Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Comparative analysis of probabilistic analysis of slope stability using software Plaxis LE V21, GeoStudio 2024 and Slide2

Seyed Ali Asghari Pari[1]✉

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: asgharipari@bkatu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 December 2025
Accepted 6 May 2026

Keywords:
Probability analysis, slope stability, Plaxis, GeoStudio, safety factor.

ABSTRACT

This study systematically compares probabilistic slope stability analyses performed using three widely used geotechnical engineering software packages: PLAXIS LE V21, GeoStudio 2024 (SLOPE/W module) and Slide2. Probabilistic analysis has emerged as an essential approach for quantifying uncertainties and calculating key metrics such as probability of failure and reliability index, given the critical importance of risk assessment and the inherent uncertainty in soil parameters. This research evaluates the capabilities, accuracy and efficiency of each software package, as well as their respective limitations, by performing identical analyses on three distinct scenarios (homogeneous soil, three-layered soil and pseudo-static conditions) while employing ten common limit equilibrium methods. The results show that, as the complexity of the problem increases, the factor of safety decreases while the probability of failure and discrepancies between the software packages increase. In the homogeneous scenario, the mean factor of safety ranges from 1.35 to 1.55, depending on the method selected, with a failure probability of 8–12%, and inter-software differences of less than 5%. In the layered scenario, the mean factor of safety decreases to 1.30–1.40, with inter-software discrepancies reaching approximately 15%. Under pseudo-static conditions, the mean factor of safety reduces by around 21% (to 1.15), the probability of failure rises to an average of 27%, and the inter-software discrepancies reach 25%. Advanced methods (Morgenstern-Price and Spencer) yield higher safety factors than simple methods (Ordinary/Fellenius). In terms of software performance, Plaxis LE offers the greatest accuracy in complex conditions, GeoStudio provides the most conservative estimates and, thanks to its advanced graphical tools, Slide2 is a suitable option for probabilistic risk assessment.

Introduction

Slope stability analysis is a vital topic in geotechnical engineering, where failure can cause substantial losses. Traditional deterministic methods provide a single factor of safety but often overlook inherent uncertainties in soil parameters and loading. Probabilistic analysis addresses these uncertainties by quantifying risks through metrics like probability of failure (Pf) and reliability index, offering more robust risk assessment. This study systematically compares three popular software tools—PLAXIS LE V21, GeoStudio 2024 (SLOPE/W module), and Slide2 for probabilistic slope stability analysis. It evaluates their capabilities and accuracy, as well as their limitations, to help engineers choose the right tool for the reserch.

Materials and Methods

Three scenarios were analyzed: (1) homogeneous soil with groundwater; (2) three-layered soil with groundwater; and (3) three-layered soil under pseudo-static seismic loading (kh = 0.15). Ten common limit equilibrium methods were applied to each scenario using software. Soil parameter uncertainties (unit weight, cohesion and friction angle) were modelled using normal distributions with a 10% coefficient of variation (COV), based on the literature. Latin Hypercube Sampling generated 1,000 samples per analysis to ensure convergence. Identical geometries, material properties and probabilistic settings were used across all software packages to enable fair comparison.

Results and Discussion

All three software packages reliably performed probabilistic analyses, producing converged results and normally distributed factor of safety outputs after 1,000 samples. In the homogeneous case, the factor of safety (FS) ranged from 1.35 to 1.55, with minimal differences (less than 5%) among the tools. In layered conditions, the mean FS decreased by ~0.15 and discrepancies increased (up to 15%). Pseudo-static loading lowered the mean factor of safety to ~1.15 and increased the average Pf to 27%,

Cite this article: Asghari Pari, A. (2026). Comparative analysis of probabilistic analysis of slope stability using software Plaxis LE V21, GeoStudio 2024 and Slide2. Journal of Engineering Geology, 20 (1), 15-31. https//doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.1018843

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.1018843

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

with maximum differences reaching 25%. Slide2 excelled in terms of advanced visualisation and risk tools, GeoStudio offered an intuitive interface and integration, and PLAXIS LE provided the highest level of accuracy in complex scenarios via its FELA approach. The selection of method significantly affected the results, with the more rigorous methods (e.g. Spencer and Morgenstern-Price) yielding a higher factor of safety than the more simplified ones.

Conclusions

This comparative study confirms that PLAXIS LE V21, GeoStudio 2024 and Slide2 are all capable of conducting accurate probabilistic slope stability analyses. However, each software has its own strengths: Slide2 is ideal for comprehensive risk assessments, GeoStudio is best suited to routine and integrated projects, and PLAXIS LE is optimal for complex, high-precision modelling. Probabilistic approaches outperform deterministic methods in risk management. Engineers should select software based on project complexity and requirements, and ideally cross-validate critical results. The findings provide practical guidance and emphasize the importance of probabilistic analysis in modern geotechnical design.

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰
نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی

تحلیل مقایسه‌ای آنالیز احتمالاتی پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزارهای Plaxis LE V21 ، GeoStudio 2024 و Slide2

سیدعلی اصغری پری[1]✉

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه:asgharipari@bkatu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

کلیدواژه‌ها:
آنالیز احتمالاتی، پایداری شیب، Plaxis LE، GeoStudio، Slide2، ضریب ایمنی، احتمال شکست

چکیده

مقاله حاضر به مقایسه سیستماتیک تحلیل احتمالاتی پایداری شیب با استفاده از سه نرم‌افزار رایج در مهندسی ژئوتکنیک، یعنی Plaxis LE V21، GeoStudio 2024 (ماژول SLOPE/W) و Slide2 می‌پردازد. با توجه به اهمیت ارزیابی ریسک و ماهیت ذاتی عدم قطعیت در پارامترهای خاک، تحلیل احتمالاتی به عنوان رویکردی ضروری برای کمّی‌سازی عدم اطمینان‌ها و محاسبه معیارهایی مانند احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق با اجرای تحلیل‌های یکسان بر روی سه سناریوی مختلف (خاک همگن، خاک سه‌لایه و شرایط شبه استاتیکی) و با استفاده از ۱۰ روش متداول تعادل حدی، قابلیت‌ها، دقت، کارایی و محدودیت‌های هر نرم‌افزار را ارزیابی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پیچیدگی مسئله، ضریب ایمنی کاهش و احتمال شکست و اختلاف بین نتایج نرم‌افزارها افزایش می‌یابد. در سناریوی همگن، میانگین ضریب ایمنی بسته به روش انتخابی بین ۱/۳۵ تا ۱/۵۵، احتمال شکست ۸–۱۲٪ و اختلاف بین‌نرم‌افزاری کمتر از ۵٪ است. در سناریوی لایه‌ای، میانگین ضریب ایمنی به ۱/۳۰–۱/۴۰ کاهش یافته و اختلاف بین‌نرم‌افزاری به حدود ۱۵٪ می‌رسد. در شرایط شبه استاتیکی، میانگین ضریب ایمنی حدود ۲۱٪ کاهش یافته (به ۱/۱۵)، احتمال شکست به میانگین ۲۷٪ افزایش یافته و اختلاف بین‌نرم‌افزاری تا ۲۵٪ گزارش می‌شود. روش‌های پیشرفته (مورگنسترن–پرایس، اسپنسر) ضرایب ایمنی بالاتری نسبت به روش‌های ساده (معمولی/فلنیوس) ارائه می‌دهند. از نظر عملکرد، Plaxis LE دقیق‌ترین نتایج را در شرایط پیچیده دارد، GeoStudio محافظه‌کارانه‌ترین تخمین‌ها را ارائه می‌دهد و Slide2 با ابزارهای گرافیکی پیشرفته، گزینه مناسبی برای ارزیابی ریسک احتمالاتی است.

مقدمه

پایداری شیب‌ها از جمله موضوعات حیاتی در مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی عمران و زمین‌شناسی مهندسی است. شکست شیب می‌تواند منجر به خسارات جانی و مالی قابل توجهی شود. تحلیل پایداری شیب به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که روش‌های تعادل حدی متداول‌ترین آنها هستند. با این حال، این تحلیل‌ها همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه هستند که ناشی از تغییرپذیری ذاتی مصالح خاک و سنگ، عدم قطعیت در بارگذاری‌ها، و خطاهای اندازه‌گیری و مدل‌سازی است. تحلیل احتمالاتی به عنوان یک روش قدرتمند برای کمّی‌سازی این عدم قطعیت‌ها و ارزیابی ریسک مربوط به پایداری شیب ظهور یافته است. این رویکرد امکان محاسبه احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان را فراهم می‌آورد که معیارهای معنادارتری نسبت به ضریب اطمینان قطعی ارائه می‌دهند. با گسترش نرم‌افزارهای تخصصی در حوزه ژئوتکنیک، انتخاب ابزار مناسب برای تحلیل احتمالاتی به یک چالش تبدیل شده است. این مقاله به مقایسه سه نرم‌افزار پرکاربرد در این حوزه می‌پردازد Plaxis LE (که قبلاً با نام Plaxis LE known بود)، GeoStudio (با ماژول SLOPE/W) و Slide2 از شرکت Rocscience. . هر یک از این نرم‌افزارها رویکردها و قابلیت‌های متفاوتی در تحلیل احتمالاتی ارائه می‌دهند که مقایسه سیستماتیک آنها می‌تواند به مهندسان در انتخاب ابزار مناسب کمک تحلیل پایداری شیب به صورت احتمالاتی ریشه در دهه ۱۹۷۰ میلادی دارد، زمانی که محققانی مانندکرنل (Cornell,

استناد: اصغری پری، ع. (۱۴۰۵). تحلیل مقایسه‌ای آنالیز احتمالاتی پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزارهای Plaxis LE V21، GeoStudio 2024 و Slide2. مجله زمین شناسی مهندسی، ۲۰ (۱)، ۳۱-۱۵. https://doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.1018843

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

1971) وهاسوفر و لیند (Hasofer and Lind, 1974) مبانی نظری شاخص قابلیت اطمینان را توسعه دادند. در دهه‌های بعد، با پیشرفت روش‌های محاسباتی مانند روش اولین مرتبه دوم گشتاور (FORM)، روش دومین مرتبه (SOM)، و شبیه‌سازی مونت کارلو، تحلیل احتمالاتی کاربرد گسترده‌تری در مهندسی ژئوتکنیک یافت. در زمینه نرم‌افزارهای تحلیل شیب، Slide2 (که قبلاً با نام Slide شناخته می‌شد) از اولین نرم‌افزارهایی بود که قابلیت تحلیل احتمالاتی را به صورت گسترده مدل کرد. GeoStudio نیز با ماژول SLOPE/W خود از سال‌ها پیش تحلیل احتمالاتی را ارائه داده است. Plaxis LE که از ادغام نرم‌افزارهای Plaxis و LimitState توسعه یافته، رویکرد مدرن‌تری را در تحلیل احتمالاتی ارائه می‌دهد.

