نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۸۱۱-۷۹۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 795-811

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل عددی پایداری شیروانی‌های سد خاکی همگن گلستان در شرایط مختلف مخزن

شعبان رسولی[۱]، عبدالرضا ظهیری[۲*]، مهدی مفتاح هلقی[۳]، فرزین سلماسی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

چکیده

اگرچه اندازه‌گیری روزانه فشار آب منفذی در نقاط مختلف سد خاکی، یکی از راهکارهای ارزیابی پایداری شیب‌ها و شیروانی‌ها در مراحل ساخت و بهره‌برداری است، اما برای افزایش دقت تحلیل‌ها به‌ویژه در حالت وقوع پدیده‌های هیدرولوژیکی حدی باید رفتار سد مدل‌سازی شود. مدل‌سازی رفتار سدهای خاکی به دو صورت عددی (فرایندمحور) و یادگیری ماشین (داده‌محور) قابل انجام است. در این تحقیق، وضعیت پایداری شیروانی‌های سد خاکی همگن گلستان در شرایط مهم و بحرانی مانند تراوش دائمی، انتهای ساخت و افت سریع آب مخزن و در سه حالت مخزن پر، مخزن نیمه‌پر و مخزن خالی به‌کمک نرم‌افزار GeoStudio مدل‌سازی شده است. تحلیل‌های انجام گرفته بر مبنای روش تعادل حدی اسپنسر می‌باشد. همچنین تحلیل لرزه‌ای این سد به روش شبه‌استاتیک و در ترکیب با شرایط تراوش دائمی و انتهای ساخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که در حالت مخزن پر و در شرایط تراوش دائمی، انتهای ساخت و افت سریع آب مخزن، حداقل ضریب اطمینان به‌دست آمده از محاسبات به‌ترتیب ۱/۵، ۱/۳۲ و ۱/۶۲ می‌باشند که همگی برابر یا بزرگتر از ضریب اطمینان مجاز می‌باشند. تحلیل اثر زمین‌لرزه به روش شبه‌استاتیک نشان داد که کمینه ضرایب اطمینان شیروانی‌های سد گلستان در دو حالت افت سریع تراز سطح آب مخزن و انتهای ساخت به‌ترتیب ۱/۴۶ و ۱/۳۵ می‌باشند. این نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در هر دو این حالت‌ها، پایداری شیروانی‌های این سد با حاشیه ایمنی یا اطمینان بسیار کمی همراه است.

واژه‌های کلیدی: پایداری شیروانی، تخلیه سریع مخزن سد، سدهای خاکی همگن، سد گلستان، نرم‌افزار GeoStudio

مقدمه

امروزه با توجه به تغییرات شدید اقلیمی در همه نقاط دنیا و اثرات هر پدیده اقلیمی بر پدیده‌های دیگر، وقایع حدی مثل وقوع سیلاب‌ها و خشکسالی‌های متناوب و یا مستمر، به موضوعی طبیعی و همه‌گیر تبدیل شده است. به‌طور مثال، بعد از وقوع سیلاب‌های شدید ۱۳۹۸-۱۳۹۷ در کل کشور، تقریباً خشکسالی بر تمام نقاط کشور حاکم شده است و با این روند، چه بسا وقوع سیلاب‌های شدید در آینده‌ای نزدیک دور از انتظار نباشد. در این شرایط، راهکارهای زیادی باید مورد توجه قرار گیرند تا بتوان این وضعیت ناپایدار را مدیریت نمود. یکی از راهکارهایی که هم در شرایط خشکسالی و هم در شرایط سیلاب (پرآبی) برای مدیریت بحران کمک شایانی می‌کند، احداث سدهای مخزنی بتنی یا خاکی است (رسولی و همکاران، ۱۴۰۴). مخازن سدها در شرایط وقوع سیل، ضمن ذخیره حجم قابل توجهی از سیلاب، باعث روندیابی موج سیلاب ورودی به مخزن نیز شده و دبی اوج سیلاب خروجی را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. نکته جالب توجه این است که سدها حتی با وجود پربودن مخزن، این قابلیت را دارند که تا حدود زیادی دبی سیلاب در پایین‌دست رودخانه را کاهش دهند (Elfeki et al., 2014). مخازن سدها در شرایط کم-آبی و خشکسالی نیز از مهمترین راهکارهای مدیریت تامین آب شرب و محیط‌زیست می‌باشند. به‌طور مثال، مخازن سدهای تامین‌کننده آب شرب تهران (طالقان، کرج، ماملو، امیرکبیر و لار) نقش کاملاً واضح و مهم خود در مدیریت بحران کم‌آبی شهر تهران در تابستان ۱۴۰۴ را نشان دادند. البته این موضوع به هیچ‌وجه احداث سدهای مخزنی به-صورت بی‌رویه و خارج از ضوابط اکوسیستمی و محیط زیستی را تایید و توجیه نمی‌کند. این مورد به ویژه برای تامین آب اراضی کشاورزی و افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی قابل توصیه و پیشنهاد نیست. بنابراین و باتوجه به افزایش اهمیت سدهای مخزنی، کنترل

۱- دانشجوی مقطع دکتری علوم و مهندسی آب- سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۳ -استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: azahiri@gau.ac.ir ;zahiri.areza@gmail.com)

مستمر ایمنی و پایداری این سازه‌ها در تمام مراحل حساس شامل ساخت، اولین آبگیری و دوره بهره‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این موضوع از این نظر مهم است که ساخت سدها مستلزم هزینه بسیار بالایی بوده و تبعات ناشی از تخریب و یا شکست آنها، بسیار گسترده و مخرب می‌باشد (Beiranvand and Komasi, 2021). بنابراین مراقبت از سدهای مخزنی و تضمین ایمنی آنها، یک ضرورت جدی است (دقیق و همکاران، ۱۳۹۴). این مراقبت برای سدهای خاکی در مقایسه با سدهای بتنی از اهمیت بیشتری برخوردار است. سدهای خاکی شامل مصالح متنوعی مانند خاک رس، ماسه، شن و قلوه‌سنگ می‌باشند. با توجه به تنوع این مصالح در بدنه و هسته سد و نیز اثرات متقابل حجم عظیم آب مخزن با مصالح خاکی، رفتار این سازه در شرایط مختلف هیدرولیکی و ژئوتکنیکی (پی) پیچیده‌تر از سدهای بتنی بوده و به همین دلیل ارزیابی ایمنی و پایداری این سازه‌ها، نیازمند تحلیل‌های ویژه‌ای است (یحیایی‌نیا، ۱۳۹۹؛ عالی‌محمدی پیرانشاهی و همکاران، ۱۴۰۰). یکی از راه‌حل‌های نسبتاً ساده برای تخمین سریع فاکتور پایداری سد، اندازه‌گیری‌های روزانه فشار آب منفذی در نقاط مختلف سد خاکی است (Pagano et al., 2010; Desideri et al., 2013). این تغییرات می‌تواند بیانگر پایداری شیب‌ها و شیروانی‌های سد خاکی در هر دو مرحله ساخت سد و بهره‌برداری یا سیستم پایش باشد. به همین دلیل و طبق یک برنامه دقیق و مشخص، اقدام به نصب ابزار دقیق در مناطق حساس سد نموده و در طی مراحل اجرای سد و بعد از آن، مواردی از قبیل مقادیر تنش (میزان فشار وارده)، تغییر شکل و مقدار جابجایی (شامل میزان نشست سازه‌ای و میزان انحراف) سازه پایش می‌شود (Seyed-Kolbadi et al., 2020). با این وجود، نتایج به‌دست آمده از ابزار دقیق سدها ممکن است دارای دقت محدودی باشد و ضمناً برای پیش‌بینی وضعیت پایداری سد در آینده و به‌ویژه برای پدیده‌های هیدرولوژیکی حدی مثل وقوع سیلاب‌ها (افزایش سریع تراز سطح آب در مخزن و یا لزوم تخلیه سریع مخزن)، خشکسالی (کاهش شدید تراز سطح آب در مخزن) و نیز زلزله جوابگو نیستند. به همین دلیل، اغلب از راهکار مدل‌سازی رفتار سد در شرایط مختلف استفاده می‌شود. مدل‌سازی رفتار سدها به دو صورت فرایندمحور (عددی) و داده‌محور (یادگیری ماشین) قابل انجام است.

علی‌رغم این‌که حدود ۷۷ درصد از سدهای بزرگ دنیا، از نوع خاکی و یا خاکی-سنگریزه‌ای هستند (Adamo et al., 2020)، اما تاکنون تحقیقات و مطالعات محققین در خصوص سدهای خاکی کمتر از سدهای وزنی-بتنی است (El Bilali et al. 2021). مطالعات مرتبط با سدهای مخزنی عمدتاً بر مدل‌سازی عددی، مدل‌های بهینه‌سازی و استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین متمرکز است. مدل‌های بهینه‌سازی معمولاً برای کاهش هزینه‌های طراحی و اجرای بدنه و سازه‌های سدها و استفاده در زمان قبل از ساخت سد پیشنهاد می‌شوند. مطالعات مبتنی بر مدل‌های یادگیری ماشین با وجود دقت مناسب و کاربرد در مراحل بهره‌برداری از سدها، دارای این محدودیت هستند که نمی‌توانند تغییرات مکانی و نوسانات برخی از پارامترهای مهم سدهای خاکی (مثل دبی نشت) در نقاط بحرانی را که متاثر از عوامل محیطی مانند وقایع هیدرولوژیکی، تغییرات سریع تراز آب زیرزمینی، و زلزله هستند، با دقت مناسبی برآورد نمایند (Panthulu et al., 2001; Fremion et al., 2016). به همین دلیل، در سال‌های اخیر مدل‌سازی عددی رفتار سدها و پیش‌بینی رفتار آنها به‌کمک نرم‌افزارهای یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی کاربرد و رواج بیشتری داشته است. سدهای خاکی به لحاظ هندسی، سازه‌هایی نسبتاً ساده می‌باشند اما مصالح تشکیل‌دهنده آنها دارای تنوع زیادی است. همچنین رفتار غیرخطی این مصالح در بارگذاری‌ها و باربرداری‌های مختلف و نیز در شرایط زهکشی شده یا نشده، انجام مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب را به‌منظور پیش‌بینی رفتار سد ضروری می‌نماید (قره و همکاران، ۱۳۹۸).

