



Research Article

Probabilistic Analysis of Soil Slope Stability Using Random Artificial Neural Network

Parnia karimi^{1*}, Amir gholampour²

1*- Civil Msc, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran

2- Assistant professor, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran

Received: 22 June 2025; Revised: 29 June 2025; Accepted: 02 August 2025; Published: 23 September

Abstract

Slope stability analysis is a fundamental challenge in geotechnical engineering. This study presents an efficient probabilistic modeling approach for slope stability using stochastic artificial neural networks. Key geotechnical parameters including unit weight, cohesion, internal friction angle, Poisson's ratio, elastic modulus, and slope angle were modeled as random variables. Training data were generated via finite element analyses with 4000 simulations to compute the safety factor. Two neural network models were developed: the first predicting the factor of safety, and the second predicting the slope angle. Various hidden layer architectures were evaluated, and the optimal structures were selected based on minimum prediction error. A linear activation function was employed to facilitate integration within a probabilistic framework, enabling application of the model in the first-order second-moment reliability method. Results revealed that the optimal architecture for the first model includes five hidden layers with 5, 1, 13, 8, and 14 neurons, while the second model's optimal structure consists of five layers with 5, 5, 7, 7, and 8 neurons. It was also demonstrated that increasing network complexity does not necessarily enhance model performance. The proposed approach was applied to two case studies: the Yasuj–Kakan road slope in Iran and the Wozeka–Gidole road slope in Ethiopia. For the first case, the reliability index and failure probability were 2.42 and 0.0078, respectively; for the second, these values were 4.34 and 6.8124×10^{-6} . According to the performance level criteria, these results correspond to performance levels ranging from “above average” to “good” for both sites.

Keywords: Soil Slope Stability, Finite Element Method, Artificial Neural Network, First Order Second Moment, Probabilistic Analysis.

Cite this article as arimi,P. and Gholampour,A. (2025). Probabilistic Analysis of Soil Slope Stability Using Random Artificial Neural Networks. (e226346). *Civil and Project*, 7(7), e226346
<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.536403.1388>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تصادفی

پرنیا کریمی^{۱*}، امیر غلام پور^۲

* ۱- کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران

۲- استادیار، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۰۱ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۸ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۱ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۱ مرداد ۱۴۰۴

چکیده

تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی یکی از مسائل کلیدی در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. در این پژوهش، با هدف ارائه مدلی کارآمد در تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی، از شبکه عصبی مصنوعی تصادفی بهره گرفته شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر وزن حجمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته و زاویه شیب به‌عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند. به منظور تولید داده‌های آموزشی، با استفاده از روش اجزای محدود و انجام ۴۰۰۰ بار تحلیل عددی، ضریب اطمینان شیروانی شبیه‌سازی گردید. دو مدل شبکه عصبی طراحی شد؛ در مدل اول ضریب اطمینان و در مدل دوم زاویه شیب به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. سپس ساختارهای مختلف لایه‌های میانی شبکه بررسی و ساختار بهینه بر اساس کم‌ترین خطای پیش‌بینی انتخاب گردید. برای امکان استفاده از مدل در تحلیل احتمالاتی، تابع فعال‌ساز به‌صورت خطی لحاظ شد و رابطه حاصل در چارچوب روش لنگر دوم مرتبه اول به‌کار گرفته شد. نتایج حاصل نشان داد که ساختار بهینه مدل اول دارای پنج لایه میانی با تعداد گره‌های ۵، ۱، ۱۳، ۸ و ۱۴ و مدل دوم شامل لایه‌هایی با ۵، ۵، ۷، ۷ و ۸ گره است. همچنین مشاهده شد که افزایش پیچیدگی ساختار شبکه لزوماً به معنای بهبود دقت مدل نیست. روش ارائه‌شده بر روی دو مطالعه موردی شامل شیروانی جاده یاسوج-کاکان در ایران و جاده Wozeka-Gidole در اتیوپی اعمال گردید. برای مطالعه اول، شاخص قابلیت اعتماد ۲/۴۲ و احتمال خرابی ۰/۰۰۷۸، و برای مطالعه دوم به‌ترتیب مقادیر ۴/۳۴ و $۶/۸۱۲۴ \times ۱۰^{-۶}$ حاصل شد. مطابق با جدول سطح عملکرد، نتایج نشان‌دهنده سطح عملکرد «خوب» تا «بالاتر از حد متوسط» در هر دو مطالعه موردی است.

کلمات کلیدی: پایداری شیب خاکی، روش اجزا محدود، شبکه عصبی مصنوعی، روش FOSM، تحلیل احتمالاتی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: parniakarimi79@yahoo.com

۱- مقدمه

پایداری شیروانی‌های خاکی یکی از مهم‌ترین مسائل در مهندسی ژئوتکنیک و مهندسی عمران به‌شمار می‌رود. پایداری شیروانی‌ها به‌طور مستقیم با ایمنی سازه‌ها و زیرساخت‌ها در ارتباط است و از اهمیت ویژه‌ای در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی برخوردار است. به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود در رفتار خاک و عوامل مؤثر بر پایداری شیروانی‌ها، پیش‌بینی دقیق پایداری آن‌ها به چالش‌های زیادی برخورد کرده‌است. شیروانی‌های خاکی تحت تأثیر عوامل متعددی می‌توانند دچار ناپایداری شوند از این‌رو پیش‌بینی پایداری شیروانی‌های خاکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چراکه ناپایداری آن‌ها می‌تواند به خسارات جدی جانی و مالی منجر شود (Qi, 2023; Chakraborty & Goswami, 2017; Bharati et al, 2024). روش‌های سنتی تحلیل پایداری شیروانی‌ها مانند روش‌های تعادل حدی، روش‌های عددی و تحلیل‌های استاتیکی با وجود ارائه نتایج قابل قبول، دارای محدودیت‌هایی هستند (Irwan & Wiati, 2023; Johari & Mousavi, 2019). این محدودیت‌ها شامل فرضیات ساده‌سازی شده، نیاز به داده‌های دقیق و زمان‌بر بودن تحلیل‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر، روش‌های هوش مصنوعی و به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتارهای پیچیده در مهندسی ژئوتکنیک معرفی شده‌اند (Johari et al. 2011; Johari & Javadi, 2010). یکی از روش‌های نوین و پیشرفته برای ارزیابی و پیش‌بینی پایداری شیروانی‌های خاکی، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت بالای خود در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرها، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه مهندسی ژئوتکنیک شناخته شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شبیه‌سازی با استفاده از کد نوشته‌شده اجزا محدود در نرم‌افزار Matlab به‌دست آمده‌است. در این پژوهش به‌منظور محاسبه ضریب ایمنی (FS) و همچنین محاسبه شیب خاک که به‌عنوان دو عامل مهم در پایداری شیب می‌باشد، از روش شبکه عصبی مصنوعی تصادفی (RANN) برای پیش‌بینی پایداری شیروانی‌های خاکی استفاده شده‌است. روش RANN به‌دلیل برخورداری از قابلیت‌های منحصر به فرد با مواجهه با داده‌های پراکنده، می‌تواند نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را ارائه دهد. در شبکه‌های عصبی مصنوعی تصادفی تعداد لایه‌های پنهان و نورون‌ها به‌عنوان متغیرهای تصادفی انتخاب می‌شوند. پس از شبیه‌سازی و ارزیابی دقت پیش‌بینی، تحلیل احتمالی انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر، توسعه روش‌های پیش‌بینی تبدیل به یکی از اولویت‌ها در حوزه‌های مهندسی شده است. یکی از جنبه‌های حیاتی در این زمینه، پیش‌بینی و برنامه‌ریزی کارآمد برای طرح‌های پایدار شیروانی خاکی است. استفاده از فناوری‌های نوین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌تواند به بهبود دقت و اثربخشی این پیش‌بینی‌ها کمک کند. در زمینه مهندسی عمران، حفظ پایداری شیب‌ها امری حیاتی و پیچیده است، همچنین نقش بسزایی در کاهش خسارات ناشی از رانش شیب ایفا می‌کند. از این رو ایمن بودن شیب نیز حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش به پیش‌بینی پایداری شیب به روش المان محدود با استفاده از RANN پرداخته شده است. هدف این پژوهش، ابتدا تعیین پارامتر FS و زاویه شیب می‌باشد و سپس از طریق این پارامترها و شبکه عصبی تصادفی پیش‌بینی پایداری شیب صورت می‌گیرد. FS و زاویه شیب تابع پارامترهایی از جمله: پارامترهای مقاومتی خاک $(\phi - c)$ ، وزن حجمی خاک (γ) ، تعداد المان‌های خاک، هندسه و خصوصیات خاک می‌باشد. این کمیت برابر با ضریبی است که پارامترهای اصلی مقاومتی یعنی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر آن تقسیم شده و به این ترتیب مقاومت برشی کاهش یافته تا تحت نیروی وزن ثابت، گسیختگی حاصل شود. روش‌های مختلف برای مدل‌سازی پایداری شیب به دو دسته تقسیم می‌شود: مدل‌سازی پیوسته و مدل‌سازی ناپیوسته. مدل‌سازی پیوسته شامل روش تفاضل محدود (FDM) و روش المان محدود (FEM) می‌شود (Mebratu et al, 2022; Gu et al. 2024). در این پژوهش، از روش المان محدود استفاده شده است. در این روش خاک مورد نظر را با استفاده از مش‌بندی به تعدادی المان تقسیم می‌شود و همچنین عوامل مؤثر در این روش تعداد المان‌های موجود در راستای X، و در راستای Y، X می‌باشد. این موضوع تفاوت موجود میان بررسی مسئله پایداری شیب و مسئله ظرفیت باربری که در آن جابجایی به صورت نموی و تحت خصوصیات ثابت مصالح اعمال می‌شود را نشان می‌دهد. با توجه به نوع خاک، هر خاک با توجه به خصوصیات مقاومتی خاک تحت زاویه اصطکاک مختص خود پایدار می‌ماند. روش‌های مختلفی برای یافتن پارامترهای مقاومتی خاک و به تبع پایداری شیب وجود دارد، این روش‌ها شامل روش‌های آزمایشگاهی، استفاده از

