



Probabilistic slope stability analysis of side wall of river under water level changes and correlation of soil random variables

Reyhaneh Haghghi¹ , Amir Malekpour Estalaki² , Mehdi Esmaeili Varaki³

¹ MSc graduated of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: rhaghighip@yahoo.com

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: malekpour@gilan.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: esmaeili@gilan.ac.ir

ABSTRACT

Considering the effect of uncertainty of random geotechnical variables, the slope stability analysis of the earthen side wall of the river were carried out in the current study taking into account the correlation between the internal friction angle and the cohesion of the soil using copulas. Additionally, the changes of water level in the river and the effect of different limit equilibrium methods on the slope stability analysis were investigated in a case study at four cross-sections of Shalmanrood in Guilan province of Iran. In this regard, a computer program was developed in MATLAB. The results showed that Frank copula and the Morgenstern-Price limit equilibrium method are appropriate for determining the probability distributions of the safety factor of the river wall. The factors of safety obtained from different limit equilibrium methods showed that the normal distribution function has a better fit to the results compared to the GEV distribution function. Decreasing the water level in the river, the value of safety factor decreases and the highest rate of decrease in the safety factor occurs when the water level declines by 20 percent from the maximum level. The rate of decrease in the safety factor diminishes as the water level drawdown changes from 20 to 40 percent.

Keywords: Copula, GeoStudio software, Limit equilibrium, Reliability, River engineering, Uncertainty

Article Type: Research Article

Article history: Received: 06 September 2023 Revised: 23 November 2023 Accepted: 30 December 2023 ePublished: 30 December 2023

1. Introduction

Stability analysis of earthen slopes has many applications in civil engineering among which the stability of earthen sloping walls of roads, the side walls of rivers, and the earthen dams are important. The earthen sloping walls of rivers are usually subjected to instability and failure caused by various factors such as floods, changes in the river water level, and hydrostatic and hydrodynamic forces. Among the mentioned factors, the change in the water level of the river has shown a significant effect on the seepage, the increased pore water pressure, and the instability of the side wall of the river. So, the increase in pore water pressure is considered as an important factor for the beginning of failure in earthen slopes (Wu et al., 2021). In investigating the stability of the earthen slopes of the rivers, the role of hydraulic and geotechnical variables as the factors of creating uncertainty in analyzes and their correlations are important from the viewpoint of increasing accuracy and reducing uncertainty in the obtained results, which is considered in the current study.

2. Methodology

The uncertainty and correlation of the random soil properties including the internal friction angle and the cohesion of the river sloping wall were investigated at four cross-sections of Shalmanrood river in Guilan province of Iran. To this end, a computer code was developed in MATLAB and five copula functions were applied to the soil properties and the calculated correlations and distributions were compared using Akaike and Bayesian information criteria to determine the best copula. Then in GeoStudio software, using three limit equilibrium methods including Bishop, Spencer and Morgenstern-Price, the slope stability was approximated. The distributions of factor of safety were obtained for three scenarios of water level including the maximum observed level and the water level decline by 20 and 40 %.

3. Results and discussion

For the maximum water level in the river cross-section 1 (on behalf of the four studied section), the distribution of factor of safety was shown in the Figures (1) and is obtained in the range of 1.4-3.6 using the limit equilibrium method.

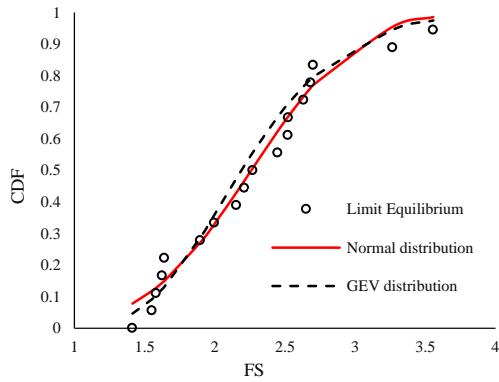


Figure 1. Distribution of the factor of safety for maximum water level in river section 1

By decreasing the water level by 20%, the factor of safety changes to 1.2-1.9 (Figure 2) and declining the water level by 40%, the range is obtained 1.06-2.8 (Figure 3).

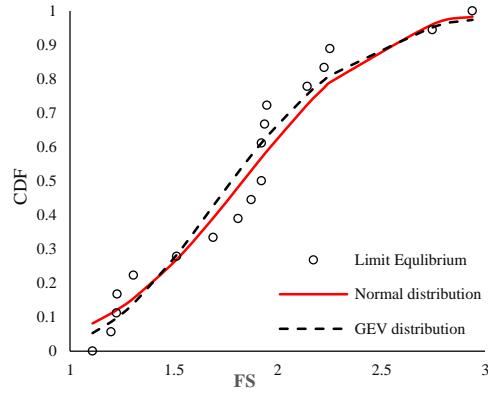


Figure 2. Distribution of the factor of safety for water level decline by 20% in river section 1

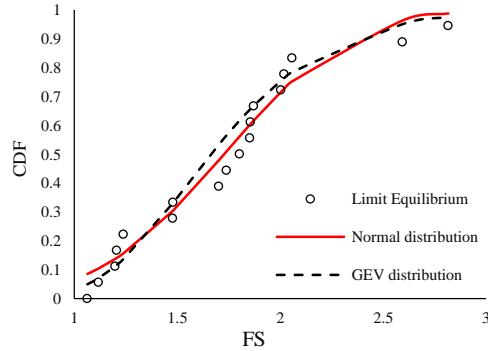


Figure 3. Distribution of the factor of safety for water level decline by 40% in river section 1

The same trends of decreasing the factor of safety by the water level decline in the river are observed in three other cross-sections. For the maximum river water level in cross-section 1, the maximum error of normal and GEV distributions were obtained equal to 7.8 and 11.4%, respectively. In addition, the error of normal and GEV distributions for water level decline by 20% were 13.4% and 13.6% respectively. Finally, the error of 9% and 14.5% were obtained for the water level decline by 40% for the normal and GEV, respectively. It is observed that normal distribution offers better performance for all water levels and the errors of both distributions increase with water level decline. This trend is also observed in the all studied cross-sections.

4. Conclusions

The performance of the Morgenstern-Price method compared to other limit equilibrium methods is not affected by the variations of the water level in the river and always offers acceptable results. Three limit equilibrium methods used (Bishop, Spencer, and Morgenstern-Price) provide similar results at lower values of the factor of safety (with lower cumulative probability, CDF). Frank copula is the best function to model the correlation of random variables affecting the studied sloping walls of the river. The highest rate of change in factor of safety is observed for the water level decline by 20%.

5. References

- Wu, D., Wang, Y., Zhang, F., & Qiu, Y. (2021). Influences of pore-water pressure on slope stability considering strength nonlinearity. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/8823899>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors express their gratitude to the vice-chancellor of research and technology of University of Guilan for the support provided to advance this research.

Cite this article: Haghghi, R., Malekpour Estalaki, A., & Esmaeili Varaki, M. (2023). Probabilistic slope stability analysis on side wall of river under water level changes and correlation of soil random variables, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 41-60. DOI: 10.22126/atwe.2024.10154.1073

Publisher: Razi University

© The Author(s).





فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

شایا الکترونیکی: ۴۹۶۴-۲۷۸۳

وبگاه نشریه: <https://atwe.razi.ac.ir>



تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه در شرایط تغییرات سطح آب و همبستگی متغیرهای تصادفی خاک

ریحانه حقیقی^۱, امیر ملکپور اسطلکی^۲, مهدی اسمعیلی ورکی^۳

^۱ دانشآموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: rhaghhighip@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: malekpour@guilan.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: esmaeili@guilan.ac.ir

چکیده

تحلیل پایداری شیب‌های خاکی در مسائل مهندسی مربوط به بررسی خاکریز جاده‌ها، جداره رودخانه‌ها و شیب‌های بالادست و پایین‌دست سدهای خاکی حائز اهمیت است. با توجه به تأثیر عدم قطعیت و مقادیر تصادفی متغیرهای ژئوتکنیکی مؤثر بر پایداری شیب خاکی جداره رودخانه و وجود همبستگی میان این متغیرها، در تحقیق حاضر از تحلیل احتمالاتی مشترک متغیرهای تصادفی دارای همبستگی (در این تحقیق، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک) با کاربرد تابع کاپولا در بررسی پایداری این شیب‌های خاکی استفاده شد. همچنین در انجام تحلیل‌ها تأثیر تغییرات تراز سطح آب رودخانه و تأثیر کاربرد روش‌های تعادل حدی مختلف در تعیین پایداری شیب در قالب یک مطالعه موردنی در چهار مقطع از رودخانه شلمان رود استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام تحلیل‌های احتمالاتی یک برنامه رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. نتایج نشان داد که تابع کاپولا فرانک و روش تعادل حدی مورگنسترن-پرایس ابزار مناسبی در انجام تحلیل احتمالاتی به منظور تعیین توزیع احتمال ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی جداره رودخانه می‌باشد. بررسی توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان به دست آمده از روش‌های مختلف تعادل حدی نشان داد که تابع توزیع نرمال در مقایسه با تابع توزیع مقادیر حدی GEV برازش بهتری بر نتایج دارد. با کاهش تراز آب در رودخانه، مقادیر ضریب اطمینان کاهش می‌یابد که بیشترین نرخ کاهش ضریب اطمینان در تغییر از تراز سطح آب حداقل به ازای ۲۰ درصد کاهش سطح آب رخداده و کاهش ضریب اطمینان به ازای کاهش سطح آب از ۲۰ به ۴۰ درصد با نرخی کمتر ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تعادل حدی، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان، کاپولا، مهندسی رودخانه، نرم‌افزار Geostudio