اسدیان و همکاران (۱۳۹۴)، نتایج داده‌های ثبت شده از ابزار دقیق سد دوستی در استان خراسان رضوی را با مدل رفتاری شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار GeoStudio مقایسه نموده و همخوانی قابل قبول و منطقی نتایج نرم‌افزار را اثبات نمودند. دقیق و همکاران (۱۳۹۴) به‌منظور بررسی پایداری سد خاکی دریاچه چیتگر تهران، از تلفیق مجموعه‌ای از بررسی‌ها و آزمایش‌های ژئوتکنیکی (مانند آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی بر روی خاک منطقه) و شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار Plaxis استفاده نمودند. شبیه‌سازی به‌کمک چهار مدل عددی با در نظر گرفتن جنس لایه‌های مختلف پی و بدنه سد انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی مشخص نمود که در سدهای خاکی همگن و غیرهمگن برای جلوگیری از تخریب سد از زیر پی (ناشی از پدیده زیرشویی یا رگاب)، سد باید به صورت مرحله‌ای و با در نظر گرفتن فواصل زمانی مناسب تحکیم یابد تا فشار آب حفره‌ای اضافی بستر تعدیل گردد. شمس و حقایق (۱۳۹۵) رفتار سد خاکی چیتگر در تهران را بررسی نمودند. به این منظور از نقاط ثابت نشست‌سنج، پیزومترهای الکتریکی، سلول‌های تنش کل در کف سد و پیزومترهای لوله قائم در پنجه پائین‌دست سد استفاده شد. آنان به‌کمک این داده‌ها، شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار GeoStudio و نیز تحلیل برگشتی، مدل رفتاری مناسبی برای این سد خاکی ارائه کردند. مرادی و همکاران (۱۳۹۵) به‌کمک نرم‌افزار Plaxis، تغییرات فشار آب منفذی را در بدنه سد خاکی دامغان بررسی کردند. با تحلیل لایه به لایه از مراحل ساخت سد و استفاده از مدل رفتار موهر-کولمب، آنان نتایج مناسبی از شبیه‌سازی فشار آب منفذی به‌دست آوردند. سلماسی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، نشست قائم بدنه سد خاکی کبودوال (نگارستان) در استان گلستان را در مرحله ساخت سد شبیه‌سازی نمودند. آنها در این پژوهش از مدل

رفتاری موهر–کلمب استفاده نموده و تأثیر دو عامل استمرار عملیات خاکریزی بدنه سد و آبگیری همزمان بر میزان نشست قائم سد را بررسی کردند. بررسی نتایج نشست در مقاطع مختلف سد مشخص نمود که بیشینه میزان نشست (حدود ۲۲۰ سانتی‌متر) در حد فاصل ترازهای ۱۸۵–۱۸۰ متر اتفاق افتاده و بیانگر بحرانی بودن نتایج در تراز خاکریزی می‌باشد. بیشترین نگرانی‌ها در بخش میانی سد است که دارای وضعیت ضعیفتری نیز می‌باشد. در پژوهش سلماسی و حکیمی خانسر (۱۳۹۹)، شبیه‌سازی سه‌بعدی فشار آب منفذی، تنش-های موثر، نشست قائم و نیز جابجایی افقی سد کبودوال به‌کمک نرم‌افزار Plaxis صورت گرفت. نتایج این مدل بعد از واسنجی به‌کمک داده‌های ابزار دقیق نشان داد که بیشینه مقدار همه متغیرهای مورد بررسی در بخش مرکزی سد اتفاق افتاده است.

رشیدی و هائری با استفاده از مدل دوبعدی FLAC-2D، فشار آب منفذی و نشست قائم سد خاکی گاوشان را شبیه‌سازی نموده و با داده‌های قرائت شده از ابزار دقیق سد مقایسه نمودند (Rashidi and Haeri.,2017). نتایج بیانگر عملکرد مناسب سد مذکور از نظر فشار آب منفذی و پایداری بود. اوندایانی . همکاران رفتار سد خاکی سرمو در اندونزی را با استفاده از پایش ابزار دقیق این سد و نیز مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار Plaxis-2D بررسی کردند. نتایج نشان داد که اگرچه داده‌های ابزار دقیق سد روند مشابهی با مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند اما نتایج عددی، مقادیر بالاتر و محافظه‌کارانه‌تری را ارائه می‌کنند (Undayani et al., 2019). جوانمردی و همکاران فشار آب منفذی و تنش‌های موثر سد تهم در استان زنجان را با استفاده از نرم‌افزار Plaxis شبیه‌سازی نموده و نتایج را با داده‌های حاصل از قرائت ابزار دقیق این سد مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقادیر فشار منفذی با داده‌های ابزار دقیق مشابه است اما تنش‌های محاسباتی در اکثر نقاط سد مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند (Javanmardi et al., 2019). کماسی و بیرانوند به‌کمک مدل رفتاری کاملاً الاستیسیته–پلاستیسیته موهر–کولمب اعمال شده در نرم‌افزار GeoStudio، وضعیت نشت و پایداری سد خاکی ایوشان در استان لرستان را در شرایط افت سریع سطح آب در مخزن شبیه‌سازی نمودند. مقادیر فشار آب منفذی شبیه‌سازی شده همخوانی بسیار خوبی با داده‌های ابزار دقیق سد داشتند. همچنین تحلیل پایداری شیروانی‌های این سد به‌کمک هر دو روش مورگنسن- پرایس و بیشاپ نشان داد که بحرانی‌ترین وضعیت در حالت افت سریع آب در مخزن با ضریب اطمینان ۱/۷۱ و بعد از ۴۲ روز از شروع تخلیه مخزن اتفاق می‌افتد که از نظر استاندارد قابل قبول بوده و خطری متوجه بدنه سد نیست(Komasi and Beiranvand, 2021). ارزیابی پژوهش‌های انجام شده در زمینه تحلیل پایداری سدهای خاکی نشان می‌دهد که مدل‌های عددی متنوعی برای شبیه‌سازی رفتار این سدها توسعه داده شده است، اما به‌طور کلی مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری ساده عموماً اختلاف زیادی با رفتار واقعی سد دارند. این در حالی است که مدل‌های رفتاری پیشرفته نیازمند پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح تشکیل‌دهنده بدنه سد، هسته و پی آبرفتی سد می‌باشند. یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های عددی در شبیه‌سازی رفتار این سدها، نرم‌افزار GeoStudio است که دارای چندین برنامه مناسب برای تحلیل‌های خاص مورنیاز سدهای خاکی می‌باشد. در این مدل، معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت آب-های زیرزمینی، تنش‌های موثر و نیز تغییرشکل‌های مصالح خاکی به روش اجزاء محدود که یکی از بهترین روش‌های حل مسائل تحلیلی پیچیده در زمینه خاک و ژئوتکنیک است، حل می‌شوند. در این پژوهش، پایداری شیروانی‌های سد خاکی گلستان به عنوان یکی از مهمترین سدهای استان گلستان به‌کمک نرم‌افزار GeoStudio مدل‌سازی شده است. این مدل‌سازی در شرایط تراوش دائمی، انتهای ساخت و افت سریع آب مخزن و در سه حالت مخزن پر، مخزن نیمه پر و مخزن خالی انجام شده است. همچنین محتمل‌ترین وضعیت گسیختگی شیروانی‌های سد در حالت وقوع زمین‌لرزه و ترکیب آن با حالت‌های تراوش دائمی و انتهای ساخت تحلیل شده و ضرایب اطمینان این حالت‌ها محاسبه شده است.

مواد و روش‌ها

سد خاکی گلستان

سد خاکی گلستان به همراه سدهای بوستان و وشمگیر، یکی از مهمترین سدهای استان گلستان است که بر رودخانه گرگانرود و در نزدیکی شهرستان گنبدکاووس احداث شده است. این سد از نوع همگن و بدون هسته رسی طراحی و اجرا شده است. ساخت این سد از سال ۱۳۷۶ شروع شده و بهره‌برداری از آن در اوایل سال ۱۳۸۰ آغاز شده است. در شکل ۱، موقعیت این سد در کشور و استان گلستان نشان داده شده و تصویری ماهواره‌ای از مخزن سد (خرداد ۱۳۹۳) ارائه شده است. همچنین سازه‌ها و اجزاء مهم آن شامل دریچه‌ها و سرریز سد هم نشان داده شده است. در شکل ۲، مقطع عرضی این سد نشان داده شده است.

مشخصات مولفه‌های مهم این سد خاکی با جزئیات بیشتری در جدول ۱ ذکر شده است.

بررسی تغییر شکل‌های سد گلستان

پارامترهای ژئوتکنیکی حاصل از نتایج آزمایشگاهی

بر مبنای محور سد، ۱۴ گمانه ماشینی حفر گردید که ۶ گمانه در تکیه‌گاه‌ها و ۸ گمانه در بستر واقع شده‌اند. گمانه‌ها دارای عمق ۵۵ تا ۷۵ متر بوده و به‌صورت نمونه‌های اشباع و دست‌خورده و اغلب دست‌نخورده در اعماق مختلف برداشت شد. تعداد نمونه‌ها ۵۱ عدد

بوده و مشخصات آنها به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها عبارتند از آزمایش دانه‌بندی، حدود اتربرگ، مقاومت تک‌محوری و سه‌محوری، تحکیم، رمبندگی و آزمایش‌های شیمیایی.

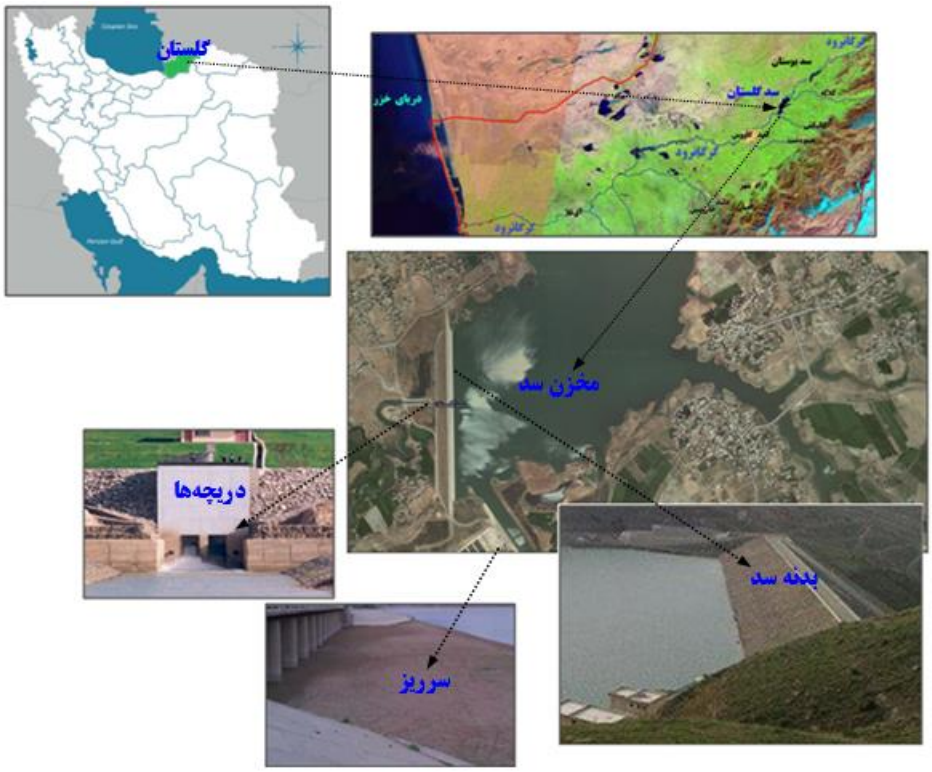
آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری خاک: نمونه‌ها دارای حدود صفر تا ۱۰ درصد ماسه ریز،۵۰ تا ۸۰ درصد سیلت، ۱۵ تا ۴۰ درصد رس و بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید طبقه خاک از نوع CL و ML (رس و سیلت با پلاستیسیته کم) می‌باشد. متوسط حد روانی دارای خواص پلاستیک ۲۷٪، حد خمیری ۱۸٪ و اندیس پلاسیسیته ۱۰٪ می‌باشد.

آزمایش تحکیم: اندیس تخلخل نمونه‌ها به‌طور متوسط ۰/۶، ضریب تراکم ۰/۰۸ و ضریب تورم حدود ۰/۰۱۳ می‌باشد.

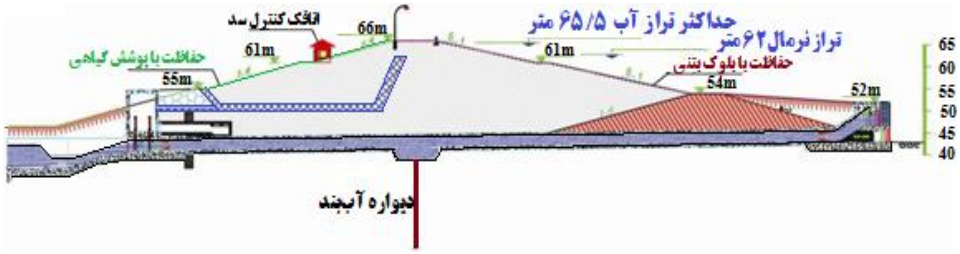
آزمایش رمبندگی: مقدار رمبندگی از ۰/۲ تا ۲ درصد متغیر می‌باشد. نتایج آزمایش رمبندگی نشان می‌دهد که برداشت خاک در مناطقی که دارای پتانسیل رمبندگی می‌باشد، انجام و مجدداً با درصد رطوبتی بیش از درصد بهینه متراکم گردید. در تکیه‌گاه‌ها که قسمت عمده خاک بالای سطح آب زیرزمینی بوده و شرایط اشباع را تجربه نکرده‌اند، می‌تواند از تراکم دینامیکی برای بهبود خواص خاک و کاهش تخلخل استفاده نمود.

