[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

بررسی پایدارسازی شیروانی‌ها به‌کمک نتایج تحلیل‌های احتمالاتی (مثال موردی: شیروانی مشرف به سرریز آزاد سد کوار شیراز)

رضا نصیرزاده، مهدی امینی*، حسین معماریان؛
دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکدهٔ مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۲/۰۶ پذیرش ۹۷/۰۴/۱۷

چکیده

طراحی و اجرای شیروانی‌ها یکی از حساس‌ترین و مهم‌ترین مسائل در پروژه‌های عمرانی و معدنی محسوب می‌شود. در علم ژئوتکنیک، به‌دلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات کافی و مطمئن پیرامون کمیت‌های طراحی، ارائه یک مدل کاملاً قطعی غیرممکن است. از این‌رو، در سال‌های اخیر، برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها بیش‌تر به‌روش احتمالاتی مراجعه شده است. در این تحلیل‌ها، کمیت‌های تأثیرگذار در پایداری شیروانی به‌صورت توزیع‌های آماری در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه ضریب اطمینان نیز یک توزیع آماری خواهد شد. از این‌رو، ابتدا خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده روی تحلیل احتمالاتی شیروانی‌ها ارائه شده و برتری تحلیل احتمالاتی نسبت به تحلیل قطعی در طراحی شیروانی‌ها بررسی می‌شود. در ادامه، برای شفاف شدن توصیف‌های مذکور، شیروانی مشرف به سرریز آزاد سد کوار شیراز با روش شبیه‌سازی مونت کارلو به‌صورت احتمالاتی با استفاده از نرم‌افزار SLIDE تحلیل می‌شود. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند ضریب اطمینان محاسبه شده به‌وسیلهٔ تحلیل احتمالاتی به‌صورت یک تابع توزیع ارائه می‌شود که نسبت به تحلیل قطعی که نتیجه آن صرفاً یک مقدار مشخص است، تصویر روشن‌تری از شکست ارائه می‌کند. هم‌چنین نتایج تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد که می‌توان شیب شیروانی را بهینه کرد به‌نحوی که کاملاً پایدار بماند و حجم عملیات سنگ‌برداری نیز بهینه شود. از این‌رو به‌کمک تحلیل احتمالاتی شیب بهینه این شیروانی تعیین شد که در این حالت میزان سنگ‌برداری حدود ۲۸۰۰۰ متر مکعب کم‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل احتمالاتی، تحلیل قطعی، سرریز آزاد سد کوار شیراز، مونت کارلو، نرم‌افزار SLIDE.

*نویسنده مسئول mamini@ut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

مقدمه

فرآیند طراحی در شیروانی‌ها همواره با عدم‌قطعیت‌های فراوانی همراه است؛ بنابراین طراح نمی‌تواند به‌طور کاملاً شفاف در مورد پایداری یا لغزش آن‌ها اظهارنظر کند. برخی از عدم‌قطعیت‌ها در تحلیل پایداری شیروانی‌ها مربوط به ماهیت مواد تشکیل‌دهندهٔ شیروانی، هندسه شیروانی، شرایط محیطی، خطای مدل و برخی دیگر مربوط به خطاهای اندازه‌گیری است. از این‌رو، تحلیل پایداری شیروانی‌ها با استفاده از روش قطعی مبتنی بر مفهوم ضریب اطمینان غالباً نتایج رضایت‌بخشی به‌دنبال ندارد و استفاده از روش احتمالاتی برای ارزیابی آن‌ها بیش‌تر توصیه می‌شود. طراحی احتمالاتی روشی است که با استفاده از آن می‌توان به‌صورت اصولی و قانون‌مند تأثیر تغییرات کمیت‌ها را روی پایداری شیروانی‌ها ارزیابی کرد. در تحلیل احتمالاتی، عدم‌قطعیت در تخمین کمیت‌ها وارد محاسبات می‌شود تا عدم‌قطعیت فاکتور ایمنی برآورد شود. بنابراین می‌توان احتمال شکست را از روی توزیع فاکتور ایمنی به‌دست آورد.

تحلیل احتمالاتی نخستین بار در دهه ۱۹٤۰ مطرح شد و در اوایل بیش‌تر در طراحی‌های پیچیده همانند مهندسی هوافضا و سازه برای توصیف قابلیت اطمینان استفاده می‌شد. اولین کاربردهای آن در مهندسی ژئوتکنیک مربوط به طراحی دیواره معادن روباز است. زیرا در این طراحی‌ها ریسک شکست تا حدی قابل پذیرش است و نتایج تحلیل احتمالاتی را می‌توان به خوبی در برنامه‌ریزی‌های اقتصادی معدن استفاده کرد [۱]، [۲]، [۳]. در مهندسی عمران، این روش در پایدارسازی شیروانی‌های مشرف به خطوط حمل و نقل [٤]، [۵]، سدها، شیروانی‌ها، پی‌ها و دیوارهای حائل [٦]، [۷] بررسی خطرات زمین‌لغزش [۸]، [۹] و طراحی محل دفن زباله‌های خطرآفرین [۱۰]، [۱۱] به‌طور موفقیت‌آمیز استفاده شده است. توبوت (۱۹۸۲) جزء اولین محققانی است که از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل پایداری احتمالاتی شیروانی‌ها استفاده کرد [۱۲]. لو در سال ۱۹۹۷ تحلیل احتمالاتی را روی شکست گوه‌ای توسعه داد [۱۳]. هوک در سال ۱۹۹۸ با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به بررسی تحلیل احتمالاتی شکست صفحه‌ای پرداخت [۱٤]. دانسن و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از قانون سه سیگما یک‌سری تحلیل نیمه‌احتمالاتی انجام داده و ریسک گسیختگی را برای شیروانی‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

مربوط به پروژه‌ای واقعی به‌دست آوردند [۱۵]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۱ با انجام تحلیل احتمالاتی به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب هم‌بستگی بین چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی، احتمال شکست به‌صورت خطی افزایش می‌یابد [۱٦]. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) با انجام تحلیل احتمالاتی بر زاویهٔ صفحه شیروانی و ارتفاع آن بهترین طراحی را از نظر اقتصادی و فنی به‌دست آوردند. هم‌چنین آن‌ها اشاره می‌کنند که با افزایش عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی (ضریب تغییرات) هزینه‌های طراحی زیادتر می‌شود [۱۷]. جوهری و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش تحلیلی که از انتگرال‌گیری مستقیم توابع چگالی احتمال به‌دست می‌آید، احتمال شکست را برای حالت شکست صفحه‌ای بررسی کرده و به نتایج مشابه با روش شبیه‌سازی مونت کارلو دست یافتند. آن‌ها برای داده‌های آماری تحلیل احتمالاتی از پژوهش هوک (۱۹۹۸) بر شکست صفحه‌ای استفاده نمودند [۱۸]. کومار در سال ۲۰۱٤ به بررسی تأثیر تغییرپذیری پارامترهای خاک روی قابلیت اعتماد شیروانی‌ها پرداخته است. این محقق برای این منظور از دو روش تقریب اول ممان دوم و روش المان محدود تصادفی استفاده کرده است [۱۹]. لی و همکاران (۲۰۱۵) از روش سطح پاسخ چندگانه برای تعیین قابلیت اعتماد شیروانی با توجه به تغییرپذیری خصوصیات خاک پرداخته‌اند [۲۰]. در سال ۲۰۱٦ لی و همکاران به بررسی و مقایسه انواع روش‌های پاسخ سطح در تعیین قابلیت اعتماد شیروانی پرداختند [۲۱]. کای و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر تغییرات پارامترهای مقاومت برشی بر قابلیت اعتماد شیروانی‌های نامحدود را با استفاده از روش تحلیلی بررسی کردند[۲۲].

یکی از راه‌های مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها در تحلیل احتمالاتی استفاده از ضریب تغییرات است، که به‌صورت تقسیم انحراف معیار بر میانگین به‌دست می‌آید. ضریب تغییرات پارامتری بسیار مناسب برای بیان کمی پراکندگی داده‌ها و یا به‌عبارت دیگر عدم‌قطعیت موجود در مقادیر آن‌ها است زیرا پارامتری بی‌بعد است و مستقل از مقادیر مطلق داده‌ها است. به‌طوری‌که اگر ضریب تغییرات تغییر کند، احتمال شکست نیز به تبعیت از آن تغییر خواهد کرد. وقتی ضریب تغییرات عدد بزرگ‌تری باشد به راه‌حل‌های پرهزینه برای کاهش احتمال شکست نیاز است. درحالی‌که اگر ضریب تغییرات کم انتخاب شود قابلیت اعتماد بیش‌تر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

