



The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes

M. Mahboubi Niazmandi¹, S. Mirassi², Mehdi Hashemi jokar³, Mohammad Momeni²

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

² Faculty of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

³ The main member of the specialized geotechnical commission, Organization of the construction engineering system

ABSTRACT: The present paper aims to determine the undrained bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soil in the vicinity of a geogrid-reinforced slope under the effect of combined loading by applying horizontal (H), vertical (V) and bending moment (M) loads. To this aim, by finite element modeling in ABAQUS based on the controlled load-displacement method, the failure envelopes and the failure mechanism of the subsoil of strip footings under the effect of combined loadings were determined in V-H, V-M and V-H-M loading spaces. The results obtained in two cases of unreinforced and reinforced slopes with geogrids were compared by performing parametric studies regarding the effect of changes in undrained shear strength ratios of clayey layers (C_{u1}/C_{u2}) and the ratio of the thickness of the first clay layer to the width of the strip foundation ($H1/B$). The results showed that by increase C_{u1}/C_{u2} in V-H loading spaces, the vertical bearing capacity increased, which is caused by the increase in the undrained cohesion of the first layer. Furthermore, in scenarios involving both vertical-horizontal (V-H) and vertical-moment (V-M) load combinations, when subjected solely to vertical loading, a greater volume of soil experienced failure. The results showed that reinforcing the slope with geogrid increases the vertical and the moment bearing capacity by 31 and 35%, respectively. In general, the findings of this study provide a new insight into the failure mechanism of strip foundations based on two-layered clayey soils in the vicinity of geogrid-reinforced slopes under the effect of combined loads.

Review History:

Received: Sep, 01, 2022

Revised: Aug. 12, 2023

Accepted: Aug. 16, 2023

Available Online: Aug. 26, 2023

Keywords:

Finite element analysis

strip footings, two-layer clayey soil

geogrid-reinforced slope

combined loading

1- Introduction

Placing a foundation near a slope significantly reduces its bearing capacity. In such situations, the use of polymer reinforcements, such as geogrids, offers a viable solution to increase the foundation's bearing capacity [1]. Moreover, real-world foundation conditions involve the simultaneous application of vertical (V), horizontal (H), and bending moment (M) loads. Conventional designs estimate the foundation's bearing capacity under the influence of combined loads by making a series of simplifying assumptions [2]. However, recent studies [3,4] have demonstrated that such analyses are overly cautious and do not possess sufficient accuracy in determining the foundation's actual response to combined loads. Therefore, it is crucial to focus on understanding the behavior of foundations when subjected to combined loads, particularly in proximity to sloping terrain [4]. This area of research has attracted substantial interest from geotechnical experts, resulting in numerous studies conducted in this field. Examples include investigations into the bearing capacity of strip foundations on two-layered clay soils [4] and sandy soils [5], the behavior of skirted foundations [6], the effect of spatial variability in soil shear strength on foundation bearing capacity [7], and the bearing capacity of strip foundations on frictional-clay soil layers [8] under V-H-M combined loads.

Despite an extensive review of technical literature, it is noteworthy that the issue of undrained bearing capacity of clay soils near slopes under the influence of combined loads remains unexplored. Consequently, the present paper is aimed to evaluate the bearing capacity of a strip foundation on a two-layer clayey soil profile near a slope reinforced with geogrid, considering the simultaneous effect of combined loads.

2- Materials and Methods

In the present paper, the bearing capacity of strip foundations on clay soils adjacent to a slope reinforced with geogrid under different combined loading conditions (V-H, V-M, and V-H-M) was investigated using numerical modeling based on finite element analysis (FEA) in ABAQUS [9]. To determine the bearing capacity and draw the failure envelopes, FEA approaches based on the Probe technique for two-dimensional loads (V-H and V-M) and the Load-Probe for V-H-M loading were used [10,11]. Figure 1 illustrates the geometry of the modeled problem. According to this figure, a strip foundation with a width of B is placed on a two-layer clayey soil profile with undrained shear strengths C_{u1} and C_{u2} adjacent to the geogrid-reinforced slope.

*Corresponding author's email: m.mahboubi@sutech.ac.ir



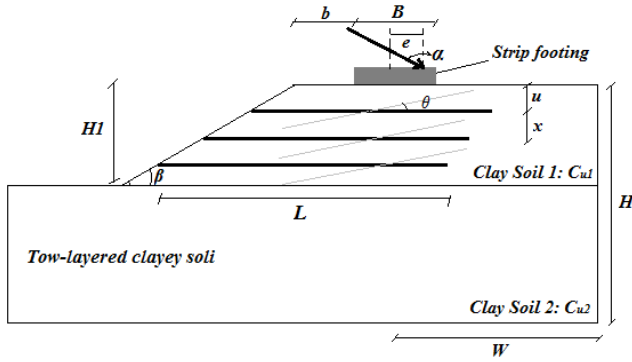


Fig. 1. Schematic of the modeled problem

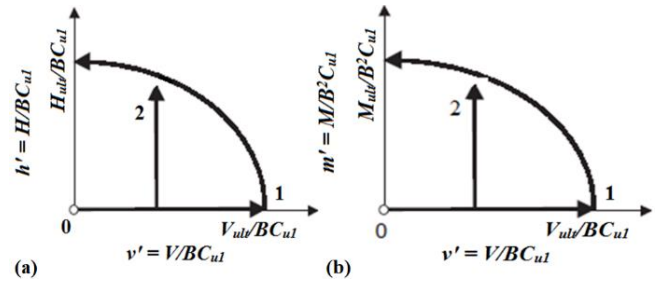


Fig. 2. Determination of failure envelopes using Probe and Load-Probe FEA in (a) V-H loading and (b) V-M loading

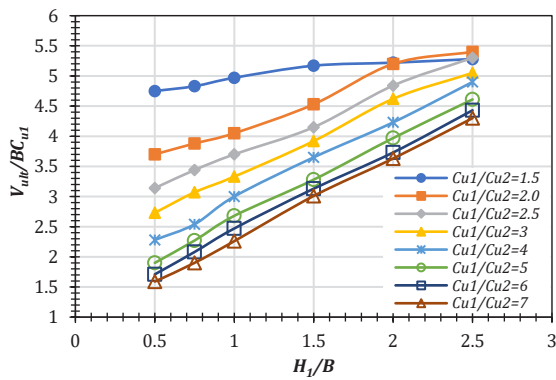


Fig. 3. Changes of V_{ult}/BC_{u1} versus $H1/B$ in V-H loading

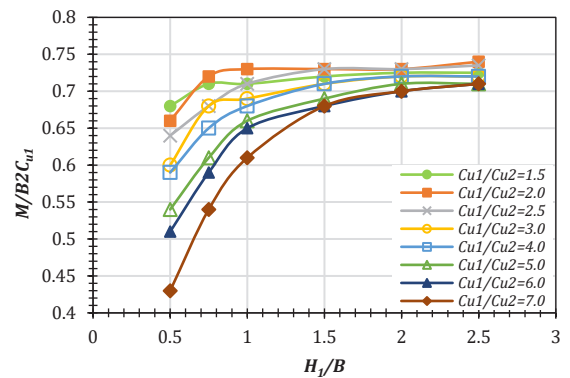


Fig. 4. Changes of M_{ult}/B^2C_{u1} versus $H1/B$ in V-M loading

The mechanism of determining the failure envelopes using Probe and Load-Probe analyzes in different loading modes is shown in Figures 3(a) and 3(b), respectively.

The focus of the parametric studies in this research is on the influence of the ratio of undrained shear strength of the clay layers (C_{u1}/C_{u2}) and the ratio of the thickness of the first clay layer to the width of the strip foundation ($H1/B$) on the bearing capacity of the foundation. The results will be compared and evaluated in terms of failure envelopes, changes in vertical load capacity, and the failure mechanism in different loading situations.

3- Results and Discussion

Figure 3 shows the changes of the maximum points of failure envelopes of the vertical bearing capacity (V_{ult}/BC_{u1}) versus $H1/B$ for different C_{u1}/C_{u2} in V-H loading. As can be seen, by increase in C_{u1}/C_{u2} , the failure envelopes become smaller. The reason for this can be attributed to the increase in the vertical bearing capacity of the foundation with an increase in the undrained shear strength of the first layer. These changes occur more strongly at lower $H1/B$ ratios. This means that the lower the thickness of the first layer, the more the vertical bearing capacity decreases with an increase in the resistance of this layer.

Figure 4 displays the changes of the maximum points of failure envelopes of the bending moment bearing capacity (M_{ult}/B^2C_{u1}) versus $H1/B$ for different C_{u1}/C_{u2} in V-M loading. By comparing the results, it can be seen that with the increase of C_{u1}/C_{u2} , the failure envelope becomes smaller. However, this change in the failure envelope occurs more intensely at lower $H1/B$ ratios. This means that the smaller the soil thickness of the first layer is, the less bending anchor is needed for the foundation to break as the strength of this layer increases.

4- Conclusions

The important and practical results of the present research can be stated as follows:

With the increase in C_{u1}/C_{u2} in V-H loading, the failure envelopes are more distant from each other because the vertical bearing capacity increases with an increase in the undrained adhesion of the first layer. Additionally, with the increase in C_{u1}/C_{u2} in V-H loading, the failure envelope becomes smaller.

The soil failure mechanism under the foundation, under the effect of V-H and V-M combined loadings, shows that in the case where there is only vertical loading, a larger volume of soil is failed.

A comparison of foundation failure envelopes in two cases (slope without reinforcement and slope reinforced with geogrid) under the effect of V-H and V-M combined loadings shows that slope reinforcement has a significant effect on vertical bearing capacity.

References

- [1] R. Sharma, Q. Chen, M. Abu-Farsakh, S. Yoon, Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation, *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009) 63–72.
- [2] M.F. Bransby, G.J. Yun, The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading”. *Geotechnique*, 59(2) (2009) 115–125.
- [3] L.C. Hung, S.R. Kim, Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads, *Marine Georesources & Geotechnology*, 32(1) (2014) 76–92.
- [4] P. Rao, Y. Liu, J. Cui, Bearing capacity of strip footings on two-layered clay under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 210–218.
- [5] C. Tang, K.K. Phoon, K.C. Toh, Effect of footing width on N_y and failure envelope of eccentrically and obliquely loaded strip footings on sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6) (2014) 694–707.
- [6] B. Bienen, C. Gaudin, M.J. Cassidy, M. Rausch, A. Purwana, H. Krisdani, Numerical modeling of a hybrid skirted foundation under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 45 (2012) 127–139.
- [7] A. Hentati, M. Selmi, T. Kormi, N. Bel Hadj Ali. Probabilistic HM failure envelopes of strip foundations on spatially variable soil, *Computers and Geotechnics*, 102 (2018) 66–78.
- [8] A. Haghghi, P. Hu, J.G. Tom, K. Krabbenhoft, Combined loading of strip footings on sand-over-clay with layers of varying extents, *Soils and Foundations*, 59(2) (2019) 433–442.
- [9] ABAQUS, (2011), ABAQUS user’s manual, Version 6.13.1.
- [10] M.F. Bransby, M.F. Randolph, Combined loading of skirted foundations, *Geotechnique*, 48(5) (1998) 637–655.
- [11] S. Gourvenec, Randolph, M.F. Effect of strength non-homogeneity on the shape and failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay, *Geotechnique*, 53(6) (2003) 575–586.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Mahboubi Niazmandi, S. Mirassi, Mehdi Hashemi jokar, Mohammad Momeni, *The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(9) (2023) 387-390.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21741.7812](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21741.7812)





اثر بارگذاری ترکیبی بر ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر خاک دو لایه رسی مجاور شیب مسلح با ژئوگرید

میثم محبوبی نیازمندی^{۱*}، سهراب میراثی^۲، مهدی هاشمی جوکار^۱، محمد مؤمنی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

کلمات کلیدی:

تحلیل المان محدود
پی نواری
خاک رسی دو لایه
شیب مسلح با ژئوگرید
بارگذاری ترکیبی

خلاصه: هدف مقاله حاضر تعیین ظرفیت باربری زهکشی نشده پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های دو لایه رسی در مجاورت یک شیب مسلح شده با ژئوگرید تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی با اعمال بارهای افقی (H)، قائم (V) و لنگر خمشی (M) می‌باشد. به همین منظور با مدلسازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس و انجام تحلیل بر مبنای روش بار-جابجایی کنترل شده، پوش‌های گسیختگی و مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی در فضاهای بارگذاری V-H، V-M و V-H-M تعیین شد. نتایج حاصله در دو حالت شیب‌های فاقد تسلیح و مسلح شده با لایه‌های ژئوگرید و با انجام مطالعات پارامتریک در خصوص اثر تغییرات نسبت‌های مقاومت زهکشی نشده لایه‌های خاک رسی (Cu2/Cu1) و نسبت ضخامت لایه رسی اول به عرض پی نواری (B/H1) مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش Cu2/Cu1 در بارگذاری V-H، ظرفیت باربری قائم افزایش یافته که ناشی از افزایش چسبندگی زهکشی نشده لایه اول است. همچنین در بارگذاری‌های ترکیبی V-H و V-M در حالتی که تنها بارگذاری قائم وجود داشته باشد، حجم بیشتری از خاک دچار گسیختگی می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که تسلیح شیب با ژئوگرید به ترتیب باعث افزایش ۳۱ و ۳۵ درصدی ظرفیت باربری قائم و ظرفیت لنگر خمشی پی می‌گردد. بطور کلی یافته‌های این مطالعه بینش جدیدی را از مکانیزم گسیختگی پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های دو لایه رسی در مجاورت شیب‌های مسلح شده با ژئوگرید تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی فراهم می‌نماید.