آزمایش تک محوری: مقاومت فشاری به‌دست آمده بین ۰/۵ تا ۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متغیر است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مقاومت فشاری تا حدودی تابع چگالی خشک خاک است.

آزمایش‌های سه‌محوری: این آزمایش‌ها هم در حالت cu تحکیم شده و هم در حالت uu تحکیم نشده انجام شده است. این آزمایش‌ها در محدوده فشار ۱ تا ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع انجام شده است.



شکل ۱- موقعیت سد گلستان در کشور و استان گلستان، تصویر ماهواره‌ای از سد (خرداد ۱۳۹۳) و سازه‌های آن



شکل ۲- مقطع عرضی تیپ بدنه سد گلستان

جدول ۱-مشخصات کلی سد گلستان (شامل مخزن، بدنه، دریچه‌ها و سرریز)

مخزن سد	
حجم اولیه (MCM)	۸۶
حجم فعلی (MCM)	۵۷
حجم مرده (MCM)	۲
تراز حداکثر آب (m)	۶۶
تراز نرمال آب (m)	۶۲
مساحت حداکثر (Km^2)	۱۵
طول دریاچه (Km)	۷

بدنه سد	
نوع سد	خاکی همگن با روکش بتنی
حداکثر ارتفاع سد (m)	۲۶
طول تاج سد (m)	۱۳۶۷
عرض پی (m)	۲۱۸
جنس تکیه‌گاه‌ها و پی	آبرفت رسی با لنز ماسه‌ای
نوع مصالح پی سد	رس لای‌دار (CL-ML)
نوع مصالح بدنه سد	ترکیب لس با رس

دریچه سد	
نوع دریچه	**دایره (لوله فلزی)**
تعداد	۲
قطر (m)	۲/۴
ظرفیت تخلیه (m^3/s)	۹۰
تراز محور مرکزی (m)	۴۷

سرریز سد	
نوع سرریز	**آزاد یا تندآب (شوت)**
طول تاج (m)	۱۳۰
تراز تاج سرریز (m)	۶۲
ظرفیت (m^3)	۱۵۵۰
بار آبی طراحی (m)	۳/۵۳

نتایج نشان داد که در چنین خاک‌هایی برای جلوگیری از گسیختگی تدریجی بهتر است از پارامترهای مقاومت برشی کمتری از پارامترهای حالت پیک استفاده شود. همچنین برای اینکه بدنه سد از خاک لس دست‌خورده ساخته می‌شود، از مقدار چسبندگی در حالت زهکشی شده صرفنظر شود.

نتایج آزمایش‌های شیمیایی: غلظت سولفات‌ها در خاک به طور متوسط تا ۰/۳ درصد می‌باشد. برای بتنی که در معرض چنین خاکی است، بهتر است از سیمان‌های تیپ I و III و با ترکیب معینی سرباره استفاده کرد. بیشترین نسبت آب به سیمان به ۰/۵۵ محدود شود و حداقل عیار سیمان مورد استفاده ۲۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد (شرکت آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۸۰).

جدول ۲- خلاصه خواص ژئوتکنیکی از نتایج آزمایش‌ها

پارامتر	مقدار میانگین	انحراف معیار
زاویه اصطکاک د اخلی (درجه)	۲۴	۴/۱
ضریب چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۰/۷	۰/۲۱
ضریب پواسون	۰/۳۵	۰/۰۳
نفوذپذیری خاک (متر بر ثانیه)	پی سد: $۶/۶\times۱۰^{-۸}$ بدنه در جهت قائم: $۵/۰\times۱۰^{-۸}$ بدنه در جهت افقی: $۵/۰\times۱۰^{-۷}$	
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	بتن (۱۰۰) فولاد (۱۰۰۰۰)	

بررسی پایداری شیروانی‌ها

تحلیل عددی استاتیکی پایداری

در سدهای خاکی برای تأمین پایداری آب‌بند سد در مقابل بارهای ناشی از فشار هیدرواستاتیک آب و بارهای دینامیکی و نیز استحکام بدنه سد در مقابل لغزش تحت بارهای گرانشی، باید از مصالح با مقاومت برشی بالا در شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد استفاده گردد. تحلیل پایداری شیب‌های بدنه سد یکی از مهمترین مسائل در طراحی سدهای خاکی می‌باشد. هدف از تحلیل پایداری شیب‌های بدنه یک سد خاکی، تعیین حداقل شرایط پایداری شیب-های بالادست و پایین‌دست بدنه سد در حالات مختلف بارگذاری محتمل می‌باشد. این بررسی در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گردد که با توجه به پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح، بدنه و پی سد، مقطع نهایی سد طوری انتخاب می‌شود که ضرایب اطمینان پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست بدنه در حد قابل قبول باشند و پایداری پی آبرفتی سد کاملاً تأمین گردد.

معرفی نرم‌افزار GeoStudio

این نرم‌افزار از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی معتبر بوده و به‌کمک آن می‌توان تحلیل‌هایی مانند تنش-کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب‌ها، تحلیل دینامیکی و هم‌چنین شرایط افت سریع را بررسی نمود. این مجموعه نرم‌افزار شامل ۸ زیربرنامه به‌نام‌های Sigma/w (بررسی تحلیل‌های تنش-کرنش، تنش درجا و تحکیم، محاسبه تنش‌های کل و بین ذره‌ای، فشار آب حفره‌ای و تغییر شکل‌های مرتبط در خاک)، برنامه Seep/w (تحلیل شرایط تراوش و جریان آب در خاک، ترسیم تراز آب عبوری از درون خاک، بردارهای سرعت، خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل و محاسبه دبی برای مقطع مشخصی از خاک)، برنامه Slope/w (بررسی پایداری سطوح شیب‌دار در حالت استاتیکی و دینامیکی، تعیین ضریب اطمینان در طراحی آن-ها و امکان مدل‌سازی مسلح کننده‌های رایج از قبیل مهارها، نیلینگ-ها و ژئوفابریک‌ها برای افزایش ایمنی شیب‌ها به‌کمک روش‌های تعادل حدی مثل Bishop، Ordinary، Janbu، Spencer و Morgenstern-Price)، برنامه Quake/w (برای تحلیل دینامیکی بر اساس شتاب نگاشت یک زلزله، امکان نمایش تغییرات ناشی از زلزله و نواحی روانگرا شده، رسم دوایر موهر در نقاط مختلف سد، بررسی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای و تنش کل پس از اعمال بارهای دینامیکی)، برنامه Temp/w (برای تحلیل توزیع دما در خاک)، برنامه Ctran/w (برای تحلیل توزیع آلاینده‌ها در خاک)، برنامه Vadoes/w (برای تحلیل اثر شرایط محیطی مانند تابش خورشید، رشد گیاهان، بارش و ... بر خاک) و برنامه Air/w (برای مدل‌سازی جریان هوا) می‌باشد. در همه برنامه‌های این نرم‌افزار به‌جز Slope/w از روش اجزاء محدود استفاده شده و فقط در این بخش، روش تعادل حدی به‌کار رفته است. در این پژوهش از روش اسپنسر که یکی از روش‌های موجود در فهرست مدل‌های تعادل حدی است، استفاده شده است.

تحلیل دوبعدی رفتار سد خاکی گلستان و مراحل مدل‌سازی

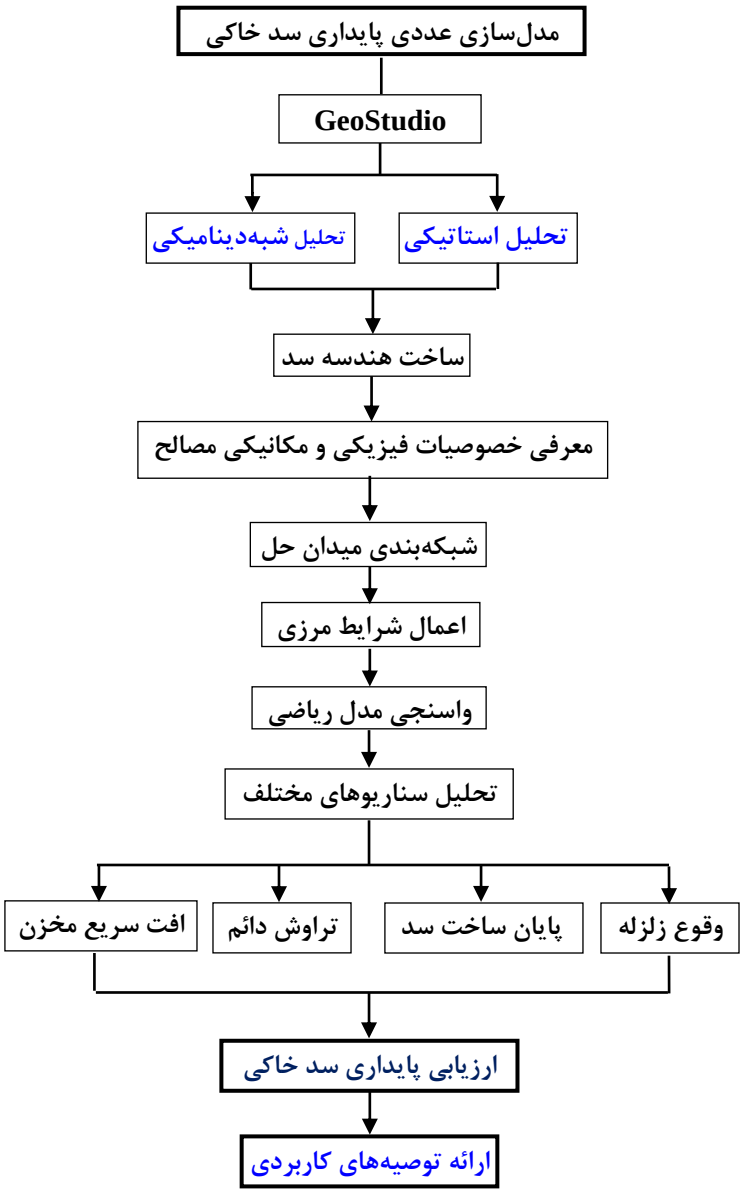
یک سد خاکی به‌غیر از حالتی که دارای طول بسیار زیاد و پی یکنواخت باشد، جسمی منشوری و گسترده در عرض دره است که باید به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شود. با این وجود به‌علت محدودیت‌های تحلیل سه‌بعدی (مخصوصاً نیاز به زمان زیاد و محدودیت اعمال شرایط مرزی) عموماً از تحلیل دوبعدی کرنش مسطح[1] استفاده می‌شود. صحت یک تحلیل عددی دوبعدی به درجه صحت مفروضات مورد استفاده در تحلیل بستگی دارد. اگرچه با توسعه المان‌های ایزوپارامتریک توسط زینکیوچ و همکاران، امکان انجام تحلیل‌های سه‌بعدی فراهم شده است، با این وجود هنوز هم محدودیت‌هایی در انجام این‌گونه تحلیل‌ها وجود دارد (Zienkiewcz et al., 1986). از طرف دیگر، با انجام تحلیل‌های دوبعدی به‌صورت تلفیقی از دو مقطع طولی و عرضی سد می‌توان اطلاعاتی در مورد اثرات سه‌بعدی جسم سد را فراهم ساخت و از انجام تحلیل سه‌بعدی صرف‌نظر کرد. عموماً اگر نسبت طول تاج سد به ارتفاع آن بزرگتر از چهار باشد (L/H>4)، رفتار سد به‌صورت دوبعدی خواهد بود (رحیمی، ۱۳۹۴). در سد گلستان، این نسبت از ۵۰ هم بزرگتر است و بنابراین، تحلیل دوبعدی کفایت می‌کند.