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۵ شهریور ۱۴۰۲ اصلاح: ۰۲ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۹ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۹ دی ۱۴۰۲

استناد: حقیقی، رء، ملکپور اسطلکی، اء، و اسمعیلی ورکی، م، (۱۴۰۲). تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه در شرایط تغییرات سطح آب و همبستگی متغیرهای تصادفی خاک، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، (۳)، ۴۱-۶۰، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10154.1073



© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

تجزیه و تحلیل پایداری شیب‌های خاکی کاربردهای فراوانی در مهندسی عمران دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی پایداری دیواره خاکی جاده‌ها، جداره رودخانه‌ها و سطوح شیب‌دار سدهای خاکی اشاره نمود. در صورت تخریب این شیب‌ها، پیامدهایی همچون اختلال در سیستم‌های حمل و نقل جاده‌ای، خسارت به سازه‌های واقع بر روی شیب‌های خاکی مجاور رودخانه‌ها، ورود حجم زیاد رسوابات به بستر رودخانه و کاهش قابلیت انتقال آب و همچنین خسارت‌های جانی و مالی ناشی از تخریب سدهای خاکی محتمل است. علاوه بر این، شیب‌های خاکی جداره رودخانه‌ها همواره در معرض ناپایداری و گسیختگی ناشی از عوامل مختلفی از قبیل سیل، تغییرات سطح آب رودخانه و نیروهای هیدرولیک و هیدرودینامیک می‌باشند. در میان عوامل مذکور، مسئله تغییر سطح آب رودخانه‌ها تأثیر مستقیم بر پدیده نشت، افزایش بار آبی و فشار آب منفذی و درنتیجه ناپایداری جداره خاکی رودخانه داشته است، به طوری که افزایش فشار آب منفذی به عنوان عامل مهم و مقدمه‌ای بر آغاز گسیختگی این شیب خاکی تلقی می‌گردد (وو و همکاران،^۱ ۲۰۲۱). در بررسی پایداری شیب‌های خاکی رودخانه‌ها، نقش متغیرهای هیدرولیکی و ژئوتکنیکی به عنوان عوامل ایجاد عدم قطعیت در تحلیل‌ها و اعمال همیستگی و اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، از منظر افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت در نتایج به دست آمده حائز اهمیت است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با توجه به اهمیت تحلیل پایداری شیب‌های خاکی در بسیاری از مسائل مرتبط با مهندسی عمران، تاکنون محققان زیادی مطالعات خود را بر این حوزه معطوف نموده‌اند. در این راستا، لین و گریفتیس^۲ (۲۰۰۰) تأثیر پایین‌افتدگی ناگهانی تراز سطح آب در دو حالت افت سریع و آهسته را بر پایداری شیب خاکی به کمک روش اجزا محدود مورد بررسی قراردادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که احتمال لغزش شیب به طور مستقیم با ضریب تغییرات مقاومت بر شیب زهکشی نشده خاک مرتبط است. بخشندۀ امنیه و همکاران (۱۳۹۱) تحلیل پایداری شیب خاکی را با استفاده از روش‌های تعادل حدی، نرم‌افزار Side و روش عددی تفاضل محدود (با استفاده از نرم‌افزار Flacslope) انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد افت تراز سطح آب با نرخ‌های مختلف امکان وقوع حالت بحرانی در شیب خاکی را ایجاد می‌نماید. بورمن و همکاران^۳ (۲۰۱۵) به ازای چند سناریوی مختلف (شامل اعمال و عدم اعمال تغییرات تراز سطح آب) عملکرد سی روش نسبی روش‌های تعادل حدی را در پایداری شیب‌ها با یکدیگر مقایسه کردند. سنائی‌راد و کاشانی (۱۳۹۵) عملکرد سه روش بهینه‌سازی را برای بررسی پایداری شیب‌های خاکی موردمطالعه قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر سنائی‌راد و جلالوندی (۱۳۹۴) از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای تعیین سطح لغزش غیر دایره‌ای شیب‌های خاکی مسلح با ضریب اطمینان یک استفاده نمودند. نتایج کاربرد روش الگوریتم ژنتیک در تحقیق مذکور در مقایسه با نتایج سایر محققین به‌وضوح نشان داد که برای شیب‌های با خصوصیات هندسی، بارگذاری و مشخصات ژئوتکنیکی مشابه، روش مورداستفاده در تحقیق، وضعیت پایداری شیب را بحرانی‌تر به دست می‌آورد. سعید پناه و آقازاده قره‌باغ (۱۳۹۶) در تحقیق خود به بررسی پایداری شیب خاکی بالا دست سد شهر چای در حالت تخلیه سریع مخزن به کمک بسته نرم‌افزاری GeoStudio پرداختند. سلماسی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از نرم‌افزارهای Seep/w و Slope/w، عملکرد زهکش‌های افقی بر پایداری شیب‌های خاکی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش طول، ضخامت و تعداد زهکش‌های افقی موجب افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب در زمان وقوع بارندگی‌های شدید و حفظ پایداری شیب می‌گردد. همچنین

¹ Wu et al

² Lane and Griffiths

³ Burman et al

به کارگیری زهکش‌های افقی در رقوم ارتقای پایین شیب، تأثیر پایدارسازی بیشتری نسبت به به کارگیری آن‌ها در نواحی وسط و فوقانی شیب دارد.

با توجه با تأثیر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدرولیکی مؤثر بر پایداری شیب‌های خاکی، امروزه در بسیاری از موارد، استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی به عنوان جایگزین روش‌های تحلیل عددی و سایر روش‌های قطعی در تحلیل پایداری شیب‌های خاکی مورد تأکید محققان قرار گرفته است (رهبر و محمودی اردکانی، ۱۳۹۱، پارکر و همکاران^۱، ملکپور و همکاران، ۱۳۹۷).

در این راستا گریفیس و همکاران^۲ (۲۰۱۵) با استفاده از روش اجزا محدود تصادفی، پایداری شیب خاکی زهکشی نشده را با مقایسه تأثیر واریانس متغیرهای ورودی مطالعه نمودند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که احتمال لغزن شیب به طور مستقیم با ضربیت تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک مرتبط است. ملکپور و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی احتمالاتی پایداری شیب خاکی در مقطع رودخانه پس از کاهش تراز سطح آب با استفاده از روش مونت‌کارلو پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هرچه قوس رودخانه بیشتر باشد، با کاهش سطح آب رودخانه سرعت استهلاک فشار آب منفذی در شیب خاکی جداره رودخانه کاهش می‌یابد. نصیرزاده و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با استفاده از نرم‌افزار Side، پایداری شیب خاکی مشرف به سریز آزاد سد کوار شیراز را در قالب یک تحلیل احتمالاتی موردنظری قرار دادند. نتیجه تحلیل آن‌ها اثبات نمود که تحلیل احتمالاتی نسبت به تحلیل قطعی تصویر روشن‌تری از وضعیت پایداری شیب خاکی ارائه می‌کند. سیاکارا و همکاران^۳ (۲۰۲۰) با استفاده از روش FORM و بسته نرم‌افزاری GeoStudio به تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیب سدهای خاکی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که عواملی همچون هدایت هیدرولیکی اشیاع، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در تعیین میزان احتمال تخریب سطوح شیب‌دار بدنه سد بیشترین سهم را دارا می‌باشند.

در بسیاری از مطالعات انجام‌شده با محوریت تحلیل احتمالاتی پایداری شیب‌های خاکی، تأثیر همبستگی میان متغیرهای تصادفی مؤثر بر پایداری شیب لحاظ نگردیده است. این در حالی است که خصوصیات ژئوتکنیکی مؤثر بر پایداری شیب خاکی، به طور معمول دارای همبستگی بوده و لذا چشم‌پوشی از آن موجب تخمین غیرواقعی احتمال گسیختگی شیب می‌گردد. علاوه بر این، مطالعات ملکپور و همکاران (۱۳۹۷) خاکی از آن است که تغییرات تراز سطح آب از مهم‌ترین عوامل پایداری شیب‌های خاکی در رودخانه‌ها است. از این‌رو هدف تحقیق حاضر، بررسی تأثیر تغییرات تراز سطح آب بر پایداری شیب‌های خاکی جداره رودخانه در شرایط اعمال همبستگی متغیرهای ژئوتکنیکی تصادفی مؤثر با کاربرد توابع کاپولا و تحلیل احتمالاتی مشترک این متغیرها است. همچنین مقایسه عملکرد توابع کاپولای بکار رفته در تلفیق با روش‌های تعادل حدی (در قالب یک مطالعه موردنظری در رودخانه شلمان رود گیلان) از دیگر اهداف موردنظر در تحقیق حاضر است.

