Journal of Structural and Construction Engineering, 11(7), 2024, pp. 189-206

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Uncertainty analysis of reinforced soil slope stability by pile

Rasoul Jani[1,2]*, Amir Jani[1]

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2- Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
3- Master of Geotechnics, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In design science, in order to avoid the complexity of the problem, many involved factors are removed with simple assumptions. Simplifying design relationships causes uncertainty and reduces the validity of calculations. In this research, it is tried to study and investigate the relationships governing the stability of earthen gables from the perspective of uncertainty. The use of stabilizing piles can increase the stability of the gables as a barrier element against sliding and improve its performance against incoming loads, but the safety factor called the reliability factor alone should not be the basis of decisions because it is calculated by conventional deterministic methods. And it is not able to directly express the effect of uncertainties. Therefore, in order to evaluate and apply the role of uncertainties, it is necessary to use probabilistic concepts and methods. In this research, slope stability has been evaluated by deterministic analysis and limit equilibrium method in GeoStudio software in the Slope/w module. In the second step, with the help of the probabilistic Monte Carlo method, the uncertainties in the problem are analyzed. Modeling of the reinforced gable has been done by Bishab, Janbo and Morgenstern methods. Bishab and Morgenstern's method showed similar and more reliable behavior than Janbo's method. At the end, the results of deterministic analyzes and the probabilistic Monte Carlo method have been compared in different situations. This comparison with Morgenstern's method has been done to investigate the role of four influential factors in the stability of the gable. The results showed that with increasing the distance of the pile from the bed and heel of the gable as well as the angle of the gable, the reliability coefficient and the reliability index decrease exponentially ,so that an increase in the gable angle by one degree causes a two percent decrease in the reliability coefficient, and also an increase in the distance of the piles from the bed and heels by one meter decreases the reliability coefficient by at least 6 percent and 2 percent, respectively. At the end, 20 sliding surfaces were examined for definitive and probabilistic analysis, and the results indicate that the eighth sliding surface is critical with the highest probability of rupture.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 September 2023
Revise Date: 23 December 2023
Accept Date: 04 February 2024

Keywords:
Slope Stability
Limit Equilibrium
Factor of safety
Indices of Reliability
pile

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.407940.3195

*Corresponding author: Rasoul Jani
Email address: Jani@iaut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

تحلیل عدم قطعیت پایداری شیروانی خاکی مسلح شده با شمع

رسول جانی*[۱و۲]، امیر جانی[۳]

۱- استادیار گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

در علم طراحی برای گریز از پیچیدگی مساله، بسیاری از عوامل دخیل را با فرض‌های ساده حذف می‌کنند. ساده‌سازی روابط طراحی باعث عدم قطعیت شده و اعتبار محاسبات را کاهش می‌دهد. در این مقاله سعی بر آن است روابط حاکم بر پایداری شیروانی‌های خاکی از منظر عدم قطعیت مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. استفاده از شمع‌های پایدارکننده می‌تواند به عنوان یک المان حائل در مقابل لغزش، پایداری شیروانی را افزایش داده و باعث بهبود عملکرد آن در مقابل بارهای وارده شود ولی فاکتور ایمنی تحت عنوان ضریب اطمینان به تنهایی نباید مبنای تصمیمات باشد چرا که بوسیله روش‌های قطعی مرسوم محاسبه شده و به طور مستقیم قادر به بیان اثر عدم قطعیت‌ها نیست. لذا جهت ارزیابی و اعمال نقش عدم قطعیت‌ها نیاز به استفاده از مفاهیم و روش‌های احتمالاتی می‌باشد. در این مقاله پایداری شیب با تحلیل قطعی و روش تعادل حدی در نرم افزار GeoStudio در ماژول Slope/w مورد ارزیابی قرار گرفته است. در گام دوم با کمک روش احتمالاتی مونت کارلو نسبت به تحلیل عدم قطعیت‌های موجود در مسئله پرداخته شده است. مدل‌سازی شیروانی مسلح به روش‌های بیشاب، جانبو و مورگنسترن انجام شده است. روش بیشاب و مورگنسترن رفتار مشابهی و قابل اعتمادتری نسبت به روش جانبو از خود نشان دادند. در انتها نتایج تحلیل‌های قطعی و روش احتمالاتی مونت کارلو در حالات مختلف مقایسه شده است. این مقایسه با روش مورگنسترن برای بررسی نقش چهار عامل تاثیرگذار در پایداری شیروانی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله شمع از بستر و پاشنه شیروانی و همچنین زاویه شیروانی، ضریب اطمینان و شاخص اعتمادپذیری بصورت تصاعدی کاهش می‌یابد، بطوری که افزایش زاویه شیروانی به اندازه یک درجه باعث کاهش دو درصدی ضریب اطمینان و همچنین افزایش فاصله شمع‌ها از بستر و پاشنه‌ها به اندازه یک متر به ترتیب باعث کاهش ضریب اطمینان حداقل ۶ درصدی و ۲ درصدی می‌گردد. در انتها بیست سطح لغزش برای تحلیل قطعی و احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از بحرانی بودن سطح لغزش هشتم با بیشترین احتمال گسیختگی می‌باشد.

کلمات کلیدی: پایداری شیروانی،تعادل حدی، فاکتور ایمنی، عدم قطعیت، روش‌های احتمالاتی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.407940.3195
۱۴۰۲/۰۶/۲۰	۱۴۰۲/۱۰/۰۲	۱۴۰۲/۱۱/۱۵	۱۴۰۲/۱۱/۱۵	۱۴۰۳/۰۷/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2024.407940.3195

*نویسنده مسئول: رسول جانی

پست الکترونیکی: Jani@iaut.ac.ir

۱- مقدمه

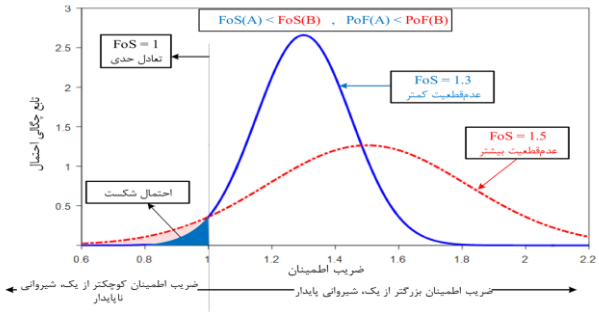
پدیده زمین لغزش و راه‌های مقابله با آن همواره یکی از مسائل مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک بوده است. بسیاری از مناطق در سطح دنیا و نیز ایران به علت کوهستانی بودن دارای استعداد زمین لغزش هستند، از دلایل اصلی به وجود آمدن زمین لغزش می‌توان به شیب‌های تند و خاک سست اشاره کرد، لیکن سایر عوامل مانند به هم خوردن تعادل سطح شیبدار در اثر دخالت بشر در طبیعت نظیر احداث جاده، خطوط لوله و یا سایر ساخت و سازها، نفوذ آب و همچنین حرکات تکتونیکی زمین و نظایر آن می‌تواند موجب زمین لغزش شود و یا آن را تسهیل کند. در سال‌های اخیر، بحث تحلیل پایداری شیروانی‌ها با توجه به پیشرفت قابل قبول رایانه‌ها بیشتر توسط روش‌های المان محدود یا تفاضل محدود صورت می‌گیرد. این روش‌ها دارای مزیت‌های متعددی نسبت به روش‌های قدیمی‌تر مثل تعادل حدی می‌باشد. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به ایجاد سطح لغزش بحرانی به صورت خودکار با فرضیات کمتر، در نظر گرفتن اندرکنش شمع خاک و امکان انجام مطالعه‌ی پارامتریک اشاره کرد . شمع‌هایی که برای پایداری شیروانی‌ها بکار برده می‌شوند به صورت مقاوم[1] بوده، زیرا همواره تحت تاثیر نیروهای جانبی ناشی از جابجایی افقی خاک اطراف خود می‌باشند. برای شمع‌های مقاوم مسئله مقداری پیچیده می‌باشد، زیرا نیروهای جانبی که به شمع وارد می‌شود بستگی به جابجایی خاک داشته و خود جابجایی خاک به علت حضور شمع، دستخوش تغییراتی خواهد شد. شمع با استفاده از مقاومت برشی خود در مقابل نیروها مقاومت می‌کند و این نوع عملکرد کاملا با عملکرد مهارها و میخ کوبی‌ها متفاوت است [۱]. شمع‌ها به عنوان المان‌های مقاوم در برابر جابه‌جایی توده خاک مستعد گسیختگی به سمت پایین عمل کرده و نیروهای ایجاد شده ناشی از این اندرکنش را به لایه‌های پایدار زیرین منتقل می‌کنند[۲].