از طرفی ضریب ایمنی (Factor of Safety) به عنوان شاخص کلیدی برای ارزیابی آن استفاده می‌شود. در دهه‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای بر تعاریف مختلف ضریب ایمنی، روش‌های سنتی تعادل حدی، تحلیل‌های عددی، روش‌های کاهش مقاومت برشی، و کاربرد یادگیری ماشین انجام شده است. تعاریف متعددی از ضریب ایمنی وجود دارد که نتایج متفاوتی تولید می‌کنند. شیائو و همکاران (Xiao et al., 2018) رویکردی مبتنی بر انرژی تغییر شکل برای محاسبه ضریب ایمنی پیشنهاد کردند که سریع‌تر از روش‌های عددی عمل می‌کند و با روش‌های تعادل حدی سازگار است. همچنین، شیائو و همکاران (Xiao et al., 2024) و آتا و برا (Atta and Bera, 2025) تعاریف مختلف را مقایسه کرده و پیشنهاد می‌کنند از تعریف مبتنی بر نسبت تنش برشی یا انرژی تغییر شکل برای دقت بیشتر استفاده شود. با پیشرفت یادگیری ماشین، پیش‌بینی ضریب ایمنی دقیق‌تر شده است. جینگ و همکاران (Jing et al., 2025) ترکیب تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با شبکه‌های عصبی پس‌انتشار (BPNN) را برای پیش‌بینی FS در شیب‌های معدنی به کار بردند و دقت بالایی نشان دادند. محمودزاده و همکاران (Mahmoodzadeh et al., 2022) تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند رگرسیون فرآیند گاوسی، رگرسیون بردار پشتیبان، و شبکه‌های عصبی عمیق را مقایسه کردند و کارایی برتر این روش‌ها نسبت به رویکردهای سنتی را تأیید نمودند. همچنین، کی و تانگ (Qi and Tang, 2021)، سورانزو و همکاران (Soranzo et al., 2023)، تون و همکاران (Tun et al., 2025)، و آهنگاری نانه‌کاران و همکاران (Ahangari Nanehkaran et al., 2022) کاربرد روش‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی، جنگل تصادفی، و ماشین بردار پشتیبان را در پیش‌بینی FS شیب‌ها بررسی کرده و نتایج مؤثری گزارش دادند. در روش‌های سنتی و عددی، رفتار strain-softening تأثیر قابل توجهی بر کاهش FS دارد و رافیعی رنانی و مارتین (Rafiei Renani and Martin, 2020) مدل‌های کاهش مقاومت برشی با رفتار نرم‌شونده را پیشنهاد کردند که نتایج واقع‌بینانه‌تری نسبت به مدل‌های پلاستیک کامل ارائه می‌دهند. دنگ و همکاران (Deng et al., 2017) روش کاهش مقاومت برشی دوگانه را برای محاسبه جامع FS در روش تعادل حدی معرفی نمودند. در تحلیل‌های به دلیل مقاومت برشی جانبی اضافی سه‌بعدی، ضریب ایمنی معمولاً بالاتر از دوبعدی است، لذا استارک و رافینگ (Stark and Ruffing, 2017) و گریفیتس و مارکز (Griffiths and Marks, 2007) برای دستیابی به سطح ایمنی مشابه تحلیل دوبعدی، حداقل FS بالاتری (مانند ۱/۶ تا ۱/۸ بسته به هندسه) پیشنهاد کردند. مظاهری و همکاران (Mazaheri et al., 2021) در یک مطالعه عددی پارامتریک با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی خاک بر پایداری شیب سدهای خاکی پرداختند. یافته‌های آنان نشان می‌دهد که ضریب اطمینان با چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی رابطه مستقیم و با وزن واحد رابطه معکوس دارد، در حالی که مدول الاستیسیته تأثیر ناچیزی بر پایداری نشان می‌دهد. مطالعات متعددی به مقایسه نرم‌افزارهای مختلف تحلیل پایداری شیب پرداخته‌اند، اما اکثر آنها بر تحلیل‌های قطعی متمرکز بوده‌اند.

آریال (Aryal, 2008) در مطالعه ای، روش‌های تعادل حدی پیاده‌سازی‌شده در نرم‌افزارهای SLOPE/W و SLIDE را با روش اجزای محدود در Plaxis مقایسه کرد. یافته‌های وی نشان داد که روش مورگنسترن-پرایس در حالت عادی تا ۱۴٪ ضریب ایمنی بالاتری نسبت به روش کاهش مقاومت در Plaxis تخمین می‌زند. در مطالعه‌ای دیگر، کونگ و همکاران (Kong et al., 2014) دو نرم‌افزار Plaxis و Geo-Studio را در شرایط بارندگی مقایسه کردند و نشان دادند که روش کاهش مقاومت در Plaxis سطح

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

لغزش واقعی‌تری نسبت به فرض سطح لغزش دایره‌ای در SLOPE/W ارائه می‌دهد. کار و روی (Kar and Roy, 2022) بر تحلیل قابلیت اطمینان شیب‌های رسی متمرکز شدند و با استفاده از Geo-Studio (SLOPE/W) به مقایسه روش زیرمجموعه با روش‌های FOSM، FORM و شبیه‌سازی مونت کارلو پرداختند. نتایج آنان نشان داد که روش زیرمجموعه به ویژه در احتمالات شکست پایین، کارایی و دقت بیشتری دارد.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در نرم‌افزارهای تحلیل پایداری شیب، مهندسان همواره با این سؤال مواجه هستند که کدام نرم‌افزار برای پروژه خاص آنها مناسب‌تر است. این انتخاب زمانی پیچیده‌تر می‌شود که تحلیل احتمالاتی مدنظر باشد، زیرا هر نرم‌افزار از روش‌های مختلفی برای تحلیل احتمالاتی استفاده می‌کند . بعلاوه قابلیت مدلسازی توزیع‌های احتمالاتی مختلف برای پارامترهای ورودی در نرم‌افزارها متفاوت است. از طرفی سرعت محاسبات ، دقت نتایج، قابلیت‌های پیش‌پردازش و پس‌پردازش و نمایش نتایج تحلیل احتمالاتی در نرم‌افزارهای مختلف، متفاوت است. درنهایت هزینه، در دسترس بودن و سهولت استفاده از نرم‌افزارها نیز از عوامل مؤثر در انتخاب هستند.

این تحقیق با هدف پر کردن خلأهای فوق از چند جهت حائز اهمیت است: نخست، با ارائه مقایسه‌ای جامع و به‌روز بین سه نرم‌افزار پرکاربرد Plaxis LE، GeoStudio و Slide2 در حوزه تحلیل احتمالاتی پایداری شیب، شکاف موجود در ادبیات فنی را پر می‌کند. دوم، با تمرکز ویژه بر تحلیل احتمالاتی و استفاده از سناریوهای متنوع، درک بهتری از قابلیت‌ها، دقت و محدودیت‌های هر نرم‌افزار ارائه می‌دهد. در نهایت، نتایج این پژوهش به عنوان راهنمایی عملی، مهندسان ژئوتکنیک رادر انتخاب ابزار مناسب بر اساس نوع پروژه، داده‌های موجود و خروجی مورد نیاز پروژه یاری می‌کند و بر مزایای رویکرد احتمالاتی نسبت به روش‌های قطعی سنتی در ارزیابی ریسک تأکید می‌ورزد.

مواد و روش‌ها

روش‌های مختلف تحلیل پایداری شیب

تحلیل پایداری شیب به روش‌های متعددی انجام می‌شود که عمدتاً بر اساس مفروضات مرتبط با شکل سطح لغزش، توزیع نیروهای داخلی و معادلات تعادل مورد استفاده، دسته‌بندی می‌شوند. درک این روش‌ها و مفروضات اساسی آنها برای تفسیر صحیح نتایج تحلیل احتمالاتی ضروری است. در جدول ۱، مقایسه‌ی روش‌های مختلف تحلیل پایداری شیب آورده شده است.