رودخانه موردمطالعه و خصوصیات شیب‌های خاکی جداره

در تحقیق حاضر، رودخانه شلمان رود در شرق شهرستان لنگرود استان گیلان در محدوده عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۹ دقیقه و ۵۷ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی موردمطالعه قرار گرفت که در شکل (۱) نشان داده شده است. این حوضه از شمال به دریای خزر، از جنوب و جنوب شرق به حوضه آبریز رودخانه پلرود، از شرق

¹ Parker et al

² Griffiths et al

³ Siacara et al

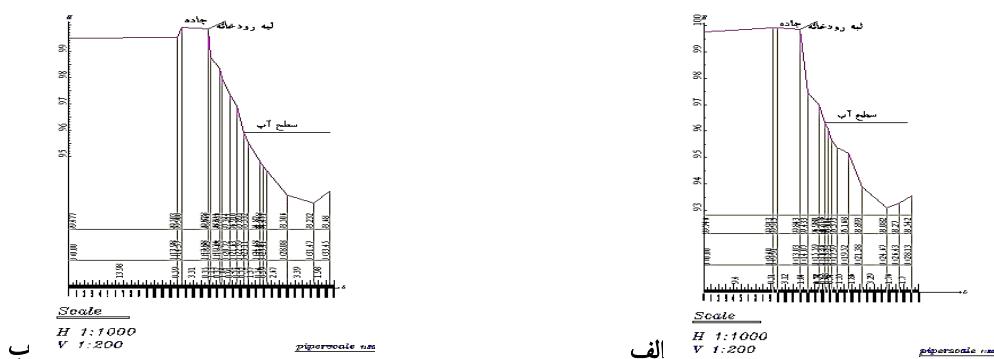
به حوضه آبریز رودخانه رودسر و از غرب و شمال غرب به حوضه آبریز رودخانه‌های شمرود و لنگرود محدود می‌شود (روح‌بخش سیکارودی، ۱۳۷۷).

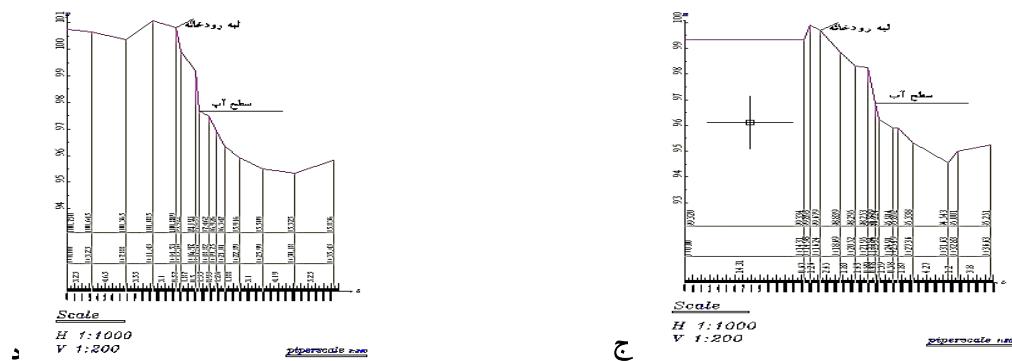
نوسانات سطح آب در این رودخانه موجب تغییر فشار هیدرواستاتیک و درنتیجه تأثیر آن بر پایداری شیب خاکی جداره می‌شود. از این‌رو، در تحقیق حاضر تأثیر این عامل به همراه نقش عدم قطعیت و همبستگی خصوصیات تصادفی مصالح خاکی جداره رودخانه در چهار مقطع مختلف بررسی شد. خصوصیات خاک در مقطع موردمطالعه از اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از تحقیق ملکپور و همکاران (۱۳۹۷) به دست آمده و برای انجام تحلیل‌های ژئوتکنیکی به کمک بسته نرم‌افزاری GeoStudio مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۱. نمای کلی از موقعیت جغرافیایی ۴ مقطع موردمطالعه در شلمان‌رود (ملکپور و همکاران، ۱۳۹۷)

شکل (۲) خصوصیات هندسی چهار مقطع موردمطالعه رودخانه شلمان‌رود در نرم‌افزار GeoStudio را نشان می‌دهد.





شکل ۲. هندسه مقاطع رودخانه شلمان رود (مقیاس ۱:۲۰۰) (الف) مقطع ۱، (ب) مقطع ۲، (ج) مقطع ۳، (د) مقطع ۴
(ملکپور و همکاران، ۱۳۹۷)

روش پژوهش

با توجه به ماهیت تصادفی و تغییرات مکانی خصوصیات خاک، برای بررسی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه از توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای ورودی به جای مقادیر قطعی آن‌ها در رابطه تعیین ضریب اطمینان مطابق رابطه (۱) استفاده شده که به تعیین توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان می‌انجامد.

$$FS = \frac{\sum R}{\sum F} \quad (1)$$

که در رابطه فوق FS , R و F به ترتیب ضریب اطمینان (با استفاده از روش‌های مختلف تعادل حدی)، نیروهای مقاوم و نیروهای مخرب می‌باشند. به منظور تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب مطابق رابطه (۱) به ازای ۱۸ نمونه خاک مربوط به شیب‌های خاکی چهار مقطع مورد مطالعه در رودخانه شلمان رود، از روش‌های تعادل حدی بیش‌آپ، مورگنسترن-پرایس و اسپنسر (کلاتجراری و علی^۱، ۲۰۱۳) استفاده شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.

از میان پارامترهای مقاومت برشی که در تعیین ضریب اطمینان دارای عدم قطعیت، ماهیت تصادفی و تغییرات مکانی بوده، می‌توان به دو متغیر تصادفی زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی خاک (C) اشاره نمود، که طبق تحقیق ملکپور و همکاران (۱۳۹۷) دارای بیشترین همبستگی با یکدیگر می‌باشند. بر این اساس، برای تشکیل توزیع احتمالاتی مشترک و اعمال همبستگی میان متغیرهای تصادفی نامبرده از توابع کاپولا مختلف استفاده گردید که در ادامه به توابع مذکور و روابط آن‌ها اشاره می‌شود.

تحلیل احتمالاتی مشترک پایداری شیب خاکی با استفاده از توابع کاپولا

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای اعمال تأثیر همبستگی بین متغیرهای تصادفی ژئوتکنیکی و ایجاد توزیع احتمالاتی مشترک این متغیرها استفاده از توابع کاپولا است (صادقیان پیرمحله، ۱۴۰۰). نظریه کاپولا جهت ترکیب چند توزیع تک متغیره (حاشیه‌ای) و تبدیل آن به یک توزیع چند متغیره با در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها توسط اسکلار^۲ (۱۹۷۳) ارائه شد. به عبارت دیگر، کاپولا (u_1, u_2, \dots, u_N) یک تابع

¹ Kalahtejari & Ali

² Sclar

متصل کننده برای ارتباط توابع توزیع متغیرهای تصادفی X_1, X_2, \dots, X_N با توابع حاسه‌ای $F_{x1}(X_1), F_{x2}(X_2), \dots, F_{xN}(X_N)$ بوده که به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد (میراکبری و همکاران، ۱۳۹۷).

(۲)

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = C_\theta [F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_N}(x_N)]$$

در این تحقیق دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و میزان چسبندگی خاک به عنوان دو متغیر دارای همبستگی و مؤثر بر پایداری شبکه خاک به عنوان ورودی‌های توابع کاپولا انتخاب شدند. توابع کاپولا مورداً استفاده در تحقیق حاضر عبارت‌اند از کاپولاهای کلیتون، گامبل و فرانک (از خانواده توابع ارشمیدسی) و کاپولاهای گوسی و تی-استیوون (از خانواده توابع گوسی) که روابط آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. روابط ریاضی و محدوده پارامتر توابع کاپولا مختلف (صادق و همکاران،^۱ ۲۰۱۷، ملک پور و همکاران،^۲ ۱۴۰۲)

نام کاپولا	نام خانواده	رابطه ریاضی	محدوده پارامتر کاپولا
گامبل		$\exp\{-[(-\ln(u))^\theta + (-\ln(v))^\theta]^{\frac{1}{\theta}}\}$	$\theta \in (1, \infty)$
کاپولای	فرانک	$-\frac{1}{\theta} \ln[1 + \frac{(\exp(-\theta u) - 1)(\exp(-\theta v) - 1)}{\exp(-\theta) - 1}]$	$\theta \in R \setminus 0$
ارشمیدسی	کلیتون	$\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0)^{-\frac{1}{\theta}}$	$\theta \in [-1, \infty) \setminus 0$
کاپولای	تی-	$\int_{-\infty}^{t_{\theta_2}^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{t_{\theta_2}^{-1}(v)} \frac{\Gamma\left(\frac{\theta_2+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \pi \theta_2 \sqrt{1-\theta_1^2}} (1 + \frac{x^2 - 2\theta xy + y^2}{\theta_2})^{\frac{(\theta_2+2)}{2}} dx dy \quad \theta_1 \in [-1, 1] \text{ and } \theta_2 \in (0, \infty)$	
بیضوی	گوسی	$\int_{-\infty}^{\theta^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\theta^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp(\frac{2\theta xy - x^2 - y^2}{2(1-\theta^2)}) dx dy \quad \theta \in [-1, 1]$	

در روابط ارائه شده در جدول فوق، u و v توزیع‌های احتمالاتی تک متغیره، θ پارامتر کاپولا، \emptyset یک توزیع استاندارد گوسی و t_{θ_2} توزیع تابع کاپولا تی-استیوون است به ازای درجه آزادی θ_2 می‌باشد.