۱- مقدمه

لنگر خمشی (M) قرار داشته و لزوم توجه به رفتار پی‌ها تحت اثر اعمال چنین بارهایی به صورت ترکیبی بسیار حائز اهمیت است [۶]. این موضوع به ویژه در شرایطی که طرح و اجرای سازه‌ها در نزدیکی زمین‌های شیب‌دار اجتناب‌ناپذیر است، منجر به وخیم‌تر شدن اوضاع پی در زیر سازه گردیده و شیب‌داری زمین از یک سو و عدم توجه به اعمال همزمان بارهای ترکیبی روی پی از سوی دیگر می‌تواند بر پیچیدگی رفتار پی بیافزاید. به همین دلیل شناخت رفتار واقعی و پیچیده پی‌های واقع بر خاک‌های چندلایه و در مجاورت سطوح شیب‌دار مسلح تحت اثر همزمان بارهای ترکیبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در خصوص ظرفیت باربری پی‌های نواری و مسلح‌سازی خاک زیر پی با ژئوگریدها به صورت مجزا انجام شده است [۷]. به‌طور مثال برگادو^۱ و همکاران [۸] با مدلسازی آزمایشگاهی و عددی خاکریزهای مسلح شده با لایه‌های ژئوتکستایل دریافتند که ژئوتکستایل‌های با مقاومت بالا، تغییر شکل‌های پلاستیک را در خاک‌های

پی‌ها پایین‌ترین بخش یک سازه هستند که وظیفه انتقال وزن سازه به خاک زیرین یا بستر سنگی را بر عهده دارند [۱]. طراحی پی‌های سطحی معمولاً به دو عامل اصلی یعنی نشست زیر پی و ظرفیت باربری آن وابسته است [۲]. وقتی که یک پی در مجاورت یک زمین شیب‌دار قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری آن به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در چنین مواردی استفاده از مسلح‌کننده‌های پلیمری همچون ژئوگریدها به منظور افزایش ظرفیت باربری پی‌ها و همچنین کاهش نشست آنها تحت انواع مختلف بارگذاری توسعه زیادی پیدا کرده است [۳]. در گذشته عمدتاً با بهره‌گیری از فرضیات ساده‌کننده و روش‌های میانگین‌گیری، ظرفیت باربری پی‌ها تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی تخمین زده می‌شد. چنین تحلیل‌هایی عمدتاً محافظه‌کارانه بوده و از توانایی کافی برای تعیین پاسخ دقیق رفتار پی‌ها تحت اثر بارهای ترکیبی برخوردار نبودند [۴ و ۵]. این در حالی است که در شرایط واقعی پی تحت تاثیر همزمان بارهای قائم (V)، افقی (H) و

1 Bergado

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.mahboubi@sutech.ac.ir



بیشتر می‌باشد. گورونچ و راندولف^۷ [۲۲] نشان دادند که با اعمال بارهای ترکیبی در مقایسه با بارهای مجزا بر روی پی‌های دایره‌ای مستقر بر خاک رسی، پوش گسیختگی خاک زیر پی کوچکتر شده و ظرفیت باربری پی کاهش می‌یابد. هالسبی و پوزرین^۸ [۲۳] با تحلیل ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک رسی تحت اثر بارگذاری ترکیبی، به این نتیجه رسیدند که لحاظ کردن اندرکنش باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری پی نواری می‌گردد. باین^۹ و همکاران [۲۴] با استفاده از مدلسازی‌های عددی به بررسی رفتار پی‌های دامنی^{۱۰} تحت اثر بارهای ترکیبی قائم، افقی و خمشی (-H-V M) پرداختند. این محققین با بررسی پروفیل‌های مقاومت برشی، به این نتیجه رسیدند که مکانیزم‌های گسیختگی خاک زیر پی‌های دامنی تحت اثر بارگذاری ترکیبی در مقایسه با بارگذاری قائم نامنظم‌تر بوده و این مسئله ظرفیت باربری این پی‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. رائو^{۱۱} و همکاران [۴] با بررسی عددی ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های دولایه رسی تحت اثر بارهای ترکیبی، نشان دادند که ظرفیت باربری پی با افزایش نسبت چسبندگی زهکشی‌نشده لایه‌های رسی افزایش یافته و هرچه لایه خاک رسی بالایی (نزدیک پی) قوی‌تر باشد، ظرفیت باربری پی افزایش بیشتری خواهد داشت. تانگ^{۱۲} و همکاران [۲۵] با استفاده از روش المان محدود، رویکردی را جهت تعیین اثر بارگذاری‌های ترکیبی بر ظرفیت باربری قائم، افقی و خمشی پی نواری مستقر بر خاک ماسه‌ای پیشنهاد نمودند. هنتای^{۱۳} و همکاران [۲۶] با در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی مقاومت برشی خاک با استفاده از روش المان محدود تصادفی، ظرفیت باربری نهایی، مکانیزم گسیختگی و پوش‌های گسیختگی احتمالی پی‌های نواری را تحت اثر بارگذاری ترکیبی H-M تعیین نمودند. حقیقی و همکاران [۲۷] با استفاده از تحلیل‌های حدی المان محدود کرنش صفحه‌ای، به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک دولایه شامل لایه خاک اصطکاکی بر روی لایه خاک رسی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی پرداخته‌اند. این محققین روابطی را برای تخمین پوش‌های گسیختگی براساس هندسه مسئله و خصوصیات مصالح پیشنهاد نموده‌اند.

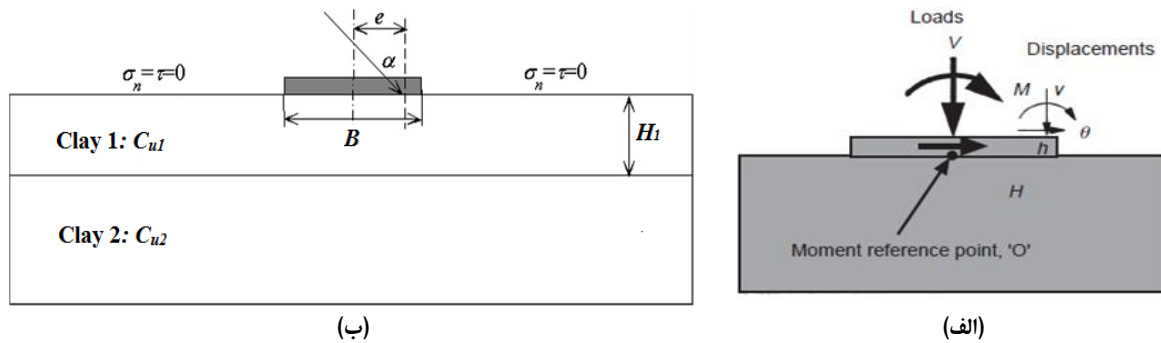
در مطالعات پیشین، توجه ویژه‌ای به مسئله ظرفیت باربری زهکشی‌نشده پی‌های نواری مستقر بر زمین‌های شیب‌دار حاوی خاک‌های چندلایه رسی

زیر پی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. یو^۱ [۹] با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی، تأثیر شرایط مرزی، ابعاد هندسی و تعداد لایه‌های ژئوگرید را بر ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاکریزهای لایه‌ای ماسه‌ای شیب‌دار و مسلح‌شده با ژئوگرید ارزیابی نمود. نتایج مطالعه وی نشان داد که با اضافه شدن لایه‌های ژئوگرید، ظرفیت باربری پی نواری بر روی سطح شیب‌دار به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. ال‌ساوواف^۲ [۱۰] با بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی دریافتند که ظرفیت باربری پی با بهبود خاک رس نرم در شیب با جایگزینی لایه ماسه‌ای مسلح‌شده با ژئوگرید، به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. شارما^۳ و همکاران [۳] بر مبنای مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین، اقدام به ارائه یک مدل تحلیلی برای تخمین ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های رسی و ماسه‌ای مسلح‌شده با ژئوگرید نمودند. غزوی و علی‌مردانی لواسانی [۱۱] نشان دادند که مسلح‌سازی خاک ماسه‌ای با ژئوستتیک‌ها در محل احداث پی‌های سطحی مجاور هم، منجر به افزایش ۱/۵ تا ۲ برابری ظرفیت باربری پی‌های سطحی می‌گردد. باسوچار^۴ و همکاران [۱۲] با بررسی تأثیر عمق مسلح‌کننده و تغییرات خصوصیات خاک بر رفتار نشست پی‌های نواری دریافتند که مسلح‌سازی خاک لایه‌ای با ژئوگرید تأثیر چندانی بر کاهش نشست ندارد. آراوجو^۵ و همکاران [۱۳] از طریق مدلسازی عددی و آزمایشگاهی، رفتار نشست خاک مسلح‌شده با ژئوگرید در زیر یک پی نواری را ارزیابی نمودند.

مسئله ظرفیت باربری پی‌ها تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی موضوع نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است [۱۴-۱۷]. برخی از محققین در گذشته با ارائه روش‌های تقریبی و یا تجربی به بررسی مسئله ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی پرداخته‌اند [۱۸-۲۰]. به‌عنوان نمونه می‌توان به تحقیق طیبات و کاتر^۶ [۲۰ و ۲۱] اشاره نمود که دریافتند اعمال بارگذاری‌های ترکیبی، منجر به کاهش ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های چسبنده همگن می‌گردد. علاوه بر این، مطالعات آنها در خصوص ظرفیت باربری پی‌های نواری و دایره‌ای بر روی خاک‌های رسی تحت اثر بارهای با خروج از مرکزیت بار زیاد نشان داد که با افزایش خروج از مرکزیت، ظرفیت باربری این پی‌ها کاهش یافته، ولی این تغییرات کاهش در پی‌های نواری

7 Gurnich and Randolph
8 Hulsby and Puzrin
9 Bienen
10 Skirted Foundations
11 Rao
12 Tang
13 Hentati

1 Yoo
2 El Sawwaf
3 Sharma
4 Basudhar
5 Araújo
6 Taiebat and Carter



شکل ۱. (الف) نمای شماتیک از بارهای ترکیبی اعمال شده بر روی یک پی نواری [۲۸]، (ب) حالت خاصی از بارگذاری ترکیبی (V-H) اعمالی بر روی یک پی نواری مستقر بر خاک دولایه رسی [۴]

Fig. 1. (a) Schematic view of the combined loads applied on a strip foundation [28], (b) A special case of combined loading (V-H) applied on a strip foundation on two-layer clay soil [4]

عرض B مستقر بر خاک دولایه رسی با مقاومت‌های زهکشی نشده C_{u1} و C_{u2} را نشان می‌دهد. مطابق این شکل لایه بالایی با ضخامت H_1 بر روی لایه دیگر که فراتر از ناحیه نفوذ پی (عمیق‌تر از $10B$) گسترش می‌یابد، قرار گرفته است. همچنین بار اعمالی به صورت مایل با زاویه α (با توجه به خط مرکزی پی نشان داده شده در شکل ۱-ب) بر روی این پی وارد شده و دارای خروج از مرکزیت e می‌باشد.