نرم افزارهای GEOSLOPE و... یا با استفاده از کدهای مشخص در برنامه‌های مختلف، زاویه اصطکاک داخلی را برای خاک‌های مختلف می‌توان محاسبه کرد. در این پژوهش، کد نوشته‌شده در برنامه Matlab برای محاسبه FS و زاویه شیب بکارگرفته شده است. در طی روند تحلیل، با کدنویسی در برنامه Matlab، بار وزن با انتگرال‌گیری در سطح المان‌ها و با توجه به مقدار در نظر گرفته شده برای وزن حجمی مصالح، حاصل شده و در طی یک نمو به مسئله اعمال می‌شود. پس از آن یک حلقه کاهش مقاومت در برنامه نوشته می‌شود که به صورت تدریجی مقاومت خاک را کم کرده تا گسیختگی حاصل شود. ضریب‌های که به واسطه آن‌ها این کاهش مقاومت صورت می‌گیرد در بردار SRF قرار می‌گیرند. معمولاً گسیختگی طی استفاده از چندین مقدار انتخابی موجود در بردار SRF حاصل می‌شود که کم‌ترین مقدار ایجاد کننده گسیختگی، به عنوان FS تعریف می‌شود. (غلام‌پور، ۱۳۹۷) در این مسئله نیز از المان‌های چهار ضلعی هشت گره‌ای برای شبکه‌بندی دامنه بهره گرفته شده است. در این پژوهش یک رویکرد احتمالی برای پیش‌بینی طرح پایداری شیب براساس داده‌های بدست آمده از اجزا محدود استفاده می‌شود. همچنین مفهوم شبیه‌سازی به کار گرفته شده و شبکه‌ها از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو ساخته می‌شوند (Kalateh & Kheiry, 2023). مفهوم شبیه‌سازی برای بررسی عدم قطعیت موجود در مدل‌سازی است. تمرکز عدم قطعیت در این پژوهش ساختار شبکه عصبی است. متغیرهای تصادفی شامل لایه‌های مخفی و تعداد نورون‌ها در هر لایه هستند که با اجرای چندین شبیه‌سازی، بالاترین دقت پیش‌بینی لایه پنهان مشخص می‌شود.

این مسئله مستلزم ترکیب دقت مدل‌سازی اجزا محدود و شبکه‌عصبی تصادفی است تا بتوان به‌طور کامل تأثیرات عوامل مختلف بر پایداری شیب را پیش‌بینی نمود. در چارچوب پژوهش، مسئله ما در اینجا این است که چگونه می‌توان با ادغام داده‌های دقیق و جامع از اجزای محدود به همراه توانایی‌های پردازشی شبکه عصبی و عدم قطعیت‌های موجود در شبکه یک مدل یکپارچه و پیشرفته برای پیش‌بینی پایداری شیب ایجاد کرد. این مسئله نیازمند بررسی کارایی و دقت در پیش‌بینی‌ها با توجه به ویژگی‌های خاص شیب‌ها و شرایط خاص شیب‌ها و شرایط محیطی متغیر است.

۲- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های محیطی و پارامتری، به یکی از محورهای اصلی مطالعات ژئوتکنیکی تبدیل شده است (Johari & Talebi, 2019). در همین راستا، Johari و Gholampour (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی تصادفی (RANN)، مدلی دقیق برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWCC) تحت شرایط عدم قطعیت ارائه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش، قابلیت بالایی در مدل‌سازی تغییرات فضایی پارامترهای ژئوتکنیکی داشته و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در تحلیل پایداری شیروانی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه این مسیر، Mamata و همکاران (۲۰۲۲) با ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، مدلی بهینه‌سازی شده برای پیش‌بینی پایداری شیب‌های خاکی توسعه دادند. مدل پیشنهادی، پارامترهای کلیدی نظیر زاویه شیب و بارگذاری اضافی را با دقت بالا مدل‌سازی نموده و عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های فاقد فرآیند بهینه‌سازی نشان داده است. همچنین، Meng و همکاران (۲۰۲۱) با تمرکز بر تحلیل سه‌بعدی پایداری شیب و بهره‌گیری از پارامترهای بی‌بعد در چارچوب شبکه‌های عصبی، دقت پیش‌بینی را به‌طور چشمگیری افزایش دادند و ابزار SlopeLab را برای ارزیابی سریع و قابل اعتماد شیروانی‌ها توسعه دادند. برآیند این مطالعات، مبنای نظری مناسبی را برای بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و تحلیل‌های احتمالاتی در بررسی پایداری شیروانی‌ها فراهم ساخته است. پژوهش حاضر نیز با هدف توسعه این رویکرد و تمرکز بر متغیرهای کلیدی مانند ضریب اطمینان (FS) و زاویه شیب، در همین راستا طراحی و اجرا شده است.

در این پژوهش، به منظور افزایش دقت و جامعیت تحلیل و همچنین لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های پارامتری و محیطی، از رویکردی ترکیبی شامل روش لنگر مرتبه اول دوم (FOSM)، شبیه‌سازی مونت کارلو و روش اجزای محدود استفاده شده است. روش لنگر مرتبه اول دوم با بهره‌گیری از مشتقات جزئی تابع حالت حدی نسبت به پارامترهای ورودی در نقطه میانگین، میانگین و واریانس ضریب اطمینان را به صورت کم‌هزینه و مؤثر برآورد می‌کند. همچنین، شبیه‌سازی مونت کارلو با نمونه‌گیری تصادفی از توزیع‌های احتمالی پارامترهای ورودی و اجرای تعداد زیادی تکرار، نقش کلیدی در لحاظ دقیق عدم قطعیت‌ها و ارائه برآوردهای آماری قابل اعتماد دارد. روش اجزای محدود نیز با تقسیم دقیق دامنه خاک به عناصر کوچک‌تر و حل عددی معادلات، امکان مدل‌سازی دقیق رفتار مکانیکی خاک و توزیع تنش و کرنش در ناحیه شیب را فراهم می‌آورد و قادر است رفتار غیرخطی و پیچیده خاک را با دقت بالا در تحلیل لحاظ کند. ترکیب این سه روش در محیط MATLAB، محدودیت‌های تحلیل‌های مجزای پیشین را برطرف ساخته و چارچوبی جامع، دقیق و کاربردی برای بررسی پایداری شیب‌های خاکی فراهم می‌آورد. این رویکرد چندرشته‌ای، دقت پیش‌بینی را به طور قابل توجهی ارتقا داده و به بهبود تصمیم‌گیری‌های مهندسی کمک می‌کند.

۳- روش تحقیق

به منظور پیش‌بینی پایداری شیروانی خاکی، محاسبه FS خاک از روش لنگر دوم مرتبه اول (FOSM) با مدل‌سازی در نرم افزار Matlab بر اساس داده‌های استخراج شده از مدل‌سازی روش اجزای محدود در نرم‌افزار Matlab با استفاده از خصوصیات مکانیکی خاک نظیر وزن حجمی خاک، چسبندگی خاک، مدول الاستیسیته خاک و غیره استفاده گردیده است. محاسبه FS خاک بر اساس عدم قطعیت در معماری ساختار شبکه عصبی به دست آمده است. در نهایت جهت جمع‌بندی و به دست آوردن ساختار بهینه و محاسبه FOSM از شبکه عصبی تصادفی استفاده شده و برای اعتبار سنجی و صحت سنجی مدل از دو مورد مطالعاتی استفاده گردیده است.