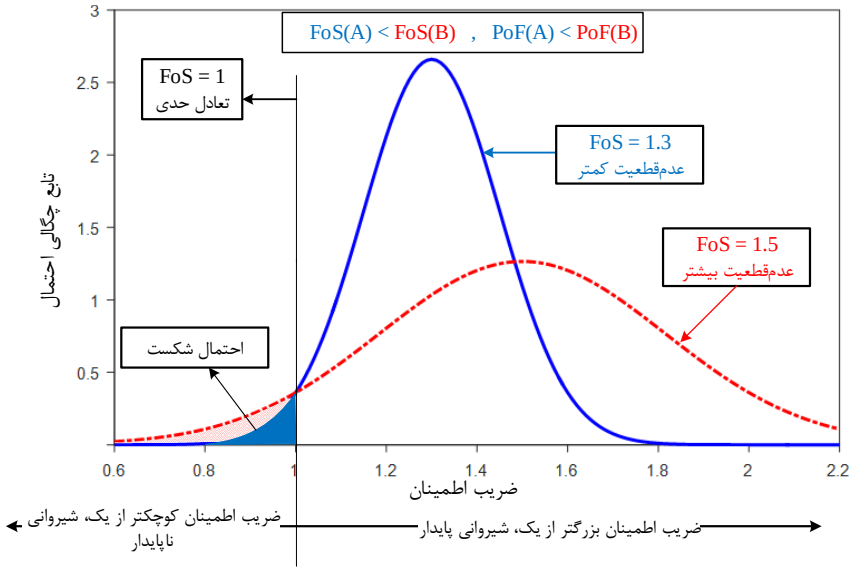
شده و هزینه‌های مورد نیاز برای کاهش احتمال شکست کم‌تر می‌شوند. بنابراین تعیین مقدار ضریب تغییرات در تجزیه‌ها بسیار مهم است. هم‌چنین ضریب هم‌بستگی بین کمیت‌ها یکی دیگر از پارامترهایی است که در تعیین احتمال شکست مؤثر است. در این تحقیق ابتدا به مقایسه و برتری تحلیل احتمالاتی نسبت به تحلیل قطعی پرداخته می‌شود، سپس فرآیند طراحی احتمالاتی توضیح داده شده و با یک مثال موردی برتری تحلیل احتمالاتی نسبت به تحلیل قطعی در پایدارسازی شیروانی‌ها نشان داده می‌شود. هم‌چنین به تحلیل حساسیت ضریب تغییرات و ضریب هم‌بستگی بین پارامترها پرداخته شده است.

کاستی‌های تحلیل قطعی مبتنی بر مفهوم ضریب اطمینان

روش ضریب اطمینان از قدیمی‌ترین روش‌های تحلیل پایداری شیروانی‌ها محسوب می‌شود که به‌صورت نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک تعریف می‌شود. اما این روش دارای یک‌سری کمبودهایی است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. یکی از مشکلات این روش عدم‌کارایی آن برای مقایسه سطح ایمنی شیروانی‌های مختلف است. برای نمونه تصور عمومی بر این است که سطح ایمنی تمامی شیروانی‌هایی که با یک مقدار ضریب اطمینان طراحی شده‌اند یک‌سان است، در صورتی که چنین مطلبی صحیح نیست. زیرا در محاسبه ضریب اطمینان تنها از یک مقدار متوسط برای هر کمیت استفاده شده و میزان عدم‌قطعیت‌ها و خطای موجود در محاسبات لحاظ نمی‌شود. به‌عبارت ساده ممکن است که احتمال شکست یک شیروانی با ضریب اطمینان ۱/۳ و عدم‌قطعیت اندک، از یک شیروانی دیگر با ضریب اطمینان ۱/۵ و عدم‌قطعیت بالا، کم‌تر باشد (شکل ۱).

نمونه دیگری که در آن استفاده از ضریب اطمینان منجر به نتایج گمراه‌کننده می‌شود، هنگامی است که با این روش سازه‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند. برای مثال سطح ایمنی یک شیروانی و یک پی که با ضریب اطمینان یک‌سان طراحی شده‌اند برابر نیست. محققان نشان داده‌اند که ممکن است احتمال پایداری یک شیروانی با ضریب اطمینان ۱/۵ و یک پی با ضریب اطمینان ۲/۵ برابر باشد [٦].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

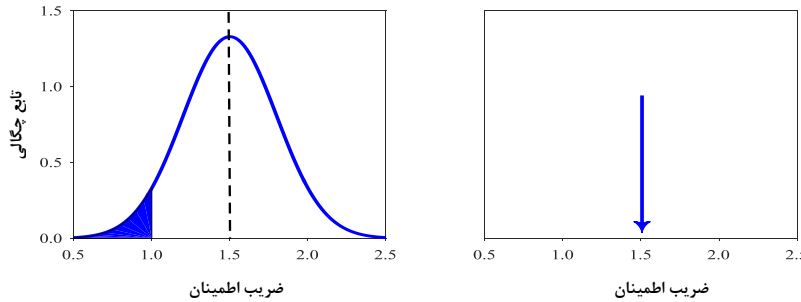


شکل ۱. تأثیر عدم‌قطعیت در توزیع احتمال ضریب اطمینان

در تحلیل قطعی تنها یک مقدار برای هر کمیت مؤثر در نظر گرفته می‌شود. در حالی‌که در تحلیل احتمالاتی توزیع احتمال برای کمیت‌های مؤثر اختصاص داده می‌شود. بدین‌ترتیب احتمال شکستی که از تحلیل احتمالاتی به‌دست می‌آید نسبت به ضریب اطمینان که از تحلیل قطعی به‌دست می‌آید، بیانی جامع‌تر و ملموس‌تر از سطح ایمنی سازه ارائه می‌دهد. زیرا علاوه بر مقدار محتمل کمیت‌های ورودی و خروجی، میزان عدم‌قطعیت‌ها را نیز در خود گنجانده است. برای نمونه در شکل ۲ حالتی نشان داده شده است که در آن نتیجه تحلیل قطعی منجر به مقدار ۱/۵ برای ضریب اطمینان شده است، در حالی که براساس تحلیل احتمالاتی یک تابع توزیع احتمال با میانگین ۱/۵ برای ضریب اطمینان به‌دست آمده است. مطابق با تئوری احتمالات سطح هاشورخورده در شکل ۲، برابر احتمال وقوع مقادیر کم‌تر از یک برای ضریب اطمینان است. لازم به ذکر است که مطابق تحلیل‌های مرسوم، ممکن است مقدار ضریب اطمینان ۱/۵ منجر به اطمینان کامل در مورد پایداری سازه شود اما نتیجه تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد با وجود مقدار میانگین ۱/۵ برای ضریب اطمینان، احتمال ناپایداری سازه وجود دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

یکی دیگر از مشکلات روش ضریب اطمینان مشخص نبودن مقیاس است. به این صورت که پایداری یک شیروانی با ضریب اطمینان ۳ لزومی ندارد به اندازهٔ دو برابر شیروانی با ضریب اطمینان ۱/۵ باشد. در حالی‌که بین احتمال شکست و ناپایداری ارتباطی خطی وجود دارد و احتمال پایداری یک شیروانی با احتمال شکست ۵٪ به اندازهٔ دو برابر شیروانی دیگر با احتمال شکست ۱۰٪ است.



شکل ۲. مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی

طراحی احتمالاتی

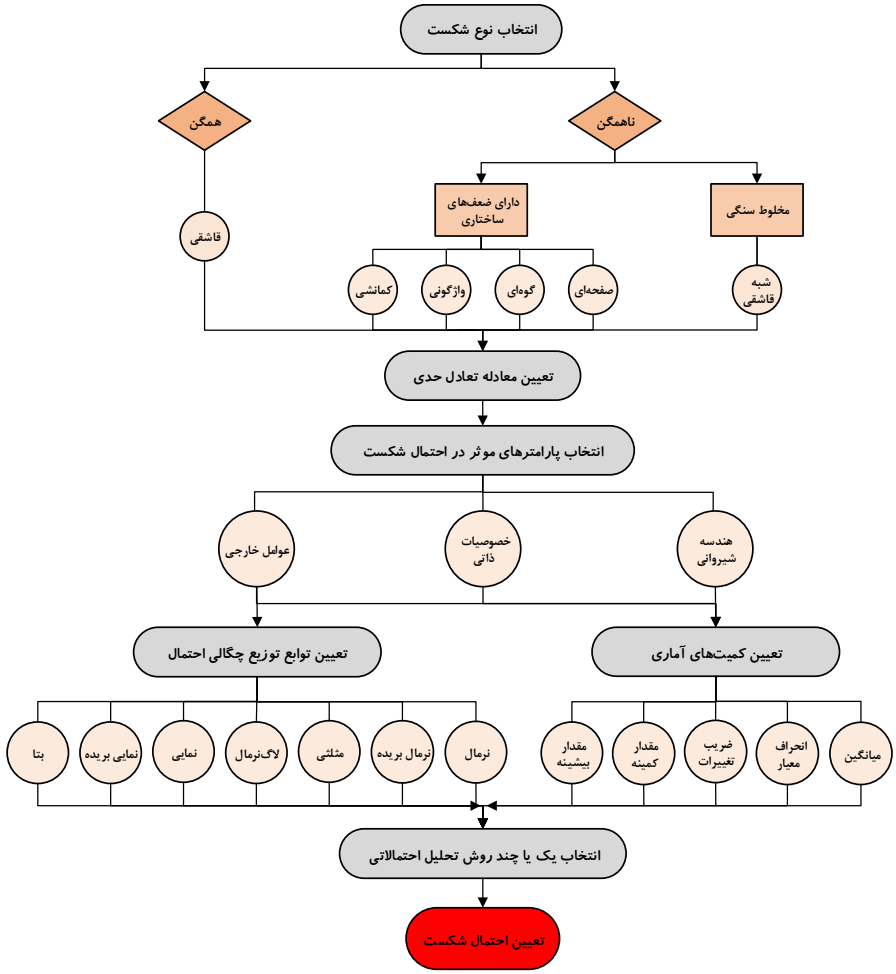
به‌دلیل وجود عدم‌قطعیت و تغییرپذیری خواص فیزیکی و مقاومتی سنگ‌ها و خاک‌ها و هم‌چنین ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها، کاربرد تحلیل احتمالاتی در مهندسی ژئوتکنیک در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، روند کلی تحلیل احتمالاتی ارائه می‌شود.