مروری بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب

تحلیل احتمالاتی پایداری شیب رویکردی ضروری برای مواجهه با عدم‌قطعیت‌های ذاتی در مهندسی ژئوتکنیک است. برخلاف تحلیل‌های قطعی سنتی که یک ضریب اطمینان واحد ارائه می‌دهند، این روش عدم‌قطعیت در پارامترهای ورودی مانند مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، وزن مخصوص، هندسه و شرایط هیدرولوژیکی را به طور صریح مدنظر قرار می‌دهد. این عدم‌قطعیت‌ها ناشی از تغییرپذیری طبیعی مواد خاک، محدودیت‌های آزمایشگاهی و خطاهای اندازه‌گیری است. تحلیل احتمالاتی با تخصیص توزیع‌های آماری (مانند نرمال، لگ‌نرمال یا یکنواخت) به این پارامترها و استفاده از روش‌هایی مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو یا روش هایپرکیوب ، به ارزیابی کمی احتمال شکست و محاسبه شاخص قابلیت اطمینان می‌پردازد. در این چارچوب، تابع عملکرد (Performance Function) که تفاوت بین مقاومت و تنش وارده را بیان می‌کند، مبنای محاسبات قرار می‌گیرد. احتمال شکست، به عنوان احتمال منفی یا صفر شدن این تابع، معیار مستقیم و معناداری از ریسک را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، تحلیل حساسیت که بخشی جدایی‌ناپذیر از این روش است، تأثیر نسبی هر پارامتر متغیر بر احتمال شکست را شناسایی می‌کند و به مهندس در اولویت‌بندی مطالعات و تصمیم‌گیری‌های طراحی آگاهانه کمک می‌نماید. این رویکرد به ویژه در پروژه‌های با پیامدهای شکست بالا یا در شرایطی که داده‌های ژئوتکنیکی محدود هستند، کاربرد حیاتی دارد، زیرا امکان مدیریت ریسک بر پایه‌ای علمی و تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم اطمینان را فراهم می‌سازد. بنابراین، تحلیل احتمالاتی نه تنها به عنوان یک تکمیل‌کننده برای تحلیل قطعی، بلکه به عنوان یک پارادایم ضروری برای طراحی ایمن و اقتصادی شیب‌ها در مهندسی مدرن نگریسته می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

جدول۱. مقایسه‌ای روش‌های تحلیل پایداری شیب

Table 1. Comparison of slope stability analysis methods

نام روش	شکل سطح لغزش	مفروضات کلیدی	معادلات تعادل	دقت	پیچیدگی	کاربرد معمول
معمولی/فلنیوس	فقط دایره‌ای	صفر بودن تمام نیروهای بین المانی	فقط گشتاور	بسیار پایین	بسیار ساده	تخمین اولیه و سریع
ساده‌شده بیشاپ	فقط دایره‌ای	صفر بودن نیروهای برشی بین المانی	گشتاور + نیروی قائم	بالا	ساده	روش استاندارد برای سطوح دایره‌ای
ساده‌شده جانبو	غیردایره‌ای	صفر بودن نیروهای برشی بین المانی	نیروی افقی + قائم	متوسط (نیاز به تصحیح)	متوسط	تحلیل اولیه سطوح غیردایره‌ای
اسپنسر	دایره‌ای و غیردایره‌ای	ثابت بودن زاویه نیروهای بین المانی	کامل (نیرو + گشتاور)	بسیار بالا	پیچیده	تحلیل‌های دقیق و پروژه‌های مهم
سپاه مهندسین #۱	غیردایره‌ای	موازی بودن نیروهای بین المانی با شیب زمین	نیروی عمود بر شیب	متوسط	ساده	تخمین سریع برای سطوح غیردایره‌ای
سپاه مهندسین #۲	غیردایره‌ای	افقی بودن نیروهای بین المانی	نیروی قائم	متوسط	ساده	تخمین سریع برای سطوح غیردایره‌ای
لو-کارافیات	غیردایره‌ای	میانگین زاویه شیب زمین و سطح لغزش	نیروی افقی + قائم	متوسط	ساده	تخمین سریع برای سطوح غیردایره‌ای
مورگنسترن-پرایس	دایره‌ای و غیردایره‌ای	استفاده از تابعی برای تغییرات زاویه نیروها	کامل (نیرو + گشتاور)	عالی (جامع‌ترین)	بسیار پیچیده	پژوهش‌های پیشرفته و پروژه‌های بسیار حساس
سارمای ساده	مستطیلی	نادیده گرفتن نیروهای بین المانی	نیروی افقی + قائم	پایین	ساده	تخمین مقدماتی بسیار سریع

نرم افزار های تحلیل احتمالاتی پایداری شیب

نرم افزار پلاکسیس (Plaxis LE, 2024) با ادغام قابلیت‌های تحلیل المان محدود تعادل حدی (FELA) ارائه می‌دهد و از روش‌های پیشرفته‌ای مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو و FORM برای تحلیل احتمالاتی استفاده می‌کند. این نرم‌افزار دقت بالایی در مسائل پیچیده دارد و قابلیت درنظرگیری همبستگی بین متغیرها را فراهم می‌آورد. رابط آن نسبتاً پیچیده است اما نتایج بسیار دقیقی تولید می‌کند، به‌ویژه برای پروژه‌هایی که نیاز به تحلیل‌های پیشرفته و یکپارچه با دیگر مدل‌های المان محدود دارند.

ماژول SLOPE/W نرم افزار ژئواستدیو (GeoStudio, 2024) بخشی از مجموعه‌ای یکپارچه است که با ماژول‌هایی مانند SEEP/W برای جریان آب ارتباط کامل دارد. تحلیل احتمالاتی آن عمدتاً بر پایه شبیه‌سازی مونت‌کارلو است و کتابخانه‌ای غنی از روش‌های تعادل حدی سنتی ارائه می‌دهد. رابط کاربری آن بسیار شهودی و آموزش آن آسان است، که آن را به گزینه‌ای محبوب برای مهندسان با سطوح مختلف تجربه تبدیل کرده است. تمرکز اصلی آن بر یکپارچگی تحلیل‌های مختلف ژئوتکنیکی است.

Slide2 که توسط شرکت راک ساینس (Rocscience, 2025) توسعه یافته، تخصصی‌ترین نرم‌افزار در حوزه تحلیل احتمالاتی و ریسک پایداری شیب به شمار می‌رود. این نرم‌افزار طیف گسترده‌ای از روش‌ها شامل مونت‌کارلو، FORM، SORM و حتی تحلیل ریسک کمی را پوشش می‌دهد. ابزارهای تجسم پیشرفته‌ای مانند نقشه‌های کانتور احتمال شکست ارائه می‌کند و در شبیه‌سازی‌های بزرگ بسیار کارآمد است. برای پروژه‌هایی که ارزیابی ریسک دقیق و جامع اولویت اصلی است، انتخاب ایده‌آلی محسوب می‌شود.

تحلیل قابلیت اطمینان

تحلیل احتمالاتی پایداری شیب، عدم قطعیت‌های ذاتی در پارامترهای ژئوتکنیکی (مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی)

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

را به‌طور صریح در ارزیابی وارد می‌کند. در این روش، پارامترهای ورودی به‌جای مقادیر قطعی، با توابع توزیع احتمال (نرمال یا لوگ‌نرمال) مدل می‌شوند. با استفاده از روش‌هایی مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو، هزاران یا میلیون‌ها محاسبه تکرارشده انجام می‌گردد. در هر تکرار، مقادیر پارامترها به‌صورت تصادفی از توزیع‌هایشان نمونه‌برداری و ضریب اطمینان مربوطه محاسبه می‌شود. خروجی این تحلیل، توزیع احتمالی خود ضریب اطمینان است که مبنای محاسبه معیارهای مهمی مانند «احتمال شکست» (نسبت حالاتی که ضریب اطمینان کمتر از ۱ است) یا «شاخص قابلیت اطمینان» می‌باشد. رابطه بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان در جدول ۲ خلاصه شده است.تغییرپذیری خاک را می توان با استفاده از ضریب تغییرات (COV)، که نسبت انحراف استاندارد به محتمل ترین مقدار پارامتر است، کمی سازی کرد. این اندازه گیری به عنوان یک شاخص تغییرپذیری پارامتر عمل می کند.

جدول ۲. روابط بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان

Table 2. Relationship between probability of failure and reliability index

Reliability Index	Probability of failure	Performance level
1	0.16	Hazardous
1.5	0.023	Unsatisfactory
2	0.0027	Poor
2.5	0.0006	Below average
3	0.0001	Above average
4	3×10^{-5}	Good

محققین بسیاری ضریب تغییرات (COV) را به عنوان شاخص تغییرپذیری در پارامترهای خاک برجسته کرده اند. ضریب تغییرات (COV) وزن واحد در انواع مختلف خاک طبق مطالعات متعددی از جمله مطالعات دانکن (Duncan, 2000) از ۳٪ تا ۱۲٪ گزارش شده است.. علاوه بر این، لومب (Lumb, 1974) و لاکاس و ندیم (Lacasse and Nadim, 1996) ضریب تغییرات را برای چسبندگی مصالح بین ۵ تا ۱۳ درصد گزارش کردند. همانطور که لومب (Lumb,1974) گزارش کردند، ضریب تغییرات (COV) زاویه اصطکاک برای انواع مختلف خاک از ۵٪ تا ۱۵٪ متغیر است. این بینش ها بر اهمیت در نظر گرفتن تنوع در پارامترهای خاک هنگام ارزیابی پایداری شیب و ویژگی های ژئوتکنیکی تأکید می کند. بر این اساس، در این تحقیق مقدار ضریب تغییرات برای وزن واحد و زاویه اصطکاک و چسبندگی مصالح سد برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است که در جدول ۳ به تفصیل شرح داده شده است. همچنین، توزیع نرمال با فاصله ۳ انحراف استاندارد در دو طرف میانگین برای همه متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. مشخصات مصالح و پارامترهای احتمالاتی آنها