در ابتدا به مطالعه و بررسی پایداری شیب در برنامه Matlab پرداخته شده است. پس از آن نسبت به عوامل مؤثر بر پایداری شیروانی‌های خاکی و بازه‌های هر یک توضیح داده شده است. پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز در این پژوهش، به بررسی هندسه اولیه شیب، شبکه‌بندی و مدل رفتاری خاک به‌طور کامل پرداخته شده است. سپس به ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار Matlab پرداخته شده است. پس از آن ساختار شبکه عصبی مصنوعی تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- مدل‌سازی پایداری شیب در برنامه متلب

در ابتدا با کدنویسی در برنامه Matlab، که در این پژوهش از کد روش اجزای محدود استفاده شده است، داده‌های موردنیاز که خصوصیات مکانیکی خاک می‌باشد، در این پژوهش شامل: وزن حجمی (کیلونیوتن بر مترمکعب)، چسبندگی خاک (کیلونیوتن بر مترمربع)، زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته خاک (کیلونیوتن بر مترمربع) و زاویه شیب (درجه) که به‌عنوان ورودی، در نظر گرفته شده است. خروجی مورد نظر، FS خاک است. همان‌طور که در بخش قبل به این موضوع اشاره شد که هر یک از ورودی‌ها دارای بازه‌های مشخص بوده، که به شرح زیر است، جدول ۱. تعداد ۴۰۰۰ داده از روش مدل‌سازی اجزای محدود به دست آمده است.

جدول ۱: بازه‌های خصوصیات مکانیکی خاک

شرح	وزن حجمی (kN/m^3)	چسبندگی خاک (Degree)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (Degree)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته خاک (kN/m^3)	زاویه شیب (Degree)
بازه ورودی	۱۵~۲۲	۰~۳۰	۰~۴۰	۰/۲~۰/۳۵	۲۰۰۰۰~۱۰۰۰۰۰	۱۵~۷۰

۳-۲- معرفی هندسه اولیه شیب، شبکه بندی خاک و مدل رفتاری خاک

در این پژوهش، هندسه دامنه مورد تحلیل بر مبنای ابعاد مشخص و فرض خاکی همگن مدل سازی گردید. شبکه بندی عددی با تعداد المان های معین در راستاهای افقی و عمودی انجام شد تا دقت و پوشش مناسب برای تحلیل پایداری فراهم شود. شرایط مرزی به گونه ای تعریف شد که جابجایی گره ها در برخی اضلاع در راستای افقی و در برخی دیگر در هر دو راستای افقی و عمودی محدود گردید. در فرآیند تحلیل، معیار همگرایی برابر با $0,0001$ و حداکثر تعداد تکرار 500 در نظر گرفته شد. همچنین، جهت ارزیابی پایداری شیب، از شش مقدار مختلف ضریب کاهش مقاومت در بازه $0,1$ تا $1,6$ بهره گیری شد. نتیجه تحلیل مسئله پایداری شیب، تعیین پارامتر FS می باشد. این کمیت برابر با ضریبی است که پارامترهای اصلی مقاومتی یعنی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر آن تقسیم شده و به این ترتیب مقاومت برشی کاهش یافته تا تحت نیروی وزن ثابت، گسیختگی حاصل شود. این موضوع تفاوت موجود میان بررسی مسئله پایداری شیب و مسئله ظرفیت باربری که در آن جابجایی به صورت نموی و تحت خصوصیات ثابت مصالح اعمال می شود را نشان می دهد. در طی روند تحلیل، بار وزن با انتگرال گیری در سطح المان ها و با توجه به مقدار در نظر گرفته شده برای وزن حجمی مصالح، حاصل شده و در طی یک نمو به مسئله اعمال می شود. پس از آن یک حلقه کاهش مقاومت در برنامه نوشته می شود که به صورت تدریجی مقاومت خاک را کم کرده تا گسیختگی حاصل شود. ضریب های که به واسطه آن ها این کاهش مقاومت صورت می گیرد در بردار sff قرار می گیرند. بر این اساس پارامترهای مقاومتی ضریب دار شده خاک که در تحلیل الاستو-پلاستیک وارد خواهند شد، به صورت زیر بیان می شوند: معمولاً گسیختگی طی استفاده از چندین مقدار انتخابی موجود در بردار sff حاصل می شود که کمترین مقدار ایجاد کننده گسیختگی، به عنوان FS تعریف می شود. در این مسئله نیز از المان های چهار ضلعی هشت گره ای برای شبکه بندی دامنه بهره گرفته شده که در برنامه، توابع $geom_d2_emb$ و bc_d2_emb به ترتیب جهت ساخت شبکه و اعمال شرایط مرزی فراخوان شده اند. مدل موهر-کولمب متداول ترین مدل در زمینه ژئومواد، به ویژه خاک ها است. مشخصات این مدل و معیار تسلیم آن معمولاً شامل فرضیه کولمب بوده که رابطه ای خطی بین مقاومت برشی روی یک صفحه و تنش نرمال اعمال شده بر آن مطرح کرده است (غلام پور، ۱۳۹۷).

۳-۳- ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی

در این پژوهش از برنامه Matlab برای ساخت ANN استفاده شده است. مسئله پیش بینی پایداری شیروانی خاکی با دو مدل تعریف شده: مدل اول با ورودی های وزن حجمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته و زاویه شیب، خروجی FS خاک است؛ مدل دوم با ورودی های مشابه به جز FS به جای زاویه شیب، خروجی زاویه شیب می باشد. داده ها شامل 4000 نمونه بوده و به سه دسته آموزش (70%)، اعتبارسنجی (15%) و آزمون (15%) تقسیم شده اند. شبکه ها ساختار جلو رو (Feed Forward) دارند، تابع خطا میانگین مربعات خطا (MSE) است و الگوریتم بهینه سازی پس انتشار (Back Propagation) با بهینه سازی لونیگ-مارکواریت به کار رفته است. تعداد تکرار آموزش برای هر دو مدل 1000 دور بوده است.

۳-۴- ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی تصادفی

در این پژوهش، به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت های مرتبط با ساختار شبکه عصبی، از رویکرد شبکه عصبی مصنوعی تصادفی (RANN) بهره گیری شده است. در این رویکرد، RANN به عنوان ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و روش شبیه سازی مونت کارلو تعریف می گردد؛ بدین صورت که شبیه سازی مونت کارلو برای نمونه گیری تصادفی و تولید ساختارهای مختلف شبکه، شامل تعداد لایه های میانی و تعداد نورون ها در هر لایه به کار گرفته می شود. در فرآیند تصادفی سازی، از توزیع احتمالی یکنواخت به منظور انتخاب مقادیر در بازه های مشخص شده (مطابق با جدول ۲) استفاده شده است. داده های آموزشی شامل 4000 نمونه شبیه سازی شده از طریق تحلیل عددی اجزای محدود بوده که شامل شش پارامتر ژئوتکنیکی کلیدی شامل

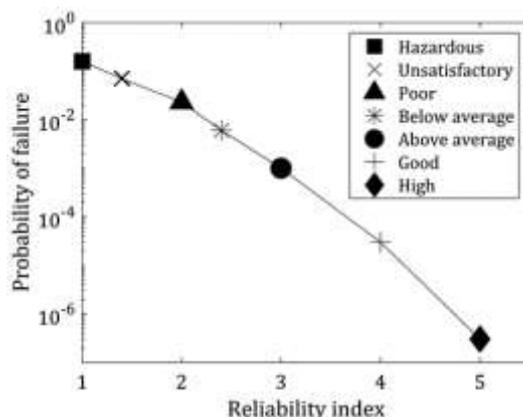
وزن حجمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته و زاویه شیب می‌باشند. دو مدل شبکه طراحی شده است؛ در مدل نخست، ضریب اطمینان (FS) به‌عنوان خروجی و در مدل دوم، زاویه شیب خروجی شبکه است تا بتوان تغییرات هندسی لازم در شیروانی‌ها برای رسیدن به پایداری مطلوب را به دقت شبیه‌سازی کرد. این انتخاب مبتنی بر هدف بررسی میزان تغییر زاویه شیب است که منجر به بهبود پایداری شیروانی‌های طبیعی می‌شود، به ویژه در شرایطی که دیگر روش‌های پایدارسازی مهندسی قابل استفاده نیستند یا محدودیت‌های اجرایی دارند. این رویکرد برای شیروانی‌های کنار جاده، که معمولاً امکان تنظیم و اصلاح زاویه شیب در طراحی آنها وجود دارد، بسیار کاربردی است و امکان ارزیابی اثرات تغییرات هندسی بر FS را فراهم می‌کند. با توجه به اهمیت طراحی مجموعه داده‌های آموزشی در دقت مدل، داده‌های مورد استفاده برای مدل دوم شامل پارامتر ضریب اطمینان (FS) به عنوان ورودی اصلی به همراه سایر ویژگی‌های مهم ژئوتکنیکی مانند وزن حجمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته می‌باشند. این مجموعه داده‌ها با دقت و گستردگی کافی در دامنه مقادیر پارامتری، شرایط متنوع خاک و شیروانی را به‌طور جامع پوشش می‌دهند. بر اساس تحلیل‌های آماری و آزمون‌های اعتبارسنجی صورت گرفته، مجموعه داده‌ها از نظر کمی و کیفی برای آموزش مدل دوم کاملاً مناسب بوده و قابلیت تعمیم نتایج به شرایط واقعی را دارا می‌باشند.

