

بررسی پایداری شیروانی سد خاکی تحت شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از روش قطعی و تحلیل قابلیت اطمینان (مطالعه موردی: سد نمرود)

امین ابراهیمی^{۱*}

مجتبی کریمائی طبرستانی^۲

چکیده

تحلیل پایداری شیروانی‌ها نظیر شیروانی سدهای خاکی یکی از مسائل با اهمیت در مهندسی ژئوتکنیک است. علت این موضوع در پیچیدگی مدل‌سازی رفتار خاک و سنگ و وجود عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی در فرا سنج‌های مؤثر بر پایداری توده خاک است که می‌تواند منجر به برآورد ناصحیح از احتمال پایداری سازه سد شود. بر این اساس در تحقیق حاضر اقدام به محاسبه ضریب‌های ایمنی پایداری شیروانی سد خاکی نمرود در استان تهران به عنوان مطالعه موردی در شرایط مختلف بارگذاری شامل تراوش ماندگار و پایان ساخت در حالت قطعی و احتمالاتی گردید. برای انجام تحلیل احتمالاتی از بسته نرم‌افزاری Geo-studio و روش تحلیل قابلیت اطمینان شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. همچنین اثر اعمال بار زلزله بر پایداری سازه سد نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط موجود سد احتمال شکست مقطع‌های بحرانی سد نمرود ناچیز بوده؛ به گونه‌ای که بیشترین مقدار احتمال شکست برابر با $0/00007$ بدست آمد. در ادامه اقدام به مطالعه میزان حساسیت خصوصیات احتمالاتی فرا سنج‌های مؤثر ورودی بر احتمال پایداری شیروانی سد گردید. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش بار زلزله به میزان ۱۵ درصد، احتمال شکست سد به میزان ۱۰۰ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که نوع توزیع فرا سنج‌های مؤثر اثر چندانی بر احتمال شکست سازه سد ندارد به گونه‌ای که با تغییر نوع توزیع فراسنجه وزن مخصوص از حالت نرمال به لگ نرمال^۲، احتمال شکست سد تنها به میزان $1/88$ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی:

سد خاکی نمرود، پایداری شیروانی، روش تعادل حدی، تحلیل قابلیت اطمینان، احتمال شکست

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران. AminEbrahimi060@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک و آب، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

مقدمه

مرحله طراحی و مطالعات اولیه بر روی تحلیل پایداری شیروانی سدهای خاکی می‌بایست با دقت و حساسیت بالایی صورت پذیرد زیرا اطلاعات اساسی در این مرحله مانند نوع بدنه سد، شیب شیروانی، نوع مصالح و نوع اجزا اصلی مشخص می‌گردد. تحلیل پایداری شیروانی شیب‌ها نظیر شیروانی‌های خاکی نامحدود سدهای خاکی یکی از مسائل پرتنش و چالش‌برانگیز مهندسی ژئوتکنیک است علت این موضوع در پیچیدگی مدل‌سازی رفتار خاک و سنگ و وجود عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی در فرا سنج‌های مؤثر بر پایداری توده خاکی است. در روش‌های کلاسیک، پایداری شیروانی سدهای خاکی را عموماً با تعیین یک مقدار ثابت برای کمیت ضریب ایمنی تعریف می‌کنند. ضریب ایمنی قابل قبول در تحلیل پایداری شیروانی سدهای خاکی بین ۱/۱ الی ۱/۵ در شرایط مختلف بارگذاری نظیر شرایط تراوش ماندگار، پایان ساخت، تخلیه سریع به همراه اعمال بار زلزله تعریف می‌شود (بیشاپ و مورگنسترن، ۱۹۶۰).^۱ از طرفی اثرات غیر-قطعی همیشه در تحلیل و طراحی سازه‌ها وجود دارد و در نتیجه جهت دستیابی به یک طرح ایمن، اتکا به یک عدد به عنوان ضریب ایمنی ثابت منطقی به نظر نمی‌رسد. به خصوص در مهندسی ژئوتکنیک به دلیل رفتارهای ناشناخته خاک و سنگ این موضوع اهمیت دوچندان دارد. در تعیین ضریب ایمنی پایداری شیروانی سدهای خاکی روش‌های گوناگون و کارآمدی وجود دارد. روش تعادل حدی پرکاربردترین و مهم‌ترین روش قطعی جهت تحلیل پایداری شیروانی سدهای خاکی به حساب می‌آید که استفاده از آن در مطالعات محققین مختلف بیشتر به چشم می‌خورد.

سلسنتینو و دانکن در سال ۱۹۸۱^۲ جهت تعیین سطح-های شکست بحرانی غیر دایره‌ای در روش تعادل حدی از روش فرا سنج‌های تناوبی استفاده کردند. البته محدودیت این روش، مشخص بودن محدوده سطح لغزش بحرانی است. آرای و تاگیو در سال ۱۹۸۵^۳ در تحقیق خود با استفاده از روش جانبو^۴ و گرادیان مزدوج، سطح گسیختگی و ضریب ایمنی حداقل را محاسبه نمودند.

ها و دلوین^۵ ۲۰۰۳ با استفاده از ترکیب روش برنامه‌نویسی پویا^۶ و المان محدود اقدام به محاسبه پایداری شیروانی خاکی نمودند. مقایسه نتایج حاصل از این تحلیل با روش‌های معمول حالات حدی نشان داد که نتایج روش این محققین از انعطاف‌پذیری بیشتری با توجه به موقعیت و شکل سطح لغزش بحرانی انتخابی برخوردار است که می‌تواند به نتایج بهتری دست یابد.

چنگ و ژو در سال ۲۰۰۴^۷ روشی را برای محاسبه مقدار ضریب ایمنی دوبعدی با استفاده از روش تعادل حدی ارائه دادند ایشان در روش خود از تقریب خطی گوس-نیوتن استفاده کردند. ذوالفقاری (۲۰۰۵)^۸ از الگوریتم ساده شده ژنتیک، چنگ در سال ۲۰۰۸^۹ از روش الگوریتم ماهی‌ها، کانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳^{۱۰} با روش الگوریتم مصنوعی اجتماع زنبور، به تحلیل پایداری شیروانی پرداختند.

اخیراً استفاده از روش قابلیت اطمینان با توجه به قابلیت بالای آن‌ها در بهینه نمودن طرح‌های مهندسی و بالا بردن توان مدیریتی پروژه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. روش-های رایج احتمالاتی شامل روش شبیه‌سازی مونت کارلو^{۱۱} MCST، روش قابلیت اطمینان مرتبه اول^{۱۲} FORM و روش قابلیت اطمینان مرتبه دوم^{۱۳} SORM می‌باشند. از بین روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اطمینان، روش‌های

^۱ Bishop and Morgenstein 1960^۲ Celestino and Duncan 1981^۳ Arai and Tagyo 1985^۴ Method of Johnbo^۵ Ha and Delwyn 2003^۶ Dynamic Programming^۷ Cheng and Zhu 2004^۸ Cheng 2008^۹ Kang and Ma 2013^{۱۰} Monte Carlo Simulation Technique^{۱۱} First Order Reliability Method^{۱۲} Second Order Reliability Moment

شبیه‌سازی نظیر MCST بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده، احتمال شکست سیستم را به دست می‌دهند. در روش MCST بعد از تعیین معادله هدف یا تابع حالت حدی، با توجه به مشخصات توزیع آماری هر فراسنجه تصادفی مؤثر بر پدیده نظیر میانگین، واریانس و ضریب پراکندگی، اقدام به تولید تعداد کافی داده شبیه‌سازی شده از آن فراسنجه می‌شود و پس از قرار دادن داده‌ها در تابع هدف، احتمال شکست سازه و شاخص قابلیت اطمینان با توجه به داده‌های شبیه‌سازی شده محاسبه می‌گردد. این روش با توجه به سادگی محاسبات و دقت بالا (در صورت تولید داده‌های کافی) از محبوبیت زیادی برخوردار است ولی مشکل آن حجم زیاد محاسبات و سرعت کم زمان اجرا است. از سال ۱۹۷۰ مباحث قابلیت اطمینان در مهندسی عمران نظر بسیاری از اندیشمندان و پژوهش‌گران این عرصه را به خود جلب نمود پیراس^۱ در سال ۲۰۱۲. در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی در مورد تحلیل مسائل مربوط به سدهای خاکی با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان صورت پذیرفت. که در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد.

گریفیتس و همکاران در سال ۲۰۱۱^۲ مطالعه‌ای را بر روی تحلیل قابلیت اطمینان شیروانی خاکی نامحدود انجام دادند. ایشان در تحقیق خود از روش‌های شبیه‌سازی و قابلیت اطمینان مرتبه اول استفاده کردند و نتیجه گرفتند که روش شبیه‌سازی مقادیر احتمال شکست بزرگ‌تری را بدست می‌دهد.

