

# The effect of soil internal friction angle on Gougerd landslide stability with a key analysis of the results obtained from various methods

Akbar Khodavirdizadeh<sup>1</sup>, Hassan Moomivand<sup>2</sup>

1. MSc, Department of Conservation and Archaeometry, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. E-mail: a.khodavirdizadeh@tabriziau.ac.ir

2. Professor, Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: h.moomivand@urmia.ac.ir

## Article Info

### Article type:

Research Article

### Article history:

Received 15 November 2024

Received in revised form 18  
December 2024

Accepted 29 December 2024

### Keywords:

stability analysis, internal  
friction angle, groundwater,  
Gougerd landslide, Khoy.

## ABSTRACT

In this study, the stability of the Gougerd landslide of Khoy was investigated with respect to changes in the soil internal friction angle. Statistical analysis of the results of changes in the FS of different methods in analyzing the stability of the Gougerd landslide in 282 analyses showed that: 1) In static conditions, under the influence of groundwater conditions, the results of the stability analysis of various methods showed up to 35.2% changes in the FS, and the largest differences in the FS values were obtained in the conventional Fellenius, Spencer, and Morgenstern-Price methods. 2) In static conditions, the FS of various methods showed changes of up to 35% with respect to the effect of the internal friction angle, and the largest difference in the FS values compared to other methods was obtained in the conventional Fellenius method and the Spencer method. 3) In pseudo-static conditions and in the dry state, up to 5% changes in the FS were obtained in different analysis methods, and under the influence of groundwater conditions, the changes in the FS were up to 39.9%. The largest changes in the FS of the dry state were obtained in the simplified Janbu method, Spencer and Morgenstern-Price methods, and under the influence of groundwater, the largest changes in the FS were obtained in the conventional Fellenius method and Spencer method. In examining the results of this research, the effect of different conditions of groundwater level, soil internal friction angle, and earthquake force on the analytical mechanism of the relationships existing in various methods is recognized as the main cause of the difference in the results of different stability analysis methods.

## Introduction

The safety factor of slope stability refers to the ratio of soil shear strength to the shear stress of a possible sliding surface in the slope (Fu Zhu et al., 2017). In the stability of slopes, including landslides, the stability is evaluated under the influence of parameters such as changes in the groundwater level, cohesion, internal friction angle, slope angle, earthquake components, etc. Soils show special behaviour against stress. Soils are much thinner than rocks, and are also much looser and have much lower strength, (Moomivand, 2016). The ability of soils to resist shear stresses, especially the soil masses of the slopes, is very low. For this reason, the reason for the instability of soil slopes in most cases is the decrease in the values of soil shear

strength parameters (Khodavirdizadeh et al., 2014). Among the parameters of soil shear strength, two parameters of cohesion and internal friction angle can be mentioned. One of the methods of evaluating the stability of slopes is stability analysis with respect to the parameters of the stability relationship, which is called stability sensitivity analysis. Since Coulomb's relation (1776):  $(\tau = c + \sigma_n \times \tan \varphi)$  is used to express the shear strength of soil and, relates the vertical stress ( $\sigma_n$ ), soil internal friction angle ( $\varphi$ ) and adhesion ( $c$ ) to shear strength (Rahn Perry, 1996). Therefore, in order to establish a relationship between the soil shear strength and the FS of the range, a sensitivity analysis should be performed with respect to the parameters of this relationship. According

**Cite this article:** Khodavirdizadeh, A., Moomivand, H. (2024). The effect of soil internal friction angle on Gougerd landslide stability with a key analysis of the results obtained from various methods. *Journal of Engineering Geology*, 18 (4), 585-608. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.101625>

to the slope model type selected in this research as a model for stability analysis, whose soil layers are placed in the SM and GC groups in USCS, therefore the internal friction angle parameter was selected as the index parameter of the analysis, and stability analysis was limited to the changes of this parameter. But on the other hand, because the continuous changes in the groundwater level and earthquake forces cause many changes in the FS of the range, therefore the effects of these parameters were also used in connection with the index parameter of the values of the internal friction angle of the soil to complete the results of this research and the results of the analysis were statistically. Slope movements in the west of Khoy area are classified as types of slope movements in road slopes, rural residential areas and agricultural lands. Landslides in the west of Khoy area on road slopes frequently cause damage to the main Khoy-Turkey road every year following heavy rainfall. Extensive damage from the landslide event on the main Khoy-Turkey road in 2009 caused the destruction of the main Khoy-Turkey road in the slopes of Stiran, west of Khoy, and also caused the destruction of the 300-meter-long

Iran-Europe railway line ([Khodavirdizadeh and Asghari-Kaljahi, 2020](#)). The large-scale Gogerd landslide is located within the residential areas and agricultural lands of Gogerd village with an area of 150 ha at a geographical location of latitude  $38^{\circ}, 29'$  and longitude  $44^{\circ}, 34'$ , is 45 kilometers west of Khoy. The landslide is located on a west-facing slope with a slope of 18 degrees, and at an altitude of 500 meters above the main Khoy-Turkey road. The height difference between the crown and the foot of the landslide within the residential areas is 230 m. The houses of Gogerd village are built on the central part of the landslide. The occurrence of the landslide within the village is accompanied by cracking of the walls of residential houses and cracking of the agricultural lands of the villagers. In the results of geoelectrical surveys, the average thickness of the landslide has been determined to be 16 m. The landslide in the residential areas and agricultural lands of Gogerd village is of rotational type, and is located on an old mudflow with an area of 1000 ha, and the height difference between the crown and the toe of the flow is about 1100 m (Fig 1).



Fig. 1. Satellite Image of Gogerd area, Google Earth, in 2014: view to the North

## Materials and Methods

### Geological construction

According to the zoning of structural-sedimentary units of Iran, the study area is considered as part of the Alborz-Azerbaijan zone ([Stocklin, 1968](#); [Nabavi, 1976](#)). In this zone sedimentary, metamorphic, volcanic rocks

of last Precambrian to recent deposits have been exposed. The rock units are including limestone, conglomerate, sandstone, ultramafic rocks and tuff, shale, schist and claystone. The tectonic of the study area is on the Khoy ophiolite by tectonic forces converging in the Laramide orogeny. Topography of area full

rugged whit the slope was steep and contains multiple waterways is along the north-south. Due to the weakness and high erosion ophiolite series in area, in the surface of slopes a relatively thick layer of weathered material is recognizable (Geological Survey of Iran, 1978; Khodavirdizadeh and Asghari-Kaljahi, 2020). The study of the hydrology of the area shows that due to heavy rains, the materials of the slopes of the area are saturated with water, which is a destructive and intensifying factor of the slope movements. Due to the fact that the rainfall on the top of the slope crown is drained from the soil mass of the slopes towards the seasonal rivers below the slopes (Qotur and Avrin rivers), during landslides, a significant amount of precipitation penetrates into the slopes and the soil mass saturates the slope. From an engineering geological point of view, the landslide mass is a part of new alluvial terraces and alluvial fan, and river bed deposits. The fact that the village is situated on weathered ophiolitic rocks, and also the amount of sediment resulting from the old landslide created the conditions for the occurrence of landslides. As a general conclusion, the main sources of the landslide mass are: old large mud flow landslide, alluvial fan - old alluvial terraces, and river deposits.

### Geotechnical Investigation of Landslide

The analysis model for this research is a real two-dimensional model type of the Gougerd landslide. This landslide consists of two layers SM and GC based on USCS. The cross-section of the landslide was designed in two dimensions using the results of mapping, and geotechnical, and geophysical investigations using Rocscience.Slide.5.5025 software. The results of stability analysis and sensitivity analysis of landslide stability have been obtained using the results of this cross-section. This landslide occurred in the residential and agricultural areas of Gougerd village on a large

scale. And it started 24 years ago and there are still effects of sliding activity. This landslide is an old mud flow landslide and rotational type, and the height of the crown to the foot of the landslide is about 1100 meters in the mud flow landslide, and about 230 meters in the Gougerd village landslide. The Gougerd village landslide is located on the sediments of an old mud flow landslide. The main cause of the old mud flow landslide is the geological events of the past geological periods and the main cause of the Gougerd village landslide is the fluctuation of the groundwater level, and the saturation of the soil mass of the landslide, and the effect on the soil shear strength parameters and as a result the reduction of the shear strength of the soil mass is known (Khodavirdizadeh et al., 2014). The specifications of the geotechnical results of the landslide mass are given in Table 1: Because the parameters obtained from the soil shear strength tests are related to after the landslide and the values of cohesion, and internal friction angle, and density of the soil materials involved in the landslide cannot be calculated directly, and also due to the change in the engineering and geotechnical characteristics of the materials, after the landslide, the shear strength parameters of the landslide soil have been obtained using the results of the back analysis method and related modelling with Rocscience.Slide.5.5025 software. The results of the back analysis have been controlled with the help of experimental methods, which are largely consistent with each other. In this research, the cross-section of the landslide using the Fellenius (Fellenius, 1936), simplified Bishop (Bishop, 1955), simplified-modified Janbu (Janbu, 1968), Morgenstern-Price (1965) and Spencer (Spencer, 1967) methods was stability analyzed and the results were analyzed. In the analysis, in addition to static analysis, a series of pseudo-static analyses have also been performed in different groundwater conditions and internal friction angle changes.