اثر عدم قطعیت در قابلیت اطمینان طراحی‌ها و پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های مهندسی قابل توجه می‌باشد. عدم قطعیت‌ها از تغییرپذیری‌های طبیعی و ذاتی ناشی می‌شوند که این تغییرپذیری‌ها بدلیل عدم وجود داده‌های کافی، عدم آگاهی کافی نسبت به عواملی که سیستم‌های مهندسی را کنترل می‌کنند و خطاها و اشتباهات انسانی بوجود می‌آیند. روش ضریب اطمینان از قدیمی‌ترین روش‌های تحلیل پایداری شیروانی‌ها محسوب می‌شود که به صورت نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک تعریف می‌شود. یکی از مشکلات این روش عدم کارایی 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 عدم قطعیت‌ها[2] و خطای موجود در محاسبات لحاظ نمی‌شود. به عبارت ساده ممکن است که احتمال شکست یک شیروانی با ضریب اطمینان ۱/۳ و عدم قطعیت اندک، از یک شیروانی دیگر با ضریب اطمینان ۱/۵و عدم قطعیت بالا، کمتر باشد (شکل۱). نمونه دیگری که در آن استفاده از ضریب اطمینان منجر به نتایج گمراه کننده 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 [۳]. 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 اندازه دو برابر شیروانی با ضریب اطمینان ۱/۵ باشد(شکل۲). در حالیکه بین احتمال شکست و ناپایداری ارتباطی خطی وجود دارد و احتمال پایداری یک شیروانی با احتمال شکست ۳٪ به اندازه دو برابر شیروانی دیگر با احتمال شکست ۱۰٪ است.

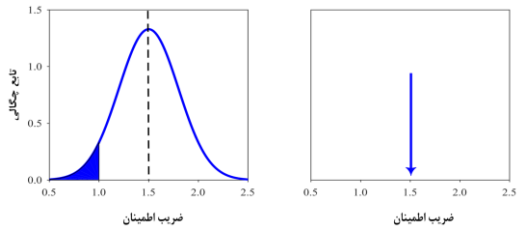
با توجه به مشکلات فوق، امروزه برای حل بعضی مسائل مختلف علوم مهندسی، اقتصاد، آمار و احتمالات از روش عددی شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌گردد [۴]. روش مونت کارلو[3] یک الگوریتم محاسباتی-احتمالاتی است که برای محاسبه نتایج از نمونه-

[1] Passive
[2] Ucertainties
[3] Monte Carlo Method

گیری تصادفی تکرارشونده استفاده می‌کند. روش مونت کارلو معمولاً برای حل مسائلی به کار می‌رود که تعداد متغیرها زیاد و استفاده از روش‌های تحلیلی برای دستیابی به جواب دشوار باشد. شیوه‌های ارزیابی قابلیت اطمینان از نظر تاریخچه پیدایش، بدواً در ارتباط با صنایع هوا و فضا و کاربردهای نظامی شکل گرفت،



شکل۱ : تاثیر عدم قطعیت در توزیع احتمال ضریب اطمینان [۵].



شکل۲ : مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل قطعی و احتمالاتی[۵].

آلونسو با استفاده از روش FOSM[4]به بررسی منابع مختلف اثر عدم قطعیت‌ها در پایداری شیروانی‌های خاکی پرداخت. وی با انجام تحلیل حساسیت اولیه، پارامترهای چسبندگی خاک و فشار آب حفره‌ای را پارامترهای مؤثر در تحلیل شیروانی تشخیص داده و با بررسی گسیختگی‌های واقعی در خاک رس حساس کانادا نشان داد که با تغییر میزان عدم قطعیت پارامترهای خاک (پراکندگی پارامترهای خاک) و میزان وابستگی (همبستگی[5]) بین پارامترهای خاک، احتمال گسیختگی شیب دچار تغییر اساسی می‌شود [۶]. ملکوی و همکاران قابلیت اطمینان شیروانی‌های خاکی همگن و ناهمگن را با استفاده از روش‌های احتمالاتی FOSM و MCs را مطالعه نموده و نتایج حاصل را با استفاده از چهار روش تحلیل پایداری قطعه، ساده شده بیشاپ، ساده شده جانبو و اسپنسر مقایسه کردند. از سوی دیگر بر مبنای نتایج حاصله براساس روش‌های ساده شده جانبو و اسپنسر مقداری اختلاف مشاهده شد. در شیروانی ناهمگن تطابق خوبی بین نتایج حاصل از روش‌های متداول قطعه، ساده شده بیشاپ و جانبو مشاهده شد. همانند شیروانی همگن اختلاف ناچیزی بین شاخص اطمینان تعیین شده با روش‌های FOSM و MCs در روش اسپنسر مشاهده گردید [۷]. ال راملی و همکاران رویکردی برای تحلیل احتمالاتی گسیختگی شیروانی بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل خطر در شیک شیپ می در هنگ کنگ، که قبلاً گسیخته شده بود، ارائه کردند. در مطالعه فوق، روش‌هایی که برای اندازه‌گیری عدم قطعیت پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها براساس بانک اطلاعاتی ارائه دادند. برای تقریب زدن توزیع احتمالاتی فشار آب حفره‌ای در شیروانی مورد نظر از تحلیل‌های بازگشتی احتمالاتی استفاده کردند. با توجه به اینکه شیروانی مورد نظر قبلاً دچار شکست شده بود، در این پژوهش شیروانی مورد بررسی را با استفاده از توزیع فشار آب حفره‌ای حاصل از تحلیل بازگشتی و عدم قطعیت‌های محاسبه شده، دوباره با زاویه‌ای کمتر طراحی کرده، و احتمال عملکرد نامناسب (احتمال گسیختگی) و شاخص اطمینان آن را محاسبه نمودند [۸].

میتا و همکاران یک الگوریتم مبتنی بر رگرسیون سازگاری چند متغیره متغیرهای خطی (MARS[6]) بر داده‌ها، برای تحلیل قابلیت اطمینان شیروانی‌های خاکی دارای خواص خاک متغیر تحت چارچوب روش تعادل حدی در نظر گرفته شده ارائه دادند. از نویز شبیه‌سازی شده برای در نظر گرفتن عدم دقت مدل‌سازی و عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. این الگوریتم پیشنهادی قادر به دستیابی سطح بالایی از راندمان محاسباتی در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم، بدون کاهش دقت نتایج است. نتایج عددی نشان می‌دهد که تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم با سطوح لغزش دایره‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی احتمال خرابی سیستم شیروانی خاک دست پایین در نظر بگیرد. مقدار احتمال خرابی سیستم از مقدار احتمال خرابی در ارتباط با سطح لغزش بحرانی احتمالی بالاتر است، که مطابق انتظار است و صحت روش پیشنهادی به تعداد نمونه‌های آموزش و تعداد شبیه‌سازی بستگی دارد[۹].

[4] First Order Second Moment Method
[5] Correlation
[6] Multivariate Adaptive Regression Spline

فرناندز و همکاران تحلیل پایداری احتمالی شیروانی را با استفاده از یک مدل متغیرهای تصادفی برای مشخص کردن پارامترهای مقاومت برشی انجام داد. شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید مقادیر متغیرهای تصادفی انتخاب گردید. نتایج این روش نشان داد که استفاده از ضریب اطمینان میانگین برای ارزیابی پایداری شیروانی، با لحاظ تغییرات خواص خاک، بیشتر محافظه کارانه است. پس از بررسی مقادیر حاصل، احتمال خرابی در برابر زاویه شیب شیروانی در مقیاس لگاریتمی رسم شد. از این نمودار مشاهده می‌شود که در تمامی ارتفاع‌های شیروانی با شیب ۵۵ درجه، احتمال خرابی پایین‌تر از ۵ درصد است. در حالی که برای ارتفاع‌های بیشتر از ۵ متر و زوایای بیشتر شیروانی، احتمال خرابی بیش از ۳۱ درصد می‌باشد. این نشانگر ناپایداری واضح است و پایدارترین ارتفاع شیروانی با ارتفاع ۲ متر می‌باشد که احتمال خرابی پایین‌تر از ۲ درصد برای کلیه شیب‌های شیروانی را دارد [۱۰].

