



Reliability analysis of nailing method in the stabilization of urban excavation - A case study of an Excavation in Tehran

S. Ghaffarpour Jahromi^{1*}, N. Shabakhty², P. Tajik¹

¹ Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

² Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Soil nail walls are being used to support vertical excavations below ground level to construct one or two basements. Also, the variability of in-situ soil properties has a significant influence on the stability of the soil nail walls. Conventional methods of slope stability analysis are usually based on limit state analysis and factor of safety criterion. These methods do not take into account the uncertainties. In the present study, global stability, soil-nail pullout failure and nail tensile failure are chosen to study. Cohesion, unit weight and angle of internal friction of soil and ultimate bond strength along the soil nail and yield strength of nail are modeled as random variables. Computations of reliability are performed using MATLAB and RT software. For better understanding, a case of soil nail wall constructed to support a vertical excavation in Tehran is considered for the study and its stability is evaluated for three failure modes. This research aims first to analyze the reliability of nailing walls and validate it using the Monte Carlo simulation method. In addition, the effect of correlation between soil parameters and distribution of random variables on the reliability index was investigated. By sensitivity analysis, the importance of variables in the reliability index was investigated. Then, the reliability index changes were evaluated with respect to the safety factors. Finally, changes in the reliability index were studied by changing the length of nails and the diameter of the nails. According to the assumptions, the correlation between the soil resistance parameters does not have much effect on the pullout mode if the general failure and pulling modes of the nails have a significant effect and should be taken into account in analyzes, as well as the type of distribution of variables affects the reliability index and the choice of distribution type is important.

Review History:

Received: Sep. 01, 2020

Revised: Feb. 15, 2021

Accepted: Oct. 08, 2021

Available Online: Oct. 16, 2021

Keywords:

Reliability index

Monte Carlo simulation

Types of rupture

Excavation, Uncertainty

Correlation

1- Introduction

The use of the nailing method has more than fifty years of experience in reinforcement and stabilization of excavation and earth and rock slopes. Design in this method is inevitable due to the uncertainty of input variables and reliability analysis. The effect of different variables in analysis based on probability theory can be investigated using appropriate functions. Uncertainty means not having accurate and sufficient information on a subject. In all matters relating to engineering sciences, there are uncertainties that must be considered in order to obtain an acceptable result. Uncertainties in geotechnical engineering are very noticeable due to the heterogeneity of materials, laboratory and field errors, as well as insufficient knowledge and information in accurate analysis and modeling. Therefore, analysis of geotechnical problems due to the nature of various variables causing errors and uncertainties should be considered.

Jingyu et al. (2016) evaluated the internal and external stability of reinforced soil walls with reliability analysis. They used point estimation and the Monte Carlo method to

calculate the reliability index, which showed that internal stability functions are the most effective limit function. Random variables were internal friction angle, soil specific gravity, base friction and reinforcement tensile strength [1]. Wang et al. (2017) evaluated the internal and external stability of reinforced soil only in a static state, which showed that the internal friction angle is the most effective parameter and other random variables were soil gravity, surge load, tensile strength and base friction. The correlation between random variables was also examined in this study [2]. Lin et al. (2017) analyzed the reliability of the nailing system in the case of slip rupture in multilayer soils. The results of this study showed that stiff clay is more likely to be damaged than dense sand [3]. Yuan and Lin (2019) developed the limit equilibrium method in the analysis of nailing stability. The results of their research showed that the reliability in the limit equilibrium method is much higher than the usual methods and the soil shear strength has the greatest impact on the reliability index. Also, the standard deviation in variables has a large effect on the reliability index [4]. Hu et al. (2020)

*Corresponding author's email: Saeed_ghf@sru.ac.ir



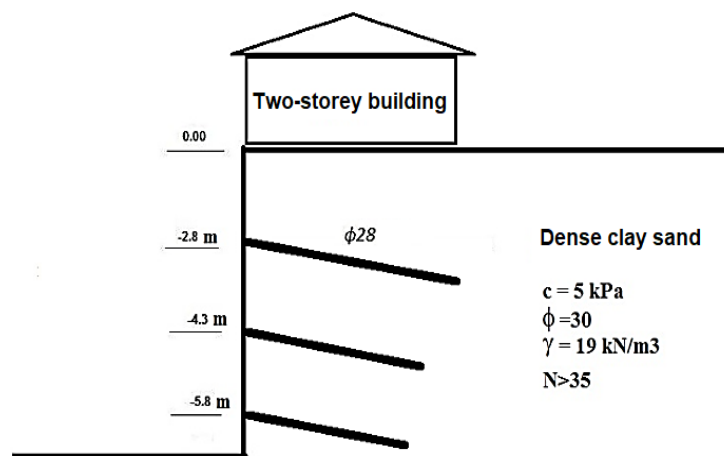


Fig. 1. Section of the nailing of Daroos project

Table 1. Nailing data of a project in the Daroos area of Tehran

Variable	Symbol	Unit	Value
Wall height	H	m	7.8
Rebar diameter	D	mm	28
Borehole diameter	D_{dh}	mm	125
Overload	Q_T	kPa	20
Rebar yield strength	f_y	kPa	400
Horizontal distances of rebars	S_h	m	2
Vertical distances of rebars	S_v	m	1.5

evaluated the calibration of two types of models in estimating the tensile strength of rebar and the analysis of the internal stability reliability of nailing systems. The results of this study showed that conventional design models are not satisfactory due to the presence of random variables and have many errors for economic design [5]. Johari et al. (2020) investigated the reliability analysis of excavations using a random finite element method. The results of this study showed that there is a large correlation between total displacement and lateral deformation. Among the reliability indicators, at least one case is related to rebar rupture. Also, the highest row of rebar had the most critical confidence indicator. The slip surface in different rebars level was variable, which means that the uncertainty of soil parameters has the greatest impact on the coefficient of safety against tensile strength [6].

2- Methodology

In this research, by examining different variables such as internal soil friction angle, soil gravity, reinforcement strength, overhead and wall base friction, excavation reliability is analyzed. In this research, analysis has been done by writing a computational program in MATLAB and

RT software based on reliability theories. In this study, the required geotechnical data from the report of a project located in Tehran (Daroos Pasdaran) have been used. According to the report, the soil layering is dense and homogeneous clay sand that characteristics of shown in Figure 1. Geometric and technical specifications of the nailing system of this project are given in Table 1. The arrangement of the rebars on one side of the excavation is schematically shown in Figure 1.

3- Results and Discussion

The study of excavation stability is one of the problems for geotechnical engineers; that due to the heterogeneous nature of the soil and the uncertainty of variables is not possible to express the stability reliability with a single number and with certainty. In this research, the reliability analysis of the stability of urban excavations by the nailing method was investigated. Variables in this study for reliability analysis include adhesion and internal friction angle of soil, soil gravity, slurry-soil bond strength and fracture capacity of rebar. The average coefficient of variation and type of probabilistic distribution are shown in Table 2.

Table 2. Statistical characteristics of variables [25-20]

Variables	Symbol	Unit	Average	Coefficient of variation	Probabilistic distribution
Adhesion	C	kPa	5	30	Continuous logarithmic distribution
Internal friction angle	φ	$Degree$	30	9	Continuous logarithmic distribution
Soil gravity	γ	kN/m^3	19	5	Continuous logarithmic distribution
Slurry-soil bond strength	q_u	kPa	125	15	Continuous logarithmic distribution
Rebar rupture resistance	f_y	MPa	400	11	Continuous logarithmic distribution

4- Conclusions

The most important achievements of this research can be summarized as follows:

- Variables affecting the reliability and stability index of the nailing system include internal friction angle, adhesion, soil gravity, slurry bond strength, arrangement and distance of rebars, diameter and tensile strength of rebars and overhead that affect external and internal wall stability.

- In the study of overall stability, the correlation between different soil variables has an important effect on the reliability index, so the correlations c - φ , γ - φ and c - γ have the most impact, respectively.

- The most important variable affecting the overall rupture of the slurry-soil bond strength.

- The correlation between adhesion and the internal friction angle of the soil increases the reliability index of rebar elongation and overall rupture.

- Changing the distribution function of variables from logarithmic to non-logarithmic decreases the reliability index in total rupture and tensile rupture of the rebar, but increases in extrusion, which indicates that the type of distribution function of variables has a greater impact on internal stability.

- Total fracture sensitivity analysis showed that adhesion, internal friction angle and slurry bond strengths are the resistant factor and the specific gravity of the load factor.

References

- [1] C. Jingyu, N. Zhihong, Z. Lianheng and L. Wei, Case Study on the Typical Failure Modes and Reliability of Reinforced-Earth Retaining Wall, *Electronic journal of geotechnical engineering*, 21(1) (2016) 305-317.
- [2] L. Wang, M. Powers and W. Gong, Reliability Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls, In *Geo-Risk, Geotechnical Risk Assessment and Management*. GSP 285 (2017) 91-100.
- [3] P. Lin, J. Liu and X. Yuan, Reliability analysis of soil nail walls against external failures in layered ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(1) (2017) 40-56.
- [4] J. Yuan and P. Lin, Reliability analysis of soil nail internal limit states using default FHWA load and resistance models, *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(7) (2019) 783-800.
- [5] Y. Hu, P. Lin, C. Guo and G. Mei, Assessment and calibration of two models for estimation of soil nail loads and system reliability analysis of soil nails against internal failures, *Acta Geotechnica*, 15 (10) (2020) 1-28.
- [6] A. Johari, A. Hajivand and S. Binesh, System reliability analysis of soil nail wall using random finite element method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(6) (2020) 2777-98.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Ghaffarpour Jahromi, N. Shabakhty, P. Tajik, Reliability analysis of nailing method in the stabilization of urban excavation - A case study of an Excavation in Tehran, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 105-108.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18930.7003





تحلیل قابلیت اطمینان روش میخ گذاری در پایدارسازی گودهای شهری- مطالعه موردی یک گود در شهر تهران

سعید غفاریور جهرمی^{۱*}، ناصر شابختی^۲، پرستو تاجیک^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

کلمات کلیدی:

شاخص قابلیت اطمینان
شبیه سازی مونت کارلو
انواع گسیختگی
گودبرداری
عدم قطعیت
همبستگی

خلاصه: امروزه در پایدارسازی گودبرداری خاکی و سنگی به خصوص در محیطهای شهری به طور گسترده از روش میخ گذاری (Nailing) استفاده می شود که عدم قطعیت در متغیرهای مختلف خاک، تأثیر به سزایی بر تحلیل پایداری آن ها دارد. روشهای سنتی در ارزیابی و تحلیل پایداری گودبرداری معمولاً بر پایه معیارهای تجربی و مفاهیم ضریب اطمینان و بیشتر بر روش تعادل حدی استوار است که عدم قطعیتها را در نظر نمیگیرند. در این تحقیق از تحلیل قابلیت اطمینان جهت بررسی سه حالت خرابی در گودهای پایدار شده توسط میخ گذاری استفاده می شود که شامل گسیختگی کلی، بیرون کشیدگی (Pull out) میخ (میلگرد مسلح کننده) و گسیختگی میخ (میلگرد مسلح کننده) می باشد. متغیرهای تصادفی در این تحقیق شامل چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک، قدرت پیوند دوغاب-خاک و مقاومت گسیختگی میلگرد می باشند. در این پژوهش جهت مطالعه موردی از داده های یک گود پایدار شده به روش میخ گذاری نیز استفاده شده و تحلیل قابلیت اطمینان نیز با استفاده از نرم افزارهای معروف MATLAB و همچنین RT انجام شده است. یکی دیگر از اهداف این مطالعه بررسی میزان تأثیر همبستگی متغیرهای مختلف خاک و نوع توزیع متغیرهای تصادفی بر شاخص قابلیت اطمینان بوده و تحلیل حساسیت به منظور تعیین اهمیت متغیرها در شاخص قابلیت اطمینان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد همبستگی بین متغیرهای مقاومتی خاک یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تأثیر چندانی بر بیرون کشیدگی میلگرد ندارد در صورتی که بر ناپایداری کلی گود و گسیختگی میلگرد تأثیر قابل ملاحظه ای دارند که باید در تحلیل ها در نظر گرفته شوند. همچنین این مطالعه نشان داد که نوع تابع توزیع نیز بر شاخص قابلیت اطمینان اثرگذار بوده و در تحلیل و طراحی گودبرداری دارای اهمیت می باشد.

