازی وجود ندارد. بنابراین تحلیل عددی با استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر و در مدت زمان کوتاه‌تر انجام می‌گیرد. از طرفی تعداد لایه‌های



شکل (۵): اختصاص مصالح به لایه اول خاکریزی در شبیه‌سازی نرم افزار Geostudio

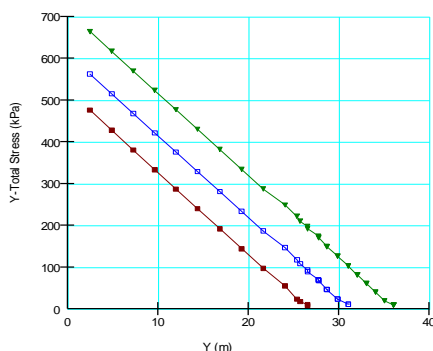


شکل(۶): تنش‌های قائم و افقی کل در وسط هسته در اثر احداث لایه ۱ a. تنش قائم و b. تنش افقی)

یافته است. نتایج تحلیل در دو مرحله اجرای سد در وسط هسته در اثر احداث لایه خاکریزی ۲ در شکل (۷) نشان داده شده است

تحلیل سد پس از احداث لایه خاکریزی ۲

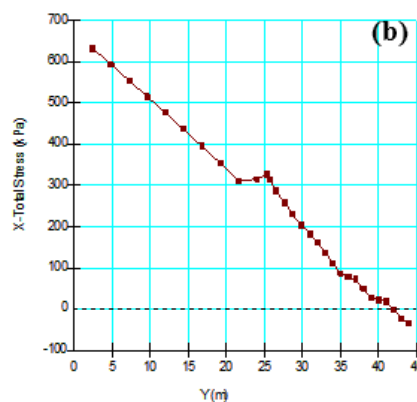
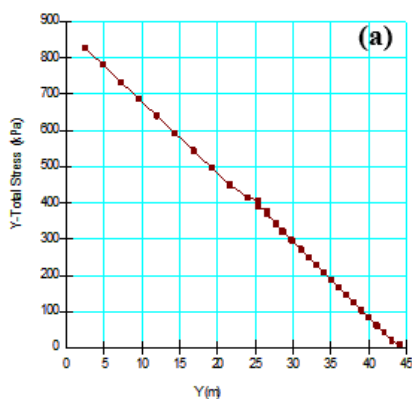
با احداث لایه دوم سد مروک نسبت به لایه اول میزان تنش قائم نزدیک به ۱۰۰ کیلو پاسکال افزایش



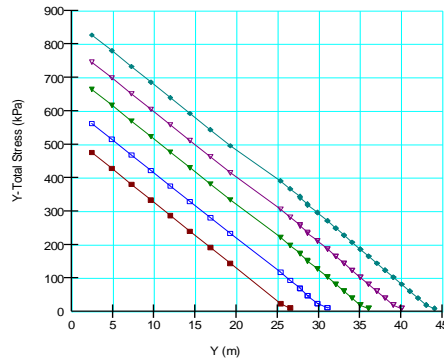
شکل(۷): تنش قائم کل در دو مرحله اجرای سد در وسط هسته در اثر احداث لایه خاکریزی ۲

تحلیل سد پس از احداث لایه خاکریزی ۴

با توجه به شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) مشخص شده است که با افزایش لایه‌های خاکریزی شده سد میزان تنش قائم و افقی افزایش می‌یابد.



شکل(۹): تنش قائم و افقی کل سد در وسط هسته در اثر احداث لایه خاکریزی ۴ a. تنش قائم و b. تنش افقی)



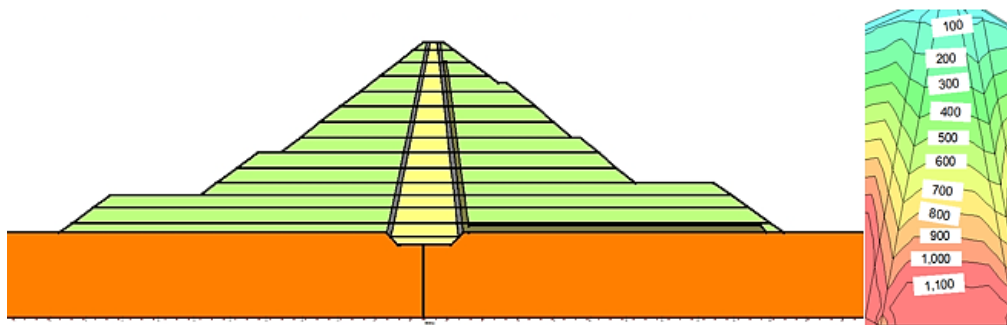
شکل (۱۰): تنش قائم کل سد در ۴ مرحله اجرای سد در وسط هسته

خاک و ساخت مرحله‌ای سد مروک از ۴ لایه به لایه ۱۲ میزان تنش قائم ۲ برابر شده است. بنابراین بایستی پس از ساخت هر مرحله از سد زمان کافی جهت نشست و تحکیم و همچنین زایل شدن فشار آب حفره‌ای به دلیل نفوذ پذیری کم هسته سد رعایت گردد و از ساخت سد با سرعت زیاد در زمان کم خودداری گردد. نتایج تحلیل پایان ساخت سد در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