تحقیقات برانسی و راندولف [۲۸] نشان داده است که جهت تحلیل مکانیزم گسیختگی یک پی نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی باید اثر بارها را در فضای بارگذاری V-H-M به صورت توأمان در نظر گرفت. بر این اساس، مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی را می‌توان طبق تابع زیر در نظر گرفت:

$$f\left(\frac{V}{A_{eff}}, \frac{M}{D.A_{eff}}, \frac{H}{A_{eff}}\right) = s \quad (1)$$

که، f تابعی است که بیانگر فضای گسیختگی خاک زیر پی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی می‌باشد. پارامترهای A_{eff} نیز مساحت مؤثر پی، B قطر و یا عرض پی و s مقاومت خاک یا تنش مؤثر خاک در زیر پی بوده و V ، H و M نیز به ترتیب نیروهای افقی، قائم، خمشی وارد بر پی هستند. بر

مسلح تحت اثر بارهای ترکیبی صورت نگرفته است. به همین منظور پژوهش حاضر در تلاش است تا از طریق مطالعات عددی پارامتریک و مدلسازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس، به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر زمین‌های شیب‌دار حاوی خاک‌های دولایه رسی تحت اثر همزمان بارهای ترکیبی افقی، قائم و لنگر (V-H-M) بپردازد. برای این منظور، خاک دولایه رسی زهکشی نشده که لایه رس قوی‌تر (تسلیح شده توسط ژئوگرید) بر روی لایه ضعیف‌تر قرار دارد، در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و با صرف نظر از شرایط تماس بین پی و خاک، نتایج به صورت پوش‌های گسیختگی و مکانیزم گسیختگی در فضاهای مختلف بارگذاری (V-H-M و V-M، V-H) مورد مقایسه و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به تشریح مدلسازی‌های عددی، اعتبارسنجی نتایج مدلسازی و همچنین روند تحلیل‌های انجام شده در اثر بارگذاری ترکیبی پرداخته شده است. نظر به محوریت موضوعی مقاله یعنی ارزیابی تاثیر بارهای ترکیبی بر ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر خاک دولایه رسی در اینجا لازم است نمای شماتیکی از بارهای ترکیبی اعمال شده بر روی یک پی نواری نمایش داده شود (شکل ۱). همانطور که مشاهده می‌شود در واقعیت، پی‌ها تحت اثر بارهای ترکیبی و مجموعه‌ای از بارهای عمودی (V)، خمشی (M) و افقی (H) قرار دارند (شکل ۱-الف) [۲۸]. شکل ۱-ب یک پی نواری به

خاک بالا و پایینی هستند. شایان ذکر است که در تمامی مدلسازی‌ها، لایه رس قوی‌تر بر روی لایه ضعیف قرار گرفته است.

یکی از نکات مهمی که تأثیر عمده‌ای بر نتایج تحلیل‌های عددی دارد، محدوده انتخابی برای هندسه مدل شبیه‌سازی شده است [۳۱]. محدوده محیط مدلسازی شده (فاصله از طرفین پی) در دو جهت افقی تا محور تقارن به اندازه ۱۰ برابر عرض پی ($W = 10B$) و در جهت قائم نیز ۵ برابر عرض پی ($H = 5B$) تنظیم شد [۳۲]. این ابعاد طوری انتخاب شد که تنش‌های ناشی از بارگذاری به مرزها نزدیک نبوده و اثری روی تنش نهایی نداشته باشند و اثرات احتمالی مرزی را به حداقل برساند. زیرا چه در آزمایشات و چه در تحلیل‌های عددی ظرفیت باربری، فاصله نهایی بخش گسیختگی خاک تا کناره پی از حدود $3.5B$ تا $4B$ تجاوز نمی‌کند [۳۳]. شرایط مرزی مدل به صورت استاندارد تنظیم شده است. بدین منظور، در مرزهای جانبی فقط از تغییر مکان افقی جلوگیری شده و مرز پایین مدل نیز در هر دو جهت افقی و قائم ثابت در نظر گرفته شده است.

شکل ۲- ب یک نمونه از مدل‌های عددی مورد بررسی با دولایه ژئوگرید به فواصل ۰/۵ متر که در خاک لایه اول قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. در تمامی مدل‌ها تنها لایه اول مسلح‌شده و فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی (u) برابر ۰/۵ متر می‌باشد. در این نمونه پی نواری دقیقاً در مجاورت شیب قرار گرفته و در نمونه‌های دیگر اثر فاصله از شیب نیز لحاظ شده است. برای مش‌بندی، لایه‌های خاک رسی به تعدادی المان چهارضلعی کرنش صفحه‌ای دوطرفه هشت‌گره‌ای گسسته شده است که برای ساخت یک میدان تنش قابل قبول استاتیکی مطلوب است [۲۹]. در این حالت تنش‌های مجهول به صورت خطی با هر المان تغییر می‌کنند. همچنین فرض شد که سطح مشترک بین دولایه خاک رسی کاملاً ناصاف (تماس کامل) بوده و بنابراین از یک مش‌بندی پیوسته برای کل مجموعه مدل خاک دولایه استفاده شده است. علاوه بر این، از المان خرپایی با جابجایی دوبعدی خطی دو گرهی برای گسسته‌سازی ژئوگریدها استفاده شد. شکل ۲- ج مدل مش‌بندی المان محدود را نشان می‌دهد.

تمرکز مطالعات پارامتریک در این تحقیق بر روی تاثیر نسبت مقاومت‌های برشی زهکشی‌نشده لایه‌های رسی (C_{u1}/C_{u2}) و نسبت ضخامت لایه رسی اول به عرض پی نواری ($H1/B$) بر پوش‌های گسیختگی ظرفیت باربری و مکانیزم گسیختگی پی‌های نواری در مجاورت شیب مسلح‌شده با ژئوگرید می‌باشد. جهت انجام تحلیل‌های پارامتریک، دو سری از پارامترهای ثابت و متغیر مطابق جدول ۱ در هر تحلیل در نظر گرفته شده است. در این جدول

این اساس، ظرفیت باربری نهایی پی طبق معادله (۲) قابل تعیین خواهد بود:

$$Q_{ult} = s.A_{eff} \quad (2)$$

در این حالت می‌توان پی را تحت اثر سه مؤلفه استاتیکی بارگذاری شامل مؤلفه‌های افقی (H)، قائم (V) و لنگر خمشی (M) در نظر گرفت که طبق معادلات (۳) تا (۵) تعیین می‌گردند:

$$H = Q \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$V = Q \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

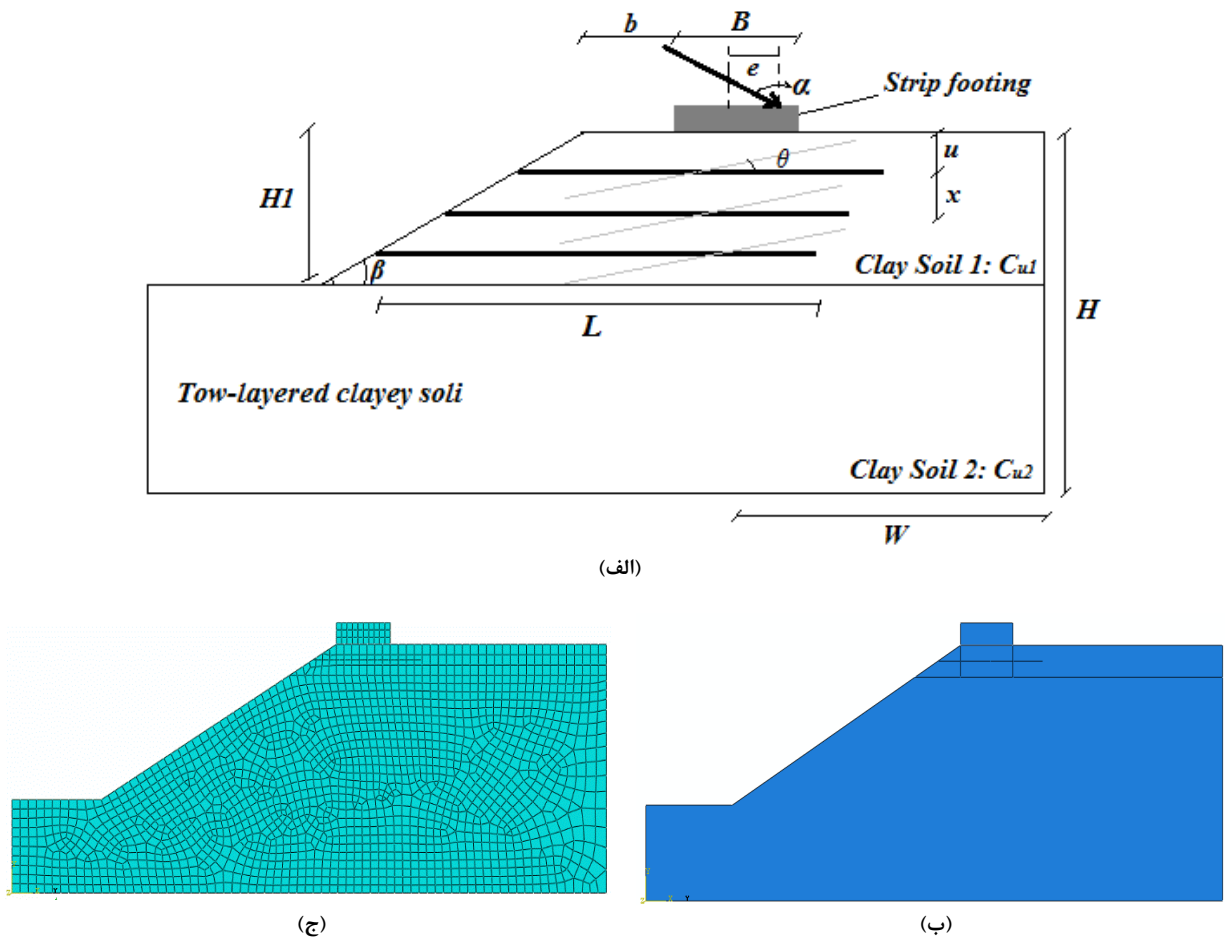
$$M = Q \cdot e \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

با تعیین بارهای فوق، تمامی ترکیب‌های احتمالی از بارهای افقی، قائم و لنگر خمشی که باعث گسیختگی پی می‌شوند و پوش گسیختگی را تعیین می‌کنند، می‌تواند به صورت تابع $f = (V, H, M)$ در نظر گرفته شود.

۲-۱- مدلسازی عددی

در این مقاله، با مدلسازی عددی دوبعدی مبتنی بر تحلیل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس [۲۹ و ۳۰]، به بررسی پارامتریک ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر پروفیل‌های دولایه رسی در مجاورت شیب مسلح‌شده با ژئوگرید تحت بارگذاری ترکیبی پرداخته شده است. تحلیل مسئله مورد بررسی در این پژوهش به صورت دوبعدی و در شرایط کرنش صفحه‌ای انجام پذیرفته است. همچنین، پی به صورت صلب و رفتار خاک رسی در حالت زهکشی‌نشده در نظر گرفته شده است.

