

EXTENDED ABSTRACT

Study of Scale Effect on the Ultimate Bearing Capacity of Slopes Containing Inclined Weak Layer Influenced by Strip Footings on Top

Kourosh Pourmohammadi ^a, Ahad Bagherzadeh Khalkhali ^{b,*}, Rouzbeh Dabiri ^c, Mehdi Mahdavi Adeli ^d

^a Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

^c Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^d Assistant Professor, Department of Civil Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 31 August 2025; **Reviewed:** 18 January 2026; **Accepted:** 05 September 2026

Keywords:

Scale effect, Ultimate bearing capacity, Sloping layered soil, Physical modeling, Numerical modeling.

1. Introduction

The bearing capacity of slopes, particularly when subjected to surface surcharges, is a long-standing and complex issue in geotechnical engineering. Numerous theoretical and empirical studies have been conducted on this topic. However, a review of available literature indicates that most of these studies have focused on the bearing capacity of homogeneous, primarily sand slopes, or slopes with horizontal layered soils, with or without reinforcement. In practice, it may be necessary to construct structures on sloping ground with inclined layered soils, which present greater challenges and concerns in evaluating bearing capacity compared to the previously mentioned scenarios. Therefore, this study experimentally and numerically investigates the role of the thickness and position of an inclined weak layer on the bearing capacity of clay slopes supporting strip footings. This investigation was conducted for three slope angles: 30, 45 and 60 degrees. Assuming a fixed footing position at the edge of the inclined weak layer, the slope angle, along with the thickness and position of the layer (at the face or inside the slope), were considered as the main variables.

2. Methodology

This research employed a dual approach, including both small-scale laboratory and numerical modeling. Given that the soil-footing layer system was studied under plane strain conditions, two types of soils with different geotechnical properties were selected. For the strong soil, low-plasticity clay (CL) was used, and for the weak soil layer, silty sand (SM) was utilized, based on the Unified Classification System.

2.1. Experimental study

The strip footing model was a rigid aluminum piece with a smooth base, measuring 59.8cm in length, 5cm in width, and 5cm in thickness. The footing's length was intentionally made 2mm smaller than the chamber's width to facilitate placement and prevent interference between the footing edges and the chamber walls during the test. The top surface of the footing was covered with a rigid steel strip to increase its stiffness and prevent

indentation from the applied load. A small, cup-like hollow was also created in the middle of the footing's top surface to allow a steel ball to move freely, enabling free rotation between the loading rod and the footing.

To prepare the soil samples, after mixing the clay with water to ensure uniform moisture distribution, the samples were placed in sealed, thick nylon bags at their optimum moisture content and stored in a cool lab for 24 hours before use. The sandy samples were prepared on the same day of the test and stored in a cool environment until construction to prevent moisture loss. To achieve plane strain conditions and avoid boundary effects, the clear internal dimensions of the test chamber were 150×60×50cm. the shatterproof glass wall of the chamber was marked with a grid of 5cm blocks to control the layer thickness. The wet weight of each block of soil was calculated based on the unit weight and desired relative density, precisely weighed, transferred to the chamber, and compacted. This process was repeated for up to 5 layers, reaching a thickness of 25 cm (five times the footing width). The entire compacted soil mass was then cut to desired slope angle using a thin, sharp-edged steel blade. After the footing was placed, the measurement system, including a force gauge and displacement transducer, was installed, and loading was applied at a rate of 1mm/min until failure (Fig. 1).

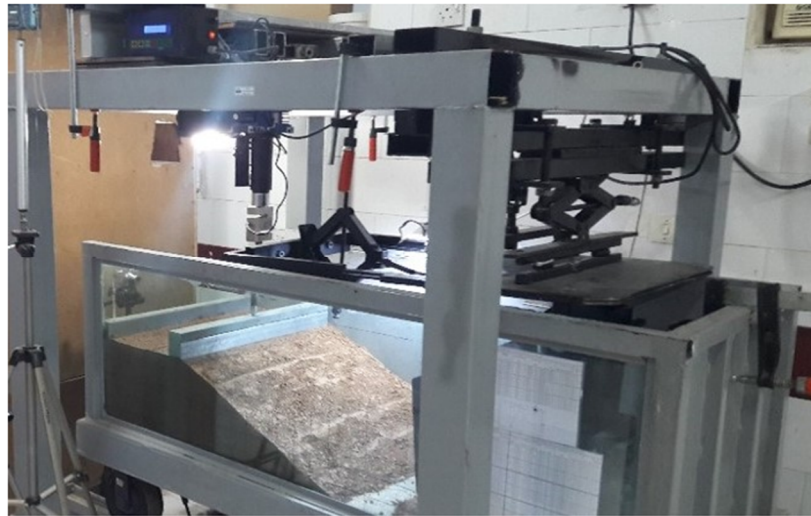


Fig. 1. Installation of the footing model, measuring gauges, and load application shaft on the model slope