مظاهری و همکاران به بررسی جابجایی، تغییر شکل، تنش، فشار آب منفذی و پایداری سد خاکی دویرج با استفاده از نرم افزار Geostudio و Flac 2D پرداخته و نشان دادند که دو نرم افزار فوق، قابلیت خوب و تقریباً یکسانی در مدل‌سازی عددی این پارامترهای فیزیکی داشته‌اند[۱۱]. بلو و همکاران مدلسازی نشت و پایداری سدخاکی گومیت در اتیوپی را با دو روش تعادل حدی از نرم افزار Slope/W و روش اجزاء محدود از نرم افزار Plaxis 2D را انجام دادند نتایج نشان داد نتایج پایداری مدل Plaxis عموماً با اختلاف کمی کوچکتر از نتایج مدل SLOPE/W است. برای تجزیه و تحلیل پایداری شیب سدهای خاکی، که در آن عدم قطعیت بالایی در داده‌های خاک ساخت سد وجود دارد، مدل Plaxis ممکن است بهتر باشد زیرا بر اساس این مطالعه عامل محافظه‌کارانه نتایج ایمنی را ارائه می‌دهد. با این حال، هنوز ارزیابی تکمیلی مدل ها ضروری است و طراحان باید به ملاحظات مختلف مدل ها در اعمال و انتخاب مدل ها توجه داشته باشند[۱۲].

ایوب و همکاران پایداری شیروانی را با استفاده از روش تعادل حدی و المان محدود مطالعه نمودند و بیان کردند که هر چند تعادل حدی یک روش مرسوم بوده و روشهای اجزای محدود روشی است که برای شاخص ها مقادیر واقع بینانه‌ای ارایه می دهد ولی هر نتایج هر دو روش تفاوت قابل توجهی از همدیگر نداشته و مقدار ضریب اطمینان در روش اجزای محدود با اختلاف کمی نسبت به نتایج روش تعادل حدی محافظه‌کارانه است [۱۳].

فتاحی و همکاران به تجزیه و تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی سد رودبار لرستان پرداختند و نشان دادند که ترکیب روش های مونت کارلو و تعادل حدی برای ارزیابی پایداری شیروانی ها بسیار موفقیت آمیز می باشد. در ضمن از پارامترهای چسبندگی، زوایه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص بعنوان منابع عدم قطعیت در سد در نظر گرفته شده است [۱۴]. جاکومار به بررسی تأثیر تغییرپذیری پارامترهای خاک روی قابلیت اعتماد شیروانی ها پرداخته است. این محقق برای این منظور از دو روش تقریب اول ممان دوم و روش المان محدود تصادفی استفاده کرده است [۱۵]. کاو و همکاران با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به تحلیل قابلیت اعتماد برای مسائل پایداری شیب پرداختند. این روش برای ارزیابی تأثیر تغییرات خواص خاک و سطح لغزش بحرانی استفاده شد و نتایج نشان داد که وقتی تغییرات خاص خاک در نظر گرفته نشود نتایج ممکن است به صورت بیش از حد(محافظه کارانه) و یا کمتر از حد (غیرمحافظه کارانه) ارائه شود [۱۶]. برای مطالعه بیشتر می توان به لی و همکاران [۱۷]، اوغوز و هواج [۱۸]، اکبری و همکاران [۱۹] اشاره کرد.

در مطالعات صورت گرفته بیشتر به ضریب پایداری و برخی پارامترهای فیزیکی پرداخته شده و کمتر به عدم قطعیت محاسبه پارامترهای فیزیکی اهمیت داده می‌شود در این مطالعه تلاش شده دو مبحث پایداری و عدم قطعیت بصورت یکجا بیان شود و همچنین پارامترهای تاثیرگذار خود شمع نیز مدنظر قرار گیرد. در این مقاله ابتدا پایداری شیروانی خاکی با استفاده از روش تعادل حدی بررسی گردید و بعد از پایدارسازی شیروانی بوسیله شمع، میزان شاخص اعتمادپذیری در شرایط مختلف با روش احتمالاتی مونت کارلو محاسبه و نقش عوامل موثر در آن مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- روش پژوهش

روش تحلیل پایداری شیروانی: برای تحلیل پایداری از نرم افزار GeoStudio 2018 استفاده شده است. این یک برنامه کامل ژئوتکنیکی برای تحلیل و طراحی است که قادر است پایداری شیب‌ها، تراوش، لرزه و تنش و کرنش در انواع شیب‌های خاکی مسلح و غیرمسلح در شرایط استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی را به صورت عددی شبیه‌سازی کند. نرم افزار Slope/w نیز برخلاف بسیاری از نرم‌افزارهای مشابه مانند Plaxis، تنها از روش‌های ترسیمی و تعادل حدی که روش‌های محبوبی در تحلیل پایداری هستند، برای محاسبه پایداری استفاده می‌کند. از مهم‌ترین مزایای دیگر این نرم‌افزار، امکان مدل‌سازی مستقیم اکثر مسلح کننده‌های رایج از قبیل ژئوگریدها، مهارها، شمع‌ها و نیلینگ‌ها (میخکوبی) برای بالا بردن ایمنی شیب می‌باشد. تمام روش‌های تعادل حدی مانند بیشاپ[۷]، جانبو[۸]، مورگنسترن- پرایس[۹]، اسپنسر[۱۰]، شارما[۱۱]، لاو و کارفه[۱۲] و دیگر روش‌های موجود در این نرم افزار تعبیه شده است[۲۰]. از مهمترین مزایای دیگر این نرم افزار، 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 سنجه‌های ورودی و تغییر این فراسنجه‌ها ازجمله 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 GeoStudio دارد. در تحقیق حاضر از این نرم‌افزار برای مطالعه پایداری یک سد خاکی در حالت قطعی و غیرقطعی (احتمالاتی) استفاده گردید. لازم به یادآوری است که حداقل ضریب اطمینان پایداری یک شیب برابر واحد (آسیب پذیری زمین لغزش زیاد) می‌باشد ولی معمولا در طراحی، حداقل آن را برابر ۱/۵ (آسیب پذیری زمین لغزش کم) در نظر می‌گیرند[۲۱].

راه‌های متفاوتی برای توزیع مقاومت مصالح (خاک و سنگ) در تحلیل پایداری وجود دارد و رفتار مکانیکی خاک ممکن است با دقت‌های متفاوتی مدل شود. رایج‌ترین روش برای بیان مقاومت برشی در مصالح ژئوتکنیکی معادله کولمب است. پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی(C , ϕ) می‌توانند پارامترهای مقاومت کل یا پارامترهای مقاومت موثر باشند. نرم افزارSlope/w بین این پارامترها تفاوتی را در نظر نمی‌گیرد، درواقع نرم افزار نمی‌تواند در انجام تحلیل‌های خاص که در آن‌ها به تمایز بین این پارامترها نیاز است، به ما کمک نماید. از نقطه نظر تحلیل پایداری شیب، پارامترهای مقاومتی موثر، راه‌حل واقع بینانه‌تری را به خصوص برای سطوح لغزش بحرانی می‌دهد. وقتی از پارامترهای مقاومتی موثر استفاده شود، موقعیت سطح لغزش بحرانی پیش بینی شده نتایج واقع بینانه‌تری را می‌دهد. بعبارتی در تحلیل قطعی تنها یک مقدار برای هر کمیت مؤثر در نظر گرفته می‌شود و این مشکل می‌تواند با تحلیل‌های احتمالاتی حل - شود.[۲۲ و ۲۳].

تحلیل احتمالاتی مونت کارلو: در تحلیل احتمالاتی توزیع احتمال برای کمیت‌های مؤثر اختصاص داده می‌شود. بدین ترتیب احتمال شکستی که از تحلیل احتمالاتی به دست 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. 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 [۲۴]. روش شبیه‌سازی مونت کارلو به طور موثری پاسخ تابع عملکرد فاکتور ایمنی را نسبت به متغیرهای ورودی که به طور تصادفی انتخاب و در تابع عملکرد جایگزین می‌شوند، شبیه‌سازی می‌کند. در این روش برای هر پارامتر ورودی که به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است با توجه به شکل تابع چگالی احتمال آن و با توجه به دامنه تغییراتش، اعداد تصادفی ایجاد و با توجه به آن‌ها، مقدار تابع

[7] Bishop
[8] Junbu
[9] Morgenstern-price
[10] Spencer
[11] Sarma
[12] Lowe-Karafiath

عملکرد محاسبه می‌شود. این فرآیند آنقدر ادامه می‌یابد تا اینکه به طور تقریبی شکل تابع چگالی احتمال فاکتور ایمنی تعیین شود و با توجه به آن احتمال گسیختگی و اندیس قابلیت اطمینان محاسبه می‌گردد[۲۵].