شکل ۲- الف هندسه مدل مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، B عرض پی نواری، b فاصله پی نواری از لبه شیب، $H1$ ضخامت لایه اول، u فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی، x فواصل بین ژئوگریدها، L طول ژئوگریدها، β زاویه شیب زمین و θ زاویه چرخش المان‌های ژئوگرید نسبت به افق می‌باشند که در تحقیق حاضر برابر صفر در نظر گرفته شد. مقادیر C_{u1} و C_{u2} به ترتیب چسبندگی زهکشی‌نشده لایه‌های



شکل ۲. (الف) هندسه اولیه مدل، (ب) شبیه‌سازی عددی و (ج) مش‌بندی المان محدود مدل

Fig. 2. (a) Initial geometry of the model, (b) Numerical simulation and (c) Finite element meshing of the model

جدول ۱. متغیرهای به‌کار گرفته شده در تحلیل‌های عددی پارامتریک

Table 1. Variables used in parametric numerical analysis

پارامترهای متغیر	پارامترهای ثابت	سری تحلیل‌های پارامتریک
-	$C_{u1}/C_{u2} = 1.5, H1/B = 0.5, b/B = 0, \text{Unreinforced } (N = 0), L = 4 \text{ m}$	۱
$H1/B = 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2$ and 2.5	$C_{u1}/C_{u2} = 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6$ and 7 $b/B = 0, L/B = 2, \theta/\beta = 0, \text{Reinforced } (N = 2)$	۲

جدول ۲. مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک رسی

Table 2. Mechanical characteristics of clay soil layers

نسبت پواسون، ν [-]	مدول الاستیسیته، E [kN/m ²]	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ [Degree]	چسبندگی زهکشی نشده، C_{u1} [kN/m ²]	مدل رفتاری	لایه‌های خاک رسی
۰/۴۹	۱۵۰۰۰	۰	۱۵	موهر-کولمب	لایه اول
۰/۴۹	۱۰۰۰۰	۰	۱۰	موهر-کولمب	لایه دوم

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مصالح بتن پی و لایه‌های ژئوگرید

Table 3. Mechanical characteristics of foundation concrete and geogrid layers materials [17,32]

لایه‌های ژئوگرید			بتن پی				
نسبت پواسون، ν [-]	مدول الاستیسیته، E [kN/m ²]	چگالی، ρ [Kg/m ³]	مدل رفتاری	نسبت پواسون، ν [-]	مدول الاستیسیته، E [kN/m ²]	چگالی، ρ [Kg/m ³]	مدل رفتاری
۰/۳۵	2×10^5	۱۵۰۰	الاستیک خطی	۰/۲	۲۹۷۵۰	۲۴۰۰	الاستیک خطی

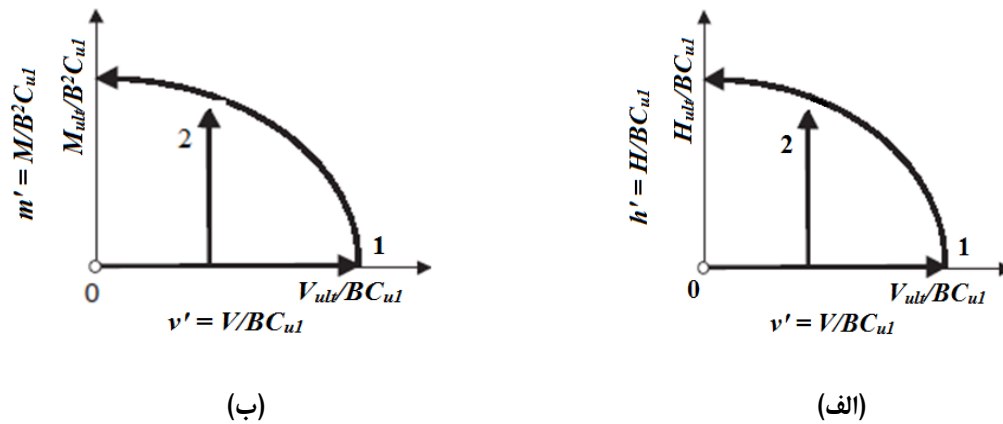
حالتی که $C_{u1}/C_{u2} = 2$ است، چسبندگی زهکشی نشده لایه اول (C_{u1}) برابر ۲۰ کیلو نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده و مدول الاستیسیته متناظر با آن تغییر می‌کند.

پی به‌عنوان یک ماده سخت بدون وزن مدلسازی شده و محاسبات با فرض چسبندگی کامل بین خاک و پی صورت گرفته است. بر این اساس از اندرکنش بین پی و خاک صرف‌نظر گردیده تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود. به عبارت بهتر، فرض بر این است که پی در تماس کامل با لایه رسی بالایی است و نقاط گرهی در بین آنها مشترک است. همچنین باتوجه به ضخامت ناچیز لایه‌های ژئوگرید و مدفون بودن این لایه‌ها در توده حجیم خاک، اندرکنش بین لایه‌های ژئوگرید و خاک رسی با استفاده از مدل رفتاری لغزشی کولمب^۱ در نرم‌افزار آباکوس اعمال شده است. براساس این مدل، شبیه‌سازی اندرکنش ژئوگرید-خاک متشکل از دو جزء اصلی است. به طوری که در جهت نرمال با فصل مشترک، سختی تماسی بدون

N تعداد لایه‌های ژئوگرید بوده و به‌منظور امکان مقایسه بهتر در تمامی تحلیل‌ها، u و x برابر ۰/۵ متر و چسبندگی زهکشی نشده لایه دوم برابر مقدار ثابت ۱۰ کیلو پاسکال ($C_{u2} = 10$ KPa) در نظر گرفته شده است.

پس از ساخت هندسه مسئله، باید یک مدل رفتاری مناسب به هر یک از مصالح اختصاص داده شود [۳۳]. با توجه به وجود سه نوع مصالح با ویژگی‌های مختلف شامل محیط‌های خاکی، بتن پی و لایه‌های ژئوگرید در مطالعه حاضر، به‌ترتیب از مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و الاستیک خطی با خصوصیات مندرج در جداول ۲ و ۳ برای مدلسازی این مصالح بهره گرفته شد. لایه‌های خاک به‌عنوان یک ماده کاملاً الاستوپلاستیک خطی در نظر گرفته شده که از معیار عملکرد خطی موهر-کولمب با قانون جریان وابسته پیروی می‌کند [۶]. ذکر این نکته ضروری است که خصوصیات لایه‌های خاک در جدول ۱ تنها برای یک حالت خاص نسبت چسبندگی زهکشی نشده لایه‌ها ($C_{u1}/C_{u2} = 1.5$) در نظر گرفته شده و با تغییرات پارامتریک در هر تحلیل، برخی خصوصیات مکانیکی تغییر می‌یابند. به‌طور مثال برای

1 Coulomb friction model



شکل ۳. گام‌های محاسبه پوش گسیختگی در حالت (الف) بارگذاری V-H و (ب) بارگذاری V-M

Fig. 3. Steps for calculating the failure envelopes in (a) V-H loading and (b) V-M loading

۲-۲- روند تحلیل تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی بارگذاری‌های ترکیبی شامل اثر همزمان بارگذاری قائم-افقی (V-H)، بارگذاری قائم-لنگر خمشی (V-M) و بارگذاری قائم-افقی-لنگر خمشی (V-H-M) هستند. برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری و ترسیم پوش گسیختگی تحت بارگذاری‌های ترکیبی با استفاده از تحلیل‌های المان محدود، معمولاً از روش بار-جابجایی کنترل شده بر مبنای دو نوع آزمایش (۱) کاوشگر^۳ و (۲) کش‌رفتن ضربه‌ای^۴ استفاده می‌کنند [۲۲ و ۲۸]. در تحقیق حاضر از روش کاوشگر برای بارگذاری دوعبده V-H و V-M و روش بار-کاوشگر^۵ برای بارگذاری V-H-M استفاده شده است.

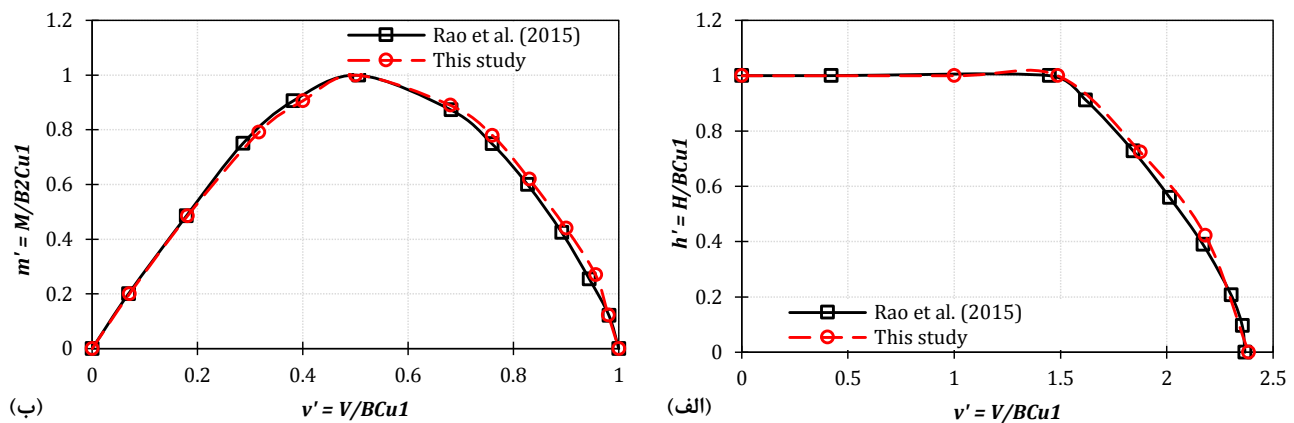
پوش گسیختگی در حالت بارگذاری V-H مطابق شکل ۳-الف طی دو گام به دست می‌آید. در گام اول، یک جابجایی قائم بر روی پی اعمال می‌گردد تا V_{ult} و متعاقب آن اولین نقطه از پوش گسیختگی با مختصات $(V_{ult}/BC_{ul}, 0)$ تعیین شود. در گام دوم، یک نیروی قائم (V) کمتر از V_{ult} به پی اعمال شده و مؤلفه افقی متناظر V/BC_{ul} تعیین می‌گردد. سپس یک جابجایی افقی بزرگ روی پی اعمال می‌گردد تا خاک گسیخته شود. طی این مرحله مؤلفه قائم متناظر نیروی افقی (H/BC_{ul}) محاسبه می‌شود. مراحل فوق آنقدر تکرار می‌شود تا نقاط کافی برای رسم پوش گسیختگی حاصل گردد. پوش گسیختگی در حالت بارگذاری V-M مطابق با شکل ۳-ب

جداسازی در مدل در نظر گرفته شده است. در حالی که در جهت مماسی، با استفاده از شرایط محدودیت مقیدشده^۱ در خصوصیات اندرکنش آباکوس، به هم‌پیوستگی کامل^۲ بین فصل مشترک ژئوگرید و خاک در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی مدل اصطکاکی کولمب به دو پارامتر ورودی مصالح شامل لغزش الاستیک و ضریب اصطکاک نیاز دارد. برای تغییر شکل‌های سطح کوچک در نظر گرفته شده در این مطالعه، لغزش الاستیک کوچک ۰/۰۰۱ متر احتمالاً رخ می‌دهد [۳۴]. ضریب اصطکاک لایه‌های ژئوگرید-رس نیز به تبعیت از [۳۵] برابر ۰/۶۲ در نظر گرفته شد.

به منظور حل از تحلیل ژئواستاتیک جامع [۳۰] جهت برقراری تنش‌های اولیه در مدل جهت منظور نمودن تاریخچه بارگذاری خاک بهره گرفته شد. در ادامه با اعمال بارگذاری‌های مختلف ترکیبی بر روی پی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی در خصوص تخمین ظرفیت باربری پی تفسیر گردیده است. بارگذاری استاتیکی اعمال شده بر روی پی مطابق روش تشریح شده در بخش قبلی (شکل ۱) و با استفاده از روش جابجایی تا ۲۰ میلیمتر بر روی پی اعمال شده است. شایان ذکر است که به منظور کاربردی نمودن نتایج و ارائه معیارهای مهندسی، تمامی پارامترهای به دست آمده نسبت به عرض پی (B) بی‌بعد شده و مقادیر بهینه برای هر یک از متغیرهای تحلیل جهت دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری پی تعیین شده است.