حیدری و امیری در سال ۱۳۹۴ در پژوهشی اقدام به ارائه یک روش برای تحلیل قابلیت اطمینان سد کارون ۴ تحت بارگذاری لرزه‌ای تصادفی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که اعتمادپذیری عملکردی سد بتنی کارون ۴ برابر با ۹۹ درصد است که ایمنی نسبتاً زیادی است.

پانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸^۳ در تحقیق خود به بررسی قابلیت اطمینان لرزه‌ای سد خاکی با روش تحول چگالی احتمال که اخیراً توسعه یافته (GPDEM)^۴ پرداختند. نتایج نشان می‌داد که GPDEM یک رویکرد

مؤثر برای ارزیابی قابلیت اطمینان لرزه‌ای از دیدگاه تصادفی است و می‌تواند به‌طور مستقیم احتمال شکست را منعکس کند.

سیاکارا و همکاران در سال ۲۰۲۰^۵ در پژوهشی به بررسی پایداری و محاسبه میزان ایمنی سد خاکی با روش تعادل محدود پرداختند. در این پژوهش از روش FORM و همچنین بسته نرم‌افزاری Geo-Studio جهت تحلیل قابلیت اطمینان سد استفاده شد. نتایج نشان داد که فرا سنج‌های تصادفی هدایت هیدرولیکی اشباع، زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی بیشترین سهم را بر احتمال شکست سد دارند.

در مقاله گوو و دیاس در سال ۲۰۲۰^۶ جهت محاسبه احتمال شکست سد از روش MCST و FORM استفاده شد. در این تحقیق تأثیر عوامل مختلفی نظیر طول تخلیه فیلتر و سطح آب مخزن موردبررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که در اکثر موارد این دو روش می‌توانند تخمین‌های مشابهی برای احتمال شکست به دست دهند. در سال‌های اخیر استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان در علوم مختلف به‌خصوص مهندسی ژئوتکنیک به نحو چشمگیری افزایش یافته است. آیین‌نامه‌های مختلف در حال تغییر و انتقال از مرحله طراحی قطعی به طراحی غیرقطعی و استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان می‌باشند. به این ترتیب نیاز است مطالعات مختلف در این زمینه انجام شود و کارایی آن موردبررسی بیشتر قرار گیرد (کریمایی طبرستانی، ۱۳۹۸).

بر این اساس در تحقیق حاضر اقدام به مطالعه تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیروانی سد خاکی نمود به‌عنوان مطالعه موردی می‌گردد و زوایای مختلف این تحلیل موردبررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور دو مقطع از مقطع‌های بحرانی سد انتخاب شد و مقادیر ضریب ایمنی قطعی به روش تعادل حدی مورگنسترن - پرایس و بیشاپ در حالت‌های متعارف بارگذاری شامل پایان ساخت و تراوش ماندگار محاسبه و بررسی می‌شود. در ادامه با در نظر گرفتن فرا سنج‌های دارای عدم قطعیت و مبانی

^۴ Generalized Probability Density Evolution Method (GPDEM)

^۵ Siakara et al 2020

^۶ Guo & Dias 2020

^۱ Peyras 2012

^۲ Griffiths et al. 2011

^۳ Pang et al 2018

احتمالات و با انتخاب روش MCST در حالت‌هایی نظیر شرایط موجود، تحلیل حساسیت اندازه بار زلزله، تحلیل حساسیت انحراف معیار استاندارد، اعمال ضریب همبستگی و تغییر نوع توزیع فرا سنج‌های مؤثر اقدام به محاسبه شاخص قابلیت اطمینان و احتمال شکست سد می‌گردد.

نرم‌افزار Geo-Studio

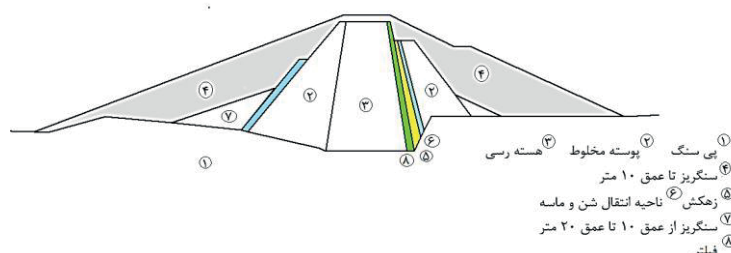
نرم‌افزار Geo-Studio از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر اجزاء محدود بوده و از طریق آن می‌توان تحلیل‌هایی از قبیل تنش-کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیروانی، تحلیل دینامیکی و همچنین شرایط افت سریع را بررسی کرد. این بسته نرم‌افزاری شامل ماژول‌های مختلف SIGMA/W برای تحلیل تنش-کرنش، SEEP/W برای تحلیل جریان تراوش، SLOPE/W برای پایداری شیروانی است. نرم‌افزار SEEP/W بر اساس رابط داری^۱ که عبور جریان آب از خاک را در دو حالت اشباع و غیراشباع بیان می‌کند، فرمول‌بندی شده است. همچنین Slope/W قابلیت تحلیل پایداری با اکثر روش‌های مربوط به تعادل حدی از جمله روش مورگنسترن - پرایس و بیشاپ را داراست. از مهم‌ترین مزایای دیگر این نرم‌افزار، قابلیت انجام تحلیل احتمالاتی با روش شبیه‌سازی مونت-کارلو در تعداد تکرار بسیار زیاد است همچنین این بخش از نرم‌افزار این امکان را به کاربر می‌دهد تا برای محاسبه دقیق‌ترین احتمال شکست در مقطع سد به تحلیل حساسیت فرا سنج‌های ورودی و تغییر این فراسنج‌ها از جمله میزان انحراف معیار، میانگین، نوع توزیع احتمالاتی و اعمال ضریب همبستگی بپردازد. این نرم‌افزار همچنین سازگاری و همبستگی بسیار مناسبی با سایر نرم‌افزارهای بسته نرم‌افزاری Geo Studio دارد. در تحقیق حاضر از این نرم‌افزار برای مطالعه پایداری یک سد خاکی در حالت قطعی و غیرقطعی (احتمالاتی) استفاده گردید.

معرفی سد نمرد

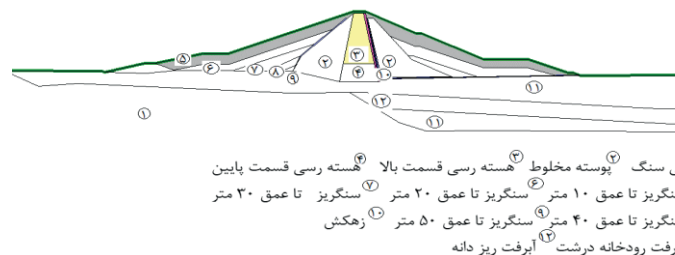
در این مطالعه از سد نمرد به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. این سد در حدود ۱۰۰ کیلومتری تهران و ۱۶ کیلومتری باختر- جنوب باختری شهرستان فیروزکوه و در

طول جغرافیایی ۳۵° و ۵۲° و عرض جغرافیایی ۴۳° و ۳۵° بر روی رودخانه نمرد واقع است. هدف از ساخت سد مخزنی نمرد تأمین آب کشاورزی مورد نیاز دشت‌های گرمسار، ایوانکی و آب شرب و صنعتی این شهرستان‌ها است (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱). این سد خاکی از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی و با رقوم تاج ۲۰۲۲ متر از سطح دریا و ارتفاع ۸۲ متر از بستر رودخانه ساخته شد که با توجه به رقوم پی‌کنی هسته، حداکثر ارتفاع سد از پی معادل ۸۳/۵ متر است. ساختگاه سد مخزنی نمرد در دره ای نسبتاً باز و متقارن قرار دارد. تکیه‌گاه راست و قسمت پایاب تکیه‌گاه چپ دارای شیب عمومی ۲ : ۱ تا ۵/۲ : ۱ بوده درحالی‌که شیب عمومی تکیه‌گاه چپ در قسمت سراب بین ۵/۲ : ۱ تا ۳ : ۱ است. پی سد از سنگ‌های آذرآواری از جنس توف همراه با لایه‌های آهکی تشکیل یافته است. در جدول (۱) مشخصات اجزا اصلی سد ارائه شده است. جهت مدل‌سازی پژوهش حاضر دو مقطع از مقطع‌های بحرانی سد خاکی نمرد انتخاب شد. مقطع شماره ۱ در منتهی‌الیه جناح چپ بدنه سد قرار دارد. در این مقطع ارتفاع سد از کف هسته تا رقوم تاج سد حدود ۴۳ متر و عرض کف هسته ۲۲/۶۰ متر است. شیروانی بالادست با شیب ۱ قائم به ۵/۲ افقی به سطح زمین می‌رسد. کل این مقطع روی سنگ پی قرار دارد این مقطع به دلیل داشتن ترکیب مصالح سازنده بدنه سد در مسیر سطوح لغزش احتمالی دارای ضعیف‌ترین فرا سنج‌های مقاومت برشی است. این مقطع به‌عنوان یکی از مقطع‌های بحرانی سد است. در شکل (۱) مقطع عرضی (۱) (مقطع جناح چپ) سد خاکی نمرد نشان داده شده است. مقطع عرضی (۲) در قسمت میانی بدنه سد قرار دارد. در این مقطع ارتفاع سد از کف هسته تا رقوم تاج سد حدود ۸۳/۵ متر و عرض کف هسته ۳۸ متر است. به‌طور کامل این مقطع بر روی آبرفت بستر رودخانه قرار دارد.