۱. مراحل تحلیل احتمالاتی

مراحل کلی تحلیل احتمالاتی شکست شیروانی‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این نمودار، بعد از تشخیص نوع شکست و انتخاب راهکار تحلیل آن، باید کمیت‌های مؤثر در لغزش شناسایی شده و به هر یک از آن‌ها کمیت‌های آماری و توزیع احتمال مناسب نسبت داده شود. سپس توزیع احتمال ضریب اطمینان شکست غالب در تودهٔ سنگ یا تودهٔ خاک با استفاده از یکی از روش‌های احتمالاتی تعیین شده و احتمال شکست از روی آن برآورد شود. از آن‌جاکه در انتخاب اکثر ویژگی‌های تودهٔ سنگ عدم‌قطعیت وجود دارد، از نتایج تحلیل احتمالاتی می‌توان به‌طور مناسب برای ارزیابی وضعیت پایداری شیروانی‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

استفاده کرد.



شکل ۳. روند کلی تحلیل احتمالاتی شیروانی‌ها

۲. تعیین احتمال شکست

احتمال شکست به نسبت بین نیروهای مقاوم و محرک وابسته است، بنابراین محاسبهٔ آن مشابه فاکتور ایمنی است. از بین روش‌های تعیین احتمال شکست، روش شبیه‌سازی مونت کارلو یک راهکار متداول است که از پرکاربردترین روش‌های تعیین احتمال شکست نیز محسوب می‌شود. یکی از ویژگی‌های بارز شبیه‌سازی مونت کارلو این است که به‌کمک آن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

می‌توان توزیع‌های مختلف آماری را با یک‌دیگر ترکیب کرد. هم‌چنین این روش برای شرایط پیچیده و غیرخطی قابل کاربرد است و محدودیتی در تعداد متغیرها یا وابسته و مستقل بودن آن‌ها ندارد.

۳. انتخاب مقادیر مجاز در طراحی احتمالاتی

به‌طورکلی هدف از طراحی احتمالاتی ارائه احتمال لغزش شیروانی و مقایسه با مقادیر مجاز است. برای شیروانی‌های سنگی دائمی طبق تحلیل‌های قطعی حداقل مقدار مجاز ضریب اطمینان برای شرایط استاتیکی ۱/۵ [۲۳]، [۲٤] و شبه‌استاتیکی ۱/۱ [۲۵]، [۲٦] است. هم‌چنین مقدار احتمال شکست استاتیکی برمبنای جدول ۱ قابل محاسبه است.

جدول ۱. احتمال شکست مجاز در شیروانی‌های سنگی [۲۷]

احتمال شکست (درصد)	مدت زمان بهره‌برداری	وضعیت دسترسی برای عموم	حداقل شرایط پایش	شکست شیروانی	حرکت شیروانی
۱۰۰ – ۵۰	غیر قابل بهره‌برداری	ممنوع است.	پایش وضعیت را بهبود نمی‌دهد.	شکست بطور عمومی مشاهده می‌شود.	خزش شیروانی کاملاً درک می‌شود.
۵۰ – ۲۰	فوق‌العاده کوتاه	باید با جبر زیاد مانع دسترسی عمومی شد.	به پایش دائمی با تجهیزات زیاد و بسیار پیشرفته نیاز دارد.	تعداد چشم‌گیری شکست مشاهده می‌شود.	خزش شیروانی واضح است.
۲۰ – ۱۰	بسیار کوتاه	باید شدیداً مانع دسترسی عمومی شد.	به پایش دائمی با تجهیزات پیشرفته نیاز دارد.	شکست‌های زیادی وجود دارد.	اثراتی از خزش آرام مشاهده می‌شود.
۱۰ – ۵	کوتاه	باید مانع دسترسی عمومی شد.	به پایش دائمی با تجهیزات ساده نیاز دارد.	شکست‌های قدیمی مشاهده می‌شود.	اثراتی از خزش بسیار آرام مشاهده می‌شود.
۵ – ۱/۵	متوسط	در حد امکان باید مانع دسترسی عمومی شد.	به پایش سطحی خوب نیاز دارد.	در حال حاضر شکست مشاهده نمی‌شود.	اثراتی از خزش فوق‌العاده آرام مشاهده می‌شود.
۱/۵ – ۰/۵	طولانی مدت	دسترسی عمومی مجاز است.	به پایش سطحی نیاز دارد.	شکست مشاهده نمی‌شود.	اثراتی از خزش مشاهده نمی‌شود.
۰/۵ >	بسیار طولانی	دسترسی عمومی آزاد است.	به پایش نیاز ندارد.	شیروانی پایدار است.	حرکت وجود ندارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

مطالعهٔ موردی (سرریز آزاد سد کوار شیراز)

سرریز آزاد سد کوار شیراز در جناح راست این سد واقع شده است. این سرریز با حفاری در توده‌سنگ آهک آسماری احداث می‌شود. بخشی از توده‌سنگ مذکور به‌علت فعالیت گسل های کوار-سپیدار، موک و ظفرآباد-سبزپوشان کاملاً خرد شده است. این بخش توده‌سنگ در ابتدای سرریز قرار گرفته و شیب طبیعی زمین نیز در این واحد حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه است. با حرکت به سمت پایین‌دست سد از خردشدگی توده‌سنگ کاسته شده و شیب طبیعی زمین نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ کیفیت بهتر توده‌سنگ است. بیش‌ترین عمق حفاری‌ها حدود ۷۵ متر است که در بخش خرد شده قرار دارد. در این بخش غالباً نیازی به انفجار نیست و حفاری با بولدزر امکان‌پذیر است که خود گواهی بر خردشدگی شدید توده‌سنگ و کیفیت پایین آن است. لوگ گمانه اکتشافی حفاری شده در توده‌سنگ خرد شده سرریز (گمانه K-۱۲۷) در جدول ۲ آورده شده است. کد ارتفاعی شروع این گمانه ۱۷۰۰ متر و کد پی سرریز در این محل ۱٦٤۲ متر است، بنابراین اطلاعات لوگ مذکور تا عمق ۵۸ **متری**در محدودهٔ حفاری سرریز قرار می‌گیرد. چنان‌که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، تا عمق ۱۷ متری (انتهای پله دوم) سنگ بسیار خرد شده است ($RQD < 25$). از ۱۷ متر تا ۲۷ متر (ابتدا تا انتهای پله سوم) کیفیت توده‌سنگ بهتر شده است ($25 < RQD < 50$). ولی مجدداً از عمق ۲۷ تا ۵۷ متر (انتهای حفاری‌های سرریز) کیفیت توده‌سنگ کاهش یافته است. بنابراین بخش اعظم حفاری‌های سرریز در توده‌سنگ خرد شده قرار گرفته است (شکل ٤).

جدول ۲. لوگ گمانه K-۱۲۷ در محل حفاری‌های سرریز

عمق گمانه (متر)	RQD	عمق گمانه (متر)	RQD	عمق گمانه (متر)	RQD
۲-۳	۰	۳۷-٤۲	۲۳/۵	۷۷-۸۲	٦۰
۵-۷	۱۸	٤۲-٤۷	۱۷	۸۲-۸۷	۷٦
۷-۱۲	۳۰/٤	٤۷-۵۲	۲۵	۸۷-۹۲	٤٤
۱۲-۱۷	۱۷	۵۲-۵۷	۳۹	۹۲-۹۷/۲	٤۱
۱۷-۲۲	٤۲	۵۷-٦۲	٤۷	۹۷-۱۰۱	۱۳
۲۲-۲۷	٤۳	٦۲-٦۷	۷٦	۱۰۰-۱۰۵/۵	۳۷
۲۷-۳۲	۲۸	٦۷-۷۲	۳٤	۱۰۵-۱۱۰	۳۵
۳۲-۳۷	۳۸	۷۲-۷۷	۵۷	۱۱۰-۱۱۵	۷٤

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

شکل ٤. خردشدگی شدید توده‌سنگ در بخشی از ترانشه سرریز

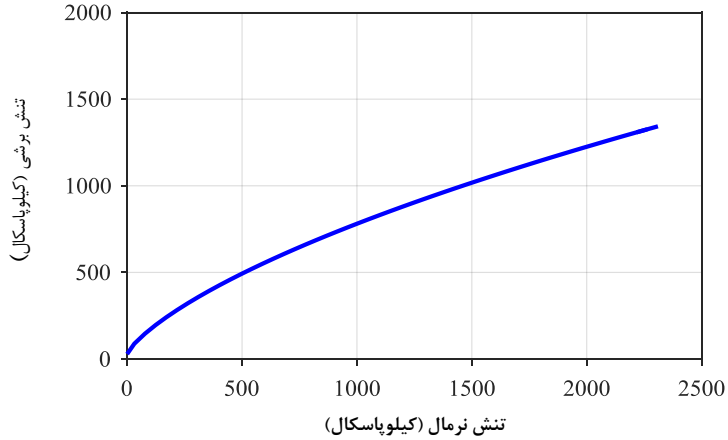
۱. تحلیل پایداری شیروانی مشرف به سرریز سد براساس تحلیل قطعی