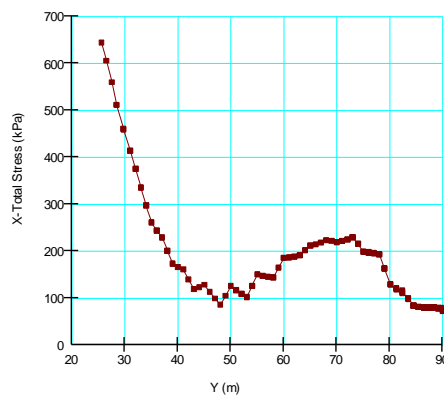
چنانچه در نتایج مدل‌سازی مشاهده می‌شود در تمامی نمودارها در محدوده کیلومتر ۲۰ تا ۲۵ به دلیل اینکه در قسمت بالای پرده آبنند واقع شده است تنش افقی روند کاهشی نداشته و ثابت می‌باشد.

تحلیل سد پس از پایان مرحله ساخت

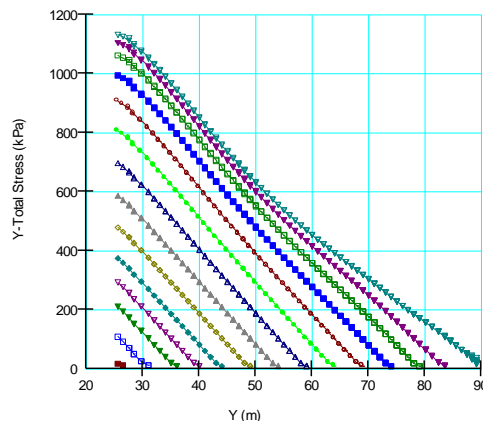
در لایه آخر تنش‌های موجود در سد و تفاوت آنها با لایه‌های ابتدایی بررسی می‌شود. با افزایش لایه‌های



شکل (۱۱): تنش قائم کل در وسط هسته در اثر اجرای ۱۴ لایه خاکریز سد



شکل (۱۲): تنش افقی کل در وسط هسته در اثر اجرای ۱۴ لایه خاکریز سد



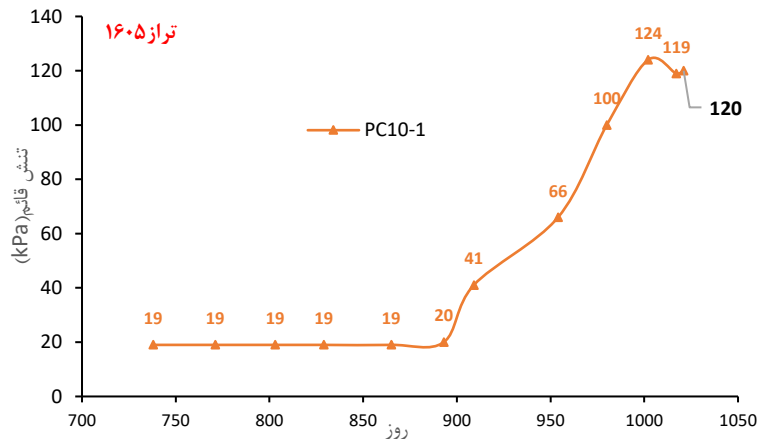
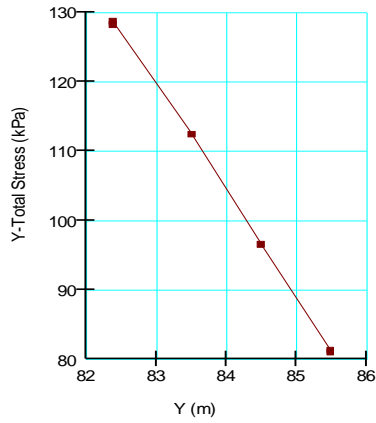
شکل (۱۳): تنش قائم کل در وسط هسته در اثر اجرای ۱۴ لایه خاکریز سد

چنانکه در شکل ۱۱ دیده می‌شود حداکثر تنش قائم در پایان ساخت سد در کف پوسته و در مجاورت گوشه‌های هسته اتفاق افتاده است. علاوه بر این، تنش‌های قائم در هسته سد دچار افت قابل توجهی شده‌اند که این پدیده قوس‌زدگی نامیده می‌شود.