۱- مقدمه

و ناهمسان بودن مصالح ژئوتکنیکی، خطاهای آزمایشگاهی و میدانی و همچنین دانش و اطلاعات ناکافی در حوزه تحلیل و مدل سازی دقیق است. لذا تحلیل مسائل ژئوتکنیکی به دلیل ماهیت متغیرهای مختلف مستعد ایجاد خطا هستند و باید به عدم قطعیتها نیز توجه کرد.

برای اولین بار وو و کرافت^۱ با استفاده از روش های احتمالاتی به تحلیل ضریب ایمنی پایداری شیبهای خاکی و سنگی پرداختند [۱]. جنسک^۲ و همکارانش (۱۹۹۱) با استفاده از روش هاسوفر و لیند قابلیت اطمینان پایداری داخلی دیوارهای مسلح شده با ژئوتکسایل را مورد بررسی قرار دادند [۲]. چان^۳ و همکارانش با استفاده از روش قابلیت اطمینان گشتاور دوم مرتبه

استفاده از روش میخ گذاری^۱ با بیش از پنجاه سال سابقه در مسلح سازی و پایدارسازی گود، شیبهای خاکی و سنگی مورد استفاده مهندسان ژئوتکنیک می باشد. تحلیل و طراحی این روش به علت وجود عدم قطعیت بسیار در متغیرهای ورودی بسیار ضروری و لزوم تحلیل قابلیت اطمینان در ایمنی را اجتناب ناپذیر کرده است. تأثیر متغیرهای مختلف در تحلیل و طراحی بر اساس تئوری احتمالات و با استفاده از توابع مناسب قابل بررسی است. عدم قطعیت به معنی نداشتن اطلاعات کافی و آگاهی در یک موضوع است. در تمام موضوعات مرتبط با علوم مهندسی، عدم قطعیتهایی وجود دارد که برای حصول نتیجه قابل قبول باید مورد بررسی قرار گیرند. عدم قطعیت در حوزه مهندسی ژئوتکنیک نیز بسیار محسوس است که علت آن ناهمگن

1 Wu and Kraft
2 Genske et al.
3 Chun et al.

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Saeed_ghf@ru.ac.ir



مقادیر ضرایب بار و مقاومت را تعیین کنند. مکانیزم‌های خرابی احتمالی در این تحقیق، لغزش، واژگونی و فشار پنجه (ظرفیت باربری) بوده که برای حفظ پایداری در سه حالت خرابی فوق، رسیدن به شاخص قابلیت اطمینان معادل ۳ برای مقادیر مختلف ضریب تغییرات^{۱۰} (CV)، زاویه اصطکاک خاکریز، زبری کف پی، سربار، چسبندگی و شتاب افقی لرزه‌ای نیاز است [۸]. همچنین در تحقیق دیگری توسط وو^{۱۱}، شاخص قابلیت اطمینان در تحلیل پایداری شیب‌های خاکی به روش نمونه‌گیری دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است که نشان داد وجود خاک ضعیف در بستر کف شیب خاکی، خطر لغزش را به شدت افزایش می‌دهد [۹]. باشا و بابو در ادامه مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که مقادیر ضرایب مقاومت خاک برای خرابی لغزش، واژگونی و ظرفیت باربری متفاوت است. می‌توان گفت که میانگین مقدار چسبندگی تأثیر ناچیزی بر ضرایب مقاومت دارد اما تأثیر ضریب تغییرات^{۱۲} زاویه اصطکاک برای تمامی حالات پایداری دیوار قابل توجه است. همچنین همبستگی بین متغیرهای تصادفی در نتایج تحلیل تعیین کننده است [۱۰].

جینگو و همکارانش^{۱۳} در سال ۲۰۱۶ با انجام یک تحقیق پایداری داخلی و خارجی دیوارهای خاک مسلح را با تحلیل قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از روش تخمین نقطه^{۱۴} و مونت کارلو^{۱۵} جهت محاسبه شاخص قابلیت اطمینان استفاده کردند که بررسی آن‌ها نشان داد توابع پایداری داخلی، مؤثرترین تابع حدی هستند. متغیرهای تصادفی مسئله زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک، اصطکاک کف و مقاومت کششی مسلح کننده بودند [۱۱]. ونگ و همکارانش^{۱۶} در یک تحقیق پایداری داخلی و خارجی دیوارهای خاک مسلح را صرفاً در حالت استاتیکی مورد ارزیابی قرار داد که نتیجه این تحقیق نشان داد زاویه اصطکاک داخلی مؤثرترین پارامتر بوده و دیگر متغیرهای تصادفی وزن مخصوص خاک، سربار وارده، مقاومت کششی مسلح کننده و همچنین اصطکاک کف دیوار می‌باشند. همچنین همبستگی بین متغیرهای تصادفی نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. لین^{۱۷} و همکارانش به تحلیل قابلیت اطمینان سیستم میخ‌گذاری در حالت گسیختگی لغزش خاک‌های چند لایه پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد خاک رس سخت نسبت به ماسه متراکم احتمال خرابی بیشتری دارد [۱۳]. یوهان^{۱۸} و همکارانش از محققانی بودند که روش تعادل حدی را

اول^۱، پایداری داخلی دیوارهای خاک مسلح را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با وزن مخصوص خاک و طول مسلح کننده، مؤثرترین پارامتر می‌باشد. همچنین بررسی آن‌ها نشان داد روش مرتبه اول قابلیت اطمینان^۲ که به روش گشتاور دوم مرتبه اول^۳ اصلاح شده نیز موسوم می‌باشد، نتایج بهتری با تابع توزیع غیرنرمال در مسئله ارائه می‌دهد [۳] چالرمیانونت^۴ و همکارش پایداری داخلی را با استفاده از روش ساده بیشاب و شبیه‌سازی مونت کارلو^۵ تحلیل کردند. با این حال، تلاش آن‌ها بر اساس این فرض بنا نهاده شده است که حالت‌های مختلف خرابی مستقل هستند [۴]. محققان به نام لی^۵ شاخص قابلیت اطمینان را با استفاده از روش‌های لنگر اول و لنگر دوم در ارزیابی شیب‌های خاکی مورد بررسی قرار داد. این مطالعه قابلیت اطمینان یک شیروانی خاکی را با زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی متفاوت را در شرایط مختلف احتمال خرابی مورد بررسی قرار می‌دهد [۵]. سید^۶ و همکارانش تحلیل استاتیکی و دینامیکی دیوار خاک مسلح را با استفاده از سه روش مرتبه اول قابلیت اطمینان، گشتاور دوم مرتبه اول و روش تخمین نقطه^۷ انجام دادند که نشان داد زاویه اصطکاک داخلی خاک مهم‌ترین متغیر تصادفی است که بر پایداری داخلی و خارجی دیوار اثر می‌گذارد. در این تحقیق زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک، اصطکاک کف دیوار و مقاومت مسلح کننده به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته و همبستگی بین پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد لغزش مهم‌ترین نوع خرابی خواهد بود [۶].

بابو^۸ و همکارانش به بررسی عدم قطعیت متغیرهای مختلف خاک‌های سست تا متراکم بر پایداری سیستم میخ‌گذاری با تحلیل قابلیت اطمینان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با چسبندگی و وزن مخصوص خاک در تمامی حالات گسیختگی، بیشترین تأثیر را دارد [۷]. باشا و بابو^۹ تحقیقات زیادی روی تحلیل قابلیت اطمینان دیوارهای خاک مسلح داشته‌اند. آن‌ها در یکی از تحقیقات خود از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان استفاده کردند تا محدوده‌های مناسب برای

- 1 First Order Second Moment
- 2 First Order Reliability Method
- 3 Chalermyanont and Benson
- 4 Monte Carlo Simulation
- 5 Le
- 6 Sayed et al.
- 7 Point Estimation Method
- 8 Babu and Singh
- 9 Basha and Babu

- 10 Coefficient of Variation
- 11 Wu
- 12 Jingyu et al.
- 13 Wang et al.
- 14 Lin et al.
- 15 Yuan et al.

محاسبات با نوشتن یک برنامه محاسباتی در نرم‌افزارهای MATLAB و RT بر مبنای نظریه‌های قابلیت اطمینان اقدام شده است.

۲- شاخص قابلیت اطمینان

در سال ۱۹۷۴ هاسوفر^۲ تعریف جدیدی برای شاخص قابلیت اطمینان ارائه کردند که به روش مرتبه اول موسوم است. شاخص قابلیت اطمینان در این روش اولین بار رابطه ۱ قابل بیان است [۱۷].

$$\beta = \frac{g(\mu_{(x_1)}, \mu_{(x_2)}, \dots, \mu_{(x_n)})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_i)^2)}} a^i \quad (1)$$

در این رابطه $g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})$ تابع حالت حدی در مقادیر میانگین متغیرهای تصادفی، σ_i انحراف معیار متغیر μ و a_i ضریب متغیر تصادفی μ در تابع حالت حدی است. وی شاخص قابلیت اطمینان را کوتاه‌ترین فاصله از صفحه اصلی در سیستم نرمال تعریف کرد. در این روش بسط در روی نقطه‌ای به نام "نقطه طراحی" به جای "نقطه میانگین" انجام می‌پذیرد. نقطه طراحی نقطه‌ای است که بر روی سطح شکست ($g = 0$) واقع است و کمترین فاصله را تا مبدأ دارد (شکل ۱). در واقع شاخص قابلیت اطمینان، کوتاه‌ترین فاصله از مبدأ تا تابع شرایط حدی در فضای استاندارد نرمال است [۱۷].