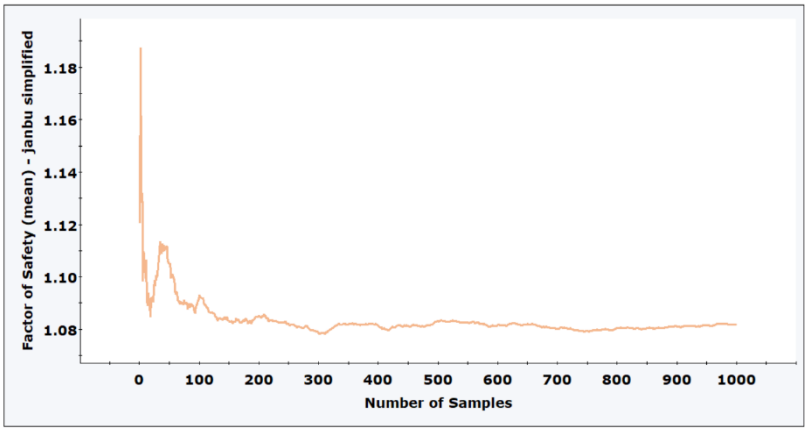
Table 3. Characteristics of materials and their probabilistic parameters

#	NAME	PROPERTY	DISTRIBUTION	MEAN	STD. DEV.	REL. MIN	REL. MAX
TOP LAYER	Material 1	Phi	Normal	30	3	9	9
		Unit Weight	Normal	20	2	6	6
MIDDEL LAYER	Material 2	Cohesion	Normal	15	1.5	4.5	4.5
		Phi	Normal	30	3	9	9
		Unit Weight	Normal	19.5	1.95	5.85	5.85
BOTTOM LAYER	Material 3	Cohesion	Normal	30	3	9	9
		Phi	Normal	35	3.5	10.5	10.5
		Unit Weight	Normal	22	2.2	6.6	6.6

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

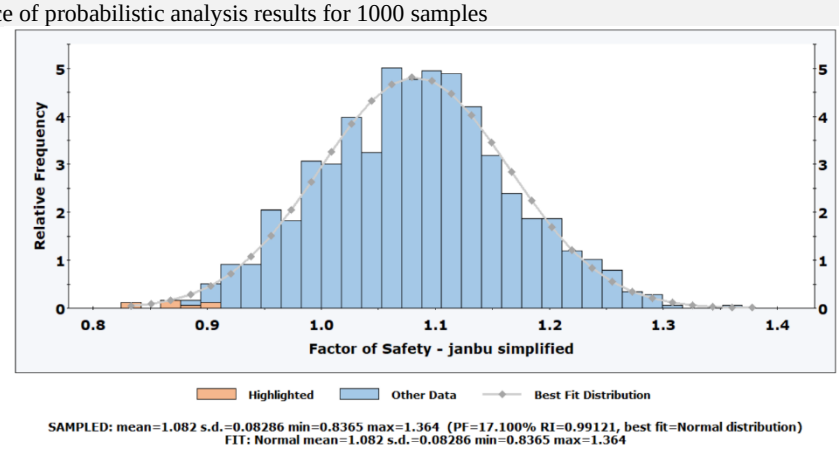
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

برای تولید نمونه‌هایی از متغیرهای ورودی بر اساس توزیع احتمال آن‌ها، از روش نمونه‌گیری هایپرکیوب لاتین استفاده شد و ۱۰۰۰ نمونه به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که ۱۰۰۰ نمونه برای محاسبه ضریب همگرایی ایمنی کافی است (شکل ۱). همچنین نتایج نشان می دهد که بهترین توزیع حاکم بر مقادیر ضریب ایمنی، توزیع نرمال است (شکل۲) نمودار همگرایی در شکل ۱ نشان می‌دهد که میانگین ضریب ایمنی پس از حدود ۴۰۰ نمونه به مقدار پایدار تقریبی ۱/۴۲ رسیده و نوسانات آن به حداقل می‌رسد. این نشان می‌دهد که انتخاب ۱۰۰۰ نمونه برای تحلیل احتمالاتی کافی و معتبر بوده و نتایج از همگرایی مناسب برخوردار هستند. تعداد نمونه‌های بیشتر تغییر محسوسی در میانگین نهایی ایجاد نمی‌کند. هیستوگرام توزیع ضریب ایمنی در شکل ۲ نشان می‌دهد که داده‌ها از توزیع نرمال با میانگین حدود ۱/۴۲ و انحراف معیار ۰/۱۵ پیروی می‌کنند. این تطابق با فرض توزیع نرمال برای پارامترهای ورودی، صحت روش‌شناسی تحقیق را تأیید می‌کند. دامنه تغییرات ضریب ایمنی بین ۱/۰ تا ۱/۸نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه عدم قطعیت‌های پارامترهای خاک بر پایداری شیب است.



شکل ۱. همگرایی نتایج آنالیز احتمالاتی برای ۱۰۰۰ نمونه

Fig. 1. Convergence of probabilistic analysis results for 1000 samples



شکل ۲. توزیع حاکم بر ضریب ایمنی(توزیع حاکم بر روش جانبو بعنوان نمونه)

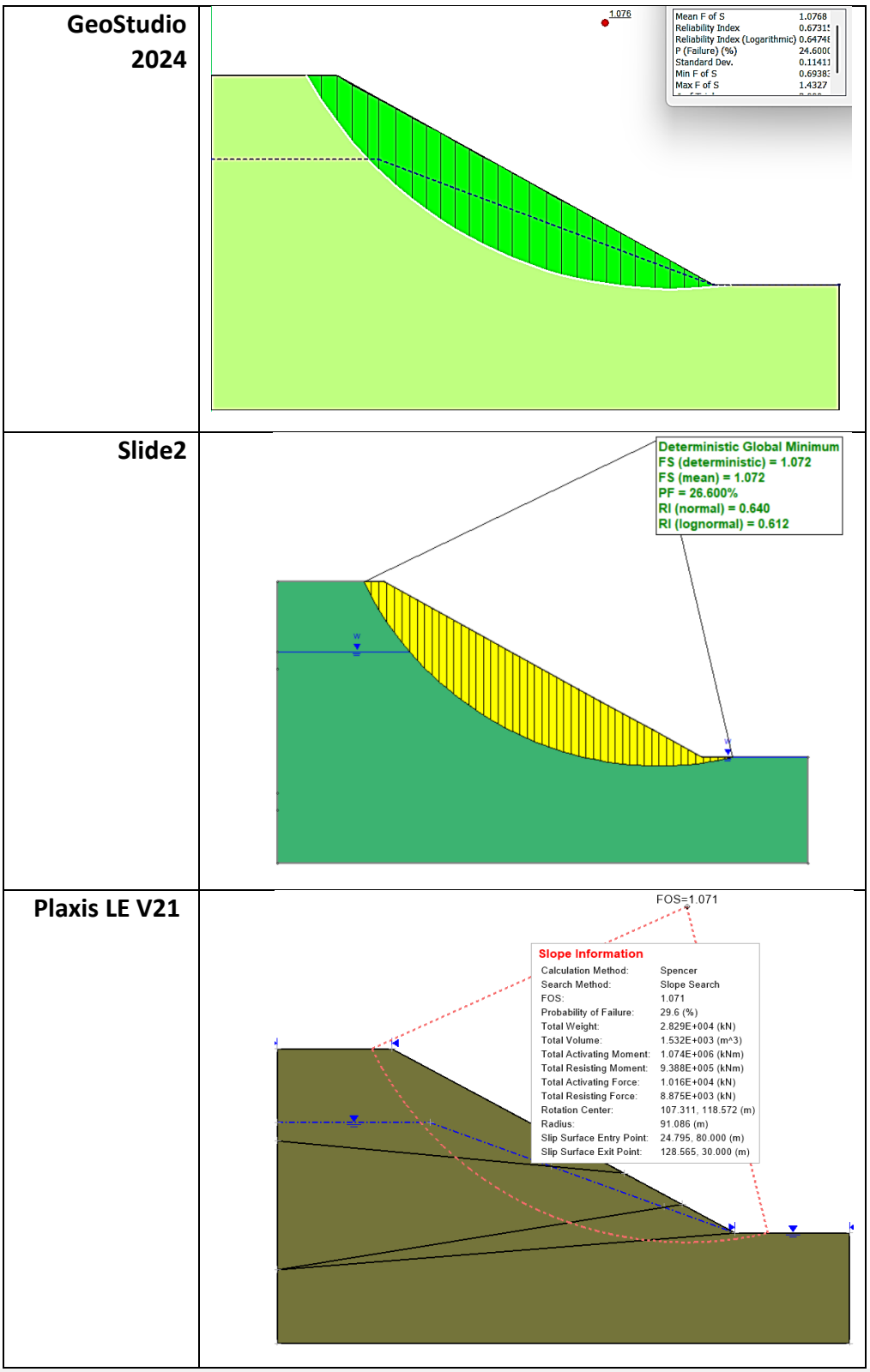
Fig. 2. The distribution governing the safety factor (the distribution governing the Janbo method, for sample)

نتایج

سناریوی اول خاک همگن با وجود آب زیر زمینی

در این سناریو فرض شده تمام شیب از یک جنس خاک (Material 2) است. با استفاده از هر سه نرم افزار آنالیز پایداری شیب برای ۱۰ روش مختلف انجام شده است. یک نمونه از نتایج هر سه نرم افزار برای روش اسپنسر در شکل ۳ آمده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که هر سه نرم‌افزار سطوح لغزش بحرانی مشابهی را برای خاک همگن شناسایی کرده‌اند. مقادیر احتمال شکست محاسبه شده در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]