Table 1 Geotechnical parameters of Gougerd landslide mass (Khodavirdizadeh et al., 2014)

| Test                                           | Code of ASTM                          | Results                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Soil sieve analysis                            | D421- D422                            | SM and SC                                                                                                                               |
| Atterberg limits                               | D4318-87                              | PL= 21 %<br>LL= 30 %                                                                                                                    |
| Water content                                  | D2216                                 | 8~12 %                                                                                                                                  |
| Unit weight                                    | D854                                  | $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$<br>$\gamma_d=13 \text{ kN/m}^3$                                                                              |
| Direct shear test                              | D3080                                 | SM:<br>c =5 kPa<br>$\phi=29^\circ$<br>SC:<br>c=20 kPa<br>$\phi = 28^\circ$                                                              |
| Specific gravity (Gs)                          | D854                                  | 2.61                                                                                                                                    |
| Permeability                                   | D2434                                 | $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$                                                                                                       |
| Estimated geotechnical parameters of landslide | Back analysis with software Slide 5.0 | SM:<br>c=5 kPa<br>$\phi = 30^\circ$<br>$\gamma=15 \text{ kN/m}^3$<br>GC:<br>c=10 kPa<br>$\phi = 28^\circ$<br>$\gamma=15 \text{ kN/m}^3$ |

## Results and Discussion

### Static analysis

The lowest value of the FS was obtained in the Fellenius method (FS=0.658), (in 3 meters of depth groundwater level). The FS values relative to this value (0.658), in the methods of simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer, the FS values are 32.9%, 23.1%, 30.6%, 35.1% and 35.2%, respectively, showed differences, and the values increased.

Regarding the effect of groundwater, since in all methods, the depth of the groundwater level from the crown of the landslide was increased by 900%, and the groundwater level was lowered, the lowest value of the FS in these changes was obtained in the Fellenius method with a value equal to 1.736. The FS values relative to this value (1.736), in the methods of simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods is 18.4%, 6.5%, 12.5%, 18.6, and 18.5%, respectively, showed differences, and the values increased.

Regarding the effect of the internal friction angle of the soil in the presence of groundwater in 3 meters of depth, which in all methods, the

internal friction angle is equal to 35 degrees, lowest value of the FS was obtained with a value of 0.733 in the Fellenius method. The FS values relative to this value (0.733), in the methods of simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods, the FS are 32.7%, 23%, 30.5%, 34.9, and 35% respectively, showed differences, and the values increased (Fig 2).

In the FS obtained from static analyzes regarding the effect of the internal friction angle of the soil in the state without the effect of groundwater (dry state), which in all methods the internal friction angle is equal to 35 degrees, the lowest value of the FS is in the simplified Janbu method with the value of 2.257 was obtained. In the analysis of this group of analyzes, relative to this value (2.257), in the methods of simplified Bishop, modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods are 0.132%, 2.8%, 4%, 2.8%, and 2.8%, respectively, showed difference, and the values increased (Fig 3).

### Pseudo-static analyses

Regarding the effect of the horizontal earthquake component equal to 0.15, and in the state without the effect of groundwater (dry

state), the lowest value of the FS was obtained in the simplified Janbu method (FS=1.331). The FS values relative to this value (1.331), in the methods of Fellenius, simplified Bishop, modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods, the FS values are 0.075%, 3.3%, 4.2%, 3.45%, and 3.45%, respectively, showed difference, and the values increased.

Regarding the effect of the horizontal earthquake component equal to 0.35, and in the state without the effect of groundwater (dry state), the lowest value of the FS was obtained in the Fellenius method (FS=0.881). The FS values relative to this value (0.881), in the methods of simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods, the FS values are 3.85%, 0.34%, 4.42%, 4.54 and 4.54%, respectively, showed differences, and the values increased. regarding the effect of groundwater (in 3 meters of depth groundwater level), and in the effect of the horizontal earthquake component equal to 0.35, the FS values relative to Fellenius method (FS=0.881) in the methods simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods, the FS values are 33.4%, 23.2%, 30.7%, and 39.7, and 39.9%, respectively, showed differences, and the values increased. regarding the effect of groundwater (in 3 meters of depth groundwater level) and in the effect of the horizontal earthquake component equal to 0.15, and the comparison of its results compared to the group of static analysis (in 3 meters of depth groundwater

level), in the methods Fellenius, simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer, the FS values in the mentioned methods showed a difference of 59.3%, 58.8%, 59.1%, 59.2%, 54%, and 53.9%, respectively, and the values decreased.

In the FS values of certainty obtained from pseudo-static analyzes regarding the effect of groundwater, that in all methods, the depth of the groundwater level from the crown of the landslide has been increased by 900%, and the groundwater level has been lowered, also, and in the effect of the horizontal earthquake component equal to 0.15, the lowest value of the FS was obtained in the Fellenius method (FS=1.132). The FS values relative to this value (1.132), in the methods of simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods, the FS values are 19.9%, 4.6%, 12.7%, 21.1%, and 21.2%, respectively, showed a difference, and the values increased. Regarding the effect of the horizontal earthquake component equal to 0.15, the depth of the groundwater level from the crown of the landslide has been increased by 900%, in pseudo-static analyzes, and the comparison of its results compared to the group of static analysis (in 3 meters of depth groundwater level), in the methods Fellenius, simplified Bishop, simplified-modified Janbu, Morgenstern-Price and Spencer, the FS values showed a difference of 53.3%, 51.4%, 56.1%, 53.1%, 50.1%, and 50%, respectively, in the mentioned methods, and values decreased.

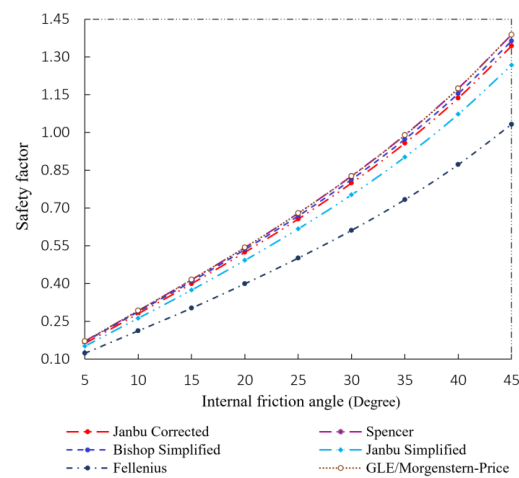


Fig. 2. The changes the FS with internal friction angle

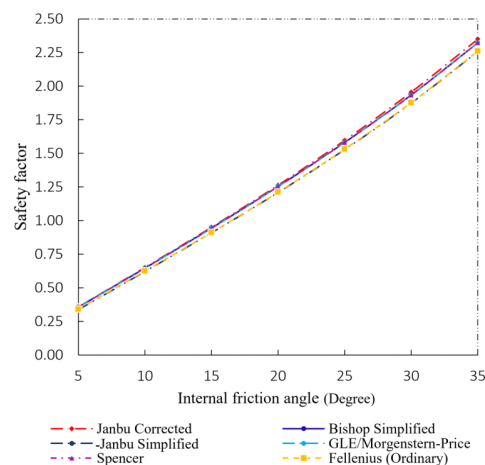


Fig. 3. The changes the FS with internal friction angle in dry state

## Conclusions

Based on the results of static and pseudo-static analyzes with 6 different methods of analysis, the following results were obtained: In the analysis model of this research, in different methods of analysis, FS values showed different values. The FS of the landslide in the Fellenius method in static and pseudo-static analysis showed more changes than other methods, and lower FS values were always obtained compared to other methods. The FS of the critical state in the Fellenius method in the static state had the highest value of the internal friction angle. In the results of this research, the range of values above 45 degrees for the internal friction angle, in static conditions (except for the Fellenius method), in other methods and in the range of more than 0.15 for

the earthquake horizontal component the in pseudo-static conditions, and in the dry state of the slope, the Gougard landslide becomes stable. The highest effect of earthquake on Gougard landslide was obtained in the simplified Bishop method (146.4%), and the lowest effect was obtained in the simplified Janbu method (132.8%). The greatest effect of the soil internal friction angle values in the static analysis was obtained in the simplified Janbu method (739%), and the least effect was obtained in the simplified Bishop method (706.5%). The FS of the landslide showed much less changes in pseudo-static analysis in different analysis methods. And the difference between the highest and the lowest value of the FS obtained from 6 different methods of change analysis showed less than 5%.



# بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک در پایداری زمین لغزش گوگرد خوی با تحلیل کلیدی نتایج حاصل از انواع روش‌ها

اکبر خداوردی زاده<sup>۱</sup>، حسن مومینوند<sup>۲</sup>✉

۱. کارشناسی ارشد، گروه مرمت و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: a.khodavirdizadeh@tabriziau.ac.ir

۲. استاد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: h.moomivand@urmia.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

## کلیدواژه‌ها:

تحلیل پایداری، زاویه اصطکاک داخلی، آب زیرزمینی، زمین لغزش گوگرد، خوی.

در این تحقیق پایداری زمین لغزش گوگرد خوی نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل آماری نتایج حاصل از تغییرات ضریب اطمینان روش‌های مختلف در تحلیل پایداری زمین لغزش گوگرد در تعداد ۲۸۲ تحلیل نشان داد که: (۱) در شرایط استاتیکی تحت تأثیر شرایط آب زیرزمینی در نتایج حاصل از تحلیل پایداری انواع روش‌ها تا ۳۵/۲ درصد تغییرات در ضریب اطمینان حاصل شد و بیشترین اختلاف در مقادیر ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی، اسپنسر و موگان - پرایس بدست آمد. (۲) در شرایط استاتیکی نسبت به تأثیر زاویه اصطکاک داخلی حاصل از تحلیل پایداری انواع روش‌ها ضریب اطمینان تا ۳۵ درصد تغییرات نشان داد و بیشترین اختلاف در مقادیر ضریب اطمینان نسبت به روش‌های دیگر در روش فلنیوس معمولی و روش اسپنسر بدست آمد. (۳) در شرایط شبه استاتیک و دامنه در حالت خشک در روش‌های مختلف تحلیل تا ۵ درصد تغییرات در ضریب اطمینان و تحت تأثیر شرایط آب زیرزمینی، تغییرات ضریب اطمینان تا ۳۹/۹ درصد حاصل شد و بیشترین تغییرات در ضریب اطمینان دامنه در حالت خشک در روش جانبو ساده شده، روش اسپنسر و موگان - پرایس و تحت تأثیر آب زیرزمینی، بیشترین تغییرات در ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی و روش اسپنسر بدست آمد. در بررسی نتایج حاصل از این تحقیق تأثیر شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی، زاویه اصطکاک داخلی خاک و نیروی زلزله بر مکانیسم تحلیلی روابط موجود در انواع روش‌ها علت اصلی اختلاف نتایج روش‌های مختلف تحلیل پایداری شناخته می‌شود.