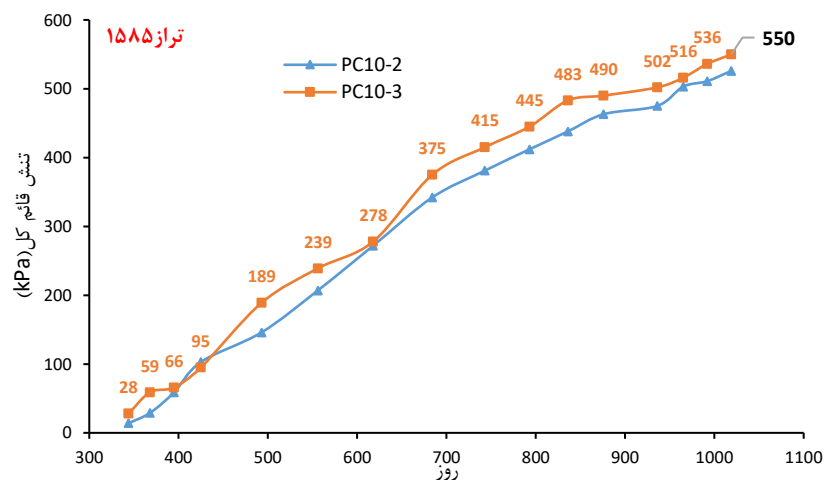
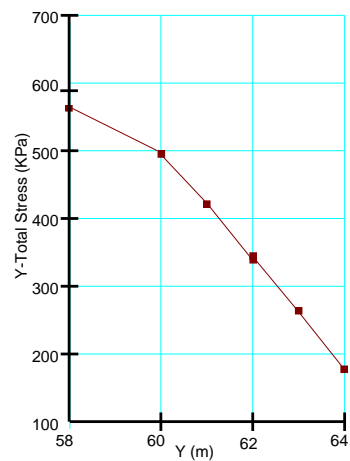
مقایسه نتایج ابزار دقیق با Geostudio

باتوجه به اینکه خروجی نرم‌افزار Geostudio مربوط به پایان مرحله ساخت می‌باشد، بنابراین خروجی‌های نرم‌افزار با نتایج ابزار دقیق در پایان مرحله ساخت یعنی در سال ۱۳۹۱ و پس از گذشت ۱۲۰۰ روز از شروع ساخت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که ساخت سد به اتمام

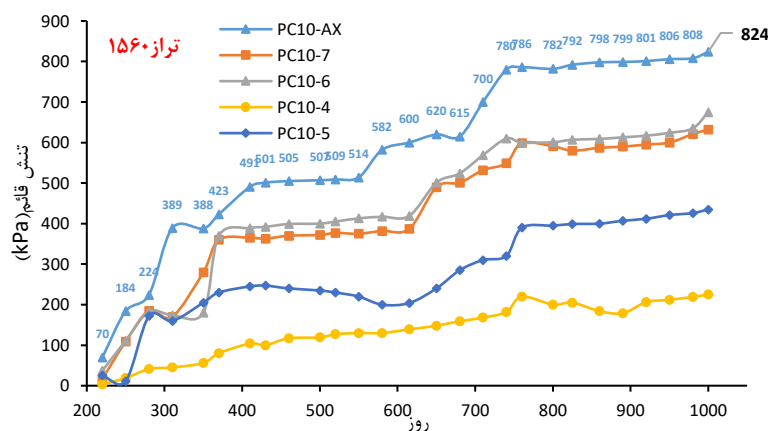
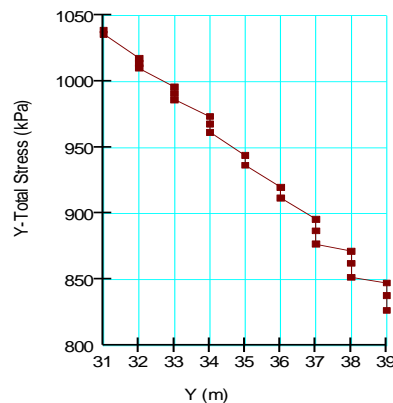
رسیده است و هنوز آبیگری نشده است. در شکل (۱۴) نتایج تغییرات تنش کل ابزار دقیق و نرم‌افزار Geostudio در تراز بالای سد (۱۶۰۵) نشان داده شده است. میزان ماکزیمم تنش قائم قرائت شده در پیزومتر بالای هسته سد از مرحله ساخت ۱۲۰ کیلوپاسکال می‌باشد که نتایج به دست آمده از نرم‌افزار نیز ۱۲۵ کیلو پاسکال می‌باشد که خطایی زیر ۵ درصد دارد. در شکل (۱۵) نیز تطابق خوبی در حدود ۹۵ درصد بین نتایج ابزار دقیق و نرم‌افزار دیده می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۱۶) میزان اختلاف تنش قائم در ابزار دقیق PC₁₀ در پایین هسته برابر با ۱۵۰ کیلو پاسکال می‌باشد که این میزان خطا می‌تواند ناشی از تغییرات فشار آب حفره‌ای وابسته به زمان در هسته سد باشد.