به این ترتیب، مهندسان می‌توانند با تغییر زاویه شیب، ضمن حفظ ملاحظات اجرایی و اقتصادی، به یک طرح پایدار و بهینه دست یابند که ریسک‌های ناشی از ناپایداری شیروانی را به حداقل می‌رساند. در فرآیند انتخاب ساختار بهینه، از دو معیار عددی شامل مقدار میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی (R) بهره گرفته شده است. به‌منظور اطمینان از دقت پیش‌بینی، ساختاری بهینه تلقی گردید که دارای کمترین مقدار MSE و بیشترین مقدار R در داده‌های آزمون باشد. این رویکرد ضمن پوشش دادن عدم قطعیت‌های ساختاری، امکان بهینه‌سازی مؤثر مدل شبکه را نیز فراهم نموده است.

جدول ۲: بازه‌های متغیرهای تصادفی مربوط به ساختار لایه میانی

تعداد لایه‌های میانی (n)	تعداد نورون‌های هر لایه (m)
۱~۲۰	۱~۱۵

ساختار شبکه به صورت تصادفی انتخاب شده و شبکه یاد می‌گیرد که چگونه ورودی‌ها را به خروجی مرتبط کند. همچنین، داده‌هایی برای تست شبکه استفاده شده تا دقت مدل ارزیابی شود. سپس ساختار بهینه شبکه با کمترین خطا (بر اساس MSE) مشخص می‌شود. برای هر دو مدل، دلیل تعیین بازه متغیرهای تصادفی، برقراری تعادل بین دقت و زمان اجرا بوده است. پس از تعیین ساختار بهینه، مدل‌ها در دو مورد مطالعاتی بررسی و اعتبارسنجی می‌شوند. علاوه بر این، برای مدل اول (خروجی FS)، تابع فعال‌سازی خطی شده تا رابطه خطی مناسب برای تحلیل احتمالاتی با روش FOSM ایجاد شود. سپس میانگین و انحراف معیار FS محاسبه شده و شاخص قابلیت اعتماد و احتمال خرابی تعیین می‌گردد. در نهایت سطح عملکرد مورد انتظار براساس شکل ۱ بررسی می‌شود.



شکل ۱: نمودار احتمال شکست نسبت به قابلیت اعتماد (USACE 1999)

۳-۵- تحلیل احتمالاتی لنگر دوم مرتبه اول

این روش به عنوان یکی از ساده‌ترین تکنیک‌ها برای انجام تحلیل‌های احتمالی در مشکلات مهندسی شناخته می‌شود (Wong, 1985). در این رویکرد، پس از شناسایی متغیرهای تصادفی با مقادیر میانگین و انحراف معیار معلوم، میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی با استفاده از رابطه تابع حالت حدی محاسبه می‌شود. این امر منجر به تعیین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان می‌شود.

در روش FOSM، مشتقات جزئی تابع حالت حدی نقش اساسی در برآورد واریانس خروجی ایفا می‌کنند. این مشتقات که از آن‌ها با عنوان ضرایب حساسیت نیز یاد می‌شود، نشان‌دهنده میزان تأثیر هر یک از متغیرهای تصادفی ورودی بر مقدار نهایی تابع حالت حدی هستند.

به طور کلی، تابع حالت حدی به صورت زیر تعریف می‌شود (۱):

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

که در آن، x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای تصادفی (نظیر مقاومت مصالح، بارهای وارده، زاویه اصطکاک و...) هستند.

در روش FOSM، تابع مورد نظر با استفاده از بسط تیلور مرتبه اول در اطراف نقطه میانگین متغیرهای تصادفی

$(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})$ تقریب زده می‌شود (۲):

$$g(x) \approx g(\mu_x) + \sum \left[\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{at \mu_x} * (x_i - \mu_{x_i}) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_1} = 1, \frac{\partial g}{\partial x_2} = 2$$

$$\sigma_g^2 = (1)^2 * \sigma_{x_1}^2 + (2)^2 * \sigma_{x_2}^2 = \sigma_{x_1}^2 + 4\sigma_{x_2}^2$$

واریانس تابع حالت حدی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد (۳):

$$\sigma_g^2 = \sum \left[\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{at \mu_x} * \sigma_{x_i}^2 \right] \quad (3)$$

که در آن:

$\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{at \mu_x}$: ضریب حساسیت نسبت به متغیر تصادفی x_i

σ_{x_i} : انحراف معیار متغیر ورودی x_i

σ_g : انحراف معیار تابع حالت حدی (خروجی)

مثال:

فرض کنید تابع حالت حدی به صورت زیر تعریف شده باشد (۴):

$$g(x_1, x_2) = x_1 + 2x_2 \quad (۴)$$

مشتقات جزئی این تابع به صورت زیر هستند (۵):

$$\partial g / \partial x_1 = 1, \partial g / \partial x_2 = 2 \quad (۵)$$

اگر انحراف معیار متغیرهای ورودی به ترتیب σ_{x_1} و σ_{x_2} باشند، آن گاه (۶):

$$\sigma_g^2 = (1)^2 * \sigma_{x_1}^2 + (2)^2 * \sigma_{x_2}^2 = \sigma_{x_1}^2 + 4\sigma_{x_2}^2 \quad (۶)$$

در مواردی که تابع حالت حدی غیرخطی باشد، معمولاً از بسط تیلور مرتبه اول برای خطی‌سازی رابطه استفاده می‌شود. رابطه خطی‌شده برای تابع حالت حدی (یعنی FS) به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$fs(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (۷)$$

در روش FOSM، میانگین μ_{fs} با استفاده از رابطه (۸) و واریانس σ_{fs}^2 با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شوند:

$$\mu_{fs} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{x_i} \quad (۸)$$

$$\sigma_{fs}^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (۹)$$

که در آن μ_{x_i} و σ_{x_i} به ترتیب نشان دهنده میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی هستند. پس از محاسبه میانگین و انحراف معیار (یعنی جذر واریانس)، شاخص قابلیت اطمینان β و احتمال خرابی P_f به ترتیب با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند:

$$\beta = \frac{\mu_{fs} - 1}{\sigma_{fs}} \quad (۱۰)$$

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (۱۱)$$

که در آن، ϕ نشان دهنده تابع توزیع نرمال استاندارد است.

۴- مورد مطالعاتی اول (تأثیر توام بارش و جاده بر پایداری شیب‌های خاکی)

مطالعه موردی این تحقیق مربوط به شیب کنار جاده در مسیر محور یاسوج به کاکان است. در این مسیر، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، مختصات ارتفاعی چند مقطع از جاده استخراج و تحلیل پایداری شیب در این نواحی انجام شده است، شکل ۲. برای شبیه‌سازی عددی، از مشخصات ژئوتکنیکی خاک محل که در قالب داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده، استفاده گردید. مشخصات مکانیکی خاک در جدول ۳ نشان داده شده است و مشخصات مکانیکی شیب مورد نظر در جدول ۳ آمده است (Rezaei et al. 2024).