۳- محاسبه شاخص قابلیت اطمینان از روش راکویتز-فیسلر

شاخص قابلیت اطمینان یا احتمال خرابی یک سازه به عنوان "ایمنی" قابل بیان است که در این تحقیق برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان از روش راکویتز-فیسلر^۳ استفاده می‌شود [۱۸]. در این روش از توزیع احتمالاتی متغیرها استفاده شده و ابتدا باید میانگین نرمال و انحراف معیار معادل برای هر متغیر با تابع توزیع متفاوت محاسبه شود.

$$\mu_X^e = X^* - \sigma_X^e [^{-1}(F_X(X^*))] \quad (2)$$

$$\sigma_X^e = 1 / (f_X(X^*)) \phi [^{-1}(F_X(X^*))] \quad (3)$$

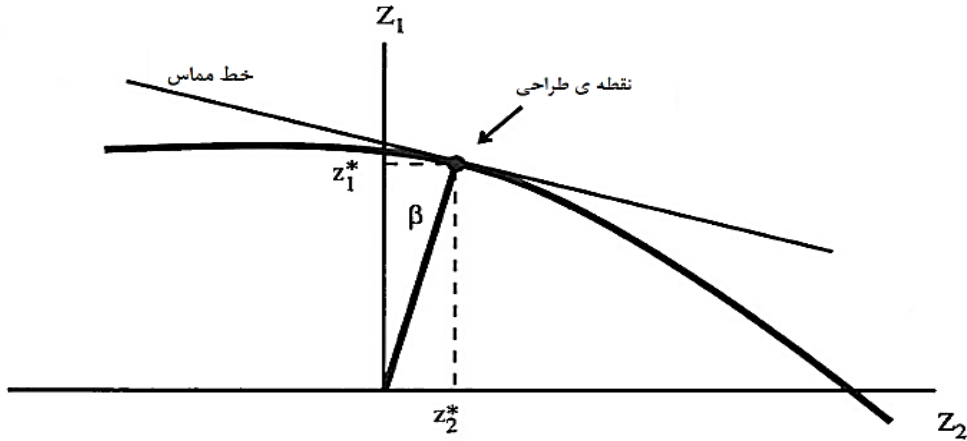
در تحلیل پایداری گود میخ‌گذاری شده ارائه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد ضریب اطمینان در روش تعادل حدی بسیار بیشتر از روش‌های معمول است و مقاومت برشی خاک بیشترین تاثیر را بر ضریب اطمینان و شاخص قابلیت اطمینان دارد. همچنین انحراف معیار در متغیرهای تصادفی تأثیر زیادی بر شاخص قابلیت اطمینان دارد ولی اثر آن بر ضریب اطمینان اندک است [۱۴]. هو^۱ و همکارانش کالیبراسیون دو نوع مدل در تخمین نیروی کششی میلگرد و تحلیل قابلیت اطمینان پایداری داخلی گودهای میخ‌گذاری شده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد مدل‌های متداول طراحی به دلیل وجود متغیرهای تصادفی رضایت بخش نبوده و خطای زیادی از منظر طرح اقتصادی دارند [۱۵]. جوهری و همکارانش تحلیل قابلیت اطمینان گودهای میخ‌گذاری شده با استفاده از روش المان محدود تصادفی را مورد کنکاش قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد وابستگی زیادی بین جابجایی کلی و تغییر شکل‌های جانبی وجود دارد. از بین شاخص‌های قابلیت اطمینان، حداقل یک مورد با گسیختگی میلگرد ارتباط دارد. همچنین بالاترین ردیف میلگرد بحرانی‌ترین شاخص اطمینان دارد. محدوده سطح لغزش در میلگردهای مختلف متغیر است به این معنی که عدم اطمینان پارامترهای خاک بیشترین تأثیر را بر ضریب ایمنی مقاومت در برابر کشش دارد [۱۶].

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص است که ارزیابی تأثیر متغیرهای مختلف بر شاخص قابلیت اطمینان گودهای خاکی و دیوارهای خاک مسلح همچنان مورد علاقه محققان مختلف قرار دارد. لذا در این تحقیق نیز با بررسی متغیرهای مختلف نظیر زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص خاک، مقاومت مسلح کننده‌ها، سربار و اصطکاک کف دیوار به عنوان متغیرهای تأثیرگذار به تحلیل قابلیت اطمینان گودهای خاکی پرداخته می‌شود. به علاوه در تحقیقات گذشته عمدتاً برای ارزیابی قابلیت اطمینان از روش مونت کارلو استفاده شده است که نتایج آن نیز بسیار زمان‌بر است. در سال‌های اخیر روش‌های قابلیت اطمینان مرتبه اول و مرتبه دوم برای انواع توابع شرایط حدی غیرخطی و متغیرهای تصادفی غیرنرمال توسط محققان مختلف استفاده شده است و در این تحقیق نیز به عنوان نوآوری از یک روش توسعه یافته قابلیت اطمینان با شبیه‌سازی مونت کارلو به ارزیابی قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. همچنین تغییرات مقادیر میانگین، همبستگی و ضریب تغییرات متغیرهای مختلف نیز مورد ارزیابی قرار گرفته تا مؤثرترین متغیر با توجه به تحلیل حساسیت محاسبه شود. در این پژوهش تحلیل و

2 Hasofer

3 Rackwitz and Flessler

1 Hu et al.



شکل ۱. شاخص قابلیت اطمینان هاسوفر و لیند [۱۵]

Fig. 1. Hasofer and Lind Reliability Index [15]

$$G_1 = -\frac{\partial g}{\partial Z} \Big|_{\{Z_i^*\}} = -\frac{\partial g}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial Z_i} =$$

$$-\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{\{X_i^*\}} \sigma_{(X_i)} \{G\} = \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

محاسبه مقدار تقریبی شاخص اطمینان با رابطه (۶) قابل بیان

$$\beta = \frac{\{G\}^T \{Z^*\}}{\sqrt{\{G\}^T \{G\}}} \{Z\} = \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

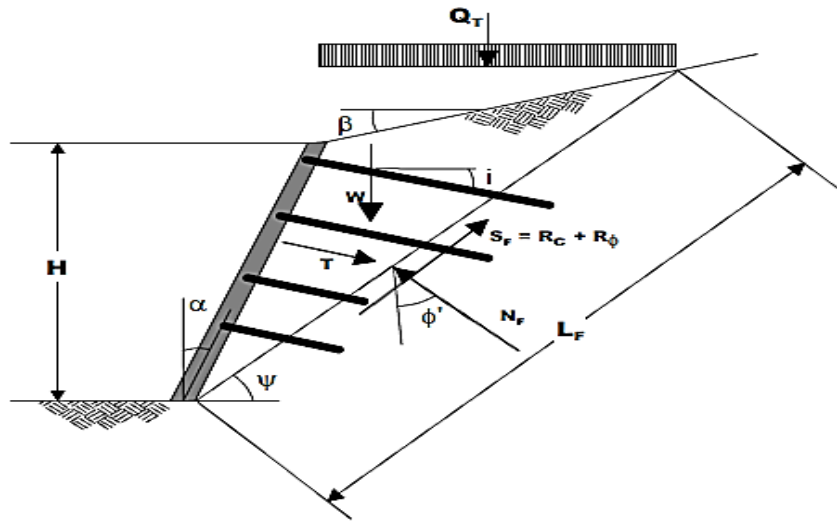
تعیین بردار ضریب حساسیت با استفاده از رابطه (۷):

در این رابطه μ_X^e میانگین نرمال معادل، σ_X^e انحراف معیار نرمال معادل، X^* متغیر تصادفی بر روی مرز خرابی و $F_X(X^*)$ تابع توزیع تجمعی می‌باشد. فلوجارت مراحل گام به گام محاسبه شاخص اطمینان در این روش به صورت زیر است:

- محاسبه تابع حالت حدی و همچنین تعیین تابع توزیع احتمالاتی برای تمامی متغیرها.
- تعیین مقدار اولیه برای نقطه طراحی $\{X_i^*\}$ در $n-1$ متغیر تصادفی X_1 و تشکیل ماتریس اولیه نقطه طراحی.
- محاسبه میانگین و انحراف استاندارد معادل نرمال برای هر نقطه طراحی X_1^* (متغیری که توزیع نرمال ندارد).
- محاسبه مقادیر استاندارد هر یک از متغیرها $\{Z_i^*\}$ در نقطه طراحی $\{X_i^*\}$ با رابطه (۴):

$$Z_i^* = \frac{(X_i^* - \mu_{(X_i)}^e)}{(\sigma_{(X_i)}^e)} \quad (4)$$

- تعریف مشتق جزئی تابع حالت حدی برای تمام متغیرها استاندارد در نقطه طراحی به صورت یک بردار ستونی $\{G\}$:



شکل ۲. تحلیل پایداری کلی در سیستم میخ گذاری [۱۹]

Fig. 2. Analysis of stability in the nailing [19]

۴- حالات حدی در سیستم میخ گذاری

در تحلیل و طراحی سیستم میخ گذاری، دو حالت حدی یعنی مقاومت حدی و بهره‌برداری حدی وجود دارد. مقاومت حدی به گسیختگی یا ریزش متناظر با بارگذاری بیش از مقاومت کل سیستم یا تک تک اجزا اشاره دارد. خرابی محتمل در چنین شرایطی شامل پایداری خارجی، پایداری داخلی و پایداری رویه است. در پایداری خارجی باید گسیختگی کلی، لغزش و فشار پنجه (باربری خاک کف) کنترل شود. در پایداری داخلی، مکانیزم انتقال بار بین خاک-میلگرد-دوغاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که شامل کنترل بیرون کنش میلگرد، لغزش در سطح مشترک میلگرد-دوغاب، گسیختگی کنشی میلگرد و کنترل خمش و برش در میلگردها است. در این تحقیق مهم‌ترین نوع گسیختگی شامل گسیختگی کلی، بیرون کشیدگی میلگرد و گسیختگی کنش میلگرد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که در ادامه به معرفی تابع حالت حدی برای این سه نوع خرابی پرداخته می‌شود [۱۹]. لازم به ذکر است کنترل تنش خمشی و تنش برشی میلگردها در سیستم میخ گذاری در اغلب موارد جوابگوی نیاز سیستم می‌باشد.