این مقطع از سد به دلیل داشتن بیشترین ارتفاع، به‌عنوان یکی دیگر از مقطع‌های بحرانی جهت مطالعه پایداری شیروانی مطرح است. در شکل (۲) مقطع عرضی (۲) سد خاکی نمرد نشان داده شده است.



شکل (۱): مقطع (۱) واقع در جناح چپ سد نمرود (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱)



شکل (۲): مقطع (۲) واقع در بخش میانی سد نمرود (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱)

جدول (۱): مشخصات اجزاء اصلی سد خاکی سنگریزه‌ای نمرود (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱)

مشخصه	تعریف	مشخصه	تعریف	مشخصه	تعریف
نوع سد	خاکی سنگریزه‌ای	سیستم انحرافی موقت	فرازبند همگن و تونل انحراف	ارتفاع سد از کف پی هسته رسی	۸۳/۵ متر
سیستم آب‌بندی دائم	هسته رسی و دیوار آب‌بند	ارتفاع سد از کف رودخانه	۸۱ متر	حجم بدنه	۶۳ میلیون مترمکعب
حجم هسته رسی	۷۷۰۰۰ مترمکعب	شیب بالادست	۱ افقی به ۲/۵ قائم	شیب پایین‌دست	۱ افقی به ۲ قائم
نوع سرریز	اوجی آزاد به عرض ۲۳ متر خالص	حجم مخزن در تراز نرمال	۱۳۹/۱ میلیون مترمکعب	سیستم آبیگری	تونل تحت فشار به قطر نهایی ۲/۵ متر

مراحل تحلیل پایداری شیروانی سد نمرود بر اساس تئوری قابلیت اطمینان

اساس روش احتمالاتی این امکان را فراهم می‌کند که به ابزارهای قدرتمندی جهت کمی کردن عدم قطعیت شامل محاسبه تابع هدف^۱، احتمال شکست^۲ و شاخص قابلیت اطمینان^۳ تبدیل گردند. در ادامه اقدام به ارائه جزئیات بیشتری از مراحل انجام تحلیل قابلیت اطمینان با روش MCST بر روی سد نمرود می‌گردد.

تابع هدف

مرز بین عملکرد مطلوب یک سیستم و عملکرد نامطلوب آن سیستم به صورت یک حالت حدی با تابع هدف $g(x) = 0$ نشان داده می‌شود. چنانچه تابع هدف $g \geq 0$ باشد، ایمنی سازه تأمین می‌گردد و در صورتی که تابع هدف $g < 0$ حاصل گردد سازه مورد نظر ایمنی خود را از دست می‌دهد و در مباحث تحلیل پایداری شیروانی به اصطلاح گسیختگی در شیب رخ می‌دهد.

روش‌های مرسوم تحلیل پایداری شیب بر اساس ضریب ایمنی بدست آمده از روش قطعی، نمی‌توانند عدم قطعیت فرا سنج‌های ورودی را به صورت صریح نشان دهند به همین دلیل عدم قطعیت‌های موجود در فرا سنج‌های ژئوتکنیکی مصالح و ساختگاه در پتانسیل شکست سد نادیده گرفته می‌شوند. قابلیت اطمینان، بیانگر احتمال عملکرد باکفایت یک سیستم تحت شرایط کاری از پیش تعیین شده و برای مدت زمانی معین است. از این روش برخلاف روش‌های مرسوم پایداری شیروانی در حالت قطعی، برای تحلیل مباحثی استفاده می‌گردد که به دنبال رفع ابهامات و عدم قطعیت‌های موجود در مسئله است.

^۱ Reliability Index

^۲ Basic Function

^۳ Probability of Failure

در این رابطه c چسبندگی، ΔL_i طول ضلع قطعه، w_i وزن هر قطعه، u فشار آب حفره‌ای، φ زاویه اصطکاک داخلی خاک و α_i زاویه قطعه با افق است.

احتمال شکست

احتمال شکست (P_f) را می‌توان با توابع چگالی احتمال مربوط به متغیرهای ورودی به تابع هدف به دست آورد. احتمال شکست بر اساس معادله (۴) تعریف می‌گردد که یک معادله عمومی برای حل مسائل قابلیت اطمینان است. (هالدر و ماهدوان، ۲۰۰۰)^۲.

$$P_f = \iiint F_x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), dx_1, \dots, dx_n \quad (4)$$

که در آن $f_x(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ تابع چگالی احتمال ترکیبی برای متغیرهای پایه x است و انتگرال‌گیری روی تمام سطوح شکست اتفاق می‌پذیرد. در عمل بدست آوردن تابع چگالی احتمال و انتگرال‌گیری از این معادله چندان ساده و دست‌یافتی نیست. در نتیجه از روش‌های تقریبی نظیر روش FORM و یا روش‌های شبیه‌سازی نظیر MCST جهت تحلیل قابلیت اطمینان و حل معادله (۴) استفاده می‌گردد. در این پژوهش از روش MCST به دلیل دقیق‌تر بودن و سهولت انجام محاسبات استفاده گردید. البته مشکل این روش زمان طولانی انجام محاسبات است. این روش این امکان را برای کاربر فراهم می‌نماید که شکل تابع عملکرد را انتخاب کند تا مقادیر احتمالاتی دقیق و قابل محاسبه باشند (مهربانی لاری، ۱۳۹۴). در این روش بعد از تولید اعداد تصادفی، مقدار تابع حالت حدی $g(x)$ برای هر دسته از اعداد تصادفی که یک چرخه شبیه‌سازی محسوب می‌شود، محاسبه می‌گردد. در ادامه با استفاده از رابطه زیر احتمال شکست سازه محاسبه می‌گردد:

$$P_f = \text{prob}(p < 1) = \frac{n_f}{n_t} \quad (5)$$

که در آن P_f احتمال گسیختگی است.

در این روش جهت اطمینان از درستی نتایج، نیاز به تعداد زیادی چرخه شبیه‌سازی وجود دارد تا رفتار تابع عملکردی

در تحلیل سدهای خاکی تابع هدف به صورت معادله (۱) تعریف می‌گردد (حریری اردبیلی، ۲۰۱۸).

$$g(x) = F - 1 = \frac{R}{S} - 1 \quad (1)$$

که در آن R نماینده نیروهای مقاوم، S نماینده نیروهای محرک و F ضریب ایمنی سد خاکی است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد ضریب ایمنی پایداری شیروانی F در معادله (۱) را می‌توان با روش‌های مختلفی تعیین کرد. در تحقیق حاضر از روش تعادل حدی مورگنسترن-پرایس و بیشاپ و به کمک نرم‌افزار Geo-studio برای محاسبه فراسنجه F استفاده می‌شود. در روش مورگنسترن-پرایس هر دو تعادل نیروها و تعادل گشتاور ارضا می‌گردد. در این روش پس از برش زدن پروفیل شیروانی به تعداد n قطعه، ضریب ایمنی پایداری شیروانی با استفاده از رابطه زیر و به صورت سعی و خطا محاسبه می‌گردد (مورگنسترن و پرایس، ۱۹۶۷)^۱.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) + T_n} \quad (2)$$

در این معادله، R نیروهای مقاوم، T نیروهای محرک و Ψ فراسنجه‌ی برحسب ضریب ایمنی، زاویه قطعه با افق و زاویه اصطکاک داخلی خاک است. همچنین در روش بیشاپ نیز برای حل مسئله، بعد از قطعه‌قطعه نمودن پروفیل شیروانی به تعداد n قطعه از روش سعی و خطا برای محاسبه ضریب ایمنی استفاده می‌شود. یعنی در ابتدا یک ضریب ایمنی معقول فرض شده و سپس ضریب ایمنی جدیدی محاسبه می‌گردد. ضریب ایمنی در این روش بر اساس رابطه زیر تعریف می‌گردد (بیشاپ، ۱۹۵۵)^۲.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{c \Delta L_i \cos \alpha_i + (w_i - u \Delta L \cos \alpha_i) \tan \varphi}{\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i \tan \varphi}{F}} \right)}{\sum_{i=1}^n w_i \sin \alpha_i} \quad (3)$$