در این تحقیق، مراحل مدل‌سازی بر مبنای روندنمای ارائه شده در شکل ۳ انجام شده است. در شکل ۴، مقطع عرضی انتخابی برای تحلیل رفتار سد و مدل‌سازی پایداری شیروانی‌ها نشان داده شده است. حداکثر ارتفاع سد، ۲۶ متر، بیشینه عمق سپری یا پرده آب‌بند ۲۵ متر (در وسط سد) و کمینه آن ۵ متر (در جناحین یا مجاورت تکیه‌گاه‌ها) است. ضخامت این پرده ۷۰ سانتی‌متر و عمق پی آبرفتی ۶۸ متر انتخاب شد. این سد در ۱۳ لایه به ضخامت حدودی ۲ متر و عرض حدود ۳ متر در مقطع میانی مدل شده است. فاصله عرضی مدل‌سازی نیز حدود ۴ برابر عمق پی و معادل ۳۰۰ متر انتخاب شد. بعد از تبیین و معرفی هندسه مقطع عرضی و ابعاد اجزاء و مولفه‌های آن، باید با توجه به حالت مختلف مورد بررسی، شرایط مرزی متناسب با هر حالت به مدل عددی اعمال شود. شرایط مرزی به‌صورت ۱) پر بودن مخزن، ۲) خالی بودن مخزن، ۳) نیمه‌پر بودن مخزن و ۴) افت سریع مخزن (با نرخ ۱/۵ متر بر روز) در نظر گرفته شد.

در شکل ۵، شبکه‌بندی (مش‌بندی) بهینه مقطع انتخابی سد توسط مدل عددی را نشان می‌دهد. بدیهی است برای تعیین شبکه-بندی بهینه (اندازه المان‌ها یا تعداد آنها) در محاسبات سدهای خاکی و به‌طور کلی هر نوع مدل‌سازی جریان، باید آزمون استقلال شبکه (یا تحلیل حساسیت ابعاد شبکه) مورد توجه قرار گیرد. در این آزمون، ابتدا شبکه‌ای با ابعاد بزرگ درنظر گرفته شده و بدنه سد و پی آن شبکه-بندی می‌شود. سپس با اعمال شرایط مرزی موردنظر، یکی از پارامترهای هیدرولیکی (مثلاً دبی نشت از درون سد و پی) محاسبه می‌شود. بعد از آن، ابعاد شبکه را کوچک‌تر نموده (مثلاً نصف) و مجدداً مدل‌سازی تکرار شده و دبی نشت محاسبه می‌شود. مقادیر دبی نشت در دو مرحله فوق با هم مقایسه شده و اگر اختلاف این دو دبی ناچیز باشد، شبکه‌بندی با ابعاد بزرگتر به عنوان حالت بهینه انتخاب خواهد شد. در غیراین‌صورت، شبکه‌ای با نصف ابعاد شبکه قبلی انتخاب شده و مدل‌سازی تکرار خواهد شد. این فرایند تا زمانی که اختلاف دو مقدار دبی نشت به حداقل ممکن برسد، تکرار می‌شود تا ابعاد بهینه مشخص شود. علاوه بر فرایند فوق که از اصول مدل‌سازی است، در مورد هندسه مدل‌سازی باید پیروی المان‌ها از شرایط مرزی و لایه‌های مختلف، حداکثر بعد آنها و نسبت طول به عرض المان‌ها مدنظر قرار گیرد. در این تحقیق، در مناطقی که بحرانی‌تر بوده و یا

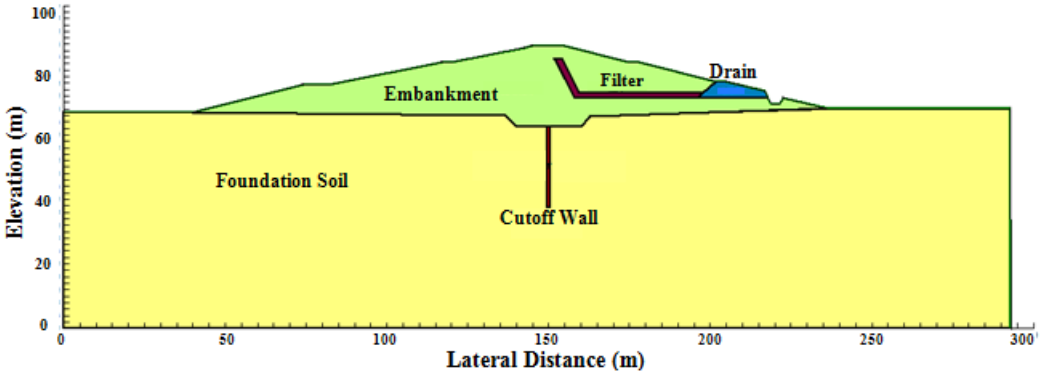
1Plane Strain

تغییر در مشخصات مصالح با نرخ بیشتری انجام می‌شود، از المان‌های کوچک‌تری استفاده شده است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که ابعاد شبکه‌بندی نشان داده تا حدودی بزرگ است. این حالت به‌دلیل عدم وجود هسته رسی در بدنه سد خاکی، وجود مصالح نسبتاً درشت‌دانه با نفوذپذیری بالا در بدنه سد و نیز همگن بودن این مصالح قابل توجیه است.

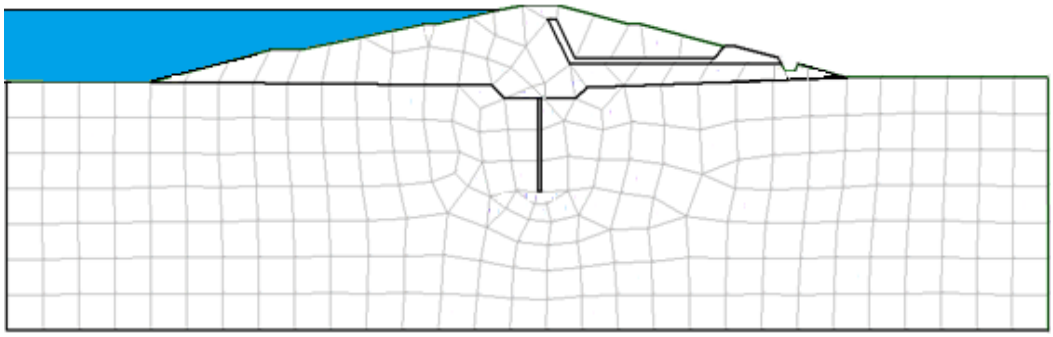


شکل ۳- روندنما یا فلوچارت انجام مراحل مدل‌سازی عددی تحلیل پایداری سد خاکی گلستان با نرم‌افزار GeoStudio

در این پژوهش، پایداری شیروانی‌های سد گلستان در سه حالت تراوش دائمی، انتهای ساخت سد و افت سریع آب در مخزن بررسی شده است. برای اطمینان از تضمین پایداری شیروانی‌های سد از حداقل ضرایب اطمینان در شرایط مختلف بارگذاری (شرایط مرزی) استفاده شد. این شرایط در جدول ۳ ارائه شده است (USACE, 1995). علاوه بر سه حالت فوق، حالت بارگذاری زمین‌لرزه نیز کنترل شد. تحلیل استاتیک به‌دست آمده از نرم‌افزار قادر است سطوح گسیختگی را به شکل کمانی از دایره یا به شکل دلخواه کنترل نموده و ضریب اطمینان را بر حسب گشتاور نیروی مقاوم به گشتاور نیروی محرک وارد بر گوه گسیخته‌شده محاسبه نماید. در تحلیل هر حالت بارگذاری، حداقل ۱۰۰ دایره گسیختگی بررسی شده و ۱۰ دایره از بحرانی‌ترین آنها معرفی و تحلیل می‌شوند. در تحلیل پایداری سد گلستان، شیب‌های (افقی:قائم) بالادست و پایین‌دست بدنه سد به‌ترتیب ۱:۵ و ۱:۴ تعریف شده‌اند.



شکل ٤- مقطع انتخابی برای تحلیل پایداری و هندسه مدل‌سازی



شکل ٥- شبکه‌بندی بدنه همگن سد و پی آبرفتی آن در مدل عددی

جدول ۳- حداقل ضریب اطمینان برای پایداری شیروانی‌ها به روش حالت حدی (USACE, 1995)

شرایط بارگذاری	حداقل ضریب اطمینان
تراوش دائمی	۱/۵
انتهای ساخت	۱/۳
افت سریع آب مخزن	۱/۴۵

نحوه مدل‌سازی مراحل زمانی ساخت و آبگیری مخزن سد

بعد از تعیین تنش‌های اولیه در پی تا انتهای زمان ساخت، از روش تغییر شکل‌ها[1] همراه با پارامترهای ورودی تنش کل استفاده شده است. در این روش، بر اساس بارهای اعمالی، نتایج حاصل از تغییرات مربوط به تنش‌ها و تغییر مکان‌ها قابل ارزیابی می‌باشد. نرم-افزار GeoStudio از تئوری تحکیم بیوت[2] در تحلیل استفاده می‌کند. در این تئوری، محدودیت موجود در تئوری تحکیم ترزاقی مبنی بر ثابت بودن تنش کل در طول فرایند تحکیم وجود نداشته و تنش کل می‌تواند در هر گام از تحلیل تحکیم متناسب با نشست‌های تحکیمی توزیع شوند. استفاده از روش اجزاء محدود برای حل معادله تحکیم نسبت به روش تفاضل محدود برتری دارد. معادله تحکیم دوبعدی برای شرایط ایزوتروپ (همسانگرد) از لحاظ نفوذپذیری به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$C_V\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)=\frac{\partial u}{\partial t}-\beta\left(\frac{\partial \sigma_1}{\sigma_1}\right) \quad (۱)$$

که C_v ضریب تحکیم مصالح خاکی در دو بعد، u اضافه فشار آب حفره‌ای، σ_1 تنش اصلی ، x و y فواصل طولی و عرضی و t زمان و β ضریب فشار آب حفره‌ای است که تابعی از نسبت تنش‌های اصلی می‌باشد. بر مبنای بررسی‌های Kulhawy et al (2000)، نتایج حاصل از تحلیل لایه‌ای سد با نتایج حاصل از مدل‌سازی کل سد در یک مرحله متفاوت است. لذا چنانچه سد آبگیری شود، شرایط تراوش پایدار وجود خواهد داشت. در این‌صورت خاک به‌علت وجود فشار آب حفره‌ای، هم تحکیم یافته و هم زهکشی می‌شود، در نتیجه شرایط به‌صورت تحکیم یافته زهکشی شده (CD) خواهد بود.