۴-۱- گسیختگی کلی

مکانیزم ساده لغزش گوه گسیختگی گوده‌های پایدار شده به روش میخ گذاری در شکل ۲ نشان داده شده است. تابع حالت حدی از تفاضل مقدار

$$\{\alpha\} = \frac{\{G\}}{\sqrt{\{G\}^T \{G\}}} \quad (7)$$

تعیین مقادیر جدید استاندارد هر یک از متغیرها $\{Z_i^*\}$ برای $n-1$ متغیر تصادفی:

$$Z_i^* = \alpha_i \beta \quad (8)$$

تعیین مقدار متناظر نقطه طراحی در مختصات اولیه $\{X_i^*\}$ برای $n-1$ متغیر تصادفی X_i :

$$X_i^* = \mu_{(X_i)}^e + Z_i^* \sigma_{(X_i)}^e \quad (9)$$

حل معادله حالت حدی $g = 0$ برای تعیین متغیر باقی‌مانده.
تکرار گام‌های قبل تا زمانی که مقادیر β و نقطه طراحی $\{X_i^*\}$ با تقریب قابل قبولی محاسبه شوند.

جدول ۱. مشخصات سیستم میخ‌گذاری شده یک پروژه در منطقه دروس شهر تهران

Table 1. Nailing data of a project in the Daroos area of Tehran

مقدار	واحد	نماد	متغیر
۷/۸	m	H	ارتفاع دیوار
۲۸	mm	D	قطر میلگرد
۱۲۵	mm	D _{dh}	قطر گمانه
۲۰	kPa	Q _T	سربار
۴۰۰	kPa	f _y	مقاومت تسلیم میلگرد
۲	m	S _h	فواصل افقی میلگردها
۱/۵	m	S _v	فواصل عمودی میلگردها

در این رابطه D_{DH} بیانگر متوسط قطر گمانه، Q_s تنش ناشی از سربار، L_p طول میلگرد خارج از گوه گسیختگی، S_h فاصله افقی و S_v فاصله عمودی میلگردها و φ_c زاویه اصطکاک در فصل مشترک دوغاب تزریقی و خاک می‌باشند. بنابراین تابع حالت حدی از تفاضل نیروهای محرک و مقاوم در برابر بیرون کشیدگی به دست می‌آید.

۴-۳- گسیختگی کششی میلگرد

گسیختگی کششی میلگرد زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی کششی میلگرد از ظرفیت کششی آن بیشتر باشد. تفاضل ظرفیت کششی میلگرد با نیروی کششی از رابطه ۱۲ قابل محاسبه است:

$$g = [A_t f_y] - [k_a (q_s + \gamma z) s_h s_v] \quad (12)$$

در این رابطه A_t سطح مقطع و f_y مقاومت گسیختگی فولاد مورد استفاده در ساخت میلگرد می‌باشند. تابع حالت حدی گسیختگی از تفاضل نیروی محرک کشش و نیروی مقاوم به دست می‌آید.

۵- داده‌ها و متغیرهای ورودی

در این تحقیق داده‌های ژئوتکنیکی مورد نیاز از گزارش مکانیک خاک یک پروژه واقع در شهر تهران (منطقه دروس پاسداران) استفاده شده است. بر اساس مندرجات گزارش مکانیک خاک، لایه‌بندی خاک از نوع ماسه

بار از مقدار مقاومت با رابطه ۱۰ قابل بیان است.

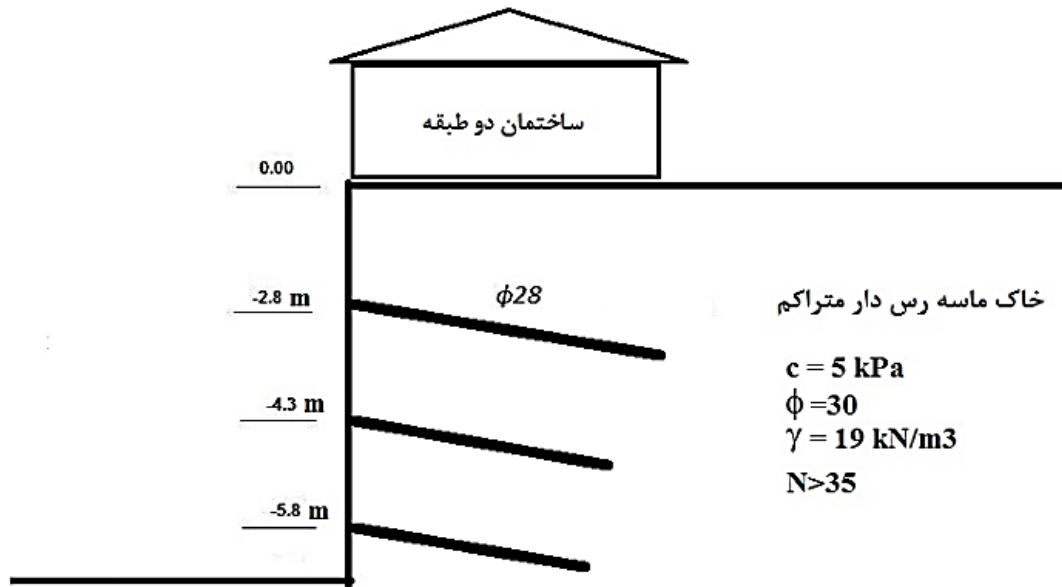
$$g_{Global} = [CL_F + [(1/2\gamma H^2 \cot \psi + Q_T H \cot \psi) \cos \psi + T_{EQ} \sin(\psi - i)] \tan \phi] - [(1/2\gamma H^2 \cot \psi + Q_T H \cot \psi) \sin \psi - T_{EQ} \sin(\psi - i)] \quad (10)$$

در این رابطه C چسبندگی خاک، L_F طول صفحه گسیختگی، Q_T تنش ناشی از سربار، ψ زاویه صفحه گسیختگی با افق، T_{EQ} نیروی برآیند اثر همه میلگردهای اجرا شده تا عمق H، i زاویه قرارگیری میلگرد نسبت به افق و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند.

۴-۲- بیرون کشیدگی میلگرد

بیرون کشیدگی میلگرد در بررسی پایداری داخلی به عنوان مهم‌ترین نوع خرابی شناخته می‌شود. بیرون کشیدگی یک میلگرد زمانی اتفاق خواهد افتاد که نیروی کششی در آن میلگرد بسیار زیاد بوده و طول کافی جهت ایجاد قدرت پیوند مناسب وجود نداشته باشد. برآیند نیروی محرک و مقاوم در این نوع خرابی با رابطه ۱۱ قابل محاسبه است:

$$g = [\pi D_H [C + (Q_T + \gamma z) \tan \phi_c] \times \left(L_{nail} - (H - z) \cot \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right)] - [k_a (Q_T + \gamma z) s_h s_v] \quad (11)$$



شکل ۳. مقطع عرضی دیوار میخ‌گذاری شده پروژه دروس تهران

Fig. 3. Section of nailing of Daroos project

شهری، وابسته به نوع خاک کمتر از ۱۵m بوده و برای اعماق بیشتر استفاده از مهارهای کششی^۱، سیستم دیوار برنی و دیگر روش‌های مشابه توصیه می‌شود. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی تاثیر متغیرهای مختلف بر ضریب ایمنی و پایداری سیستم میخ‌گذاری می‌باشد لذا مشخصات هندسی و فنی یک گود به عنوان مطالعه موردی با مشخصات جدول ۱ مبنای ارزیابی قرار گرفته است.

۶- متغیرهای تصادفی

متغیرهای تصادفی در این تحقیق جهت تحلیل قابلیت اطمینان شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص خاک، مقاومت پیوند دوغاب-خاک و ظرفیت گسیختگی میلگرد می‌باشند که میانگین، ضریب تغییرات و نوع توزیع احتمالاتی مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. این مقادیر با استناد به مقادیر پیشنهاد شده در مراجع و منابع مختلف در این تحقیق انتخاب شده‌اند [۲۵-۲۰].

رس دار متراکم و همگن در نظر گرفته می‌شود که مشخصات آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در کنار گود یک ساختمان قدیمی دو طبقه مسکونی وجود دارد که سربار آن بر اساس کاربری و تعداد طبقات معادل ۲۰ kPa در نظر گرفته می‌شود. همچنین ضریب تغییرات و انحراف معیار داده‌های موجود متناسب با مقادیر اشاره شده در مراجع، منابع و تحقیقات قبلی محققان مطابق با مراجع ۲۰ تا ۲۵ انتخاب و اصلاح شده است [۲۵-۲۰]. در آمار و احتمال، مفهوم ضریب تغییرات یک معیار شناخته شده برای اندازه‌گیری توزیع داده‌های آماری است که از تقسیم انحراف معیار بر میانگین به دست می‌آید. مشخصات هندسی و فنی سیستم میخ‌گذاری این پروژه در جدول ۱ آمده است. آرایش میلگردها در یک طرف گود به صورت شماتیک در شکل ۳ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از روش میخ‌گذاری در گود برداری بسیار عمیق کاربرد چندانی ندارد چرا که با افزایش عمق، قطر و طول میلگردها افزایش و فاصله بین میخ‌ها کاهش می‌یابد که می‌تواند بسیار پرهزینه باشد. همچنین با افزایش عمق گود میزان تغییر شکل‌ها نیز افزایش می‌یابد که در محیط‌های شهری می‌تواند باعث آسیب به ساختمان‌های مجاور گود شود و لذا ایجاد محدودیت می‌نماید. بر این اساس بسیاری از مهندسان عمق توصیه شده برای استفاده از روش میخ‌گذاری در محیط‌های

جدول ۲. مشخصات آماری متغیرهای تصادفی [۲۰-۲۵]

Table 2. Statistical characteristics of variables [20-25]

متغیرهای تصادفی	نماد	واحد	میانگین	ضریب تغییرات	توزیع احتمالاتی
چسبندگی	C	kPa	۵	۳۰	توزیع پیوسته لگاریتمی
زاویه اصطکاک داخلی	φ	$Degree$	۳۰	۹	توزیع پیوسته لگاریتمی
وزن مخصوص خاک	γ	kN/m^3	۱۹	۵	توزیع پیوسته لگاریتمی
مقاومت پیوند دوغاب-خاک	q_u	kPa	۱۲۵	۱۵	توزیع پیوسته لگاریتمی
مقاومت گسیختگی میلگرد	f_y	MPa	۴۰۰	۱۱	توزیع پیوسته لگاریتمی