به‌درستی تعیین گردد. در صورتی که تعداد چرخه‌های فرا سنجه‌های ورودی

در این تحلیل، فرا سنجه‌های مقاومتی مصالح مختلف به‌کاررفته در بدنه سد (رجوع به شکل (۱) و (۲)) شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و همچنین وزن مخصوص به‌عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که سطح لغزش‌های گسیختگی از مصالح محدودی در سد خاکی عبور می‌کند بدین منظور برای انجام تحلیل قابلیت اطمینان از فرا سنجه‌های مکانیکی سه مصالح (مصالح هسته، پوسته میانی و خاک سنگ‌ریز تا عمق ده متر) استفاده می‌شود. کمی‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به این فراسنجها به کمک مشخصه‌های آماری مختلف نظیر میانگین، واریانس و همچنین نوع توزیع احتمالاتی آن‌ها انجام می‌گیرد. بر این اساس در جدول (۲) مقادیر میانگین و انحراف معیار فرا سنجه‌های چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و وزن مخصوص (γ) برای بخش‌های مختلف بدنه سد شامل هسته، پوسته و سنگ‌ریز در حالت آزمایش سه محوری UU ارائه شده است. مقادیر میانگین در این جدول از گزارش‌های طراحی سد نمود استخراج شد (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱). همچنین مقادیر انحراف معیار نیز به‌صورت حد بالای مقادیر گزارش‌شده در مقالات و گزارش‌های مختلف در نظر گرفته شد.

شاخص قابلیت اطمینان

شاخص قابلیت اطمینان درواقع بیان دیگری از احتمال شکست سازه است. این شاخص درواقع کوتاه‌ترین فاصله خط تابع هدف $g(Z_R, Z_S)=0$ تا مبدأ فرا سنجه‌های فروکاست بار و مقاومت (Z_R, Z_S) در فضای نرمال استاندارد است. در معادله (۱) چنانچه نیروهای مقاوم و محرک از هم مستقل باشند می‌توان شاخص قابلیت اطمینان را عکس ضریب پراکندگی تابع هدف دانست. همچنین اگر نیروهای مقاوم و نیروهای محرک به‌صورت متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال تعریف شوند، می‌توان رابطه شاخص قابلیت اطمینان را با احتمال شکست برابر با معادله (۶) دانست (ژائو و همکاران، ۱۹۹۹).^۲

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f) \quad (6)$$

که در آن β برابر با شاخص قابلیت اطمینان است. بر طبق آیین‌نامه (۱۹۹۷) USACE^۱ چنانچه شاخص β بزرگ‌تر از ۴ باشد، پایداری سد در شرایط خوبی قرار دارد. درحالی‌که مقادیر کمتر از ۱/۵ برای این شاخص می‌تواند سد را در شرایط خطرناکی قرار دهد.

جدول (۲): میانگین و انحراف معیار مصالح سد خاکی نمود

مقطع ۱		مقطع ۲		میانگین	انحراف معیار
پوسته	c (kPa)	۲۰	۴/۴	۴	۱
	ϕ (deg.)	۲۱	۴/۴	۳۳	۷/۱
	γ (kn.m ⁻³)	۲۲	۴/۴	۲۲	۴/۷
هسته	c (kPa)	۱۰	۲/۲	۱۰	۲/۲
	ϕ (deg.)	۱۹	۴/۴	۳۲	۷
	γ (kn.m ⁻³)	۲۱	۴/۴	۲۱	۴/۴
سنگ‌ریز	c (kPa)	۰	۰	۰	۰
	ϕ (deg.)	۴۶	۹/۴	۴۶	۹/۴
	γ (kn.m ⁻³)	۲۱/۹	۴/۴	۲۱/۹	۴/۴

^۱ U.S. Army Corps of Engineers

^۱ Halder A. and Mahadevan S

^۲ Zhao et al., 1999

شرایط بارگذاری

در تحقیق حاضر تحلیل پایداری شیروانی سد خاکی نمود در دو حالت پایان ساخت و تراوش ماندگار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت پایان ساخت قبل از آبیگری مخزن سد، تحلیل پایداری شیروانی با معرفی فشار منفذی اضافی ناشی از ساخت سد انجام می‌گردد. در حالت پایان ساخت فرا سنبه‌های مقاومت برشی مصالح هسته و پوسته از نتایج آزمایش سه محوری UU بر روی مصالح متراکم شده و رطوبت متناظر بدون اشباع نمونه استفاده می‌گردد. همچنین در حالت بهره‌برداری از سد و مخزن لازم است از نتایج آزمایش‌های CD و CU استفاده شود. در این حالت بحرانی‌ترین حالت از نظر پایداری زمانی است که سطح همچنین برای مقایسه نتایج تحلیل قابلیت اطمینان

(روش احتمالاتی) با نتایج تحلیل کلاسیک، در ابتدا امر

پایداری

شیروانی سد در شرایط قطعی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در شرایط شبه‌استاتیکی میزان ضریب بار افقی زلزله بر مبنای زلزله بهره‌برداری برای شرایط پایان ساخت برابر با ۰/۱۵ و در شرایط تراوش ماندگار بار زلزله برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شد (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱).

خلاصه تحلیل‌های انجام‌شده

در این بخش خلاصه‌ای از مدل‌سازی‌های انجام‌شده مطابق جدول (۳) مربوط به روش قطعی و جدول (۴) مربوط به روش غیرقطعی (احتمالاتی) ارائه می‌گردد. نکته دیگر اینکه محدوده زمانی اجرای تحلیل‌های غیرقطعی برای کامپیوتری با مشخصات intel® core™ 2Duo CPU رم ۴ و حالت سیستم 64-bit مابین ۸ الی ۱۶ ساعت است. به این ترتیب کل زمان اجرای مدل‌سازی در نرم‌افزار ۲۳۰ ساعت است.

جدول (۳): خلاصه تحلیل‌های انجام‌شده در روش قطعی

عنوان	جزئیات مدل‌سازی
روش تحلیل	روش تعادل حدی و استفاده از روابط مورگنسترن - پرایس و بیشاپ
مقطع‌های مورد تحلیل	۲ مقطع مختلف شامل مقطع (۱) در جناح چپ و مقطع (۲) در محدوده میانی دره
شرایط بارگذاری	۲ نوع بارگذاری شامل شرایط پایان ساخت برای مقطع (۱) در حال با و بدون زلزله و ۴ نوع بارگذاری شامل شرایط پایان ساخت و تراوش ماندگار برای مقطع (۲) در حالت با و بدون زلزله
نوع سطح لغزش	۲ نوع مختلف شامل نوع (۱) Entry and Exit برای هر دو مقطع و نوع (۲) Grid and Radius برای هر دو مقطع
تعداد مدل‌سازی	مقطع شماره (۱) به تعداد ۴ مدل و مقطع شماره (۲) به تعداد ۸ مدل

جدول (۴): خلاصه تحلیل‌های انجام‌شده در روش غیرقطعی

هدف از تحلیل	جزئیات مدل‌سازی	تعداد مدل‌سازی
تعیین تعداد چرخه شبیه‌سازی	شرایط پایان ساخت مقطع (۲)	۵ مدل
قابلیت اطمینان در شرایط موجود	شرایط پایان ساخت مقطع (۱)، شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲)	۴ مدل
تحلیل حساسیت اندازه بار زلزله	شرایط پایان ساخت مقطع (۱)، شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲)	۴ مدل
تحلیل حساسیت انحراف معیار استاندارد	شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲)	۶ مدل
تحلیل حساسیت ضریب همبستگی	شرایط پایان ساخت مقطع (۱) و شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲)	۴ مدل
تحلیل حساسیت نوع توزیع احتمالاتی	شرایط پایان ساخت مقطع (۱) و شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲)	۴ مدل

تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش با توجه به مطالب ارائه‌شده در جدول‌های (۳) و (۴)، نتایج حاصل از تحلیل قطعی و قابلیت اطمینان شیروانی مقطع (۱) (جناح چپ) در شرایط پایان ساخت و مقطع (۲) (جناح میانی) سد خاکی نمود در شرایط

تراوش ماندگار از تراز نرمال و پایان ساخت در دو حالت با و بدون بار زلزله ارائه می‌گردد.