2.2. Numerical modeling

For the evaluation of the results, numerical modeling was performed using version 7 of the finite software Flac 2D. the geometric dimensions of these models were set to be 30 times larger than the laboratory models. It's worth noting that the Flac software cannot directly calculate bearing capacity. Therefore, by gradually applying and increasing the stress under the footing, the corresponding displacement values were determined. After plotting the stress-displacement curve, the ultimate bearing capacity was determined by using the method of intersecting tangent lines from the initial and final parts of the curve (Fig. 2).

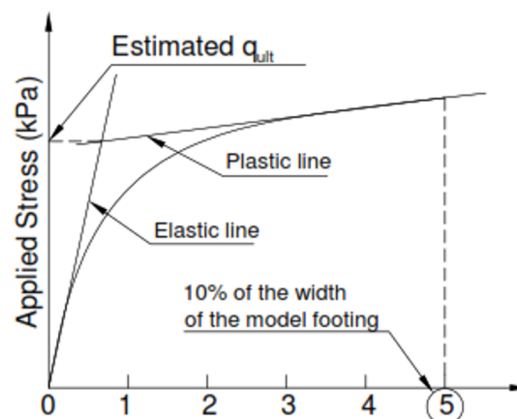


Fig. 2. Intersection of tangents method for determining ultimate bearing capacity

3. Results and discussion

In this study, the scale effect on the ultimate bearing capacity of clay slopes containing an inclined weak layer subjected to strip footing loading was investigated through 21 small-scale physical model tests and the corresponding full-scale numerical simulations performed using FLAC 2D. In this context, the effects of slope angle, weak-layer thickness, and weak-layer location (at the slope face or embedded within the slope) on the bearing-capacity behavior of the slopes were evaluated. The main findings of this study are summarized as follows:

- 1) Unsaturated soils in small-scale physical models exhibit higher shear strength than their full-scale counterparts due to the presence of matric suction. However, as the model dimensions and the corresponding stress levels increase, the influence of matric suction decreases substantially and, in many cases, becomes negligible.
- 2) The use of small-scale physical models without accounting for scale effects and proper calibration of the geomechanical parameters, particularly cohesion, may lead to a significant overestimation of the ultimate bearing capacity. Therefore, incorporating scale effects is essential for the reliable extrapolation of laboratory findings to field-scale conditions.
- 3) For full-scale models, the operational cohesion required to achieve consistency between the numerical predictions and the experimental results was found to be dependent on the slope inclination, increasing as the slope angle increased. This finding highlights the coupled influence of slope geometry and the prevailing stress conditions on the effective strength parameters.
- 4) In all cases considered, decreasing the slope angle led to an increase in the ultimate bearing capacity. Likewise, increasing the setback distance of the strip footing from the slope crest enhanced the bearing capacity up to a critical distance, beyond which further increases in setback produced little or no additional improvement. For slopes containing a weak layer, this critical distance was found to depend on both the position and the inclination of the weak layer.
- 5) A comparison between the two weak-layer configurations revealed that slopes containing an embedded weak layer exhibited a considerably higher ultimate bearing capacity than those with a weak layer located at the slope face. This behavior is attributed to the confining effect provided by the overlying competent soil layer, which enhances the stability of the embedded weak layer.
- 6) In the design of strip footings on layered slopes, relying solely on conventional bearing-capacity equations or on the results of small-scale physical models without explicitly accounting for scale effects and unsaturated soil conditions may lead to inaccurate predictions of bearing capacity and, consequently, unreliable assessments of structural safety.