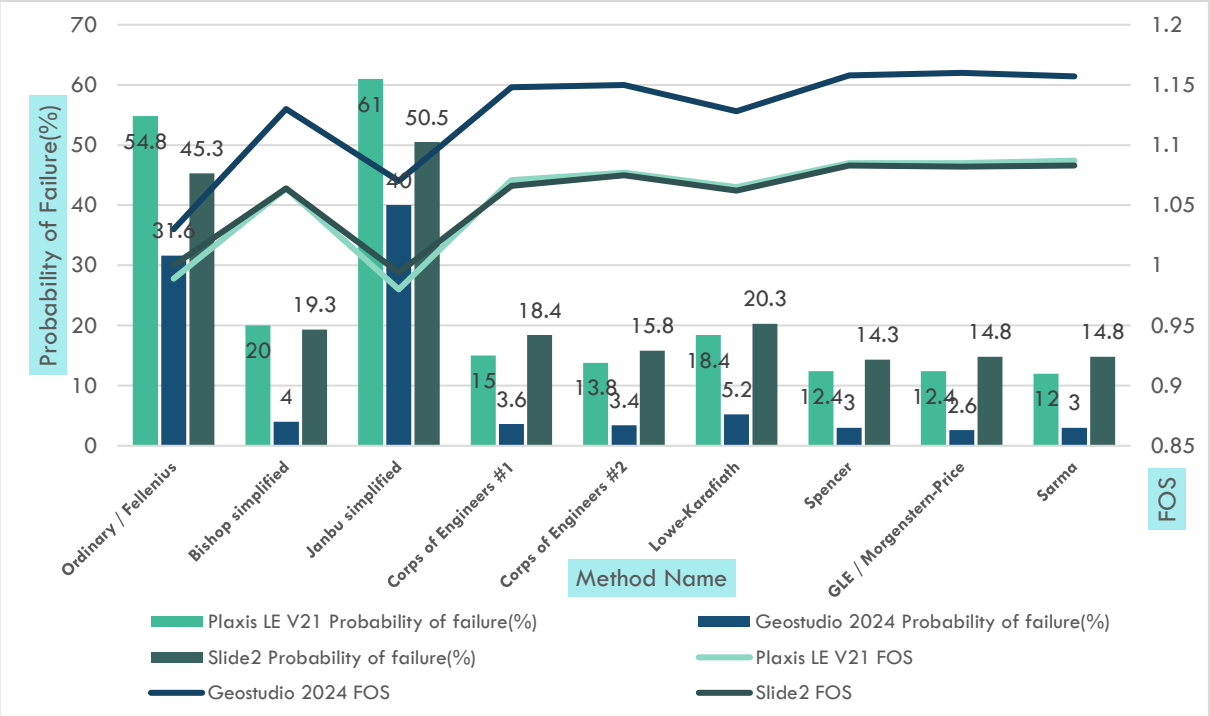
شکل ۳. نتایج آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت خاک همگن در سه نرم افزار (روش اسپنسر بعنوان نمونه)

Fig. 3. The results of probabilistic analysis of slope stability in the case of homogeneous soil in three software (Spencer's method as an example)

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

محدوده ۸-۱۲٪ قرار دارد Slide2 .با نمایش کانتورهای احتمالی پیشرفته، جزئیات بیشتری از توزیع احتمال شکست ارائه می‌دهد . Plaxis LE دقت بیشتری در مدلسازی تعادل حدی با المان محدود نشان داده است GeoStudio .ساده‌ترین خروجی را ارائه می‌دهد اما مقادیر اصلی را به درستی گزارش می‌کند. شکل ۴ یک نمودار میله‌ای مقایسه‌ای را نمایش می‌دهد که نتایج ۹ روش مختلف تحلیل پایداری شیب را برای حالت خاک همگن در سه نرم‌افزار Plaxis LE، GeoStudio و Slide2 مقایسه می‌کند. محورهای عمودی نشان‌دهنده مقدار ضریب ایمنی و احتمال خرابی و محور افقی روش‌های مختلف تحلیل را فهرست کرده است. نتایج شکل ۴ نشان می دهد که میانگین ضریب ایمنی در تمام روش‌ها بین ۱/۳۵تا ۱/۵۵ قرار دارد و بیشترین تطابق بین نرم‌افزارها در روش‌های اسپنسر و مورگنسترن-پرایس مشاهده می‌شود از طرفی کمترین تطابق در روش معمولی/فلنیوس دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان می دهد که روش‌های ساده‌تر (معمولی، سارمای ساده) کمترین ضریب ایمنی را گزارش می‌کنند و روش‌های پیشرفته‌تر (مورگنسترن-پرایس، اسپنسر) بالاترین ضرایب ایمنی را نشان می‌دهند که این روند منطبق با تئوری است زیرا روش‌های پیشرفته‌تر مفروضات واقع‌بینانه‌تری در نظر می‌گیرند. مقایسه نرم‌افزارها نشان می دهد که در حالت شیب همگن، Plaxis LE در بیشتر روش‌ها بالاترین ضریب ایمنی را گزارش کرده است و GeoStudio در اکثر موارد کمترین مقدار را نشان داده است در حالیکه Slide2 معمولاً نتایجی بینابینی ارائه داده است



شکل ۴. نتایج کامل آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت خاک همگن در سه نرم افزار

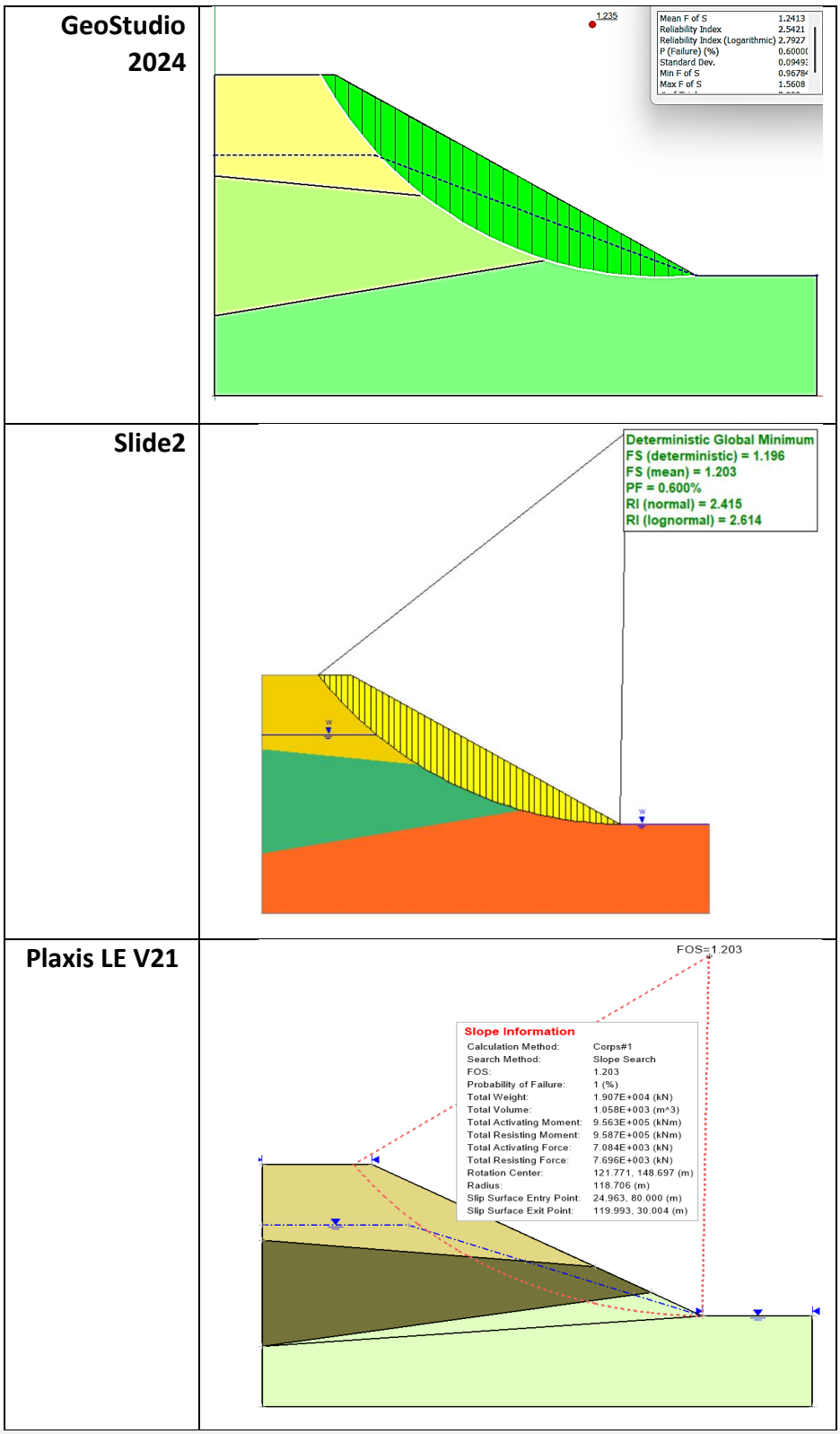
Fig. 4. Full results of probabilistic analysis of slope stability in the case of homogeneous soil in three software

سناریوی دوم

خاک در این سناریو بصورت سه لایه با شرایط وجود آب زیر زمینی بررسی شده است.با استفاده از هر سه نرم افزار آنالیز پایداری شیب برای ۱۰ روش مختلف انجام شده و یک نمونه از نتایج هر سه نرم افزار برای روش سپاه مهندسین #۱ (Corps of Engineers #1)در شکل ۵ آمده است.