شکل ۲: تصویر واقعی از شیب جاده در محور یاسوج به کاکان (Rezaei et al. 2024)

جدول ۳: مشخصات مکانیکی خاک محل مطالعه

جنس خاک	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته خاک	چسبندگی خاک	مدل رفتاری خاک	وزن حجمی خاک	زاویه اصطکاک داخلی	زاویه شیب
GW	۰/۲۵	۹۰۰۰۰ KPa	۱ kN/m ²	Mohr_Coulomb	۲۰ kN/m ³	۴۰۰	۳۰۰

۵- مورد مطالعاتی دوم (Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road, Ethiopia)

مطالعه موردی دوم به بررسی شیب جاده Wozeka-Gidole در کشور اتیوپی اختصاص دارد؛ جایی که در پی اجرای پروژه عمرانی، پدیده رانش زمین در برخی نواحی مسیر مشاهده شده است. برای تحلیل دقیق، نمونه‌های خاک از دامنه‌های آسیب‌پذیر برداشت شده و آزمایش‌های آزمایشگاهی مطابق استاندارد ASTM برای تعیین ویژگی‌هایی همچون حدود آتربرگ، وزن حجمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی، مدول یانگ و نسبت پواسون بر روی آن‌ها انجام گرفت. نتایج این آزمایش‌ها به‌عنوان ورودی در شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزارهای PLAXIS (بر پایه روش اجزای محدود) و SLOPE (بر پایه روش تعادل حدی) انجام شد تا شرایط پایداری منطقه به‌طور جامع مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل ۳ (Bushira et al. 2018)).



شکل ۳: زمین‌شناسی منطقه موردنظر (Bushira et al. 2018)

مشخصات مکانیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی خاک محل مطالعه

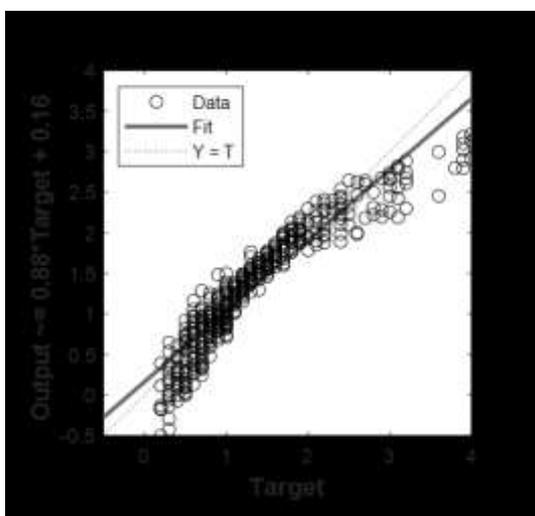
جنس خاک	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته خاک	چسبندگی خاک	مدل رفتاری خاک	وزن حجمی خاک	زاویه اصطکاک داخلی	زاویه شیب
CS	۰/۳	۱۰۰۰۰۰۰ KPa	۱۸ kN/m ²	Mohr_Coulomb	۱۶ kN/m ³	۴۰۰	۴۵۰

در هر دو مورد مطالعاتی هدف پژوهش انجام شده، محاسبه FS خاک می باشد. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از آن‌ها پرداخته می شود. نتایج حاصل با استفاده از دو مدل ساخته شده بررسی و با نتایج به دست آمده در مقالات مقایسه می شود.

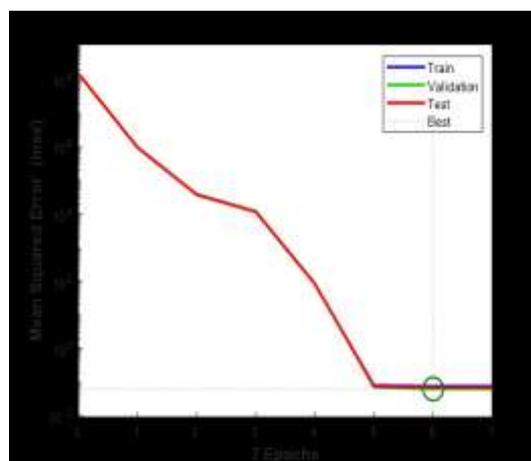
۶- یافته‌ها

۶-۱- نتایج خروجی مدل‌سازی RANN مدل اول (خروجی FS)

در این پژوهش، مدل‌سازی پایداری شیروانی خاکی با استفاده از ساختار تصادفی شبکه عصبی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. متغیرهای ورودی شامل خواص ژئوتکنیکی خاک و هندسه شیب بوده و خروجی مدل، FS در نظر گرفته شد. با اجرای ۱۰,۰۰۰ بار شبیه‌سازی و استفاده از روش مونت کارلو، ساختار بهینه شبکه با کم‌ترین خطا شناسایی گردید. سپس تحلیل قابلیت اطمینان با روش FOSM برای برآورد احتمال خرابی صورت گرفت. نتایج حاصل از نمودارهای خطای MSE شکل ۴ و ضریب همبستگی در مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون، دقت بالا و توانایی تعمیم‌پذیری مدل را تأیید کردند شکل ۵؛ به طوری که ضریب همبستگی در تمامی مراحل بیش از ۰,۹۳ گزارش شده و پراکندگی داده‌ها در نزدیکی خط برابری قرار داشت، که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در پیش‌بینی رفتار شیروانی است.



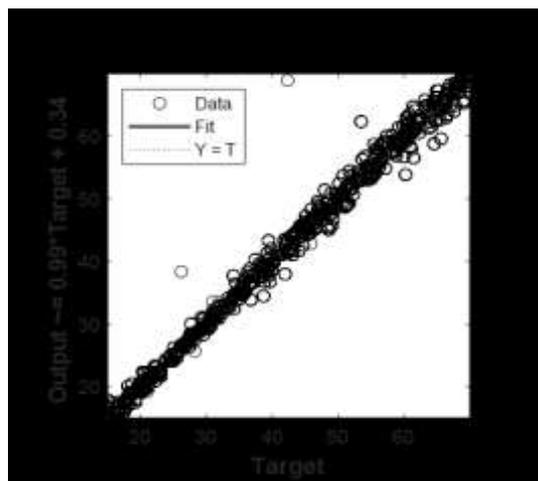
شکل ۵: نمودار رگرسیون (R) مدل اول



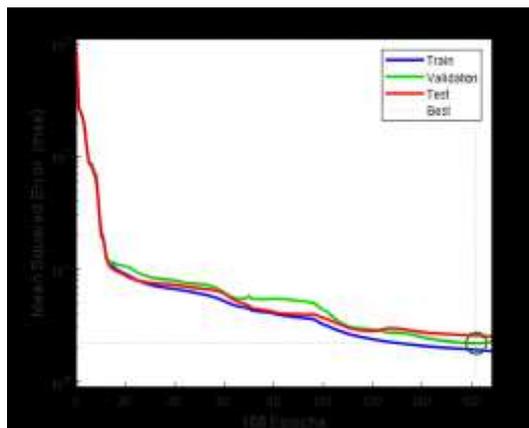
شکل ۴: میزان خطا (MSE) مدل اول

۶-۲- نتایج خروجی مدل‌سازی RANN مدل دوم (خروجی زاویه شیب)

در مدل دوم، خروجی شبکه عصبی زاویه شیب خاک در نظر گرفته شد و با لحاظ عدم قطعیت در ساختار شبکه، مدل‌سازی در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفت. داده‌های ورودی شامل خواص مکانیکی خاک و هندسه شیب بوده و تابع فعال‌سازی غیرخطی از نوع سیگموئید انتخاب شد. با اجرای ۱۰,۰۰۰ بار شبیه‌سازی و بهره‌گیری از روش مونت کارلو، ساختار بهینه‌ای با پنج لایه پنهان و آرایش گره‌ای مشخص به عنوان کم‌خطاترین ساختار شناسایی شد. ارزیابی مدل با استفاده از نمودارهای MSE شکل ۶ و پراکندگی داده‌ها در مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون نشان داد که ضریب همبستگی (R) در همه مراحل بسیار بالا و نزدیک به ۱ بوده است (بیش از ۰,۹۹) شکل ۷، که بیانگر دقت بسیار بالای مدل و توانایی آن در پیش‌بینی صحیح زاویه شیب در شرایط مختلف می باشد.