تحلیل قطعی پایداری شیروانی

در حالت قطعی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت فرا سنبه‌های مدل‌سازی، تحلیل پایداری شیروانی هر دو

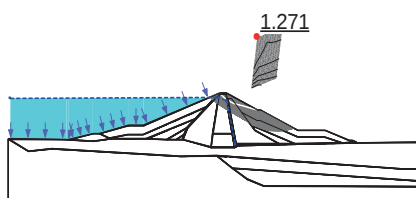
مقطع بحرانی سد نمرود صورت پذیرفت. در جدول (۵) نتایج تحلیل پایداری شیروانی بالادست سد و در جدول (۶) نتایج تحلیل پایداری شیروانی پایین دست سد نمرود با استفاده از روش های مورگنسترن - پرایس و بیشاپ در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی ارائه شده است. همچنین در این دو جدول مقادیر ضریب ایمنی ارائه شده توسط مشاور طرح نیز ارائه شده اند (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۱). در تحقیق حاضر از دو نوع سطح لغزش مختلف شامل Entry and Exit و Grid and Radius جهت

جدول (۵): نتایج تحلیل پایداری شیب مقطع جناح چپ (مقطع ۱) در شرایط پایان ساخت

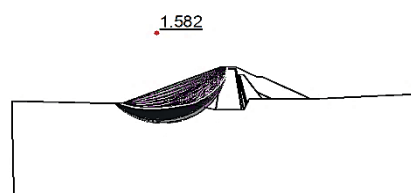
ردیف	سطح لغزش	ضریب ایمنی	شبه استاتیکی	روش تحلیل
۱	Entry and Exit	۲/۴۹۵	۱/۵۸۲	مورگنسترن پرایس
۲	Grid and Radius	۲/۴۵۶	۱/۷۷۵	مورگنسترن پرایس
۳	Entry and Exit	۲/۵۲۰	۱/۶۰۷	بیشاپ
۴	Grid and Radius	۲/۴۸۲	۱/۶۴۷	بیشاپ
۵	Entry and Exit	۲/۰۰۲	۱/۳۸۲	مشاور طرح
۶	Grid and Radius	۲/۱۲۸	۱/۴۹۳	مشاور طرح

جدول (۶): نتایج تحلیل پایداری شیب مقطع میانی (مقطع ۲) در شرایط تراوش ماندگار از مخزن و شرایط پایان ساخت

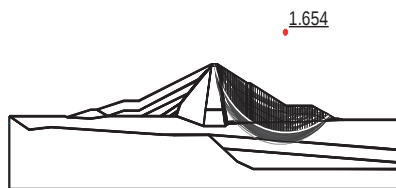
ردیف	سطح لغزش	شرایط بارگذاری	ضریب ایمنی	شبه استاتیکی	روش تحلیل
۱	Entry and Exit	تراوش ماندگار	۲/۴۶۵	۱/۳۳۰	مورگنسترن پرایس
۲	Grid and Radius	تراوش ماندگار	۲/۴۲۲	۱/۳۳۴	مورگنسترن پرایس
۳	Entry and Exit	تراوش ماندگار	۲/۴۶۰	۱/۳۰۸	بیشاپ
۴	Grid and Radius	تراوش ماندگار	۲/۰۸۲	۱/۲۷۱	بیشاپ
۵	Entry and Exit	تراوش ماندگار	۲/۱۴۲	۱/۹۷۸	مشاور طرح
۶	Grid and Radius	تراوش ماندگار	۲/۴۵۰	۲/۲۲۰	مشاور طرح
۷	Entry and Exit	پایان ساخت	۲/۰۱۳	۱/۶۵۴	مورگنسترن پرایس
۸	Grid and Radius	پایان ساخت	۱/۹۶۱	۱/۶۷۶	مورگنسترن پرایس
۹	Entry and Exit	پایان ساخت	۲/۰۶۱	۱/۸۲۲	بیشاپ
۱۰	Grid and Radius	پایان ساخت	۲/۱۰۲	۱/۷۰۶	بیشاپ
۱۱	Grid and Radius	پایان ساخت	۱/۹۵۲	۱/۲۷۵	مشاور طرح
۱۲	Entry and Exit	پایان ساخت	۱/۹۰۰	۱/۲۵۶	مشاور طرح



شکل (۴): بحرانی ترین ضریب ایمنی تحلیل پایداری شیروانی تراوش ماندگار مقطع (۲) به روش سطح لغزش Grid and Radius



شکل (۳): بحرانی ترین ضریب ایمنی تحلیل پایداری شیروانی پایان ساخت مقطع (۱) به روش سطح لغزش Grid and Radius



شکل (۵): بحرانی ترین ضریب ایمنی تحلیل پایداری شیروانی پایان ساخت مقطع (۲) به روش سطح لغزش Entry and Exit

دارای عدم قطعیت، اعمال ضریب همبستگی و تغییر نوع توزیع فرا سنج‌های مؤثر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تعیین تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی

تعداد چرخه شبیه‌سازی بر روی پاسخ دریافت شده از روش MCST مؤثر است. به این ترتیب اولین قدم، انتخاب تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی (n_t) است به گونه‌ای که جواب‌های مستقلی بدست آید. البته باید توجه داشت که هر چه مقدار n_t افزایش یابد زمان تحلیل نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه لازم است که یک مقدار بهینه محاسبه شود. در تحقیق حاضر برای انجام این کار، تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیروانی مقطع (۲) با استفاده از مقادیر مختلف فراسنجه n_t انجام گرفت. نتایج خروجی تحلیل قابلیت اطمینان شامل احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان در جدول (۷) ارائه شده است. همچنین با توجه به نتایج این جدول، تغییرات فراسنجه P_f نسبت به n_t نشان داده شده است. بررسی اطلاعات جدول (۷) و شکل (۶) نشان می‌دهد که نتایج روش MCST متناظر با تعداد ۲۰۰۰۰ چرخه شبیه‌سازی تفاوت چندانی با ۱۵۰۰۰ ندارد. به این ترتیب تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی (n_t) برابر با ۱۵۰۰۰ به عنوان مبنای تحلیل قابلیت اطمینان حاضر قرار می‌گیرد و در تحلیل‌های آتی از این تعداد چرخه شبیه‌سازی استفاده شد.

جدول (۷): تغییرات تعداد تکرارهای شبیه‌سازی بر نتایج

حاصل از روش MCST

ردیف	n_t	P_f	شاخص β
۱	۱۰۰۰	۰/۰۰۷۷	۲/۴۲۲
۲	۵۰۰۰	۰/۰۳۰	۱/۸۷۶
۳	۱۰۰۰۰	۰/۰۴۲	۱/۷۲۱
۴	۱۵۰۰۰	۰/۰۵۳	۱/۶۱۶
۵	۲۰۰۰۰	۰/۰۵۳	۱/۶۱۴

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در شرایط پایان ساخت، روش بیشاپ کمینه ضریب ایمنی در شرایط شبه‌استاتیکی را با فرض سطح لغزش انتخابی Grid and Radius برابر با ۱/۴۵۸ به دست می‌دهد که بحرانی ترین ضریب ایمنی از دیدگاه روش تعادل حدی در مقطع (۱) است. همچنین همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد، بحرانی ترین ضریب ایمنی پایداری شیروانی در شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲) مربوط به روش بیشاپ در شرایط شبه‌استاتیکی و انتخاب سطح لغزش Grid and Radius است که دارای مقداری برابر با ۱/۲۷۱ است در حالی که در حالت استاتیکی این مقدار به عدد ۲/۰۸۲ می‌رسد. همچنین کمترین ضریب ایمنی در شرایط پایان ساخت مقطع (۲) مربوط به روش مورگنسترن - پرایس با اعمال بار زلزله و انتخاب سطح لغزش Entry and Exit است که دارای مقداری برابر با ۱/۶۵۴ است. به‌طور کلی نتایج ارائه‌شده در جدول - های (۵) و (۶) نشان می‌دهند که ضریب‌های ایمنی محاسبه‌شده در روش بیشاپ و مورگنسترن - پرایس اندکی بالاتر از ضریب‌های ایمنی ارائه‌شده توسط مشاوره طرح است. همچنین با انتخاب سطح لغزش Grid and Radius ضریب‌های ایمنی در هر دو روش بیشاپ و مورگنسترن - پرایس و در هر دو حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی مقداری کاهش داشته است اما کلیه ضریب‌های ایمنی حاصله در محدوده مجاز برای تحلیل پایداری شیروانی سدهای خاکی قرار گرفته است.

تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیروانی

در این بخش طبق جزئیات ارائه‌شده در جدول (۴)، نتایج تحلیل غیرقطعی (احتمالاتی) پایداری شیروانی سد نمود در حالت‌های مختلف شامل بررسی شرایط موجود، تحلیل حساسیت بر روی اندازه زلزله اعمالی به مدل، تحلیل حساسیت انحراف معیار انتخاب شده برای متغیرهای

به گونه‌ای که مقدار فراسنجه احتمال شکست در حالت مورگنسترن - پرایس به عدد ۰/۰۵۵ و احتمال شکست در حالت بیشاپ به مقدار ۰/۰۲۸ می‌رسد. همچنین مقدار میانگین ضریب‌های ایمنی در هر دو حالت بیشتر از ۱ به دست می‌آید.

جدول (۸) نتایج تحلیل قابلیت اطمینان پایداری مقطع

(۱) سد نمرود در شرایط پایان ساخت و افزایش بار زلزله

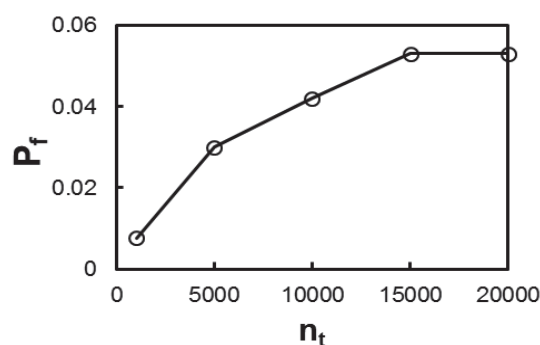
فراسنجه	مورگنسترن - پرایس	بیشاپ
میانگین ضریب ایمنی	۱/۱۱۰	۱/۱۵۶
انحراف معیار ضریب ایمنی	۰/۰۴۶۶	۰/۰۵۳۱
شاخص β	۱/۵۹۳	۲/۸۳۳
P_f	۰/۰۵۵	۰/۰۰۲

در جدول (۹) نتایج تحلیل MCST در حالت شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲) سد نمرود با افزایش ضریب بار زلزله به میزان ۱۵ درصد نسبت به بار زلزله بهره‌برداری (که برابر با ۰/۲ است) ارائه شده است. با افزایش میزان بار زلزله، احتمال شکست سد با هر دو روش مورگنسترن - پرایس و بیشاپ افزایش یافته به گونه‌ای که مقدار فراسنجه احتمال شکست در حالت مورگنسترن - پرایس به عدد ۰/۰۵۳ و احتمال شکست در حالت بیشاپ به مقدار ۰/۰۲۶ می‌رسد. همچنین مقدار میانگین ضریب‌های ایمنی در هر دو حالت تقریباً برابر با ۱ به دست می‌آید. در شکل (۷) نیز نتایج تحلیل پایداری شیروانی مقطع (۲) به همراه تابع چگالی احتمال ضریب ایمنی در حالت تراوش ماندگار و استفاده از رابطه مورگنسترن - پرایس ارائه شده است.

جدول (۹): نتایج تحلیل قابلیت اطمینان پایداری مقطع (۲) سد

نمرود در شرایط تراوش ماندگار و افزایش ضریب زلزله

فراسنجه	مورگنسترن - پرایس	بیشاپ
میانگین ضریب ایمنی	۱/۰۱۴	۰/۹۴۲
انحراف معیار ضریب ایمنی	۰/۰۶۷	۰/۰۵۴
شاخص β	۱/۶۱۶	۱/۹۲۷
P_f	۰/۰۵۳	۰/۰۲۶



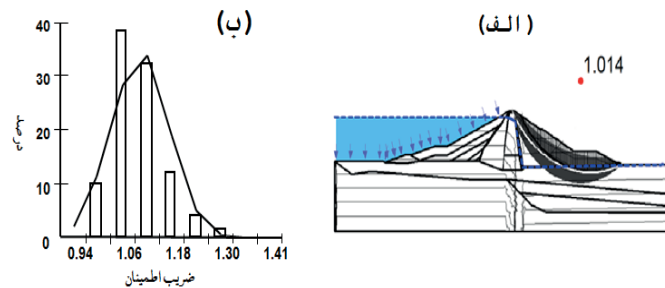
شکل (۶): تغییرات احتمال شکست با تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی

بررسی شرایط موجود

نتایج روش MCST در حالت شرایط موجود نشان می‌دهد که به علت ضریب ایمنی بالای سد نمرود، احتمال شکست در حالت‌های مختلف استاتیکی و شبه‌استاتیکی (با اعمال ضریب زلزله طرح ۰/۲) مقداری ناچیز است. به گونه‌ای که در بدترین حالت مربوط به شرایط پایان ساخت در مقطع (۱) شاخص قابلیت اطمینان برابر با ۶/۹۸۲ و احتمال شکست برابر با 10^{-12} است. همچنین در شرایط تراوش ماندگار مقطع (۲)، کمترین شاخص قابلیت اطمینان و بیشترین احتمال شکست به ترتیب برابر با ۳/۸۲۵ و ۰/۰۰۰۰۷ محاسبه شد.

تحلیل حساسیت اندازه بار زلزله

با توجه به اینکه که در شرایط موجود احتمال شکست سد مقدار ناچیزی به دست آمد در ادامه اقدام به افزایش ضریب زلزله طرح به میزان ۱۵ درصد شد و نتایج حاصل از تحلیل MCST در حالت‌های تراوش ماندگار و پایان ساخت با شرایط موجود سد مقایسه شدند. در جدول (۸) نتایج تحلیل در حالت شرایط پایان ساخت مقطع (۱) سد نمرود با افزایش ضریب بار زلزله به میزان ۱۵ درصد نسبت به بار زلزله بهره‌برداری (که مقداری برابر با ۰/۱۵ است) ارائه شده است. همان‌طور که از داده‌های این جدول مشخص است با افزایش میزان بار زلزله، احتمال شکست سد با هر دو روش تحلیل پایداری شیروانی مورگنسترن - پرایس و بیشاپ افزایش یافته



شکل (۷) نتایج تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیروانی مقطع (۲) سد نمرود در شرایط تراوش ماندگار و افزایش ضریب زلزله طرح به میزان ۱۵ درصد. (الف) سطوح مختلف گسیختگی به همراه میانگین ضریب ایمنی و (ب) تابع چگالی احتمال ضریب ایمنی

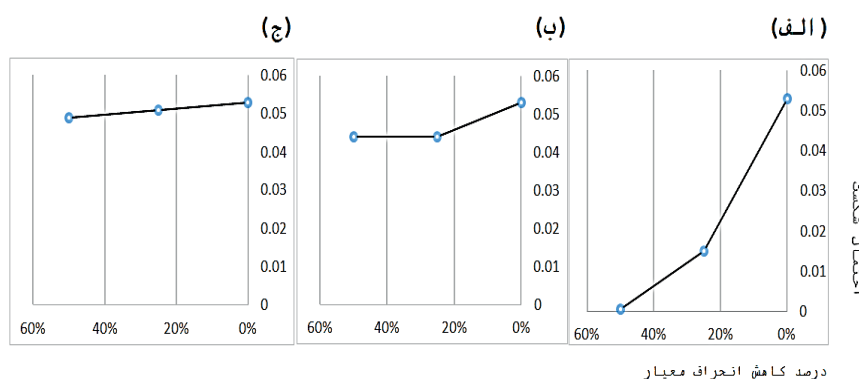
تحلیل حساسیت انحراف معیار فرا سنج‌های مؤثر

در این بخش تحلیل حساسیت انحراف معیار استاندارد فرا سنج‌های دارای عدم قطعیت (γ, ϕ, c) در تحلیل پایداری شیروانی سد نمرود برای حالت شبه‌استاتیکی با افزایش ۱۵ درصد ضریب بار زلزله طرح انجام شد. برای این منظور پایداری شیروانی مقطع (۲) در شرایط تراوش ماندگار مورد تحلیل قرار گرفت. از آنجاکه انحراف معیار استاندارد فرا سنج‌های موجود در جدول (۲) به صورت بیشترین مقدار گزارش شده از مقالات و گزارش‌های مختلف علمی استخراج شد در نتیجه در این قسمت اقدام به کاهش انحراف معیار فرا سنج‌های مؤثر به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد شد. به این ترتیب امکان بررسی و مقایسه کمی تأثیر کاهش انحراف معیار فرا سنج‌های مختلف بر پایداری سد وجود خواهد داشت. نتایج تحلیل MCST در این حالت در جدول (۱۰) ارائه شده است. همچنین در شکل (۸) تغییرات احتمال شکست شیروانی سد نمرود در حالت تغییر انحراف معیار فرا سنج‌های مؤثر نشان داده

شده است. نکته مهم اینکه با توجه به ثابت بودن مقدار میانگین فرا سنج‌های مؤثر، مقدار میانگین ضریب ایمنی در حالت‌های مختلف ثابت و برابر با ۰/۹۶۲ بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش میزان انحراف معیار فراسنج چسبندگی به میزان ۵۰ درصد، احتمال شکست سد به میزان حدوداً ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش انحراف معیار فراسنج زاویه اصطکاک داخلی خاک به میزان ۵۰ درصد، احتمال شکست در حدود ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد و به ۰/۰۰۰۵ می‌رسد. در نهایت با کاهش انحراف معیار فراسنج وزن مخصوص خاک به میزان ۵۰ درصد، احتمال شکست به میزان حدوداً ۸ درصد کاهش می‌یابد. در نتیجه اثر کاهش عدم قطعیت (انحراف معیار استاندارد) فرا سنج‌های مؤثر اثر مستقیم بر احتمال شکست دارد. همچنین بیشترین تأثیر در تغییر احتمال شکست به ترتیب مربوط به فرا سنج‌های زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی و وزن مخصوص است.