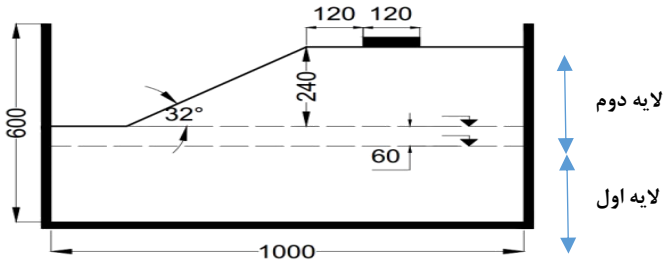
شاخص اعتمادپذیری و احتمال گسیختگی: در مسائل قابلیت اطمینان کمی کردن مقدار اعتمادپذیری توسط شاخص قابلیت اطمینان با شاخص اعتماد پذیری صورت می گیرد. شاخص اعتماد پذیری (β) در ساده ترین قالب به صورت نسبت میانگین (μ_g) و انحراف معیار (σ_g) برای تابع شرایط حدی (g) بیان می شود که به آن شاخص قابلیت اطمینان کورنل نیز می گویند. در مسائل ژئوتکنیک، نامعینی و تغییرپذیری ذاتی در پارامترهای مقاومتی خاک به شکل محسوسی دیده می‌شوند و استفاده از تحلیل قطعی با استفاده از پارامترهای قطعی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. لذا استفاده از متغیرهای تصادفی و روش‌های قابلیت اطمینان، بهترین شیوه برای بیان این پارامترها است. برای تحلیل‌های احتمالاتی باید عدم قطعیت موجود در پارامترهای موجود را نیز درنظر گرفت. این عدم قطعیت‌ها به وسیله متغیرهای تصادفی با توابع توزیع احتمالاتی خاص و همچنین پارامترهای آماری شامل مقادیر میانگین، انحراف معیار و چولگی بیان می‌گردند. ایده اصلی محاسبه شاخص قابلیت اطمینان فاصله از محل اندازه‌گیری میانگین تا سطح حالت حدی است که برابر است با اختلاف انحراف معیار تا تابع حدی (رابطه ۱) که هرچه این فاصله بیشتر باشد، سازه ایمن‌تر خواهد بود[۲۶]. گسیختگی در ارزیابی پایداری یک شیب، زمانی رخ می‌دهد که ضریب اطمینان کوچکتر از یک شود. برای بدست آوردن احتمال گسیختگی یک شیب، فرض کنید تعداد تحلیل‌های انجام شده در روش مونت کارلو ۱۰۰۰ بار است که در ۱۰۰ تحلیل ضریب اطمینان کوچکتر از یک بدست آمده است. در این حالت احتمال گسیختگی برابر است با $\frac{100}{1000} = 10\%$.

$$\beta = \frac{(\mu_R - \mu_Q)}{\sqrt{(\sigma_R{}^2 + \sigma_Q{}^2)}} \qquad (۱)$$

۲-۱ مطالعه موردی و پارامترهای به کار رفته در مدل رفتاری

در یک مطالعه آزمایشگاهی که توسط سرخانی در سال ۱۳۹۶ انجام شده است، با روش[۱۳] PIV رفتار شیروانی خاکی تحت بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر طول شمع‌ها، موقعیت شمع‌ها، تعداد ردیف گروه شمع و طول نفوذ شمع در ماسه اشباع بر روی جابجایی سر شمع مورد مطالعه قرار گرفته است. خاک استفاده شده در این آزمایش از نوع ماسه‌ای خشک بد دانه‌بندی شده بود که در سست‌ترین حالت در داخل محفظه آزمایش ریخته شده است. شمع‌های استفاده شده، شمع‌های صلب استوانه‌ای به قطر۲ سانتی‌متر، از جنس آلومینیوم و به طول‌های ۱۴، ۲۰، ۲۶ و ۳۲ سانتی‌متر بودند. ۱۹ شیروانی مسلح شده با شمع با ابعاد مختلف مدل‌سازی شده (واحدها بر حسب میلیمتر) و با بارگذاری پی قرار گرفته در نزدیکی لبه شیروانی، رفتار شیروانی مسلح شده با شمع تحت بار پی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه از داده‌های این مطالعه برای مدل‌سازی استفاده شده است که در جدول(۱) آمده است. همچنین در شکل (۳) ابعاد شیروانی مدل سازی شده نشان داده شده است[۲۵].

[13] Particle Image Velocimetry



شکل۳ : ابعاد شیروانی مدل شده [۲۲]

جدول۱ : مشخصات لایه‌های خاک [۲۲]

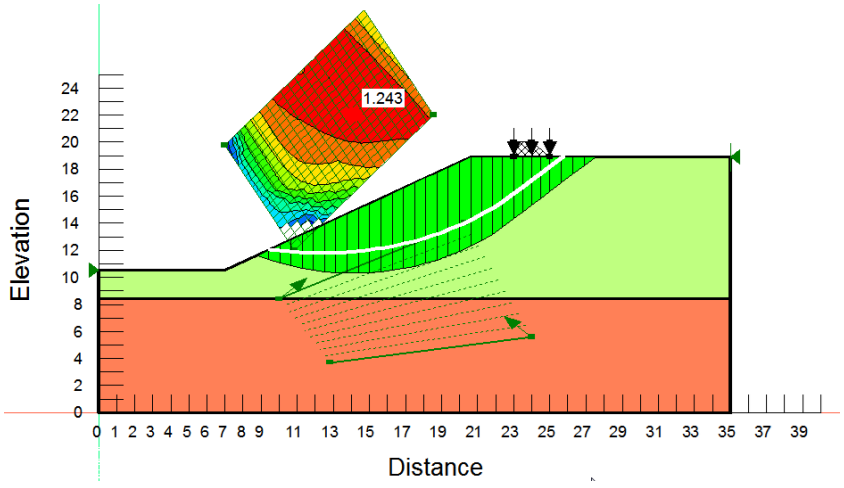
نوع خاک	γ_{wet}(KN/m3)	γ_d(KN/m3)	C	Φ	φ_b	P(KN/m3)
لایه اول	۱۸/۹۸		۰	۳۴°	۱۷°	۲۵۰۰
لایه دوم	۱۲	۱۴/۶۶	۰	۳۴°		

جدول۲ : مشخصات شمع‌ها [۲۲]

نوع شمع	E(KN/m2)	EI(KN.m2)	D(m)	L(m)
بتنی	3e7	1794870	0.86	7

۲-۲ نحوه مدل‌سازی عددی

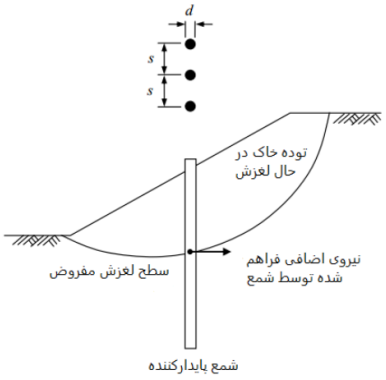
ابتدا شیروانی خاکی مورد آزمایش قرار گرفته، مطابق شکل (۴) بدون مسلح کننده مدل‌سازی می‌گردد. در این حالت شیروانی خاکی غیر مسلح مورد بررسی قرار می گیرد. چنانچه از تحلیل شیروانی خاکی در حالت غیرمسلح مشخص است، ضریب اطمینان پایداری شیروانی بدست آمده از روش قطعی مورگنسترن برابر با ۱/۲۴۳ می‌باشد. سپس در ادامه شیروانی با شمع‌ها مسلح شده و تاثیر آنها بر پایداری در شرایط مختلف بررسی می‌شود.



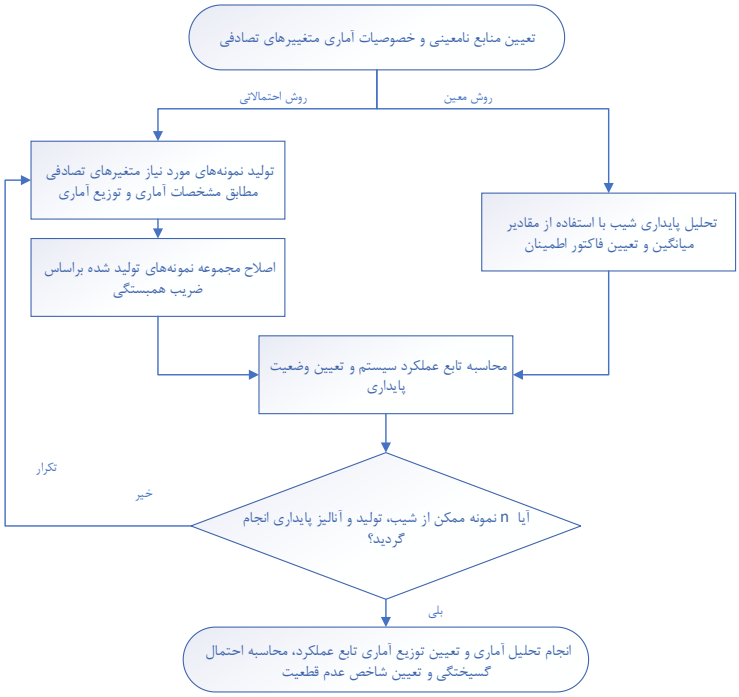
شکل۴ : مدل‌سازی شیروانی غیر مسلح .