در تحقیق حاضر به منظور سنجش و انتخاب بهترین توزیع احتمالاتی مشترک از دو معیار اطلاعاتی آکائیکه^۳ (AIC) و بیزی^۴ (BIC) برای رتبه‌بندی توزیع‌های احتمالاتی استفاده شد (به ترتیب روابط (۳) و (۴)). این معیارها تعادل بین پیچیدگی و دقیقت مدل را ارزیابی کرده و

¹ Sadegh et al

² Akaike Information Criterion

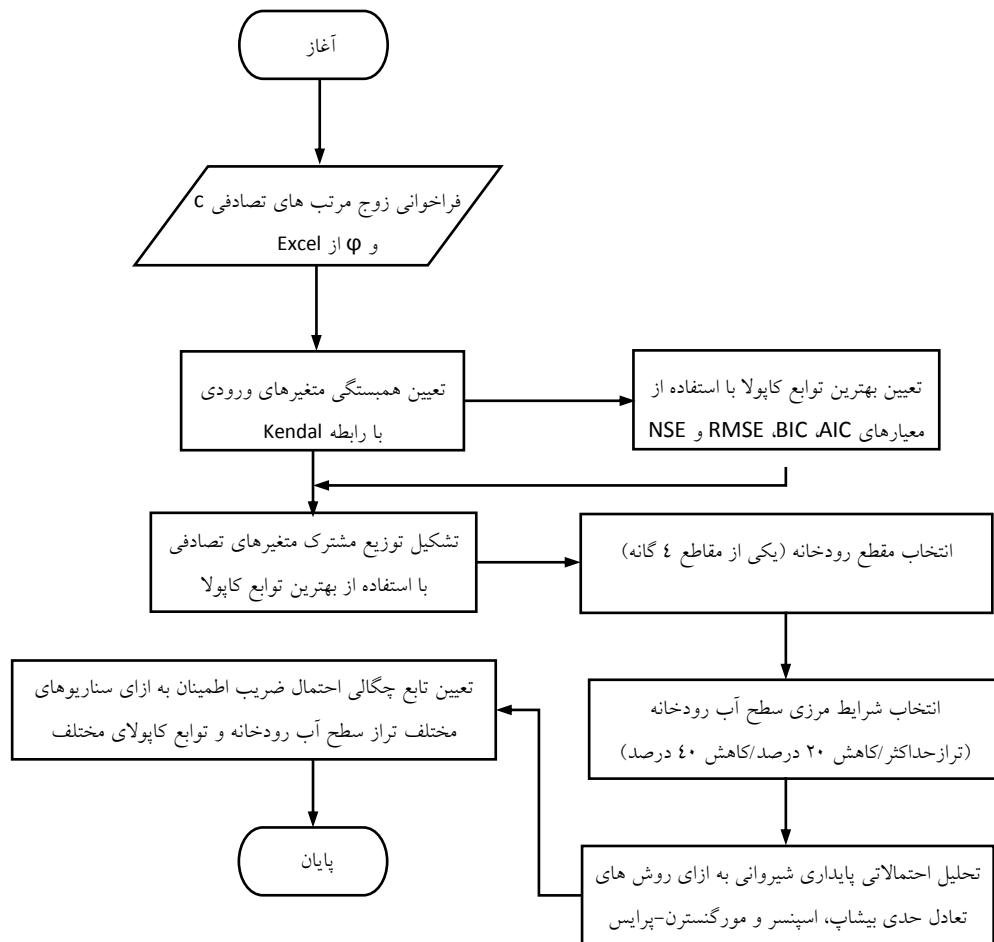
به عبارت دیگر می‌توان توزیع‌های انتخاب شده توسط این معیارها را دارای حداقل پیچیدگی به ازای دقت پیش‌بینی مناسب تعریف نمود (صادقیان پیر محله، ۱۴۰۰). لازم به ذکر است هر چه مقدار معیارهای AIC و BIC بدهست‌آمده برای یک توزیع احتمالاتی کوچک‌تر باشد، آن توزیع نتایج مناسب‌تری در مقایسه با سایر توزیع‌های دیگر ایجاد می‌کند.

$$AIC = 2k - 2\ln(\hat{L}) \quad (3)$$

$$BIC = K\ln(n) - 2\ln(\hat{L}) \quad (4)$$

در این روابط k تعداد پارامترهای مدل، n تعداد مشاهدات و \hat{L} مقدار تابع حداکثر درست‌نمایی است. همچنین معیارهای رتبه‌بندی مذکور با استفاده از برنامه رایانه‌ای MvCAT (صادق و همکاران، ۲۰۱۷) محاسبه شد و نتایج خروجی آن در برنامه رایانه‌ای توسعه‌یافته در تحقیق حاضر فراخوانی گردید. شکل (۳) فلوچارت برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

^۱ Bayesian Information Criterion



شکل ۳. فلوچارت برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده در تحقیق حاضر

علاوه بر دو معیار اصلی سنجش توزیع‌های احتمالاتی مشترک برازش داده شده، از دو معیار ارزیابی خطای NSE و RMSE (به ترتیب روابط (۵) و (۶)) نیز به عنوان معیارهای کمکی استفاده شد تا از صحت رتبه‌بندی حاصل از معیارهای رتبه‌بندی AIC و BIC اطمینان حاصل گردد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (6)$$

که در این روابط، x_i , \bar{x}_i و x_j به ترتیب مقادیر مشاهده شده، مقدار میانگین و مقادیر پیش‌بینی شده هریک از متغیرهای تصادفی بکار رفته در تحقیق است. در زمینه سناریوهای موردبررسی دو متغیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک به عنوان متغیرهای تصادفی دارای همبستگی در این تحقیق در نظر گرفته شدند. علاوه بر این تأثیر کاهش تراز سطح آب به میزان ۲۰ و ۴۰ درصد نسبت به حالت بدون تغییرات تراز سطح آب نیز موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. توزیع‌های احتمالاتی مورداستفاده در آزمون نیکویی برآشش شامل توزیع‌های نرمال و مقادیر حدی تعیین‌یافته^۱ (GEV) می‌باشند.

یافته‌ها

در این بخش بر اساس روش پژوهش بکار رفته در تحقیق، نتایج تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه با کاربرد روش‌های تعادل حدی مختلف و به ازای تغییرات سطح آب رودخانه در مقاطع عرضی موردبررسی رودخانه شلمان‌رود استان گیلان ارائه می‌شود. طبق شکل (۳)، پس از اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی مصالح خاکی تشکیل‌دهنده جداره رودخانه، تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی با کاربرد توابع کاپولا مناسب حاصل از معیارهای AIC و BIC انجام شد. درنهایت مقادیر ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی به ازای هریک از سناریوهای موردبررسی (شامل سطح آب رودخانه، روش تعادل حدی و تابع کاپولا بکار رفته) به دست آمد و با استفاده از آزمون نیکویی برآشش، توزیع‌های احتمالاتی دارای بیشترین برآشش بر نتایج حاصل تعیین گردید.