شکل (۱۴): تغییرات تنش قائم کل در سلول‌های فشار تراز بالای هسته سد (ابزار دقیق و Geostudio)



شکل (۱۵): تغییرات تنش قائم کل در سلول‌های فشار تراز میانی هسته سد (ابزار دقیق و Geostudio)



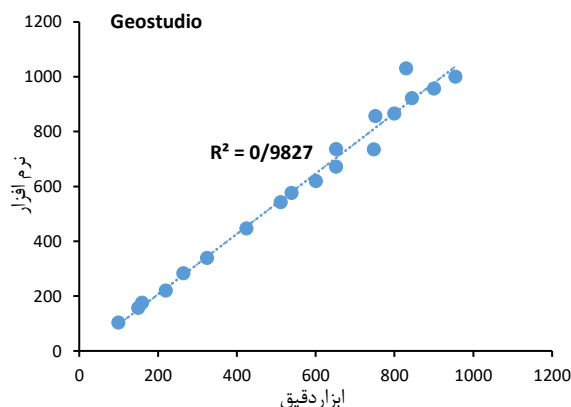
شکل (۱۶): تغییرات تنش قائم کل در سلول‌های فشار تراز پایین هسته سد (ابزار دقیق و Geostudio)

می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک، نزدیک است. در محاسبات هرچقدر مقدار R^2 به عدد یک نزدیکتر باشد کارایی بیشتر مدل را نشان می‌دهد. در واقع چنانچه مقدار R^2 معادل یک گردد برازش کاملی را نشان می‌دهد و بیانگر انطباق کامل بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده است. با اعمال رابطه (۱) بر روی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده مقدار ضریب تبیین 0.9827 به دست آمد که نشانگر همخوانی نتایج مربوط به فشار آب منفذی برای مقادیر ابزار دقیق و مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد (شکل ۱۷).

با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که در بالای هسته سد تطابق بیشتری بین نتایج ابزار دقیق و نرم افزار وجود دارد که می‌تواند ناشی از اثر تحکیم در لایه‌های زیرین باشد. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد نتایج ابزار دقیق و مدل نرم افزار از رگرسیون چند متغیره معیار ضریب تبیین (رابطه ۱) استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_{ave})^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱) n تعداد نمونه‌هاست، P_i و O_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر پیش‌بینی شده و O_{ave} میانگین مقادیر مشاهداتی است. ضریب تبیین، نشان



شکل (۱۷): نمودار پراکنش برای مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده (Geostudio)

میزان قوس‌زدگی درون هسته خاکی از رابطه (۲) زیر به دست می‌آید:

$$= \frac{\sigma_v}{\gamma \cdot h} \quad (2)$$

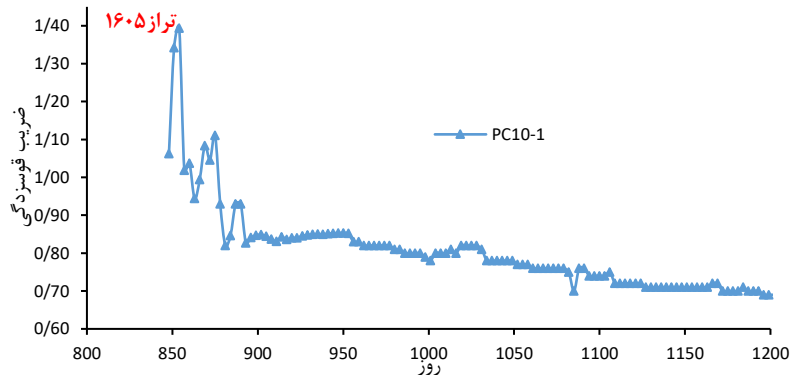
A_r

که A_r : ضریب قوس‌زدگی^۱، σ_v : تنش کل قائم واقعی داخل هسته در نقطه مورد نظر، γ : وزن مخصوص مصالح هسته و h : ارتفاع خاکریز در بالای نقطه مورد نظر است. نسبت‌های کمتر از ۱ ضریب مذکور، دال بر انتقال بار هسته به روی ناحیه تبدیل و پوسته می‌باشد، در حالی که نسبت‌های بزرگتر از ۱ نشان دهنده انتقال بار از نواحی تبدیل و پوسته بر روی هسته است. در صورتی که تنش‌ها در رقوم ارتفاعی در اثر قوس‌زدگی به مقادیری کمتر از فشار آب در همان ارقام کاهش پیدا کند ممکن است به شکست هیدرولیکی یا تشکیل ترک‌های ناشی از فشار آب زیاد منجر گردد و در این صورت امکان رگاب وجود دارد. درسد مروک با استفاده از نتایج ابزار دقیق‌های نصب شده و نتایج تنش قائم تحلیل عددی بر اساس نسبت این دو تنش بر یکدیگر پدیده قوس‌زدگی بررسی خواهد شد.