نتایج

مدل‌سازی در حالت تراوش دائمی یا پایدار

در این حالت با فرض وجود فرصت کافی برای میراشدن فشارهای منفذی، برای بدنه سد و پی آن شرایط آزمایش سه‌محوری

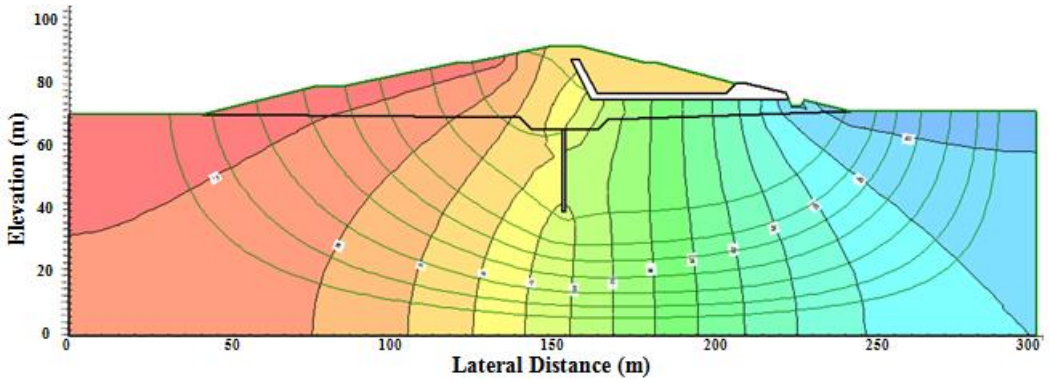
1- Load-Deformation
2- Biot

CD وجود خواهد داشت. بنابراین از پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شده که از آزمایش سه محوری با اندازه‌گیری فشار منفذی به‌دست آمده است، استفاده می‌گردد. در حالت زهکشی شده می‌توان فرض نمود که فشار منفذی در هر نقطه از خاک برابر فاصله قائم نقطه مورد نظر تا سطح آزاد آب می‌باشد. بنابراین سطح آزاد آب که بر مبنای محاسبات تئوری خطوط جریان در محیط‌های ناهمگن به‌دست آمده است، معیاری برای اندازه‌گیری فشار منفذی در بدنه سد و زمین زیر آن محسوب می‌شود. در بالادست سد، سطح آب منطبق بر سطح نرمال مخزن و در پایین‌دست، سطح آب منطبق با سطح زمین طبیعی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای استفاده شده تحلیل پایداری در حالت تراوش پایدار عبارتند از:

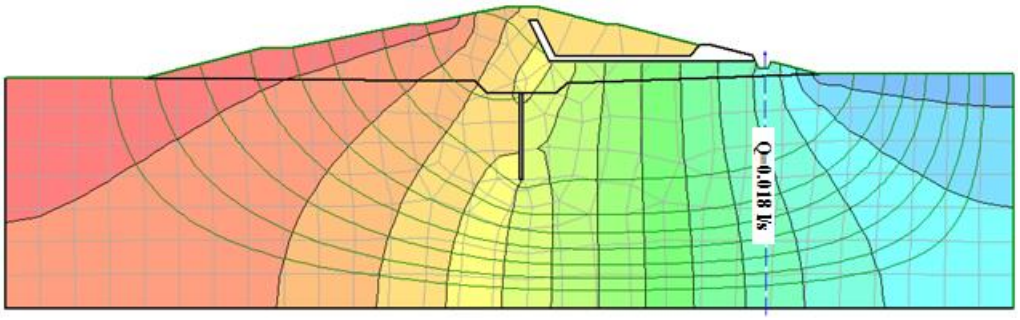
بدنه سد: چسبندگی ۰ و زاویه اصطکاک داخلی ۳۳ درجه

پی سد: چسبندگی ۰/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه

در شکل ۶، نتایج شبکه جریان و خطوط هم‌پتانسیل به‌دست آمده از تحلیل پایداری در حالت تراوش پایدار نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷، مقادیر دبی جریان خروجی از زهکش نشان داده شده است که حداکثر دبی زهکش را حدود ۱/۵۸ مترمکعب بر روز ارائه می‌کند.



شکل ٦- شبکه خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل



شکل ۷- مقادیر دبی خروجی از زهکش

کمینه ضریب اطمینان به‌دست آمده از محاسبات در حالتی که شیب پایین‌دست تندتر از شیب بالادست می‌باشد، حدود ۱/۵ است که در محدوده ضریب اطمینان می‌باشد.

مدل‌سازی در حالت انتهای ساخت سد

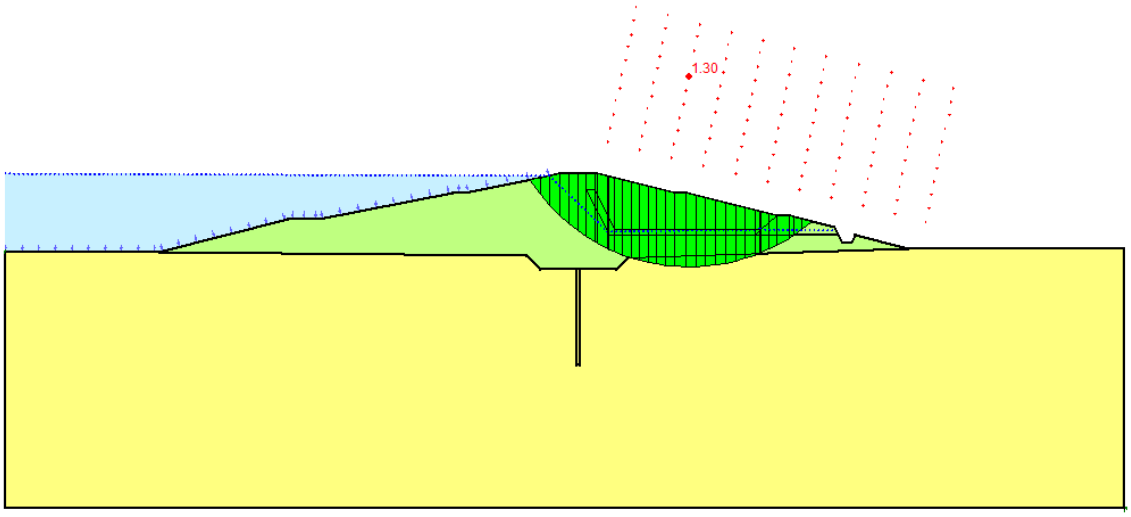
معمولاً در سدهایی که روی زمین‌هایی با مصالح ریزدانه ساخته می‌شوند، حالت انتهای ساخت بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری می‌باشد (رحیمی، ۱۳۹۳). در صورتی که نرخ خاکریزی بیش از نرخ تحکیم بدنه و پی باشد، می‌توان از نتایج آزمایش سه‌محوری تحکیم نشده و زهکشی نشده برای تخمین رفتار خاک استفاده نمود. در این حالت برای بررسی پایداری بدنه سد از نتایج این آزمایش که به‌صورت غیراشباع و بر روی نمونه‌های دست‌خورده انجام شده است، استفاده می‌گردد. برای محاسبه پارامترهای مقاومت برشی در پی نیز از نتایج همین آزمایش بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و در رطوبت طبیعی استفاده می‌گردد. پارامترهای استفاده شده برای تحلیل پایداری در حالت انتهای ساخت عبارتند از:

بدنه سد: چسبندگی ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی ۲۶ درجه

پی سد: چسبندگی ۰/۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی ۰ درجه

نتایج این تحلیل در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل، بحرانی‌ترین دایره گسیختگی ارائه شده است که از بالادست تاج سد

شروع شده و تا حدود زهکش پایین‌دست ادامه دارد. بحرانی‌ترین مقطع در این دایره گسیختگی، دارای ضریب اطمینان ۱/۳ می‌باشد که مطابق استاندارد (جدول ۳) معادل ضریب اطمینان بحرانی در حالت انتهای ساخت است و بیانگر پایداری بدنه سد و شیروانی آن است.



شکل ۸- محتمل‌ترین گسیختگی در شرایط انتهای ساخت- شیب پایین‌دست سد (حالت مخزن پر)

مدل‌سازی در حالت افت سریع آب مخزن

افت سریع آب مخزن یکی از حالت‌های فوق‌العاده بارگذاری سدهای خاکی با مصالح ریزدانه می‌باشد. این حالت بارگذاری زمانی رخ می‌دهد که در زمان پر بودن مخزن، تخلیه‌کننده‌های عمقی (دریچه‌ها) با بیشینه ظرفیت خود فعال بوده و تراز سطح آب مخزن در مدت کوتاهی کاهش یابد. در صورتی که در زمان افت تراز سطح آب مخزن و تقلیل سربار هیدرولیکی روی شیب بالادست (که نقش موثری در پایداری شیب بالادست ایفاء می‌کند)، فشار منفذی فرصت میرا شدن نداشته باشد، تنش‌های موثر و نیز مقاومت برشی توده خاک در بدنه سد و پی آن سریعاً کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل کنترل گسیختگی شیب بالادست بدنه سد در این حالت الزامی می‌باشد. تحلیل پایداری در حالت افت سریع آب مخزن با این دو فرض انجام می‌شود که الف) با کاهش تراز سطح آب، فشار منفذی تغییر نمی‌کند و ب) سطح آزاد آب در بالادست منطبق با شیب بالادست می‌باشد. بنابراین با داشتن تخمینی از فشار منفذی می‌توان تحلیل را در حالت تنش موثر با پارامترهای زهکشی شده انجام داد. در این حالت برای بررسی پایداری بدنه سد از نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته بدون زهکشی که به‌صورت متراکم شده و بر روی نمونه‌های دست-خورده انجام شده است استفاده می‌گردد. برای حصول پارامترهای مقاومت برشی در پی، از نتایج همین آزمایش بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و اشباع شده استفاده می‌گردد. پارامترهای استفاده شده در تحلیل پایداری درحالت افت سریع آب مخزن عبارتند از:

بدنه سد: چسبندگی ۰ و زاویه اصطکاک داخلی ۳۴ درجه

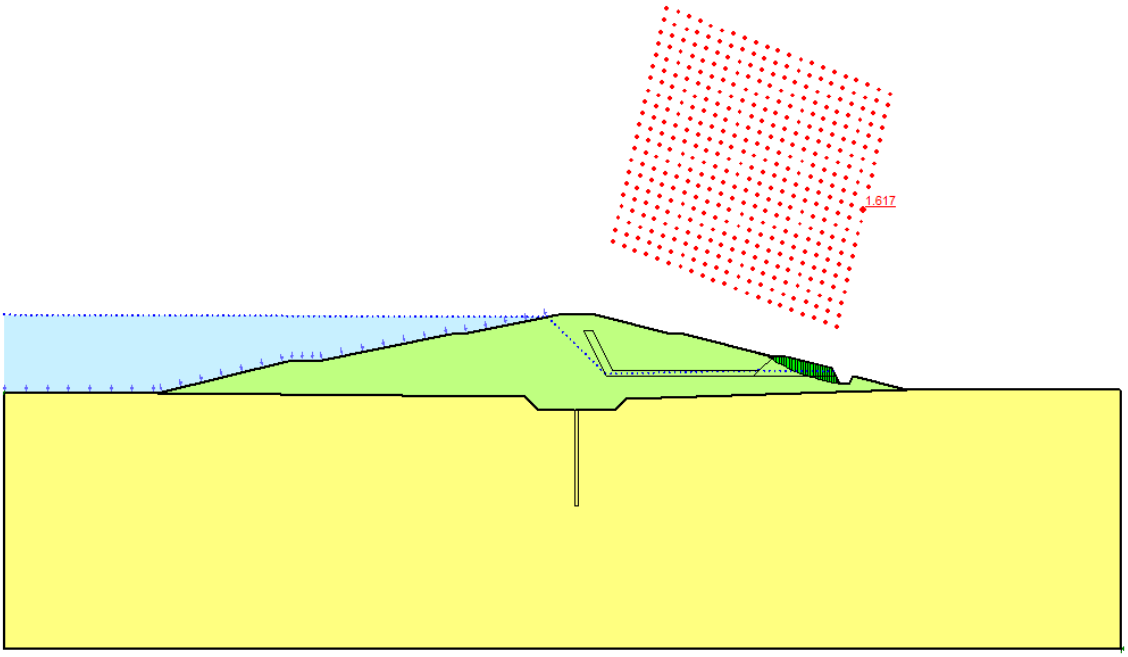
پی سد: چسبندگی ۰/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه

نتایج مدل‌سازی عددی این تحلیل در شکل ۹ نشان داده شده است. کمینه ضریب اطمینان به‌دست آمده از این محاسبات حدود ۱/۶۲ به‌دست آمده است که بزرگتر از حداقل ضریب اطمینان ۱/۴۵ (متناسب با شرایط افت سریع مخزن سد، جدول ۳) می‌باشد. با توجه به این‌که سد خاکی گلستان بدون هسته رسی است، افت سریع آب مخزن این سد در مقایسه با سدهای دارای هسته رسی دارای وضعیت بحرانی کمتری برای شیب بالادست سد است.