مطالعه اثر مقیاس بر ظرفیت باربری نهایی شیب‌های حاوی لایه ضعیف مایل تحت اثر پی‌های نواری مستقر در بالای آن‌ها

کوروش پورمحمدی¹، احد باقرزاده خلخالی^{2*}، روزبه دبیری³، مهدی مهدوی عادل⁴

¹ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

² استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

³ دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

⁴ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

دریافت: 1404/6/9، بازنگری: 1404/10/28، پذیرش: 1405/6/14، نشر آنلاین: 1405/6/14

چکیده

ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری واقع در بالای شیب‌ها، به‌ویژه در توده‌های خاکی حاوی لایه ضعیف مایل، از مسائل مهم و پیچیده مهندسی ژئوتکنیک است. از آنجا که تمرکز اغلب روش‌های تجربی و تحلیلی در دسترس به بررسی رفتار شیب‌های همگن و یکنواخت عمدتاً ماسه‌ای و یا شیب‌های حاوی خاک‌های لایه‌ای افقی با و یا بدون عناصر مسلح کننده معطوف گردیده است. در این پژوهش، اثر مقیاس و موقعیت و ضخامت لایه ضعیف مایل بر ظرفیت باربری این نوع شیب‌ها، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی بررسی شد. بدین منظور، 21 آزمایش مدل کوچک‌مقیاس بر روی شیب‌هایی با زوایای 30، 45 و 60 درجه انجام و سپس مدل‌های متناظر در مقیاس واقعی با نرم‌افزار FLAC2D شبیه‌سازی و کالیبره شدند. متغیرهای اصلی شامل زاویه شیب، ضخامت لایه ضعیف و محل قرارگیری آن (در پیشانی یا داخل شیب) در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد که در مدل‌های کوچک‌مقیاس، مکش بافتی ناشی از غیراشباع بودن خاک موجب افزایش مقاومت برشی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری می‌شود، درحالی‌که این اثر در مقیاس واقعی به دلیل افزایش تنش‌های مؤثر به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که بی‌توجهی به اثر مقیاس و عدم کالیبراسیون پارامترهای ژئومکانیکی، می‌تواند به برآورد نادرست ظرفیت باربری منجر شود. علاوه بر این، ظرفیت باربری نهایی با کاهش زاویه شیب و افزایش فاصله لبه پی از تاج شیب افزایش یافته و در شرایط مشابه، شیب‌های دارای لایه ضعیف داخلی ظرفیت باربری بیشتری نسبت به شیب‌های دارای لایه ضعیف در پیشانی از خود نشان دادند. نتایج این پژوهش بر ضرورت لحاظ کردن اثر مقیاس و شرایط غیراشباع در تحلیل و طراحی پی‌های نواری احداث شده بر شیب‌های لایه‌ای تأکید دارد.

کلیدواژه‌ها: اثر مقیاس، ظرفیت باربری نهایی، خاک لایه‌ای شیب‌دار، مدل‌سازی آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی.

1- مقدمه

در پروژه‌های عمرانی نظیر پایه پل‌ها و دکل‌های انتقال نیرو در مناطق کوهستانی، استقرار پی بر روی شیب‌های طبیعی یا خاکریزهای شیب‌دار امری اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو برآورد دقیق ظرفیت باربری این نوع پی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در دهه‌های اخیر، پژوهشگران متعددی با استفاده از روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی و بررسی رفتار پی‌های نواری مستقر بر روی شیب‌ها پرداخته‌اند، اما بخش عمده

تحلیل ظرفیت باربری پی‌های سطحی مستقر بر روی شیب‌ها همواره یکی از موضوعات مهم و چالش‌برانگیز در مهندسی ژئوتکنیک بوده است، زیرا علاوه بر ویژگی‌های مقاومتی خاک، عواملی نظیر زاویه شیب، هندسه پی، فاصله پی از تاج شیب، شرایط لایه‌بندی و وجود ناپوستگی‌های داخلی می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر رفتار باربری و مکانیزم گسیختگی تأثیر بگذارند.