## مقدمه

ضریب اطمینان پایداری دامنه به نسبت مقاومت برشی خاک به تنش برشی یک سطح لغزشی احتمالی در دامنه اشاره دارد (Fu Zhu et al., 2017). در پایداری شیروانی‌ها از جمله زمین لغزش‌ها، پایداری‌ها تحت تأثیر پارامترهایی نظیر تغییرات سطح آب زیرزمینی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه شیب دامنه، مؤلفه‌های نیروی زلزله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. خاک‌ها در برابر تنش رفتارهای ویژه‌ای را از خود نشان می‌دهند. خاک‌ها در مقایسه با سنگ‌ها ضخامت خیلی کمتری دارند و همچنین خیلی

زمین لغزش یک فرآیند خطرناک است که می‌تواند باعث آسیب، مرگ، تخریب محیط زیست و آسیب به زیرساخت‌ها شود (Wubalem and Meten, 2020). حوادث ناپایداری شیب ناشی از عوامل طبیعی و انسانی، به ویژه وقوع زمین لغزش‌های بزرگ که باعث تهدیدات و خسارات عمده جانی و مالی مردم شده‌است، رو به افزایش است. در عین حال، زمین لغزش به‌طور جدی بر محیط زندگی مردم، عملیات ایمن حمل و نقل و زیرساخت‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین تحلیل و پیش‌بینی پایداری شیب‌ها امری ضروری است.

استناد: خداوردی زاده، ا.، مومینوند، ح. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک در پایداری زمین لغزش گوگرد خوی با تحلیل کلیدی نتایج حاصل از انواع روش‌ها. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۴)، ۵۸۵-۶۰۸. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.101625>

سست‌تر بوده و مقاومت آن‌ها بسیار پایین‌تر است (Moomivand, 2016). قابلیت مقاومت خاک‌ها به ویژه توده‌های خاک شیروانی‌ها در مقابل تنش‌های برشی خیلی کم است به همین دلیل نیز علت ناپایداری دامنه‌های خاکی در بیشتر موارد کاهش مقادیر پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد (Khodavirdizadeh et al., 2014). از جمله پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌توان به دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی اشاره کرد. یکی از روش‌های ارزیابی پایداری شیروانی‌ها، آنالیز پایداری نسبت به پارامترهای رابطه پایداری است. مقاومت خاک توانایی آن‌ها در تحمل تنش‌های برشی می‌باشد. معادله کولمب  $(\tau = c + \sigma_n \tan \phi)$  (۱۷۷۶): تنش عمودی  $(\sigma_n)$ ، زاویه اصطکاک داخلی  $(\phi)$  و چسبندگی  $(c)$  را با مقاومت برشی مرتبط می‌سازد (Rahn Perry, 1996). از آنجایی که رابطه کولمب برای بیان مقاومت برشی خاک عنوان می‌شود لذا برای برقراری ارتباط بین مقاومت برشی خاک و ضریب اطمینان دامنه، آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای این رابطه باید انجام گیرد. با توجه به مدل تیپ دو بعدی حاصل از نتایج مطالعات نقشه‌برداری‌ها و بررسی‌های ژئوتکنیک و ژئوفیزیک زمین لغزش گوگرد که لایه‌های خاک مصالح درگیر لغزش آن در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید در گروه SM و GC قرار می‌گیرند لذا پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک زمین لغزش مذکور به عنوان پارامتر شاخص تحلیل‌های پایداری انتخاب شده‌است و تحلیل‌های پایداری نسبت به تغییرات این پارامتر محدود شده است. ولی از طرفی چون تغییرات مداوم سطح آب زیرزمینی و نیز نیروهای زلزله محلی تغییرات زیادی را در ضریب اطمینان دامنه ایجاد می‌کنند، بنابراین از تأثیرات این پارامترها نیز

در ارتباط با پارامتر شاخص مقادیر زاویه اصطکاک داخلی خاک زمین‌لغزش نیز جهت تکمیل نتایج این تحقیق استفاده شده‌است و نتایج آن تحلیل آماری شدند. زاویه اصطکاک داخلی ارتباط نزدیکی با توپوگرافی شیب و ضخامت خاک دارد. شیب با زاویه تندتر لایه خاکی نازک‌تری نسبت به شیب با زاویه ملایم دارد و احتمال لغزش بیشتر است (He et al., 2022) زاویه اصطکاک داخلی بر ضریب اطمینان زمین‌لغزشی پیش‌رونده تأثیر می‌گذارد. بنابراین، مصالح با زاویه اصطکاک داخلی زیاد می‌تواند ضریب اطمینان یک زمین‌لغزش را افزایش دهد (Zhang et al., 2020). تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک برای مقادیر ثابت چسبندگی باعث افزایش کمی در ضریب اطمینان دامنه می‌شود (حدود ۱۵٪)، (Harabinová and Panulinová, 2020). با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک دامنه، شیب پایدارتر می‌شود (Huang et al., 2024).

حرکات دامنه‌ای در غرب منطقه خوی بصورت انوعی از حرکات دامنه‌ای در دامنه‌های جاده‌ای و مناطق مسکونی روستایی و زمین‌های کشاورزی طبقه‌بندی شده است. زمین لغزش‌های منطقه غرب خوی در دامنه‌های جاده‌ای بطور مکرر در هر سال در پی بارش‌های سنگین خساراتی را در مسیر جاده اصلی خوی- ترکیه بوجود می‌آورد. تخریبات گسترده‌ای از رخداد زمین‌لغزش در جاده اصلی خوی- ترکیه در سال ۱۳۸۸ سبب تخریب مسیر جاده اصلی خوی- ترکیه در دامنه استیران، غرب خوی (شکل ۱) و همچنین سبب تخریب مسیر راه آهن سراسری ایران-اروپا به طول ۳۰۰ متر شد (Khodavirdizadeh and Asghari-Kaljahi, 2020).

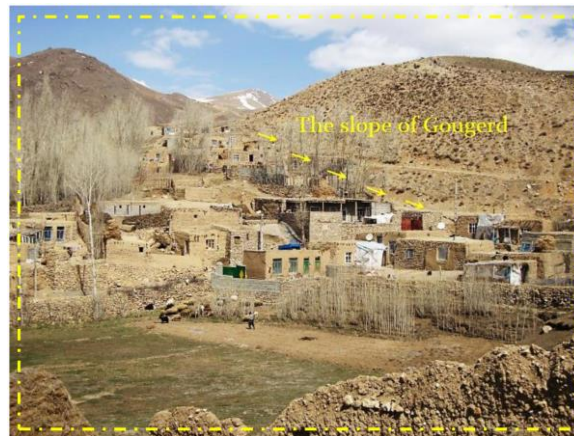


شکل ۱. تخریب جاده اصلی خوی- ترکیه در اثر رخداد زمین لغزشی بزرگ در ۱۲ مرداد ماه سال ۱۳۸۸

Fig. 1. Khoy-Turkey road demolition by a major landslide: August 3, 2009

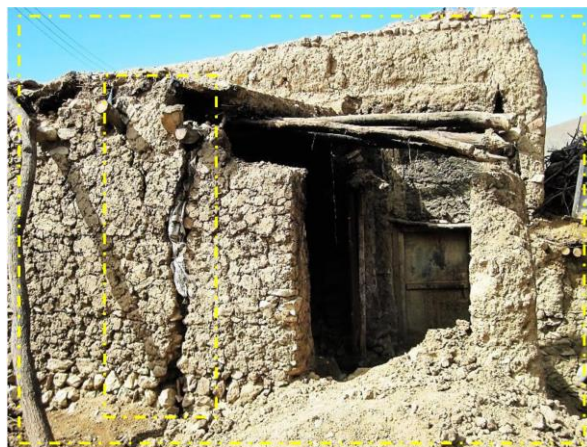
مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی روستای گوگرد از نوع چرخشی بوده و بر روی یک جریان گلی قدیمی به مساحت ۱۰۰۰ هکتار قرار گرفته و اختلاف ارتفاع بین تاج و پنجه جریان در حدود ۱۱۰۰ متر می باشد (شکل ۴). لایه های خاک مصالح درگیر لغزش در سیستم طبقه بندی یونیفاید در گروه SM و GC قرار می گیرند. بررسی موضوع تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک به عنوان پارامتر مقاومت برشی خاک در پایداری زمین لغزش گوگرد دارای اهمیت ویژه ای است. همچنین موضوع مهمی است که تأثیر این پارامتر در شرایط مختلف آب زیرزمینی و نیروی زلزله در پایداری زمین لغزش مشخص شود. لذا بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک در پایداری زمین لغزش گوگرد خوی و همچنین بررسی پایداری آن با انواع روش های تحلیل در خصوص زمین لغزش گوگرد کاملاً موضوع جدیدی می باشد.