جدول ۳. مقادیر همبستگی بین متغیرهای مختلف خاک

Table 3. Correlation values between different soil variables

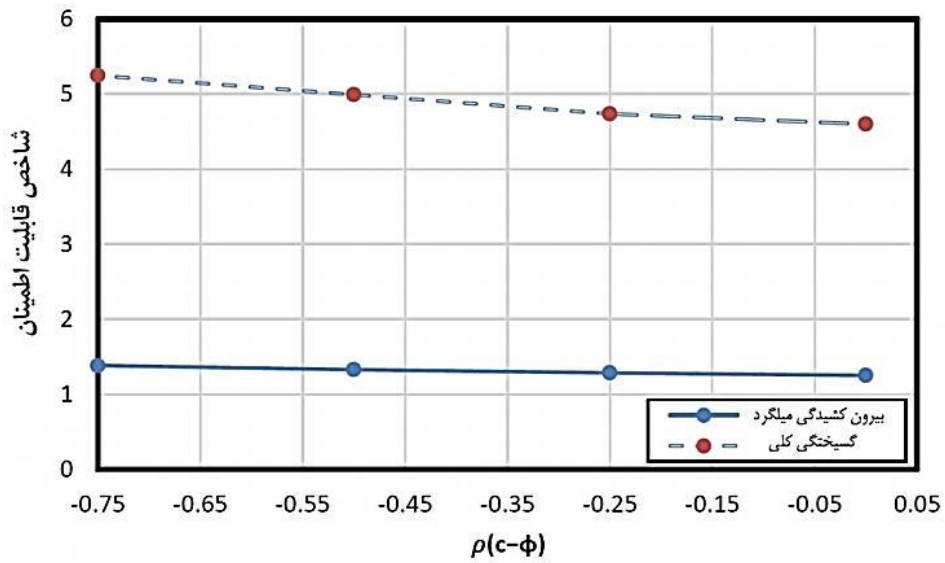
مقدار انتخاب شده در این تحقیق	منبع و مرجع	همبستگی (ρ)	متغیر مورد بررسی
$-0.75 \leq \rho \leq 0$	Babu and Singh (2009) [4]	-0.125 و -0.15	$c - \emptyset$
	Ferreira et al. (2013) [18]	-0.161	
	Lumb (1970) [19]	-0.17 تا -0.137	
$0 \leq \rho \leq 0.75$	Babu and Srivastava (2007) [20]	0.125 تا 0.175	$\emptyset - \gamma$
	Javankhoshdel et al. (2013) [21]	0.17	
	Low and Tang (1997) [22]	0.15	
$0 \leq \rho \leq 0.75$	Babu and Srivastava (2007) [20]	0.125 تا 0.175	$c - \gamma$
	Javankhoshdel et al. (2013) [21]	0.14	
	Low and Tang (1997) [22]	0.15	
	Luo et al. (1974) [23]	0.144	

۷- تاثیر همبستگی بین پارامترهای مختلف خاک بر شاخص قابلیت اطمینان

بین محققان مختلف اتفاق نظر وجود دارد که پارامترهای رفتاری و مکانیکی خاک با یکدیگر همبستگی دارند لذا در نظر گرفتن همبستگی بر شاخص قابلیت اطمینان نیز اثرگذار خواهد بود. ضریب همبستگی یک ابزار آماری برای تعیین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) و شدت ارتباط یک متغیر با متغیر دیگر است. این ضریب مقداری بین ۱ تا -۱ دارد و در صورت

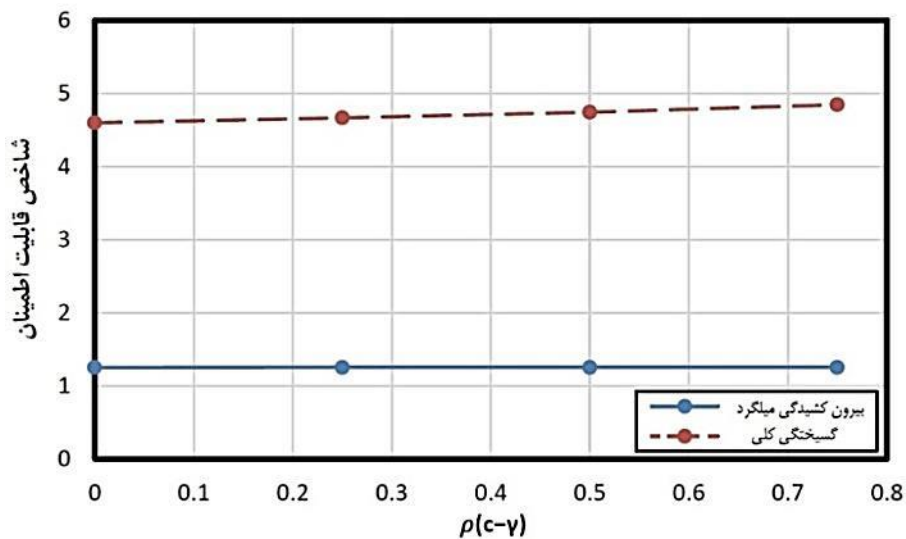
عدم وجود رابطه، مقدار آن صفر خواهد بود. مقادیر مختلف همبستگی بین متغیرهای خاک بر اساس مقادیر پیشنهادی منابع و مراجع مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق همبستگی متناسب با این داده‌های موجود در این جدول انتخاب شده و تأثیر همبستگی پارامترهای مختلف خاک روی شاخص قابلیت اطمینان در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که با تغییر ضریب همبستگی بین چسبندگی



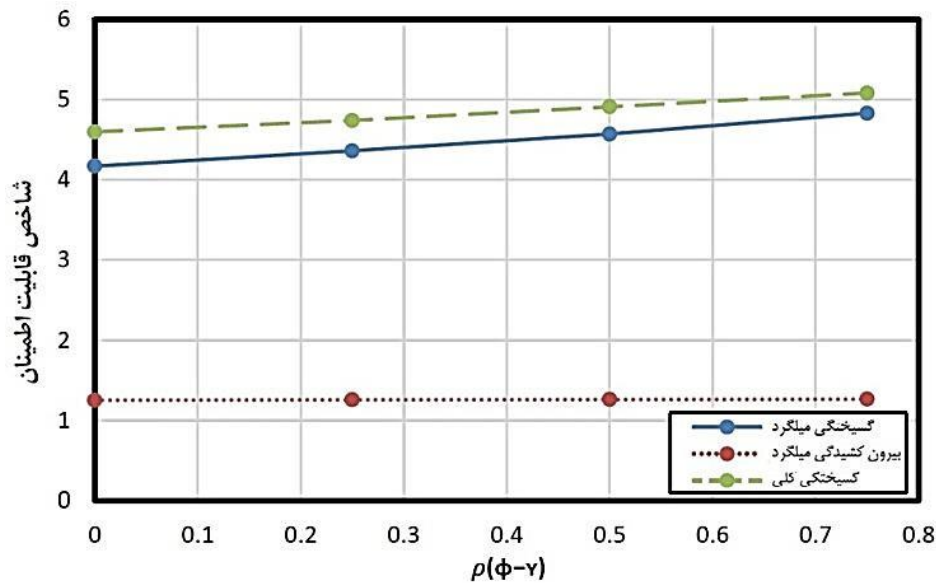
شکل ۴. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به تغییرات همبستگی بین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک

Fig. 4. Changing the reliability index to changes in correlation between internal friction angle and soil adhesion



شکل ۵. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به تغییرات همبستگی بین وزن مخصوص و چسبندگی خاک

Fig. 5. Changing the reliability index to changes in the correlation between gravity and soil adhesion



شکل ۶. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به تغییرات همبستگی بین وزن مخصوص و چسبندگی خاک

Fig. 6. Change in reliability index to changes in correlation between gravity and soil adhesion

داخلی و وزن مخصوص خاک تأثیر چندانی بر شاخص قابلیت اطمینان بیرون کشیدگی نداشته است و بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان خرابی کششی میلگرد دارد.

۸- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت به معنی بررسی تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به متغیرهای تصادفی مانند میانگین و انحراف معیار است که می‌توان با استفاده از آن رتبه‌بندی بین متغیرها را تعیین کرد به طوری که متغیرهای تصادفی با اهمیت بالا بیشتر مورد توجه قرار گرفته و متغیرهایی با اهمیت کمتر را می‌توان از تحلیل احتمالاتی حذف و با قطعیت با آن‌ها برخورد کرد. در این تحقیق از متغیرهای اشاره شده در جدول ۴ برای بررسی تحلیل حساسیت استفاده شده است.

تحلیل حساسیت نسبت به متغیرهای آماری مختلف قابل ارزیابی است که در این تحقیق سه نوع تحلیل حساسیت به شرح زیر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است [۱۶].

$$E_{1(\text{without correlation})} = \frac{-\frac{\partial g}{\partial Z}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial Z}\right)^2}} \quad (13)$$

و زاویه اصطکاک داخلی خاک از -0.25 به 0.75 ، مقدار شاخص قابلیت اطمینان در بیرون کشیدگی میلگرد از $1/29$ به $1/38$ یعنی حدوداً ۷ درصد افزایش یافته است. همچنین شاخص قابلیت اطمینان در گسیختگی کلی از مقدار $4/73$ به $5/24$ به میزان ۱۰ درصد افزایش داشته است. همچنین شکل ۵ بیان می‌کند که شاخص قابلیت اطمینان گسیختگی کلی با افزایش همبستگی با شدت و شیب بزرگتری افزایش یافته است. با تغییر ضریب همبستگی بین چسبندگی و وزن مخصوص خاک از 0.25 به 0.75 ، مقدار شاخص قابلیت اطمینان در حالت بیرون کشیدگی از مقدار $1/252$ به $1/253$ به میزان اندکی افزایش یافته است و شاخص قابلیت اطمینان در حالت گسیختگی کلی از مقدار $4/6$ به $4/84$ حدود ۴ درصد افزایش داشته است. بنابراین همبستگی این دو متغیر تأثیر اندکی بر شاخص قابلیت اطمینان بیرون کشیدگی میلگرد دارد که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. با تغییر ضریب همبستگی بین وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک از 0.25 به 0.75 ، مقدار شاخص قابلیت اطمینان در حالت گسیختگی کششی از مقدار $4/36$ به $4/83$ حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. همچنین شاخص قابلیت اطمینان در حالت بیرون کشیدگی از مقدار $1/256$ به $1/265$ حدود یک درصد افزایش یافته است. به طور مشابه شاخص قابلیت اطمینان تحت گسیختگی کلی از مقدار $4/73$ به $5/08$ به مقدار ۷ درصد افزایش داشته است. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد همبستگی بین زاویه اصطکاک

جدول ۴. متغیرهای ورودی در بررسی تحلیل حساسیت

Table 4. Input variables in sensitivity analysis

متغیرها	واحد	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)	نوع توزیع
φ	degree	۳۰	۹	توزیع پیوسته لگاریتمی
γ	kN/m ³	۱۹	۵	توزیع پیوسته لگاریتمی
C	kPa	۵	۳	توزیع پیوسته لگاریتمی
f_y	kPa	۴۰۰	۱۱	توزیع پیوسته لگاریتمی
q_u	kPa	۱۲۵	۱۵	توزیع پیوسته لگاریتمی
L	m		۶	
H	m		۷/۸	
D_{dh}	mm		۱۲۵	
Q_T	kPa		۲۰	
D	mm		۲۸	
S_h	m		۲	
S_v	m		۱/۵	

[۱۶]. در روابط فوق g بیانگر تابع حدی، Z بیانگر متغیر، β بیانگر شاخص قابلیت اطمینان، μ بیانگر میانگین متغیر تصادفی و σ بیانگر انحراف معیار متغیر تصادفی است. نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای مختلف در جدول ۵ آمده است همچنین شکل‌های ۷ تا ۹ تحلیل حساسیت پارامتر E_1 به صورت نمودار ستونی برای درک بهتر نمایش داده شده است.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهند که در بررسی گسیختگی کلی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و قدرت پیوند دوغاب-خاک با توجه به علامت E_1 به عنوان عامل مقاوم و وزن مخصوص به عنوان عامل بار محسوب می‌شوند. همچنین مهم‌ترین متغیر تصادفی در گسیختگی کلی قدرت پیوند دوغاب-خاک است. بررسی مقادیر E_2 نشان می‌دهند که وزن مخصوص خاک بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان دارد و پس از آن به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و قدرت پیوند دوغاب-خاک تأثیرگذار هستند. همچنین مقادیر E_3 نشان می‌دهند که زاویه اصطکاک داخلی بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان داشته و پس از آن به ترتیب وزن مخصوص، چسبندگی و قدرت پیوند بر شاخص قابلیت اطمینان مؤثر هستند.