مطابق با شکل(۵)در یک شیروانی مسلح شده با شمع، نیروی برشی افقی از اندرکنش شمع- خاک حاصل می‌شود که عموماً در محل برخورد سطح لغزش با شمع فرض می‌شود. حضور شمع‌های مسلح کننده در شیرونی ناپایدار می‌تواند سهم عمده‌ای از پایدار کردن شیروانی با فراهم کردن نیروی مقاوم اضافی در برابر لغزش شامل شود.

روش‌های لغزش دایروی برای پایداری شیروانی (که بر پایه روش قطعات استوار است) در حالت کلی برای طراحی کافی است بطوری که نیروی اندرکنش را به عنوان نیروی خطی افقی در نظر می‌گیرد (در سطح لغزشی وارد می شود که قبل از پایداری بحرانی است). نرم افزار تجاری تهیه شده برای پایداری شیروانی تحت عنوان Slope/W به آسانی این رویکرد را عملی می‌کند[۲۷].



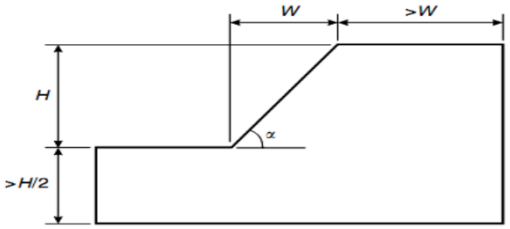
شکل۵ : تحلیل های تعادل حدی برای شیروانی ناپایدار مسلح شده با شمع[۲۷]



شکل۶ : فلوچارت کلی روند مطالعه حاضر به روش‌های قطعی و احتمالاتی

۲-۳- صحت سنجی

به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از نرم افزار GeoStudio، از مطالعه روحانی و قدیری استفاده گردید. در این مطالعه یک مدل شیروانی با مشخصات قید شده توسط Duncan & Christopher (2004) ارایه شده است (شکل۷). در بررسی یک حالت، شیروانی با H=18 و زاویه ۳۰ درجه در محیط خاکی ماسه‌ای دارای ضریب اطمینان ۱/۸۲ با استفاده از روش عددی می‌باشد. با شبیه سازی مشخصات فوق در نرم افزارGeoStudio با روش قطعی مورگنسترن مقدار ضریب اطمینان برابر ۱/۷۷۵ بدست آمد که اختلاف کمی با ضریب اطمینان عددی دارد[۲۸].



شکل۷: پیشنهاد ارائه شده برای انتخاب محدوده مسئله [۲۸]

جدول۳ : مشخصات میانگین خاک ماسه‌ای [۲۸]

γ_s(KG.m3)	C(Kpa)	Φ(°)
1840	۵	۴۰

۳- بررسی نتایج

هدف استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو، بدست آوردن معیارهای موجود در روش احتمالاتی یعنی شاخص اعتمادپذیری و احتمال گسیختگی می‌باشد. در این بخش، به مقایسه نتایج تحلیل احتمالاتی با مقادیر مجاز پرداخته می‌شود. اکثر خاک‌ها به طور طبیعی شکل گرفته‌اند و از این رو خواص فیزیکی آن‌ها در قسمت‌های مختلف با توجه به شرایط محیطی متفاوت خواهد بود. این تغییرات در خواص، حتی در یک لایه‌ی همگن خاک نیز وجود خواهد داشت. تغییرپذیری در خواص خاک سهم زیادی در تحلیل عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک دارد. در مقاله موجود، پارامترهای مقاومتی (شامل چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و همچنین وزن مخصوص) و مقاومت برشی شمع‌ها، به عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند.

در این مقاله تاثیر چهار عامل مهم از جمله استفاده از دو ردیف شمع، فاصله شمع‌ها از بستر و پاشنه شیروانی و همچنین نقش زاویه شیروانی در سطح اعتماد و ضریب اطمینان به ازای سطح گسیختگی بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل احتمالاتی مونت کارلو ۵۰۰۰ بار تکرار صورت گرفته و از توزیع نرمال برای تخمین احتمال گسیختگی استفاده شده است. در زیر به نتایج تاثیر چهار عامل فوق پرداخته می‌شود.

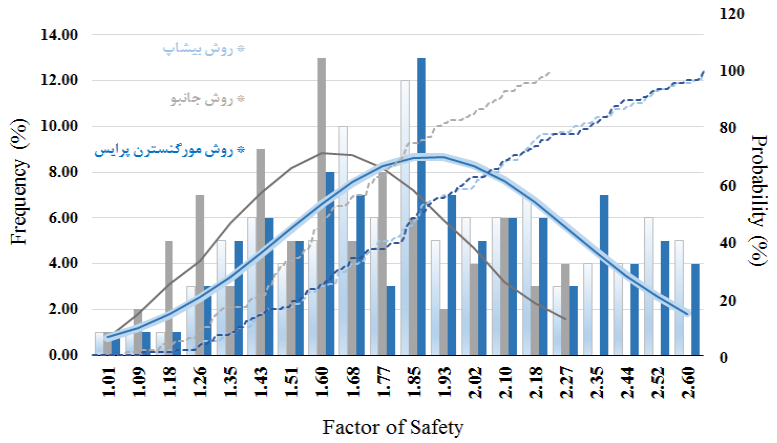
حالت اول: استفاده از شمع در شیروانی برای پایداری

چنانچه از تحلیل شیروانی خاکی در حالت غیرمسلح مشخص شد، ضریب اطمینان پایداری شیروانی غیر مسلح از روش قطعی مورگنسترن برابر با ۱/۲۴۳ بدست آمد و این مقدارکمتر از حداقل ضریب اطمینان پایداری است. در ادامه شیروانی خاکی با تعبیه شمع با فاصله ۳ متری از همدیگر در نیمه بالایی شیروانی مطابق مطالعات پیشین توسط سرخانی در نظر گرفته شد[۲۷]. ضرایب اطمینان از

روش‌های بیشاب، جانبو و مورگنسترن محاسبه گردید. نتایج تحلیل پایداری شیروانی در جدول (۲) آمده است و حاکی از این است که روش‌های بیشاب و مورگنسترن نتایج مشابهی داشته و کمترین ضریب اطمینان مربوط به روش جانبو است که حداقل ضریب اطمینان پایداری در آن تامین شده است. شاخص اعتماد پذیری در روش بیشاب و مورگنسترن بیشتر و احتمال گسیختگی در آنها کمتر است. بعبارت ساده‌تر، به نتایج بیشاب و مورگنسترن اطمینان بیشتری وجود دارد. بنابراین در بررسی سایر حالات صرفاً از روش مورگنسترن استفاده می‌شود. در شکل(۵) مدل‌سازی شیروانی مسلح به روش های بیشاب، جانبو و مورگنسترن به همراه تابع چگالی و تابع تجمعی توزیع نرمال نشان داده شده است. اگر حداقل ضریب اطمینان برای پایداری شیروانی ۱/۵در نظر گرفته شود منحنی تجمعی توزیع نرمال نشان می‌دهد که در روش بیشاب و مورگنسترن با احتمال ۲۰ درصد و پایین‌تر ممکن است ضریب اطمینان ۱/۵ اتفاق بیفتد در حالی که در روش جانبو با احتمال کمتر از ۴۰ درصد ممکن است اتفاق بیفتد و احتمال گسیختگی در روش جانبو بیشتر است. از طرفی نمودار پله-ای توزیع نرمال بیانگر این است که روش مورگنسترن و جانبو با بیشترین تعداد تکرار مساوی، حداکثر ضریب اطمینان خود را بدست آورده‌اند بعبارت دیگر؛ ضریب اطمینان پایین جانبو، احتمال گسیختگی بیشتری نسبت به ضریب اطمینان بالای مورگنسترن دارد. موارد فوق حاکی از قابلیت اعتماد بیشتر روش مورگنسترن نسبت به روش جانبو می‌باشد.