زمین لغزش گوگرد در ابعاد بزرگ در محدوده مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی روستای گوگرد با ۱۵۰ هکتار مساحت در موقعیت جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شرقی و در فاصله ۴۵ کیلومتری غرب خوی قرار گرفته است (شکل ۵). زمین لغزش در مختصات جغرافیایی بر روی یک دامنه رو به غرب با شیب معادل ۱۸ درجه و در ارتفاع ۵۰۰ متری از کف جاده اصلی خوی- ترکیه واقع است (شکل ۲). اختلاف ارتفاع بین تاج و پای زمین لغزش در محدوده مناطق مسکونی ۲۳۰ متر می باشد. خانه های روستای گوگرد بر روی بخش مرکزی لغزش بنا شده است. وقوع لغزش در محدوده روستا همراه با ترک خوردگی دیوارهای منازل مسکونی و ترک خوردگی اراضی کشاورزی روستائیان می باشد (شکل ۳). در نتایج بررسی های ژئوالکتریک، ضخامت متوسط زمین لغزش ۱۶ متر تعیین شده است. زمین لغزش



شکل ۲. موقعیت مناطق مسکونی روستای گوگرد: دید به سمت شمال شرق (مآخذ: نگارندگان)

Fig. 2. The location of the residential area of the Gougard village, view to Northeast (Source: Authors)



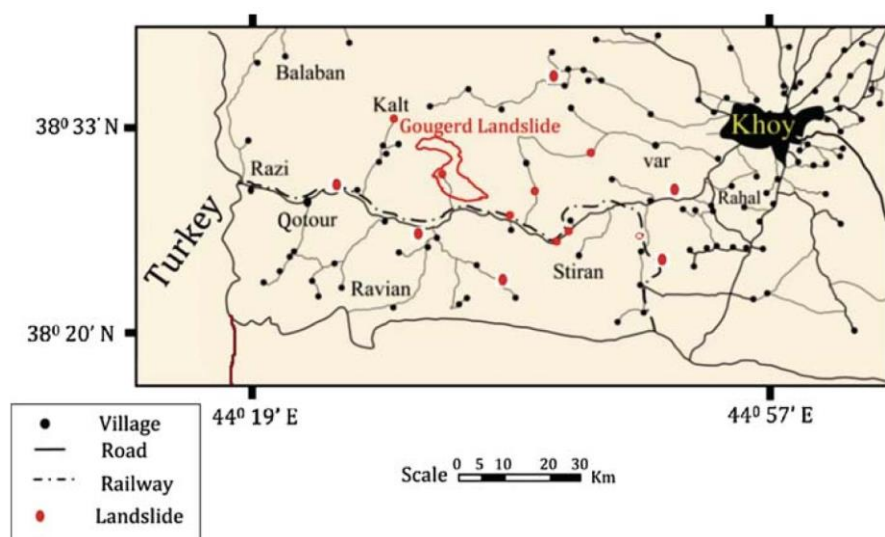
شکل ۳. تأثیر زمین لغزش گوگرد بر مناطق مسکونی روستایی: دید به سمت شمال (مآخذ: نگارندگان)

Fig. 3. The effect of Gougard landslide on rural residential areas: view to the North (Source: Authors)



شکل ۴. تصویر ماهواره‌ای Google Earth از زمین لغزش گوگرد سال ۱۳۹۳: دید به سمت شمال (مآخذ: نگارندگان)

Fig. 4. Satellite Image of Gougard area, Google Earth, in 2014: view to the North (Source: Authors)



شکل ۵. موقعیت جغرافیایی محدوده زمین لغزش گوگرد خوی در شمال غرب ایران (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 5. Geographical location of the Gougerd landslide of Khoy in Northwestern Iran (Source: Authors)

داده‌اند. و در زمینه جغرافیا می‌توان به مطالعه جعفر مدیرزاده «بررسی رفتار سطح زمین ناشی از زمین لغزش و زلزله با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی و DiNSAR در روستای گوگرد» اشاره نمود (Modirzadeh, 2022).

## مواد و روش‌ها

### ساخت زمین‌شناسی

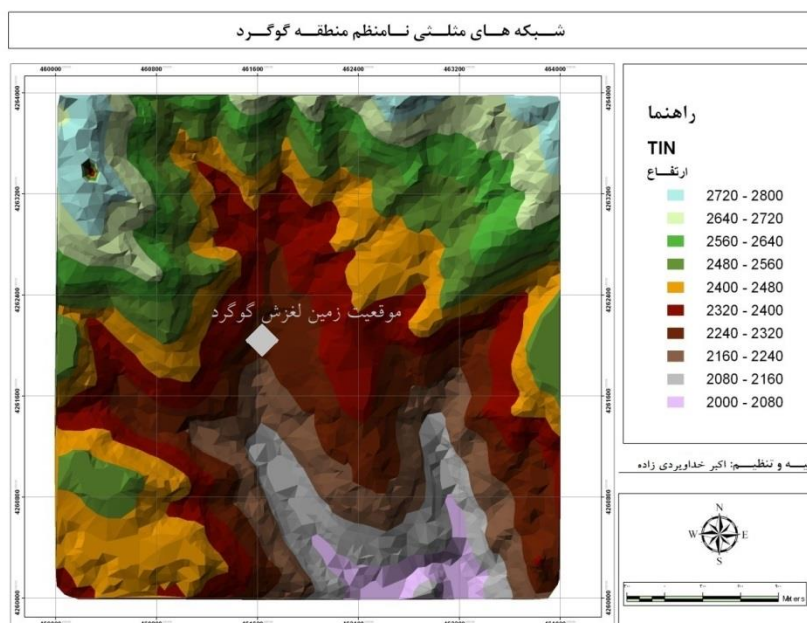
محدوده مورد مطالعه با توجه به تقسیمات واحدهای رسوبی ایران بخشی از پهنه آمیزه رنگین البرز ساختمانی- (Nabavi, 1976; Stocklin, 1968) در این محدوده سنگ‌های رسوبی، دگرگونی، آتشفشانی و نفوذی از پرکامبرین پسین تا عهد حاضر با روند عمومی شمال غربی - جنوب شرقی رخنمون دارند. واحدهای سنگی منطقه شامل: قطعات سنگی آهکی، کنگلومرایی، ماسه سنگی، قطعات سنگی اولترامافیک و توف، شیل، شیست و رس می‌باشد. توده‌های سنگی در این منطقه اغلب تکتونیزه و نمایی خرد شده دارند. توده لغزیده

## پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهشی زمین لغزش گوگرد از سه گروه مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و زمین‌شناسی زیست - محیطی و جغرافیا شکل گرفته است: پژوهشکده سوانح طبیعی ایران در سال ۱۳۸۷ مطالعه علل ناپایداری زمین لغزش گوگرد را انجام داده است (Adib, 2008). در زمینه زمین‌شناسی مهندسی باید اشاره کرد که اکبر خداوردی-زاده مطالعات تحلیل‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی تحت تأثیر پارامترهای مختلف خاک و شرایط مختلف آب زیرزمینی در پایداری زمین لغزش گوگرد خوی انجام داده است (Khodavirdizadeh et al., 2010, 2011, 2012, 2014, Khodavirdizadeh and Asghari-Kaljahi, 2020). در زمینه زمین‌شناسی زیست محیطی فاطمه نمکچی (Namakchi, 2014 Namakchi et al., 2013)، «مطالعه و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه غرب خوی» و ابراهیم اصغری کلجاهی (Asghari-Kaljahi et al., 2016) «پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطق غرب شهرستان خوی به روش آنبالاگان» مطالعاتی را انجام

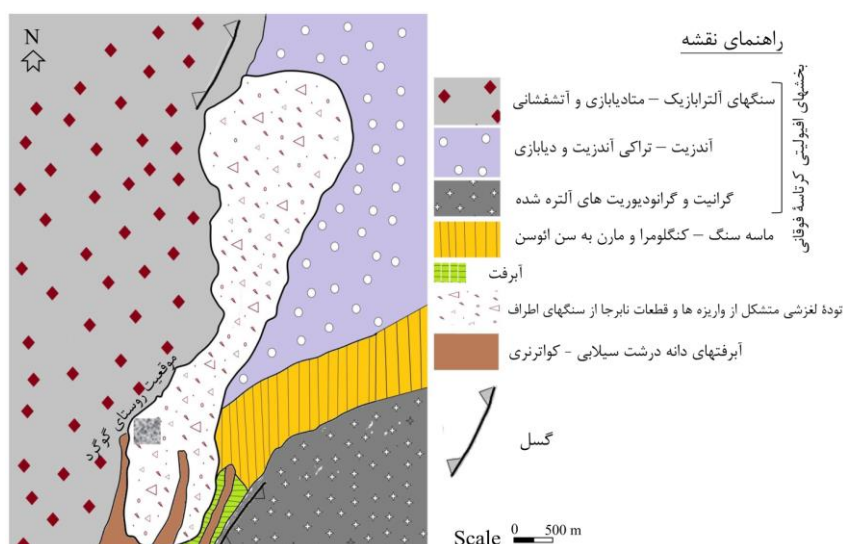
عمومی شمال غربی - جنوب شرقی در منطقه مشخص می توپوگرافی منطقه کاملاً ناهموار و با شیب دامنه‌ای. شوند تند بوده و حاوی آبراهه‌های متعدد در امتداد شمالی - جنوبی می‌باشد. با توجه به سستی و فرسایش‌پذیری بالای سری افیولیتی در منطقه، در سطح دامنه قشر نسبتاً ضخیمی از مواد هوازده دیده می‌شود. شرایط توپوگرافی محدوده زمین لغزش گوگرد در شکل ۶ و مشخصات زمین‌شناسی محدوده لغزش در شکل ۷ نشان داده شده (Khodavirdizadeh and Asghari-Kalajahi, 2020; Geological Survey of Iran, 1978.) است

از نظر زمین‌شناسی جزء پادگانه‌های آبرفتی جدید و مخروط‌افکنه و آبرفت‌های بستر رودخانه‌ای قرار می‌گیرد (Geological Survey of Iran, 1978). جهت شیب لایه‌های موجود در منطقه نشان می‌دهد که جهت لغزش تنها در قسمت غرب زمین لغزش با جهت لایه- از نظر زمین‌ساختی محدوده مورد بندی مطابقت دارد. مطالعه بر روی افیولیت‌های خوی که توسط عملکرد نیروهای همگرا تحت فازهای تکتونیکی معادل لارامین و نزدیک شدن بلوک ایران و عربستان و عملکرد گسل‌های راندگی در کرتاسه بالا و پالئوسن بالا آمده قرار گرفته است. نیروهای تکتونیکی با ایجاد چین‌ها و گسل‌های دارای روند