در بررسی خرابی ناشی از گسیختگی میلگرد، مقاومت میلگرد و زاویه اصطکاک داخلی با توجه به علامت E_1 به عنوان عامل مقاوم و وزن مخصوص به عنوان عامل بار به حساب می‌آید. همچنین مهم‌ترین متغیر

$$E_2 = \frac{\partial \beta}{\partial \mu x} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta \mu_x} \quad (14)$$

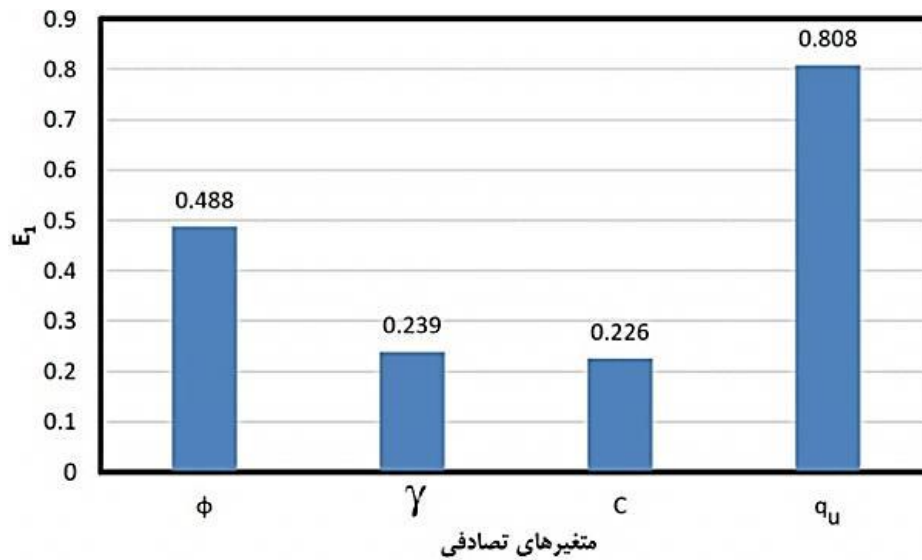
$$E_3 = \frac{\partial \beta}{\partial \sigma x} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta \sigma_x} \quad (15)$$

E_1 بیانگر تأثیر متغیر بر تابع حدی بدون در نظر گرفتن همبستگی و بیانگر سهم نسبی هر متغیر تصادفی بر احتمال خرابی می‌باشد. علامت E_1 نشان دهنده رابطه بین تابع عملکرد و متغیرهای تصادفی می‌باشد که علامت مثبت به این معنی است که متغیر تصادفی از جنس بار و علامت منفی به این معنی است که متغیر تصادفی از جنس مقاومت است. با ضریب حساسیت مثبت تابع حدی با افزایش متغیر تصادفی کاهش می‌یابد و با ضریب حساسیت منفی تابع حدی با افزایش در متغیر تصادفی افزایش می‌یابد. E_2 بیانگر تأثیر تغییرات میانگین متغیر تصادفی بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی است. E_3 بیانگر تأثیر تغییرات انحراف معیار متغیر تصادفی بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی است که مقدار آن همیشه منفی است یعنی هر چه انحراف معیار بیشتر باشد توزیع پهن‌تر و احتمال خرابی نیز بیشتر می‌شود

جدول ۵. تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی

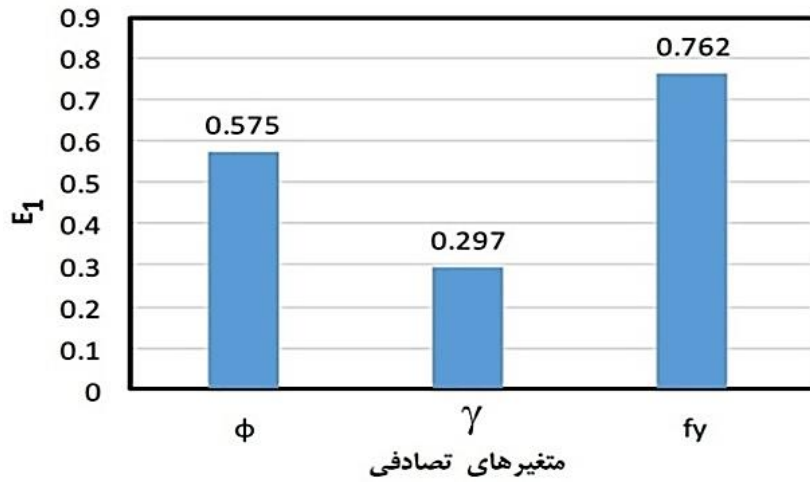
Table 5. Sensitivity analysis of variables

نوع خرابی	تحلیل حساسیت	ϕ	γ	C	q_u	f_y
گسیختگی کلی	E_1	-۰/۴۸۸	۰/۲۳۹	-۰/۲۲۶	-۰/۸۰۸	-
	E_2	۰/۲۱۹	-۰/۲۳۹	۰/۲۱۱	۰/۰۶۸	-
	E_3	-۰/۴۲۰	-۰/۲۶۴	-۰/۱۹۲	-۰/۱۶۵	-
گسیختگی میلگرد	E_1	-۰/۵۷۵	۰/۲۹۷	-	-	-۰/۷۶۲
	E_2	۰/۲۶۰	-۰/۲۹۴	-	-	۰/۰۰۰۰۲
	E_3	-۰/۵۲۶	-۰/۳۶۹	-	-	-۰/۰۰۰۰۵
بیرون کشیدگی میلگرد	E_1	-۰/۹۹۵	۰/۰۱۴	-۰/۰۹۸	-	-
	E_2	۰/۴۱۳	-۰/۰۱۵	۰/۰۷۴	-	-
	E_3	-۰/۴۹۰	-۰/۰۰۰۰۵	-۰/۰۲۶	-	-



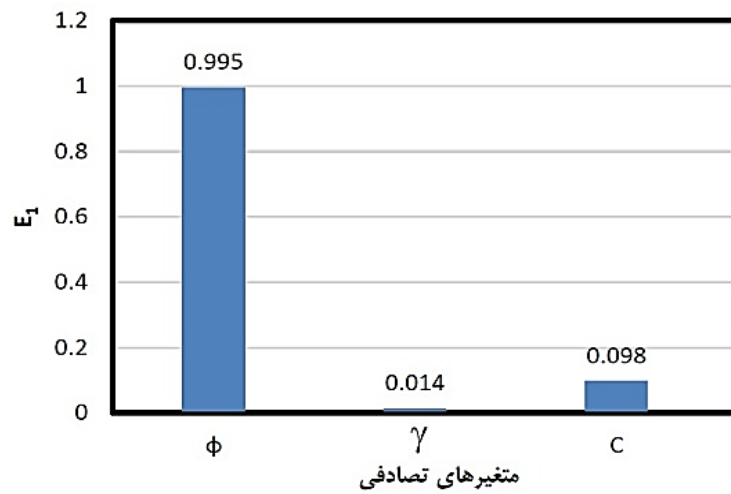
شکل ۷. تحلیل حساسیت E_1 برای خرابی گسیختگی کلی

Fig. 7. Sensitivity analysis of E_1 for total rupture failure



شکل ۸. تحلیل حساسیت E_1 برای خرابی ناشی از گسیختگی میلگرد

Fig. 8. Sensitivity analysis of E_1 for failure due to rebar rupture



شکل ۹. تحلیل حساسیت E_1 برای خرابی ناشی از بیرون کشیدگی میلگرد

Fig. 9. Sensitivity analysis of E_1 for failure due to rebar extrusion

جدول ۶. تأثیر نوع تابع توزیع متغیرهای تصادفی بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال گسیختگی کلی

Table 6. The effect of the type of variable distribution ruction on the reliability index and the probability of total rupture

گسیختگی کلی	تابع توزیع پیوسته لگاریتمی	β	۴/۵۹۶
		P_f	2×10^{-6}
	تابع توزیع پیوسته غیرلگاریتمی	β	۴/۴۷۱
		P_f	۰/۰۰۰۰۰۴

گسیختگی‌های داخلی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۶ و ۷ آورده شده است.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهند که با تغییر تابع توزیع احتمال از لگاریتمی به غیر لگاریتمی، شاخص قابلیت اطمینان در خرابی ناشی از گسیختگی کلی حدوداً ۳ درصد کاهش یافته است. همچنین جدول ۷ نشان می‌دهد که برای میلگرد مورد بررسی که در تراز ۲/۸ متری قرار دارد، شاخص قابلیت اطمینان (β) برای گسیختگی کششی میلگرد، با تغییر تابع توزیع احتمال از لگاریتمی به غیر لگاریتمی حدوداً ۱۲ درصد کاهش یافته است و گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی میلگرد (P_f) تقریباً ۲۵ درصد افزایش یافته است.

