



University Of Qom

## Evaluating the Seismic Bearing Capacity of Strip Foundation Adjacent to Geogrid-Reinforced Slopes Using Finite Element Limit Analysis Method

Mohammad Ahmadi<sup>1</sup>, Ali Reza Bagherieh<sup>2</sup>, Fatemeh Mohammadipour<sup>3</sup>

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: [m.ahmadi@malayeru.ac.ir](mailto:m.ahmadi@malayeru.ac.ir)
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: [bagheri@malayeru.ac.ir](mailto:bagheri@malayeru.ac.ir)
3. M.Sc. in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: [mohamadifateme03@gmail.com](mailto:mohamadifateme03@gmail.com)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 10 Nov 2023  
Revised 24 Jan 2024  
Accepted 06 Feb 2024

**Keywords:**  
Seismic Bearing  
Capacity,  
Strip Foundation,  
Slope,  
Geogrid,  
Finite Element Limit  
Analysis Method.

### ABSTRACT

*Building construction on slopes is inevitable, despite many limitations. On the other hand, due to the seismicity of Iran, calculating the seismic bearing capacity of foundations is more important. The construction along a slope has been observed to result in a reduction in the bearing capacity when compared to flat ground. To mitigate this decrease, various improvement techniques, such as the incorporation of reinforcements like geogrids, can be employed to partially offset the reduction in bearing capacity. The present study investigates the impact of ground slope (10 and 20 degrees) on the bearing capacity of granular soils with varying internal friction angles (25, 30, 35, 40, and 45 degrees) in both seismic and static conditions. This investigation employs the finite element limit analysis method and OptumG2 software to determine the upper and lower bounds of the bearing capacity. The findings indicate that the implementation of a horizontal earthquake coefficient of  $k_h=0.1$  leads to a reduction in the seismic bearing capacity of the foundation, ranging from 2 to 12 percent. The effective length of the geogrid is contingent upon the internal friction angle of the soil and varies within the range of  $2B$  to  $3B$ , where  $B$  represents the width of the foundation. Additionally, the study revealed that the optimal distance between the footing and the slope edge ( $X/B$ ) is influenced by the internal friction angle, with a significantly bigger impact than the slope angle. In the current study, the optimal distance ( $X$ ) was estimated to lie within the range of  $2B$  to  $4B$  for internal friction angles of 25, 30, and 35 degrees. Conversely, for internal friction angles of 40 and 45 degrees, the  $X$  value was assessed to be no less than  $5B$ .*

**Cite this article:** Ahmadi M, Bagherieh AR, Mohammadipour F. Evaluating the Seismic Bearing Capacity of Strip Foundation Adjacent to Geogrid-Reinforced Slopes Using the Finite Element Limit Analysis Method. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1); 169-185. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10058.1519>



## بررسی لرزه‌های ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیب‌های مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود

محمد احمدی<sup>۱</sup>، علیرضا باقریه<sup>۲</sup>، فاطمه محمدی پور<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: [m.ahmadi@malayeru.ac.ir](mailto:m.ahmadi@malayeru.ac.ir)

۲. استادیار گروه عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: [bagheri@malayeru.ac.ir](mailto:bagheri@malayeru.ac.ir)

۳. کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: [mohamadifateme03@gmail.com](mailto:mohamadifateme03@gmail.com)

### چکیده

ساخت‌وساز در زمین‌های شیب‌دار، علی‌رغم محدودیت‌های زیاد، اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر، به دلیل لرزه‌خیز بودن ایران، بررسی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌ها دارای اهمیت دوچندانی است. ساخت‌وساز در مجاورت شیب با کاهش ظرفیت باربری نسبت به زمین مسطح همراه است. بنابراین استفاده از روش‌های بهسازی از جمله استفاده از مسلح‌کننده‌ها همچون ژئوگرید می‌تواند تا حدی کاهش ظرفیت باربری را جبران نماید. در این تحقیق با استفاده از قضیه کران بالا و پایین روش تحلیل حدی المان محدود و به کمک نرم‌افزار OptumG2 به بررسی اثر شیب زمین (با زوایای ۱۰ و ۲۰ درجه) بر ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای با زوایای اصطکاک داخلی مختلف (۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه) در دو حالت لرزه‌ای و استاتیکی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد با اعمال بار لرزه‌ای با ضریب زلزله افقی  $k_h = 0.1$ ، ظرفیت باربری لرزه‌ای پی بین ۲ تا ۱۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین طول مؤثر ژئوگرید به زاویه اصطکاک داخلی خاک وابسته بوده و بین  $2B$  تا  $3B$  ( $B$  عرض پی) تغییر می‌کند. همچنین یافت شد که فاصله ایمن پی از لبه شیب ( $X/B$ ) به زاویه اصطکاک داخلی وابسته بوده و اثر آن به مراتب از اثر زاویه شیب بیشتر است. در تحلیل حاضر برای زوایای اصطکاک داخلی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ این مقدار بین  $2B$  تا  $4B$  و برای زوایای اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه حداقل  $5B$  برآورد گردید.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

### کلیدواژه‌ها:

ظرفیت باربری لرزه‌ای،  
پی نواری،  
زمین شیب‌دار،  
ژئوگرید،  
روش تحلیل حدی المان  
محدود.

استناد: احمدی محمد، باقریه علیرضا، محمدی پور فاطمه. بررسی لرزه‌ای ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیب‌های مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱)، ۱۶۹-۱۸۵.

<https://doi.org/10.22091/cer.2024.10058.1519>

## ۱- مقدمه

عموما سعی می‌شود سازه‌های عمرانی در زمین مسطح یا نسبتا مسطح ساخته شوند. با این حال، موارد بسیار زیادی وجودی دارد که ساخت این سازه‌ها در زمین‌های شیب‌دار اجتناب‌ناپذیر است. از جمله این موارد می‌توان به پی‌های پایه پل‌ها، پی دکل‌های برق، ساختمان‌های با ارتفاع نسبتا کم در مجاورت شیب و غیره اشاره نمود. با توجه به کوهستانی بودن کشور ایران و احتمال قرارگیری سازه‌ها در مجاورت شیب‌ها، اهمیت مطالعه این مسأله دوچندان می‌شود. از طرفی دیگر از منظر مسائل اقتصادی، استفاده از زمین‌های شیب‌دار برای ساخت‌وساز قابل توجیه است. مشخص است که به دلیل وجود شیب، ظرفیت باربری پی به دلایل مختلف از جمله کوتاه شدن طول صفحات گسیختگی در زیر پی و عدم تشکیل سطوح لغزش متقارن می‌تواند کمتر از ظرفیت باربری پی در یک زمین مسطح باشد. این مسأله به عوامل مختلف از جمله شیب زمین و فاصله پی از سطح شیب‌دار وابسته است. به همین دلیل، بهسازی خاک زیر پی‌های واقع در شیب با روش‌های متفاوت به عنوان یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری مطرح است. در بین روش‌های بهسازی خاک، مسلح کردن خاک با استفاده از ژئوگرید یکی از روش‌های جذاب برای مهندسين است. ژئوگرید با توجه به توان کششی مناسب، باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری خاک زیر پی می‌شود.

از طرفی دیگر، تعیین ظرفیت باربری پی‌ها در حالت لرزه‌ای به علت قرار گرفتن کشور ایران در منطقه‌ای لرزه‌خیز از اهمیت بالایی برخوردار است. تحقیقات گسترده‌ای تاکنون در زمینه بررسی اثرات زلزله بر کاهش ظرفیت باربری در حالت‌های مختلف از جمله پی واقع بر شیب انجام شده است. کاهش ظرفیت باربری پی در هنگام زلزله باعث خسارت‌های مالی و جانی بسیاری می‌شود. با توجه به اینکه در عمده ساخت‌وسازهای انجام شده، از پی‌های سطحی استفاده می‌شود، لزوم بررسی

ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های سطحی، به دلیل تنوع و فراوانی، از اهمیت خاصی برخوردار است. کاهش ظرفیت باربری پی در اثر زلزله و استفاده از مسلح‌کننده‌ها جهت بهبود ظرفیت باربری امری بدیهی است، اما در این زمینه سوالاتی بیان می‌شود که باید به آنها پاسخ داده شود:

الف) روند تغییرات ظرفیت باربری قبل و بعد از اعمال

زلزله چگونه است؟

ب) شرایط قرارگیری مسلح‌کننده‌ها، همچون طول

آن‌ها چگونه بر ظرفیت باربری تأثیر دارد؟

کوزاکابه<sup>۱</sup> و همکاران، با استفاده از آنالیز حدی کران

بالا ظرفیت باربری شیب‌های بارگذاری شده را مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه این روش با روش‌های دیگر مشخص شد که روش کران بالا از لحاظ مهندسی به دلیل ساده بودن این روش مفید می‌باشد [۱].

عسکری و فرزانه ظرفیت باربری یک پی نواری را در

مجاورت شیب با استفاده از روش تحلیل حدی کران بالا مطالعه کردند. اثرات اینرسی خاک در تحلیل آن‌ها در نظر گرفته شد و نتایج حاصل از تحقیق با سایر پژوهش‌ها مقایسه گردید [۲].

میخالوفسکی<sup>۲</sup> با استفاده از روش تحلیل حدی

تعداد و طول مورد نیاز مسلح‌کننده را برای گسیختگی شیب مورد بررسی قرار داد. مسلح‌کننده‌ها به صورت یکنواخت و با طول‌های مساوی در ارتفاع شیروانی قرار داده شدند. همچنین بر پایه آنالیز کران بالا بیشینه بار گسیختگی مشخص شد. نتایج نشان می‌دهد طول مورد نیاز مسلح‌کننده به مجموع نیروهای نهایی موردنیاز، اصطکاک بین مسلح‌کننده و شیب، تعداد مسلح‌کننده‌ها و نحوه چیدمان آنها وابسته است [۳].