3 Probe
4 Swipe
5 Load-Probe

1 Tie constraint
2 full interlocking



شکل ۴. مقایسه پوش‌های گسیختگی حاصل از مدلسازی المان محدود در مطالعه حاضر در مقایسه با مقاله مرجع [۴] در فضای بارگذاری ترکیبی: (الف) V-H، (ب) V-M

Fig. 4. Comparison of the failure envelopes resulting from the finite element modeling in the present study compared to the reference article [4] in the combined loading space: (a) V-H, (b) V-M

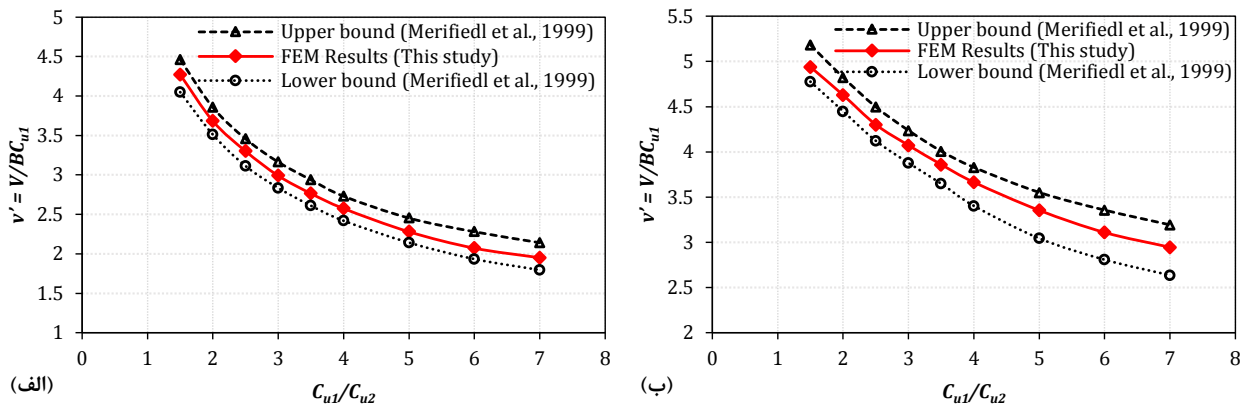
[۴] مقایسه گردید. مدل مرجع شبیه‌سازی شده در اینجا شامل یک پی نواری مستقر بر خاک دولایه رسی (مطابق هندسه نشان داده شده در شکل ۱) می‌باشد. وضعیت لایه‌بندی، خصوصیات هندسی، شرایط مرزی و شرایط بارگذاری مدل مرجع [۴] مطابق شکل ۱-ب و شرایط تشریح شده در بالا می‌باشد. شکل‌های ۴-الف و ب به ترتیب پوش‌های گسیختگی نرمال‌ایز شده حاصل از مدلسازی المان محدود مقاله حاضر در مقایسه با مقاله مرجع [۴] تحت بارگذاری‌های V-H و M-V و به‌ازای $C_{u1}/C_{u2} = 3$ و $D/B = 0.25$ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پوش‌های گسیختگی در هر دو فضای بارگذاری از انطباق نسبتاً قابل قبولی برخوردارند. تفاوت اندک بین پوش‌های گسیختگی را می‌توان به تفاوت در مش‌های المان محدود نسبت داد.

در رویکرد دوم برای اطمینان از صحت مدلسازی المان محدود، نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی حد پایین و حد بالای ظرفیت باربری پی پیشنهاد شده توسط مریفیلد و همکاران [۳۶] مقایسه شد. شکل‌های ۵-الف و ب نتایج مقادیر کران پایین و بالای ظرفیت باربری قائم بدون بعد پی ($v' = V/BC_{u1}$) حاصل از تحلیل عددی حدی را به‌ازای مقادیر مختلف H/B و C_{u1}/C_{u2} در مقایسه با آنالیزهای المان محدود حاضر نشان می‌دهد. شکل‌های ۵-الف و ب به‌وضوح نشان

و همانند بارگذاری V-H به‌دست می‌آید؛ با این تفاوت که در مرحله دوم به‌جای اعمال جابجایی، یک دوران بزرگ به پی اعمال گردیده و لنگر بدون بعد (M/B^2C_{u1}) در لحظه گسیختگی محاسبه می‌شود. پوش گسیختگی در حالت بارگذاری V-H-M نیز طی دو گام به‌دست می‌آید. به‌طوری‌که ابتدا یک جابجایی قائم روی پی اعمال شده و اولین نقطه از پوش گسیختگی با مختصات $(V_{ult}/BC_{u1}, 0)$ تعیین می‌گردد. در ادامه یک نیروی قائم (V) کمتر از V_{ult} به پی اعمال می‌شود، به‌نحوی که نسبت V/V_{ult} ثابت بماند. در ادامه با اعمال لنگر خمشی (M) روی پی، M/B^2C_{u1} به‌دست می‌آید. سپس با اعمال یک جابجایی افقی بزرگ روی پی و گسیختگی خاک، H/BC_{u1} نیز محاسبه می‌گردد. مراحل فوق‌الذکر تکرار می‌شود تا نقاط کافی برای رسم پوش گسیختگی به‌ازای یک نسبت ثابت V/V_{ult} حاصل گردد.

۲-۳- صحت‌سنجی

در تحقیق حاضر، به‌منظور اطمینان از صحت نتایج مدلسازی عددی از جمله شرایط بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی، خصوصیات و اندرکنش مصالح از دو رویکرد متفاوت استفاده شد. در رویکرد اول، پوش‌های گسیختگی تحت بارگذاری ترکیبی V-H و M-V حاصل از مدلسازی المان محدود در مطالعه حاضر با نتایج مدلسازی عددی انجام‌شده توسط راتو و همکاران



شکل ۵. مقایسه ظرفیت باربری قائم بدون بعد پی ($v' = V/BC_{u1}$) حاصل از مدل‌سازی المان محدود مطالعه حاضر در مقایسه با مقادیر کران پایین و بالا حاصل از تحلیل‌های حدی مرفیلد و همکاران [۳۶] به‌ازای: (الف) $H1/B = 0.5$ ، (ب) $H1/B = 1.0$

Fig. 5. Comparison of the non-dimension vertical bearing capacity of foundation ($v' = V/BC_{u1}$) resulting from the finite element modeling of the present study compared to the lower and upper limit values obtained from the limit analyzes of Merrifield et al. [36] for: (a) $H1/B = 0.5$, (b) $H1/B = 1.0$

به‌ترتیب هر یک به‌ازای نسبت‌های 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, C_{u1}/C_{u2} در ترتیب 6 and 7 نشان می‌دهد. در تمامی پوش‌های گسیختگی، H_{ult}/BC_{u1} برابر ۱ است. به این معنی که در شرایط عدم وجود نیرو در راستای قائم یا ناچیز بودن اثر آن، هیچ لغزشی بر اثر نیروی افقی گسیختگی اتفاق نیفتاده و آنگاه H_{ult} که در واقع ظرفیت باربری نهایی افقی است برابر BC_{u1} خواهد بود. در حالات مختلف، نسبت $H1/B$ مقدار V_{ult}/BC_{u1} متغیر است. از آنجایی که در هر پوش، H_{ult}/BC_{u1} ثابت و V_{ult}/BC_{u1} متغیر است، لذا بزرگی پوش گسیختگی به ظرفیت باربری قائم بستگی دارد. چراکه لایه‌بندی خاک در راستای قائم بوده و در حالت بارگذاری افقی تنها همان لایه اول درگیر لغزش می‌شود. در پوش‌های گسیختگی با C_{u1}/C_{u2} کمتر مشاهده می‌شود که پوش‌ها در هنگام فرود با شیب ملایم‌تری نزول و با محور افقی برخورد می‌کنند. در صورتی‌که با افزایش $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ پوش‌های گسیختگی به یکباره دچار نزول می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش C_{u1}/C_{u2} ، پوش‌های گسیختگی بیشتر از یکدیگر فاصله می‌گیرند. به دلیل اینکه با افزایش چسبندگی زهکشی‌نشده لایه اول، ظرفیت باربری قائم و همچنین V_{ult}/BC_{u1} نیز افزایش می‌یابد.

برای سهولت درک نتایج، شکل ۷ تغییرات V_{ult}/BC_{u1} در مقابل $H1/B$ در بارگذاری V-H را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد که با افزایش C_{u1}/C_{u2} پوش‌های گسیختگی کوچکتر می‌شوند؛

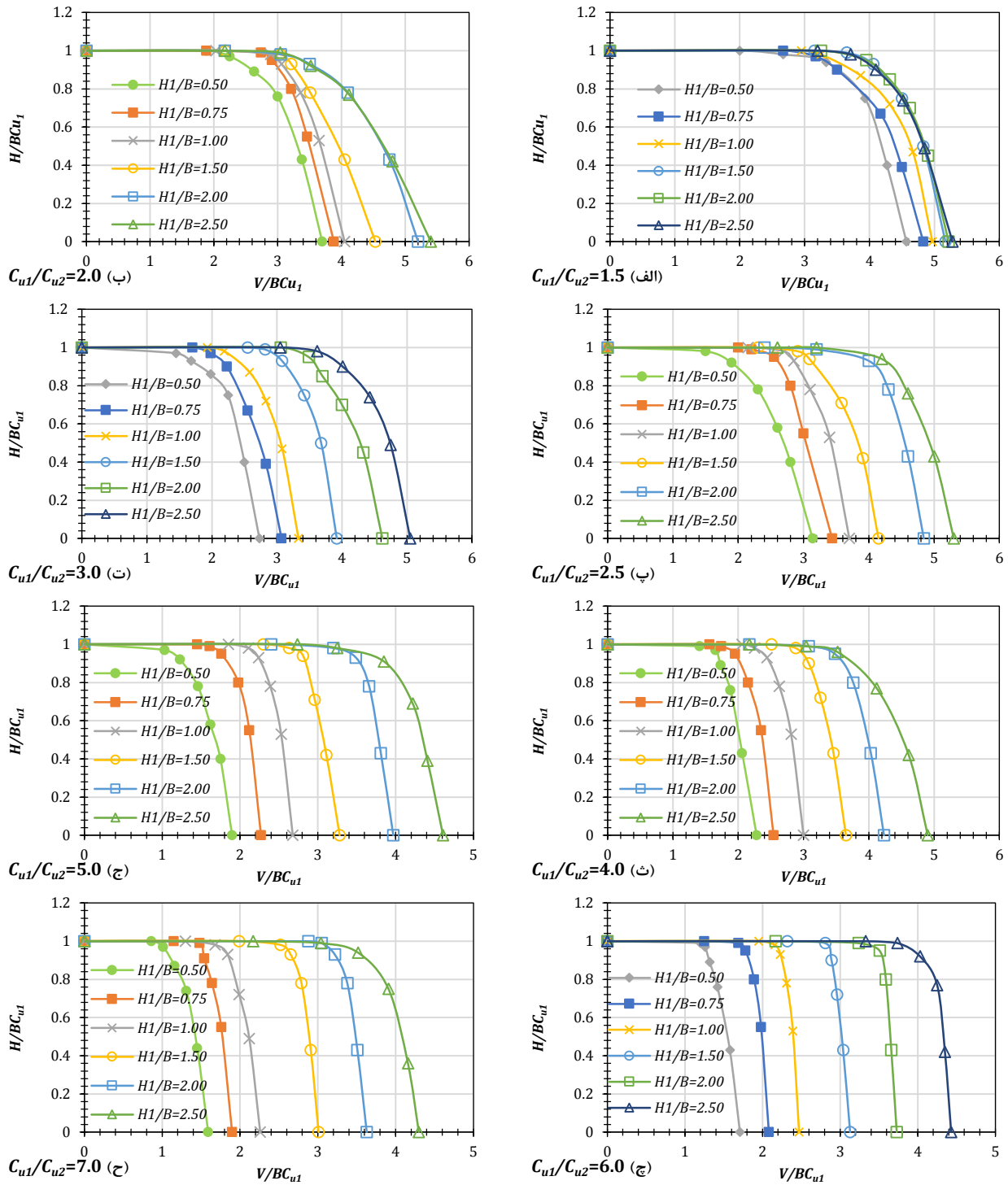
می‌دهد که ظرفیت باربری با کاهش C_{u1}/C_{u2} به‌ازای $H1/B = 0.5$ ، همچنین از شکل ۵ می‌توان دریافت که نتایج تحلیل المان محدود بین راه‌حل‌های حد پایین و حد بالا قرار گرفته است. با مقایسه نتایج می‌توان اختلاف بار گسیختگی قائم پی را با ترکیب بارهای حد پایین و حد بالای مرفیلد و همکاران [۳۶] در تطابق کامل یافت. بر این اساس می‌توان دریافت که مدل‌های المان محدود ساخته‌شده در مطالعه حاضر برای بررسی ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر خاک‌های دولایه رسی قابل اعتماد و دقیق هستند.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش نتایج مدل‌سازی‌های عددی در خصوص ارزیابی رفتار پی‌های نواری واقع بر شیب‌های مسلح‌شده با ژئوگرید ارائه گردیده است. نتایج حاصله به‌صورت پوش‌های گسیختگی پی تعیین گردیده و براساس نوع بارگذاری ترکیبی اعمالی بر روی پی به سه گروه بارگذاری (V-M, V-H) و (V-H-M) دسته‌بندی شده‌اند.