شکل ۷: نمودار رگرسیون (R) مدل دوم



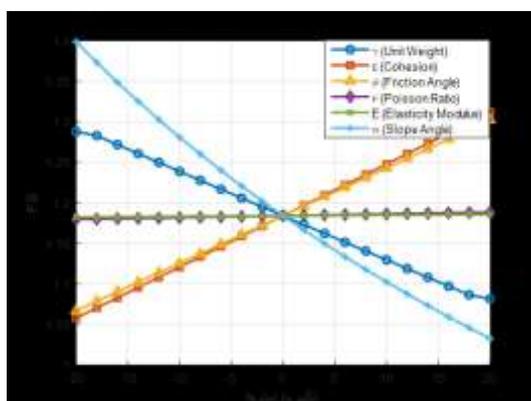
شکل ۶: میزان خطا (MSE) مدل دوم

۳-۶- استفاده از SVM به عنوان معیار مقایسه برای مدل RANN

به منظور ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی تصادفی و سنجش قابلیت آن در پیش‌بینی ضریب اطمینان شیب، در یکی از نمونه‌های مورد بررسی، از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز به عنوان یک روش مقایسه‌ای استفاده شد. این بررسی با هدف اطمینان از صحت عملکرد مدل پیشنهادی انجام گرفت و نتایج حاصل از دو رویکرد، در بخش نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۴-۶- تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis)

در ادامه به بررسی تحلیل حساسیت برای مدل ساخته شده در RANN پرداخته شده است. برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی بر پایداری شیب، یک تحلیل حساسیت انجام شد که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. در این نمودار، FS در برابر تغییرات نسبی پارامترهای اصلی مدل شامل وزن مخصوص واحد حجم (γ)، زاویه شیب (α)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش مقادیر پارامترهای مقاومت برشی (C و ϕ) منجر به افزایش FS می‌شود، در حالی که افزایش γ و α کاهش نسبی FS را به دنبال دارد. تغییرات E و ν تأثیر محدودی بر FS نشان داده و روند تقریباً ثابتی دارند. این نتایج بیانگر اهمیت بالای پارامترهای مقاومتی در ارزیابی پایداری شیب است و بر لزوم تعیین دقیق این پارامترها در فرآیند طراحی تأکید دارد.



شکل ۸: تحلیل حساسیت ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی

۵-۶- نتایج تحلیل احتمالاتی FS برای مورد مطالعاتی اول

در این بخش، با استفاده از داده‌های ورودی مشخص شده در جدول ۳، آموزش مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی FS شیب خاک انجام گرفت. در این مدل، تابع فعال‌سازی از نوع خطی انتخاب شد و پس از اعمال ورودی‌ها و اجرای شبکه، FS پیش‌بینی شد. به‌منظور کاهش خطای مدل، ساختار بهینه شبکه از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰,۰۰۰ تکرار تعیین گردید. این ساختار بهینه شامل پنج لایه پنهان با تعداد گره‌های به ترتیب ۵، ۱، ۱۳، ۸ و ۱۴ بوده که مربوط به ساختار شماره ۳۳۲۷ می‌باشد. در ادامه، جهت بررسی قابلیت اطمینان نتایج مدل، روش FOSM نیز اعمال گردید تا شاخص‌های آماری مورد نیاز برای تحلیل احتمال خرابی استخراج شود. ابتدا باید برای هر یک از پارامترهای ورودی شبکه میانگین و انحراف معیار مشخص شود جدول ۵. تحلیل احتمالاتی فقط برای مدل اول انجام شده است.

جدول ۵: میانگین و انحراف معیار پارامترها

وزن حجمی خاک (γ)	چسبندگی خاک (C)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ)	نسبت پواسون (ν)	مدول الاستیسیته خاک (E)	زاویه شیب (α)
۲۰	۱	۴۰	۰/۲۵	۹۰۰۰۰	۳۰
۲	۰/۵	۵	۰/۰۵	۲۰۰۰	۱۰

فرمول خطی به‌دست آمده برای FS خاک به صورت فرمول ۱۲ می‌باشد. در واقع همان فرمول خطی به‌دست آمده از شبکه عصبی بهینه است.

تابع FS خاک رابطه (۱۲):

$$FS = 0.0428 * C - 0.0256 * a + 0.0000001 * E + 0.0390 * f - 0.0272 * g - 0.0984 * u + 1.5081 \quad (12)$$

تابع حالت حدی رابطه (۱۳):

$$g = FS - 1 = (0.0428 * C - 0.0256 * a + 0.0000001 * E + 0.0390 * f - 0.0272 * g - 0.0984 * u + 0.5081) \quad (13)$$

میانگین تابع حالت حدی (μ_g) رابطه (۱۴):

$$\begin{aligned} \mu_g &= (a_0 + a_1 * \mu_C + a_2 * \mu_a + a_3 * \mu_E + a_4 * \mu_f + a_5 * \mu_g + a_6 * \mu_u) \\ &= 0.5081 + 0.0428 * 1 - 0.768 * 0.0000001 * 90000 + 1.56 * 0.0390 - 0.0272 * 40 - 0.0984 * 20 = 0.7925 \end{aligned} \quad (14)$$

واریانس تابع حالت حدی (σ_g^2) رابطه (۱۵):

$$\sigma_g^2 = A^T * M * A \quad (15)$$

$$A^T = [0.0428 \quad -0.0256 \quad 0.0000001 \quad 0.0390 \quad -0.0272 \quad -0.0984]$$

$$M = \begin{bmatrix} (0.5)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (10)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (2000)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (5)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (2)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (0.05)^2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.0428 \\ -0.0256 \\ 0.0000001 \\ 0.0390 \\ -0.0272 \\ -0.0984 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_g^2 = A^T * M * A = 0.1071$$

انحراف معیار تابع حالت حدی (σ_g) رابطه (۱۶):

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_g^2} = \sqrt{0.1071} = 0.3274 \quad (16)$$

شاخص قابلیت اعتماد تابع حالت حدی (β_g) رابطه (۱۷):

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{0.7925}{0.3274} = 2.42 \quad (17)$$

احتمال وقوع خرابی تابع حالت حدی (P_f) رابطه (۱۸):

$$P_f = \varphi(-\beta) = \varphi(2.42) = 0.0078 \quad (18)$$

برای محاسبه مقدار احتمال وقوع خرابی از کدنویسی در برنامه Matlab استفاده شده است. پس از محاسبه مقدار احتمال شکست، سطح عملکرد مورد انتظار را بررسی کرده و از نمودار احتمال شکست نسبت به قابلیت اعتماد، شکل ۱، نیز استفاده گردیده و نتایج حاصل طبق نمودار نشان می‌دهد که، سیستم عملکردی بیش‌تر از حد متوسط دارد.

نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی برای مورد مطالعاتی اول به شرح جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶: محاسبه لنگر دوم مرتبه اول

واحد	انحراف معیار	میانگین	شاخص قابلیت اعتماد	احتمال وقوع خرابی
FOSM	۰/۱۰۷۱	۰/۷۹۲۵	۲/۴۲	۰/۰۰۷۸

در مورد مطالعاتی اول، برای مدل اول که خروجی FS بوده است، علاوه بر استفاده از مدل شبکه عصبی تصادفی، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز برای تحلیل داده‌ها به کار گرفته شد. خروجی حاصل از مدل SVM برای این مورد، مقدار FS را برابر با ۱،۸۶ پیش‌بینی کرد. این تحلیل با هدف بررسی دقت و کارایی مدل‌های مختلف در تخمین مقدار FS انجام شده است.

۶-۶- نتایج مدل دوم (زاویه شیب) برای مورد مطالعاتی اول

پس از وارد کردن ورودی‌ها به شبکه آموزش دیده، برنامه را اجرا کرده تا زاویه شیب پیش‌بینی شده توسط شبکه، به دست آید، در این مطالعه زاویه شیب پیش‌بینی شده توسط شبکه، با در نظر گرفتن FS، ۱،۵ طبق آیین نامه آشتو، برابر ۳۷/۲۵ درجه می‌باشد، که این زاویه پیشنهادی به‌عنوان طرح بهینه پایدار است.

در مورد مطالعاتی دوم، که هدف پیش‌بینی زاویه شیب پایدار بوده است، پس از طراحی مدل شبکه عصبی تصادفی، از الگوریتم SVM نیز به‌عنوان روش مقایسه‌ای استفاده شد. مدل SVM در این مورد، مقدار زاویه شیب را برابر با ۱۹،۹۷ درجه پیش‌بینی نمود. این مقایسه با هدف ارزیابی توان مدل‌ها در برآورد دقیق زاویه شیب انجام گرفت و امکان سنجش عملکرد مدل پیشنهادی را در کنار یک روش کلاسیک فراهم ساخت.

۶-۷- نتایج تحلیل احتمالاتی FS برای مورد مطالعاتی دوم

پس از وارد کردن ورودی‌ها به شبکه آموزش دیده، برنامه را اجرا کرده تا FS خاک پیش‌بینی شده توسط شبکه، به دست آید، تحلیل احتمالاتی فقط برای مدل اول انجام شده است. در این مطالعه مشخصات لنگر دوم، به صورت جدول ۷ تعریف می‌گردد:

جدول ۷: میانگین و انحراف معیار پارامترها

زاویه شیب (α)	مدول الاستیسیته خاک (E)	نسبت پواسون (ν)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ)	چسبندگی خاک (C)	وزن حجمی خاک (γ)	میانگین (μ)
۴۵	۱۰۰۰۰۰۰	۰/۳	۴۰	۱۸/۳۴	۱۶/۱۸	میانگین (μ)
۵	۵۰۰۰۰	۰/۰۳	۵	۵	۲	انحراف معیار (σ)

فرمول خطی به دست آمده برای FS خاک به صورت فرمول ۱۹ می‌باشد. در واقع همان فرمول خطی به دست آمده از شبکه عصبی بهینه است.