محققان به بررسی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های

نواری کم عمق واقع در زمین شیب‌دار با استفاده از روش تعادل حدی پرداختند. آنها نیروی لرزه‌ای را به صورت یک

<sup>۱</sup>- Kusakabe

<sup>۲</sup>- Michalowski

گردید. از یک لایه مسلح کننده در اعماق مختلف استفاده گردید. تغییرات ضریب ظرفیت باربری  $N\gamma$  به ازای زاویه شیب، فاصله از لبه شیب، زاویه اصطکاک خاک و عمق استقرار ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزودن یک لایه ژئوگرید تا عمق مشخص، ظرفیت باربری پی افزایش پیدا کرده و پس از آن کاهش پیدا می‌کند. همچنین طول بهینه ژئوگرید نیز محاسبه گردید [۸].

حسینی و قنبری به کمک روش اجزای محدود اثر پارامترهایی از جمله زاویه شیب و فاصله ایمن پی از لبه شیب را بررسی و تغییرات میزان ظرفیت باربری پی را برآورد کردند. با توجه به نتایج مشخص گردید که با فاصله گرفتن از لبه شیب ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و تا فاصله‌ای به مقدار ۳ برابر عرض پی این مقدار افزایشی است، ولی در مقادیر فاصله مساوی و بیشتر از ۳، میزان ظرفیت باربری تغییری نداشته و اثر مخرب شیب از بین می‌رود [۹].

کشاورز و همکاران در تحقیقی به بررسی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری واقع بر شیب غیرمسلح به روش تحلیل حدی اجزای محدود پرداختند. رفتار مصالح خاکی به صورت زهکشی نشده در نظر گرفته شد. اثر نوع رفتار خاک در این تحقیق به صورت همگن و ناهمگن مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مؤثر بر ظرفیت باربری و روندهای گسیختگی بررسی گردید. بر مبنای نتایج این تحلیل چارت‌های طراحی با استفاده از مقادیر بدون بعد تولید گردید [۱۰].

ژانگ و همکاران، به بررسی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری واقع بر شیب خاکی دارای چسبندگی با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود همراه با یک مش تطابق‌پذیر پرداختند. اثر لرزه‌ای در این تحقیق به صورت شبه‌استاتیک در نظر گرفته شد. نتایج در قالب تحلیل

نیروی شبه‌استاتیک به پی و خاک زیر پی اعمال کردند. اثر پارامترهای مختلف از قبیل شتاب لرزه‌ای افقی و عمودی، شیب زمین و عمق مدفون پی را بر ضرایب ظرفیت باربری بررسی کردند. از جمله نتایج آنها کاهش شدید ظرفیت باربری پی با افزایش شیب زمین بوده است [۴].

کای و ژو<sup>۳</sup>، با استفاده از روش آنالیز حدی کران بالا، حداکثر شیب مجاز برای خاک مسلح شده با ژئوسنتتیک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سه چیدمان متفاوت برای مسلح کننده در نظر گرفتند: توزیع یکنواخت، تراکم بیشتر مسلح کننده در بالای شیب و تراکم بیشتر در پایین شیب. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که تراکم بیشتر مسلح کننده در پایین شیب سبب افزایش ارتفاع بحرانی آن می‌گردد [۵].

سواف و نظیر<sup>۴</sup>، پی در مجاورت شیب را در دو حالت با مسلح کننده و بدون مسلح کننده روی خاک ماسه‌ای سست در نظر گرفتند و به بررسی اثر پارامترهای مختلف از قبیل ضخامت ماسه متراکم شده جایگزین، تعداد ژئوگرید و فاصله پی از تاج شیب پرداختند [۶].

پژوهشگران با استفاده از روش کران پایین تحلیل حدی اجزای محدود، ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های سطحی واقع بر روی خاکریزهایی با زاویه‌های شیب متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش زاویه شیب و ضریب افقی زلزله  $k_h$ ، ضرایب ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، مقادیر ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای افزایش پیدا می‌کند [۷].

هالدر و چاکرابورتی<sup>۵</sup>، ظرفیت باربری پی نواری واقع بر یک شیب مسلح شده را با استفاده از قضیه کران پایین مورد بررسی قرار دادند. نوع خاک بدون چسبندگی فرض

<sup>3</sup>- Cui and Zhou

<sup>4</sup>- El Sawwaf and Nazir

<sup>5</sup>- Halder and Chakraborty

<sup>6</sup>- Zhang

شده است. با این حال، محاسبه ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری با استفاده از هر دو قضیه کران بالا و پایین تحلیل حدی که بر روی خاک مسلح‌شده با ژئوسینتتیک قرار دارد، کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از طرفی دیگر، مطالعات پارامتری محدودی در هریک از تحقیقات گذشته انجام شده است. بنابراین در این تحقیق از قضیه کران بالا و پایین روش تحلیل حدی با مدل‌سازی در نرم‌افزار OptumG2، که قابلیت‌های بسیار مناسبی در بهره‌مندی از این روش دارد، استفاده گردیده است. با توجه به مسأله مورد مطالعه و نرم‌افزار مورد استفاده، هندسه مدل دوبعدی بوده و مدل‌سازی عددی در فضای دوبعدی صورت پذیرفته است. همچنین لازم به ذکر است رویکرد مدل‌سازی عددی، رویکردی شبه‌استاتیکی است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

در این بخش به بررسی روش مدل‌سازی، صحت‌سنجی مدل، هندسه مسأله، پارامترهای مورد مطالعه و برنامه آزمایش‌ها پرداخته شده است.

### ۲-۱- روش آنالیز حدی

روش آنالیز حدی، بار گسیختگی را به سادگی به دست می‌آورد. در این روش تلاش می‌شود، دو حد بالا و پایین برای بار گسیختگی واقعی به دست آید. در این روش مشخص می‌شود که بار گسیختگی واقعی در چه محدوده‌هایی قرار دارد، اما در روشی همانند تعادل حدی این جایگاه مشخص نیست. این روش دارای دو قضیه حد بالا و حد پایین می‌باشد که کران جواب‌های مسئله را تعیین می‌کنند. جواب واقعی مسئله بین حد بالا و حد پایین قرار خواهد گرفت. در این روش، با استفاده از ارتباط تنش‌ها با تغییرشکل‌های نسبی در مکانیک محیط‌های پیوسته و استفاده از معیار گسیختگی، ظرفیت باربری نهایی پی محاسبه می‌شود [۱۵ و ۱۶].

مفهوم حد بالا بیانگر این است که بارگسیختگی با برابر قرار دادن ائتلاف انرژی داخلی با کار نیروهای خارجی

پارامتریک و نمودارهای بدون بعد ظرفیت باربری ارائه گردید [۱۱].

رمضان بروجردی و جیریایی شهرانی، ظرفیت باربری لرزه‌ای یک پی نواری در مجاورت شیب را با استفاده از یک فرآیند شبه‌دینامیکی محاسبه نمودند. در این تحقیق از روش تعادل حدی استفاده گردید. همچنین یک تحلیل پارامتریک جهت بررسی اثر چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک، شیب زمین و شتاب افقی و قائم زلزله صورت پذیرفت. نتایج این تحقیق با برخی دیگر از پژوهش‌هایی که از روش‌های شبه‌استاتیکی استفاده کرده بودند، مقایسه گردید [۱۲].

رضایی‌صوفی و همکاران ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری واقع بر شیب مسلح‌شده با ژئوسینتتیک را با استفاده از روش کران بالا مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق پارامترهای مختلفی از جمله عمق بهینه استقرار ژئوسینتتیک مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج این تحقیق، جداولی برای تعیین ظرفیت باربری لرزه‌ای پی در شرایط مختلف استخراج گردید [۱۳].

یعقوبی و همکاران به بررسی ظرفیت نهایی پی نواری واقع بر یک شیب مسلح‌شده به ژئوگرید با استفاده از روش مرز پایین در ارتباط با المان محدود و برنامه‌نویسی مخروطی مرتبه دوم (SOCP<sup>۷</sup>) پرداختند. عوامل مختلفی از جمله عمق استقرار ژئوگرید، مقاومت نهایی کششی ژئوتکستایل، زاویه‌دار بودن بار و خروج از مرکزیت آن بر روی پی مورد بررسی قرار گرفت [۱۴].

با توجه به متداول بودن ساخت‌وساز در پهنه‌های شیب‌دار به دلیل وجود مناطق کوهستانی متعدد در ایران و از طرفی لرزه‌خیز بودن این نواحی، در این تحقیق به بررسی رفتار لرزه‌ای پی‌های سطحی که بر روی خاک‌های ماسه‌ای مسلح‌شده با ژئوگرید قرار گرفته‌اند، پرداخته شده است. همان‌طور که از بررسی ادبیات فنی این موضوع مشخص می‌شود، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام

<sup>7</sup>- Second Order Cone Programming

نرم‌افزار بر مبنای تحلیل حالت حدی می‌باشد. تجزیه و تحلیل حدی بدون نیاز به تحلیل گام‌به‌گام الاستوپلاستیک ارزیابی سریع‌تری از پایداری و یا ظرفیت باربری پی‌ها را انجام می‌دهد. محاسبات جهت بارهای تکی و گسترده قابل انجام بوده و در آنالیز حدی، بار تکی ثابت نگه داشته می‌شود، در حالی که بار گسترده تا زمانی که حالت گسیختگی اولیه حاصل شود تقویت می‌شود. این ویژگی در ارتباط با پایداری شیب کاربرد داشته و مؤثر است [۹].