شکل ۶. مدل ارتفاعی رقومی منطقه گوگرد خوی با استفاده از GIS (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 6. Digital Elevation Model (DEM) of the landslide area of Khoy using GIS (Source: Authors)



شکل ۷. نقشه زمین‌شناسی محدوده زمین‌لغزش گوگرد خوی با استفاده از GIS (نگارندگان ۱۴۰۳)؛ بر اساس نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از محدوده زمین‌لغزش در پژوهشکده سوانح طبیعی ایران: (Adib, 2008)

Fig. 7. Geological map of the Gougerd landslide of Khoy area using GIS (Source: Authors 2024, Based on the geological map prepared of the landslide area by the Natural Disasters Research Institute (NDRI): NDRI, (Adib, 2008)

لغزش با استفاده از نتایج این مقطع تیپ بدست آمده است (شکل ۱۰). از نظر طبقه‌بندی یونیفاید رسوبات تا عمق ۳ متر عمدتاً متشکل از SM و سپس GC می‌باشد (شکل ۱۰). مشخصات نتایج مشخصات ژئومکانیکی توده لغزشی در جدول ۱ آمده است: از آنجا که پارامترهای حاصل از انجام آزمایش‌ها مقاومتی خاک مربوط به بعد از لغزش می‌باشند و بطور مستقیم مقادیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و دانسیته مصالح خاک و سنگی دخیل در لغزش را نمی‌توان محاسبه نمود و همچنین به علت تغییر خصوصیات مهندسی و ژئومکانیکی مصالح خاک بعد از لغزش، پارامترهای مقاومتی خاک دامنه با استفاده از نتایج روش تحلیل برگشتی و مدل‌سازی مربوط به آن با نرم‌افزار Rocscience.Slide.5.5025 بدست آمده است. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی به کمک روش‌های تجربی کنترل شده‌اند و تا حدود زیادی بر یکدیگر منطبق‌اند (Adib, 2008). در این تحقیق مقطع تیپ زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های فلنیوس معمولی (Fellenius, 1936)، بیشاب

### مشخصات زمین‌لغزش

لایه‌های خاک زمین‌لغزش گوگرد در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید متشکل از دو لایه SM و GC می‌باشد. زمین لغزش گوگرد بر روی رسوبات یک لغزش از نوع جریان‌ی قدیمی قرار گرفته است، (شکل ۴). علت اصلی زمین‌لغزش جریان‌ی قدیمی رخدادهای زمین‌شناسی دوره‌های زمین‌شناسی گذشته و علت اصلی زمین‌لغزش روستای گوگرد اشباع توده خاک دامنه حاصل از جریان‌های آبی بالا دست دامنه و کاهش مقاومت برشی توده خاک شناخته شده است (Khodavirdizadeh, 2014). این زمین‌لغزش از ۲۴ سال پیش شروع شده و هنوز هم اثراتی از فعالیت لغزشی وجود دارد (شکل ۸ و ۹). این لغزش از نوع چرخشی بوده و از نوع ساز و کار زمین لغزشی پیش‌رونده است. یک مقطع تیپ از زمین‌لغزش با استفاده از نتایج نقشه‌برداری‌ها و نتایج بررسی‌های ژئوتکنیک و ژئوفیزیک (Adib, 2008) و با استفاده از نرم‌افزار Rocscience.Slide.5.5025 بصورت دوبعدی طراحی شد و نتایج تحلیل‌های پایداری زمین

ساده شده (Bishop, 1955)، جانبو ساده شده و جانبو اصلاح شده (Janbu, 1968)، موگان- پرایس (Morgenstern-Price, 1965) و اسپنسر (Spencer, 1967) تحلیل پایداری شد و نتایج تحلیل شدند. در تحلیل‌ها علاوه بر انجام تحلیل‌های استاتیکی، یک سری تحلیل‌های شبه استاتیک نیز در شرایط مختلف آب زیرزمینی تحت تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک انجام گرفته است.

جدول ۱. مشخصات نتایج ژئومکانیکی توده زمین لغزش گوگرد (Khodavirdizadeh et al., 2014)

Table 1. Geomechanical properties of Gougerd landslide mass (Khodavirdizadeh et al., 2014)

| Test                                           | Code of ASTM                                        | Results                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Soil sieve analysis                            | D421- D422                                          | SM and GC                                                                                                                               |
| Atterberg limits                               | D4318-87                                            | PL= 21 %<br>LL= 30 %                                                                                                                    |
| Water content                                  | D2216                                               | 8~12 %                                                                                                                                  |
| Unit weight                                    | D854                                                | $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$<br>$\gamma_d=13 \text{ kN/m}^3$                                                                              |
| Direct shear test                              | D3080                                               | SM:<br>c =5 kPa<br>$\phi=29^\circ$<br>GC:<br>c=20 kPa<br>$\phi = 28^\circ$                                                              |
| Specific gravity (Gs)                          | D854                                                | 2.61                                                                                                                                    |
| Permeability                                   | D2434                                               | $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$                                                                                                       |
| Estimated geotechnical parameters of landslide | Back analysis with software Rocscience.Slide.5.5025 | SM:<br>c=5 kPa<br>$\phi = 30^\circ$<br>$\gamma=15 \text{ kN/m}^3$<br>GC:<br>c=10 kPa<br>$\phi = 28^\circ$<br>$\gamma=15 \text{ kN/m}^3$ |



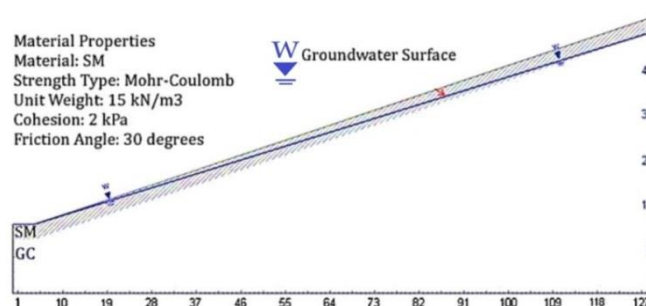
شکل ۸. موقعیت محدوده مناطق مسکونی روستای گوگرد، دید به سمت به جنوب غرب (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 8. The location of the residential area of the Gougerd village, view to Southwest (Source: Authors)



شکل ۹. تأثیر زمین لغزش گوگرد در مناطق مسکونی روستایی (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 9. The effect of Gougard landslide on rural residential areas (Source: Authors)



شکل ۱۰. مقطع تیپ دو بعدی (2D) زمین لغزش گوگرد با استفاده از نرم افزار Rocscience (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 10. Two-dimensional (2D) cross-section of the Gougard landslide: using Rocscience, (Source: Authors)

بخش نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب زیرزمینی بیشترین تأثیر را در مقادیر ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی دارد.

### تحلیل پایداری استاتیکی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک

تحلیل پایداری برای مقادیر زاویه اصطکاک داخلی خاک توده زمین لغزش از مقدار ۵ تا ۴۵ درجه به ۶ روش مختلف در شرایط طبیعی دامنه انجام گرفت و ضریب اطمینان آستانه لغزش برای هر ۶ روش بدست آمد (شکل ۱۲). با در نظر داشتن ضریب اطمینان آستانه لغزش برای هر یک از روش‌ها، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی لازم برای حالت آستانه لغزش به ترتیب برای روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبوی ساده شده، اصلاح شده، مورگان - پرایس و اسپنسر مقادیر زاویه اصطکاک داخلی به

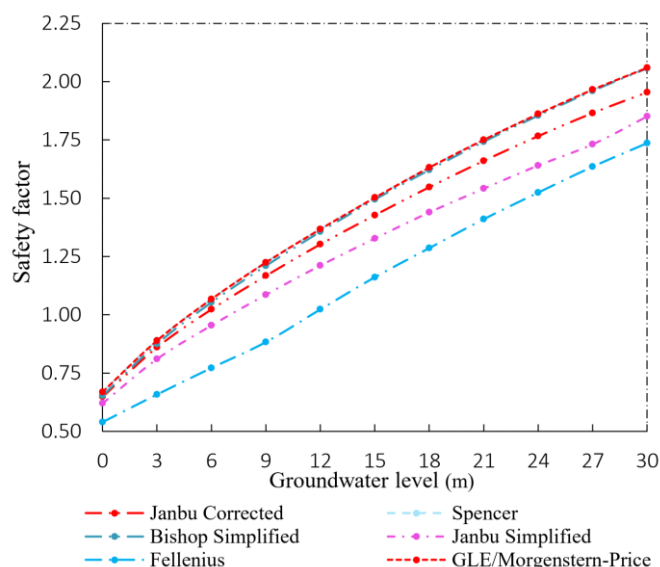
### تحلیل پایداری استاتیکی در شرایط مختلف آب

#### زیرزمینی

نتایج تحلیل‌های استاتیکی به ۶ روش موجود در شرایط مختلف آب زیرزمینی برای دامنه انجام شد و نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این تحلیل‌ها با توجه به مشخصات نتایج ژئومکانیکی توده زمین لغزش (جدول ۱) انجام شده است. نتایج نسبت به تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی از تاج زمین لغزش آنالیز شدند و ضریب اطمینان آستانه لغزش برای هر ۶ روش بدست آمد. در بررسی تغییرات ضریب اطمینان آستانه لغزش نسبت به ضریب اطمینان طبیعی دامنه (۰/۸۷) در روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبوی ساده شده، جانبوی اصلاح شده، مورگان - پرایس و اسپنسر به ترتیب ضریب اطمینان ۰/۸۹، ۰/۶۱، ۰/۷۵، ۰/۵۸، ۰/۵۹ و ۰/۵۹ تغییرات نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند. تحلیل‌های نتایج این