مدل‌سازی در حالت بارگذاری زمین‌لرزه

بررسی لرزه‌ای سدهای خاکی عموماً شامل تحلیل تنش-کرنش و بررسی روانگرایی خاک بدنه سد می‌باشد. برای بررسی تنش و کرنش در حالت دینامیکی لازم است شتاب زمین‌لرزه‌ای با بزرگی و فاصله مشخص از محل سد در دسترس باشد. با توجه به اینکه سختی بدنه سد و پی تقریباً یکسان بوده و هندسه بدنه سد تقریباً به شکل ذوزنقه‌ای با نسبت ارتفاع به قاعده کوچک است، به نظر می‌رسد که اغلب جرم موثر سد در مود اول ارتعاشی قرار گرفته باشد و نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی مغایرت قابل توجهی با هم نداشته باشند. برای سدها و پی‌هایی که در معرض روانگرایی قرار ندارند، در صورتی که شرایط زیر را داشته باشند، نیاز به بررسی تغییر شکل‌های

دینامیکی نمی‌باشد (رحیمی، ۱۳۹۲): **الف**) مصالح بدنه سد بـه‌خـوبی متراکم شده باشد و شتاب پیک در پی، کمتر از ۰/۲ شتاب زمین باشد، **ب**) شیب‌های بالادست و پایین‌دست بدنه سد ۱:۳ یا ملایم‌تر باشـند، **ج**) ضریب اطمینان سطح گسیختگی که شامل تاج سد نیز مـی‌شـود، در حالت استاتیکی حداقل برابر ۱/۵ باشد و **د**) ارتفاع آزاد آب در زمان زمین‌لرزه حداقل ۲ تا ۳ درصد ارتفاع خاکریز باشد. سد گلسـتان دارای شرایط فوق بوده و لذا در بررسی رفتار لرزه‌ای سد به تحلیل استاتیکی معادل استناد خواهد شد. علاوه بر شرایط فوق، نشـریه ۶۲۴ (معاونـت برنامه‌ریزی و نظرات راهبردی رییس‌جمهـور، ۱۳۹۲) و نیـز مطالعـات صادقی و اصلانی (۱۳۸۹) و نیز حکیمـی خانسـر و همکـاران (۱۳۹۴) این فرض را تایید می‌کنند. با توجه به تایید تحلیل شبه‌اسـتاتیکی، در تعیین پایداری سد به روش حالت حدی نیز می‌توان از روش استاتیکی معادل اسـتفاده کـرد. در ایـن روش، نیروهـای ناشـی از زمـین لـرزه متناسب با شتاب زمین لرزه و جرم گوه گسیخته شده در جهت افقی یا عمودی به گوه گسیخته شده اعمال و ضرایب اطمینان مطابق حالـت استاتیکی محاسبه می‌شوند. برای عمر مفید سازه به‌مـدت ۱۰۰ سـال، زمین‌لرزه مبنای طرح با احتمـال وقـوع ۶۴ درصـد دارای شـدت ۷/۵ درجه مرکالی، شتاب افقی ۰/۱۳ و شتاب قائم ۰/۰۵ شتاب زمین می‌باشد.



شکل ۹- محتمل‌ترین گسیختگی در شرایط افت سریع آب مخزن (حالت مخزن پر)

به‌دلیل دشوار بودن تخمین فشـار منفـذی در حالـت زمـین‌لـرزه، تحلیل پایداری به روش تنش کل انجام خواهد شد و با فـرض پایـدار بودن فشار منفذی قبل از وقوع زمین‌لرزه، می‌توان از پارامترهای بـه‌دست آمده از آزمایش سه محوری تحکیم شـده و زهکشـی نشـده در حالت اشباع استفاده نمود. همچنین پارامترهای استفاده شده در تحلیل پایداری عبارتند از:

بدنه سد: چسبندگی ۰/۴ کیلوگرم بـر سـانتی‌متـر مربـع و زاویـه اصطکاک داخلی ۲۲ درجه

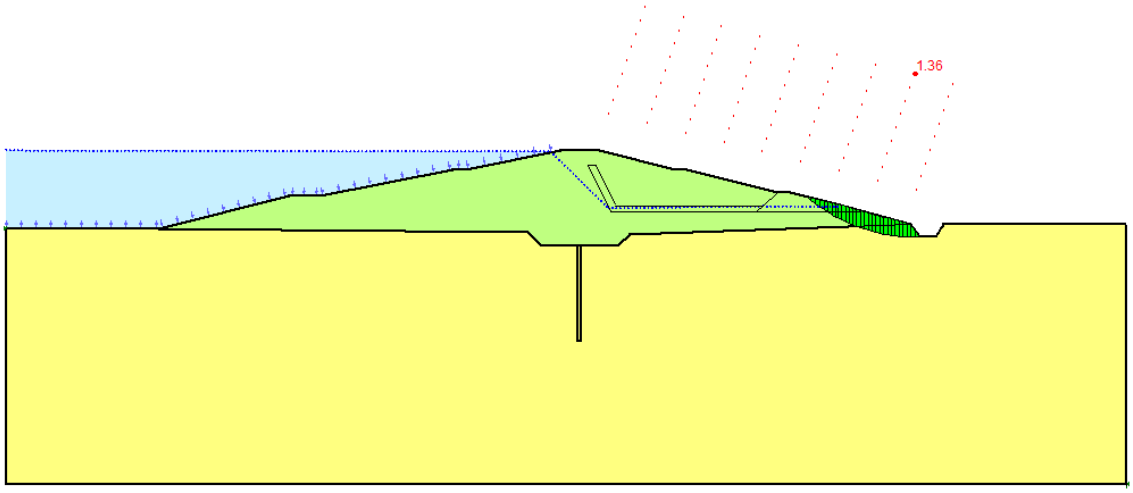
پی سد: چسـبندگی ۰/۳ کیلـوگرم بـر سـانتی‌متـر مربـع و زاویـه اصطکاک داخلی ۲۵ درجه

در شکل ۱۰ نتایج مدل‌سازی عددی در حالـت افـت سـریع تـراز سطح آب مخزن همراه با زلزله نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت، کمینه ضریب اطمینـان بـه‌دسـت آمـده در شـرایط محتمل‌ترین گسیختگی حـدود ۱/۴۶ مـی‌باشـد کـه کمـی بزرگتـر از حـداقل ضـریب اطمینـان مجـاز (جـدول ۳) بـوده و بیـانگر پایـداری شیروانی‌های سد است. نتـایج مـدل‌سـازی عـددی در حالـت انتهـای ساخت همراه با زلزله در محدوده پایین‌دست نیز نشان داد که حـداقل ضریب اطمینان در ایـن حالـت حـدود ۱/۳۵ بـوده و بیـانگر پایـداری شیروانی‌های سد است.

بررسی نتایج و تحلیل حساسیت

برای تحلیل سریع نتـایج مـدل‌سـازی‌هـای انجـام شـده در ایـن تحقیق، ضرایب اطمینان به‌دست آمده در همه شرایط و حالات مـورد بررسی در جدول ۴ خلاصه شده است. مشاهده می‌شـود کـه در همـه

حالات مورد بررسی، وضعیت پایداری شیب‌های بالادست و پایین-دست سد خاکی گلستان تا حدودی تضمین شده است. با این‌حال در بعضی از حالات، این پایداری با حاشیه ایمنی یا اطمینان بسیار کمی همراه است.



شکل ۱۰- محتمل‌ترین گسیختگی در شرایط افت سریع آب مخزن همراه با زلزله-پایین‌دست سد

جدول ٤- حداقل ضرایب اطمینان برای پایداری شیروانی‌ها به روش تعادل حدی (USACE, 1995)

شرط مرزی	وضعیت مخزن		
	مخزن پر	مخزن نیمه‌پر	مخزن خالی
تراوش دائمی	۱/۵	۱/۵۴	۱/۵۶
انتهای ساخت	۱/۳۲	۱/۳۳	۱/۳۶
افت سریع مخزن	۱/۶۲	۱/۶۴	۱/۶۶
وقوع زلزله (انتهای ساخت)	۱/۳	۱/۳۲	۱/۳۵

همانگونه که در نتایج مدل‌سازی‌های فوق مشاهده شد، سطوح گسیختگی در بدنه سد در دو حالت بارگذاری انتهای ساخت و افت سریع آب مخزن تقریباً در شرایط بحرانی می‌باشند، اما در دو حالت تراوش یکنواخت و زمین‌لرزه دارای حاشیه اطمینان بالایی هستند. بنابراین دو حالت بارگذاری اخیر در تحلیل حساسیت پایداری شیروانی نسبت به تغییر شیب بدنه مورد بحث قرار نگرفته و فقط دو حالت اول (بارگذاری انتهای ساخت و افت سریع آب مخزن) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

الف) افزایش شیب پایین‌دست

بارگذاری بحرانی برای این شیب، حالت انتهای ساخت می‌باشد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش شیب پایین‌دست از ۱:۴ به ۱:۳، ضریب اطمینان در این حالت از ۱/۳۲ به ۱/۲۴ کاهش یافته و کمتر از مقدار استاندارد خواهد بود.

ب) افزایش شیب بالادست

با افزایش شیب بالادست از ۱:۵ به ۱:۴، ضریب اطمینان در حالت افت سریع آب مخزن از ۱/۶۲ به ۱/۳۸ کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که این حالت در طول عمر مفید سد چندین بار تکرار خواهد شد، ضرایب اطمینان کمتر از حد استاندارد برای بارگذاری مذکور به‌هیچ عنوان توجیه‌پذیر نمی‌باشد.

علاوه بر تحلیل حساسیت شیب‌های بالادست و پایین‌دست بدنه سد گلستان، حساسیت نتایج خروجی این تحلیل‌ها (ضریب اطمینان) نسبت به تغییر پارامترهای مقاومت برشی مصالح این سد (ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح) نیز تحلیل شده و نتایج آن در جدول ۵ خلاصه شده است. این نتایج برای حالت تراوش دائم و در حالت مخزن پر به‌دست آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب چسبندگی و نیز زاویه اصطکاک داخلی مصالح، ضریب اطمینان افزایش یافته است. این نتیجه منطقی بوده و با نتایج محققین دیگر هم همخوانی دارد. بدیهی است که با افزایش این دو پارامتر، نیروی مقاومت برشی خاک در برابر لغزش و تغییر شکل، بیشتر شده و در نتیجه خطر لغزش و ریزش شیب کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، ضریب اطمینان یا فاکتور پایداری خاک با مقاومت برشی خاک نسبت مستقیم دارد. نکته مهم و قابل اشاره این است که این

روند و نیز درصد تغییر ضریب اطمینان در این تحقیق تا حدودی مختص سد خاکی گلستان بوده و قابل تعمیم به سدهای خاکی دیگر نیست. به‌طور کلی، درصد افزایش ضریب اطمینان شیب‌ها به افزایش پارامترهای مقاومت برشی مصالح، ثابت و خطی نبوده و به ماهیت خاک، هندسه سد خاکی، نوع ابرگذاری یا زلزله، تراز سطح آب مخزن، همگن یا غیرهمگن بودن سد، شرایط زهکشی، روش تحلیل و سایر عوامل بستگی دارد.