از ویژگی‌های خاص این نرم‌افزار که متفاوت با سایر نرم‌افزارهای موجود است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: محاسبه دقیق و آسان ظرفیت باربری در حالت لرزه‌ای تنها با وارد کردن ضریب لرزه‌ای افقی و یا قائم به خاک، امکان محاسبه بارهای حدی با ظرفیت باربری مسائل مختلف ژئوتکنیکی بدون انجام تحلیل‌های الاستوپلاستیک مرحله‌به‌مرحله، امکان محاسبه حد بالا و پایین برای مسئله‌های حدی، عدم نیاز به تشکیل ماتریس سختی، امکان به‌روزرسانی شبکه اجزای محدود، زمان بسیار کم تحلیل، امکان اعمال محاسبه حدود بالا و پایین تحلیل به کمک فاکتور کاهش مقاومت با اعمال یک بار مشخص، عدم وجود مشکلات همگرایی و عددی.

## ۲-۲- صحت‌سنجی مدل

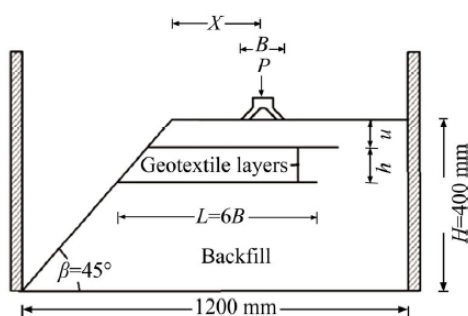
جهت صحت‌سنجی قابلیت نرم‌افزار OptumG2 در مدل‌سازی مسأله ظرفیت باربری پی‌های واقع در مجاورت شیب، مدل‌های آزمایشگاهی تحقیق غفاری و همکاران توسط این نرم‌افزار به صورت عددی مدل‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی با مدل‌سازی عددی مقایسه گردید. در تحقیق غفاری و همکاران ظرفیت باربری پی مجاور شیب، در دو حالت خاک غیرمسلح و مسلح‌شده با ژئوتکستایل مورد بررسی قرار گرفت [۱۷].

در بخشی از این تحقیق ظرفیت باربری آزمایشگاهی پی سطحی با فواصل مختلف از لبه پی در دو حالت استقرار بر روی خاک غیرمسلح و مسلح محاسبه و

پیدا شود. آنگاه بار گسیختگی حاصل شده از این روش مساوی یا بزرگتر از بار گسیختگی واقعی است. حد پایین در روش تحلیل حدی با فرض میدان تنش و سپس مطالعه تعادل نیروها به دست می‌آید. بار حاصل از روش حد پایین همواره کوچکتر و یا مساوی بار گسیختگی واقعی است.

نرم‌افزار OptumG2 مانند بسیاری از نرم‌افزارهای موجود، نرم‌افزاری المان محدود برای تحلیل مقاومت و تغییر مسائل ژئوتکنیکی می‌باشد. هسته محاسباتی OptumG2 بر اساس الگوریتم‌های عددی پیشرفته که بر مینا و پایه‌ای از رویکردهای سنتی قرار دارد ساخته شده است. این الگوریتم‌ها منجر به سطح قدرت و کارایی بالا برای هر برنامه موجود تحلیل اجزای محدود عناصر ژئوتکنیک می‌شود. عدم همگرایی و مشکلات عددی مشابه که همچنان در برخی از برنامه‌های اجزای محدود متعارف وجود دارند در OptumG2 مطرح نیستند. به همین ترتیب، تنظیمات الگوریتمی، خسته‌کننده و وقت‌گیر، انجام نشده و همه توجه را می‌توان به آنچه که در محاسبات ضروری است، یعنی فیزیک یک مسئله خاص، معطوف کرد. اغلب برنامه‌های المان محدود دارای راه‌حل‌هایی هستند که ممکن است دقیق یا تقریبی باشند، اما هیچ راهی برای دانستن این که چه مقدار ممکن است در این محاسبات خطا وجود داشته باشد وجود ندارد. در نتیجه، فرآیند اصلاح تدریجی شبکه‌بندی به عنوان بخش استاندارد هر برنامه المان محدود دیده می‌شود. روش تحلیل‌ها در نرم‌افزار Optum یک جایگزین برای این فرآیند طولانی و اغلب بی‌نتیجه را با فراهم ساختن محاسبه حد بالا و پایین مقادیر مورد نظر فراهم ساخته است. با حدهای بالا و پایین محاسبه شده، یک تخمین از محتمل‌ترین خطای موردی در دسترس قرار می‌گیرد که می‌تواند مقادیر حدود بالا و پایین را با استفاده از افزایش تعداد اجزای آنالیز بهبود داده و میزان خطا را کاهش دهد. روش محاسبه ظرفیت باربری در این

شده و تمیز ساحل بابلسر در تحقیق غفاری و همکاران استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این خاک در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- هندسه مدل فیزیکی تحقیق غفاری و همکاران [۱۷]

درصد تراکم خاک برابر با ۷۰ درصد است. ژئوتکستایل استفاده شده در این آزمایش از نوع ژئوتکستایل بافته شده پلی استری است. ویژگی‌های آن در جدول ۲ ارائه شده است. مشخصات آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی غفاری و همکاران که برای صحت‌سنجی در پژوهش حاضر از آنها استفاده شده، به شرح جدول ۳ است [۱۷].

نتایج زمین مسطح نیز مقایسه گردید. جهت مدل‌سازی از یک جعبه با مشخصات ۱/۲ متر طول، ۰/۶۷ متر عرض و ۰/۷ متر ارتفاع استفاده شده که برای مشاهده سطوح گسیختگی از دیواره شفاف پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلیمتر ساخته شده است. دیواره‌های این جعبه از پروفیل فولادی و کف آن از ورق فولادی ساخته شده است. همچنین جهت بارگذاری از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ تن استفاده گردید. خاکریزی با ابعاد ۱۲۰۰×۷۰۰ میلیمتر در پلان و ارتفاع ۴۰۰ میلیمتر و زاویه شیب ۴۵ درجه در این مخزن مدل‌سازی شد. ابعاد مدل پی ۱۰۰×۶۴۰ میلیمتر در پلان انتخاب گردید. همچنین فاصله اولین مسلح‌کننده از زیر پی (u)، فاصله بین دو مسلح‌کننده (h) و طول مسلح‌کننده (L) به ترتیب برابر  $u=0.5B$ ،  $h=0.7B$  و  $L=6B$  است. B عرض پی مدل‌شده و X فاصله وسط پی از لبه شیب می‌باشد. طرح کلی شیروانی و پی مدل‌شده در تحقیق غفاری و همکاران در شکل ۱ نمایش داده شده است. از ماسه بد دانه‌بندی

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه ساحل بابلسر مورد استفاده در تحقیق غفاری و همکاران [۱۷]

پارامتر	مقدار
$D_{10}$ (mm)	۰/۱۵
$D_{50}$ (mm)	۰/۲۵
$C_u$	۱/۹۳
$C_c$	۰/۸۳
$G_s$	۲/۷۴
$e_{max}$	۰/۸
$e_{min}$	۰/۵۵
$\phi$ (°)	۴۱
C (kPa)	صفر

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی ژئوتکستایل استفاده شده در تحقیق غفاری و همکاران [۱۷]

پارامتر	مقدار
مقاومت کششی (kN/m)	۱۰۰
کرنش طولی (/.)	۱۰
مقاومت کششی در ۵٪ کرنش (kN/m)	۵۰

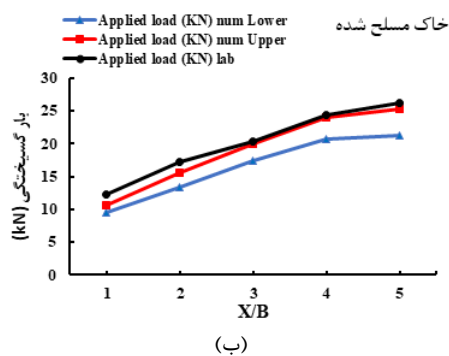
جدول ۳ انجام پذیرفت و پارامترهای مقاومتی خاک و مسلح‌کننده طبق جدول ۱ و جدول ۲ اعمال گردید.

با توجه به هندسه مدل فیزیکی، مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار OptumG2 براساس برنامه آزمایش‌های

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مرز بالا و پایین حاصل از مدل سازی عددی، حاکی از صحت و دقت مناسب مدل عددی در محاسبه بار نهایی پی در زمین شیب دار است. شکل ۳-۲ الف و ب تغییرات بار نهایی وارده بر پی را به ازای فاصله نرمال شده از لبه شیب ( $X/B$ ) در دو حالت خاک مسلح نشده و خاک مسلح شده نشان می دهد.

### ۳-۲-۳- مشخصات و هندسه مدل عددی

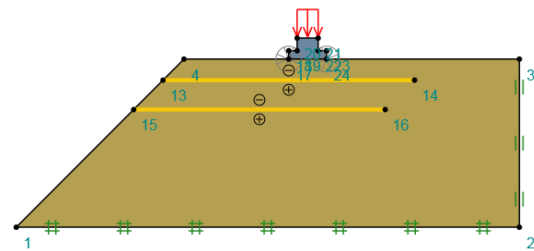
جهت بررسی و تعیین مقدار بهینه برای پارامترهای تأثیرگذار بر ظرفیت باربری لرزه ای پی های واقع در مجاورت شیب مسلح و تعیین پیکربندی مناسب طول ژئوگرید ( $L$ )، زاویه شیب ( $\beta$ ) و فاصله از لبه شیب ( $X$ )، از یک شیب خاکی با مشخصات اشاره شده در جدول ۴ استفاده شده است. طول مسلح کننده به گونه ای انتخاب گردید که بتوان تأثیر آن را بر افزایش ظرفیت باربری و تعیین طول بهینه مشاهده کرد. همچنین بازه زاویه اصطکاک داخلی خاک از مقادیر بسیار کم (۲۵ درجه) تا مقادیر بسیار زیاد (۴۵ درجه) جهت بررسی اثر زاویه اصطکاک خاک دانه ای در نظر گرفته شد.