جدول۴ : نتایج تحلیل با بررسی روش‌های تعیین پایداری با درنظر گرفتن شمع

روش	جانبو	بیشاپ	مورگنسترن پرایس
ضریب اطمینان در حالت قطعی	۱/۵۳	۱/۸۲	۱/۸۱
میانگین ضریب اطمینان	۱/۵۹	۱/۸۹	۱/۸۹
شاخص اعتماد پذیری	۱/۷۷	۲/۲۵	۲/۲۲
احتمال گسیختگی(٪)	۳	۱	۱
انحراف معیار ضریب اطمینان	۰/۳۳	۰/۴	۰/۴
حداقل ضریب اطمینان	۰/۸۱	۰/۹۷	۰/۹۶
حداکثر ضریب اطمینان	۲/۲۴	۲/۶۴	۲/۶۴



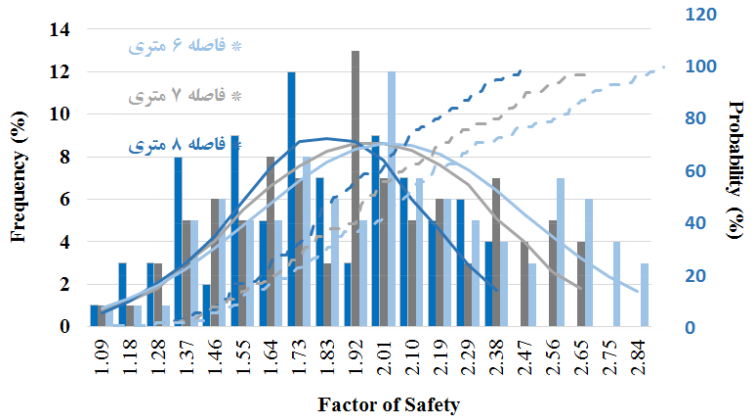
شکل۸ : نمودار تابع چگالی و توزیع نرمال با روش‌های مختلف تعیین پایداری شیب با درنظر گرفتن شمع.

حالت دوم: تاثیر فاصله شمع‌ها از بستر (طول)

در این حالت شمع در فواصل مختلفی از بستر قرار می‌گیرد. در این مقاله فواصل ۶، ۷ و ۸ متر از بستر تعبیه شده و تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد که که هر چه فاصله شمع از بستر بیشتر باشد ضریب اطمینان و شاخص اعتمادپذیری کاهش می‌یابد. فاصله‌گیری شمع از بستر باعث کاهش تصاعدی ضریب اطمینان و شاخص سطح اطمینان می‌شود. چنانچه از جدول ۳ بر می‌آید افزایش فاصله از ۶ به ۷ متری حدوداً ۶/۷ درصد کاهش ضریب اطمینان را نشان می‌دهد در حالی که افزایش فاصله از ۷ به ۸ متری کاهش ۸/۳ درصدی را دارد. احتمال وقوع ضریب اطمینان حداقل پایداری شیروانی و تعداد فراوانی وقوع در بدست آوردن حداکثر ضریب اطمینان در هر سه فاصله از بستر تقریباً یکسان است. مطابق شکل(۶) بطور کلی رفتار توابع توزیع در فواصل مختلف مشابه و صرفاً با تعدیل ضریب اطمینان می‌باشد.

جدول۵ : نتایج تحلیل با بررسی فاصله شمع‌ها از بستر(طول)

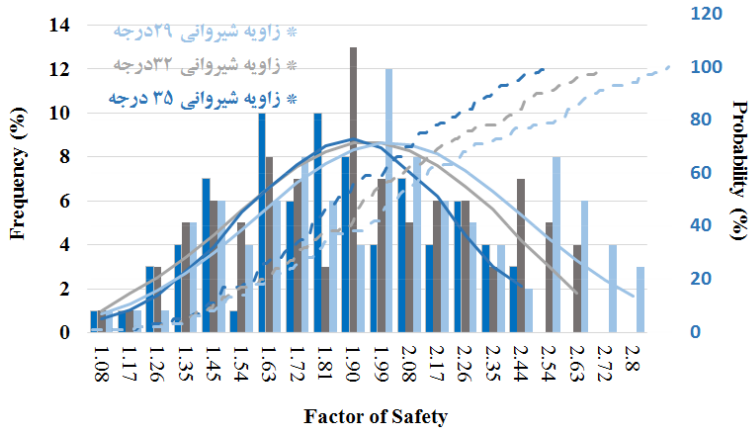
فاصله	۶ متری	۷ متری	۸ متری
ضریب اطمینان در حالت قطعی	۱/۹۴	۱/۸۱	۱/۶۶
میانگین ضریب اطمینان	۲/۰۳	۱/۸۹	۱/۷۴
شاخص اعتماد پذیری	۲/۳۴	۲/۲۲	۲/۰۸
احتمال گسیختگی(٪)	۰	۱	۱
انحراف معیار ضریب اطمینان	۰/۴۴	۰/۴	۰/۳۶
حداقل ضریب اطمینان	۱/۰۴	۰/۹۶	۰/۸۸
حداکثر ضریب اطمینان	۲/۸۸	۲/۶۴	۲/۴۲



شکل۹ : نمودار تابع چگالی و توزیع نرمال شمع‌ها با فواصل مختلف از بستر.

حالت سوم: تاثیر زوایای مختلف شیروانی

زوایای شیروانی در پایداری دیواره شیروانی تاثیر زیادی دارد در جدول(۴) نتایج بررسی زوایای مختلف شیروانی بر پایداری آن نشان داده شده است. افزایش زاویه شیروانی باعث کاهش ضریب اطمینان و شاخص اعتمادپذیری و افزایش احتمال گسیختگی می‌شود. افزایش یک درجه ای زاویه شیروانی باعث کاهش ضریب اطمینان دو درصدی می‌شود و این نسبت برای زوایای مختلف ثابت است. چنانچه در شکل(۷) مربوط به توابع توزیع نشان داده شده است احتمال وقوع ضریب اطمینان حداقلی در هر سه زاویه برابر است، ولی تعداد فروانی وقوع ضریب اطمینان حداکثری در زوایه ۳۲ درجه با فاصله اندک بیشتر از بقیه زوایاست.



شکل۱۰ : نمودار تابع چگالی و توزیع نرمال با زوایای مختلف

جدول۶ : نتایج تحلیل با بررسی زوایای مختلف شیروانی

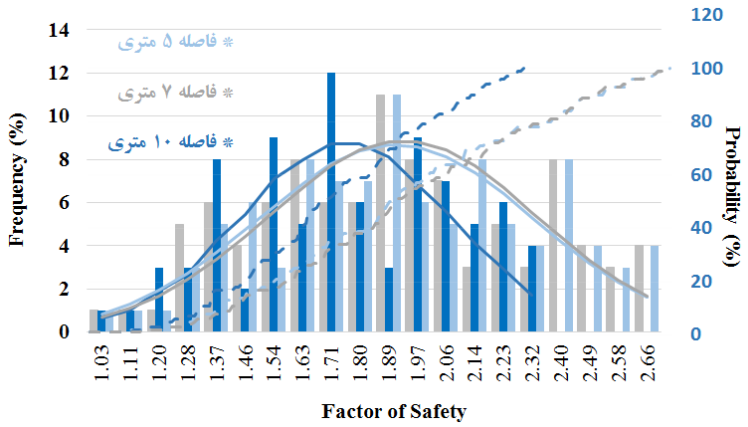
روش	۲۹°	۳۲°	۳۵°
ضریب اطمینان در حالت قطعی	۱/۹۳	۱/۸۱	۱/۷
میانگین ضریب اطمینان	۲/۰۲	۱/۸۹	۱/۷۷
شاخص اعتماد پذیری	۲/۳۳	۲/۲۲	۲/۱۳
احتمال گسیختگی(٪)	۰	۱	۱
انحراف معیار ضریب اطمینان	۰/۴۴	۰/۴	۰/۳۶
حداقل ضریب اطمینان	۱/۰۴	۰/۹۶	۰/۹
حداکثر ضریب اطمینان	۲/۸۵	۲/۶۴	۲/۴۸

حالت چهارم: تاثیر فاصله شمع‌ها از پاشنه شیروانی

فاصله شمع‌ها از پاشنه نیز یکی از عوامل تاثیرگذار در پایداری شیروانی است نتایج تحلیل مونت کارلو مطابق جدول ۵ موید این مطلب است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود هر چه فاصله شمع از پاشنه بیشتر می‌شود ضریب اطمینان و شاخص اعتماد پذیری کاهش می‌یابد و این تاثیر در تغییر فاصله ۵ الی ۷ متر کمتر بوده ولی در تغییر فاصله از ۷ به ۱۰ متر بسیار مشهود است. البته احتمال گسیختگی برای فواصل مختلف یکسان می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد که احتمال وقوع ضریب اطمینان حداقلی در فاصله ۱۰ متری بیشتر از فاصله ۵ و ۷ متری است و فاصله ۵ و ۷ متری رفتار کاملاً مشابهی داشته، بطوری که تفاوتی باهم حتی از نظر تعداد فراوانی وقوع در ضریب اطمینان حداکثری نیز ندارند. بعبارت دیگر؛ با توجه به شرایط شیروانی فاصله شمع از پاشنه از یک حد معین که بر اساس شرایط شیروانی مشخص می‌شود می‌تواند تاثیر بسیار اساسی روی پایداری شیروانی بگذارد.