از آن‌جاکه ارتفاع شیروانی جناح چپ مشرف به سرریز بسیار کم‌تر از شیروانی جناح راست است، فاکتور ایمنی لغزش آن در شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی برای این شیروانی بالای حدود مجاز است و نیاز به پایدارسازی اضافه (به‌غیر از مش و شاتکریت) ندارد. در طرح اولیه طراحی شیروانی جناح راست، قرار بود این شیروانی با شیب کلی ۵۸ درجه و با پله‌هایی با شیب ۷۱ درجه حفر شود. ولی متأسفانه بعد از حفر پله اول، لغزش قاشقی کوچکی در شیروانی رخ داد که نشان می‌داد توده‌سنگ برای حفر این شیروانی ضعیف است. هر چند با کاهش موقتی شیب پله‌های اول و دوم و افزایش ارتفاع این دو پله، وقوع ناپایداری موقتاً رفع شد ولی در مورد ادامه حفر شیروانی سوالات زیادی مطرح بود. با توجه به خردشدگی شدید توده‌سنگ محل سرریز و البته با در نظر گرفتن شواهد موجود (لغزش قاشقی در پله اول و دوم)، احتمال بروز لغزش‌های قاشقی بیش از سایر انواع گسیختگی‌ها پیش‌بینی می‌شود. از این‌رو، در تحلیل پایداری این شیروانی مسئله بروز لغزش‌های قاشقی بسیار با اهمیت است و باید از یک برنامه تعادل حدی مناسب برای انجام تجزیه لغزش‌های قاشقی بهره گرفته شود. از این‌رو برای تحلیل پایداری این شیروانی از نرم‌افزار SLIDE استفاده شده است.

در این تحقیق، برای رفتار مواد از معیار شکست هوک-براون بهره گرفته شده است. برای تعیین پارامترهای مقاومتی معیار شکست هوک-براون از شاخص مقاومت زمین‌شناسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

(GSI)، مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (UCS) و پارامتر ثابت سنگ m_i استفاده شد. برای سنگ خرد شده با کیفیت متوسط سطوح خردشدگی، کیفیت تـوده‌سـنگ براسـاس GSI حدود ۳۸-۲۳ به‌دست آمد که مقدار میانگین آن برای توده‌سنگ محل سرریز ۳۵ فرض شـد. هم‌چنین مقاومت فشاری تک محوری سنگ حدود ۱۰۰-۵۰ مگاپاسکال با مقدار میـانگین ۷۵ مگاپاسکال ارزیابی شد. به‌علاوه مقدار m_i برابر ۱۰ و به‌دلیل حفـاری مکـانیزه بـرای ضـریب به‌هم‌ریختگی مقدار ۱ در نظر گرفته شد. بنابراین بـا توجـه بـه ایـن مفروضـات فـوق معیـار شکست متناسب با توده‌سنگ به‌دست آمد که نمودار آن در شـکل ۵ نشـان داده شـده اسـت. مقدار وزن واحد حجم نیز برابر ۲۲ کیلونیوتن بر مترمکعب فرض شد.



شکل ۵. معیار شکست انتخابی برای توده‌سنگ خرد شده محل سرریز

برای تحلیل‌های احتمالاتی باید ابتدا یک مدل معین انتخاب شود و سپس کمیت‌هـای آمـاری بر اساس آن مدل تغییر داده شوند تا توزیع آماری ضریب اطمینان به‌دست آید. بـرای تحلیـل سطوح لغزش در محیط‌های پیوسته می‌تـوان از مـدل‌هـای مختلفـی ماننـد بیشـاب، اسپنسـر، مرگنسترن-پرایس و یا شارما استفاده کرد. در میان این مدل‌ها، روش اسپنسر و مرگنسـترین-پرایس طوری طراحی شده‌اند که تمام معـادلات تعـادل حـدی نیروهـا و گشـتاور نیروهـا را ارضاء می‌کنند و نتایج آن‌ها بسیار به یک‌دیگر نزدیک است. در این تحقیق، مدل معـین اولیـه که از آن برای تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی استفاده شده است، مـدل مورگنسـترین-پـرایس است. این مدل براساس معادلات تعادل حدی نیروها و گشتاور نیروها پایه‌گذاری شده اسـت

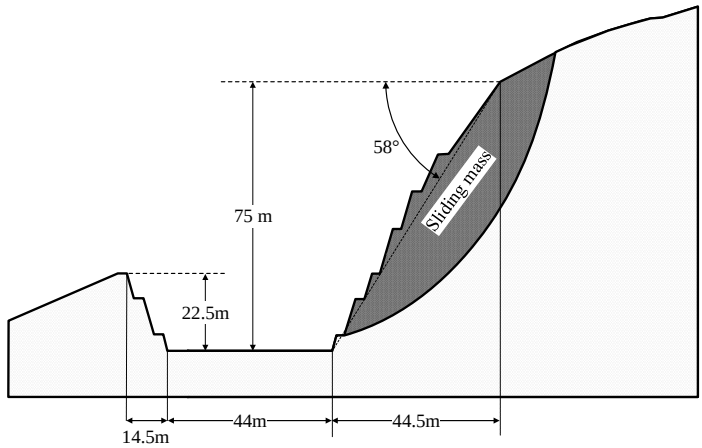
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

و اگر از آن به‌صورت قطعی استفاده شود، مقدار مشخصی برای ضریب اطمینان شیروانی‌ها در برابر لغزش قاشقی به‌دست می‌آید.

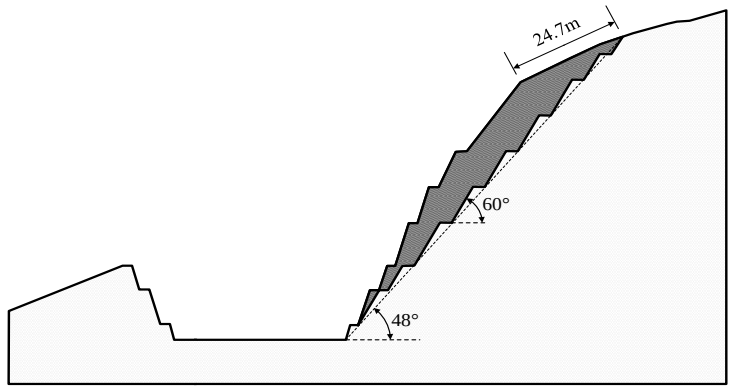
براساس این تحلیل‌ها مقدار ضریب اطمینان شیروانی جناح راست برای شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی، به‌ترتیب، برابر با ۱/۲۳۲ و ۱/۰۰۷ به‌دست آمد که در شکل ٦ تحلیل پایداری این شیروانی نشان داده شده است. مطابق با معیارهای مجاز ارائه شده در بخش ٤-۳ و ارزیابی‌ها فوق، مقادیر فاکتور ایمنی برای این شیروانی زیر حدود مجاز قرار دارد. بنابراین باید راهکار مناسبی برای افزایش پایداری آن به‌کار برده شود. یک روش پایدارسازی پیشنهادی برای این شیروانی استفاده از تزریق دوغاب سیمان است. هر چند این تزریق‌ها باعث به هم چسبیدن بلوک‌های خرد شده می‌شود و از ریزش‌های کوچک موضعی جلوگیری می‌کند، ولی چنان‌که از شکل ٦ مشخص است سطح لغزش احتمالی عمیق است. تزریق‌های فوق کمیت‌های برشی این سطح را افزایش نمی‌دهد و حتی با افزایش وزن توده لغزشی موجب کاهش فاکتور ایمنی و افزایش احتمال شکست آن می‌شود. بنابراین این روش مورد قبول تیم مشاور قرار نگرفت. استفاده از سیستم‌های نگه‌داری مصنوعی (بولت، آنکر و دیواره حائل) نیز به‌دلیل خرد شدگی شدید توده‌سنگ و عمیق بودن سطح لغزش از نظر فنی و مالی معقول نیست. بنابراین گزینه باربرداری یا کاهش شیب، گزینه مناسبی برای افزایش پایداری این توده باشد. در شکل ۷ حجم باربرداری از توده به‌صورت هاشور خورده نشان داده شده است. در این گزینه شیب کلی شیروانی از ۵۸ درجه به ٤۸ درجه کاهش یافت و سر ترانشه قدیمی حدود ۲٤/۷ متر عقب نشینی کرد و شیروانی مجدداً از سر ترانشه جدید حفاری شد. بعد از این باربرداری، شیروانی مجدداً ارزیابی شد و مقادیر متوسط فاکتور ایمنی برای شیروانی فوق تحت شرایط استاتیکی ۱/٤۸۷ و شبه استاتیکی ۱/۱۹۵ شده است که براساس معیارهای مجاز تقریباً در مرز مجاز قرار دارد. بنابراین برای پایدارسازی این شیروانی، از راه‌حل تعدیل شیب استفاده شد و این روش برای پایدارسازی شیروانی فوق استفاده شد و بدون اتفاق خاصی اجرا شد. در زمان اجرای این شیروانی صرفاً از روش قطعی برای ارزیابی طرح جدید و قدیم استفاده شد. سوالی که در این‌جا مطرح می‌شود این است که آیا با تحلیل احتمالاتی بررسی‌های آماری کمیت‌های تأثیرگذار بر شیروانی، باز هم طرح

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

قبلی اجرا می‌شود یا اندکی تغییر خواهد یافت. در ادامه به بررسی تحلیل احتمالاتی شـیروانی جناح راست پرداخته می‌شود.