این مطالعات بر شیب‌های همگن، شیب‌های ماسه‌ای، خاک‌های دولایه افقی یا شیب‌های مسلح متمرکز بوده است و اثر عواملی نظیر زاویه شیب، فاصله پی از تاج شیب، عمق استقرار پی و استفاده از عناصر مسلح‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفته است. باوجود ارزشمند بودن این مطالعات، شرایط واقعی بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی با فرض همگن بودن خاک مطابقت ندارد و در بسیاری از مناطق، توده‌های خاکی دارای لایه‌های مایل با مقاومت متفاوت هستند که می‌توانند رفتار مکانیکی شیب را به‌طور اساسی تغییر دهند. از سوی دیگر، استفاده از مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس یکی از روش‌های متداول برای مطالعه رفتار مسائل ژئوتکنیکی است. با این حال، خاک‌های غیراشباع در مقیاس کوچک به‌دلیل وجود مکش بافتی، مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های واقعی از خود نشان می‌دهند. درنتیجه، عدم توجه به اثر مقیاس و کالیبراسیون مناسب پارامترهای ژئومکانیکی، می‌تواند موجب اختلاف قابل توجه میان نتایج آزمایشگاهی و رفتار واقعی شود. این موضوع به‌ویژه در تحلیل شیب‌های لایه‌ای دارای لایه ضعیف مایل اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا اثر هم‌زمان موقعیت لایه ضعیف، زاویه شیب و مکش بافتی می‌تواند مکانیزم گسیختگی و ظرفیت باربری را تحت تأثیر قرار دهد.

El Sawwaf (2007) با بررسی ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر روی لایه ماسه‌ای مسلح جایگزین شده بر روی شیب رسی نرم و ارائه نتایج آزمایش‌ها نشان داد که کارگذاری لایه‌های ژئوگرید باعث ارتقای قابل ملاحظه عملکرد پی و کاهش ضخامت لایه ماسه مسلح مورد نیاز برای حصول نشست مجاز خواهد گردید. Choudhary و همکاران (2010) در تحقیقی آزمایشگاهی به بررسی ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب حاوی خاکستر آتشفشانی مسلح پرداخته و گزارش نمودند که رفتار فشار-نشست و ظرفیت باربری پی با وجود لایه‌های مسلح‌کننده ارتقا می‌یابد. Keskin و Laman (2012) با انجام تحقیقی آزمایشگاهی به بررسی اثر فاصله پی از تاج شیب، زاویه شیب، دانسیته نسبی ماسه و عرض پی بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری مستقر بر شیب‌های ماسه‌ای پرداخته و با انجام مجموعه‌ای از تحلیل‌های المان محدود بر روی شیب‌های تمام مقیاس (با ابعاد واقعی)، سازگاری و توافق قابل قبولی میان نتایج گزارش نموده‌اند.

Chakraborty و Kumar (2013) با تحلیل المان محدود مرز پایین و بهینه‌سازی غیرخطی، تغییرات ضرایب ظرفیت باربری پی نواری در دو حالت با کف زبر و صاف را بر اساس تغییرات زاویه شیب برای خاک‌های با زاویه اصطکاک متفاوت محاسبه و گزارش نموده‌اند که ضرایب ظرفیت باربری برای پی زبر در مقایسه با پی با کف صاف به میزان قابل توجهی بالاتر می‌باشند. با این حال، این ضرایب در هر دو حالت با افزایش شیب زمین به‌طور گسترده‌ای کاهش می‌یابند.

Crusoe Jr و همکاران (2016) در پژوهشی مبتنی بر تحلیل عددی به بررسی ارتباط دو پارامتر کلیدی زاویه و ضخامت لایه ضعیف بر مکانیسم پایداری شیب‌های سنگی پرداخته و با مقایسه مدهای گسیختگی و ضرایب اطمینان حاصله اعلام نموده‌اند که این دو پارامتر اثرگذاری قابل ملاحظه‌ای بر پایداری شیب‌ها خواهند داشت.

Dhatrak و Gandhi (2016) با انجام مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، به بررسی مقاومت و پایداری شیب‌های احداث شده با خاکستر بادی غیرمسلح و مسلح شده با ژئوگرید پرداخته و گزارش نموده‌اند که ظرفیت باربری پی مستقر در پیشانی شیب کمتر از پی مستقر در بالای شیب می‌باشد. همچنین افزایش فاصله لبه پی از تاج شیب تا محدوده‌ای معادل عرض پی باعث افزایش قابل ملاحظه ظرفیت باربری خواهد شد.

Pusadkar و Mankar (2016) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Plaxis 2D به تجزیه و تحلیل رفتار پی نواری واقع بر روی شیب، با و بدون شمع مایل پرداخته و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی شامل موقعیت شمع نسبت به تاج شیب، زاویه و طول شمع و عرض بار، اعلام نموده‌اند که کارگذاری شمع در درون شیب به‌طور مکانیکی باعث افزایش مقاومت شیب در امتداد سطح لغزش گردیده و اثر قابل ملاحظه‌ای در ارتقای ظرفیت باربری و ضریب اطمینان شیب ایفا می‌کند.