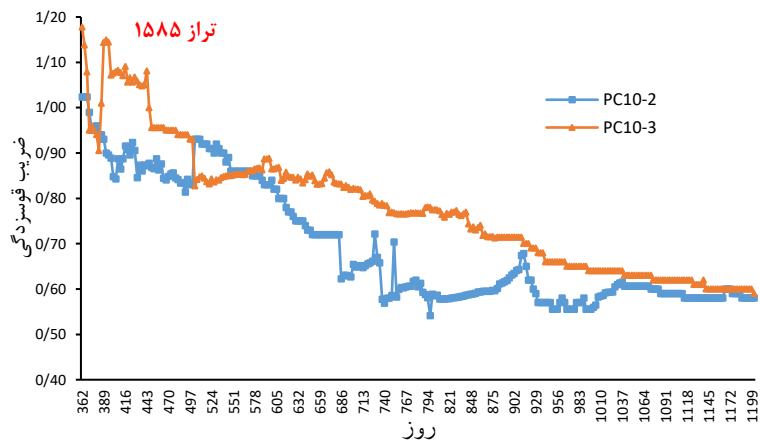
بررسی پدیده قوس‌زدگی در سد مروک

در سدهای خاکی غیر همگن تمایل هسته نرم به نشست بیشتر (نسبت به پوسته سخت مجاور) تحت اثر وزن منجر به انتقال بخشی از وزن هسته به پوسته سخت مجاور می‌شود. در نتیجه در هسته تنش قائم از سربار کمتر و در پوسته مجاور بالعکس بیشتر می‌باشد. این انتقال وزن از هسته به پوسته به قوس‌زدگی هسته به روی پوسته موسوم است. با کاهش فشار قائم در هسته و به دنبال آن آبیگری سد و کاهش تنش موثر امکان نفوذ آب، شکست هیدرولیکی و تخریب سد وجود دارد. چنانچه بدنه سد از مناطق مختلف دارای مصالح متفاوت تشکیل شده باشد، عدم تطبیق در تغییر شکل‌پذیری این مصالح مختلف ممکن است منجر به ایجاد تغییر شکل‌های قائم شود. در سدهای از نوع غیرهمگن با هسته مرکزی معمولاً نشست هسته رسی ممکن است منجر به محبوس شدن و در واقع آویزان شدن آن در بین مصالح پوسته بالادست و پایین دست شود و در واقع پدیده قوس‌زدگی را ایجاد کند. این امر به خاطر تفاوت در تراکم‌پذیری هسته نسبت به پوسته اتفاق می‌افتد.

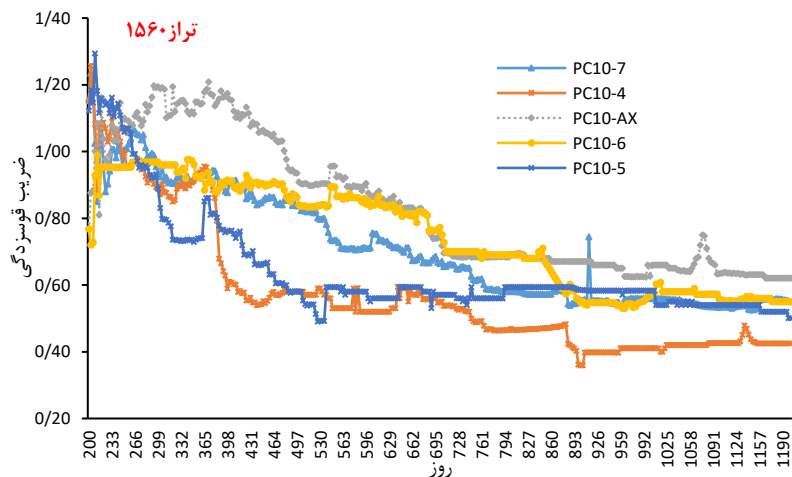
¹ Arching ratio



شکل(۱۸): تغییرات ضریب قوس زدگی نسبت به زمان برای سلول‌های فشار در تراز بالایی هسته سد



شکل(۱۹): تغییرات ضریب قوس زدگی نسبت به زمان برای سلول‌های فشار در تراز میانی هسته سد



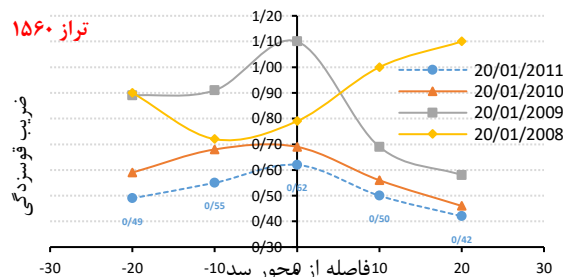
شکل(۲۰): تغییرات ضریب قوس زدگی نسبت به زمان برای سلول‌های فشار در تراز پایینی هسته سد

دو سلول فشارسنج در قسمت بالا و پایین از محور سد در هسته جانمایی شده است که نتایج بیانگر ضریب قوس زدگی کمتر در قسمت پایین دست می‌باشد به نحوی که مقادیر از $1/0.2$ به $0/0.58$ کاهش یافته است در حالی که در بالادست مقادیر در محدوده $1/0.18$ تا $0/0.59$ قرار دارد. همچنین در تراز ۱۵۶۰ تعداد ۵ سلول فشارسنج جانمایی شده است که بالاترین ضریب

باتوجه به شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) مشاهده می‌شود که نتایج ضریب قوس زدگی ابزار دقیق نسبت به زمان در سه تراز مختلف روند کاهشی داشته است. با توجه به نتایج فشارسنج نصب شده در تراز ۱۶۰۵ در مرکز هسته سد مشاهده می‌گردد که ضریب قوس زدگی در ابتدای ساخت از مقدار $1/0.39$ به $0/0.62$ در پایان ساخت (حدود سه سال) کاهش یافته است (شکل ۱۸). در تراز میانی سد