شکل ٦. تحلیل پایداری شیروانی جناح راست سرریز برای شرایط استاتیکی



شکل ۷. بخش پیش‌بینی شده برای باربرداری از توده‌سنگ جناح راست سرریز

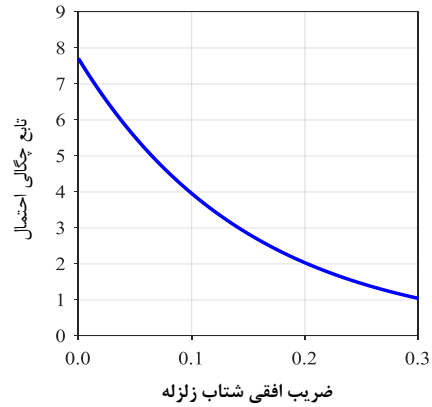
۲. تحلیل پایداری شیروانی مشرف به سرریز سد براساس تحلیل احتمالاتی

۲-۱. خصوصیات ژئومکانیکی آماری توده‌سنگ

چنان‌که اشاره شد به‌دلیل این‌که توده محل حفاری‌ها به‌صورت سنگ خرد شده است، از معیار شکست هوک-براون استفاده می‌شود. جدول ۳ کمیت‌های آماری و توزیع‌های احتمال

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

به‌کار رفته برای کمیت‌های مؤثر را نشان می‌دهد. به‌دلیل کمبود نمونه‌های سالم و هزینه زیاد آزمایش‌های، پژوهش‌های آماری موجود در این جدول براساس پژوهش‌های گذشته به‌دست آمده است، به‌طوری‌که برای تعیین ضریب تغییرات و نوع توزیع احتمالی UCS، GSI و m_i از مقادیر پیشنهادی هوک (۱۹۹۸)[۲۸] و برای وزن واحد حجم (γ) از تحقیقات جیمنزرودریگز و سیتار (۲۰۰۷)[۲۹] بهره گرفته شده است. هم‌چنین مقادیر حداقل و حداکثر کمیت‌های UCS و GSI براساس نتایج آزمایش‌های تعیین و برای کمیت‌های m_i و γ از قانون ۳ سیگما استفاده شده است. به این مفهوم که بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقدار قابل تصور یک کمیت به‌ترتیب به اندازهٔ سه برابر انحراف معیار بیش‌تر و کم‌تر از مقدار میانگین آن ($x \pm 3\sigma$) فرض شد. البته باید به این نکته توجه شود که مقدار $x - 3\sigma$ بزرگ‌تر از صفر باشد. از آن‌جاکه پدیده زلزله به‌ندرت با شدت بزرگ اتفاق می‌افتد و تعداد زمین‌لرزه‌های کوچک زیادتر است، بنابراین توزیع نمایی بریده می‌تواند با نتایج حاصل از وقوع زلزله تطابق خوبی داشته باشد. معمولاً حداکثر مقدار ضریب شتاب زلزله دو برابر مقدار میانگین آن در نظر گرفته می‌شود [۱٤]. از آن‌جاکه ضریب قائم شتاب زلزله تأثیر چندانی در توزیع احتمال ضریب اطمینان و مقدار احتمال شکست ندارد، از مقدار آن صرفه‌نظر شده است. کمیت‌های آماری ضریب افقی شتاب زلزله نیز در جدول ۳ ذکر شده است، هم‌چنین شکل ۸ نمای توزیع احتمال آن را نشان می‌دهد.

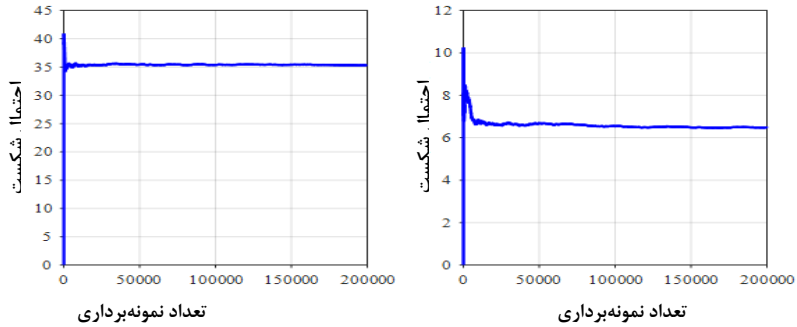


شکل ۸. توزیع احتمال ضریب افقی شتاب زلزله

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

۲-۲. تعیین احتمال شکست

چنان‌که قبلاً گفته شد مدل اولیه معین در این تحقیق روش مورگنسترن- پرایس است که از آن برای انجام تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی بهره گرفته شده است. به‌علاوه، برای تعیین احتمال شکست از شبیه‌سازی مونت کارلو با نمونه‌گیری کاملاً تصادفی (RS-MC) و برای هم‌گرایی نتایج شبیه‌سازی از ۲۰۰۰۰۰ نمونه‌برداری استفاده شده است. برای بررسی کافی بودن تعداد نمونه‌برداری‌ها در هر دو شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی از آزمون هم‌گرایی استفاده شد. چنان‌که در شکل ۹ نشان داده شده است، احتمال شکست برای هر دو شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی به مقدار حدی رسیده است، بنابراین تعداد نمونه‌برداری‌ها برای هر دو شرایط کافی بوده است.



الف ب

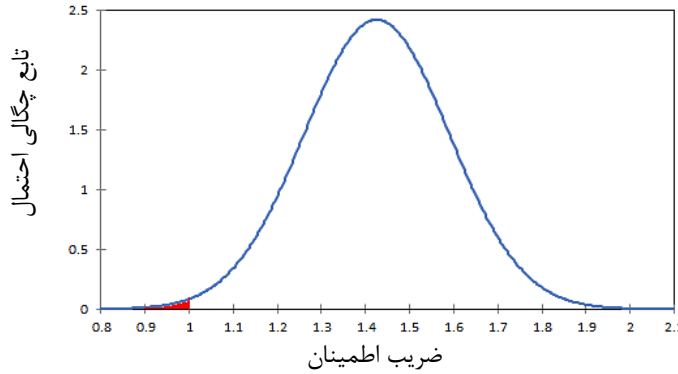
شکل ۹. بررسی هم‌گرایی احتمال شکست برای شرایط الف) استاتیکی، ب) شبه استاتیکی

جدول ۳. کمیت‌های به‌کار رفته در تحلیل پایداری شیروانی سرریز

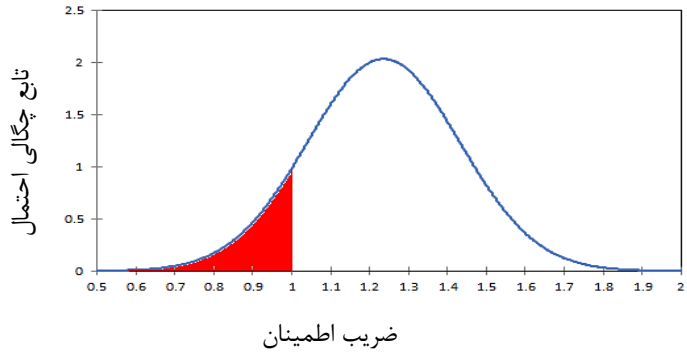
کمیت	توزیع احتمال	میانگین	ضریب تغییرات (٪)	حداقل	حداکثر
UCS (MPa)	نرمال	۷۵	۲۵	۵۰	۱۰۰
GSI	نرمال	۳۵	۱۰	۲۳	۳۸
m_i	نرمال	۱۰	۱۲/۵	٦/۲۵	۱۳/۷۵
γ (kN/m^3)	نرمال	۲۲	۸	۱٦/۷۲	۲۷/۲۸
ضریب افقی شتاب زلزله	نمایی بریده	۰/۱۵	–	۰	۰/۳

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

براساس تحلیل احتمالاتی مقدار احتمال شکست برای شیروانی جناح راست تحت شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی قبل از باربرداری، به‌ترتیب برابر با، ۹/۷۵ و ٤۱/۵۹ درصد است. مطابق با معیارهای مجاز ارائه شده در جدول ۱ مقدار احتمال شکست استاتیکی برای این شیروانی زیر حدود مجاز قرار دارد. بنابراین براساس این روش نیز بایستی شیب این شیروانی تعدیل یابد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع احتمال ضریب اطمینان شیروانی جناح راست را بعد از باربرداری برای شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی نشان می‌دهند. نتایج کلی این تحلیل‌ها و تحلیل قطعی در جدول ٤ به صورت خلاصه نشان داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، مقدار احتمال شکست شیروانی جدید در شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی، به‌ترتیب، ۰/٤۷ و ۱۲/۲۵ درصد است.