۱۰- تأثیر قطر میلگرد بر شاخص قابلیت اطمینان برای خرابی ناشی از گسیختگی کششی

قطر میلگرد یکی از مهم‌ترین متغیرها در طراحی سیستم میخ‌گذاری است که بر تابع حدی خرابی ناشی از گسیختگی کششی میلگرد بسیار تأثیرگذار است. جهت ارزیابی تأثیر این متغیر به منظور یافتن قطر مناسب متناظر با حداقل شاخص قابلیت اطمینان، قطر میلگردها را در ترازهای مختلف، از ۲۰ mm تا ۳۲ mm تغییر داده و شاخص قابلیت اطمینان بر اساس رابطه ۱۲ برای هر یک از حالات محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۸ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نیز نتایج این تحلیل نشان داده شده است. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تغییرات شاخص قابلیت اطمینان با توجه به قطر تقریباً به صورت خطی است. مطابق نتایج جدول ۸ می‌توان قطر متناسب با "شاخص قابلیت اطمینان هدف" در ترازهای مختلف را محاسبه و طرح بهینه را ارائه کرد که نتایج آن در جدول ۹ آمده است.

تصادفی در این نوع خرابی مقاومت کششی میلگرد است. از مقادیر E_2 به این نتیجه می‌رسیم که وزن مخصوص خاک بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان دارد و پس از آن به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی میلگرد تأثیرگذار هستند. همچنین از مقادیر E_3 قابل مشاهده است که زاویه اصطکاک داخلی بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان داشته و پس از آن به ترتیب وزن مخصوص و مقاومت کششی میلگرد بر شاخص قابلیت اطمینان مؤثر هستند. از طرفی مقادیر E_2 و E_3 برای مقاومت کششی میلگرد ناچیز هستند یعنی تأثیر میانگین و انحراف معیار این متغیر بر شاخص قابلیت اطمینان اندک است که می‌توان این متغیر را ثابت فرض کرد. در بررسی خرابی ناشی از بیرون کشیدگی میلگرد با توجه به علامت E_1 ، چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی به عنوان عامل مقاوم و وزن مخصوص به عنوان عامل بار به حساب می‌آید. به علاوه مهم‌ترین متغیر تصادفی در این نوع خرابی زاویه اصطکاک داخلی خاک است. مقادیر E_2 نشان داد زاویه اصطکاک داخلی خاک با اختلاف چشمگیری نسبت به دیگر متغیرها بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان دارد. همچنین مقادیر E_3 نشان می‌دهند که زاویه اصطکاک داخلی و پس از آن چسبندگی و وزن مخصوص بیشترین تأثیر بر شاخص قابلیت اطمینان دارند.

۹- تأثیر تابع توزیع احتمال بر شاخص قابلیت اطمینان

در اکثر تحقیقات گذشته متغیرهای تصادفی دارای تابع توزیع پیوسته لگاریتمی و یا تابع توزیع پیوسته غیر لگاریتمی هستند. در این تحقیق در راستای بررسی نوع تابع توزیع احتمال بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال گسیختگی، این دو نوع تابع توزیع احتمال در گسیختگی کلی و

جدول ۷. تأثیر نوع تابع توزیع متغیرهای تصادفی بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی‌های داخلی

Table 7. The effect of the type of distribution function of variables on the reliability index and the probability of internal failures

تراز میلگرد (متر)	توزیع تابع احتمال	-	گسیختگی کششی میلگرد	بیرون کشیدگی میلگرد
۲/۸	تابع توزیع پیوسته لگاریتمی	β	۸/۹۳۴	۱/۲۵۲
		P_f	$2/0.5 \times 10^{-10}$	۰/۱۰۵
	تابع توزیع پیوسته غیرلگاریتمی	β	۷/۸۱۵	۱/۵۶۸
		P_f	$2/7 \times 10^{-10}$	۰/۰۵۸

جدول ۸. شاخص قابلیت اطمینان خرابی ناشی از گسیختگی کششی میلگرد

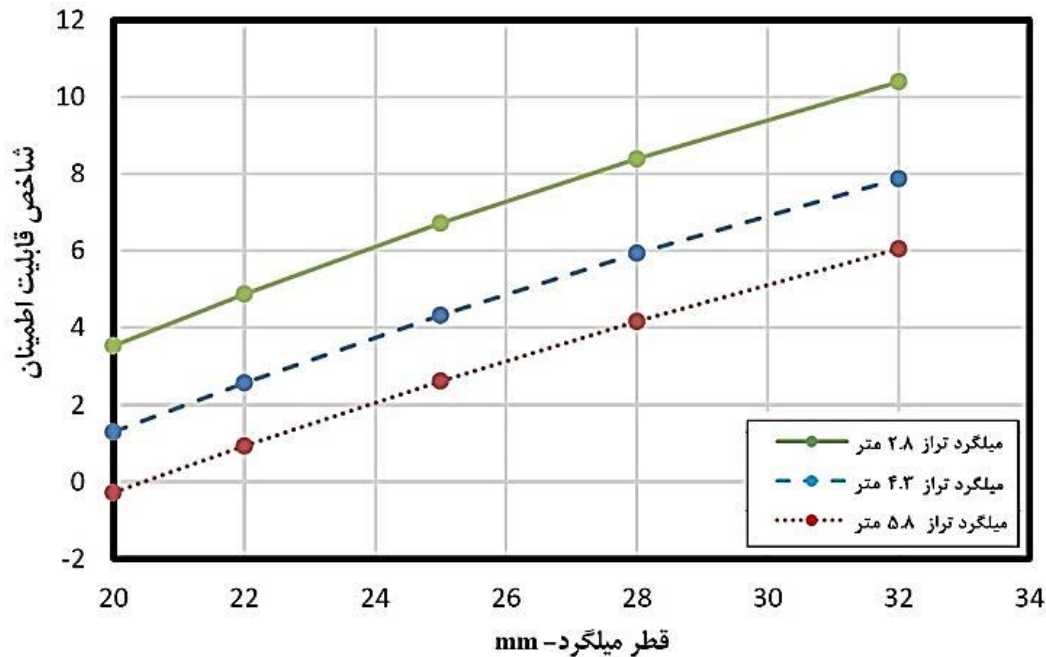
Table 8. Failure reliability index due to rebar tensile rupture

قطر میلگرد (mm)	تراز میلگرد (متر)		
	۲/۸	۴/۳	۵/۸
۲۰	۳/۵۳۴	۱/۲۹۵	-۰/۲۸۲
۲۲	۴/۸۷۶	۲/۵۶۶	۰/۹۲۵
۲۵	۶/۷۲۱	۴/۳۲۶	۲/۶۱۴
۲۸	۸/۳۹۲	۵/۹۳۴	۴/۱۶۶
۳۲	۱۰/۳۹۶	۷/۸۷۲	۶/۰۵۰

جدول ۹. قطر پیشنهادی میلگرد با ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان

Table 9. Failure reliability index due to rebar tensile rupture

تراز میلگرد (m)	قطر میلگرد (mm)	شاخص قابلیت اطمینان
۲/۸	۲۲	۴/۹
۳/۴	۲۵	۴/۳
۵/۸	۲۸	۴/۲



شکل ۱۰. شخص قابلیت اطمینان خرابی ناشی از گسیختگی کششی میلگرد در ترازهای مختلف

Fig. 10. Fault reliability index due to tensile rupture of rebar at different levels

۱۲- نتیجه‌گیری

بررسی پایداری گود خاکی از جمله مسائل مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک می‌باشد که به واسطه ماهیت غیرهمگن و عدم قطعیت متغیرها مختلف نمی‌توان ضریب اطمینان پایداری را با یک عدد و به طور قطعی بیان کرد. به همین دلیل استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان جایگاه ویژه‌ای دارد. در این روش‌ها با به کارگیری دامنه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیرها تلاش می‌شود تا تمامی حالات ممکن رخداد یک متغیر بر ضریب اطمینان پایداری در نظر گرفته شود. از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک اهمیت پارامترهای و متغیرهای مختلف در طراحی نیلینگ توسط محققان مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است اما با تحلیل قابلیت اطمینان، می‌توان حساسیت، همبستگی و وابستگی عوامل مختلف بر نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. لذا استفاده از نتایج این تحقیق مستلزم درک مهندسان ژئوتکنیک از تحلیل آماری و علم قابلیت اطمینان است. در این تحقیق تحلیل قابلیت اطمینان پایداری گودبرداری‌های شهری به روش میخ‌گذاری مورد بررسی قرار گرفت که

۱۱- تأثیر طول میلگرد بر شخص قابلیت اطمینان

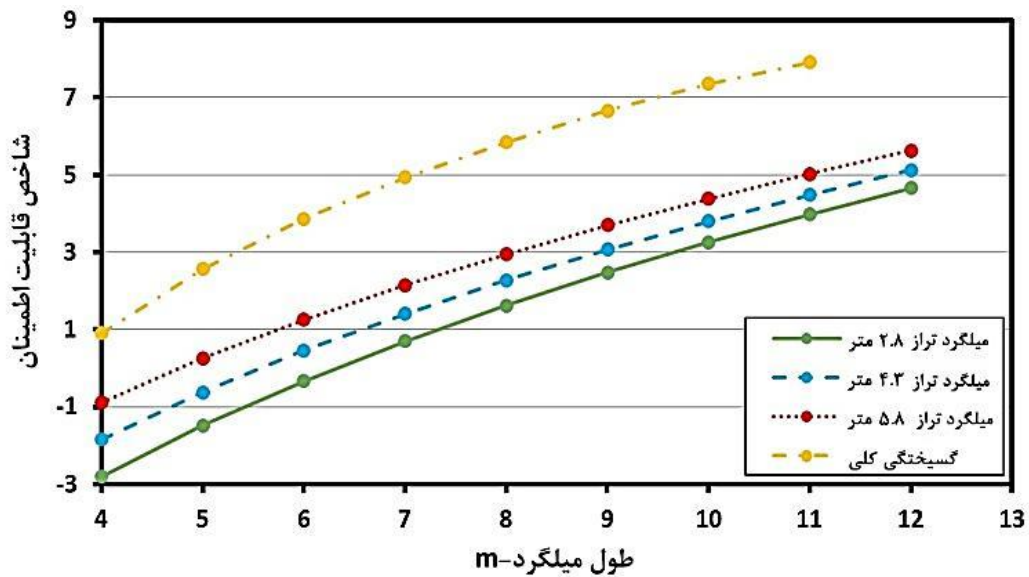
طول میلگردها مهم‌ترین متغیر طراحی بر تابع حدی خرابی ناشی از بیرون کشیدگی و گسیختگی کلی است. به منظور بررسی تأثیر این متغیر بر شخص قابلیت اطمینان، در این بخش از تحقیق طول میلگرد در ترازهای مختلف از ۴ m تا ۱۲ m تغییر داده شده و شخص قابلیت اطمینان برای هر یک از حالات محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده است.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش طول میلگرد، شیب منحنی‌ها کاهش می‌یابد یعنی میزان تأثیر آن بر شخص قابلیت اطمینان کاهش یافته است. جدول ۱۱ بیانگر طول پیشنهادی در ترازهای مختلف برای "شخص قابلیت اطمینان هدف" (جدول ۱۰) است. طول مناسب میلگرد برای هر تراز، بزرگ‌ترین مقدار حاصل از شخص قابلیت اطمینان برای گسیختگی کلی و بیرون کشیدگی خواهد بود.