جدول (۱۰): تحلیل حساسیت انحراف معیار استاندارد فرا سنج‌های مؤثر بر پایداری مقطع (۲) سد نمرود در شرایط تراوش ماندگار

شاخص β	P_f	مقدار	فراسنجه
۱/۶۱۶	۰/۰۵۳	مقادیر اولیه انحراف معیار	Φ
۱/۷۰۰۲	۰/۰۱۵	کاهش ۲۵ درصدی انحراف معیار	
۱/۷۰۰۱	۰/۰۰۰۵	کاهش ۵۰ درصدی انحراف معیار	
۱/۶۱۶	۰/۰۵۳	مقادیر اولیه انحراف معیار	C
۲/۱۴۲	۰/۰۴۴	کاهش ۲۵ درصدی انحراف معیار	
۳/۲۴۵	۰/۰۴۴	کاهش ۵۰ درصدی انحراف معیار	
۱/۶۱۶	۰/۰۵۳	مقادیر اولیه انحراف معیار	Γ
۱/۷۰۰۷	۰/۰۵۱	کاهش ۲۵ درصدی انحراف معیار	
۱/۶۴۹	۰/۰۴۹	کاهش ۵۰ درصدی انحراف معیار	



شکل (۸): تغییرات احتمال شکست نسبت به تغییر انحراف معیار فرا سنج‌های مؤثر بر پایداری شیروانی سد نمود: (الف) فراسنجه زاویه اصطکاک داخلی (ب) فراسنجه چسبندگی (ج) فراسنجه وزن مخصوص

است که شاخص β سطح لغزش بحرانی را از مقداری برابر با ۱/۵۹۲ برای حالت استقلال خطی، به مقدار ۲/۴۹۸ در حالت اعمال ضریب همبستگی افزایش داده است.

جدول (۱۱): نتایج روش MCST مقطع‌های سد نمود با اعمال ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۲- مابین فرا سنج‌های (c, ϕ)

مقطع	حالت بارگذاری	F	شاخص β	P_f
۱	پایان ساخت شرایط موجود همراه با اعمال ضریب همبستگی	۱/۵۸۶	۷/۰۰۲	۱۰-۱۲
۱	پایان ساخت شبه-استاتیکی و اعمال ضریب همبستگی	۱/۱۵۷	۲/۴۹۸	۰/۰۰۵۳
۲	تراوش ماندگار شرایط موجود همراه با اعمال ضریب همبستگی	۱/۲۲۶	۳/۳۲۵	۰/۰۰۰۴
۲	تراوش ماندگار شبه-استاتیکی و اعمال ضریب همبستگی	۰/۹۶۲	۲/۲۲۹	۰/۰۱۲

تحلیل حساسیت نوع توزیع فرا سنج‌های مؤثر

در بخش‌های قبلی توزیع فرا سنج‌های مؤثر به صورت نرمال در نظر گرفته شد. باین وجود در بعضی از مراجع توزیع فراسنجه‌هایی نظیر وزن مخصوص به صورت لگ-نرمال نیز در نظر گرفته شده است (وزیری زاده، ۲۰۱۷). بر این اساس در این بخش با تغییر توزیع فراسنجه وزن مخصوص به لگ-نرمال اقدام به محاسبه شاخص قابلیت اطمینان و احتمال شکست مقطع (۱) تحت شرایط پایان

اثر اعمال ضریب همبستگی

ضریب‌های همبستگی که مقادیری مابین ۱- تا ۱ دارند، را می‌توان از روابط آماری و مطالعات تخصصی محاسبه کرد. مقدارهای مثبت نشان‌دهنده وابستگی مستقیم و مقدارهای منفی نشان‌دهنده وابستگی معکوس است. یعنی برای مثال در شرایط همبستگی مستقیم افزایش یکی موجب افزایش دیگری می‌شود و بالعکس برای همبستگی معکوس. در این بخش تأثیر اعمال ضریب همبستگی مابین دو فراسنجه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر تغییرات فرا سنج‌های مؤثر در حالت‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی با افزایش ۱۵ درصدی بار زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور با اعمال مقدار ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۲- و مقایسه آن با نتایج قبلی که مقدار این ضریب صفر بود (حالت عدم همبستگی و یا وجود استقلال خطی بین دو فراسنجه)، تأثیر اعمال این فراسنجه بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال شکست مشخص شد. مقدار ضریب ۰/۷۲- با توجه منابع گذشته انتخاب شده است (وزیری زاده، ۲۰۱۷). در جدول (۱۱) نتایج تحلیل پایداری شیروانی مقطع (۱) تحت شرایط پایان ساخت و مقطع (۲) در شرایط تراوش ماندگار با وجود همبستگی مابین دو فراسنجه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از این جدول با نتایج حاصل از قابلیت اطمینان شرایط موجود و نتایج جدول‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهد که اعمال ضریب همبستگی معکوس باعث افزایش ناچیز شاخص قابلیت اطمینان و کاهش احتمال شکست می‌گردد. لیکن بیشترین تغییر مربوط به حالت پایان ساخت شبه‌استاتیکی

ساخت و مقطع (۲) در شرایط تراوش ماندگار گردید. در جدول (۱۲) نتایج حاصل از تحلیل MCST ارائه شده است.

مقایسه نتایج حاصل از این قسمت با توزیع لگ نرمال و نتایج ارائه شده در جدول های (۷) و (۸) با توزیع نرمال برای فراسنجه وزن مخصوص نشان می دهد که انتخاب نوع توزیع احتمالاتی باعث تغییر کمی (در حدود ۴ درصد) در افزایش شاخص β و یا کاهش P_f (در حدود ۹ درصد) در شرایط پایان ساخت می گردد و در حالت تراوش ماندگار انتخاب نوع توزیع احتمالاتی تأثیری بر روی شاخص β و یا P_f نداشته است.

جدول (۱۲): نتایج روش MCST مقطع ها سد نمروود با در نظر گرفتن توزیع لگ نرمال برای فراسنجه وزن

مخصوص

مقطع	حالت بارگذاری	F	شاخص β	P_f
۱	پایان ساخت شرایط موجود	۱/۵۸۶	۷/۰۰۲	۱۰ ^{-۱۲}
۱	پایان ساخت با افزایش ۱۵ درصدی بارگذاری	۱/۱۵۷	۱/۶۲۱	۰/۰۴۹
۲	تراوش ماندگار شرایط موجود	۱/۲۲۶	۳/۸۲۵	۰/۰۰۰۰۶
۲	تراوش ماندگار با افزایش ۱۵ درصدی بارگذاری	۰/۹۶۲	۱/۶۲۷	۰/۰۵۲

نتیجه گیری

تحلیل قابلیت اطمینان یک چارچوب منظم برای کمی سازی فرا سنج های غیرقطعی مؤثر بر طراحی سازه های پیچیده فراهم می کند و این امکان را به طراح می دهد که اطلاعات مناسبی از میزان پایداری سازه و یا احتمال شکست آن تحت بارهای طراحی دریافت کند. بر این اساس در تحقیق حاضر اقدام به مطالعه پایداری شیروانی سد خاکی نمروود تحت شرایط پایان ساخت و تراوش ماندگار از تراز نرمال بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان گردید. برای این منظور با کمک روش شبیه سازی مونت- کارلو میزان پایداری دو مقطع از سد نمروود مطالعه شد.