جدول۷ : نتایج تحلیل با بررسی فاصله شمع‌ها از پاشنه

فاصله	۵ متر	۷ متر	۱۰ متر
ضریب اطمینان در حالت قطعی	۱/۸۴	۱/۸۱	۱/۶۶
میانگین ضریب اطمینان	۱/۹۲	۱/۸۹	۱/۷۴
شاخص اعتماد پذیری	۲/۲۳	۲/۲۲	۲/۰۸
احتمال گسیختگی(٪)	۱	۱	۱
انحراف معیار ضریب اطمینان	۰/۴۱	۰/۴	۰/۳۶
حداقل ضریب اطمینان	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۸۸
حداکثر ضریب اطمینان	۲/۷۲	۲/۶۴	۲/۴۲



شکل۱۱ : نمودار تابع چگالی و توزیع نرمال با فواصل مختلف از پاشنه

۳-۱- محاسبه حداقل شاخص اعتمادپذیری در شیروانی‌ها با در نظر گرفتن اثر لرزه ای

در تحلیل عدم قطعیت در شیروانی‌ها، هدف بدست آوردن حداکثر شاخص اعتماد پذیری یا حداقل احتمال گسیختگی و سطح متناظر با آن است. نکته قابل تامل در تحلیل احتمالاتی شیروانی‌ها که تاکنون کمتر به آن توجه شده، آن است که سطح گسیختگی دارای کمترین ضریب اطمینان، لزوماً دارای کمترین مقدار شاخص اعتمادپذیری یا بیشترین مقدار احتمال گسیختگی نخواهد بود. در بخش حاضر این مسئله بررسی گردیده و در یک مطالعه موردی (شیروانی با شیب ۳۲ درجه، فاصله‌ها از پاشنه ۷ متری، فاصله نوک شمع‌ها از بستر ۷ متری و روش پایداری مورگنسترن با در نظر گرفتن موقعیت مکانی شهر تبریز و بیشینه شتاب لرزه‌ای (PGA) ۰.۲۳g، بزرگای گشتاوری ۷

و ضریب لرزه‌ای g۰.۱۳۶) ، سطح گسیختگی متناظر با کمترین مقدار شاخص اعتمادپذیری، با سطح گسیختگی متناظر با کمترین ضریب ایمنی مقایسه خواهد شد[۲۹].

بطور خلاصه مراحل دست‌یابی به این هدف به شرح ذیل بوده است:

۱- پایداری شیب مورد نظر توسط نرم افزار Geostudio بررسی و ضرایب اطمینان متناظر با تعداد بسیار زیادی سطح لغزش فرضی تعیین شده است. سپس ۲۰ سطح لغزش که متناظر با کمترین ضرایب اطمینان بودند، به ترتیب مقدار این ضریب انتخاب شده‌اند. در این بخش، از روش مورگنسترن- پرایس به منظور تحلیل استفاده شده است.

۲- در مرحله بعد با توجه به انحراف معیار ورودی و فرض تابع توزیع نرمال برای آن‌ها و با استفاده از این توابع توزیع، برای هریک از ۲۰ سطح لغزش مذکور در مرحله ۱ روال ذکر شده به منظور تحلیل عدم قطعیت شیروانی به روش مونت کارلو تکرار خواهد شد.

۳- نتیجه مرحله ۲ استخراج ۲۰ شاخص اعتمادپذیری می‌باشد. در مرحله پایانی، مقدار شاخص اعتمادپذیری و احتمال گسیختگی هر سطح، با سطوح دیگر مقایسه و کمترین مقدار شاخص اعتمادپذیری به عنوان شاخص اعتمادپذیری شیروانی انتخاب گردید.

در جدول (۶) ضرایب اطمینان سطوح مختلف با ذکر شماره سطح لغزش و مقادیر شاخص اعتمادپذیری و احتمال گسیختگی مربوط به آن سطح قید شده است. لازم به ذکر است که شماره سطوح لغزش به ترتیب بحرانی بودن سطوح از دیدگاه قطعی است. بعبارتی سطح لغزش شماره ۱ دارای کمترین ضریب اطمینان بوده و در سطوح بعدی به ترتیب ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. در حالی که بحرانی‌ترین سطح لغزش از دیدگاه احتمالاتی، مربوط به سطح لغزش شماره ۸ می‌باشد که دارای کمترین شاخص اعتمادپذیری(۱/۷۸۷۳) است.

با توجه به طبقه‌بندی منتشر شده توسط انجمن مهندسین ارتش آمریکا[14]، از دیدگاه قابلیت اطمینان شاخص اعتماد پذیری بزرگتر از ۴ به مفهوم قرارگیری شیروانی در جایگاه مناسب و مقادیری بزرگتر از ۳، حالت بالاتر از میانگین و مقادیر کمتر از ۱/۵ ناحیه خطر می‌باشد. با مقایسه مقادیر بدست آمده، مشاهده می‌شود که در تمام حالات مورد بررسی، شاخص اعتمادپذیری بیشتر از ۱.۵ می‌باشد [۳] .

جدول۸ : نتایج تحلیل مونت کارلو برای سطوح لغزش مختلف با روش پایداری مورگنسترن- پرایس

شماره سطح لغزش	ضریب اطمینان قطعی	شاخص اعتمادپذیری	احتمال گسیختگی
۱	۱.۵۵۲	۱.۷۸۹۴	۰.۰۲
۲	۱.۵۵۲	۱.۷۹۳۲	۰.۰۲
۳	۱.۵۵۳	۱.۷۸۷۶	۰.۰۲
۴	۱.۵۵۳	۱.۷۹۹۲	۰.۰۲
۵	۱.۵۵۵	۱.۷۸۸	۰.۰۲
۶	۱.۵۵۶	۱.۸۰۸۱	۰.۰۲
۷	۱.۵۵۹	۱.۷۹۰۵	۰.۰۲
۸	۱.۵۶	۱.۷۸۷۳	۰.۰۲
۹	۱.۵۶۱	۱.۷۹۱۶	۰.۰۲
۱۰	۱.۵۶۱	۱.۸۱۹۲	۰.۰۲
۱۱	۱.۵۶۱	۱.۸۲۱۳	۰.۰۲
۱۲	۱.۵۶۱	۱.۸۲۵۶	۰.۰۲
۱۳	۱.۵۶۲	۱.۷۹۷۲	۰.۰۲
۱۴	۱.۵۶۲	۱.۸۱۹۷	۰.۰۲
۱۵	۱.۵۶۳	۱.۸۳۲۴	۰.۰۲
۱۶	۱.۵۶۴	۱.۸۰۳۹	۰.۰۲
۱۷	۱.۵۶۴	۱.۸۱۹۸	۰.۰۲

[14] US Army Corps of Engineers

۱۸	۱.۵۶۶	۱.۸۴۲۱	۰.۰۲
۱۹	۱.۵۶۷	۱.۸۱۲۸	۰.۰۲
۲۰	۱.۵۶۷	۱.۸۳۴۶	۰.۰۲

۴- نتیجه گیری

در مطالعات ژئوتکنیکی، ثابت در نظر گرفتن مشخصات خاک با جنس غیر یکنواخت ذاتی خاک مغایر است. همین امر باعث بروز خطاها و غیر قابل اعتماد بودن محاسبات می‌گردد که تحت عنوان عدم قطعیت یا عدم قابلیت اعتماد مورد توجه محققین و طراحان قرار گرفته است. با این هدف در این مقاله پایداری شیروانی مسلح با استفاده از روابط قطعی همراه با بررسی شاخص اعتمادپذیری آنان بررسی شده است. در این راستا، یک شیروانی مطابق با یک نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار GeoStudio مدل‌سازی شده و با روش احتمالاتی مونت‌کارلو، عدم قطعیت محاسبات پایداری و شاخص اعتمادپذیری مورد تحلیل قرار گرفت. از روش های قطعی بیشاب، جانبو و مورگسترن برای محاسبه ضریب اطمینان بهره گرفته شده است. تحلیل فوق در چهار حالت برای ارزیابی نقش استفاده از دو ردیف شمع، فاصله شمع‌ها از بستر و پاشنه شیروانی و همچنین نقش زاویه شیروانی در سطح اعتماد و ضریب اطمینان به ازای سطح گسیختگی بحرانی انجام شده است. نتایج زیر حاکی از آنست که:

۱- کمترین مقدار شاخص اعتمادپذیری مربوط به روش جانبو می‌باشد. البته از دیدگاه قطعی نیز، ضریب اطمینان این روش، در مقایسه با روش بیشاپ و مورگنسترن پرایس، دارای مقادیر کمتری می‌باشد.