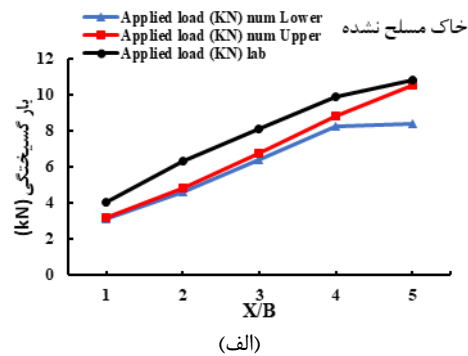
سپس نتایج حاصل از مدل سازی عددی با مدل سازی آزمایشگاهی مقایسه و بررسی گردید. شکل ۲، هندسه مدل در نرم افزار را نشان می دهد.

جدول ۳- برنامه آزمایش های غفاری و همکاران [۱۷]

شماره آزمایش	وضعیت مسلح شدگی	فاصله از لبه شیب
۱	غیرمسلح	۱B
۲	غیرمسلح	۲B
۳	غیرمسلح	۳B
۴	غیرمسلح	۴B
۵	غیرمسلح	زمین مسطح (۵B)
۶	مسلح	۱B
۷	مسلح	۲B
۸	مسلح	۳B
۹	مسلح	۴B
۱۰	مسلح	زمین مسطح (۵B)



شکل ۲- هندسه مدل عددی براساس تحقیق غفاری و همکاران [۱۷] برای صحت سنجی نرم افزار OptumG2



شکل ۳- صحت سنجی مدل سازی عددی در تحقیق حاضر با نتایج مدل سازی آزمایشگاهی غفاری و همکاران [۱۷] در دو حالت (الف) خاک مسلح نشده و (ب) خاک مسلح شده

جدول ۴- پارامترهای خاک و مسلح کننده در تحقیق حاضر

پارامتر	واحد	مقدار
طول مسلح کننده ( $L$ )	m	۱، ۲، ۳، ۴ و ۵
زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ )	درجه	۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵
چسبندگی خاک ( $C$ )	kg/cm <sup>2</sup>	صفر
وزن مخصوص خاک ( $\gamma$ )	kN/m <sup>3</sup>	۱۶



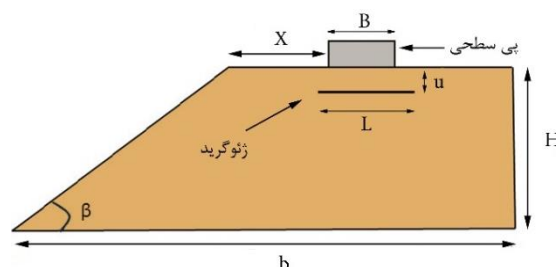
در تحلیل‌های پارامتریک که چندین متغیر در نتیجه دخیل است، تحلیل حساسیت و تعیین اثرگذارترین پارامتر بر خروجی، حائز اهمیت است. در روش‌های طراحی آزمایش‌ها همچون روش سطح پاسخ (RSM<sup>۹</sup>) امکان تعیین تأثیرگذارترین پارامتر با دقت بالا و با سهولت بیشتری فراهم است [۱۹]. با توجه به اینکه در تحلیل حاضر از روش‌های طراحی آزمایش‌ها و روش‌های مشابه استفاده نشده، اثر تک تک متغیرها بر ظرفیت باربری پی مد نظر بوده است، بنابراین به‌طور ویژه به تحلیل حساسیت متغیرها پرداخته نشده است.

#### ۲-۴- مدل‌سازی لرزه‌ای

در این پژوهش، تنها اثرات ضریب افقی زلزله  $k_h$  در نظر گرفته شده و ضریب قائم زلزله  $k_v$  صفر می‌باشد. برای این منظور، ابتدا به کمک نرم‌افزار،  $k_{multi}$  که به معنای بیشترین ضریب زلزله قابل تحمل توسط خاک بدون اعمال بار قائم می‌باشد، مشخص گردید. این مقدار برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک و سایر پارامترهای هندسی متغیر می‌باشد. سپس برای هر آنالیز، ضریب افقی زلزله از  $k_h$  برابر صفر (حالت استاتیکی) تا  $k_h = k_{multi}$  متغیر بوده و تحلیل‌های لازم روی آن انجام شده است. با این کار، کمترین تا بیشترین شتاب افقی لرزه‌ای که ممکن است به خاک اعمال شود در تحلیل در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق و برای بررسی رفتار لرزه‌ای  $k_h = 0/1$  در نظر گرفته شده است. مقدار مذکور به این دلیل انتخاب گردید که به ازای مقادیر بیشتر  $k_h$ ، در برخی حالات مورد مطالعه، خود شیب در اثر اعمال شتاب لرزه‌ای ناپایدار گشته و دیگر امکان محاسبه ظرفیت باربری پی امکان‌پذیر نبود. به عبارت بهتر،  $k_h = 0/1$  حالتی است که در هیچ‌یک از موارد تحلیل پارامتری، خود شیب در اثر زلزله ناپایدار نمی‌شود.

#### ۳- بحث و بررسی نتایج

از آنجا که در این تحقیق، تأثیر وزن مخصوص خاک بر ظرفیت باربری مد نظر نبود، بنابراین مقدار این پارامتر ثابت و در محدوده مناسب برای یک خاک دانه‌ای خشک در نظر گرفته شد. همچنین هندسه پی و شیروانی مدل‌شده با توجه به شکل ۴ و طبق مقادیر جدول ۵ است.



شکل ۴- هندسه مدل عددی در تحقیق حاضر

جدول ۵- هندسه مدل در تحقیق حاضر

پارامتر	واحد	مقدار
B	m	۱
u	m	۰/۳
X	m	۵، ۴، ۳، ۲، ۱
$\beta$	درجه	صفر، ۱۰ و ۲۰
b	m	۳۰
H	m	۷/۵

مقدار عرض پی (B) ثابت و برابر یک متر در نظر گرفته شد تا بیان پارامترهای بدون بعد ساده‌تر صورت پذیرد. فاصله عمودی ژئوگرید از زیر پی (u) برابر با مقداری انتخاب گردید که حتما سطوح گسیختگی ژئوگرید را قطع نماید. مقدار فاصله پی از لبه شیب (X) به‌گونه‌ای تعیین گردید که اثر این پارامتر بر ظرفیت باربری قابل مشاهده و تفسیر باشد. همچنین در این تحقیق، ظرفیت باربری در یک شیب ملایم مد نظر بود؛ بنابراین بازه تغییرات زاویه شیب ( $\beta$ ) بین صفر تا ۲۰ درجه تعیین گردید. عرض (b) و ارتفاع مدل (H) عددی در تحقیق حاضر که به ترتیب  $30B$  و  $7/5B$  است، مطابق پژوهش کومار و چاکرابورتی<sup>۸</sup> انتخاب شده است [۱۸].

<sup>۹</sup>- Response Surface Method

<sup>۸</sup>- Kumar and Chakraborty

در این بخش جهت بررسی و تعیین طول مؤثر مسلح‌کننده در حالت استاتیکی و لرزه‌ای (دینامیکی)، سه زاویه شیب صفر (زمین مسطح)، ۱۰ و ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است. برای هر زاویه شیب پارامترهای اشاره‌شده در جدول ۶ متغیر در نظر گرفته شد. در تمامی این تحلیل‌ها  $u/B=0/3$  فرض شده است.

شکل ۵، حد بالا و پایین ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه‌ای پی را برای زمین شیب‌دار با زاویه شیب ۱۰ درجه و زاویه اصطکاک داخلی ۲۵ درجه به ازای طول‌های مختلف مسلح‌کننده و همچنین فواصل مختلف پی از لبه شیب ( $X/B$ ) نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که به ازای  $X/B$ ‌های مختلف، طول مسلح‌کننده افزایش چشم‌گیری بر ظرفیت باربری پی ندارد. در این حالت، طول بهینه مسلح‌کننده حدود  $2B$  برآورد می‌گردد.

جدول ۶- برنامه مدل‌سازی عددی جهت بررسی طول مؤثر ژئوگرید

پارامتر	مقدار
$L/B$	۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶
$X/B$	۱، ۲، ۳، ۴ و ۵
$\phi$ (°)	۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵

جهت محدودیت در ارائه نمودار، در شکل ۶، تغییرات ظرفیت باربری برای خاک با زاویه اصطکاک داخلی ۴۵ درجه ارائه شده است.

در شکل ۷، می‌توان دلیل این مسأله را به خوبی مشاهده کرد. ریزتر شدن شبکه در تحلیل حاضر، نشان‌دهنده استهلاک برشی بیشتری و به عبارتی وقوع سطوح گسیختگی است. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مشاهده می‌شود که صفحه گسیختگی سراسری تا سطح شیب ایجاد شده و به همین دلیل علی‌رغم افزایش مقاومت خاک، طول بهینه ژئوگرید افزایش چندانی نداشته است. همانطور که در شکل ۷- ب مشخص است، عملاً بخش‌های کمی از ژئوگرید با سطوح گسیختگی تلاقی کرده و به کشش می‌افتد.