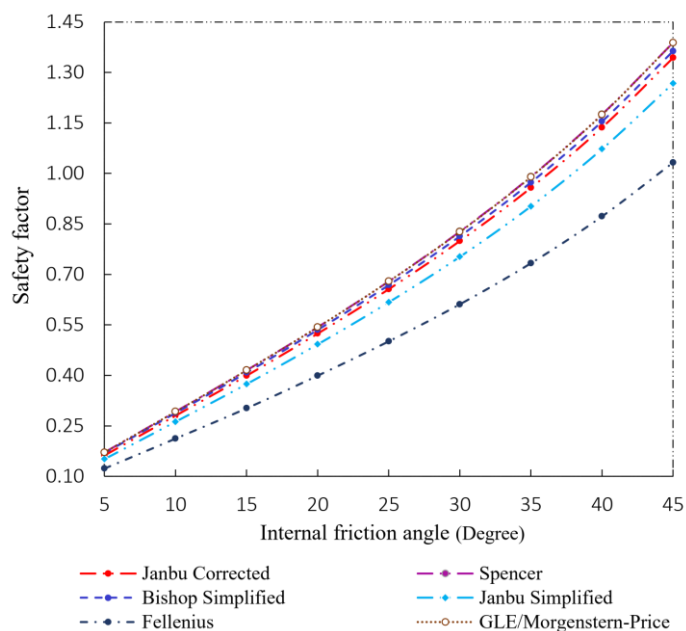
اصطکاک داخلی معادل ضریب اطمینان آستانه لغزش (شکل ۱۲) ضریب اطمینان دامنه برای هر یک از روش‌ها بدست آمد (شکل ۱۳). نتایج نشان می‌دهد اثر زاویه اصطکاک داخلی در روش فلنیوس معمولی بیشترین تأثیر را دارد.

ترتیب ۴۵، ۳۵، ۴۰، ۳۵، ۳۵ درجه بدست آمد. به منظور تحلیل اثر آب زیرزمینی بر نتایج هر یک از روش‌های مذکور نسبت به تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک داخلی، با در نظر داشتن عمق سطح آب زیرزمینی معادل ضریب اطمینان آستانه لغزش (شکل ۱۱) و مقدار زاویه



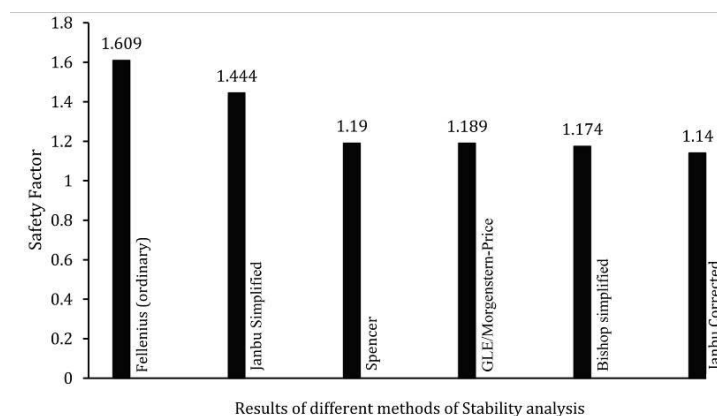
شکل ۱۱. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به عمق سطح آب زیرزمینی (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 11. The changes the FS with groundwater (Source: Authors)



شکل ۱۲. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زاویه اصطکاک داخلی (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 12. The changes the FS with internal friction angle (Source: Authors)



شکل ۱۳. تغییرات ضریب اطمینان حاصل از نتایج روش‌های مختلف تحلیل پایداری نسبت به شرایط آب زیرزمینی و زاویه اصطکاک داخلی معادل آستانه لغزش در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ (مأخذ: نگارندگان)

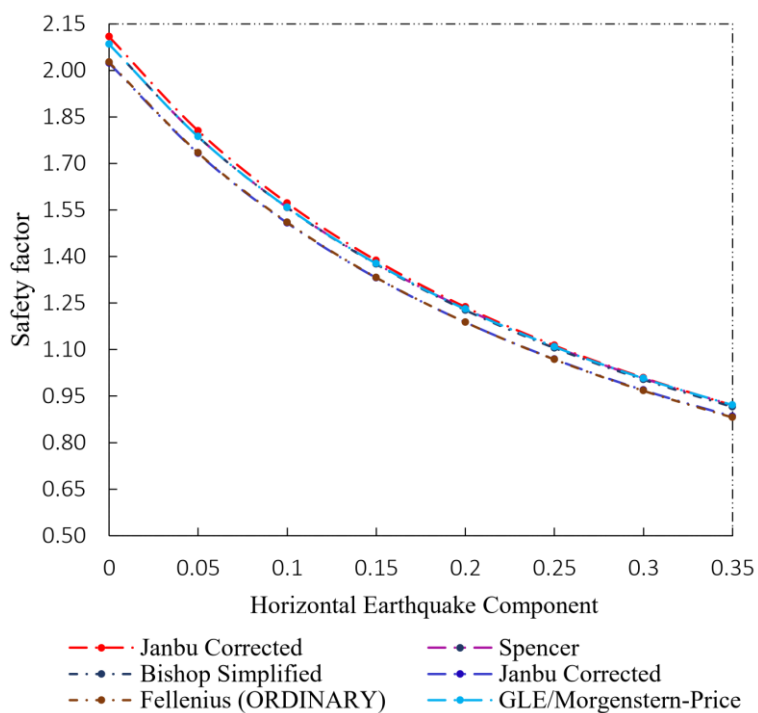
Fig. 13. The changes the FS obtained from the results of different methods relative to groundwater conditions and the internal friction angle equivalent to the critical state (Source: Authors)

نسبت به حالت تحلیل استاتیکی در حالت دامنه خشک برای هر یک از روش‌ها تعیین شد (شکل ۱۵). ضریب اطمینان برای روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبوی ساده شده، جانبوی اصلاح شده، مورگان-پرایس و اسپنسر به ترتیب  $44/8\%$ ،  $44/6\%$ ،  $50\%$ ،  $49/8\%$  و  $49/8\%$  تغییرات نشان داد. عمق سطح آب زیرزمینی از تاج زمین لغزش برای مقادیر متناسب با ضریب اطمینان آستانه لغزش هر یک از روش‌ها در حالت تحلیل استاتیکی به ترتیب برای روش‌های مذکور نسبت به اعمال مؤلفه افقی نیروی زلزله برابر  $15\%$ ، به ترتیب  $125\%$ ،  $200\%$ ،  $133\%$ ،  $200\%$  و  $200\%$  تغییرات نشان داد (شکل ۱۶ و ۱۷).

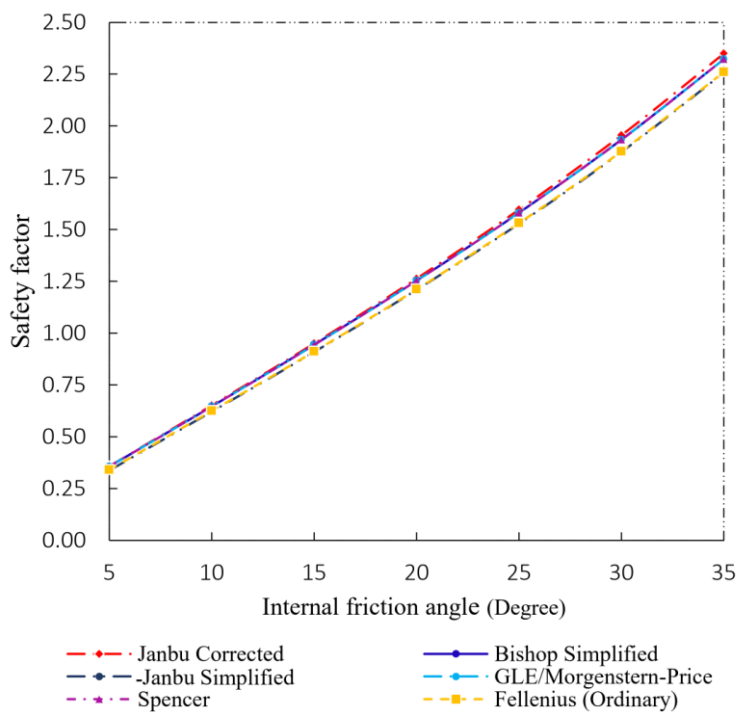
### تحلیل پایداری نسبت به نیروی زلزله

تحلیل‌های پایداری شبه استاتیک برای ۶ روش مختلف در شرایط اعمال نیروی زلزله، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی انجام گرفت. ضریب اطمینان آستانه لغزش برای هر یک از روش‌ها در حالت دامنه خشک در اعمال مؤلفه افقی نیروی زلزله بدست آمد (شکل ۱۴). نتایج نشان می‌دهد اثر نیروی زلزله بر ضریب اطمینان روش فلنیوس معمولی و جانبو ساده بیشترین تأثیر را دارد.