در ابتدا اقدام به مطالعه ضریب های ایمنی پایداری شیروانی سد نمروود در حالت قطعی گردید که نتایج نشان داد بحرانی ترین ضریب ایمنی در شرایط تراوش ماندگار مقطع جناح میانی سد نمروود مربوط به روش بیشاپ با اعمال بار زلزله طراحی و انتخاب سطح لغزش Grid and Radius است که دارای مقداری برابر با ۱/۲۷۱ است. درحالی که در حالت استاتیکی این مقدار به عدد ۲/۰۸۲ می رسد. با این وجود کلیه ضریب های ایمنی روش قطعی در محدوده مجاز برای تحلیل پایداری شیروانی سدهای خاکی قرار گرفته است. در ادامه نتایج تحلیل حساسیت بر روی تعداد چرخه شبیه سازی مونت کارلو نشان داد که تعداد ۱۵۰۰۰ چرخه می تواند منجر به نتایج مناسب شود.

نتایج تحلیل قابلیت اطمینان نشان داد که در شرایط موجود سد نمروود به علت ضریب ایمنی بالای سد، بیشترین احتمال شکست در حالت های مختلف استاتیکی و شبه استاتیکی برابر با ۰/۰۰۰۰۷ است. در ادامه نتایج تحلیل حساسیت بر روی اندازه بار زلزله اعمالی به مدل نشان می دهد که با افزایش بار زلزله به میزان ۱۵ درصد، احتمال شکست سد به میزان حدوداً ۱۰۰ درصد افزایش می یابد به گونه ای که مقدار فراسنجه احتمال شکست در حالت استفاده از رابطه مورگنسترن-پرایس به عدد ۰/۰۵۵ می رسد که بیشترین احتمال شکست را دارد.

در ادامه، نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش میزان انحراف معیار استاندارد به میزان ۵۰ درصد، احتمال شکست سد برای فرا سنج های مؤثر چسبندگی، وزن مخصوص خاک و زاویه اصطکاک به ترتیب به میزان حدوداً ۱۷، ۸ و ۱۰۰ درصد کاهش یافت که بیشترین تأثیر در تغییر احتمال شکست مربوط به فراسنجه زاویه اصطکاک است. در نهایت نتایج تحلیل تأثیر اعمال همبستگی بر روی فرا سنج های چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و همچنین تأثیر انتخاب نوع توزیع نرمال و لگ نرمال نشان می دهد که نوع توزیع فرا سنج های چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و وزن مخصوص (γ) اثر چندانی بر احتمال شکست سازه سد ندارد به گونه ای که با تغییر نوع توزیع فراسنجه وزن مخصوص از حالت نرمال به لگ نرمال، احتمال شکست سد تنها به میزان حدوداً ۲ درصد کاهش می یابد.

مراجع

- 14- Hariri, Ardebili. M. A. (2018). Risk reliability, resilience (R3) and beyond in dam engineering. A state-of-the-art review. International journal of disaster risk reduction. 31: 806-831.
- 15- Halder A. and Mahadevan S. (2000). Probability, reliability and statistical methods in engineering design. John Wiley & Son, P: 161.
- 16- Kang, F.; Li, J.; and Ma, Z.; (2013). An Artificial Bee Colony Algorithm for Locating the Critical Slip Surface in Slope Stability Analysis, Engineering Optimization.
- 17- Li, D., Qi, X. Cao, Z., Tang, X., Phoon, K., Zhou, C., (2016), Evaluating slope stability uncertainty using coupled Markov chain. Computers and Geotechnics, 73: 72-83.
- 18- Morgenstern NR and Price VE, (1967). A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. Computers journal, 120: 9 (4): 388-393.
- 19- Pang, R. Xu, B. Kong, X. Zou, D. Zhou, Y. (2018). Seismic reliability assessment of earth-rockfill dam slopes considering strain-softening of rockfill based on generalized probability density evolution method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering V. 107: 96-107.
- 20- Peyras, L., Carvajal, C., Felix, H., Bacconnet, C., Royet, P., Becue, J.-P., Boissier, D. (2012). Computer program for multimodel reliability and optimization analysis. Journal of Computing in Civil Engineering. 27(1): 87-98.
- 21- Siacara, A.T. Futai, M. (2020). Reliability analysis of rapid drawdown of an earth dam using direct coupling. Computers and Geotechnics. V. 118: 103336.
- 22- United States Army Corps of Engineers. USACE (1997). Engineering and design: Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Engineering Circular No. 1110-2-547. Dept. of the Army. Washington D.C.
- 23- Vazirizade, S.M., Nozhati, S., Zadeh, M.A. (2017). Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods – application to hazards studies. Journal of Environmental and Civil Engineering. 16(7): 795-817.
- 24- Zolfaghari, A. R.; Heath, A. C.; and McCombie, P. F. (2005). Simple Genetic Algorithm Search for Critical Non-Circular Failure Surface in Slope Stability Analysis Comput. Geotech, Vol. 32, pp. 139-52.
- 25- Zhao Y. G, Ono T. (1999). A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM), Structural Safety; 21: 95-112.
- ۱- امری، مهدی. و شادمان حیدری، پیمان. (۱۳۹۴). "بررسی و تعیین قابلیت اطمینان عملکردی سد بتنی دو قوسی کارون"، نشریه آنالیز سازه-زلزله، شماره ۱۲. دوره ۲. ص ۶۳ تا ۷۴.
- ۲- "مطالعات مرحله دوم طرح سد نمروود"، مهندسین مشاور لاز. سازمان آب منطقه‌ای تهران، جلد سوم- الف سازه‌های هیدرولیکی، مهرماه ۱۳۸۱.
- ۳- مهربانی لاری، امین، (۱۳۹۴). "تحلیل قابلیت اطمینان شیب‌های سنگی با استفاده از روش ترکیب متوالی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه عمران. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی شیراز.
- ۴- کریمایی طبرستانی، م. (۱۳۹۸). "ارزیابی پایداری و تحلیل حساسیت لایه سنگچین محافظ در اطراف پایه‌های پل بر مبنای تحلیل قابلیت اطمینان"، نشریه هیدرولیک، ۱۴ (۴)، ۵۳-۶۸.
- 5- Arai, K. and Tagyo, K. (1985). Determination of noncircular slip surfaces giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, Soils and Foundations, 21, 43-51.
- 6- Bishop, A.W. and N.Morgenstein. (1960). Stability Coefficients for Earth Slopes. Geotechnique. Vol. 10: No.4.
- 7- Bishop, A. W, (1955). The use of slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5: 7-17.
- 8- Celestino, T. B.; and Duncan, J. M, (1981). Simplified Search for Non-Circular Slip Surface, Proceeding 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, pp. 391-4.
- 9- Cheng, Y M, and Zhu, L J, (2004). Unified formulation for two dimensional slope stability analysis and limitations in factor of safety determination. Soils and foundations 44, no. 6:121-127.
- 10- Cheng, Y. M.; Liang, L.; Chi, S. C.; and Wei, W. B. (2008) Determination of Critical Slip Surface Using Artificial Fish Swarm Igorithm, Geotech Geoenviron Eng. ASCE, Vol. 134, pp. 244-51.
- 11- Guo, X. Dias, D. (2020). Kriging based reliability and sensitivity analysis – Application to the stability of an earth dam. Computers and Geotechnics. V. 120: 103411.
- 12- Griffiths, D. V., Huang J. and Fenton, G. A. (2011). Probabilistic infinite slope analysis. Computers and Geotechnics 38: 577–584.
- 13- Ha, T. V. and Delwyn, G. F. (2003). The application of dynamic programming to slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal. 40: 830-847.

Study on the slope stability of embankment dam under different load conditions using deterministic and probabilistic methods (Case study: Namrood dam)

Amin Ebrahimi^{۱*}

Mojtaba Karimaei Tabarestani^۲

Abstract:

Slope stability analysis is one of the most important parts of an embankment dam design. However, the current conventional methods, which are based on the use of stability coefficients obtained from the deterministic methods, are not capable to explicitly analyze the uncertainty of effective parameters especially geotechnical parameters. This leads to an incorrect estimate of the potential stability of the dam structure. Accordingly, in the present study, the slope stability coefficient of Namrood dam as a case study was calculated for different load conditions, including permanent leakage and completion of construction by using deterministic and probabilistic methods. Geo-studio software package and Monte Carlo simulation techniques were used for analysis. The effect of earthquake load on the stability of the dam structure was also investigated. The results showed that, the failure probability of the critical sections of Namrood dam was negligible, so that the maximum probability of failure was calculated as 0.00007. Then, sensitivity analysis were carried out on the value and type of distribution of effective parameters. Results showed that with the increase in the earthquake load by 15%, the probability of dam failure increased by about 100%. Finally, results showed that by considering lognormal instead of normal distribution for unit weight of soils, the probability of dam failure only decreased for 1.88%.

^۱ M.Sc Graduated of Geotechnical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran. Iran. AminEbrahimi060@gmail.com

^۲ Assistant Professor, Department of Geotechnical and Water Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. karimaei@sru.ac.ir