تعیین همبستگی و تولید زوج مرتب متغیرهای تصادفی مؤثر بر پایداری جداره رودخانه

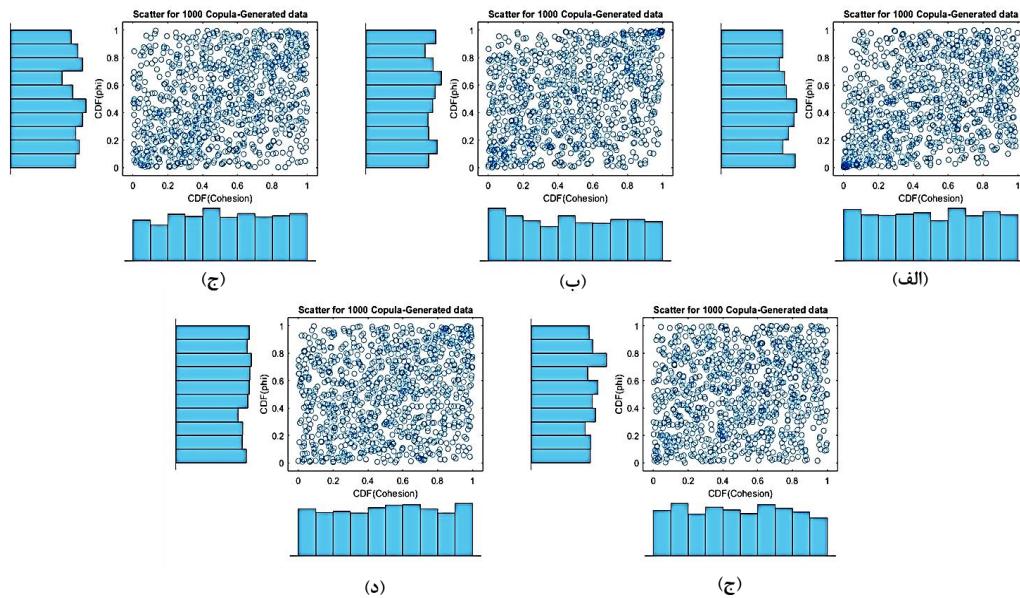
با توجه به محدودیت تعداد داده‌های مشاهداتی اولیه در مقاطع موردمطالعه رودخانه شلمان‌رود (۱۸ زوج مرتب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برداشت شده از پژوهش ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۷))، در تحقیق حاضر، یک برنامه رایانه‌ای برای فلوچارت ارائه شده در شکل (۳) در محیط برنامه‌نویسی MATLAB توسعه داده شد. در الگوریتم این برنامه، روشی برای رفع محدودیت تعداد داده‌های ورودی و امکان تولید داده به تعداد دلخواه (با همبستگی مشابه داده‌های اولیه) با استفاده از توابع کاپولا ارائه گردید. بر این اساس، ضریب همبستگی Kendall^۲ (سن، ۱۹۶۸^۳) زوج مرتب‌های مذکور (برابر با ۰/۱۸۶۱) حاصل گردید و با کاربرد توابع کاپولا مختلف (جدول (۱)، ۱۰۰۰ زوج مرتب تصادفی تولید شد. شکل (۴) نمودارهای هیستوگرام-پراکنده می‌داند.

طبق شکل (۴)، بیشترین همبستگی در مقادیر کم چسبندگی مربوط به تابع کاپولای کلیتون (شکل (۴-الف)) و بیشترین همبستگی در مقادیر زیاد چسبندگی مربوط به تابع کاپولای گامبل (شکل (۴-ب)) است. تابع کاپولای فرانک (شکل (۴-ج)) نیز بیشترین همبستگی را در مقادیر حدی ایجاد می‌کند. این در حالی است که تابع کاپولای گوسی و تی-استیودنت (به ترتیب شکل‌های (۴-ج) و (۴-د)) عملکرد یکسانی را نشان می‌دهند. با توجه به پراکنده‌گی قابل توجه نقاط در شکل (۴)، به طور کلی همبستگی مشبت با مقدار کم در کلیه توابع کاپولای بکار رفته مشاهده می‌شود.

¹ Generalized Extreme Values (GEV)

² Kendall

³ Sen



شکل ۴. نمودار هیستوگرام-پراکنده‌گی ۱۰۰۰ زوج مرتب چسبندگی-زاویه اصطکاک داخلی (الف) کاپولای گامبل، (ب) کاپولای گامبل، (ج) کاپولای فرانک، (د) کاپولای گوسی و (ه) کاپولای تی-استیودنت

رتبه‌بندی توابع کاپولا و تعیین بهترین توزیع احتمالاتی مشترک متغیرهای تصادفی

در تحقیق حاضر برای رتبه‌بندی و تعیین بهترین توابع کاپولا از معیارهای AIC و BIC استفاده گردید. جدول (۲) نتایج رتبه‌بندی توابع کاپولای مختلف بکار رفته برای تشکیل توزیع احتمالاتی مشترک زوج مرتب‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۲. رتبه‌بندی توابع کاپولا برای دو متغیر تصادفی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک

رتبه	AIC	معيار	BIC	معيار
۱		فرانک		فرانک
۲		تی-استیودنت		تی-استیودنت
۳		گامبل		گامبل
۴		کلیتون		کلیتون
۵		گوسی		گوسی

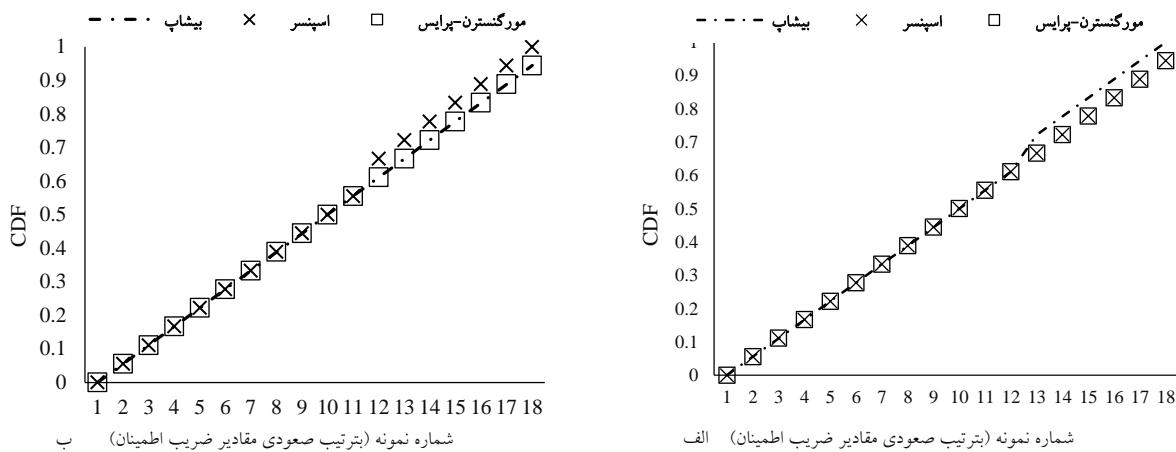
همچنین از دو ضریب ارزیابی خطا شامل RMSE و NSE به عنوان معیارهای کمکی در کنار روش‌های رتبه‌بندی توابع کاپولا استفاده گردید که نتایج ارزیابی توابع کاپولای بکار رفته با استفاده از روش‌های مذکور در جدول (۳) ارائه شده است. بر این اساس با توجه به دو معیار اصلی AIC و BIC، کاپولای فرانک به عنوان بهترین توزیع احتمالاتی مشترک برای زوج مرتب مذکور تعیین گردید. همچنین بر اساس روش‌های ارزیابی خطای بکار رفته (جدول (۳)) کاپولای تی-استیودنت و با اختلاف اندکی پس از آن کاپولای فرانک به عنوان بهترین توزیع‌های احتمالاتی مشترک تعیین گردیدند. درمجموع با توجه به نتایج جدول‌های (۲) و (۳) تابع کاپولای فرانک برای تولید زوج مرتب‌های تصادفی چسبندگی-زاویه اصطکاک داخلی و کاربرد در روش‌های تعادل حدی برای تعیین توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان پایداری شبیه خاکی جداره رودخانه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳. جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش-سانکلیف به ازای توابع کاپولای مختلف بکار رفته در تحقیق حاضر

تابع کاپولا	RMSE	NSE
فرانک	۰/۱۰۸۵	۰/۹۸۸۰
تی-استیودنت	۰/۱۰۵۵	۰/۹۸۸۷
گامبل	۰/۱۱۷۷	۰/۹۸۵۹
کلیتون	۰/۱۱۸۴	۰/۹۸۵۷
گوسی	۰/۱۳۲۸	۰/۹۸۲۰

تحلیل احتمالاتی پایداری شبیه خاکی جداره رودخانه بر اساس توزیع مشترک متغیرهای تصادفی