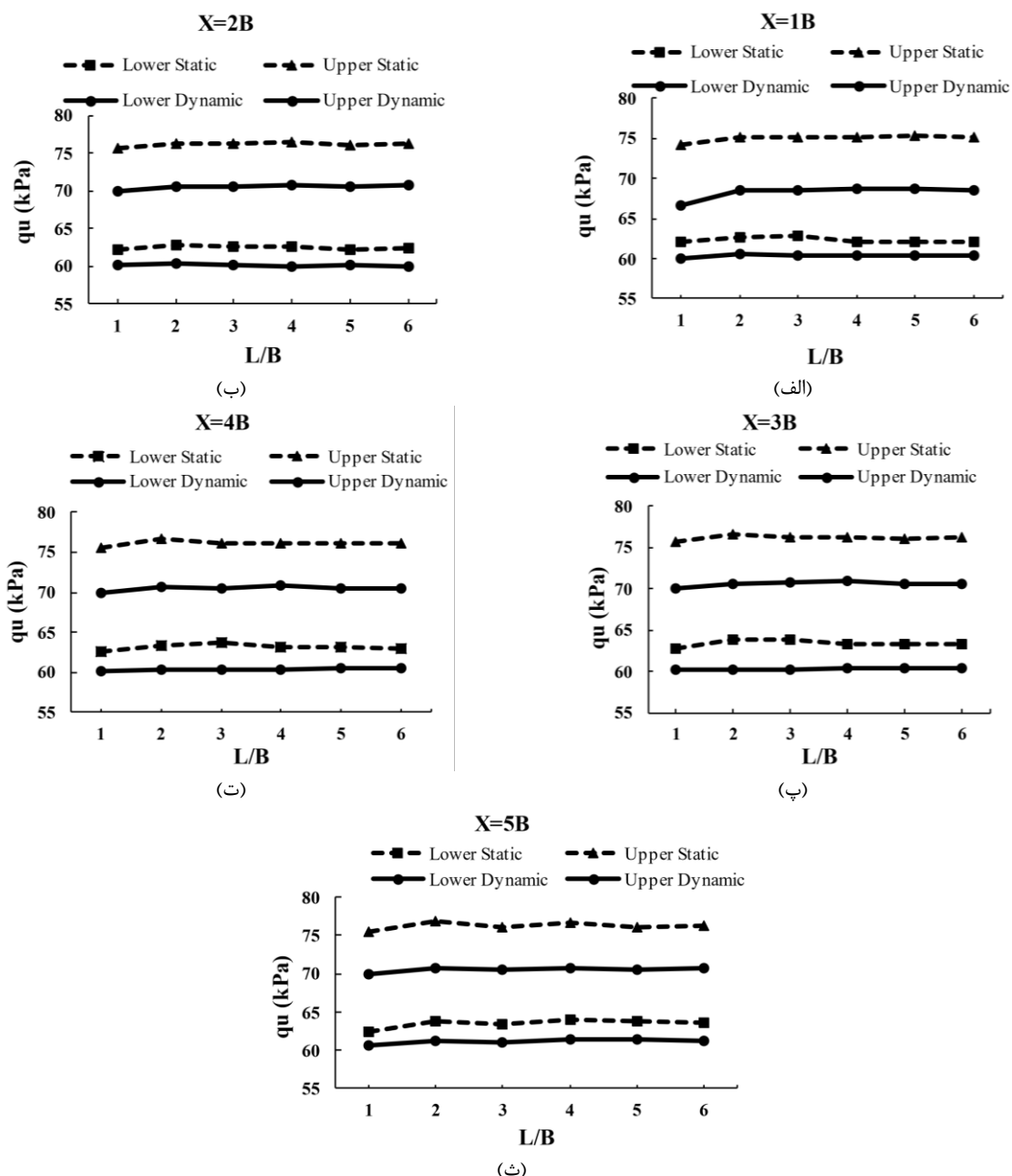
در این بخش به بررسی نتایج حاصل‌شده از مدل عددی و بررسی پارامترهای تأثیرگذار اعم از فاصله پی از لبه سطح شیب‌دار ( $X$ )، زاویه شیب ( $\beta$ ) و طول مسلح‌کننده ( $L$ ) بر ظرفیت باربری استاتیکی و دینامیکی پی‌های واقع در مجاورت سطح شیب‌دار پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- تحلیل طول مؤثر مسلح‌کننده

طول ژئوگرید تأثیر قابل‌توجهی در نحوه عملکرد آن در افزایش ظرفیت باربری خاک دارد، به طوری که با انتخاب یک طول مناسب می‌توان به بهینه‌ترین عملکرد از لحاظ اقتصادی و افزایش ظرفیت باربری رسید و یا برعکس در صورت انتخاب یک طول بزرگتر علاوه بر اینکه افزایش چشم‌گیری در ظرفیت باربری نخواهد داشت، از نظر اقتصادی نیز به صرفه نیست.

برخلاف این عقیده که با افزایش زاویه اصطکاک، خاک مقاوم‌تر شده و در نتیجه طول بهینه مسلح‌کننده کمتر می‌شود، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه اصطکاک به دلیل گسترده‌تر شدن ناحیه گسیختگی زیر پی و لغزش شیروانی تا پای شیب، نیمه سمت چپ ژئوگرید از زیر پی به کشش نیافتاده و در نتیجه به بهبود ظرفیت باربری پی کمکی نمی‌کند. بنابراین طول بهینه ژئوگرید نیز افزایش پیدا می‌کند. به طوری که در زاویه اصطکاک داخلی زیاد (۴۰ و ۴۵ درجه) طول بهینه مسلح‌کننده اندکی افزایش پیدا کرده و به  $3B$  می‌رسد.

البته این بدان معنا نیست که مقدار ظرفیت باربری کاهش پیدا می‌کند؛ بلکه به ازای طول بزرگتری از ژئوگرید، به مقاومت‌های بالاتر می‌توان دست یافت. به



شکل ۵- تغییرات حد بالا و پایین ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه‌ای پی برای زمین شیب‌دار با زاویه شیب ۱۰ درجه و زاویه اصطکاک داخلی ۲۵ درجه به ازای طول‌های مختلف مسلح‌کننده ( $L/B$ ) و فواصل مختلف پی از لبه شیب ( $X$ )

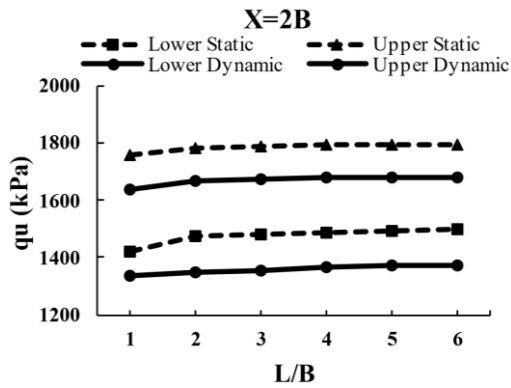
درصد کاهش ظرفیت باربری برای حد بالا و حد پایین متفاوت است. با مقایسه حد بالا و حد پایین ظرفیت باربری در حالت استاتیکی و لرزه‌ای مشخص شد که اعمال ضریب شتاب افقی زلزله، سبب کاهش ظرفیت باربری براساس مرز بالا در حدود ۵ تا ۱۲ درصد و براساس مرز پایین در حدود ۲ تا ۱۱ درصد شده است. دلیل تفاوت این بازه علاوه بر تأثیر پارامترهای مختلف

بخش زیادی از نیمه سمت راست ژئوگرید در این شکل هیچ دخالتی در افزایش ظرفیت باربری خاک ندارد. به بیان دیگر، نوع گسیختگی از حالت نسبتاً موضعی برای خاک با زاویه اصطکاک داخلی ۲۵ درجه به گسیختگی از نوع سراسری برای خاک با زاویه اصطکاک ۴۵ درجه تغییر می‌نماید.

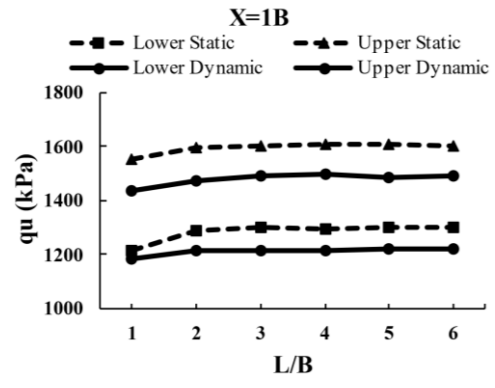
هنگامی که ضریب افقی زلزله ( $k_h=0/1$ ) وارد می‌شود، طبیعی است که ظرفیت باربری کاهش پیدا کند.

لبه شیب)، به نوع حد (مرز بالا یا پایین) نیز مرتبط است.