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]



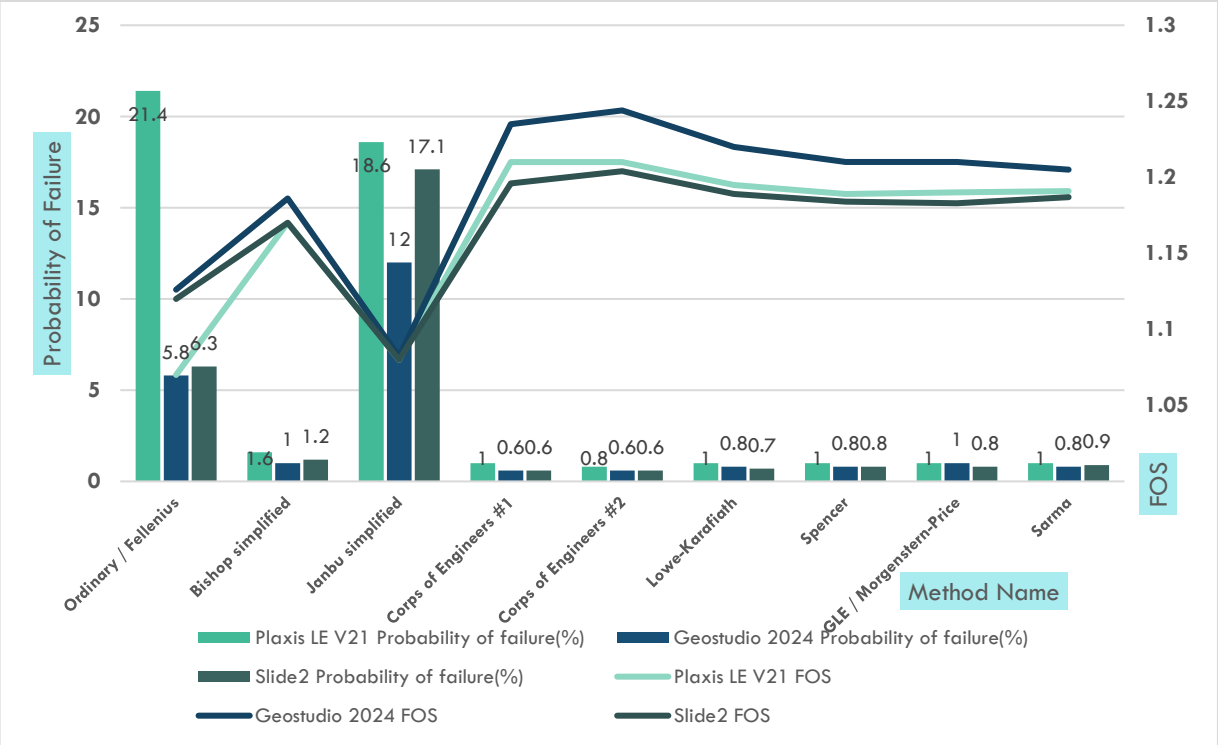
شکل ۵. نتایج آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت خاک لایه ای در سه نرم افزار (روش سپاه مهندسین ۱، بعنوان نمونه)

Fig. 5. The results of probabilistic analysis of slope stability in the case of layered soil in three software (Corps of Engineers #1, as an example)

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

شکل ۶ یک نمودار میله‌ای گروه‌بندی‌شده را نمایش می‌دهد که نتایج ۱۰ روش مختلف برای خاک سه‌لایه را مقایسه می‌کند. هر گروه شامل سه میله برای نرم‌افزارهای مختلف است. رنگ‌های مختلف نشان‌دهنده نرم‌افزارهای متفاوت هستند. نتایج نشان می دهد که میانگین ضریب ایمنی نسبت به حالت خاک همگن حدود ۰/۱۵ واحد کاهش یافته است و این کاهش نشان‌دهنده تأثیر منفی شرایط لایه‌ای بر پایداری است در حالیکه بیشترین کاهش در روش‌های ساده‌تر مشاهده می‌شود. بررسی شکل ۶ نشان از افزایش اختلاف بین نرم‌افزارها دارد بطوریکه اختلاف بین نتایج نرم‌افزارها در شرایط لایه‌ای بیشتر شده است و حداکثر اختلاف به ۰/۲۵ واحد ضریب ایمنی رسیده است که این افزایش نشان‌دهنده چالش‌های مدلسازی شرایط لایه‌ای است. در این سناریو روش سپاه مهندسین #۱ و #۲ عملکرد بهتری نسبت به حالت همگن نشان می‌دهند و روش جانبو (ساده و اصلاح‌شده) حساسیت بیشتری به شرایط لایه‌ای نشان می‌دهند. نتایج نشان می دهد که Plaxis LE با رویکرد المان محدود بهترین عملکرد را در شرایط لایه‌ای نشان داده است در حالیکه Slide2 نیز نتایج قابل قبولی ارائه داده اما حساسیت کمتری به تغییرات لایه‌ای نشان داده است. نرم افزار GeoStudio بیشترین کاهش را در ضرایب ایمنی گزارش کرده که ممکن است نشان‌دهنده محافظه‌کاری بیشتر باشد



شکل ۶. نتایج کامل آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت خاک لایه ای در سه نرم افزار

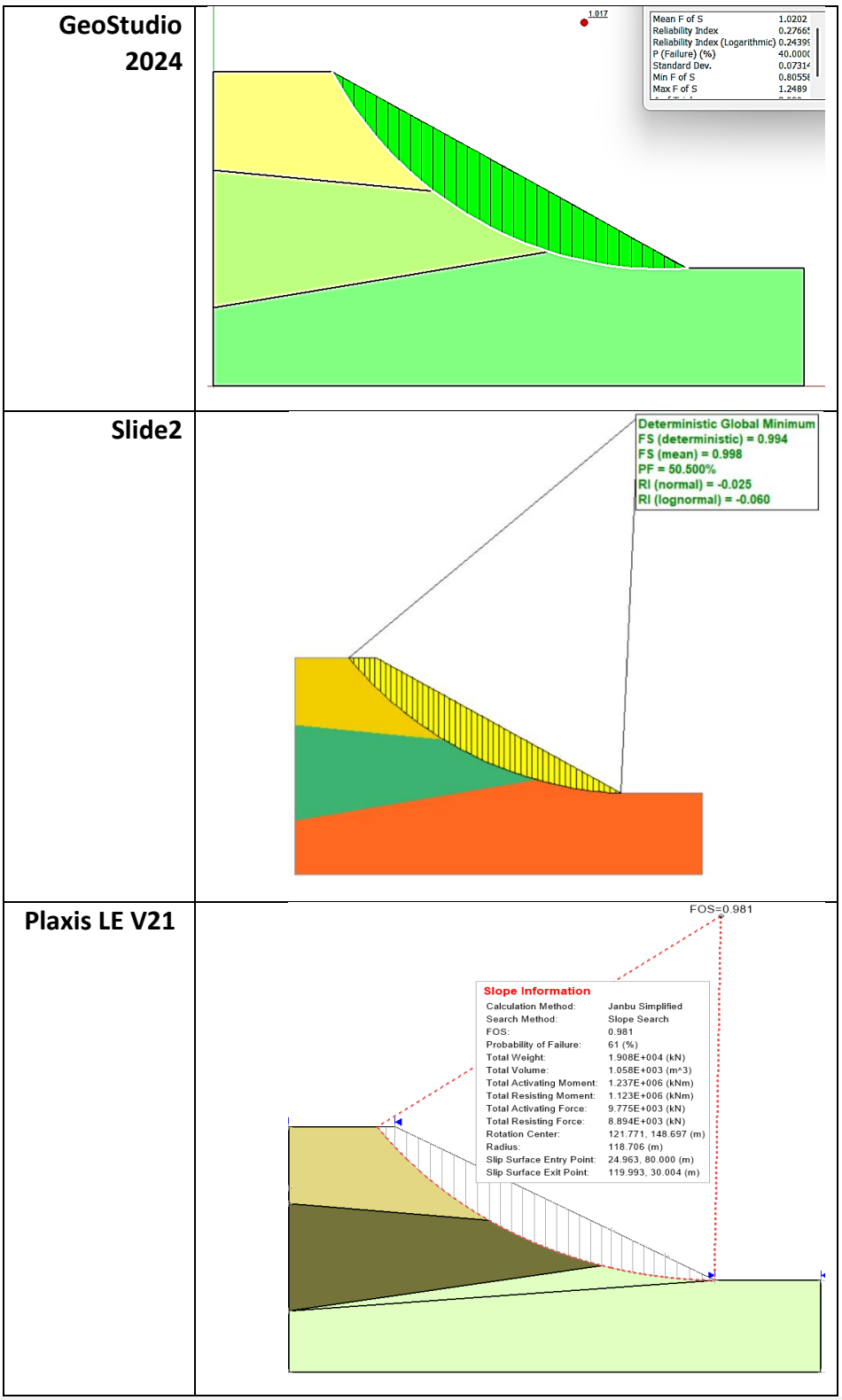
Fig. 6. Full results of probabilistic analysis of slope stability in layered soil condition in three software

سناریوی سوم

خاک در این سناریو بصورت سه لایه بصورت شبه استاتیکی با ضریب افقی ۰/۱۵ بررسی شده است.با استفاده از هر سه نرم افزار آنالیز پایداری شیب برای ۹ روش مختلف انجام شده و یک نمونه از نتایج هر سه نرم افزار برای روش جانبو در شکل ۷ آمده است.