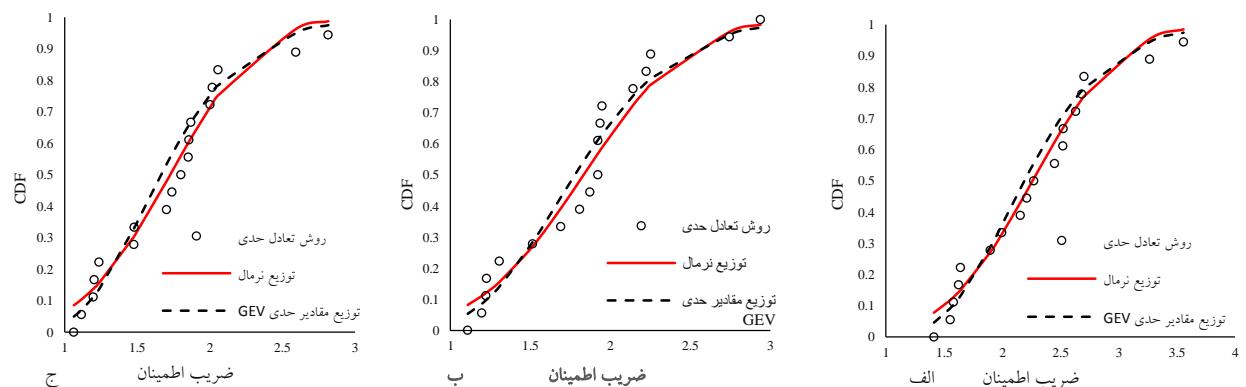
پیش از کاربرد تابع کاپولای فرانک به عنوان بهترین کاپولا جهت تولید زوج مرتب متغیرهای تصادفی، محاسبه ضریب اطمینان با مقادیر اولیه مربوط به ۱۸ نمونه خاک انجام شد. با توجه به بررسی اولیه خصوصیات هندسی و ضریب اطمینان در مقاطع موردمطالعه، مقطع ۱ که دارای شبیه خاکی بلند و کمترین ضریب اطمینان در میان مقاطع موردمطالعه است، جهت مقایسه عملکرد روش‌های مختلف تعادل حدی بکار رفته در تعیین پایداری شبیه انتخاب شد. شکل (۵) نتایج مقایسه عملکرد سه روش تعادل حدی را به ازای داده‌های ۱۸ نمونه خاک رودخانه شلمان رود به ازای دو تراز آب حداکثر (شکل (۵-الف)) و تراز آب با کاهش ۴۰ درصد (شکل (۵-الف)) نشان می‌دهد. با توجه به چینش نمونه‌ها روی محور افقی به ترتیب صعودی برای مقادیر ضریب اطمینان، مشاهده می‌شود که به ازای کمترین مقادیر محور افقی (کمترین ضریب اطمینان) هر سه روش دارای جواب مشابه بوده و با افزایش مقادیر ضریب اطمینان، کمترین احتمال (به ازای دو تراز آب حداکثر و کاهش تراز ۴۰ درصد) توسط روش مورگنسترن-پرایس به دست می‌آید. از آن‌رو، این روش که نشان‌دهنده شرایط بحرانی تر و روشنی محافظه کارانه است در مقایسه سناریوهای دیگر تحقیق بکار گرفته شد.



شکل ۵. مقایسه ضریب اطمینان به ازای روش‌های مختلف تعادل حدی در مقطع ۱

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

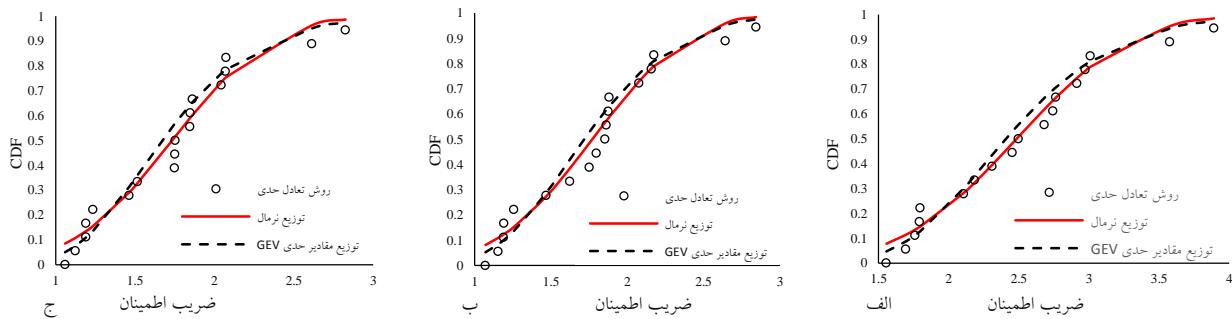
شکل (۶) توزیع احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۱ به ازای ترازهای مختلف سطح آب رودخانه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به ازای تراز آب حداکثر (شکل (۶-الف)) توزیع ضریب اطمینان به روش تعادل حدی در محدوده $1/4 - 3/6$ به دست می‌آید. با کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد (شکل (۶-ب)) محدوده ضریب اطمینان حاصل $1/10 - 2/8$ به دست می‌آید. برای بررسی میزان برآذش مدل‌های احتمالاتی دو توزیع نرمال و توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV)، بر مقادیر حاصل از روش تعادل حدی برآذش داده شد. به ازای حداکثر تراز آب رودخانه حداکثر خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب $7/8$ و $11/4$ درصد حاصل گردید. این در حالی است که به ازای کاهش تراز آب ۲۰ درصد، خطای توزیع‌های نرمال و GEV به ترتیب $13/4$ و $13/6$ درصد و به ازای کاهش تراز آب ۴۰ درصد، به ترتیب خطای 9 و $14/5$ درصد به دست آمد.



شکل ۶. مقایسه توزیع‌های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۱ (مقادیر محاسبه شده، تابع نرمال، تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

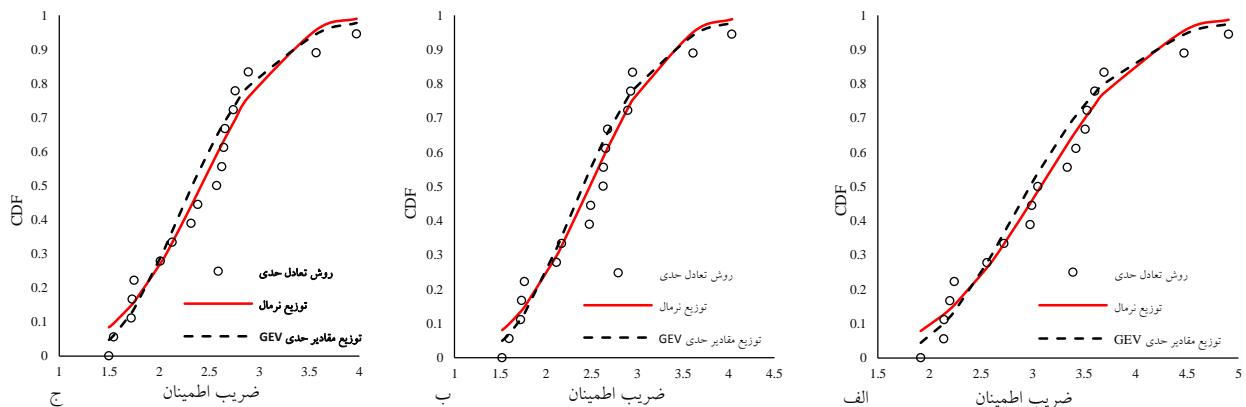
شکل (۷) توزیع احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۲ به ازای ترازهای مختلف سطح آب رودخانه را نشان می‌دهد. طبق نتایج شکل (۷-الف) به ازای تراز آب حداقل، توزیع ضریب اطمینان به روش تعادل حدی در محدوده $1/56-3/9$ به دست می‌آید. با کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد (شکل (۷-ب)) ضریب اطمینان در محدوده $1/07-2/8$ بوده و به ازای کاهش تراز آب به میزان ۴۰ درصد (شکل (۷-ج)) محدوده ضریب اطمینان حاصل $1/06-2/8$ است. همچنین به ازای حداقل تراز آب رودخانه حداقل خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب $7/8$ و $10/9$ درصد به دست آمد. این در حالی است که به ازای کاهش تراز آب ۲۰ درصد، خطای توزیع های نرمال و GEV به ترتیب $9/5$ و $13/9$ درصد و به ازای کاهش تراز آب ۴۰ درصد، به ترتیب خطای $12/3$ و $17/8$ درصد حاصل می‌شود.



شکل ۷. مقایسه توزیع های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۲ (مقادیر محاسبه شده،تابع نرمال،تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداقل (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

شکل (۸) توزیع های احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۳ به ازای سه تراز سطح آب بررسی شده را نشان می‌دهد. نتایج شکل (۸-الف) بیانگر این است که به ازای تراز آب حداقل، تغییرات ضریب اطمینان با روش تعادل حدی در محدوده $1/9-4/9$ حاصل می‌گردد. کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد در مقطع ۳ موجب تغییرات ضریب اطمینان در محدوده $1/52-4/03$ می‌شود (شکل (۸-ب)). در این مقطع با کاهش تراز آب به میزان ۴۰ درصد (شکل (۸-ج)) تغییرات ضریب اطمینان به روش تعادل حدی در محدوده $1/5-3/97$ به دست آمد.