شکل ۱۰. توزیع احتمال ضریب اطمینان استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز برای بعد از باربرداری



شکل ۱۱. توزیع احتمال ضریب اطمینان شبه استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز برای بعد از باربرداری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

جدول ٤. نتایج تحلیل قطعی و احتمالاتی برای دو حالت قبل و بعد از باربرداری

شرایط		ضریب اطمینان قطعی	احتمال شکست (٪)
استاتیکی	قبل	۱/۲۳۲	۹/۷۵
	بعد	۱/٤۸۷	۰/٤۷
شبه استاتیکی	قبل	۱/۰۰۷	٤۱/۵۹
	بعد	۱/۱۹۵	۱۲/۲۵

اگر به جدول ۱ مراجعه شود از دیدگاه احتمالاتی نیز احتمال شکست شیروانی بررسی شده زیر ۰/۵ درصد است و در شرایط بسیار مطلوبی قرار دارد که با شرایط کنونی (اتمام عملیات حفر شیروانی) تطابق دارد.

ولی چنان‌که ملاحظه می‌شود از نظر احتمالاتی شرایط این شیروانی محافظه‌کارانه‌ترین حالت ممکن را دارد. اگر بتوان احتمال شکست ۰/۵ تا ۱/۵ درصد را برای این شیروانی پذیرفت، با حفظ ایمنی، امکان افزایش شیب کلی آن و کاهش حجم عملیات خاک‌برداری وجود دارد. بنابراین در این بخش از مقاله، سعی شده است با استفاده از نتایج تحلیل احتمالاتی شرایط بهینه دیگری نیز جستجو شود. در این راستا مقطع ارائه شده در شکل ٦ با شیب‌های مختلف به‌صورت احتمالاتی ارزیابی شد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج این تحلیل‌ها برای هر دو شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی نشان داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود اگر شیب این شیروانی از ۵۸ درجه به ۵۱/۵ درجه کاهش یابد احتمال شکست استاتیکی آن حدود ۱/۵ درصد می‌شود. هم‌چنین برای این حالت مقدار ضریب اطمینان برای شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی، به‌ترتیب، ۱/۳۹۳ و ۱/۱۳۳ و مقدار احتمال شکست شبه استاتیکی حدود ۱۹/٤ درصد به‌دست می‌آید. در این حالت می‌توان حرکت شیروانی را به‌کمک چند ایستگاه نقشه‌برداری پایش کرد. از آن‌جاکه کارگاه مذکور فعال است، این عملیات هزینهٔ خاصی برای کارفرما در بر ندارد ولی شیب کلی شیروانی را بهینه می‌کند. با این بهینه‌سازی که قطعاً با پشتوانهٔ روش احتمالاتی مسیر شد، حجم سنگ‌برداری در کل ۲۸۰۰۰ مترمکعب کاهش می‌یابد که از نظر زمانی و مالی به نفع پروژه خواهد بود. هر چند این شیروانی با شیب ٤۸ درجه حفر و احداث آن تکمیل شده است ولی این تحلیل‌ها نشان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

دادند به‌کمک روش احتمالاتی می‌توان دید بهتری نسبت به وضعیت پایداری شیروانی پیدا کرد و حجم خاک‌برداری را بهینه کرد.

نتایج تحلیل حساسیت

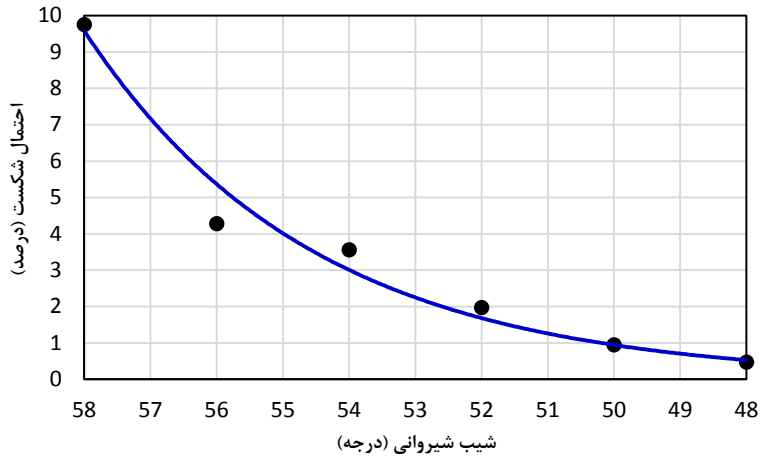
تحقیقات نشان داده‌اند که با کاهش ضریب تغییرات (عدم‌قطعیت)، احتمال شکست نیز کاهش می‌یابد، بنابراین به‌ازای ضریب تغییرات مختلف می‌توان احتمال شکست متفاوتی را انتظار داشت. زمانی‌که ضریب تغییرات بیش‌تری برای کمیت‌ها انتخاب می‌شود، احتمال شکست افزایش یافته و نیاز به راه‌حل‌هایی برای کاهش احتمال شکست است، در نتیجه هزینه‌ها بیش‌تر شده و طراحی‌ها مقرون به صرفه نیستند. درحالی‌که اگر ضریب تغییرات کم‌تری برای کمیت‌ها انتخاب شود، هزینه‌های کاهش احتمال شکست نیز کم‌تر می‌شوند. بنابراین تعیین مقدار ضریب تغییرات برای کمیت‌ها در تحلیل احتمالاتی بسیار مهم است. در صورتی‌که امکان انجام آزمایش‌های لازم برای تعیین مقدار ضریب تغییرات کمیت‌ها وجود نداشته باشد، ضروری است تأثیر ضریب تغییرات در مقدار احتمال شکست بررسی شود. یکی از روش‌های پرکاربرد استفاده از تجزیه حساسیت است. در این تحقیق چنین تحقیقاتی صورت گرفت. شکل‌های ۱٤ و ۱۵ تغییرات احتمال شکست استاتیکی و شبه استاتیکی را نسبت به ضریب تغییرات کمیت‌ها را برای حالت بعد از باربرداری نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود با افزایش ضریب تغییرات مقدار احتمال شکست نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج تجزیهٔ حساسیت شکل ۱٤ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب تغییرات تک تک کمیت‌ها، مقدار احتمال شکست استاتیکی زیر حد مجاز قرار دارد. ولی اگر ضریب تغییرات GSI بالای ۲۱٪ انتخاب شود، مقدار احتمال شکست استاتیکی بالای ۵٪ درصد می‌شود.

مقادیر فاکتور حساسیت ضریب تغییرات کمیت‌ها نسبت به احتمال شکست نیز برای حالت بعد از باربرداری در جدول ۵ آورده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در هر دو شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی ضریب تغییرات GSI بیش‌ترین و ضریب تغییرات وزن واحد حجم کم‌ترین تأثیر را در مقدار احتمال شکست دارند. در نتیجه در تحلیل‌های احتمالاتی که از معیار هوک و بروان استفاده می‌شود، ضروری است مقادیر ضریب تغییرات کمیت‌ها به ویژه GSI با دقت بیش‌تری انتخاب شود.

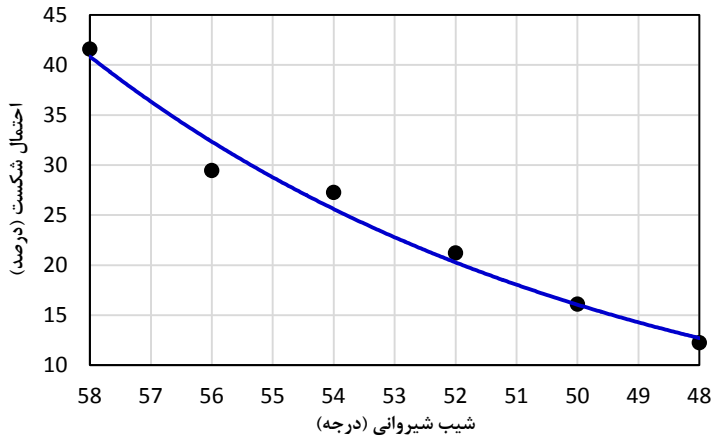
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

جدول ۵. مقادیر فاکتور حساسیت ضریب تغییرات کمیت‌ها نسبت به مقدار احتمال شکست شیروانی جناح راست سرریز برای حالت بعد از باربرداری

شرایط	UCS	GSI		γ
استاتیکی	۰/۵۸۸	۲/۴۷۸	۱/۰۵۳	۰/۲۳۸
شبه استاتیکی	۰/۰۹۷	۰/۹۳۵	۰/۱۱۶	۰/۰۲۳

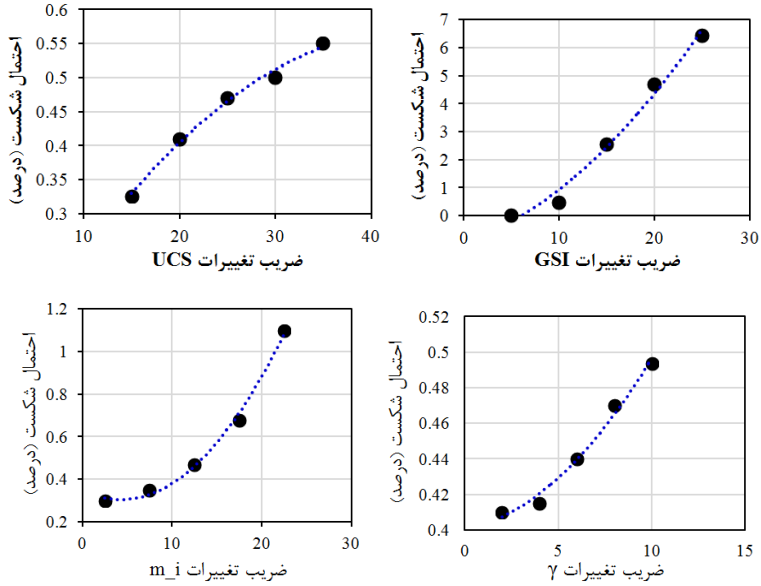


شکل ۱۲. مقادیر احتمال شکست استاتیکی به‌ازای شیب‌های مختلف شیروانی جناح راست سرریز