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]



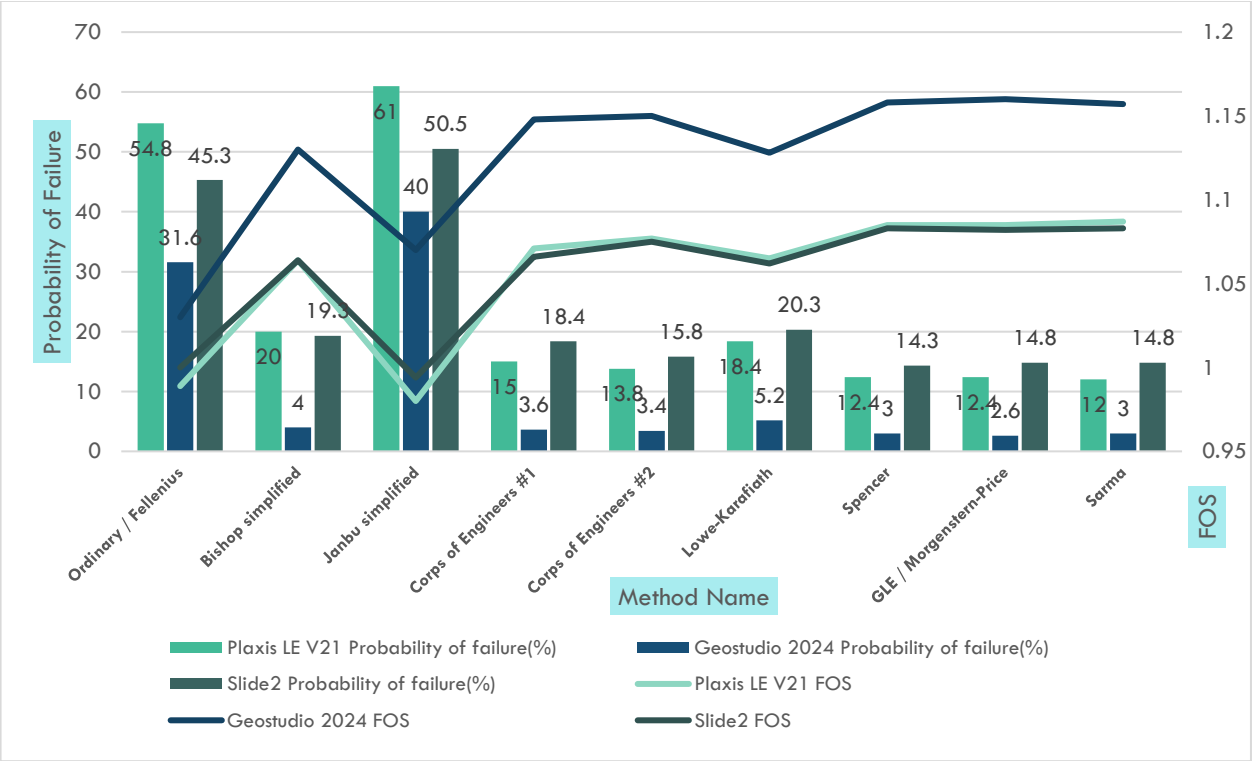
شکل ۷. نتایج آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت خاک لایه ای و آنالیز شبه استاتیکی در سه نرم افزار (روش جانبو، بعنوان نمونه)

Fig. 7. The results of probabilistic analysis of slope stability in the case of layered soil and quasi-static analysis in three software (Janbu method, as an example)

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

شکل ۸ نموداری ترکیبی است که هم ضرایب ایمنی و هم احتمال شکست را برای شرایط شبه استاتیکی نمایش می‌دهد. تأثیر چشمگیر بارگذاری شبه استاتیکی در نتایج مشهود است بطوریکه میانگین ضریب ایمنی به ۱/۱۵کاهش یافته است (کاهش ۲۰/۷٪ نسبت به حالت همگن) و احتمال شکست به طور متوسط به ۲۷٪ افزایش یافته است که این تغییرات نشان‌دهنده حساسیت زیاد پایداری شیب به بارهای دینامیکی است. نتایج همچنین نشان می دهد که روش‌های مختلف پاسخ متفاوتی به بارگذاری شبه استاتیکی نشان داده‌اند بطوریکه روش‌های مبتنی بر تعادل کامل نیروها (اسپنسر، مورگنسترن-پرایس) نتایج پایدارتری دارند و روش‌های ساده‌تر نوسانات بیشتری نشان می‌دهند. مقایسه نرم افزار ها نشان می دهد که در این سناریو، Plaxis LE با قابلیت‌های پیشرفته مدلسازی دینامیکی، دقیق‌ترین نتایج را ارائه داده است در حالیکه Slide2 نیز عملکرد خوبی داشته اما در برخی روش‌ها نتایج محافظه‌کارانه‌تری گزارش کرده است و از طرفی GeoStudio در تحلیل شبه استاتیکی بیشترین اختلاف را با دو نرم‌افزار دیگر نشان داده است.



شکل ۸. نتایج کامل آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت خاک لایه ای در سه نرم افزار (شبه استاتیکی)

Fig. 8. Full results of probabilistic analysis of slope stability in layered soil condition in three software (pseudo-static)

بحث

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر سه نرم‌افزار قابلیت انجام تحلیل احتمالاتی پایداری شیب را با دقت قابل قبولی دارند، اما هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را نشان می‌دهند. بطوریکه Slide2 به عنوان تخصصی‌ترین نرم‌افزار در این حوزه، کامل‌ترین مجموعه ابزارهای تحلیل احتمالاتی و ریسک را ارائه می‌دهد. قابلیت‌های پیشرفته نمایشی مانند نقشه‌های کانتور احتمال شکست، تحلیل نتایج را تسهیل می‌کند. همچنین، کارایی محاسباتی بالا در شبیه‌سازی‌های بزرگ و سرعت بالا از مزایای اصلی این نرم‌افزار است. از طرفی GeoStudio با رابط کاربری شهودی و یکپارچگی با ماژول‌های دیگر (مانند SEEP/W برای تحلیل جریان آب)، برای پروژه‌های معمولی و کاربران با تجربه کمتر مناسب‌تر است. اگرچه قابلیت‌های پیشرفته کمتری نسبت به دو نرم‌افزار دیگر دارد، اما برای بیشتر کاربردهای عملی کافی است. در نهایت Plaxis LE با رویکرد ترکیبی المان محدود و تعادل حدی (FELA)، دقیق‌ترین نتایج را در مسائل پیچیده ارائه می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

قابلیت درنظرگیری همبستگی بین متغیرها و مدلسازی دقیق رفتار خاک از مزایای اصلی این نرم‌افزار است، اگرچه زمان تحلیل طولانی‌تر و نیاز به تخصص بیشتر از معایب آن محسوب می‌شود. همگرایی نتایج پس از ۱۰۰۰ نمونه و تطابق توزیع نرمال ضریب ایمنی با فرضیات اولیه، صحت روش‌شناسی تحقیق را تأیید می‌کند. ضریب تغییرات ۱۰٪ برای پارامترهای خاک، که بر اساس مطالعات پیشین انتخاب شده، نماینده‌ای مناسب از تغییرپذیری طبیعی خاک‌ها است.

از طرفی نتایج حاصل از این تحقیق با یافته‌های مطالعات پیشین مقایسه شده است. آریال (Aryal, 2008) در تحقیق خود، دو نرم‌افزار مبتنی بر تعادل حدی (SLOPE/W وSLIDE) را با نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis مقایسه نمود. وی گزارش کرد که روش مورگنسترن-پرایس در حالت عادی تا ۱۴٪ ضریب ایمنی بالاتری نسبت به تحلیل اجزای محدود در Plaxis تخمین می‌زند . یافته‌های تحقیق حاضر نیز این روند را تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که در سناریوی خاک همگن، Plaxis LE در بیشتر روش‌ها بالاترین ضریب ایمنی را نسبت به دو نرم‌افزار دیگر گزارش کرد. وبالم (Wubalem, 2022) در مطالعه‌ای جامع، روش‌های مختلف تعادل حدی را با یکدیگر مقایسه کرد و نشان داد که روش‌های اسپنسر، مورگنسترن-پرایس و سارما به دلیل ارضای کامل معادلات تعادل ایستایی، نتایج قابل اعتمادتری نسبت به روش‌های ساده‌تر ارائه می‌دهند .این نتیجه با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت کامل دارد، زیرا در هر سه سناریوی مطالعه شده (همگن، لایه‌ای و شبه استاتیکی)، روش‌های پیشرفته (مورگنسترن-پرایس و اسپنسر) کمترین اختلاف بین‌نرم‌افزاری و پایدارترین نتایج را نشان دادند، در حالی که روش معمولی/فلنیوس بیشترین اختلاف را گزارش کرد. کار و روی (Kar and Roy, 2022) تحلیل قابلیت اطمینان شیب رسی را با استفاده از روش‌هایFOSM ، FORM، شبیه‌سازی مونت کارلو و روش زیرمجموعه (Subset Simulation) در محیط صفحه گسترده انجام دادند و نتایج را با نرم‌افزار GeoStudio (SLOPE/W) اعتبارسنجی کردند. یافته‌های آنان نشان داد که روش شبیه‌سازی مونت کارلو، به دلیل استحکام و سادگی، عملکرد بهتری در محاسبه احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان دارد. در تحقیق حاضر نیز از روش شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ نمونه و نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین استفاده شد که همگرایی مناسب نتایج (پس از حدود ۴۰۰ نمونه) نشان‌دهنده کارایی این رویکرد است. همچنین، استفاده از نرم‌افزار GeoStudio در تحقیق حاضر برای اعتبارسنجی متقابل نتایج، رویکردی مشابه با مطالعه کار و روی دارد. علاوه بر این، مستندات فنی شرکت روسینس (Rocscience, 2025) نیز تأکید می‌کند که روش اسپنسر و مورگنسترن-پرایس برای شرایط پیچیده از جمله بارگذاری لرزه‌ای و مصالح لایه‌ای ایده‌آل هستند، نکته‌ای که در نتایج تحقیق حاضر در سناریوی شبه استاتیکی (کاهش ۲۰.۷٪ ضریب ایمنی و افزایش احتمال شکست به ۲۷٪) به وضوح مشهود است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه مقایسه‌ای جامع، عملکرد سه نرم‌افزار پیشرو در حوزه تحلیل احتمالاتی پایداری شیب را در شرایط مختلف ژئوتکنیکی مورد ارزیابی قرار داد. یافته‌های کلیدی تحقیق را می‌توان در محورهای زیر خلاصه کرد:

۱. اعتبار روش‌شناسی تحلیل احتمالاتی: نتایج نشان داد که استفاده از ۱۰۰۰ نمونه با روش نمونه‌گیری هایپرکیوب لاتین برای دستیابی به همگرایی در ضرایب ایمنی کافی است. توزیع نرمال حاکم بر نتایج ضریب ایمنی، صحت فرضیات اولیه در مدلسازی پارامترهای ورودی را تأیید می‌کند.