جدول ۵- نتایج تحلیل حساسیت ضرایب اطمینان محاسبات پایداری شیروانی سد خاکی گلستان به تغییر پارامترهای مقاومت برشی مصالح

پارامتر	مقدار	ضریب اطمینان (در حالت مخزن پر)
ضریب چسبندگی	۲۰٪ افزایش	۱/۵۵
	مقادیر پایه	۱/۵
	۲۰٪ کاهش	۱/۴۷
زاویه اصطکاک داخلی	۲۰٪ افزایش	۱/۵۳
	مقادیر پایه	۱/۵
	۲۰٪ کاهش	۱/۴۸

مقایسه نتایج مدل‌سازی جدید تنش‌های قائم (GeoStudio) و زمان طراحی سد (FEADAM)

در زمان طراحی سد خاکی گلستان، مهندسین مشاور تهران برکلی برای تحلیل رفتار این سد از نرم‌افزار FEADAM (1986) و تئوری تحکیم یک‌بعدی (معادله ۱) استفاده نمودند. در این روش، تغییر شکل‌های حاصل در زمین طبیعی با استفاده از تئوری تحکیم و پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش تحکیم محاسبه می‌شوند. برای این منظور، نرم‌افزاری توسط این مهندسین مشاور تهیه شده است که تغییر شکل‌ها را به کمک مراحل زیر محاسبه می‌نماید:

۱-پی به چندین لایه با ضخامت‌های متفاوت تقسیم می‌شود. از آنجا که در اثر احداث سد، افزایش تنش مؤثر در لایه‌های بالایی بیشتر است، لایه‌های بالایی با ضخامت کمتر و لایه‌های زیرین با ضخامت بیشتر در نظر گرفته می‌شوند. در مدل سد گلستان، تحکیم تا عمق ۵۰ متری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-افزایش تنش مؤثر (Δp) در مرکز هر لایه و با انتگرال‌گیری عددی روی سطوح بارگیر (بار ناشی از بدنه سد) محاسبه می‌شود. تنش‌های قائم ناشی از بار یکنواخت در ناحیه‌ای مستطیلی و در زیر یکی از چهارگوشه مستطیل محاسبه می‌شود. در این حالت فرض می‌شود که محیط بارگذاری شده، نیمه بینهایت و دارای خواص الاستیک ایزوتروپیک می‌باشد. در شکل ۱۱، نتایج افزایش تنش مؤثر ناشی از احداث خاکریز سد در اعماق مختلف ۰/۵ متر (کف سد خاکی در محور مرکزی)، ۲۲/۵ متر (تراز انتهایی پرده آب‌بند) و ۴۵ متر (حدود تراز سنگ بستر پی) در پی سد خاکی گلستان نمایش داده شده است. در این شکل، مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار GeoStudio در یکی از عمق‌ها نیز نشان داده شده است. این نتایج به کمک تحلیل تنش-کرنش سد گلستان توسط نرم‌افزار FEADAM و با استفاده از مدل تنش-کرنش هذلولی انجام شده است. مدل سد شامل پی تا عمق ۵۰ متر و بدنه سد می‌باشد که ساخت آن در ۹ لایه در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که پس از ساخت هر لایه، کلیه تغییر شکل‌ها انجام می‌گیرد. بنابراین بیشترین تغییر شکل‌ها در پی و کمترین تغییر شکل در تاج سد اتفاق می‌افتد. همچنین آبگیری سد به‌صورت یک بارگذاری اضافه و با در نظر گرفتن فشار هیدرواستاتیکی آب بر بدنه سد و پی اعمال شده است.

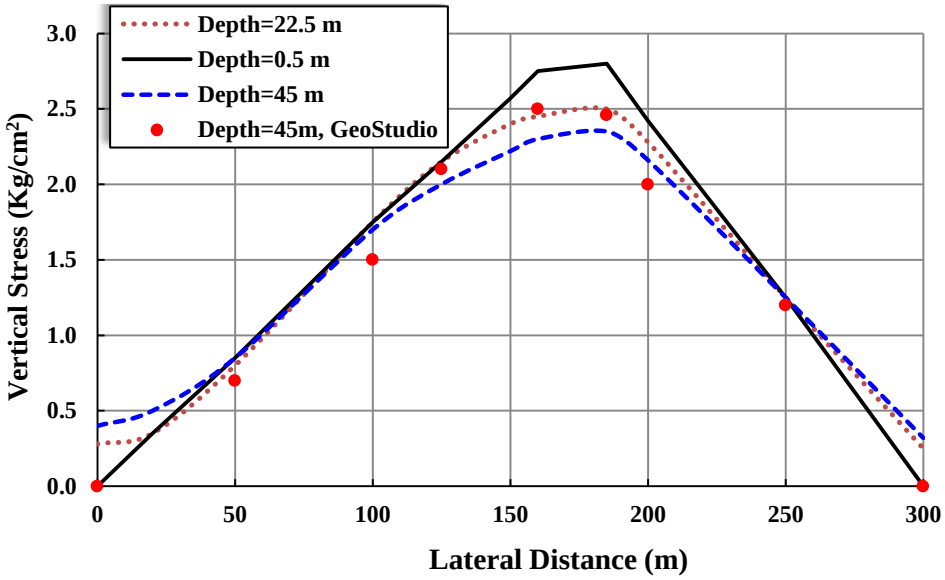
۳-تنش مؤثر موجود در پی با استفاده از رابطه $P_0 = \gamma' Z$ در مرکز هر لایه محاسبه می‌شود که γ' وزن مخصوص مستغرق خاک و Z فاصله از سطح طبیعی زمین است.

۴-با استفاده از پارامترهای تحکیم، نشست قائم ناشی از تحکیم برای هر لایه و در نقاط مختلف محاسبه می‌شود:

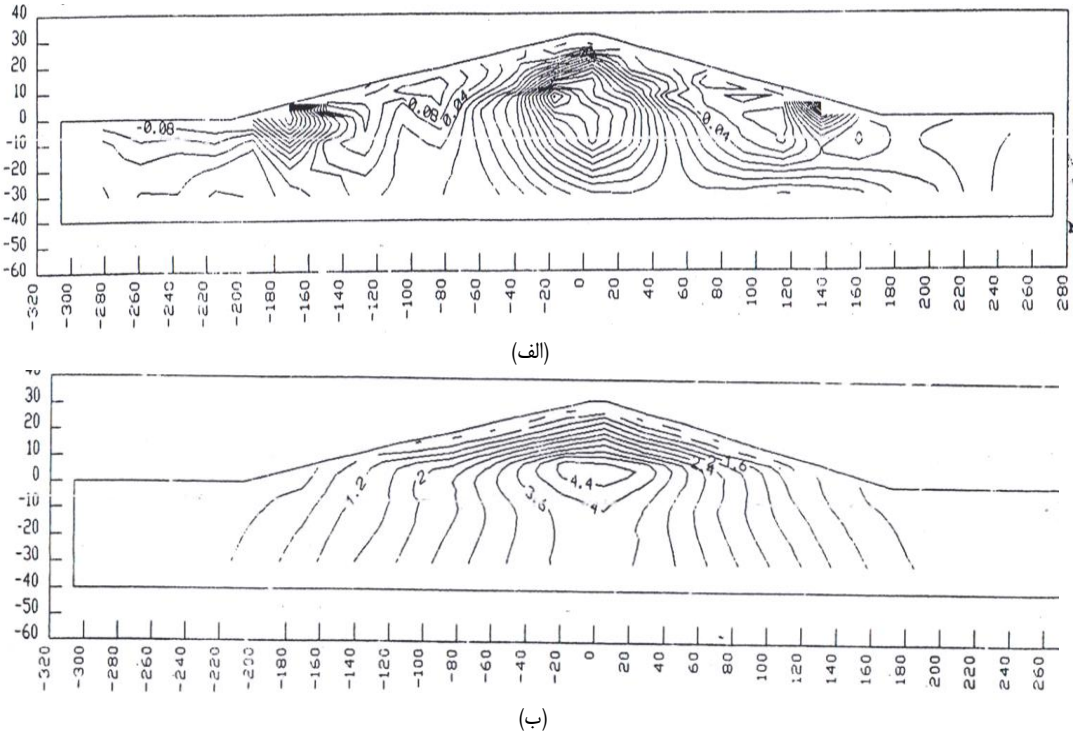
$$\Delta s_i = \frac{\Delta H}{1+e_0}\left[C_S \log\left(\frac{P_C}{P_0}\right) + C_C \log\left(\frac{P_0+\Delta P}{P_C}\right)\right] \quad (۲)$$

که s_i نشست لایه iام، C_C ضریب تراکم (۰/۰۷۹)، C_S ضریب تورم خاک (۰/۰۱۳)، e_0 نسبت پوکی یا خلاء خاک (۰/۵۶۹)، ΔH ضخامت هر لایه، P_0 تنش موثر اولیه در مرکز لایه، P افزایش تنش مؤثر در مرکز لایه و P_C فشار پیش تحکیمی در مرکز لایه است.

منحنی‌های هم‌کرنش اصلی حداقل و حداکثر محاسبه شده توسط نرم‌افزار FEADAM در بدنه و پی سد گلستان در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل قدیمی بودن این نرم‌افزار، نتایج دارای وضعیت گرافیکی مناسبی نیستند، در حالیکه امروزه به کمک نرم‌افزارهای جدیدتر Plaxis و GeoStudio، نتایجی با ظاهری بهتر قابل ارائه است.



شکل ۱۱- اضافه تنش قائم در پی سد خاکی گلستان در عمق‌های مختلف ناشی از احداث خاکریز سد به ارتفاع ۲۵/۵ متر



(الف)

(ب)

شکل ۱۲- کانتور یا منحنی‌های هم‌کرنش اصلی الف) حداقل و ب) حداکثر سد گلستان در حالت مخزن پر به کمک تحلیل اجزاء محدود

علاوه بر بررسی‌های فوق و با توجه به اطلاعات موجود، چند مورد مقایسه بین نتایج این دو نرم‌افزار نیز انجام شد که طی این مقایسه‌ها مشخص شد که تقریباً در همه حالات، ضریب اطمینان به‌دست آمده از نرم‌افزار GeoStudio به میزان ۰/۱ تا ۰/۱۵ از نتایج نرم‌افزار FEADAM بزرگتر بوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌کمک نرم‌افزار GeoStudio و برنامه Slope/w این نرم‌افزار، پایداری سطوح شیب‌دار بدنه سد خاکی گلستان در حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی به روش تعادل حدی اسپنسر بررسی شده و

حداقل ضرایب اطمینان سطوح شکست یا گسیختگی در شرایط مختلف مخزن شامل تراوش دائمی، انتهای ساخت سد و افت سریع تراز سطح آب در مخزن سد محاسبه شده است. در همه این شرایط، ضرایب اطمینان به‌دست آمده در بحرانی‌ترین حالت از مقادیر استاندارد تضمین پایداری شیروانی‌های سدهای خاکی بالاتر بوده و بیانگر پایداری شیب‌های سد خاکی گلستان است. با وجود این‌که سد گلستان دارای هسته رسی نیست، اما دوایر گسیختگی در بدنه سد در دو حالت بارگذاری انتهای ساخت و به‌ویژه افت سریع تراز سطح آب در مخزن تقریباً در شرایط بحرانی می‌باشند، اما در دو حالت تراوش پایدار و زمین‌لرزه دارای حاشیه اطمینان بالایی هستند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی فشار آب منفذی ناچیزی در بدنه سد ایجاد شده و می‌توان بیان نمود که با افزایش تراز خاکریزی، افزایش محسوسی در این پارامتر به‌وجود نیامده است. در نهایت، مقادیر به‌دست آمده از نتایج نشست و ضرایب ایمنی در مراحل مختلف، بیانگر وضعیت ایمن و پایدار سد و در برخی شرایط حتی فراتر از ضرایب ایمنی مجاز است.