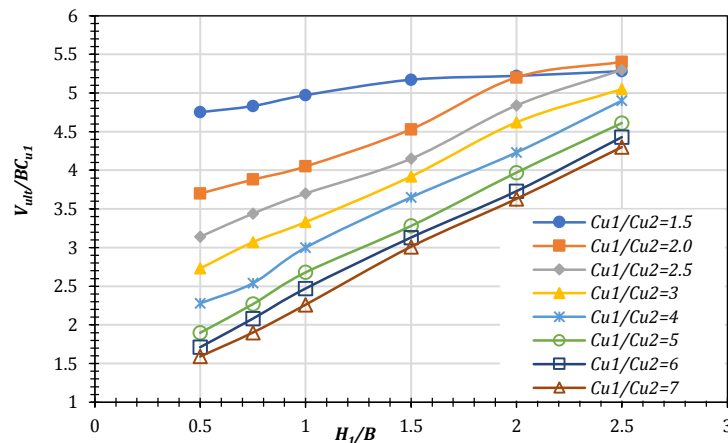
۳-۱- نتایج در حالت بارگذاری V-H

شکل ۶- الف تا ح پوش‌های گسیختگی را در بارگذاری ترکیبی V-H برای نسبت‌های مختلف $H1/B = 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2$ and 2.5 و



شکل ۶. پوش گسیختگی بی نواری در مجاورت یک شیب دولایه رسی مسلح شده با دولایه ژئوگرید تحت بارگذاری V-H

Fig. 6. Failure envelope of strip foundation in the vicinity of a two-layer clay slope reinforced with two-layer geogrid under V-H loading



شکل ۷. تغییرات V_{ult}/BC_{u1} در مقابل $H1/B$ در بارگذاری V-H

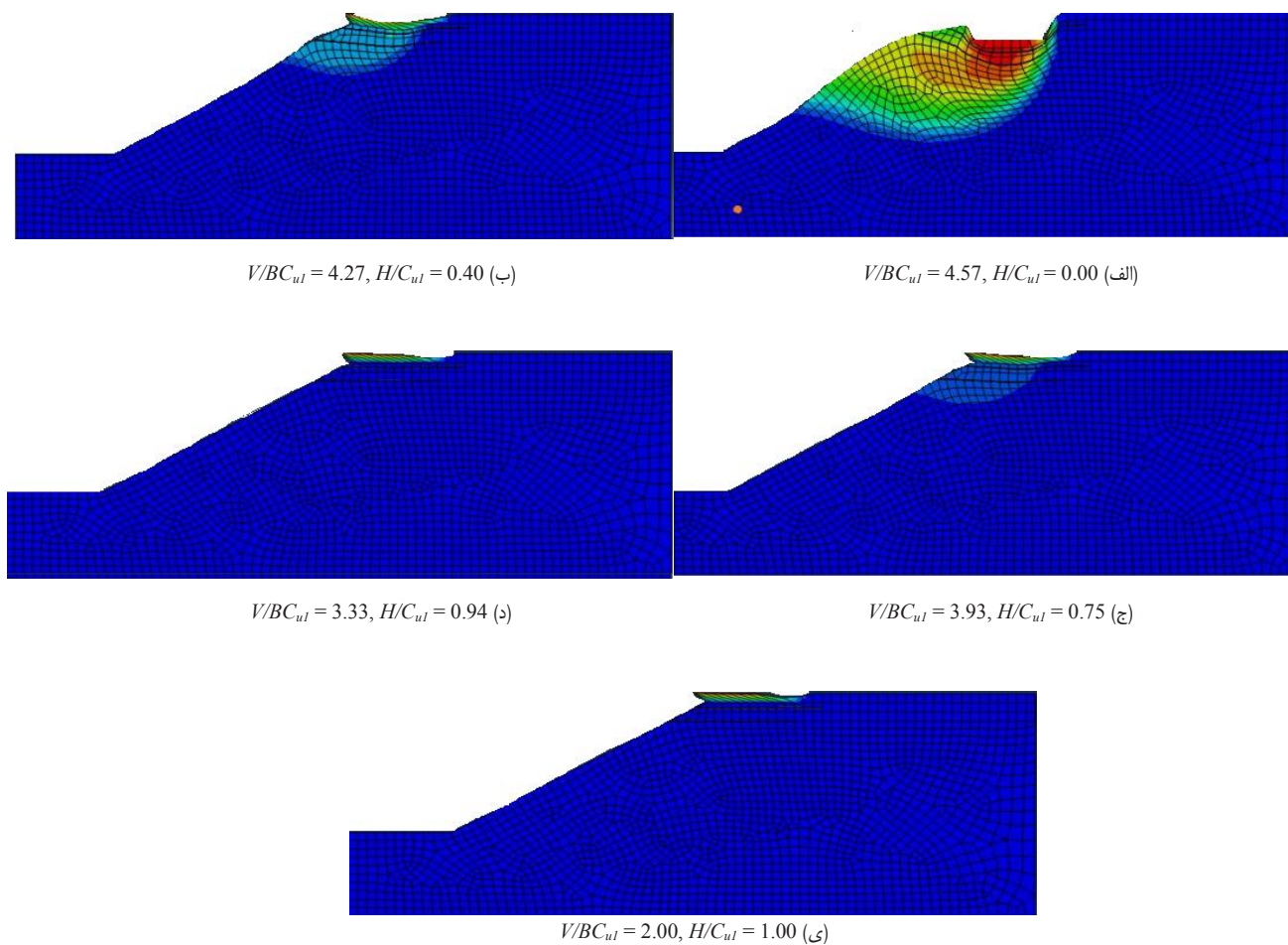
Fig. 7. Changes of V_{ult}/BC_{u1} versus $H1/B$ under V-H loading

شکل ۹ پوش‌های گسیختگی به‌ازای $H1/B = 0.5$ و C_{u1}/C_{u2} را در حالتی که شیب رسی فاقد تسلیح باشد در مقایسه با شیب مسلح‌شده با ژئوگرید نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است استفاده از ژئوگرید تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری قائم داشته است. به‌طوری‌که ظرفیت باربری قائم پی (V_{ult}/BC_{u1}) با افزایش ۳۱ درصدی از $3/5$ به $4/57$ رسیده است. اما این تغییر برای ظرفیت باربری افقی بسیار ناچیز است، به‌طوری‌که H_{ult}/BC_{u1} تنها با افزایش ۲ درصدی از $0/98$ به $1/0$ می‌رسد.

۳-۲- نتایج در حالت بارگذاری V-M

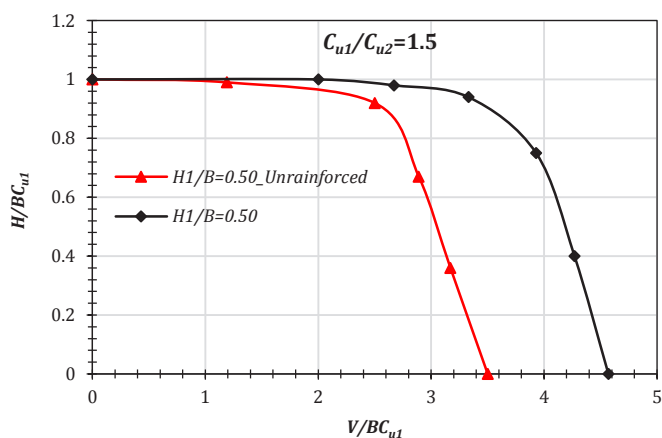
شکل ۱۰- الف تا ح پوش‌های گسیختگی پی را در بارگذاری ترکیبی V-M برای نسبت‌های $H1/B = 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2$ and 2.5 و به‌ترتیب هر یک به‌ازای نسبت‌های $C_{u1}/C_{u2} = 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5$ and 7 نشان می‌دهد. تمامی پوش‌های گسیختگی از مبدأ مختصات عبور می‌کنند. یعنی برخلاف بارگذاری V-H که در نبود بار قائم، تنها با اعمال بار افقی خاک دچار گسیختگی می‌شود، در این حالت وجود لنگر خمشی به تنهایی قادر به گسیختگی خاک زیر پی نیست. چراکه از اصطکاک بین خاک و پی صرف‌نظر شده است. نیمه سمت راست پوش‌ها همانند حالت بارگذاری V-H است. زیرا V_{ult}/BC_{u1} در هر دو حالت بارگذاری به یک روش تعیین

اما این تغییر در پوش‌های گسیختگی در نسبت‌های $H1/B$ کمتر، با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. به‌طوری‌که مطابق شکل ۷ در نسبت‌های $H1/B = 0.5$ و 2.5 به‌ترتیب بیشترین و کمترین اختلاف در V_{ult}/BC_{u1} به وجود می‌آید. به این معنی که هرچه ضخامت لایه اول کمتر باشد، با افزایش مقاومت این لایه ظرفیت باربری کل به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. در ادامه به بررسی مکانیزم گسیختگی پی در حالت بارگذاری V-H پرداخته شده است. بدین منظور مکانیزم گسیختگی خاک در زیر پی نواری قرار گرفته در مجاورت شیب مسلح با نسبت‌های $H1/B = 0.5$ و $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ برای حالات مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود در حالتی که تنها بارگذاری قائم وجود داشته باشد (شکل ۸- الف)، حجم بیشتری از خاک دچار گسیختگی می‌شود. همچنین با افزایش بار افقی و کاهش بار قائم ناحیه کوچکتری از خاک گسیخته شده و فرم گسیختگی خاک زیر پی به گسیختگی لغزشی نزدیک می‌گردد. در شکل‌های ۸- د و ی نحوه گسیختگی تقریباً شبیه یکدیگر است. به این معنی که در روند بارگذاری از یک جایی به بعد بار قائم تاثیری بر فرم گسیختگی خاک زیر پی ندارد. این امر در پوش‌های گسیختگی ارائه شده در شکل ۶ یعنی جایی که پوش‌ها به‌صورت یک خط افقی درمی‌آیند نیز مشهود است. در این ناحیه از پوش‌های گسیختگی با کاهش میزان بار قائم، بار افقی بدون بعد شده که باعث گسیختگی می‌شود، در مقدار ۱ ثابت می‌ماند.



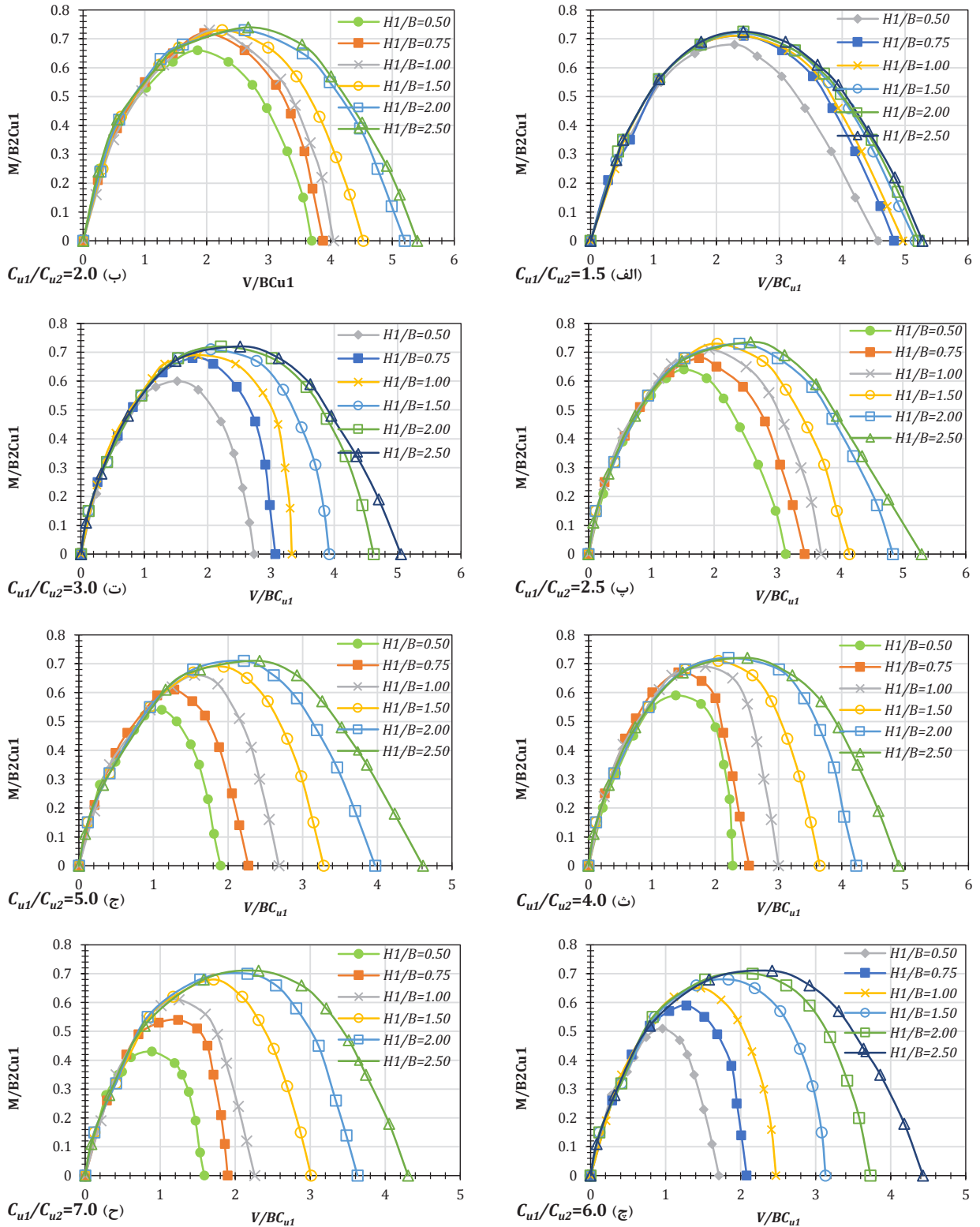
شکل ۸. مکانیزم گسیختگی پی نواری قرار گرفته در مجاورت شیب مسلح با نسبت $H1/B = 0.5$ و $Cu1/Cu2 = 1.5$ در بارگذاری V-H