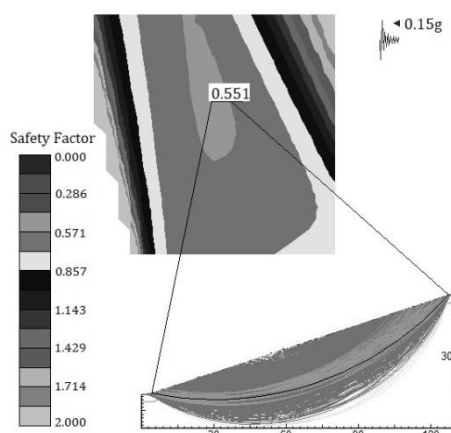
با در نظر داشتن ضریب اطمینان آستانه لغزش برای هر یک از روش‌ها در این بخش از تحلیل (شکل ۱۴)، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی معادل ضریب اطمینان آستانه لغزش



شکل ۱۴. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به مؤلفه افقی نیروی زلزله در حالت دامنه خشک (مأخذ: نگارندگان)  
 Fig. 14. The changes the FS with horizontal earthquake components in dry state (Source: Authors)

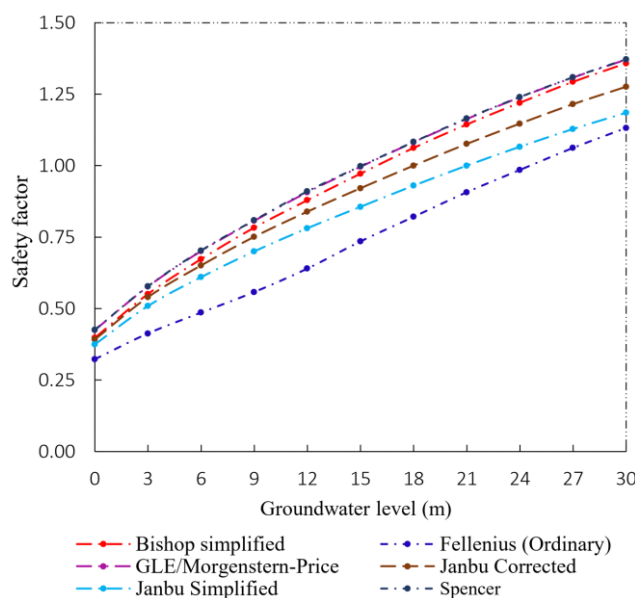


شکل ۱۵. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت دامنه خشک (مأخذ: نگارندگان)  
 Fig. 15. The changes the FS with internal friction angle in dry state (Source: Authors)



شکل ۱۶. تحلیل پایداری شیب در حالت توده خاک خشک و تأثیر زلزله با استفاده از نرم افزار Rocscience.Slide.5.5025 (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 16. Slope stability analysis in the dry soil mass state and earthquake effect using Rocscience.Slide.5.5025 software (Source: Authors)



شکل ۱۷. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به شرایط آب زیرزمینی (مأخذ: نگارندگان)

Fig. 17. The changes the FS with groundwater (Source: Authors)

است. رخداد لغزش اصلی در حاشیه رودخانه مهم ترین علل خرابی های منازل مسکونی روستای گوگرد است. لغزش های روستای گوگرد بنا به گفته ساکنین روستا از حدود ۲۴ سال پیش ایجاد شده است و پس از هر بارندگی سنگین این مسئله تشدید شده است. عمده لغزش های رخ داده در روستا در مجاورت رودخانه واقع در غرب روستا مشاهده می

## بحث و نتایج

محدوده زمین لغزش روستای گوگرد بخشی از یک زمین- لغزش جریانی قدیمی است و از لحاظ زمین ساختی بر روی افیولیت های خوی واقع است. به طور کلی می توان گفت که منشأ اصلی مصالح توده لغزیده از سه منشأ زمین لغزش قدیمی بزرگ، مخروط افکنه ای و رسوبات رودخانه ای جوان

شوند که همچنان به سمت شرق روستا در حال پیشروی می‌باشند. حمل حجم عظیمی از رسوبات توسط رخداد زمین‌لغزش جریانی قدیمی به این دامنه و وجود سنگ‌های شیلی و کنگلومرای و تکتونیزه بودن توده‌های سنگی منطقه و قرارگیری محدوده در جزء پادگانه‌های آبرفتی جدید و مخروط‌افکنه و آبرفت‌های بستر رودخانه‌ای سبب تشکیل خاک‌های این دامنه شده است. از نظر طبقه‌بندی که با SM یونیفاید رسوبات تا عمق ۳ متر عمدتاً متشکل از در تغییر می‌یابد. GC افزایش عمق جنس مصالح به نوع این تحقیق جهت تحلیل پایداری زمین لغزش گوگرد از روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبوی پرایس و اسپنسر ساده شده، جانبوی اصلاح شده، مورگان- استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که ضریب اطمینان دامنه با افزایش زاویه اصطکاک داخلی زیاد می‌شود (شکل ۱۲). و این نوع تحلیل همبستگی بهتری با ضریب اطمینان و رابطه مقاومت برشی خاک را نشان می‌دهد  $(\tau = c + \sigma_n \tan \phi)$ . در نتیجه عامل افزایش میزان ضریب اطمینان، افزایش مقاومت برشی خاک به سبب ازدیاد زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده از این تحلیل با نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پایداری دامنه نسبت به آب زیرزمینی بیانگر کاهش میزان ضریب اطمینان در اثر حضور آب می‌باشد به طوری که با کاهش عمق سطح آب زیرزمینی از سطح دامنه ضریب اطمینان بیشتر می‌شود (شکل ۱۱). و این می‌تواند به سبب بوجود آمدن فشارهای آب منفذی توده خاک دامنه باشد. بدین ترتیب که فشار آب منفذی با کاهش تنش عمودی  $(\sigma_n)$  در رابطه مقاومت برشی  $(\tau = c + \sigma_n \tan \phi)$  می‌تواند ضریب اطمینان دامنه را کاهش دهد. تحلیل نتایج حاصل از انواع روش‌ها در پایداری زمین لغزش بصورت آماری به شرح زیر می‌باشد:

### الف- تحلیل‌های استاتیکی

(۱) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های استاتیکی به روش‌های مختلف، کمترین مقدار ضریب اطمینان (۰/۶۵۸) در روش فلنیوس معمولی بدست آمد. در آنالیز ضرایب این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان-پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر ۰/۳۲/۹، ۰/۲۳/۱، ۰/۳۰/۶، ۰/۳۵/۱ و ۰/۳۵/۲ اختلاف نشان دادند و افزایش یافتند (جدول ۲).

(۲) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های استاتیکی نسبت به تغییرات اثر آب زیرزمینی که در همه روش‌ها عمق سطح آب زیرزمینی ۲۴ متر پایین نگه داشته شده است، کمترین مقدار ضریب اطمینان در این تغییرات در روش فلنیوس معمولی با مقدار برابر ۱/۷۳۶ بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های بیشاب ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان- پرایس و اسپنسر مقادیر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر ۰/۱۸/۴، ۰/۶/۵، ۰/۱۲/۵، ۰/۱۸/۵ و ۰/۱۸/۶ اختلاف نشان دادند و افزایش یافتند.

(۳) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های استاتیکی نسبت به اثر زاویه اصطکاک داخلی خاک که در همه روش‌ها زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۵ درجه اعمال شده است کمترین مقدار ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی با مقدار ۰/۷۳۳ بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان-پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر ۰/۳۲/۷، ۰/۲۳/۱، ۰/۳۰/۵، ۰/۳۴/۹ و ۰/۳۵/۲ اختلاف نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند (جدول ۲).

(۴) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های استاتیکی نسبت به اثر زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت دامنه خشک که در همه روش‌ها زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۵

شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر  $۰/۱۳۲$ ،  $۰/۲/۸$ ،  $۰/۴$ ،  $۰/۲/۸$  و  $۰/۲/۸$  اختلاف نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند (جدول ۲).

درجه اعمال شده است کمترین مقدار ضریب اطمینان در روش جانبو ساده با مقدار  $۲/۲۵۷$  بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبو اصلاح

جدول ۲. مقایسه نتایج روش‌های مختلف تحلیل پایداری استاتیکی (مأخذ: نگارندگان)

Table 2. Comparison of results of different static stability analysis methods (Source: Authors)

| ضریب اطمینان محاسبه شده |               |                  |                 |               |               | شرح مسئله                                                                           |
|-------------------------|---------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| اسپنسر                  | مورگان- پرایس | جانبوی اصلاح شده | جانبوی ساده شده | یشاب ساده شده | فلنیوس معمولی |                                                                                     |
| $۰/۸۸۹$                 | $۰/۸۸۸$       | $۰/۸۵۹$          | $۰/۸۰۹$         | $۰/۸۷۴$       | $۰/۶۵۸$       | SM: $c=5 \text{ kPa}$ و $\phi=30^\circ$<br>GC: $c=10 \text{ kPa}$ و $\phi=28^\circ$ |
| ۳۵                      | ۳۵            | ۳۵               | ۴۰              | ۳۵            | ۴۵            | $\phi$ آستانه لغزش (درجه)                                                           |
| $۰/۹۸۹$                 | $۰/۹۸۸$       | $۰/۹۵۶$          | $۰/۹۰۱$         | $۰/۹۷۲$       | $۰/۷۳۳$       | SM: $c=5 \text{ kPa}$ و $\phi=35^\circ$<br>GC: $c=10 \text{ kPa}$ و $\phi=35^\circ$ |

برابر  $۰/۳/۸۵$ ،  $۰/۰/۳۴$ ،  $۰/۴/۴۲$ ،  $۰/۴/۵۴$  و  $۰/۴/۵۴$  اختلاف نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند.

۳) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی نسبت به اثر آب زیرزمینی که در همه روش‌ها مقدار مؤلفه افقی نیروی زلزله برابر  $۳۵$  اعمال شده است کمترین مقدار ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی با مقدار  $۰/۴۱۳$  بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر  $۰/۳۳/۴$ ،  $۰/۲۳/۲$ ،  $۰/۷$ ،  $۳۰$ ،  $۳۹/۷$  و  $۳۹/۹$  اختلاف نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها با اعمال مقدار مؤلفه افقی نیروی زلزله برابر  $۱۵$  و مقایسه نتایج آن نسبت به گروه تحلیل استاتیکی در روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان در روش‌های مذکور به ترتیب  $۰/۵۹/۳$ ،  $۰/۵۸/۸$ ،  $۰/۵۹/۱$ ،  $۵۹/۲$ ،  $۵۴$  و  $۵۳/۹$  اختلاف نشان دادند و مقادیر کاهش یافتند.