دارد. همانگونه که انتظار می‌رود، ضریب قوس‌زدگی و به عبارت دیگر نسبت تنش قائم اندازه‌گیری شده به تنش قائم محاسباتی با افزایش تراز خاکریزی کاهش می‌یابد. بیشترین درصد قوس‌زدگی از ابتدا تا پایان مرحله ساخت برابر ۵۸٪ و در یک سوم ارتفاع هسته از کف رخ داده است. در واقع نسبت قوس‌زدگی بحرانی در شرایط پایان مرحله ساخت برابر ۰/۴۲ است و در سایر ترازها در محدوده ۰/۷۰-۰/۶۰ قرار دارد. با توجه به اینکه احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی در نسبت‌های قوس‌زدگی کمتر از ۰/۶ (درصد قوس‌زدگی بیشتر از ۴۰ درصد) می‌باشد، می‌توان گفت سد از لحاظ قوس‌زدگی در پایان ساخت در حد نسبتاً متعارفی قرار دارد و از نظر گسیختگی مشکلی نخواهد داشت. به‌طورکلی نتایج تحلیل‌ها رفتار مناسب سد را در برابر شرایط قوس‌زدگی تأیید می‌نماید.



شکل (۲۱): تغییرات ضریب قوس‌زدگی در عرض هسته در زمان‌های مختلف در تراز ۱۵۶۰

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده است تا با توجه به داده‌های به‌دست آمده از ابزار دقیق نصب شده در بدنه سد مروک و پردازش این داده‌ها به کمک تحلیل عددی اطلاعات بیشتری در مورد رفتار سد پس از پایان ساخت به‌دست آورد. با مقایسه نتایج مقادیر تنش قائم کل اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزارها می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه مقادیر تنش قائم کل به‌دست آمده از آنالیز عددی در فشارسنج‌هایی که در یک تراز نصب شده‌اند، تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارند، نرم افزار عملکرد مناسبی داشته است. همچنین با بررسی اختلاف موجود در مقادیر فشار کل به‌دست آمده از ابزار دقیق و از طرفی شرایط عادی تراوش و آب حفره‌ای می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از این اختلاف مقادیر می‌تواند ناشی از اختلاف مقادیر وزن

قوس‌زدگی مربوط به فشارسنج PC10AX می‌باشد که در خط محور سد جانمایی شده است. با توجه به تأثیر زیاد تحکیم بر شدت قوس‌زدگی، سرعت ساخت باید به گونه‌ای انتخاب شود که قبل از اجرای لایه‌های فوقانی بخشی از تحکیم لایه‌های زیرین انجام شده باشد. از نظر مصالح سد، انتخاب فیلتر ضعیف بین هسته و پوسته می‌تواند ممکن‌ترین راه حل جهت کاهش قوس‌زدگی باشد. به علاوه انتخاب مصالح با ضریب پواسون بالا قوس‌زدگی را کاهش می‌دهد. به‌طورکلی میزان قوس‌زدگی در ارتفاع سد متغیر است. شدت قوس‌زدگی و محل حداکثر پارامتر قوس‌زدگی به ارتفاع سد، تعداد لایه‌های انتخاب شده (جهت نشان دادن ساخت تدریجی سد)، نوع رفتار فرض شده برای مصالح، ضخامت و شیب هسته، شیب پوسته، سختی نسبی هسته و پوسته (نسبت مدول‌های دگر شکلی و ضرایب پواسون) بستگی

با توجه به شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که درصد قوس‌زدگی فشارسنج‌هایی که در تراز یکسان (همتراز) در هسته نصب شده است متفاوت است به نحوی که جناح پایین‌دست هسته رسی نسبت به بالادست قوس‌زدگی بالاتری (ضریب قوس‌زدگی پایین‌تر) را نشان داده است. این تغییرات به جهت مجاورت فشارسنج‌های پایین دست با ناحیه فیلتر و زهکش زیر هسته رسی سد است در حالیکه در بالادست هسته، یک ناحیه فیلتر با عرض کمتر وجود دارد. شایان ذکر است که یک ناحیه فیلتر با عرض ۲/۵ متر در بالادست هسته و دو ناحیه فیلتر و زهکش هر کدام به عرض ۳ متر در پایین‌دست هسته جانمایی گردیده است.



تأثیر زیاد تحکیم بر شدت قوس‌زدگی، سرعت ساخت باید به گونه‌ای انتخاب شود که قبل از اجرای لایه‌های فوقانی بخشی از تحکیم لایه‌های زیرین انجام شده باشد. نتایج به‌دست آمده از ابزار دقیق و تحلیل‌های نرم‌افزاری حاکی از افزایش مقدار تنش در خاک با افزایش ارتفاع خاکریزی است. با افزایش ارتفاع هسته قائم مقدار قوس‌زدگی کاهش می‌یابد ولی هیچ‌گاه به طور کامل از بین نمی‌رود. در قسمت‌های پایینی سد میزان قوس‌زدگی بیشتری مشاهده شده است. از نظر مصالح سد، انتخاب فیلتر با ضریب پواسون بالا بین هسته و پوسته بهترین روش برای کاهش میزان قوس‌زدگی می‌باشد.