Fig. 8. Failure mechanism of the strip foundation located in the vicinity of a reinforced slope with $H1/B = 0.5$ and $Cu1/Cu2 = 1.5$ under V-H loading



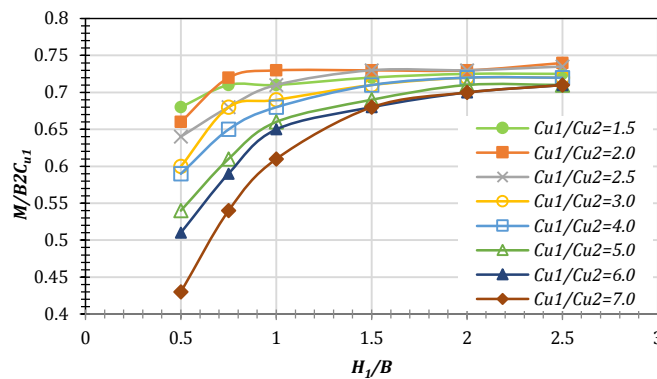
شکل ۹. مقایسه پوش‌های گسیختگی پی نواری در حالت‌های شیب تسلیح‌شده با ژئوگرید و شیب بدون تسلیح در بارگذاری V-H

Fig. 9. Comparison of the failure envelope of strip foundation in geogrid-reinforced and non-reinforced slope modes under V-H loading



شکل ۱۰. وش گسیختگی پی در مجاورت یک شیب دولایه رسی مسلح شده با دولایه ژئوگرید تحت بارگذاری V-M

Fig. 10. Failure envelope of the strip foundation in the vicinity of a two-layer clay slope reinforced with two-layer geogrid under V-M loading



شکل ۱۱. تغییرات M_{u11}/B^2C_{u1} در مقابل $H1/B$ در بارگذاری

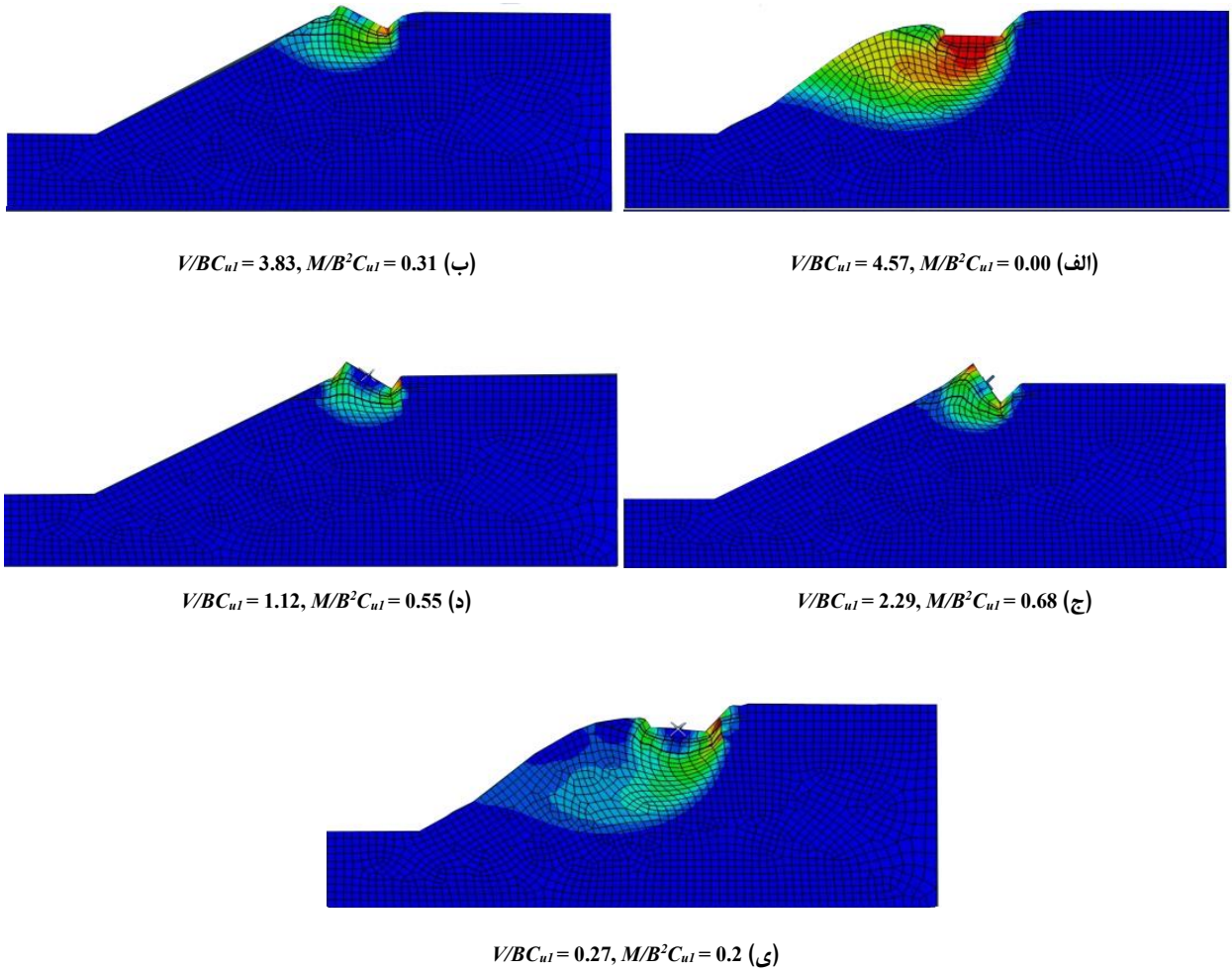
Fig. 11. Variations of M_{u11}/B^2C_{u1} versus $H1/B$ under V-M loading

می‌شود. بدین منظور مکانیزم گسیختگی خاک در زیر پی نواری قرار گرفته در مجاورت شیب مسلح با نسبت $H1/B = 0.5$ و $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ برای حالات مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانند تحلیل V-H در حالتی که تنها بارگذاری قائم وجود داشته باشد (شکل ۱۲-الف)، حجم بیشتری از خاک دچار گسیختگی می‌شود. علاوه بر این همانند شکل ۸ که پوش‌های گسیختگی تقریباً به صورت متقارن هستند، مکانیزم‌های گسیختگی در شکل‌های ۱۲-الف و ی و همچنین شکل‌های ۱۱-ب و د نیز تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشند.

پوش‌های گسیختگی در دو حالت شیب تسلیح شده با ژئوگرید و شیب بدون تسلیح در بارگذاری V-M به‌ازای $H1/B = 0.5$ و $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ به صورت مقایسه‌ای در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود استفاده از ژئوگرید تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری قائم (V_{u11}/BC_{u1}) داشته است و منجر به افزایش ۳۱ درصدی ظرفیت باربری قائم شده است. این تغییر در خصوص بیشینه لنگر لازم جهت گسیختگی (M_{u11}/B^2C_{u1}) نیز به صورت افزایشی بوده و تسلیح شیب موجب افزایش ۳۵ درصدی ظرفیت باربری خمشی پی بوده و مقدار آن را از ۰/۵۱ به ۰/۶۹ افزایش داده است.

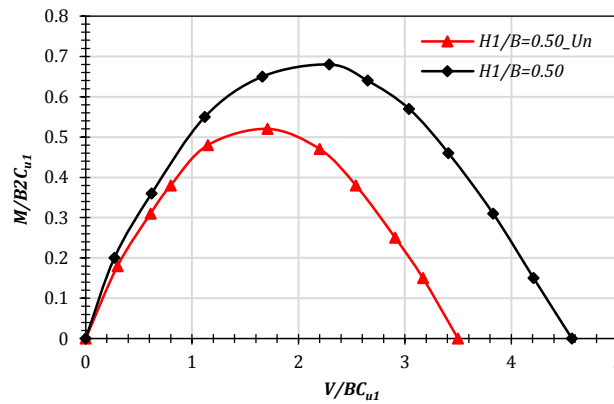
گردیده است. همانند حالت بارگذاری V-H، با افزایش C_{u1}/C_{u2} مشاهده می‌شود که پوش‌های گسیختگی بیشتر از یکدیگر فاصله می‌گیرند. به دلیل اینکه هرچه چسبندگی زهکشی نشده لایه اول افزایش یابد، ظرفیت باربری قائم پی نیز در حال افزایش می‌باشد. برخلاف حالت بارگذاری V-H که در آن H_{u11}/BC_{u1} در هر یک از پوش‌ها ثابت و برابر ۱ است، در بارگذاری V-M مقدار M_{u11}/B^2C_{u1} متغیر است. با مقایسه پوش‌های گسیختگی مشاهده می‌شود که با افزایش C_{u1}/C_{u2} این مقدار کاهش پیدا می‌کند. همچنین نقطه متناظر با آن (V/BC_{u1}) نیز در حال کاهش است. علاوه بر این کاهش M_{u11}/B^2C_{u1} در نسبت‌های $H1/B$ پایین بیشتر اتفاق می‌افتد. برای سهولت درک نتایج، شکل ۱۱ تغییرات M_{u11}/B^2C_{u1} در مقابل $H1/B$ در بارگذاری V-M را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش C_{u1}/C_{u2} ، پوش گسیختگی کوچکتر می‌شود؛ اما این تغییر در پوش گسیختگی در نسبت‌های $H1/B$ کمتر، با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. به طوری که مطابق شکل ۱۱ در نسبت‌های $H1/B = 0.5$ و $H1/B = 2.5$ به ترتیب بیشترین و کمترین اختلاف در M_{u11}/B^2C_{u1} وجود دارد. به این معنی که هرچه ضخامت لایه اول کمتر باشد، با افزایش مقاومت این لایه لنگر خمشی لازم جهت گسیختگی به میزان بیشتری کاهش می‌یابد.