## الف- تحلیل‌های شبه‌استاتیکی

۱) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی نسبت به اثر مؤلفه افقی نیروی زلزله در حالت دامنه خشک که در همه روش‌ها مقدار مؤلفه افقی نیروی زلزله برابر  $۱۵$  اعمال شده است کمترین مقدار ضریب اطمینان در روش جانبو ساده با مقدار  $۱/۳۳۱$  بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر  $۰/۰۷۵$ ،  $۰/۳/۳$ ،  $۰/۴/۲$ ،  $۰/۳/۴۵$  و  $۰/۳/۴۵$  اختلاف نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند.

۲) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی نسبت به اثر مؤلفه افقی نیروی زلزله در حالت دامنه خشک که در همه روش‌ها مقدار مؤلفه افقی نیروی زلزله برابر  $۳۵$  اعمال شده است کمترین مقدار ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی با مقدار  $۰/۸۸۱$  بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب

همواره مقادیر ضریب اطمینان کمتری در این روش نسبت به روش‌های دیگر حاصل شد. ضریب اطمینان آستانه لغزش در روش فلنیوس معمولی در حالت استاتیک بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی را داشت. در نتایج بررسی‌های این پژوهش به روش‌های مختلف تحلیل، در مقادیر بالای ۴۵ درجه برای زاویه اصطکاک داخلی خاک در شرایط استاتیک (به غیر از روش فلنیوس معمولی) و در مقادیر کمتر از ۱۵/۱ برای مولفه افقی زلزله در شرایط شبه استاتیک و حالت خشک دامنه زمین لغزش گوگرد به حالت پایدار در می‌آید. بیشترین تأثیر نیروی زلزله در زمین‌لغزش گوگرد در روش بیشاب ساده شده با میزان ۱۴۶/۴ درصد تغییرات در ضریب اطمینان و کمترین اثر آن در روش جانبو ساده شده با میزان ۱۳۲/۸ درصد تغییرات در مقدار ضریب اطمینان بدست آمد. بیشترین تأثیر مقادیر زاویه اصطکاک داخلی خاک در تحلیل استاتیکی در روش جانبو ساده شده با ۷۳۹ درصد تغییرات در مقدار ضریب اطمینان و کمترین اثر آن در روش بیشاب ساده شده با ۷۰۶/۵ درصد تغییرات در مقدار ضریب اطمینان بدست آمد. ضریب اطمینان دامنه در تحلیل‌های شبه استاتیک و در روش‌های مختلف تحلیل نسبت به هم تغییرات خیلی کمتری نشان داد و اختلاف بیشترین و کمترین مقدار ضریب اطمینان حاصل از ۶ روش مختلف تحلیل تغییرات کمتر از ۵ درصد حاصل شد.

## References

- Adib, A. (2008). The study of the landslide instability causes of Gougerd village of Khoy city. Research project, Natural Disasters Research Institute (NDRI), Environmental Hazards Department. (In Persain).
- Asghari-Kaljahi, E., Namakchi, F., & Vaezi Hir, A. (2016). Landslide Hazard Zoning in the Western Area of Khoy County Using Anbalagan Method.

۴) در ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی در همه روش‌ها عمق سطح آب زیرزمینی ۲۴ متر پایین نگه داشته شده است، و نیز مقدار مؤلفه افقی نیروی زلزله برابر ۱۵/۱ اعمال شده است کمترین مقدار ضریب اطمینان در روش فلنیوس معمولی با مقدار ۱/۱۳۲ بدست آمد. در آنالیز این گروه از تحلیل‌ها نسبت به این مقدار ضریب اطمینان در روش‌های بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان به ترتیب برابر ۱۹/۹٪، ۴/۶٪، ۱۲/۷٪، ۲۱/۱٪ و ۲۱/۲٪ اختلاف نشان دادند و مقادیر افزایش یافتند. و مقایسه نتایج آن نسبت به گروه تحلیل استاتیکی بدون اعمال تغییرات در عمق سطح آب زیرزمینی در روش‌های فلنیوس معمولی، بیشاب ساده شده، جانبو ساده شده، جانبو اصلاح شده، مورگان- پرایس و اسپنسر ضرایب اطمینان در روش‌های مذکور به ترتیب ۵۳/۳٪، ۵۱/۴٪، ۵۶/۱٪، ۵۳/۱٪ و ۵۰/۱٪ اختلاف نشان دادند و مقادیر کاهش یافتند.

## نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج تحلیل‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی با ۶ روش مختلف تحلیل نتایج مختلفی در مقادیر ضریب اطمینان زمین‌لغزش بدست آمد. ضریب اطمینان دامنه در روش فلنیوس معمولی در تحلیل استاتیکی و شبه‌استاتیکی تغییرات بیشتری را نسبت به سایر روش‌ها نشان داد و

Geography and Planning. Volume 20, Issue 56. August 2016. Pages 19-38. (In Persian).

Bishop, A. W. (1955). "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes," *Geotechnique*, vol. 5, pp. 7-17, 1955. View at Publisher • View at Google Scholar.

Coulomb, C.A. (1776) *Essai sur une application des regles de maximis et minimis quelques problemes de statique, relatits a l'architecture*. Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science 7, Paris.

- Fellenius, W. (1936). "Calculation of the stability of earth dams," in In Proceedings of the 2nd Congress on Large Dams, vol. 4, pp. 445–463, Wash, USA.
- Fu Zhu, W.Z., & Mingzhi, S. (2017). "A New Calculation Method for the Soil Slope Safety Factor" Mathematical Problems in Engineering. Volume 2017, Article ID 3569826, 6 pages
- Khodavirdizadeh, A., & Asghari-Kaljahi, E. (2020). Slope Movements in the Southwest of Khoy County, Iran (Characterizations, Causes and Solutions). Springer Nature Switzerland AG 2020, GeoMEast 2019, SUCI, pp 94–103,
- Khodavirdizadeh, A., Asghari-Kaljahi, E., & Abolhasanzadeh, S. (2014). Sensitivity of Soil Cohesion on the Stability of Gougerd Landslide, Northwest of Iran. Engineering Geology for Society and Territory, Volume 2, 1281-1284, Springer International Publishing (2015),
- Khodavirdizadeh, A., Asghari-Kaljahi, E., & Abolhasanzadeh, S. (2012). The effect of soil parameters on the stability of Gougerd village landslide. In: 2nd National Conference on Structure, Earthquake and Geotechnics, Babolsar, Iran. (In Persian)
- Khodavirdizadeh, A., Razizadeh, F., Asghari-Kaljahi, E., & Poormohsen, M. (2011). Pseudo-Static stability analysis of Gougerd landslide under different groundwater conditions. In: First International Conference on Urban Construction in the Vicinity of Faults (ICCVAF 2011), Tabriz, Iran, 3–5 September 2011. (In Persian).
- Khodavirdizadeh, A., Razizadeh, F., & Poormohsen, M. (2010). Cause of slide investigation and static stability analysis of Gougerd landslide in the Khoy area. In: The 14th Symposium of Geological Society of Iran and 28th Symposium on Geosciences, 16–19 September 2010, Urmia University. (In Persian)
- Kharabinová, S., & Panulinová, E. (2020). Impact of shear strength parameters on slope Stability. MATEC Web of Conferences 310, 00040 (2020).
- He, Y., Wang, Y., Xu, Z., & Sun, R. (2022). Critical soil thickness analysis and stability prediction of slope. Research Square.
- Huang, Y., Zhang, J., Li, B., & Chen, Sh. (2024). Slope Stability Analysis and Soil Mechanical Properties of Impact Craters around the Lunar South Pole. remote sensing.
- Janbu, N. (1968). "Slope stability computations," in Soil Mechanics and Foundation Engineering Journal, Technical University of Norway, Trondheim, Norway. (1968). View at Google Scholar
- Moomivand, H. (2016). Rock Mechanics (First Volume: Fundamental and Advanced), Urmia University, 2nd Edition, 705 pages. (In Persian).
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). "The analysis of the stability of general slip surfaces," Géotechnique, vol. 15, no. 1, pp. 79–93, 1965. View at Publisher · View at Google Scholar.
- Modirzadeh, J. (2022). Investigation of land surface behavior caused by landslides and earthquakes using Sentinel 1 images and radar interferometry techniques based on permanent scatterers and DiNSAR in Gougerd village. MSc Thesis. Faculty of Geography, University of Tehran, Iran. (In Persian)
- Nabavi, MH. (1976). An introduction to geology of Iran. (in Persian), Geological Survey of Iran, Tehran, 1976.
- Namakchi, F., Asghari-Kaljahi, E., Vaezi Hir, A., & Khodavirdizadeh, A. (2013) Study of the landslide hazard in western of Khoy area, Second International Conference on Environmental, Jun 3, 2013. (In Persian)
- Namakchi, F. (2014). Study and landslide hazard Zoning in the Western area of khoy (Weat Azarbaijan). MSc Thesis. Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Iran. (In Persian)
- Rahn Perry, H. (1996). Engineering Geology: An Environmental Approach. Pearson; 2nd Revised ed. Edition (August 2, 1996). 672 pages.
- Spencer, E. (1967). "A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces," Geotechnique, vol. 17, no. 1, pp. 11–26, 1967. View at Publisher · View at Google Scholar
- Geological survey of Iran. (1978). Geology map of Khoy, Scale 1 :250,000.
- Stocklin, J. (1968). Structural History and Tectonic of Iran: A Review. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, USA, 52, 1229-1258.

Wubalem, A., & Meten, M. (2020). Landslide susceptibility mapping using information value and logistic regression models in Goncha Siso Eneses area, northwestern Ethiopia. SN Applied Sciences, 2, 1-19.

Zhang, a. W., Ji a, J., Gao a, Y., Li a, X., & Zhang, Ch. (2020). Spatial variability effect of internal friction angle on the post-failure behavior of landslides using a random and non-Newtonian fluid based SPH method. Geoscience Frontiers, 11(4), 1107-1121.