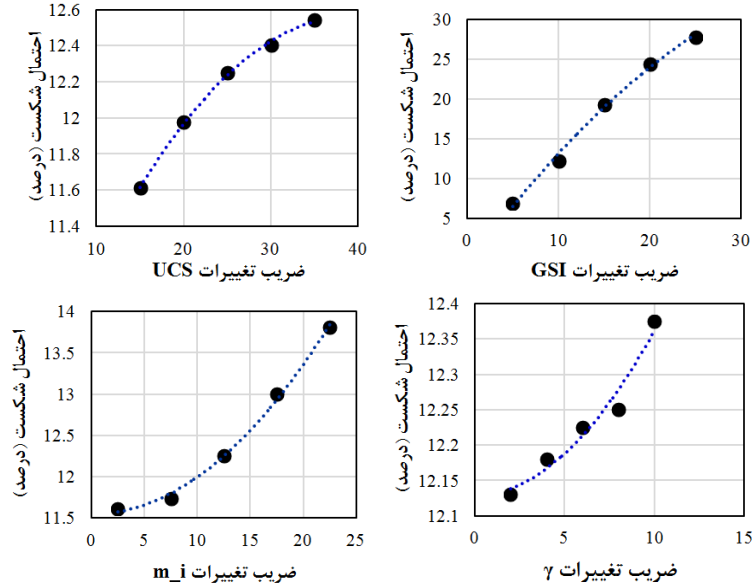


شکل ۱۳. مقادیر احتمال شکست شبه استاتیکی به‌ازای شیب‌های مختلف شیروانی جناح راست سرریز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]



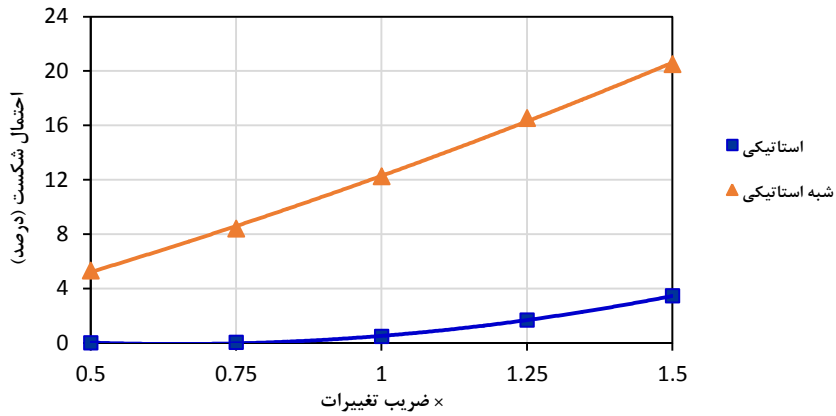
شکل ۱۴. تجزیه حساسیت احتمال شکست استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز برای حالت بعد از باربرداری برحسب ضریب تغییرات کمیت‌ها



شکل ۱۵. تجزیه حساسیت احتمال شکست شبه استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز برای حالت بعد از باربرداری برحسب ضریب تغییرات کمیت‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

به‌علاوه، در این تحقیق بدترین و بهترین حالت برای ضریب تغییرات کمیت‌ها بررسی شد. مقادیر ضریب تغییرات برای تمامی کمیت‌ها نسبت به مقادیر پیشنهادی به یک میزان کاهش و افزایش یافت تا نتیجه آن در مقدار احتمال شکست بررسی شود. شکل ۱۵ نتیجه این پژوهش را برای هر دو شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی برای حالت بعد از باربرداری نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشخص است با افزایش ضریب تغییرات کمیت‌ها مقدار احتمال شکست نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده می‌شود در بدترین شرایط یعنی افزایش ضریب تغییرات به میزان ۵۰٪، هم‌چنان مقدار احتمال شکست برای شرایط استاتیکی زیر حد مجاز قرار دارد، بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که میزان باربرداری‌ها از توده‌سنگ مناسب بوده است.

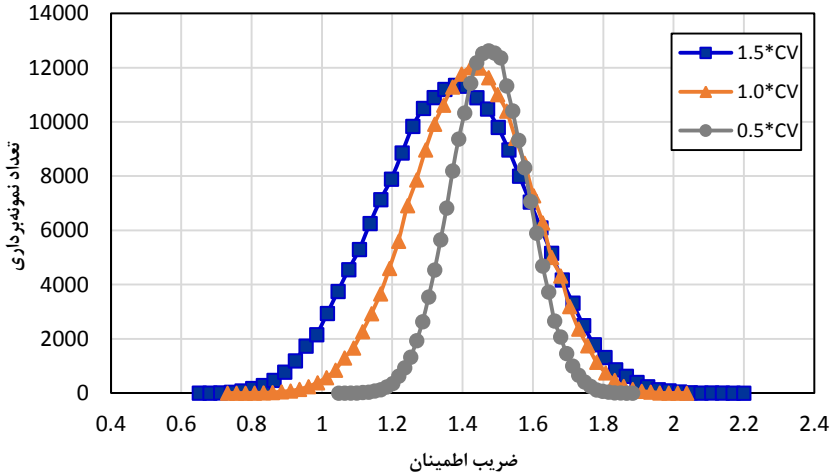


شکل ۱۶. تغییرات احتمال شکست شیروانی جناح راست سرریز به ازای کاهش و افزایش ضریب تغییرات کمیت‌ها برای حالت بعد از باربرداری

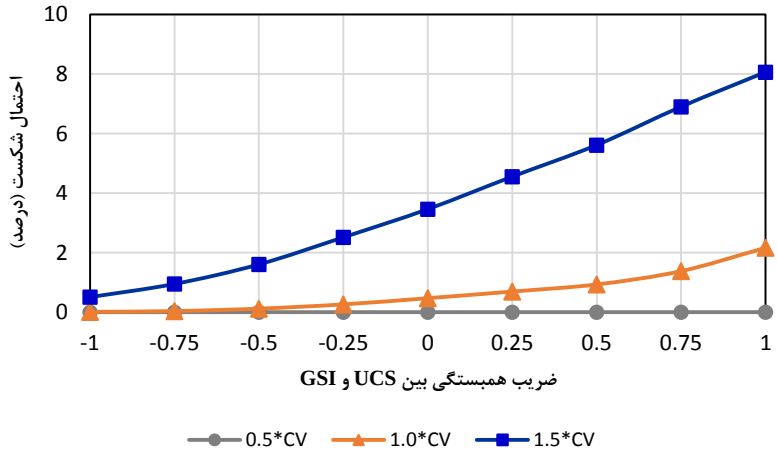
شکل ۱۷ توزیع احتمال ضریب اطمینان را برای سه حالت مختلف ضریب تغییرات (0.5CV، 1.0CV و 1.5CV) تحت شرایط استاتیکی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با افزایش ضریب تغییرات کمیت‌ها، مقدار انحراف معیار ضریب اطمینان نیز افزایش یافته است. به‌عبارت بهتر این شکل به‌خوبی تأثیر عدم‌قطعیت را در شکل توزیع ضریب اطمینان نشان می‌دهد که با افزایش عدم‌قطعیت کمیت‌ها، عدم‌قطعیت ضریب اطمینان نیز افزایش یافته است. بنابراین تحلیل‌های صورت گرفته به خوبی برتری تحلیل احتمالاتی را نسبت به تحلیل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

قطعی نشان می‌دهد.



شکل ۱۷. توزیع احتمال ضریب اطمینان استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز به‌ازای ضریب تغییرات مختلف کمیت‌ها برای حالت بعد از باربرداری

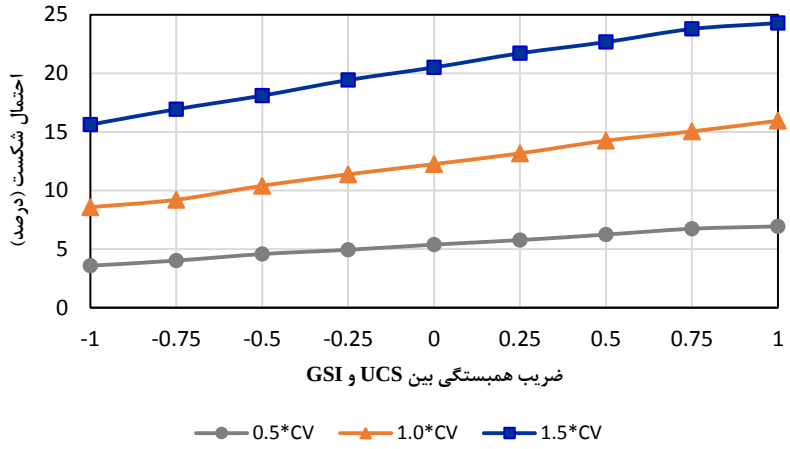


شکل ۱۸. تأثیر ضریب هم‌بستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر روی احتمال شکست استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز برای حالت بعد از باربرداری