در ادامه مکانیزم گسیختگی پی در حالت بارگذاری V-M بررسی



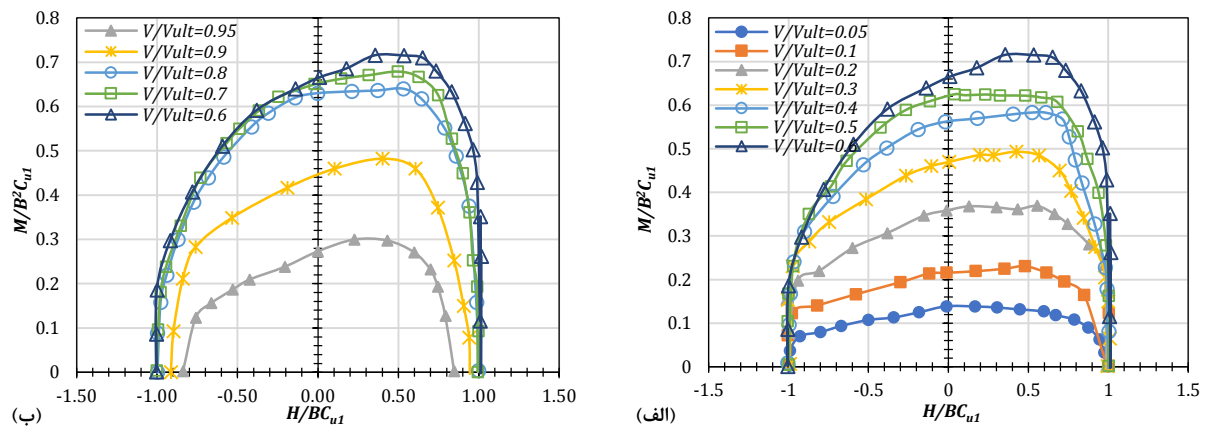
شکل ۱۲. مکانیزم گسیختگی پی نواری قرار گرفته در مجاورت شیب مسلح با نسبت $H1/B = 0.5$ و $Cu1/Cu2 = 1.5$ در بارگذاری V-M

Fig. 12. Failure mechanism of the strip foundation located in the vicinity of a reinforced slope with $H1/B = 0.5$ and $Cu1/Cu2 = 1.5$ under V-M loading



شکل ۱۳. مقایسه پوش‌های گسیختگی پی نواری در حالت‌های شیب مسلح شده با ژئوگرید و شیب بدون تسلیح در بارگذاری V-M

Fig. 13. Comparison of the failure envelope of the strip foundation in geogrid-reinforced and non-reinforced slope modes under V-M loading



شکل ۱۴. پوش گسیختگی در بارگذاری V-H-M

Fig. 14. Failure envelopes under V-H-M loading

۴- نتیجه گیری

در مقاله حاضر با استفاده از آنالیز المان محدود به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک دولایه رسی در مجاورت شیب مسلح شده با لایه‌های ژئوگرید پرداخته شد. بدین منظور تاثیر نسبت مقاومت‌های برشی زهکشی نشده لایه‌های رسی (C_{u1}/C_{u2}) و نسبت ضخامت لایه رسی اول به عرض پی نواری (H/B) بر پوش‌های گسیختگی ظرفیت باربری پی نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی مختلف شامل بارگذاری مختلف (V-H، V-M، H-M) تعیین شد. نتایج مهم و کاربردی حاصل از تحقیق به شرح زیر قابل بیان است:

- با افزایش C_{u1}/C_{u2} در بارگذاری V-H، پوش‌های گسیختگی بیشتر از یکدیگر فاصله می‌گیرند. به دلیل اینکه با افزایش چسبندگی زهکشی نشده لایه اول، ظرفیت باربری قائم افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش C_{u1}/C_{u2} در بارگذاری V-H، پوش گسیختگی کوچکتر می‌شود؛ اما این تغییر در پوش گسیختگی در نسبت‌های H/B کمتر، با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. به این معنی که هرچه ضخامت لایه اول کمتر باشد، با افزایش مقاومت این لایه ظرفیت باربری کل به میزان بیشتری کاهش می‌یابد.

۳-۳- نتایج در حالت بارگذاری V-H-M

شکل ۱۴- الف و ب نتایج مربوط به پوش‌های گسیختگی پی را برحسب تغییرات بار قائم ($V/V_{ult} = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ and 0.95) در فضای بارگذاری ترکیبی V-H-M نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که عدم تقارن در تمامی پوش‌ها وجود داشته و همگی به سمت راست کشیدگی دارند. به دلیل اینکه وقتی نیروی افقی (H) در جهت منفی اعمال می‌شود، پی به سمت شیب گسیخته می‌شود و نسبت به حالت عکس آن لنگر کمتری بر روی پی ایجاد می‌گردد. در این حالت بارگذاری، لنگر نهایی گسیختگی (M_{ult}/B^2C_{u1}) مادامی‌که بار قائم اعمال شده به پی (V) کمتر از $0.6V_{ult}$ است، افزایش می‌یابد. به طوری‌که در $V = 0.6V_{ult}$ بیشترین مقدار خود را دارد (شکل ۱۴- الف). اما برای مقادیر $V > 0.6V_{ult}$ پوش‌های گسیختگی به صورت نزولی است (شکل ۱۴- ب). با توجه به شکل ۱۴- ب پوش‌های گسیختگی برای حالت‌های $V = 0.6V_{ult}$ to $0.8V_{ult}$ تقریباً یکسان به دست آمده و در مقادیر $V > 0.9V_{ult}$ دچار نزول زیادی گردیده است. دلیل چنین رفتاری با توجه به نتایج پیش‌گفته در بارگذاری‌های V-H و V-M به وضوح قابل درک است.

- [6] L.C. Hung, S.-R. Kim, Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads, *Marine Georesources & Geotechnology*, 32(1) (2014) 76-92.
- [7] S. Alamshahi, N. Hataf, Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3) (2009) 217-226.
- [8] D.T. Bergado, P.V. Long, B.S. Murthy, A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground, *Geotextiles and Geomembranes*, 20(6) (2002) 343-365.
- [9] C. Yoo, Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(5) (2001) 279-298.
- [10] M.A. El Sawwaf, Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope, *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1) (2007) 50-60.
- [11] M. Ghazavi, A.A. Lavasan, Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(5) (2008) 404-415.
- [12] P. Basudhar, P. Dixit, A. Gharpure, K. Deb, Finite element analysis of geotextile-reinforced sand-bed subjected to strip loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1) (2008) 91-99.
- [13] G.L. Araújo, E.M. Palmeira, Í.L. Macêdo, Comparisons between predicted and observed behaviour of a geosynthetic reinforced abutment on soft soil, *Engineering geology*, 147 (2012) 101-113.
- [14] J. Ko, H. Seo, J.K. Lee, Failure Envelopes for Circular Foundations on Two-Layered Clay under Combined Loading, *International Journal of Geomechanics*, 22(7) (2022) 04022085.
- [15] H. Xia, X. Zhou, M. Zhou, F. Niu, X. Zhang, Capacity of caissons in stiff-over-soft clay under combined V-HM loadings, *Ocean Engineering*, 229 (2021) 109007.
- [16] B.T. Chua, K.P. Nepal, A new approach to estimate bearing capacity of strip footings on geogrid-stabilised
- مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی V-M و V-H نشان می‌دهد در حالتی که تنها بارگذاری قائم وجود داشته باشد، حجم بیشتری از خاک گسیخته می‌شود. همچنین با افزایش بار افقی و کاهش بار قائم ناحیه کوچکتری از خاک گسیخته شده و فرم گسیختگی خاک زیر پی به گسیختگی لغزشی نزدیک می‌گردد.
 - پوش‌های گسیختگی برحسب تغییرات بار قائم تحت اثر بارگذاری ترکیبی V-H-M حاکی از وجود عدم تقارن است. دلیل چنین رفتاری این است که در اثر اعمال نیروی افقی (H) در جهت منفی، پی به سمت شیب گسیخته شده و نسبت به حالت عکس آن، بار لنگری کمتری را متحمل می‌شود. در این حالت، لنگر نهایی گسیختگی مادامی که بار قائم اعمال شده روی پی (V) کمتر از $0.6V_{ult}$ باشد، افزایش می‌یابد. اما برای مقادیر $V > 0.6V_{ult}$ پوش گسیختگی نزولی می‌گردد. دلیل این موضوع با توجه به نتایج پیش گفته در بارگذاری‌های V-H و V-M به وضوح قابل درک است.
 - مقایسه پوش‌های گسیختگی پی نواری قرار گرفته در مجاورت شیب در دو حالت شیب رسی فاقد تسلیح و مسلح شده با لایه‌های ژئوگرید تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی V-H و V-M نشان می‌دهد که تسلیح شیب تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری قائم دارد. به طوری که تسلیح شیب باعث افزایش ۳۱ درصدی ظرفیت باربری قائم گردیده است. همچنین این افزایش برای ظرفیت لنگر خمشی در حدود ۳۵ درصد می‌باشد.

منابع

- [1] R. Kimmerling, Geotechnical engineering circular No. 6 shallow foundations, United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology, 2002.
- [2] A.S. Vesić, Analysis of ultimate loads of shallow foundations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(1) (1973) 45-73.
- [3] R. Sharma, Q. Chen, M. Abu-Farsakh, S. Yoon, Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1) (2009) 63-72.
- [4] P. Rao, Y. Liu, J. Cui, Bearing capacity of strip footings on two-layered clay under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 210-218.
- [5] M. Bransby, G.-J. Yun, The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading, *Géotechnique*, 59(2) (2009) 115-125.

- Journal, 52(6) (2015) 694-707.
- [26] A. Hentati, M. Selmi, T. Kormi, N.B.H. Ali, Probabilistic HM failure envelopes of strip foundations on spatially variable soil, *Computers and Geotechnics*, 102 (2018) 66-78.
- [27] A. Haghghi, P. Hu, J.G. Tom, K. Krabbenhoft, Combined loading of strip footings on sand-over-clay with layers of varying extents, *Soils and Foundations*, 59(2) (2019) 433-442.
- [28] M. Bransby, M. Randolph, Combined loading of skirted foundations, *Géotechnique*, 48(5) (1998) 637-655.
- [29] S. Helwany, *Applied soil mechanics with ABAQUS applications*, John Wiley & Sons, 2007.
- [30] D.S. Simulia, *ABAQUS 6.13 User's manual*, Dassault Systems, Providence, RI, 305 (2013) 306.
- [31] D.M. Potts, L. Zdravković, T.I. Addenbrooke, K.G. Higgins, N. Kovačević, *Finite element analysis in geotechnical engineering: application*, Thomas Telford London, 2001.
- [32] T. Sitharam, S. Sireesh, Model studies of embedded circular footing on geogrid-reinforced sand beds, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 8(2) (2004) 69-75.
- [33] A. Lashkari, M. Mahboubi, Use of hyper-elasticity in anisotropic clay plasticity models, *Scientia Iranica*, 22(5) (2015) 1643-1660.
- [34] S.W. Perkins, M.Q. Edens, Finite element and distress models for geosynthetic-reinforced pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 3(4) (2002) 239-250.
- [35] G. Altay, C. Kayadelen, T. Taşkıran, Y.Z. Kaya, A laboratory study on pull-out resistance of geogrid in clay soil, *Measurement*, 139 (2019) 301-307.
- [36] R. Merifield, S. Sloan, H. Yu, Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two-layered clays, *Geotechnique*, 49(4) (1999) 471-490.
- granular layer over clay, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(4) (2023) 569-594.
- [17] Z. Shen, D. Jin, Q. Pan, H. Yang, S.C. Chian, Effect of soil spatial variability on failure mechanisms and undrained capacities of strip foundations under uniaxial loading, *Computers and Geotechnics*, 139 (2021) 104387.
- [18] C. Martin, C. Martin, *Physical and numerical modelling of offshore foundations under combined loads*, Oxford University, UK, 1994.
- [19] J. Salençon, A. Pecker, Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads. Part I: purely cohesive soil, *European journal of mechanics series - A/Solids*, 14 (1995) 349-349.
- [20] H.A. Taiebat, J.P. Carter, Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading, *Geotechnique*, 50(4) (2000) 409-418.
- [21] H.A. Taiebat, J.P. Carter, Bearing capacity of strip and circular foundations on undrained clay subjected to eccentric loads, *Geotechnique*, 52(1) (2002) 61-64.
- [22] S. Gourvenec, M. Randolph, Effect of strength non-homogeneity on the shape of failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay, *Géotechnique*, 53(6) (2003) 575-586.
- [23] G.T. Houlsby, A.M. Puzrin, The bearing capacity of a strip footing on clay under combined loading. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455 (1983), 893-916.
- [24] B. Bienen, C. Gaudin, M.J. Cassidy, L. Rausch, O.A. Purwana, H. Krisdani, Numerical modelling of a hybrid skirted foundation under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 45 (2012) 127-139.
- [25] C. Tang, K.-K. Phoon, K.-C. Toh, Effect of footing width on N_y and failure envelope of eccentrically and obliquely loaded strip footings on sand, *Canadian Geotechnical*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mahboubi Niazmandi, S. Mirassi, M. Hashemi jokar, M. Momeni, The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes, Amirkabir J. Civil Eng., 55(9) (2023) 1825-1844.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21741.7812