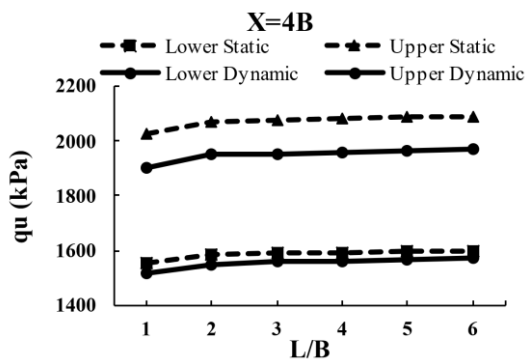
(همچون زوایای اصطکاک داخلی و فواصل مختلف پی از



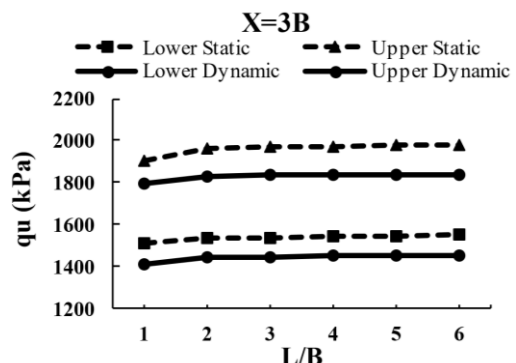
(ب)



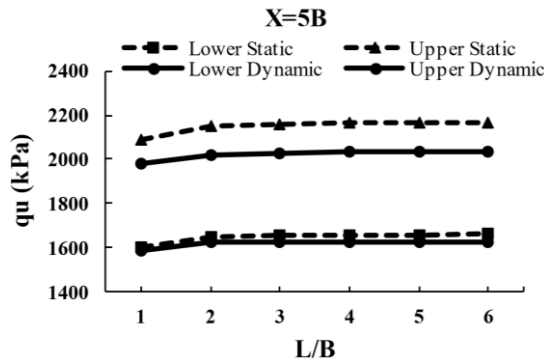
(الف)



(ت)

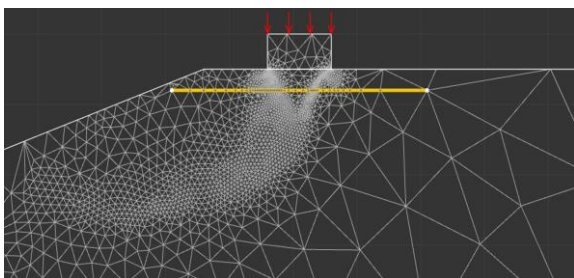


(پ)

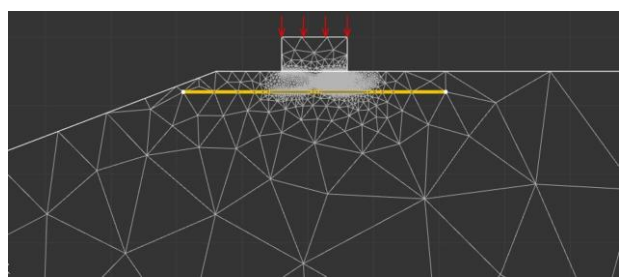


(ث)

شکل ۶- تغییرات حد بالا و پایین ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه‌ای پی برای زمین شیبدار با زاویه شیب ۱۰ درجه و زاویه اصطکاک داخلی ۴۵ درجه به ازای طول‌های مختلف مسلح کننده (L/B) و فواصل مختلف پی از لبه شیب (X)



(ب)

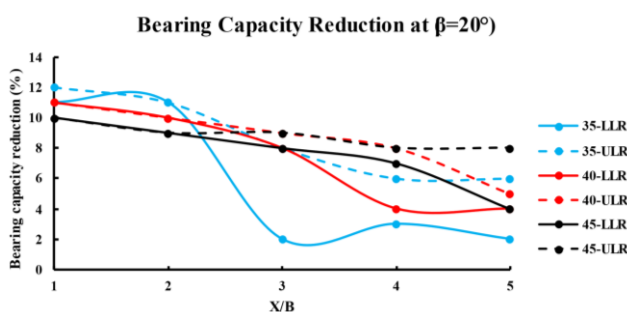


(الف)

شکل ۶- المان‌بندی مدل در شرایط استاتیکی با فرض  $L=4B$  و  $\beta=20^\circ$ ،  $X=1B$  به ازای زوایای اصطکاک داخلی خاک، (الف)  $\phi=25^\circ$  و (ب)  $\phi=45^\circ$

ذکر است روند مشاهده شده در نتایج تحلیل بر روی شیروانی با زاویه ۲۰ درجه کاملاً مشابه شیروانی با زاویه ۱۰ درجه است با این تفاوت که در حالت زاویه اصطکاک داخلی ۲۵ و ۳۰ درجه به علت ناپایداری شیب، امکان اعمال ضریب افقی زلزله وجود نداشت. همچنین طول مؤثر ژئوگرید برای این حالت نیز بین ۲B تا ۳B تعیین گردید. همچنین طول مؤثر در حالت زمین مسطح ( $\beta=0$ ) نیز مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۸، تغییرات کاهش ظرفیت باربری لرزه‌ای نسبت به ظرفیت باربری استاتیکی را براساس حد بالا و حد پایین برای شیروانی با زاویه ۲۰ درجه نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که به طور کلی هم براساس نتایج مرز پایین و خصوصاً نتایج مرز بالا با افزایش فاصله از لبه شیب، ضریب کاهش ظرفیت باربری کاهش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد هرچقدر پی به شیب نزدیک می‌شود، بر اثر اعمال نیروی لرزه‌ای، سطوح گسیختگی در ظرفیت باربری‌های کمتری به طور کامل تشکیل می‌شود. لازم به



شکل ۷- روند تغییرات کاهش ظرفیت باربری لرزه‌ای نسبت به ظرفیت باربری استاتیکی به ازای فواصل مختلف پی از لبه شیب ( $X/B$ ) و زوایای اصطکاک داخلی مختلف خاک براساس نتایج مرز پایین (LLR) و مرز بالا (ULR) برای شیب با زاویه ۲۰ درجه

در زوایای اصطکاک داخلی تا ۳۵ درجه، طول مؤثر ۲B و برای زوایای اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه، این مقدار برابر با ۳B تعیین گردید. همچنین میزان کاهش ظرفیت باربری لرزه‌ای نیز براساس مرزهای بالا و پایین بین ۲ تا ۸ درصد محاسبه گردید. به دلیل مسطح بودن زمین، انتظار می‌رفت که کاهش ظرفیت کمتری نسبت به زمین شیب‌دار به دست آید که نتایج نیز مؤید این مسأله است.

۳-۲- فاصله امن شیب (بررسی فاصله پی از لبه شیب)

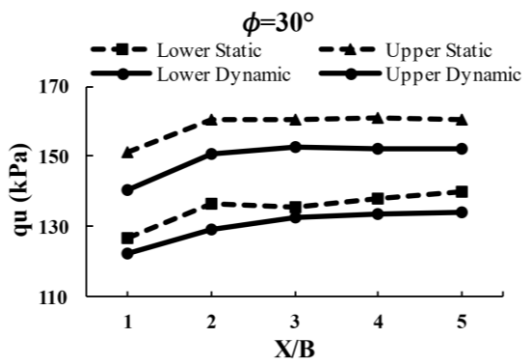
بدیهی است با افزایش فاصله پی از لبه شیب، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. فاصله امن از لبه شیب به فاصله‌ای گفته می‌شود که بیشتر از آن فاصله، اثر کاهشی شیب بر ظرفیت باربری از بین رفته و تغییرات ظرفیت باربری در برابر فاصله ثابت شده و با فاصله گرفتن بیشتر از شیب، افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری مشاهده نمی‌شود. در این بخش با ثابت نگه داشتن مقدار  $L/B=3$

و  $u/B=0.3$ ، به ازای مقادیر مختلف  $X/B$  و زاویه اصطکاک داخلی خاک، حد بالا و پایین ظرفیت باربری در دو حالت استاتیکی و لرزه‌ای محاسبه گردید. شکل ۹، مقادیر مذکور را برای شیب با زاویه ۱۰ درجه نشان می‌دهد. نکته مهم در این نتایج وابستگی بسیار زیاد فاصله امن از لبه شیب به زاویه اصطکاک داخلی است، به طوری که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، فاصله امن از لبه شیب افزایش پیدا می‌کند. این مقدار برای خاک با زاویه اصطکاک ۲۵ و ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه به ترتیب برابر ۲B، ۲B، ۳B و ۴B است. برای خاک با زاویه اصطکاک ۴۵ درجه تا نسبت  $X/B=5$  مقدار فاصله امن از لبه شیب صعودی بوده و به نظر می‌رسد مقدار آن حداقل ۵B و حتی بیشتر از آن است. دلیل این مسأله را می‌توان مرتبط با عمیق تر شدن سطوح گسیختگی با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک و وقوع گسیختگی کلی در شیب دانست.

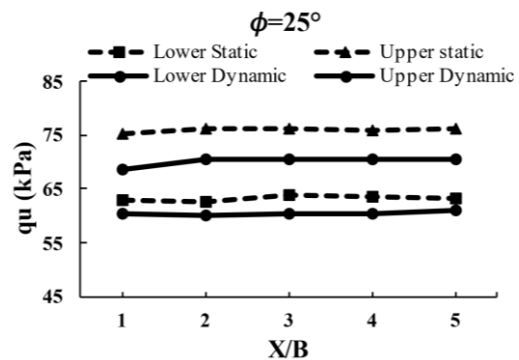
سواف و نظیر و همچنین حسینی و قنبری فاصله امن پی از لبه شیب را سه برابر عرض پی از لبه شیب بیان

خاک بر میزان فاصله امن پی است.