Mansouri و Abbeche (2019) با انجام مدل‌سازی کوچک مقیاس پی مربعی نزدیک شیب ماسه‌ای به بررسی ظرفیت باربری پی تحت اثر بارگذاری خارج از مرکز پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌های این محققین مبین آن است که ظرفیت باربری نهایی با افزایش خروج از مرکزیت بار نسبت به مرکز پی، کاهش و با افزایش فاصله پی از تاج شیب افزایش می‌یابد.

Debnath (2021) در پژوهشی مبتنی بر روش تعادل محدود و رویکرد شبه استاتیکی به ارزیابی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های سطحی نزدیک شیب پرداخته و یک مکانیسم گسیختگی خطی برای تعیین ضرایب ظرفیت باربری شبه‌استاتیکی این گونه پی‌ها پیشنهاد نمود.

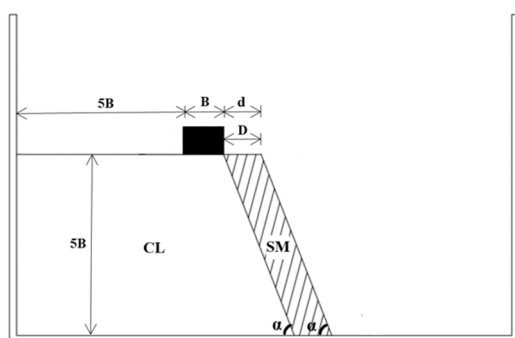
Kadhm Salman و همکاران (2022) با انجام مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی به ارزیابی ضریب ظرفیت باربری (Nc) پی نزدیک شیب خاکی رسی با و بدون ژئوگرید پرداخته و تعدادی نمودار طراحی مرتبط با تأثیر موقعیت و تعداد ورق‌های ژئوگرید بر ضریب مورد نظر ارائه نموده‌اند.

Taher و همکاران (2022) با انجام بررسی عددی مبتنی بر روش تحلیل اجزا محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار Plaxis 2D به ارزیابی اثرات زاویه و ارتفاع شیب بر روی پایداری شیب ماسه‌ای تحت اثر سربار پرداخته و بیان نمودند که افزایش زاویه و ارتفاع شیب و سربار بالای آن به کاهش ضریب اطمینان منجر می‌گردند.

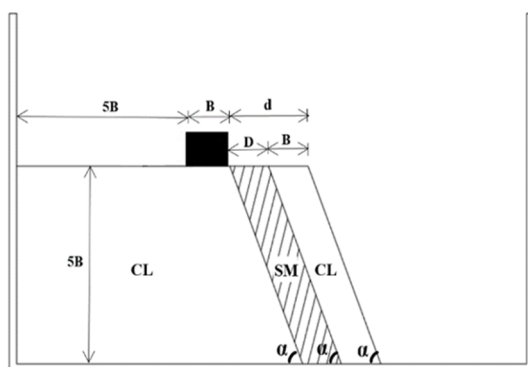
فیزیکی کوچک مقیاس با مدل سازی عددی در مقیاس واقعی همراه با کالیبراسیون پارامترهای مقاومتی، تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر مقیاس بر ظرفیت باربری نهایی شیب های رسی دارای لایه ضعیف مایل تحت اثر پی نواری است. بدین منظور، 21 آزمایش مدل کوچک مقیاس بر روی شیب هایی با زوایای 30، 45 و 60 درجه انجام و پس از آن نمونه های متناظر در ابعاد واقعی با استفاده از نرم افزار FLAC2D مدل سازی و کالیبره شدند. در این تحقیق، زاویه شیب، ضخامت لایه ضعیف و محل قرارگیری آن (در پیشانی یا داخل شیب) به عنوان متغیرهای اصلی مورد بررسی قرار گرفتند تا ضمن ارزیابی اثر مقیاس، نقش هر یک از این پارامترها در تغییر ظرفیت باربری نهایی و مکانیزم گسیختگی مشخص شود.

2- مواد و روش ها

در این تحقیق با فرض موقعیت ثابت استقرار پی در لبه لایه ضعیف مایل، زاویه شیب به همراه ضخامت و موقعیت استقرار لایه مذکور در پیشانی یا داخل شیب به عنوان متغیرهای مورد نظر در نظر گرفته شده و در این شرایط ظرفیت باربری شیب های رسی حاوی لایه ضعیف مایل مورد ارزیابی و بررسی قرار داده شده اند. تصاویر شماتیک مدل ها و شرایط متغیرهای مورد نظر به ترتیب در شکل های (1) و (2) و جداول (1) و (2) ارائه شده اند.