اگرچه نتایج تحلیل پایداری هر سدی به عوامل مختلفی (مانند نرم‌افزار انتخاب شده، روش تحلیل، نوع بارگذاری و شرایط مخزن، مشخصات ژئوتکنیکی (ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، مشخصات ژئومکانیکی خاک (مقاومت، تراکم، و وجود مواد آلی)، هندسه شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست (شیب و ارتفاع)، شرایط آب زیرزمینی (فشار منفذی و نفوذ آب)، عوامل خارجی (مانند زلزله، بارگذاری خارجی، و هوازدگی)، و شرایط زمین‌شناسی منطقه) وابسته بوده و بنابراین نمی‌توان به‌صورت صریح نتایج یک سد را با سدی دیگر مقایسه نمود، اما با این‌حال بررسی‌ها نشان داد که نتایج این تحقیق با یافته‌های محققان قبلی تا حدود زیادی همخوانی دارد. به‌طور مثال، نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی شرایط انتهای ساخت برای شیب پایین‌دست سدهای خاکی تقریباً مشابه گلستان (با نرم‌افزار GeoStudio و در حالت مخزن پر) و نگارستان (با نرم‌افزار Plaxisi و در حالت مخزن نیمه‌پر) نشان می‌دهد که ضرایب اطمینان برای این دو سد به‌ترتیب ۱/۳۲ و ۱/۵ محاسبه شده‌اند (حکیمی‌خانسر و همکاران، ۱۳۹۴). تفاوت این دو عدد احتمالاً به دلیل نرم‌افزار مورد استفاده و روش حل است. برای سایر مراحل (مانند تراوش دائمی و افت سریع مخزن) هم تفاوت‌های مشابهی دیده می‌شود. همچنین فتاحیان و همکاران (۱۳۹۵) ضرایب اطمینان شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد خاکی ایلام را در حالت پایان ساخت با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio حدود ۲ به‌دست آوردند که در مقایسه با نتایج این تحقیق، اختلاف زیادی دارد. به دلیل وجود هسته رسی در سد ایلام و سنگریزه درشت‌دانه در شیب بالادست آن، حصول این ضرایب اطمینان بیشتر منطقی است. یافته اخیر با مطالعات آزمایشگاهی و میدانی دقیق و همکاران (۱۳۹۴) کاملاً همخوانی دارد.

به منظور استفاده از کاربردی از نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود حالات بحرانی‌تری برای مدل‌سازی پایداری شیروانی‌های سد گلستان درنظر گرفته شود. این حالات می‌تواند مانند الف) مدل‌سازی آبگیری سریع مخزن که در شرایط وقوع سیلاب‌های فصلی در منطقه قابل تصور است، ب) مدل‌سازی تحلیل لرزه‌ای سد خاکی گلستان به روش دینامیکی، و ج) مدل‌سازی جریان ورودی به مخزن سد به‌صورت محلولی دوفازی از آب و رسوب معلق (محلول چگال). بر مبنای قضاوت مهندسی، درنظر گرفتن همه این سه حالت، باعث کاهش ضریب اطمینان محاسباتی تا حدود ۲۰ درصد خواهد شد که ممکن است برای پایداری شیروانی‌های سد خاکی گلستان تا حدودی بحرانی باشد.

منابع

اسدیان، ح.، رحیمی، ا.، غفوری، م. و بشیرگنبدی، م. ۱۳۹۴. رفتارنگاری سد دوستی تا انتهای ساخت به‌کمک داده‌های ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی. نشریه علوم زمین، ۹۸: ۲۲۲-۲۱۳.

حکیمی خانسر، ح.، گلمایی، س.ح. و شیداییان، م. ۱۳۹۴. بررسی پایداری شیروانی در حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی در بدنه سد خاکی با استفاده از نرم‌افزارهای GeoStudio و Plaxis (مطالعه موردی: سد کبودوال). دو فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز. (۱۱)۵: ۸۹-۷۵.

دقیق، ح.، حسن‌پور درویشی، ح. و موسوی جهرمی، س.ح. ۱۳۹۴. آنالیز ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. (۲)۵: ۲۷-۱۵.

رحیمی، ح. ۱۳۹۳. سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۶ ص.

رسولی، ش.، ظهیری، ع.، مفتاح هلقی، م. و سلماسی، ف. ۱۴۰۴. بررسی و ارزیابی پارامترهای نشست، جابجایی و فشار حاصل از داده‌های ابزار دقیق (مطالعه موردی: سد خاکی گلستان). فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب. doi: 10.22126/atwe.2025.12129.1166

سلماسی، ف. و حکیمی خانسر، ح. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی رفتار سد کبودوال در زمان ساخت با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. (۹)۵۳: ۳۹۸۴-۳۹۶۷.

سلماسی، ف.، حکیمی خانسر، ح.، و نورانی، ب. ۱۳۹۷. بررسی نشست بدنه سد خاکی در دوران ساخت و مقایسه آن با نتایج تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS (مطالعه موردی: سد کبودوال). نشریه علوم آب و خاک. (۴)۲۲: ۱۷۱-۱۵۵.

شرکت آب منطقه‌ای گلستان. ۱۳۸۰. گزارش رفتارنگاری سد گلستان در مراحل ساخت و بهره‌برداری. شرکت مهندسین مشاور تهران-

برکلی.

شمس، ش.، و حقایق، ع. ۱۳۹۵. تحلیل عددی تغییرات تنش و فشار آب حفره‌ای در سد خاکی با رویه نفوذناپذیر و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق سد خاکی چیتگر. سومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش-های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

صادقی، م.، و اصلانی، م. ۱۳۸۹. تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای سنگریزه‌ای با هسته بتن آسفالتی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.

عالی‌محمدی پیرانشاهی، س.، شاه‌کرمی، ن. و اسدی، ح. ۱۴۰۰. تحلیل تراوش در شرایط افزایش ظرفیت مخزن با بالا بردن تراز سرریز (مطالعه موردی: سد خاکی کمال صالح). نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. (۹)۵۳: ۳۹۳۲-۳۹۱۳.

فتاحیان، م.، یوسف‌زاده، م. و کوه‌زادیان، ی. ۱۳۹۵. تحلیل پی و بدنه سدهای خاکی در حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی با استفاده از مدل‌های عددی. فصلنامه علمی تخصصی مهندسی و مدیریت ساخت. (۲)۱: ۱۴-۱۱.

قره، س.، اخلاقی، ف. و نوروززاده، ر . ۱۳۹۸. بررسی رفتار سد خاکی چهچهه با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی. مجله مدل‌سازی در مهندسی. (۵۹)۱۷: ۲۴-۱۱.

مرادی، س.، اسماعیلی، ک. و جبلی، ز. ۱۳۹۵. بررسی فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی در مراحل ساخت به وسیله نرم‌افزار Plaxis (مطالعه موردی: سد دامغان). دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای پژوهشی در عمران معماری و مدیریت شهری، تهران.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور. ۱۳۹۲. راهنمای تحلیل و طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی و سنگریز. نشریه ۶۲۴، امور نظام فنی.

یحیایی‌نیا، ا. ۱۳۹۹. آنالیز پایداری سد خاکی بر اساس تحلیل عددی و نتایج ابزار دقیق (مطالعه موردی سد دامغان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Beiranvand, B. and Komasi, M. 2021. An investigation on dam settlement during and end of construction using instrumentation data and numerical analysis. SN Applied Sciences. 3:306.

Desideri, A., Fontanella, E. and Pagano, L., 2013. Pore water pressure distribution for use in stability analyses of earth dams. Landslide Sci. Pract. Risk Ass. Manag. Mitig. 6: 149-153, https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_21.

El Bilali, A., Mohammed, M., Taleb, A., Nafii, A., Alabjah, B., Brouzyine, Y., Mazigh, N., Teznine, Kh. and Mhamed. M. 2021. Predicting daily pore water pressure in embankment dam using machine learning models and hydrostatic seasonal time approach. Environmental Science and Pollution Research. 29: 382-397.

Elfeki, A.M.M., Kamis, A.S., Al-Amri, N.S. and Bahrawi, J.A. 2014. On The hydraulic design of dam outlets in arid zones. Life Science Journal. 11(7): 254-260.

Javanmardi, M., Amiri, F. and Safavi, M. 2019. Instrumentation readings versus numerical analysis of Taham Dam. Int. J. Engineering. 32(1): 28-35.

Komasi, M. and Beiranvand, B. 2021. Seepage and stability analysis of the Eyvashan earth dam under drawdown conditions. Civil Engineering Infrastructures Journal. 54(2): 205-223.

Pagano, L., Fontanella, E., Sica, S. and Desideri, A., 2010. Pore water pressure measurements in the interpretation of the hydraulic behaviour of two earth dams. Soils Found. 50: 295-650, https://doi.org/10.3208/sandf.50.295.

Panthulu, T.V., Krishnaiah, C. and Shirke, J.M., 2001. Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. Engineering Geology. 59: 281-295.

Rashidi, M. and Haeri, M. 2017. Evaluation of behaviors of earth and rock fill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. J. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 9(4): 709-725.

Seyed-Kolbadi, S.M., Hariri-Ardebili, M.A., Mirtaheri, M. and Pourkamali-Anaraki, F. 2020. Instrumented health monitoring of an earth dam. Infrastructures. 5(3), 26.

Undayani, C.S., Partono, W., and Wardani, S.P.R. 2019. Displacement analysis of dam based on material parameters using numerical simulation and monitoring instrumentation. International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, MATEC Web of Conferences, Yogyakarta, Indonesia.

US Army Corps of Engineers (USACE). 1995. Instrumentation of embankment dams and levees engineering and design. Washington DC.

Zienkiewicz, O.C., Clough, R.W., and Seed, H.B. 1986. Earthquake analysis procedures for dams, state of the art. ICOLD/CIGB Bulletin No. 52, Int. Commission on Large Dams, Paris.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 795-811

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۸۱۱-۷۹۵

Numerical Analysis of Slope Stability of the Golestan Homogenous Earth Dam in Different Reservoir Conditions

Sh. Rasooli[1], A. Zahiri [2]*, M. Meftah Helghi[3], F. Salmasi[4]
Recived: Auj.03, 2025 Accepted: Aug.24, 2025

Abstract

Although daily measurement of pore water pressure at different points of an earthen dam is one of the methods for assessing the stability of slopes during construction and operation stages, the behavior of the dam must be modeled to increase the accuracy of the analysis, especially in the event of extreme hydrological phenomena. This modeling can be done in two ways: numerically (process-based) and machine learning (data-driven). In this study, the stability of the slopes of the Golestan homogeneous earthen dam under critical conditions such as steady seepage, end of construction, and rapid drawdown of the reservoir, and in three cases of full reservoir, half-full reservoir, and empty reservoir, has been modeled using GeoStudio software. The analyses performed are based on Spencer method, one the limit equilibrium methods. Also, the seismic analysis of this dam was investigated using the pseudo-static method in combination with steady seepage and the end of construction conditions. The results showed that in the case of full reservoir and in conditions of steady seepage, end of construction, and rapid drawdown of reservoir, the minimum safety factors obtained from calculations are 1.5, 1.32, and 1.62, respectively, which are all equal to or greater than the critical safety factor. Pseudo-static earthquake analysis showed that the minimum safety coefficients of the slopes of the Golestan Dam in two cases of rapid drawdown of the reservoir and at the end of construction are 1.46 and 1.35, respectively. These results indicate that in almost both of these cases, the stability of the slopes of this dam is accompanied by a very small safety margin or confidence.

Keywords: GeoStudio, Golestan dam, Homogeneous earth dams, Rapid drawdown of the reservoir, Slope stability

1- PhD Student in Water Science and Engineering-Water Structures, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2- Associate Professor in Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3- Professor in Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
4- Professor in Water Engineering, Tabris University, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: azahiri@gau.ac.ir, zahiri.areza@gmail.com)