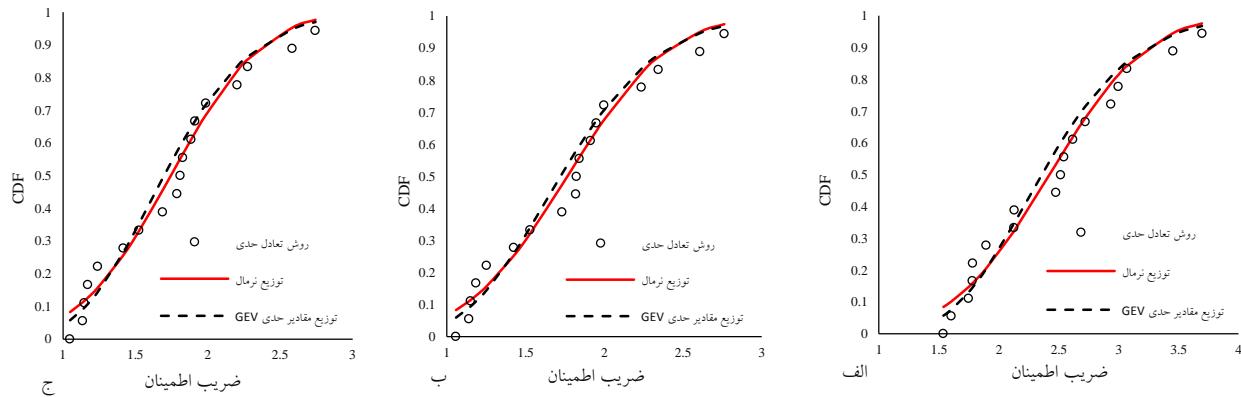


شکل ۸. مقایسه توزیع های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۳ (مقادیر محاسبه شده،تابع نرمال،تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداقل (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

به ازای حداقل تراز آب رودخانه در مقطع ۳، حداقل خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب $7/8$ و $11/7$ درصد حاصل گردید. در مقطع ۳ به ازای کاهش تراز آب 20 درصد، خطای توزیعهای نرمال و GEV به ترتیب 11 و $15/7$ درصد و به ازای کاهش تراز آب 40 درصد، به ترتیب خطای $9/3$ و $14/7$ درصد تعیین گردید.

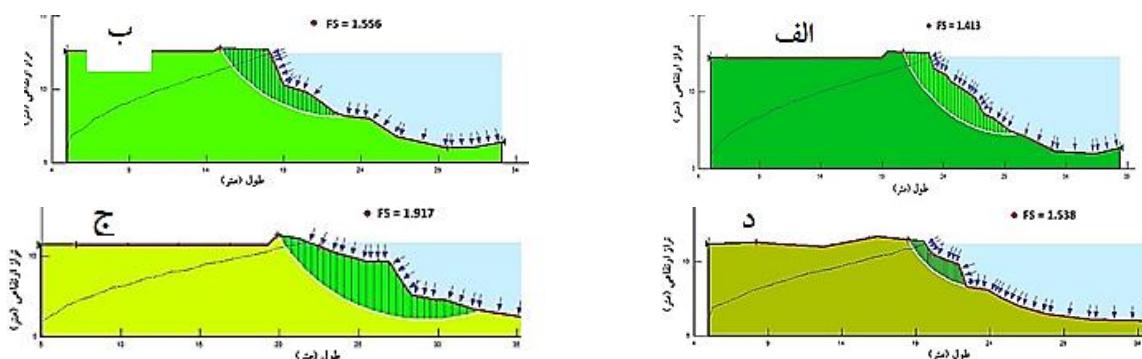
شکل (۹) توزیعهای احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۴ را نشان می‌دهد. طبق شکل (۹-الف)، تغییرات ضریب اطمینان به روش تعادل حدی به ازای تراز آب حداقل در محدوده $1/54-3/7$ به دست آمد. کاهش تراز آب به میزان 20 درصد در این مقطع موجب کاهش مقادیر ضریب اطمینان به $1/1-2/7$ می‌شود (شکل (۹-ب)). در این مقطع با کاهش تراز آب به میزان 40 درصد (شکل (۹-ج)) محدوده تغییرات ضریب اطمینان $2/7-10/5$ است.



شکل ۹. مقایسه توزیعهای احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۴ (مقادیر محاسبه شده،تابع نرمال،تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداقل (ب) کاهش تراز آب 20 درصد (ج) کاهش تراز آب 40 درصد

به ازای حداقل تراز آب رودخانه در مقطع ۴، حداقل خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب $8/8$ و $13/2$ درصد به دست آمد. در این مقطع، به ازای کاهش تراز آب 20 درصد، خطای توزیعهای نرمال و GEV به ترتیب $9/5$ و $13/1$ درصد و به ازای کاهش تراز آب 40 درصد، به ترتیب خطای $9/1$ و $13/02$ درصد محاسبه گردید. در مرحله بعد بر اساس نتایج بدست آمده از نرم افزار GeoStudio سطوح لغزش بحرانی به همراه ضریب اطمینان در چهار مقطع رودخانه مورد مطالعه به دست آمد که نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹ - سطوح لغزش بحرانی در چهار مقطع مورد مطالعه (الف) مقطع ۱، (ب) مقطع ۲، (ج) مقطع ۳، (د) مقطع ۴

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر چهار مقطع مقادیر ضربی اطمینان بر روی سطح لغزش بحرانی بزرگ‌تر از یک بوده و تغییرات آن از ۱/۴۱۳ در مقطع اول (شکل ۱۰-الف) تا ۱/۹۱۷ در مقطع سوم (شکل ۱۰-ج) است که بیانگر عدم وقوع لغزش به ازای سناریوهای موردبررسی در هر چهار مقطع است. همچنین نکته قابل ملاحظه این است که رابطه معکوس میان مقدار ضربی اطمینان و زاویه شیب خاکی مشاهده می‌شود. از این‌رو بیشترین مقادیر ضربی اطمینان در شکل‌های (۱۰-ج) و (۱۰-د) که داری کمترین شیب جداره می‌باشند به دست می‌آید. علاوه بر این، در شکل (۱۰-ج) به ازای بیشترین ضربی اطمینان، بزرگ‌ترین دایره لغزش در میان مقاطع مختلف مشاهده می‌شود.

بحث

در تحقیق حاضر، با توجه به اینکه در صورت تخریب شیب خاکی جداره رودخانه، ورود رسوبات و کاهش قابلیت عبور جریان در آبراهه محتمل است، پایداری این شیب‌ها در قالب تحلیل احتمالاتی با اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی (با استفاده از توابع کاپولا) موردبررسی قرار گرفت. بر این اساس یک مطالعه موردی در رودخانه شلمان رود استان گیلان در چهار مقطع (ایستگاه) مختلف و با توسعه یک برنامه رایانه‌ای در محیط MATLAB انجام شد. زوج مرتبت‌های متغیرهای تصادفی تولیدشده در برنامه رایانه‌ای (زاویه اصطکاک داخلی-چسبندگی خاک) به نرم‌افزار GeoStudio منتقل گردید و پایداری شیب با استفاده از روش‌های تعادل حدی مختلف تحلیل شد. سپس مجدداً برنامه رایانه‌ای توسعه‌یافته در تحقیق جهت تعیین توزیع‌های احتمال ضربی اطمینان پایداری شیب خاکی و تعیین مدل‌های احتمالاتی قابل برآش بر آن‌ها مورداستفاده قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که تابع کاپولا فرانک و روش تعادل حدی مورگنسترن-پرایس ابزار مناسبی در انجام تحلیل احتمالاتی بهمنظور تعیین توزیع احتمال ضربی اطمینان پایداری شیب خاکی جداره رودخانه می‌باشند. در این زمینه، عملکرد روش مورگنسترن-پرایس نسبت به روش‌های تعادل حدی دیگر تحت تأثیر تغییرات سطح آب رودخانه نبوده و همواره نتایج قابل قبولی ایجاد می‌نماید. همچنین تابع توزیع نرمال در مقایسه با تابع توزیع مقادیر حدی GEV برآش بهتری بر توزیع‌های احتمال ضربی اطمینان حاصل از روش‌های تعادل حدی مختلف دارد. سه روش تعادل حدی بکار رفته (بیشاپ، اسپنسر و مورگنسترن-پرایس) در مقادیر کم ضربی اطمینان (دارای احتمال تجمعی CDF کمتر) نتایج مشابهی ارائه می‌نمایند. در توزیع‌های احتمال ضربی اطمینان به‌دست‌آمده، با کاهش تراز آب در رودخانه، خطای ناشی از برآش هر دو توزیع نرمال و GEV بر توزیع احتمال ضربی اطمینان افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش سطح آب در رودخانه، مقادیر ضربی اطمینان کاهش می‌یابد که بیشترین نرخ کاهش ضربی اطمینان در تغییر از تراز سطح آب حداکثر به ازای ۲۰ درصد کاهش سطح آب رخداده و کاهش ضربی اطمینان به ازای کاهش سطح آب از ۲۰ به ۴۰ درصد با نرخی کمتر ایجاد می‌شود. در انتهای جهت ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود که تأثیر سرعت تغییرات سطح آب ناشی از ورود هیدرو گراف‌های سیلاب به رودخانه بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب جداره خاکی موردبررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

در انتهای، نویسنده‌گان خدمت تشرکر از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه گیلان، از حمایت انجام‌شده جهت پیشبرد این تحقیق، کمال تشرکر و قدردانی خود را ابراز می‌نمایند.