از آن‌جاکه ضریب هم‌بستگی بین کمیت‌ها در نتایج تحلیل احتمالاتی مؤثر است، بنابراین در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

این تحقیق تأثیر ضریب هم‌بستگی بین کمیت‌ها نیز بررسی شد. برای این منظور برای ضریب هم‌بستگی بین UCS و GSI ($\rho_{UCS,GSI}$) مقادیر ۱- تا ۱+ در نظر گرفته شد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ تأثیر این ضریب هم‌بستگی را بر احتمال شکست برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود برای ضریب تغییرات پیشنهادی به‌ازای ضرایب هم‌بستگی مختلف مقدار احتمال شکست تقریباً زیر ۲٪ قرار دارد. هم‌چنین ملاحظه می‌شود زمانی‌که ضریب تغییرات کم است، ضریب هم‌بستگی تأثیر کم‌تری بر احتمال شکست دارد و برعکس زمانی‌که ضریب تغییرات ۵۰٪ نسبت به حالت پیشنهادی افزایش یابد، اختلاف احتمال شکست برای ضریب هم‌بستگی ۱- و ۱+ برای شرایط استاتیکی حدود ۸٪ و برای شرایط شبه استاتیکی حدود ۱۰٪ است. این نتایج نشان می‌دهند که در تحلیل احتمالاتی ضروری است ضریب هم‌بستگی بین کمیت‌ها نیز در نظر گرفته شود تا تأثیر ضرایب هم‌بستگی در مقدار احتمال شکست بررسی شود.



شکل ۱۹. تأثیر ضریب هم‌بستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر احتمال شکست شبه استاتیکی شیروانی جناح راست سرریز برای حالت بعد از باربرداری

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به بررسی اهمیت تحلیل احتمالاتی نسبت به تحلیل قطعی پرداختیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

سپس برای روشن شدن موضوع، تحلیل احتمالاتی شیروانی مشرف به سرریز آزاد سد کوار شیراز تحت شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی بررسی شد. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که مقادیر ضریب اطمینان متوسط و احتمال شکست برای هندسه اولیه طراحی زیر حدود مجاز بوده است و باید برای افزایش پایداری، شیب شیروانی کاهش یابد. نتایج تحلیل‌ها برای حالت بعد از باربرداری نشان دادند که مقادیر مذکور به حد مجاز رسیده‌اند. ولی بر خلاف ضریب اطمینان، احتمال شکست شیروانی بسیار کم‌تر از حد مجاز است. بنابراین به‌نظر می‌رسید تحلیل قطعی برای این شیروانی محافظه‌کارانه باشد. بنابراین شیروانی مذکور به‌روش احتمالاتی نیز بررسی شد. نتایج نشان دادند که می‌توان شیب پایدار شیروانی را حدود ۳/۵ درجه بیش‌تر از شیب پایدار در روش قطعی در نظر گرفت. بنابراین در این شرایط حدود ۲۸۰۰۰ متر مکعب سنگ‌برداری کم‌تر می‌شود که این امر می‌تواند برای کاهش هزینه‌ها بسیار مؤثر باشد. هر چند شیروانی مذکور با همان شیب محافظه‌کارانه حفر شده است و این تحلیل‌ها برای شیروانی مذکور کاربردی ندارد ولی می‌توان از آن برای بهینه‌سازی شیروانی‌های مشابه بهره برد.

برای بررسی عدم‌قطعیت کمیت‌ها نیز از تجزیه حساسیت ضریب تغییرات استفاده شد. نتایج تجزیه حساسیت احتمال شکست نسبت به ضریب تغییرات کمیت‌ها نشان داد که مقادیر فاکتور حساسیت کمیت‌ها برای شرایط استاتیکی بیش‌تر از شبه استاتیکی متناظر آن بوده و کمیت GSI بیش‌ترین و وزن واحد حجم کم‌ترین تأثیر را در مقدار احتمال شکست دارند. به‌علاوه، تحلیل‌ها نشان دادند که اگر، در این مثال موردی، صرفاً مقدار ضریب تغییرات GSI بالای ۲۱٪ انتخاب شود، مقدار احتمال شکست استاتیکی بالای حد مجاز قرار خواهد گرفت. هم‌چنین افزایش ضریب تغییرات کمیت‌ها به اندازه ۵۰٪ نشان می‌دهد که احتمال شکست استاتیکی هم‌چنان زیر حد مجاز قرار دارد.

هم‌چنین تحلیل ضریب هم‌بستگی بین UCS و GSI نشان می‌دهد هر چه ضریب تغییرات کمیت‌ها بیش‌تر انتخاب شود، تغییرات احتمال شکست نیز نسبت به $\rho_{UCS,GSI}$ زیاد خواهد بود. به‌طوری‌که برای شرایط شبه استاتیکی تغییرات احتمال شکست نسبت به $\rho_{UCS,GSI}$ خطی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

بوده ولی در شرایط استاتیکی این تغییرات برای افزایش ۵۰٪ ضریب تغییرات نمایی است. هم‌چنین برای کاهش ۵۰٪ ضریب تغییرات، مقدار احتمال شکست استاتیکی به‌ازای مقادیر مختلف $\rho_{UCS,GSI}$ تقریباً برابر صفر است.

منابع

1. Savely J. P., "Probabilistic analysis of intensely fractured rock masses", 6th ISRM Congress, Montreal (1987).
2. Pentz D., "Slope stability analysis techniques incorporating uncertainty in the critical parameters", 3rd International Conference on Stability in Open Pit Mining, Vancouver, Canada (1981).
3. Canada Department of Energy, Mines and Resources, Pit Slope Manual. DEMR, Ottawa, Canada (1978).
4. Wyllie D., McCammon N., Brumund W., "Use of risk analysis in planning slope stabilization programs on transportation routes", Transportation Research Board, Research Recor (1979).
5. McGuffey V., Athanasiou-Grivas D., Iori J., Kyfor Z., "Probabilistic Embankment Design-A Case Study", Transportation Research Board, Washington, D.C. (1980).
6. Phoon K. K., "Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications", CRC Press (2008).
7. Griffiths D. V., Fenton G. A., "Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering", Springer Science & Business Media (2007).
8. Cruden D., "Estimating the risks from landslides using historical data", International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, HI, Balkema, Rotterdam (1997) 177-184.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

9. Fell R., "Landslide risk assessment and acceptable risk", Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, No. 2, (1994) 261-272.
10. Roberds W. J., "Risk-based decision making in geotechnical engineering: overview of case studies", Engineering Foundation Conference on Riskbased Decision Making in Water Resources, Santa Barbara, CA (1984).
11. Roberds W. J., "Applications of decision theory to hazardous waste disposal", ASCE Specialty Conference GEOTECH IV, Boston, MA (1986).
12. Tobutt D., "Monte Carlo simulation methods for slope stability", Computers and Geosciences, vol. 8, No. 2, (1982) 199-208.
13. Low B., "Reliability analysis of rock wedges", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 123, No. 6, (1997) 498-505.
14. Hoek E., "Factor of safety and probability of failure", Rock Engineering, (1998)105-114.
15. Duncan J. M., "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 126, No. 4, (2000) 307-316.
16. Li D., ChenY., Lu W., Zhou, C., "Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables", Computers and Geotechnics, vol. 38, No. 1 (2011) 58-68.
17. Wang L., Hwang J. H., Juang C. H., Atamturktur S., "Reliability-based design of rock slopes—a new perspective on design robustness", Engineering Geology, vol. 154, (2013) 56-63.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

18. Johari A., Fazeli A., Javadi A., "An investigation into application of jointly distributed random variables method in reliability assessment of rock slope stability", Computers and Geotechnics, vol. 47, (2013) 42-47.

19. Jha S. K., "Effect of Spatial Variability of Soil Properties on Slope Reliability Using Random Finite Element and First Order Second Moment Methods", Indian Geotechnical Journal, 1-11.

20. Li D.-Q., Jiang S.-H., Cao Z.-J., Zhou W., Zhou C.-B., Zhang L.-M., "A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties", Engineering Geology, vol. 187, (2015) 60-72.

21. Li D.-Q., Zheng D., Cao Z.-J., Tang X.-S., Phoon K.-K., "Response surface methods for slope reliability analysis: review and comparison", Engineering Geology, vol. 2, 3 (2016) 3-14.

22. Cai J.-S., Yan E.-C., Yeh T.-C. J., Zha Y.-Y., Liang Y., Huang S.-Y., et al., "Effect of spatial variability of shear strength on reliability of infinite slopes using analytical approach", Computers and Geotechnics, vol. 8, 1 (2017) 77-86.

23. US Navy Department, "Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures", Waghington, D.C (1971).

24. SAICE, "Code of Practice: Lateral Support in Surface Excavations", South African Institution of Civil Engineers, Geotechnical Division (1989).

25. Seed H. B., "Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams", Geotechnique, vol. 29, No. 3, (1979) 215-263.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.1.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.371]

26. Corps of Engineers, "Slope Stability Manual EM-1110-2-1902", Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, Washington, D. C. (1982).

27. Kirsten H., "Significance of the probability of failure in slope engineering", The Civil Engineer in South Africa, vol. 25, No. 1 (1983).

28. Hoek E., "Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 35, No. 1, (1998) 63-68.

29. Jimenez-Rodriguez R., Sitar N., "Rock wedge stability analysis using system reliability methods", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 40, No. 4 (2007) 419-427.