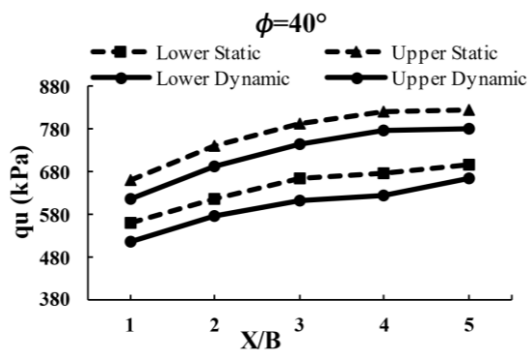
کردند [۶ و ۹]. مسأله مهمی که در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفت، تأثیر قابل توجه زاویه اصطکاک داخلی



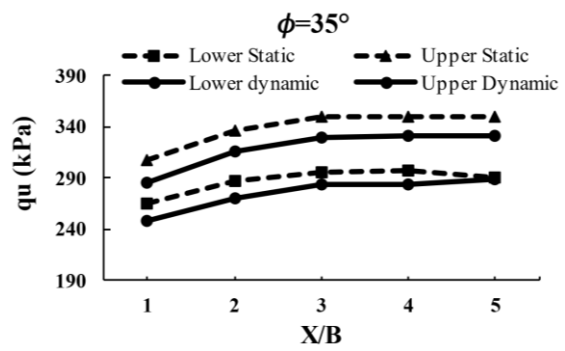
(ب)



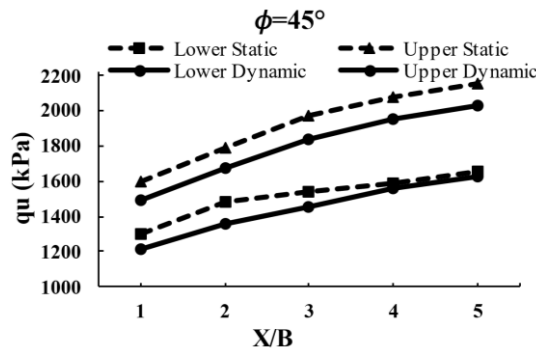
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۸- تغییرات حد بالا و پایین ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه‌ای پی برای زمین شیب‌دار با زاویه شیب ۱۰ درجه و نسبت  $L/B=3$  و  $u/B=0.3$  به ازای فواصل مختلف پی از لبه شیب ( $X/B$ ) و زوایای اصطکاک داخلی خاک

می‌دهد تغییری در مقدار آن رخ نداده است. دلیل این مسأله را می‌توان به تأثیرگذارتر بودن پارامتر شیب زمین نسبت به نیروهای لرزه‌ای با ضریب افقی زلزله  $k_H=0.1$  مرتبط دانست. روندهای مشاهده شده در زمین شیب‌دار با زاویه ۲۰ درجه، کاملاً مشابه روندهای مشاهده شده در زمین با شیب ۱۰ درجه است با این تفاوت که در زوایای اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه شیب تغییرات ظرفیت

ظرفیت باربری لرزه‌ای با استاتیکی با فرض  $k_H=0.1$  و فاصله ایمن از لبه شیب برابر با  $3B$  مقایسه گردید. جدول ۷، نشان‌دهنده میزان کاهش ظرفیت باربری لرزه‌ای نسبت به استاتیکی است که به طور کلی کاهش حدود ۲ تا ۸ درصد را نشان می‌دهد.

مسأله دیگر، فاصله ایمن پی از لبه شیب در حالت لرزه‌ای نسبت به حالت استاتیکی است. نتایج نشان

شیب، وقوع گسیختگی کلی در خاک با زوایای اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه در فواصل دورتری از لبه پی رخ می‌دهد و بنابراین فاصله ایمن افزایش پیدا می‌کند.

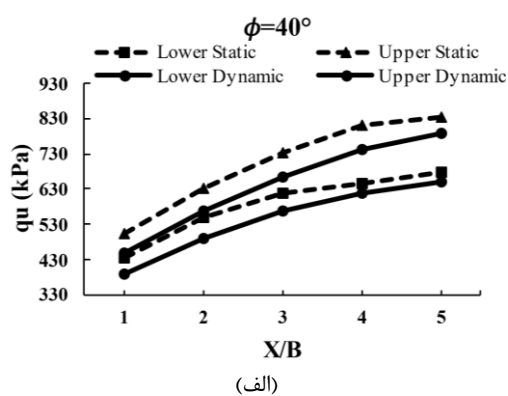
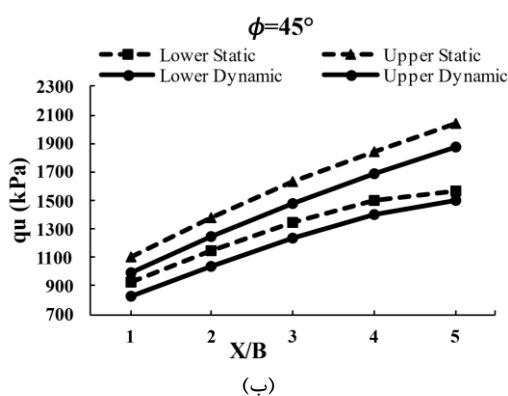
باربری تندتر شده و فاصله ایمن پی از لبه شیب بیشتر از ۵B برآورد گردید. این مسأله در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این روند کاملاً منطقی است چرا که با افزایش زاویه

جدول ۷- میزان کاهش ظرفیت باربری لرزه‌ای نسبت به استاتیکی با فرض  $X/B=3$  برای شیب با زاویه ۱۰ درجه

کاهش ظرفیت باربری لرزه‌ای نسبت به استاتیکی		زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)
مرز بالا (%)	مرز پایین (%)	
۸	۵	۲۵
۵	۲	۳۰
۶	۴	۳۵
۶	۸	۴۰
۷	۶	۴۵

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که فاصله ایمن از لبه پی به دو عامل مهم شیب زمین و خصوصاً زاویه اصطکاک داخلی خاک وابستگی مستقیم دارد و این دو عامل باید به صورت توأمان در نظر گرفته شود. در محدوده تحقیق حاضر، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک به مراتب بیشتر از زاویه شیب بر روی محاسبه فاصله ایمن از لبه پی است.

به این نکته باید توجه نمود که ظرفیت باربری پی به ازای یک فاصله مشخص از لبه پی برای خاک با زوایای اصطکاک داخلی بالاتر، بیشتر از خاک با زوایای اصطکاک کمتر است و این مسأله متفاوت از فاصله ایمن از لبه پی است. ایمانی و رزقانی فاصله ایمن پی از لبه شیب را برای زاویه شیب ۲۰ درجه سه برابر عرض پی پیشنهاد کرده است [۲۰].



شکل ۹- تغییرات حد بالا و پایین ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه‌ای پی برای زمین شیب‌دار با زاویه ۲۰ درجه و  $L/B=3$  و  $u/B=0/3$  به ازای فواصل مختلف پی از لبه شیب ( $X/B$ ) و زوایای اصطکاک داخلی خاک

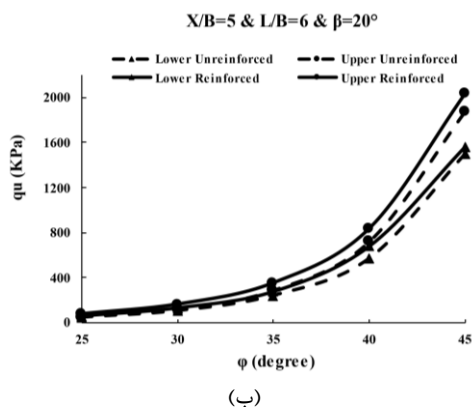
۳-۳- اثر زاویه شیب  
مسلح‌کننده برابر  $L=3B$  در نظر گرفته شده و مدل‌سازی و تحلیل انجام گرفت. نتایج در دو حالت استاتیکی و دینامیکی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش زاویه شیب به علت وقوع ناپایداری و تشکیل سطوح گسیختگی، ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. کاهش زاویه شیب از ۲۰ به ۱۰

جهت بررسی اثر زاویه شیب بر ظرفیت باربری پی با در نظر گرفتن یک لایه ژئوگرید و با ثابت فرض گرفتن مقدار پارامترهای مؤثر دیگر شامل زاویه اصطکاک برابر ۳۵ درجه، فاصله از لبه شیب برابر  $X=1B$  و طول

آن در حالت مسلح شده توجه گردد. از آنجا که مقایسه بین ظرفیت باربری پی در حالت مسلح شده و مسلح نشده برای تمامی حالات مورد مطالعه در این تحقیق امکان پذیر نبوده، در اینجا و تنها برای حالاتی محدود به مقایسه ظرفیت باربری پی در حالت مسلح شده و مسلح نشده پرداخته شده است.

شکل ۱۲، تغییرات حد بالا و حد پایین ظرفیت باربری استاتیکی پی واقع بر شیب را به ازای تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک برای دو شیب ۱۰ و ۲۰ درجه و برای دو حالت مسلح شده و مسلح نشده نشان می دهد. قابل توجه ظرفیت باربری در هر دو نوع تحلیل حد بالا و حد پایین شده است. همچنین این نمودارها نشان می دهد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، ظرفیت باربری به شدت افزایش پیدا می کند. لازم به ذکر است که ظرفیت باربری پی بر روی شیب با زاویه ۱۰ درجه اندکی بیشتر از ظرفیت باربری پی بر روی شیب با زاویه ۲۰ درجه است که چنین انتظاری نیز وجود داشت.