مخصوص مصالح در طراحی و واقعیت باشد و بخشی دیگر به احتمال بروز خطا و یا عملکرد نامناسب این ابزار مربوط می‌شود. با افزایش خاکریزی مقادیر تنش کل در حال افزایش بوده و نتایج بدست آمده از ابزار دقیق و تحلیل عددی نیز با هم سازگارند. علت افزایش تنش کل در داخل هسته افزایش مداوم سربارهای ناشی از افزایش ضخامت خاکریزی می‌باشد. میزان قوس‌زدگی در ارتفاع سد متغیر است. شدت قوس‌زدگی و محل حداکثر پارامتر قوس‌زدگی به ارتفاع سد، تعداد لایه‌های انتخاب شده (جهت نشان دادن ساخت تدریجی سد)، نوع رفتار فرض شده برای مصالح، ضخامت و شیب هسته، شیب پوسته، سختی نسبی هسته و پوسته (نسبت مدول‌های دگرشکلی و ضرایب پواسون) بستگی دارد. با توجه به

منابع

- جمال، ع.، نیکو، م.ر.، کریمی، ا.، ۱۳۹۰. افزایش ایمنی در برابر وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی غیر همگن، هسته رسی قائم یا مایل، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی. حشمتی، ع. ا.، یوسفی، م.، ۱۳۸۸. تحلیل عددی سد دریک و تأثیر پارامترهای مدل موهر-کولمب بر تنش‌های نرمال هسته رسی، مجله عمران شریف، ۳۸ (۲): ۶۹-۶۱
- عساکره، ع.، آهنگ، م.، ۱۳۹۶. بررسی عددی پدیده قوس‌زدگی در هسته سد خاکی غیرهمگن بافت واقع در استان کرمان، عمران مدرس، ۱۷ (۵): ۱۶۸-۱۶۱.
- میرقاسمی، ع. ا.، توللی، ع.، ۱۳۷۹. تحلیل سه بعدی انتقال تنش در هسته رسی سدهای خاکی واقع در دره‌های تنگ، چهارمین کنفرانس سدسازی، تهران، ایران.
- نوری قیداری، م.ح.، علی‌الهی، ح.، ملائی، ر.، ۱۳۹۳. بررسی تنش کل در سدخاکی گلابر با استفاده از تحلیل عددی و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق، همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، تبریز، ایران.

- Duncliff, j. 1993. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Published by Wiley.
- Gao, J.L., Chen, Y.X., 2012. Study on stress of closed cut-off wall in earth-rock Dam reinforcement
- He, X.X., Wang, R.J., YAN, F., FAN, Y.X., 2016. Effect of seepage-stress coupling on
- Kulhawy, F.H, 1976. Load Transfer and Hydraulic Fracturing in Zoned Dams. Journal of Geotechnical Engineering, 102(9): 963-967.
- Liu, S., Wang, L., Wang, Z.J., Bauer, E., 2016. Numerical stress-deformation analysis of cut-off wall in clay-core rock fill dam on thick overburden, Water
- 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, pp. 789-800.
- Overburden Dam. Advanced Materials Research, 393-395: 463-466
- Science and Engineering, 9(3): 219-226
- Sherard, J.L, 1986. Hydraulic Fracturing in Embankment Dam. Journal of Geotechnical Engineering, 112(100): 905-927.



- Skibin, G.M., Chizh, I.N., 2016. Evaluation of Cutoff Walls Influence on Stresses Distribution Stress and deformation of cutoff wall. 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering, Shaanxi, China, 843-850.
- Szostak, A., Massie'ra, M. 2005. Use of deformation monitoring results in solving geotechnical problems case studies. Journal of engineering geology, 97:3-12.
- Zhang, B., 2012. The Stress and Displacement Analysis of the Cut-Off Wall for the Deep under Adjacent Foundations. International Conference on Industrial Engineering, Novocherkassk, Russia, 150: 2261-2265.



Evaluation of Total Stress and Arching Coefficient by Back Analysis with Result of Stepwise Construction (Case Study: Marvak Earth Dam)

Mehdi Komasi¹, Behrang Beiranvand² Ahmadreza Mazaheri³

Abstract

Arching in core dam can reduce tension and create scour and clay scrub damage, so it is always a major issue in the earth's dams. In this research, Geostudio software, which is a powerful software for limited components, is used to study the total stress and arching coefficient of Marvak earth dam. In modeling the dam, a Mohr-Coulomb behavioral model has been used and the effect of the construction has been considered. By analyzing the stress-strain during the construction of the dam and the effect of the construction, the results of total stress and arching coefficient were evaluated and compared with the results of the instrumentation. Multivariate regression and coefficient of determination were used to fit the observed and predicted data and the value of $R^2 = 0.9834$ was obtained, which is a very good agreement between the observed and predicted arching data. The results indicate that as the embankment increases, the total stresses also increase, and the highest arching percentage from the beginning to the end of the construction phase is 58 percent and at the third of the core of the foundation. Due to the great effect of consolidation on the arching severity, the speed of construction should be chosen in such a way as to be part of the consolidation of the underlying layers before the upper layers are applied. It is also possible to reduce arching by choosing the appropriate filter between the core and the shell and using materials with a Poisson's ratio.