جدول ۱۰. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان با تغییر طول میلگرد

Table 10. Changes in the reliability index by changing the length of the rebar

طول میلگرد (m)	خرابی ناشی بیرون کشیدگی میلگرد			خرابی ناشی گسیختگی کلی
	تراز میلگرد (m)			
	۲/۸	۴/۳	۵/۸	
۴	-۲/۸۰۷	-۱/۸۵۱	-۰/۸۸۵	۰/۹
۵	-۱/۴۸۷	-۰/۶۲۱	۰/۲۵۴	۲/۵۷۰
۶	-۰/۳۳۴	۰/۴۵۳	۱/۲۵۲	۳/۸۵۹
۷	۰/۷۰۰	۱/۴۱۰	۲/۱۴۴	۴/۹۳۳
۸	۱/۶۲۴	۲/۲۷۷	۲/۹۵۴	۵/۸۴۲
۹	۲/۴۷۴	۳/۰۷۰	۳/۶۷۹	۶/۶۶۵
۱۰	۳/۲۶۰	۳/۸۰۲	۴/۳۸۶	۷/۳۶۰
۱۱	۳/۹۸۳	۴/۴۸۳	۵/۰۲۷	۷/۹۱۸
۱۲	۴/۶۰۱	۵/۱۲۰	۵/۶۲۹	۹/۲۵۱



شکل ۱۱. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان با تغییر طول میلگرد

Fig. 11. Changes in the reliability index by changing the length of the rebar

جدول ۱۱. طول پیشنهادی میلگرد با ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان

Table 11. Recommended length of rebar with reliability index evaluation

نوع خرابی	تراز میلگرد (m)	طول میلگرد (m)	شاخص قابلیت اطمینان
بیرون کشیدگی میلگرد	۲/۸	۱۱	۴/۰
	۳/۴	۱۰	۳/۸
	۵/۸	۱۰	۴/۴
گسیختگی کلی	-	۶	۳/۸

خاک باعث افزایش شاخص قابلیت اطمینان گسیختگی کششی میلگرد می‌شود اما تاثیر ناچیزی بر خرابی بیرون کشیدگی میلگرد دارد.

- ارزیابی تاثیر انحراف معیار بر شاخص قابلیت اطمینان نشان داد زاویه اصطکاک داخلی بیشترین تاثیر و سپس وزن مخصوص و مقاومت میلگرد مؤثر هستند. همچنین تأثیر میانگین و انحراف معیار مقاومت کششی میلگرد بر شاخص قابلیت اطمینان اندک است که می‌توان آن را یک متغیر ثابت فرض کرد.

- تغییر تابع توزیع متغیرها از لگاریتمی به غیرلگاریتمی باعث کاهش شاخص قابلیت اطمینان در گسیختگی کلی و گسیختگی کششی میلگرد می‌شود اما در بیرون کشیدگی افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد نوع تابع توزیع متغیرها بر پایداری داخلی تاثیر بیشتری دارد.

- با افزایش قطر و طول میلگردها، شاخص قابلیت اطمینان در خرابی گسیختگی کششی میلگرد به صورت خطی افزایش می‌یابد. با افزایش طول میلگردها، میزان تاثیرگذاری آن بر شاخص قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد.

- تحلیل حساسیت گسیختگی کششی میلگرد نشان داد مقاومت میلگرد و زاویه اصطکاک داخلی عامل مقاومت و وزن مخصوص عامل بار می‌باشند. همچنین مقاومت کششی میلگرد مهم‌ترین متغیر تصادفی در گسیختگی کلی است.

- تحلیل حساسیت بیرون کشیدگی میلگرد بیان می‌کند که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی عامل مقاوم و وزن مخصوص عامل بار به حساب می‌آیند. مهم‌ترین متغیر تصادفی در این نوع خرابی زاویه اصطکاک

مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- متغیرهای تاثیرگذار بر شاخص قابلیت اطمینان و پایداری سیستم میخ‌گذاری شامل زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، وزن مخصوص خاک، قدرت پیوند دوغاب، آرایش و فاصله میلگردها، قطر و مقاومت کششی میلگرد و سربار کنار گود می‌باشند که بر پایداری خارجی و داخلی دیوار تاثیرگذار هستند.

- در بررسی پایداری کلی، همبستگی بین متغیرهای مختلف خاک تاثیر مهمی بر شاخص قابلیت اطمینان دارد به طوری که همبستگی $C-\phi$ ، $\phi-\phi$ و $C-\gamma$ به ترتیب بیشترین تاثیر را دارند.

- مهم‌ترین متغیر تاثیرگذار بر گسیختگی کلی قدرت پیوند دوغاب-خاک است. همچنین در بررسی میانگین متغیرها بر پایداری کلی، وزن مخصوص خاک بیشترین تأثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان دارد و پس از آن زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی تأثیرگذار هستند. همچنین در بررسی انحراف معیار بر پایداری کلی، زاویه اصطکاک داخلی بیشترین تأثیر و پس از آن وزن مخصوص، چسبندگی و قدرت پیوند دوغاب مؤثر هستند.

- همبستگی بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک باعث افزایش شاخص قابلیت اطمینان بیرون کشیدگی میلگرد و گسیختگی کلی می‌شود.

- همبستگی بین چسبندگی و وزن مخصوص خاک تاثیر محسوسی بر شاخص قابلیت اطمینان بیرون کشیدگی میلگرد و گسیختگی کلی ندارد و قابل صرف نظر کردن است.

- همبستگی بین وزن مخصوص خاک و زاویه اصطکاک داخلی

a copula-based sampling method, *Computational Geosciences*, 17(5) (2013) 739-755.

- [10] B. M. Basha and G. S. Babu, Reliability-based load and resistance factor design approach for external seismic stability of reinforced soil walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 60 (2014) 8-21.
- [11] C. Jingyu, N. Zhihong, Z. Lianheng and L. Wei, Case Study on the Typical Failure Modes and Reliability of Reinforced-Earth Retaining Wall, *Electronic journal of geotechnical engineering*, 21(1) (2016) 305-317.
- [12] L. Wang, M. Powers and W. Gong, Reliability Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls, In *Geo-Risk, Geotechnical Risk Assessment and Management*. GSP 285 (2017) 91-100.
- [13] P. Lin, J. Liu and X. Yuan, Reliability analysis of soil nail walls against external failures in layered ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(1) (2017) 40-56.
- [14] J. Yuan and P. Lin, Reliability analysis of soil nail internal limit states using default FHWA load and resistance models, *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(7) (2019) 783-800.
- [15] Y. Hu, P. Lin, C. Guo and G. Mei, Assessment and calibration of two models for estimation of soil nail loads and system reliability analysis of soil nails against internal failures, *Acta Geotechnica*, 15 (10) (2020) 1-28.
- [16] A. Johari, A. Hajivand and S. Binesh, System reliability analysis of soil nail wall using random finite element method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(6) (2020) 2777-98
- [17] A. M. Hasofer, An Exact and Invariant First Order Reliability Format, *J. Eng. Mech. Div., Proc. ASCE*, 100(1) (1974) 111-121.
- [18] R. Rackwitz and B. Flessler, Structural reliability under combined random load sequences, *Computers & structures*, 9(5) (1978) 489-494.
- [19] C. Lazarte, H. Robinson, J. E. Gómez, A. Baxter, A. Cadden, and R. Berg, Soil nail walls reference manual, No. FHWA-NHI-14-007 (2015).
- [20] F. B. Ferreira, A. Topa Gomes, C. S. Vieira and M. L.

داخلی خاک است. تاثیر میانگین و انحراف معیار زاویه اصطکاک داخلی خاک بر شاخص قابلیت اطمینان در مقایسه با دیگر متغیرها بسیار چشمگیری و محسوس است.

● تحلیل حساسیت گسیختگی کلی نشان داد چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و قدرت پیوند دوغاب عامل مقاوم و وزن مخصوص عامل بار می‌باشند.

منابع

- [1] [1] T. Wu, and L. M. Kraft, Safety analysis of slopes, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, 96(2) (1970) 609-632.
- [2] D. D. Genske, T. Adachi, and M. Sugito, Reliability analysis of reinforced earth retaining structures subjected to earthquake loading, *Soils and foundations*, 31(4) (1991) 48-60.
- [3] B. S. Chun, K. M. Kim and D. K. Min, Study on reliability analysis for reinforced earth retaining walls, *Third Asian Geotechnical Conference on Geosynthetics*, Korea, (2004) 248-254.
- [4] T. Chalermyanont and C. H. Benson, Reliability-based design for internal stability of mechanically stabilized earth walls, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2) (2004) 163-173.
- [5] F. Nadim, H. Einstein and W. Roberds, Probabilistic stability analysis for individual slopes in soil and rock, In *Proc. Int. Conf. on Landslide Risk Management*, (2005) 63-98.
- [6] S. Sayed, G. R. Dodagoudar and K. Rajagopal, Reliability analysis of reinforced soil walls under static and seismic forces, *Geosynthetics International*, 15(4) (2008) 246-257.
- [7] G. S. Babu and V. P. Singh, Reliability analysis of soil nail walls, *Georisk*, 3(1) (2009) 44-54.
- [8] B. M. Basha and G. S. Babu, Optimum design for external seismic stability of geosynthetic reinforced soil walls: reliability based approach, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(6) (2010) 797-812.
- [9] X. Z. Wu, Probabilistic slope stability analysis by

- strength using RLEM and RFEM, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 11(3) (2017) 231-246.
- [24] B. K. Low and K. K. Phoon, Practical first-order reliability computations using spreadsheet, *Proc. Probabilistics in Geotechnics: Technical and Economic Risk Estimation*, (2002) 39-46.
- [25] N. Luo, R. J. Bathurst and S. Javankhoshdel, Probabilistic stability analysis of simple reinforced slopes by finite element method, *Computers and Geotechnics*, 77 (2016) 45-55.
- Lopes, Reliability analysis of geosynthetic-reinforced steep slopes, *Geosynthetics International*, 23(4) (2016) 301-315.
- [21] P. Lumb, Safety factors and the probability distribution of soil strength, *Canadian Geotechnical Journal*, 7(3) (1970) 225-242.
- [22] G. S. Babu and A. Srivastava, Reliability analysis of allowable pressure on shallow foundation using response surface method, *Computers and Geotechnics*, 34(3) (2007) 187-194.
- [23] S. Javankhoshdel, N. Luo, and R. J. Bathurst, Probabilistic analysis of simple slopes with cohesive soil

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ghaffarpour Jahromi, N. Shabakhty, P. Tajik, Reliability analysis of nailing method in the stabilization of urban excavation - A case study of an Excavation in Tehran, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 475-494.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18930.7003