منابع

- بخشنده امنیه، حسن، طایی سمیرمی، سعید، و رحیمی، مرتضی. (۱۳۹۱). تحلیل پایداری شیب‌های سنگی مشرف به نیروگاه سد سردشت با در نظر گرفتن اثر کلیواژ توده سنگ. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۵(۱۹)، ۲۶-۱۷.
https://www.jiraeg.ir/article_68308.html
- روح بخش سیکارودی، حسینعلی. (۱۳۷۷). بررسی هیدرولیمیای حوضه آبریز رودخانه شلمان‌رود (سیکارود) با تأکید بر سیل‌خیزی منطقه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ۵-۵۱۳۵.
- رهبر، داود، و محبوبی اردکانی، احمد رضا. (۱۳۹۱). ارزیابی پایداری شیب‌ها با استفاده از روش تحلیل تغییر شکل گسسته DDA و روندیابی موقعیت خط لنزش. هفتمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، زاهدان، ایران.
<https://civilica.com/doc/206591>
- سعید پناه، ایرج، و آغازاده قره باغ، بهمن. (۱۳۹۶). بررسی پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حالت تخلیه سریع مخزن (مطالعه موردي سد شهرچای). مجله پژوهش آب ایران، ۱۱(۳)، ۴۷-۳۷.
- سلماسی، فرزین، حسین‌زاده دلیر، علی، و نوروزی سرکارآباد، رضا. (۱۳۹۸). بررسی عملکرد زهکشی‌های افقی در افزایش پایداری شیب‌های خاکی در بارندگی‌های شدید با شبیه‌سازی عددی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۱(۳)، ۵۰۲-۴۹۱.
- <http://doi.org/10.22060/CEEJ.2018.13739.5468>
- سنائی‌راد، علی، و جلالوندی، مهدی. (۱۳۹۴). استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی طول مسلح کننده‌های شیب‌های خاکی مسلح. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۷(۳)، ۶۰-۵۳.
- سنائی‌راد، علی، و کاشانی، علیرضا. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی پایداری شیروانی‌های خاکی با فرض سطح لنزش غیربدایر ای با استفاده از الگوریتم های بهینه‌سازی رقابت استعماری. کرم شتاب و بازیخت فلات، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۸(۲)، ۲۱۶-۲۰۷.
- صادقیان پیر محله، نیما. (۱۴۰۰). تحلیل احتمالاتی پدیده فرسایش درونی در سدهای خاکی با کاربرد توابع کاپولا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان. گیلان، ایران.
<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9684bd4d1e3f7773a32d4f700ccc342e>
- ملک‌پور، امیر، نیکنام یوسفی، حامد، و اسماعیلی ورکی، مهدی. (۱۳۹۷). تحلیل پایداری شیب پس از کاهش سطح آب در مقطع رودخانه با بررسی کرنش و روش احتمالاتی مونت کارلو. نشریه دانش آب و خاک، ۲۸(۲)، ۱۳-۱-۱.
- https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_7819.html
- نصیرزاده قورچی، رضا، امینی، مهدی، و معماریان، حسین. (۱۳۹۸). بررسی پایدارسازی شیب‌ها به کمک نتایج تحلیل‌های احتمالاتی (مثال موردي: شیب مشرف به سریز آزاد سد کوار شیراز). نشریه زمین شناسی مهندسی، ۱۳(۲)، ۳۹۸-۳۷۱.
- <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.2.371>
- ملک پور اسطلکی، امیر، صادقیان، نیما، و فرخی، محمد جواد. (۱۴۰۲). تحلیل احتمالاتی دو متغیره تغییرات زمانی فشار آب منفذی در حین فرآیند تحکیم پی‌ساز. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۴(۹۰)، ۱۱۳-۹۱.
- <https://doi.org/10.22092/IDSER.2023.363197.1551>
- میراکبری، مریم، مصباح‌زاده، طبیه، و محسنی ساروی، محسن. (۱۳۹۷). تحلیل دو متغیره دوره بازگشت توفان گرد و غبار براساس تئوری کاپولا در استان یزد. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۲(۴۰)، ۱۲۳-۱۱۵.
- <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.40.13.0>

References

- Bakhshndeh Amieh, H., Taei Semiroomi, S., & Rahimi, M. (2012). Stability analysis of large rock slopes for Sardasht dam hydraulic power plant trenches considering rock cleavage. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 5(1 & 2), 17-26. https://www.jiraeg.ir/article_68308.html [In Persian]
- Burman, A., Acharya, S.P., Sahay, R. R. & Maity, D. (2015). A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method. Asian Journal of Civil Engineering 16(4), 467-492. <https://www.researchgate.net/publication/274076368>
- Griffiths, D. V., Huang, J., & Fenton, G. A. (2015). Probabilistic slope stability analysis using RFEM with non-stationary random fields. In Geotechnical safety and risk, IOS Press ,704-709. <https://www.researchgate.net/publication/313575886>
- Kalatehjari, R., & Ali, N. (2013). A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18, 119-134. <https://www.researchgate.net/publication/236174492>
- Lane, P. A., & Griffiths, D. V. (2000). Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 126(5), 443-450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(443))
- Malekpour, A., Niknam Yousefi, H., & Esmaili Varaki, M. (2018). Slope stability analysis after decline of water level at the river meander considering strain and Monte-Carlo probabilistic method. Water and Soil Science, 28(2), 1-13. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_7819.html [In Persian]
- Malekpour Estalaki, A., Sadeghian, N., & Farrokhi, M. J. (2023). Bivariate probabilistic analysis of temporal variations of pore water pressure during consolidation process in structural foundation. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 24(90), 91-113. <https://doi.org/10.22092/IDSER.2023.363197.1551> [In Persian]
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., & Mohseni saravi, M. (2018). Bivariate analysis of return period of dust storm based on copula theory in Yazd province. Jwmseir, 12(40),115-124. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.40.13.0> [In Persian]
- 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. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.2.371> [In Persian]
- Parker, C., Simon, A. R., & Thome, R. (2008). The effect of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. Geomorphology, 101(4), 533-543. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.007>
- Rahbar, D. & Mahboubi Ardakani. (2012). Evaluating the stability of the slopes using the DDA discrete deformation analysis method and trending the position of the slip line. 7th National Civil Eng. Conference, Zahedan, Iran. <https://civilica.com/doc/206591> [In Persian]
- Roohbakhsh Sikaroody, H. (1998). Investigating the hydroclimate of the Shalman River (Sikaroud) catchment area with an emphasis on flooding in the area. MSc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. <https://elmnet.ir/doc/10769692-5135> [In Persian]

- Sadegh, M., Rango, E., & AghaKouchak, A. (2017). Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework. *Water Resources Research*, 53(6), 5166-5183. <https://doi.org/10.1002/2016WR020242>
- Sadeghian, N. (2021). Probability analysis of internal erosion phenomenon in earthen dams using copula functions. MSc. Thesis, University of Gilan, Gilan, Iran. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9684bd4d1e3f7773a32d4f700ccc342e>
- Saeedpanah, I., & Aghazadeh Garebaqh, B. (2017). Evaluation of the Upstream Slope Stability in Earth Dams under Rapid Drawdown Conditions (Case Study Shaharchay Dam). *Iranian Water Researches Journal*, 11(3), 37-47. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10553.html [In Persian]
- Salmasi, F., Dalir, A. H., & Sarkarabad, R. N. (2019). Investigation of the performance of horizontal drains in increasing slope stability in intense rainfall conditions by numerical simulation. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(3), 491-502. <http://doi.org/10.22060/CEEJ.2018.13739.5468> [In Persian]
- Sanaeirad, A., & Jalalvandi, M. (2015). Using genetic algorithm for design length of reinforcers in slope reinforced. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 47(3), 55-62. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.556> [In Persian]
- Sanaeirad, A., & Kashani, A. (2016). Slope stability optimization with non-circular slip surface and using firefly algorithm, simulate annealing and imperialistic competitive algorithm. *Amirkabir J Sci Res Civ Environ Eng (ASJR-CEE)*, 48(2), 207-216. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.656> [In Persian]
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Siacara, A. T., Beck, A. T., & Futai, M. M. (2020). Reliability analysis of rapid drawdown of an earth dam using direct coupling, *Computers and Geotechnics*, 118, 103336. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103336>
- Sklar, A. (1973). Random variables, joint distribution functions, and copulas. *Kybernetika*, 9(6), 449-460. <https://www.kybernetika.cz/content/1973/6/449/paper.pdf>
- Wu, D., Wang, Y., Zhang, F., & Qiu, Y. (2021). Influences of pore-water pressure on slope stability considering strength nonlinearity. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/8823899>