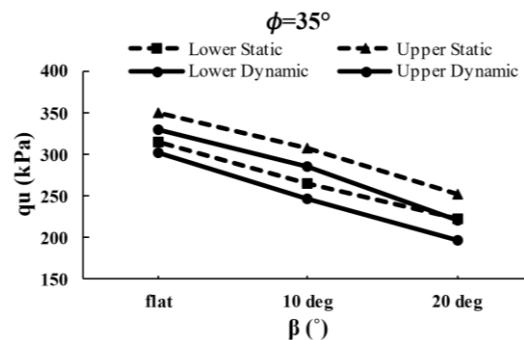


شکل ۱۱- تغییرات حد بالا و پایین ظرفیت باربری استاتیکی پی در حالت  $X/B=5$  و  $L/B=6$  به ازای زوایای اصطکاک داخلی خاک برای زمین شیب دار با زاویه شیب، (الف) ۱۰ و (ب) ۲۰ درجه

که نرم افزاری بر پایه روش تحلیل حدی است، پرداخته شد. نتایج نشان می دهد:

(الف) با اعمال بار لرزه ای با ضریب زلزله افقی  $k_{II}=0/1$  به زمین شیب دار مسلح شده با ژئوگرید، ظرفیت باربری لرزه ای براساس نتایج مرز بالا و پایین بین ۲ تا ۱۲ درصد کاهش پیدا می کند.

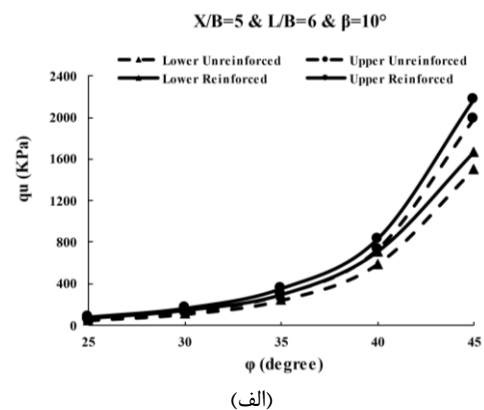
درجه سبب افزایش ۱۸٪ ظرفیت باربری و همچنین کاهش زاویه از ۱۰ به صفر درجه (زمین مسطح) باعث افزایش ۱۲٪ در ظرفیت باربری گردید. همانطور که در تصویر نیز مشخص است، ظرفیت باربری لرزه ای نسبت به استاتیکی کمتر می باشد.



شکل ۱۰- تغییرات ظرفیت باربری برای زاویه شیب ۱۰ و ۲۰ درجه و زمین مسطح

### ۳-۴- تأثیر وجود مسلح کننده

واضح است که استفاده از مسلح کننده بر ظرفیت باربری پی به شدت اثرگذار است و در این تحقیق سعی شده است بر تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری



### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه ای پی های واقع در مجاورت شیب شامل فاصله از لبه شیب، طول ژئوگرید و زاویه اصطکاک داخلی خاک توسط نرم افزار OptumG2،



حداقل ۵B و بیشتر از آن محاسبه گردید. در صورت افزایش زاویه شیب به ۲۰ درجه، به دلیل ایجاد گسیختگی عمیق از فواصل دورتر برای خاک با زوایای اصطکاک داخلی بالا، فاصله ایمن از لبه پی برای زوایای اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه بیشتر از ۵B محاسبه گردید.

(ث) با افزایش زاویه شیب وضعیت پی بحرانی‌تر و شرایط ناپایدارتر گشته و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. در حالت استاتیکی با افزایش شیب از صفر (حالت مسطح) به ۱۰ درجه و از ۱۰ به ۲۰ درجه ظرفیت باربری به ترتیب ۱۲٪ و ۱۸٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر این در حالت دینامیکی هنگامی که شیب از صفر به ۱۰ درجه و از ۱۰ به ۲۰ درجه افزایش می‌یابد، ظرفیت باربری به ترتیب ۱۳٪ و ۲۲٪ کاهش پیدا می‌کند.

(ج) فاصله امن پی از لبه شیب در شرایط لرزه‌ای با استاتیکی تفاوت چندانی ندارد و دلیل آن اثرگذار بودن سایر پارامترها همچون زاویه اصطکاک داخلی خاک و زاویه شیب بر آن است.

میزان کاهش علاوه بر انتخاب نوع کران (مرز بالا یا مرز پایین)، به عواملی همچون شیب زمین، زاویه اصطکاک داخلی خاک، فاصله پی از لبه شیب و طول ژئوگرید وابسته است.

(ب) طول مؤثر ژئوگرید به زاویه اصطکاک داخلی خاک وابسته است به طوری که در تحلیل حاضر برای زوایای اصطکاک داخلی بین ۲۵ تا ۳۵ درجه حدود ۲B (عرض پی) و برای زوایای اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه حدود ۳B برآورد گردید.

(پ) فاصله امن از لبه شیب (X/B) به شدت به زاویه اصطکاک داخلی خاک وابسته است و تأثیر آن بر این مقدار به مراتب بیشتر از خود زاویه شیب است.

(ت) نتایج تحلیل نشان می‌دهد که برای شیب با زاویه ۱۰ درجه، فاصله امن پی از لبه شیب برای زوایای اصطکاک داخلی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ به ترتیب برابر با ۲B، ۲B، ۳B و ۴B است. برای زاویه اصطکاک داخلی ۴۵ درجه این مقدار

## References

- [1] Kusakabe O, Kimura T, Yamaguchi H. Bearing capacity of slopes under strip loads on the top surfaces. *Soils and foundations*. 1981 Dec 15; 21(4): 29-40. doi: 10.3208/sandf1972.21.4\_29
- [2] Askari F, Farzaneh O. Upper-bound solution for seismic bearing capacity of shallow foundations near slopes. *Geotechnique*. 2003 Oct; 53(8): 697-702. doi: 10.1680/geot.2003.53.8.697
- [3] Michalowski R. An estimate of the influence of soil weight on bearing capacity using limit analysis. *Soils and foundations*. 1997 Dec 15; 37(4): 57-64. doi: 10.3208/sandf.37.4\_57
- [4] Choudhury D, Subba Rao KS. Seismic bearing capacity of shallow strip footings embedded in slope. *International Journal of Geomechanics*. 2006 May; 6(3): 176-184. doi: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:3(176)
- [5] Cui X, Zhou X. Limit Analysis of stability of geosynthetics reinforced road embankment. In *Slope Stability and Earth Retaining Walls*. 2011; 180-187. doi: 10.1061/47627(406)24
- [6] El Sawwaf MA, Nazir AK. Cyclic settlement behavior of strip footings resting on reinforced layered sand slope. *Journal of Advanced research*. 2012 Oct 1; 3(4): 315-324. doi: 10.1016/j.jare.2011.10.002
- [7] Chakraborty D, Mahesh Y. Seismic bearing capacity factors for strip footings on an embankment by using lower-bound limit analysis. *International Journal of Geomechanics*. 2016 Jun 1; 16(3): 06015008. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000553
- [8] Halder K, Chakraborty D. Bearing capacity of strip footing placed on the reinforced soil slope. *International Journal of Geomechanics*. 2018 Nov 1; 18(11): 06018025. doi: 10.1680/jgein.19.00032
- [9] Hosseini M, Ghanbari A. Numerical analysis of the bearing capacity of the foundation in the vicinity of the slope. The first engineering opportunities and challenges conference of Alborz province. Karaj, Iran. 2017. [In Persian]

- [10] Keshavarz A, Beygi M, Vali R. Undrained seismic bearing capacity of strip footing placed on homogeneous and heterogeneous soil slopes by finite element limit analysis. *Computers and Geotechnics*. 2019 Sep 1; 113: 103094. doi: **10.1016/j.compgeo.2019.103094**
- [11] Zhang R, Xiao Y, Zhao M, Jiang J. Seismic bearing capacity of strip footings placed near  $c-\phi$  soil slopes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020 Sep 1; 136: 106221. doi: **10.1016/j.soildyn.2020.106221**
- [12] Ramazan Borujerdi A, Jiryaei Sharahi M. Seismic bearing capacity of strip footings adjacent to slopes using pseudo dynamic approach. *Mathematics and Computational Sciences*. 2021 Jan 1; 2(1): 17-41. doi: **10.30511/mcs.2021.137964.1009**
- [13] Rezai Soufi G, Jamshidi Chenari R, Bathurst RJ. Seismic bearing capacity of geosynthetic reinforced strip footings using upper bound limit analysis. *International Journal of Geomechanics*. 2022 Mar 1; 22(3):04021300. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002292**
- [14] Yaghoobi B, Fathipour H, Payan M, Jamshidi Chenari R. Bearing capacity of footings on geosynthetic-reinforced soils under combined loading. *Geosynthetics International*. 2023 Jun 19: 1-29. doi: **10.1680/jgein.22.00385**
- [15] Chen WF, editor. *Limit analysis and soil plasticity*. Elsevier; 2013 Jul 10.
- [16] Chen HF, Liu YH, Cen ZZ, Xu BY. On the solution of limit load and reference stress of 3-D structures under multi-loading systems. *Engineering structures*. 1999 Jun 1; 21(6): 530-537. doi: **10.1016/S0141-0296(98)00001-7**
- [17] Ghaffari SA, Sattari E, Hamidi A, Tavakoli Mehrjardi G, Farshi Homayoun Rooz A. Experimental study on bearing capacity of shell strip footings near geotextile-reinforced earth slopes. *Journal of Central South University*. 2021; 28(8): 2527-2543. doi: **10.1007/s11771-021-4784-9**
- [18] Kumar P, Chakraborty M. Seismic bearing capacity of rough strip footing placed over geogrid-reinforced two-layer sands. *International Journal of Geomechanics*. 2020 Oct 1; 20(10): 06020029. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001824**
- [19] Abdi MR, Ghalandarzadeh A, Shafiei-Chafi L. Optimization of lime and fiber content for improvement of clays with different plasticity using response surface method (RSM). *Transportation Geotechnics*. 2022 Jan 1; 32: 100685. doi: **10.1016/j.trgeo.2021.100685**
- [20] Imani Varzkhani M. Analysis of the dynamic bearing capacity of the foundation in the vicinity of the slope. Master's Thesis, Kharazmi University, Iran. 2012. [In Persian]