Keywords: Back Analysis, Geostudio Software, Marvak Earth Dam, Stress, Arching Coefficient

¹ Assistant Professor, Water Engineering and Hydraulic Structure Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran, 09166624180, komasi@abru.ac.ir
Corresponding Author

² Ms. Graduated, Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran, 09116752101, behrang220@gmail.com

³ Assistant Professor, Water Engineering and Hydraulic Structure Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran, 09122861728, a.mazaheri@abru.ac.ir

Research Paper

Mehdi Komasi , Behrang Beiranvand *, AhmadReza Mazaheri Evaluation of Total Stress and Arching Coefficient by Back Analysis with Result of Stepwise Construction (Case Study: Marvak Earth Dam)

Mehdi Komasi¹,Behrang Beiranvand^{2*},AhmadReza Mazaheri³

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran

² Ph.D. candidate in Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Qom, Qom, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran



10.22125/IWE.2020.179024.1095

Received:
April.16.2020
Accepted:
February.23.2021
Available online:
March.13.2022

Keywords:

**Back Analysis,
Geostudio Software,
Marvak Earth Dam,
Stress, Arching
Coefficient**

Abstract

Arching in the core dam can reduce tension and create scour and clay scrub damage, so it is always a major issue in the earth's dams. In this research, Geostudio software, which is a powerful software for limited components, is used to study the total stress and arching coefficient of Marvak earth dam. In modeling the dam, a Mohr-Coulomb behavioral model has been used and the effect of the construction has been considered. By analyzing the stress-strain during the construction of the dam and the effect of the construction, the results of total stress and arching coefficient were evaluated and compared with the results of the instrumentation. Multivariate regression and coefficient of determination were used to fit the observed and predicted data and the value of $R^2=0.9834$ was obtained, which is a very good agreement between the observed and predicted arching data. The results indicate that as the embankment increases, the total stresses also increase, and the highest arching percentage from the beginning to the end of the construction phase is 58 percent and at a third of the core of the foundation. Due to the great effect of consolidation on the arching severity, the speed of construction should be chosen in such a way as to be part of the consolidation of the underlying layers before the upper layers are applied. It is also possible to reduce arching by choosing the appropriate filter between the core and the shell and using materials with a Poisson's ratio.

1. Introduction

Behavior measurement of dams leads to the evaluation of design parameters, risk mitigation, quality control during construction, as well as careful evaluation of stability in the early period of operation

* **Corresponding Author:** Name

Address: Department, University, Country,

Email: Academic Email

Tel: Number

and long-term operation. Due to the absence of external loads during the construction of stress changes, pore pressure and settlement are the most important factors that can be evaluated.

2. Materials and Methods

To analyze the stress and strain in this research, Geostudio software based on finite elements and the body structure of the dam has been used. This program works on the assumption of Darcy's law and for two-dimensional flow with the help of the Laplace equation. The boundary conditions considered for the model include limiting the vertical displacement on the bedrock and limiting the horizontal displacement at the two ends of the model. The border conditions include zero flow at the vertical boundaries and the lower horizontal boundary. The potential line is defined in the downstream level of the stream floor code and for the upstream, the potential line in the normal level is determined according to the water level of the reservoir. In the analysis, 2939 elements and 3018 nodes in the dam body have been used. In Marvak Dam, due to the increase of pore water pressure in the core of the dam and also the presence of a sealing wall at different levels, the network of elements in the core and the cut-off wall is considered smaller than other points. Also, square elements in the finite element network and the standard boundary conditions in the program for model boundaries are used. Results

3. Discussion and Conclusion

Given that the output of Geostudio software is related to the end of the construction phase, so the output of the software is evaluated with instrumentation results at the end of the construction phase, ie in 2012 and after 1200 days from the start of construction that the construction of the dam is completed and still It is not impounding. The results of stress changes of the whole instrument and Geostudio software are shown in the upper level of the dam (1605). The maximum amount of vertical stress read in the piezometer above the dam core is 120 kPa from the construction stage, and the results obtained from the software are 125 kPa, which has an error of less than 5%. There is also a good 95% correlation between the results of the instrument and the software. The difference in vertical stress in the PC10 instrument at the bottom of the core is 150 kPa, which can be due to time-dependent pore water pressure changes in the dam core.

4. Six important references

Dunnicliff, j. 1993. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Published by Wiley.

Gao, J.L., Chen, Y.X., 2012. Study on the stress of closed cut-off wall in earth-rock Dam reinforcement

He, X.X., Wang, R.J., YAN, F., FAN, Y.X., 2016. Effect of seepage-stress coupling on

Kulhawy, F.H, 1976. Load Transfer and Hydraulic Fracturing in Zoned Dams. Journal of Geotechnical Engineering, 102(9): 963–967.

Liu, S., Wang, L., Wang, Z.J., Bauer, E., 2016. Numerical stress-deformation analysis of cut-off wall in clay-core rockfill dam on thick overburden, Water

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, pp. 789-800.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We would like to thank two anonymous reviewers at Research Ethics and two anonymous reviewers at Theoria for commenting on earlier versions of this paper.