تابع FS خاک رابطه (۱۹):

$$FS = 0.0428 * C - 0.0256 * \alpha + 0.0000001 * E + 0.0390 * f - 0.0272 * g - 0.0984 * u + 1.5081 \quad (19)$$

تابع حالت حدی رابطه (۲۰):

$$g = FS - 1 = (0.0428 * C - 0.0256 * a + 0.0000001 * E + 0.0390 * f - 0.0272 * g - 0.0984 * u + 0.5081) \quad (20)$$

میانگین تابع حالت حدی (μ_g) رابطه (۲۱):

$$\begin{aligned} \mu_g &= (a_0 + a_1 * \mu_C + a_2 * \mu_\alpha + a_3 * \mu_E + a_4 * \mu_f + a_5 * \mu_\gamma + a_6 * \mu_\nu) \\ &= 0.5081 + 0.7704 - 1.152 + 0.1 + 1.56 - 0.4325 - 0.0295 = 1.3393 \end{aligned} \quad (21)$$

واریانس تابع حالت حدی (σ_g^2) رابطه (۲۲):

$$\sigma_g^2 = A^T * M * A \quad (22)$$

$$A^T = [0.0428 \quad -0.0256 \quad 0.0000001 \quad 0.0390 \quad -0.0272 \quad -0.0984]$$

$$M = \begin{bmatrix} (5)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (5)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (50000)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (5)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (2)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (0.03)^2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.0428 \\ -0.0256 \\ 0.0000001 \\ 0.0390 \\ -0.0272 \\ -0.0984 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_g^2 = A^T * M * A = 0.1071$$

انحراف معیار تابع حالت حدی (σ_g) رابطه (۲۳):

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_g^2} = \sqrt{0.1034} = 0.3217 \quad (23)$$

شاخص قابلیت اعتماد تابع حالت حدی (β_g) رابطه (۲۴):

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{1.3393}{0.3217} = 4.34 \quad (24)$$

احتمال وقوع خرابی تابع حالت حدی (P_f) رابطه (۲۵):

$$P_f = \varphi(-\beta) = \varphi(-4.34) = 6.8134 \times 10^{-6} \quad (25)$$

برای محاسبه مقدار احتمال وقوع خرابی از کدنویسی در برنامه Matlab استفاده شده است. پس از محاسبه مقدار احتمال شکست، سطح عملکرد مورد انتظار را بررسی کرده و از نمودار احتمال شکست نسبت به قابلیت اعتماد، شکل ۱، نیز استفاده گردیده و نتایج حاصل طبق نمودار نشان می‌دهد که، سیستم دارای عملکرد خوبی است و شیب پایدار و احتمال شکست بسیار کم می‌باشد.

نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی مورد مطالعاتی دوم به شرح جدول ۹ می‌باشد.

جدول ۹: محاسبه لنگر دوم مرتبه اول

واریانس	انحراف معیار	میانگین	شاخص قابلیت اعتماد	احتمال وقوع خرابی
۰/۱۰۲۴	۰/۳۲۱۷	۱/۳۳۹۳	۴/۳۴	$6/8134 \times 10^{-6}$

۶-۸- نتایج مدل دوم (زاویه شیب) برای مورد مطالعاتی دوم

پس از وارد کردن ورودی‌ها به شبکه آموزش دیده، برنامه را اجرا کرده تا زاویه شیب پیش‌بینی شده توسط شبکه، به دست آید، در این مطالعه زاویه شیب پیش‌بینی شده توسط شبکه، با در نظر گرفتن FS ۱,۵ طبق آیین نامه آشتو، برابر ۳۸/۰۲ درجه می‌باشد، که این زاویه پیشنهادی به‌عنوان طرح بهینه پایدار است.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، از روش RANN جهت تحلیل و پیش‌بینی پایداری شیروانی‌های خاکی استفاده شده است. نتایج حاصل از طراحی، آموزش و ارزیابی مدل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱. دو مدل مبتنی بر RANN توسعه داده شد. مدل اول با هدف پیش‌بینی ضریب اطمینان خاک (FS) بر اساس پارامترهای مکانیکی و هندسی خاک شامل وزن حجمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته و زاویه شیب طراحی شد. در مدل دوم، زاویه شیب به‌عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد و پارامتر FS جایگزین زاویه شیب در بین ورودی‌ها گردید. طراحی این دو مدل، امکان بررسی عملکرد شبکه در پیش‌بینی پارامترهای کلیدی مرتبط با پایداری شیروانی را فراهم کرد.
۲. در طراحی ساختار داخلی شبکه عصبی، از رویکرد تصادفی برای تعیین تعداد لایه‌های مخفی و گره‌های هر لایه استفاده شد. این ساختارها پس از اجرای مدل‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفتند و ساختار بهینه برای هر مدل انتخاب گردید. مدل اول دارای پنج لایه میانی با ۵، ۱، ۱۳، ۸ و ۱۴ گره بود، در حالی که مدل دوم نیز شامل پنج لایه میانی با ۵، ۷، ۷ و ۸ گره به دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش پیچیدگی ساختار، لزوماً منجر به بهبود عملکرد مدل نمی‌شود.
۳. برای آموزش شبکه‌ها، از الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت به‌عنوان نسخه بهینه‌شده الگوریتم پس‌انتشار (Backpropagation) استفاده شد. فرآیند آموزش در هر دو مدل به صورت ۱۰۰۰ تکرار انجام شد. ساختار شبکه‌ها از نوع Feed Forward بوده و از تابع خطای میانگین مربعات خطا (MSE) برای ارزیابی عملکرد استفاده گردید.

۴. تعداد کل داده‌های مورد استفاده در این پژوهش ۴۰۰۰ نمونه بود که مطابق با رویه‌های استاندارد، به سه بخش آموزش (۷۰ درصد)، اعتبارسنجی (۱۵ درصد) و آزمون (۱۵ درصد) تقسیم شدند. این تقسیم‌بندی، امکان ارزیابی دقیق عملکرد مدل در مواجهه با داده‌های نادیده را فراهم ساخت.
۵. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای مقاومت برشی خاک شامل چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بیشترین نقش را در افزایش ضریب اطمینان (FS) دارند، در حالی که افزایش وزن مخصوص واحد حجم (γ) و زاویه شیب (α) موجب کاهش FS می‌شود. سایر پارامترها اثر قابل توجهی بر نتایج نداشته و نقش کمتری در پایداری شیب نشان دادند.
۶. مدل‌های توسعه‌یافته بر روی دو مطالعه موردی قرار گرفتند. در مدل اول، که هدف آن پیش‌بینی FS بود، مقدار پیش‌بینی‌شده برای مطالعه موردی اول ۱,۷۹ و برای مورد دوم ۲,۴ به دست آمد، در حالی که مقادیر واقعی از منابع اصلی به ترتیب ۱,۷۲ و ۲,۱ گزارش شده بودند. این نتایج نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی پارامترهای کلیدی می‌باشد. در مدل دوم، زاویه شیب بهینه با فرض مقدار ثابت FS برابر با ۱,۵ (مطابق با آیین‌نامه AASHTO) به ترتیب برای دو مطالعه موردی برابر با ۳۷,۲۵ و ۳۸,۰۲ درجه برآورد شد که عملکرد قابل قبولی از نظر سطح پایداری ارائه داد.
۷. به منظور ارزیابی دقت مدل شبکه عصبی تصادفی (RANN) و سنجش عملکرد آن، از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز به عنوان روش مقایسه‌ای استفاده شد. برای مورد مطالعاتی اول و مدل اول، که هدف پیش‌بینی ضریب اطمینان خاک (FS) بوده است، نتایج حاصل از مدل RANN مقدار ۱,۷۹ را برای FS پیش‌بینی کرد، در حالی که مدل SVM مقدار ۱,۸۶ را ارائه داد. این در حالی است که مقدار واقعی FS در داده‌های گزارش‌شده مقاله ۱,۷۰ بوده است. با توجه به این موضوع که خروجی مدل RANN به مقدار واقعی نزدیک‌تر بوده، می‌توان نتیجه گرفت که دقت پیش‌بینی این مدل در مقایسه با SVM بالاتر است.
۸. در ادامه، برای همان مورد مطالعاتی اول و مدل دوم، که هدف پیش‌بینی زاویه شیب بوده است، مدل RANN مقدار ۳۷,۲۵ درجه و مدل SVM مقدار ۱۹,۹۷ درجه را ارائه دادند. مقدار واقعی زاویه شیب در مقاله برای این مورد ۳۰ درجه گزارش شده است. در این حالت نیز خروجی مدل RANN به مقدار واقعی نزدیک‌تر است، در حالی که خروجی مدل SVM اختلاف بیشتری با مقدار واقعی دارد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبکه عصبی تصادفی در هر دو مدل بررسی‌شده از دقت و قابلیت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش SVM برخوردار است.
۹. در ارزیابی عملکرد مدل‌ها، مشخص شد که مدل اول با استفاده از تابع فعال‌سازی خطی و مدل دوم با تابع سیگموئید، هر دو توانسته‌اند دقت مناسبی در پیش‌بینی داده‌ها داشته باشند. به‌ویژه مدل دوم، با توجه به نوع خروجی مورد نظر، توانست در تخمین زاویه شیب با دقت بالا عمل کند.
۱۰. در ادامه، به منظور بررسی سطح ایمنی و قابلیت اعتماد مدل‌ها، از روش تحلیل قابلیت اعتماد FOSM استفاده شد. با محاسبه میانگین، انحراف معیار، شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست، مشخص شد که روش ترکیبی شبکه عصبی تصادفی و تحلیل قابلیت اعتماد، می‌تواند به ارزیابی کمی ریسک در پایداری شیروانی‌ها کمک کند. در مورد مطالعاتی اول سیستم عملکردی بیش‌تر از حد متوسط و در مورد مطالعاتی دوم، به عنوان سطح عملکرد خوب طبقه‌بندی شد و احتمال شکست در سطح پایین ارزیابی گردید.
- در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که روش RANN با بهره‌گیری از ساختار تصادفی و انعطاف‌پذیر، توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان پارامترهای مؤثر در پایداری شیروانی‌های خاکی دارد. همچنین ترکیب آن با تحلیل قابلیت اعتماد، چارچوبی قدرتمند و قابل اعتماد برای تحلیل‌های احتمالاتی فراهم می‌سازد و می‌تواند به عنوان یک ابزار تحلیلی مؤثر در مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گیرد.