۲. تأثیر پیچیدگی شرایط بر نتایج:

- در خاک همگن، اختلاف نتایج بین نرم‌افزارها ناچیز (تقریبا ۵٪) و حاکی از تطابق مناسب بود.
- در خاک لایه‌ای، اختلاف به حدود ۱۵٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده حساسیت روش‌های مختلف به مدلسازی رفتار بین لایه‌ها است.
- در شرایط شبه استاتیکی، بیشترین اختلاف (۲۵٪) مشاهده شد که اهمیت انتخاب روش و نرم‌افزار مناسب برای تحلیل دینامیکی را برجسته می‌سازد.

۳. مقایسه عملکرد نرم‌افزارها:

- Slide2: به عنوان تخصصی‌ترین نرم‌افزار، کامل‌ترین مجموعه ابزارهای تحلیل احتمالاتی و ریسک را همراه با کارایی محاسباتی

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

بالا و نمایش گرافیکی پیشرفته ارائه می‌دهد. این نرم‌افزار برای پروژه‌های حساس و نیازمند ارزیابی دقیق ریسک، گزینه بهینه است.

- GeoStudio: با رابط کاربری شهودی، یکپارچگی عالی با ماژول‌های دیگر (مانند SEEP/W) و هزینه معقول، برای پروژه‌های معمولی، تحلیل‌های اولیه و کاربران با سطوح تجربی مختلف مناسب‌تر است.

- Plaxis LE: با رویکرد ترکیبی المان محدود و تعادل حدی (FELA)، بالاترین دقت را در مسائل پیچیده و شرایط مرزی نامتعارف ارائه می‌دهد. اگرچه زمان تحلیل طولانی‌تر و نیاز به تخصص فنی بیشتری دارد، اما برای پروژه‌های تحقیقاتی و طراحی‌های با حساسیت بالا بی‌نظیر است.

۴. اهمیت انتخاب روش تحلیل: تفاوت تا ۳۰٪ در نتایج حاصل از روش‌های مختلف تحلیل (مانند مقایسه روش معمولی با مورگنسترن-پرایس)، لزوم انتخاب آگاهانه روش مناسب بر اساس پیچیدگی مسئله و دقت مورد نیاز را نشان می‌دهد. روش‌های پیشرفته‌تر در شرایط پیچیده نتایج قابل اعتمادتری تولید می‌کنند.

۵. نتایج کاربردی پژوهش:

بر اساس یافته‌های این مطالعه، توصیه‌های زیر برای مهندسان ژئوتکنیک ارائه می‌شود:

- برای پروژه‌های معمولی و خاک همگن، نرم‌افزار GeoStudio با روش اسپنسر یا مورگنسترن-پرایس به دلیل سادگی و هزینه مناسب توصیه می‌شود.

- برای پروژه‌های لایه‌ای با حساسیت متوسط، Slide2 با قابلیت نمایش کانتورهای احتمال شکست گزینه ایده‌آل است.

- برای پروژه‌های حساس و پیچیده (سدهای بزرگ، مناطق لرزه‌خیز)، Plaxis LE به دلیل دقت بالای محاسباتی پیشنهاد می‌گردد.

- برای اعتبارسنجی نتایج، استفاده همزمان از دو نرم‌افزار متفاوت توصیه می‌شود.

- در شرایط شبه استاتیکی، حتماً از روش‌های تعادل کامل نیرو (اسپنسر یا مورگنسترن-پرایس) استفاده شود.

تأکید نهایی بر این است که تحلیل احتمالاتی نه یک گزینه تکمیلی، بلکه یک ضرورت در طراحی ایمن و اقتصادی سازه‌های خاکی در جهان پرعدم‌قطعیت امروز است، زیرا ضریب ایمنی قطعی به تنهایی قادر به کمّی‌سازی ریسک نیست.

References

Ahangari Nanehkaran, Y., Pusatli, T., Chengyong, J., Chen, J., Cemiloglu, A., Azarafza, M., & Derakhshani, R. (2022). Application of machine learning techniques for the estimation of the safety factor in slope stability analysis. Water, 14(22), 3743. https://doi.org/10.3390/w14223743

Aryal, K. P. (2008). Differences between LE and FE methods used in slope stability evaluations. In 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) (pp. 1-6).

Atta, J., & Bera, A. K. (2025). Slope safety factor (FoS): decoding definitions through analogical discussion. Natural Hazards. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07606-4

Cornell, C.A. (1971). First-order uncertainty analysis of soils deformation and stability. Proceedings of the First International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Hong Kong.

Deng, D. P., Li, L., & Zhao, L. H. (2017). Limit equilibrium method (LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique. Journal of Mountain Science, 14(11), 2310–2322. https://doi.org/10.1007/s11629-017-4537-2

Duncan, J.M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4), 307-316.

GeoStudio 2024 User's Guide (2024). Geo-Slope International Ltd. Calgary, Canada.

Griffiths, D. V., & Marquez, R. M. (2007). Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. Géotechnique, 57(6), 537–546. https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.537

Hasofer, A.M., & Lind, N.C. (1974). Exact and invariant second-moment code format. Journal of the Engineering Mechanics Division, 100(1), 111-121.

Jing, Y., Li, Y., Chang, J., Liu, Z., Ni, Z., Wang, Q., & Gao, D. (2025). Factor of safety prediction for slope stability using PCA and BPNN in Guangdong's H mining area. Scientific Reports, 15, 12804. https://doi.org/10.1038/s41598-025-95498-6

Kar, S. S., & Roy, L. B. (2022). A comparative study on reliability analysis of cohesive soil slope using subset simulation and other methods. U.Porto Journal of Engineering, 8(2), 109-118. https://doi.org/10.24840/2183-6493_008.002_0011

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]

Kong, Y. F., Zhou, M. J., Song, E. X., Yang, J., Zhang, L. Y., Shi, H. G., & Liu, J. (2014). Slope stability analysis considering rainfall using PLAXIS software. Journal of Hydraulic and Water Transport Engineering, (3), 70-76.

Lacasse, S., & Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterising soil properties. Proceedings of Uncertainty in the Geologic Environment, ASCE, 49-75.

Lumb, P. (1974). Application of statistics in soil mechanics. In Soil Mechanics: New Horizons, Elsevier, London.

Mahmoodzadeh, A., Mohammadi, M., Ali, H. F. M., Ibrahim, H. H., Abdulhamid, S. N., & Nejati, H. R. (2022). Prediction of safety factors for slope stability: comparison of machine learning techniques. Natural Hazards, 111(2), 1771–1799. https://doi.org/10.1007/s11069-021-05115-8

Mazaheri, A., Paknahad, M., & Alipour, R. (2021). Examination the effect of soil parameters on earth dam slope stability in ABAQUS software. Journal of Hydraulic Structures, 7(3), 23-32. https://doi.org/10.22055/jhs.2021.37701.1178

Plaxis LE Reference Manual (2024). Bentley Systems. Exton, PA, USA.

Qi, C., & Tang, X. (2021). Evaluation and prediction of slope stability using machine learning approaches. Frontiers of Structural and Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/s11709-021-0742-8

Rafiei Renani, H., & Martin, C. D. (2020). Factor of safety of strain-softening slopes. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.04.037

Rocscience Slide2 User's Guide. (2025). Toronto, Canada.

Soranzo, E., Guardiani, C., Chen, Y. R., Wang, Y. T., & Wu, W. (2023). Convolutional neural networks prediction of the factor of safety of random layered slopes by the strength reduction method. Acta Geotechnica, 18(6), 3391–3402. https://doi.org/10.1007/s11440-022-01783-3

Stark, T. D., & Ruffing, D. G. (2017). Selecting minimum factors of safety for 3D slope stability analyses. In J. Huang, G. A. Fenton, L. Zhang, & D. V. Griffiths (Eds.), Geotechnical Special Publication (GSP 283, pp. 259–266). ASCE.

Tun, S. H., Zeng, C., & Jamil, F. (2025). Prediction of slope stability based on five machine learning techniques approaches: a comparative study. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 8, 224. https://doi.org/10.1007/s41939-025-00808-0

Wubalem, A. (2022). Comparison of different limit equilibrium methods for slope stability analysis. Geology, Ecology, and Landscapes, 6(4), 293-303. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17083.44324

Xiao, S. G., Guo, W. D., & Zeng, J. X. (2018). Factor of safety of slope stability from deformation energy. Canadian Geotechnical Journal, 55(2), 296–302. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0527

Xiao, S., Dai, T., & Li, S. (2024). Review and comparative analysis of factor of safety definitions in slope stability. Geotechnical and Geological Engineering. https://doi.org/10.1007/s10706-024-02793-6

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

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1018843]