۲- در بررسی چهار حالت با استفاده از روش مورگنسترن مشخص شد که تعبیه دو ردیف شمع و تبدیل شیروانی غیرمسلح به مسلح باعث افزایش پنجاه درصدی ضریب اطمینان می‌شود.

۳- افزایش فواصل شمع‌ها از بستر باعث کاهش ضریب اطمینان شده و هر چه این فاصله بیشتر می‌شود، نرخ کاهش ضریب اطمینان و شاخص اعتمادپذیری رشد تصاعدی دارد.

٤- افزایش زاویه شیروانی باعث ناپایداری شیروانی شده بطوری که افزایش یک درجه‌ای شیروانی باعث کاهش دو درصدی ضریب اطمینان می‌گردد.

٥- فاصله شمع‌ها از پاشنه شیروانی تا اندازه مشخص تاثیر چندانی در ضریب اطمینان و شاخص اعتماد پذیری ندارد ولی از آن اندازه بالاتر، پایداری شیروانی را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

٦- درحالت تحلیل مونت کارلو برای سطوح لغزش مختلف با روش پایداری مورگنسترن- پرایس و درنظر گرفتن بار لرزه‌ای، مشاهده شد که بحرانی‌ترین شاخص اعتماد پذیری مربوط به سطح لغزش شماره ۸ است و مقدار آن برابر ۱.۷۸۷۳ می‌باشد درحالی که بحرانی‌ترین سطح لغزش از دیدگاه قابلیت اطمینان سطح لغزش شماره ۱ است که دارای شاخص اعتماد پذیری ۱.۷۸۹۴ می‌باشد. این حالت موید این مطلب است که بحرانی‌ترین سطح لغزش از دیدگاه قطعی، الزاما بحرانی‌ترین حالت از دیدگاه احتمالاتی نمی‌باشد.

با مقایسه روش قطعی و احتمالاتی، می‌توان گفت که روش احتمالاتی، اطلاعات بسیار مناسبی از دیدگاه اطمینان‌پذیری از وضعیت شیروانی در اختیار قرار می‌دهد. ممکن است شیروانی از نظر روش قطعی پایدار باشد (ضریب اطمینان بالاتر از ۱/۵) ولی از دیدگاه احتمالاتی، شیروانی در ناحیه متوسط قرار داشته باشد. از اینرو استفاده از روش احتمالاتی در کنار روش قطعی درک واقع بینانه‌ای از وضعیت پایداری شیروانی را تداعی می‌کند و بایستی جزو الزامات تحلیل‌های پایداری قرار گیرد.

منابع

Pourzareh, H., & Naini, A. (2018). *Numerical analysis of the seismic behavior of the pile group in slope and its comparison with the results of physical modeling experiments*. Master's thesis, Imam Khomeini International University.

Mostafavi Moghadam, A., & Ashtiani, M. (2011). *Investigation and comparison of new methods of stabilization of slope in different conditions*. Tehran Study and Planning Center, 39.

Phoon, K. K. (2008). *Reliability -Based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications*, CRC Press.

Metropolis, N. and Ulam,s., (1994). *The Monte Carlo Method*. J. Amer. Stat. Assoc. 44, 335-341

Nassirzadeh Goorchi, R., Amini, M., & Memarian, H.(2019). Assessment of Slope Stabilization Based on Probabilistic Analysis Results (Case Study: Slope Facing Spillway of Kavar Dam in Shiraz). *Journal of Engineering Geology*, 13 (2) :371-398.

Alonso, E. E. (1976). Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. *Geotechnique*, 26(3), 453-472.

Malkawi, A. I. H., Hassan, W. F., & Abdulla, F. A. (2000). Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural safety*, 22(2), 161-187.

El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice. *Can Geotech J*. 39(3):665–83.

Metya, S., Mukhopadhyay, T., Adhikari, S., & Bhattacharya, G. (2017). System reliability analysis of soil slopes with general slip surfaces using multivariate adaptive regression splines. *Computers and Geotechnics*, 87, 212-228.

Fernández, W., Villalobos, S., & King, R. (2018). Probabilistic analysis of slope stability in completely decomposed granite residual soils. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 05-14.

Mazaheri, A. Komasi, M. & Viesi, M. (2020). Numerical Study of Earthdams after Construction and First Impounding (Case Study of Doyraj EarthDam). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 52(1), 222-232

Belew, A.Z., Belay, S.K., Wosenie,M.D., Alemie,N.A.(2022). A comparative evaluation of seepage and stability of embankment dams using GeoStudio and Plaxis models: The Case of Gomit Dam in Amhara Region, Ethiopia. *Jornal of water Conservation Science and Engineering*,7:429-441

Ayob, M., Kasa, A., Sulaiman, M. S., Miniandi, N. D., & Yusoff, A. H. (2019). Slope stability evaluations using limit equilibrium and finite element methods. *Int J Adv Sci Technol*, 28(18), 27-43

Fattahi , H., Shirmohamadi , M., & Ghaedi , H.(2021). Reliability analysis of earth dam using a new hybrid method-A case study. *Journal of the Engineering Geology Association of Iran*, 13 (4),95-110.

Jha, S.K.(2015). Effect of spatial variability of soil properties on slope reliability using random finite element and first order second moment methods, *Indian Geotechnical Journal*, 45: 145-155.

Cao Z., Wang Y., Li D. (2017). Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet. In: *Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis*. Springer, pp 147-167

Liu, L. L., Cheng, Y. M., & Zhang, S. H. (2017). Conditional random field reliability analysis of a cohesion-frictional slope. *Computers and Geotechnics*, 82, 173-186.

Huvaj, N., & Oğuz, E. A. (2018). Probabilistic Slope Stability Analysis: A Case Study. *Sakarya University Journal of Science*, 22(5), 1-1.

Ardalan Akbari, H., Moghadaripour, M. & Rahmani, I. (2011). Reliability analysis of nailed walls using probabilistic Monte Carlo method. In: *2nd Reliability Engineering Conference*. Tehran, 105.

Amel Sakhi,M., Manafi,S.(2014). Static and Pseudo Static Stability Analysis of Soil Slope Reinforced by Geo-Fabric. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 73:87-97.

Sharifi, R. & Madah, M. (2022). Numerical modeling and evaluation of the stability of gables on the threshold of landslide (Case study: Semnan-Kiasar road). *Civil and Project Journal*, 4(6), 47-54.

Amini,M.,(2018). Slope Stability Analysis. Amir kabir university of Technology,352.

Salmasi, F., Norani, B., & Norozi, R. (2019). Slope Stability Analysis and GeoStudio(Slope) software application training. Maravia Publication, 236.

Nasirzadeh, R., & Amini, M. (2018). Stability analysis of earthen slopes. Tehran: Academic Jihad of Amir Kabir University of Technology, 213.

Brandimarte, P. (2014). Handbook in Monte Carlo simulation: applications in financial engineering, risk management, and economics.

Shabakhty, N., Ghaffarpour Jahromi, S., & Ahmadi, R. (2020). Reliability analysis for static stability of reinforced soil. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *52*(10), 2451-2470.

Sarkhani, R. (2017). *Study of pile-stabilized slopes using PIV method*. Thesis is submitted for the degree of Master of Science in Geotechnical Engineering. University of Tabriz, Facuilty of Civil Engineering, Department of Geotechnical Engineering.

Laki rouhani, A. & ghadiri, A. (2015) Seismic stability analysis of sand slope. *A scientific-promotional quarterly in the field of road and transportation*. 23(83), 42-53.

Mehrpouyan, M. Jami, M. Khatib, M. & Sarhaddi, N. (2015). Evaluating the Potential of Occurrence of Earthquake in City of Tabriz. *Journal of Natural Environment Hazards*. 4(5), 45-59. doi: 10.22111/jneh.2015.2474