۸- محدودیت ها و پیشنهادات برای تحقیقات آتی:

مطالعات موردی ارائه شده در این پژوهش، کارایی و دقت روش پیشنهادی را در ارائه تخمینی سریع و قابل قبول از پایداری شیب نشان داده‌اند. با این وجود، برخی محدودیت‌های مدل توسعه یافته وجود دارد که لازم است در تفسیر نتایج به طور شفاف مدنظر قرار گیرند:

۱. نخست، مدل بر پایه تحلیل‌های دوبعدی بنا شده است؛ این در حالی است که شرایط واقعی اغلب دارای هندسه و رفتار سه‌بعدی هستند. این تفاوت می‌تواند منجر به کاهش دقت نتایج در مقایسه با شرایط میدانی شود.
 ۲. دوم، برخی عوامل کلیدی مؤثر بر پایداری شیب نظیر شرایط آب زیرزمینی، میزان اشباع‌بودن خاک و فرآیندهای هوازگی در مدل‌سازی لحاظ نشده‌اند، در حالی که این عوامل می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد واقعی شیب ایفا کنند.
 ۳. سوم، روش FOSM به کار رفته در تحلیل احتمالاتی، بر پایه خطی‌سازی تابع حالت حدی است. این فرض، اگرچه ساده‌سازی محاسبات را ممکن می‌سازد، ممکن است در شرایطی که رفتار سیستم شدیداً غیرخطی است، موجب کاهش دقت نتایج احتمالاتی شود.
 ۴. افزون بر این، عملکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی به دقت و کیفیت داده‌های اولیه (چه واقعی و چه مصنوعی) وابسته است و هرگونه ضعف در داده‌ها می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.
 ۵. علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده، مدل حاضر قادر به شبیه‌سازی کامل رفتار غیرخطی و پیچیده خاک، از جمله وابستگی به نرخ کرنش، نیست.
۱. از مدل‌سازی سه‌بعدی جهت تولید داده‌های مصنوعی واقع‌گرایانه‌تر استفاده شود.
 ۲. تابع حالت حدی گسترش یابد تا با افزودن مولفه‌هایی نظیر اثرات سطح آب زیرزمینی، شرایط غیراشباع، و تغییرات زمانی خصوصیات خاک، عملکرد دقیق‌تری ارائه دهد.
 ۳. از روش‌های پیشرفته تحلیل احتمالاتی مانند SORM برای ارزیابی دقیق‌تر عدم قطعیت‌ها بهره گرفته شود.
 ۴. تأثیر مدل رفتاری خاک، از جمله رفتار غیرخطی یا وابستگی به نرخ کرنش، در چارچوب مدل لحاظ گردد. این اقدامات می‌توانند موجب بهبود دقت و جامعیت روش پیشنهادی در کاربردهای عملی و شرایط پیچیده‌تر شوند.

مراجع

- Qi, Y. (2023). "FLAC3D-based slope stability analysis and calculation". *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 79, 22-29.
- Chakraborty, A., & Goswami, D. (2017). Slope stability prediction using artificial neural network (ANN). *International Journal of Engineering and Computer Science*, 6(6), 21845-21848.
- Bharati, A. K., Ray, A., Khandelwal, M., Rai, R., & Jaiswal, A. (2022). Stability evaluation of dump slope using artificial neural network and multiple regression. *Engineering with Computers*, 38(Suppl 3), 1835-1843.
- Irwan, A. G., & Wiati, I. T. Reconstruction of Natural Slope Stability by Limit Equilibrium Methods and Finite Element Methods. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 16(2), 43-49.
- Johari, A., Javadi, A. A., & Habibagahi, G. (2011). "Modelling the mechanical behaviour of unsaturated soils using a genetic algorithm-based neural network". *Computers and Geotechnics*, 38(1), 2-13.
- Johari, A., & Javadi, A. A. (2010). "Prediction of soil-water characteristic curve using neural network". In *Unsaturated Soils, Two Volume Set* (pp. 461-466). CRC Press.
- Johari, A., & Mousavi, S. (2019). An analytical probabilistic analysis of slopes based on limit equilibrium methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6), 4333-4347.
- Mebrahtu, T. K., Heinze, T., Wohnlich, S., & Alber, M. (2022). Slope stability analysis of deep-seated landslides using limit equilibrium and finite element methods in Debre Sina area, Ethiopia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(10), 403.

Gu, X., Song, L., Xia, X., & Yu, C. (2024). Finite Element Method-Peridynamics Coupled Analysis of Slope Stability Affected by Rainfall Erosion. *Water*, 16(15), 2210.

Gholampour, A. (2018). "Application of the finite element method in geotechnical engineering". Shiraz: Moallemfan-e Farhikhteh Publication (In Persian).

Kalateh, F., & Kheiry, M. (2024). Uncertainty analysis in the simulation of effective seepage flow through earth dams with the Monte Carlo algorithm and machine learning. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 151-170.

Johari, A., & Talebi, A. (2019). Stochastic analysis of rainfall-induced slope instability and steady-state seepage flow using random finite-element method. *International Journal of Geomechanics*, 19(8), 04019085.

Johari, A., & Gholampour, A. (2018). "A practical approach for reliability analysis of unsaturated slope by conditional random finite element method". *Computers and Geotechnics*, 102, 79-91.

Mamata, R. C., Ramliya, A., Yazidb, M. R. M., Kasab, A., Razalib, S. F. M., & Bastamc, M. N. (2022). Slope stability prediction of road embankment using artificial neural network combined with genetic algorithm. *J Kejuruter*, 34(1), 165-173.

Meng, J., Mattsson, H., & Laue, J. (2021). Three-dimensional slope stability predictions using artificial neural networks. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(13), 1988-2000.

US Army Corps of Engineers. (1999). Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies (ETL 1110-2). Washington, DC

Wong, F. S. (1985). First-order, second-moment methods. *Computers & structures*, 20(4), 779-791.

Rezaei, A., Rabeti Moghaddam, M., Zamani Lenjani, M., & Montaseri, H. (2024). "The combined effect of rainfall and road construction on the stability of soil slopes". *Jadeh*, 32(118), 295-312 (In Persian).

Bushira, K. M., Gebregiorgis, Y. B., Verma, R. K., & Sheng, Z. (2018). "Cut soil slope stability analysis along national Highway at wozeka-gidole road, Ethiopia". *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 591-600.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO LRFD bridge design specifications (9th ed.) [Article 11.6.2.3, pp. 11-102 to 11-104]. Washington, DC: Author.