شکل 1- مدل شماتیک شیب حاوی لایه ضعیف در پیشانی



شکل 2- مدل شماتیک شیب حاوی لایه ضعیف داخلی

Luo و همکاران (2023) با انجام مجموعه ای از آزمایش های مدل کوچک مقیاس و در نظر گرفتن اثرات فاصله پی از تاج شیب، ارتفاع و زاویه شیب و نیز تعداد، فاصله و عمق مدفون شدگی لایه های ژئوگرید به بررسی ظرفیت باربری و رفتار تغییر فرمی پی نواری صلب مستقر بر روی شیب های ماسه ای مرجانی (Coral Sand Slopes) پرداخته و بیان نمودند که ظرفیت باربری در شیب های غیرمسلح با افزایش فاصله پی از تاج شیب افزایش یافته و به تدریج به ظرفیت باربری در زمین افقی نزدیک می شود. همچنین کاهش ارتفاع و زاویه شیب نیز باعث افزایش و بهبود ظرفیت باربری می گردند. علاوه بر آن تسلیح با ژئوگرید باعث افزایش قابل ملاحظه ظرفیت باربری خواهد شد که این موضوع به تعداد، عمق مدفون شدگی و فاصله میان مسلح کننده ها بستگی دارد.

Kianpour و همکاران (2024) با ترکیبی از تحلیل های آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار پی های نواری مستقر در بالای شیب های ماسه ای در دو حالت همگن و حاوی لایه ضعیف پرداخته و گزارش نموده اند که وجود لایه ضعیف به طور قابل ملاحظه ای ظرفیت باربری و سختی سیستم خاک- پی را کاهش می دهد.

Pourmohammadi و همکاران (2025) با مطالعه ای آزمایشگاهی و عددی به بررسی ظرفیت باربری پی های نواری مستقر در بالای شیب های رسی همگن و حاوی لایه ضعیف مایل با ضخامت ثابت در دو حالت استقرار در پیشانی و داخل شیب پرداخته و گزارش نموده اند که در کلیه حالت ها ظرفیت باربری نهایی با کاهش زاویه شیب و افزایش فاصله پی از تاج شیب افزایش نشان می دهد، که البته با افزایش فاصله پس از حدود 4 تا 6 برابر عرض پی ظرفیت باربری ثابت مانده و برابر مقدار متناظر در زمین های صاف و مسطح می گردد. از منظر مقایسه با شیب های همگن نیز، ظرفیت باربری نهایی در شیب های حاوی لایه ضعیف در پیشانی در زوایای 30، 45 و 60 درجه به ترتیب حدود 8، 20 و 31 درصد و در شیب های حاوی لایه ضعیف داخلی به ترتیب در حدود 10، 19 و 28 درصد کاهش نشان داده اند.

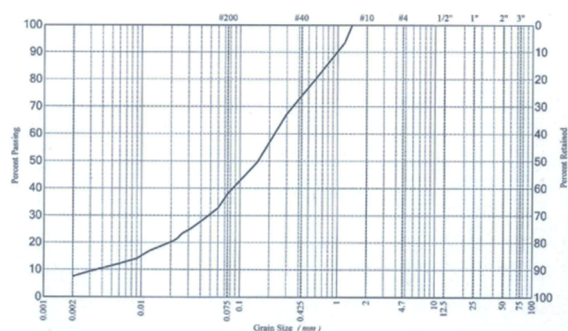
مرور منابع علمی نشان می دهد که اگرچه مطالعات متعددی درباره ظرفیت باربری پی های واقع بر شیب انجام شده است، اما عمده تمرکز مطالعات و پژوهش های محققان بر ارزیابی ظرفیت باربری شیب های همگن عمدتاً ماسه ای و یا شیب های حاوی خاک های لایه ای افقی همراه با و یا بدون مسلح کننده معطوف بوده (El Sawwaf و همکاران، 2021؛ Tian و همکاران، 2022؛ Mazouz و همکاران، 2022؛ Ray و همکاران، 2023؛ Susanti و همکاران، 2023) معطوف بوده و پژوهش های اندکی به بررسی اثر مقیاس، ضخامت و موقعیت لایه ضعیف مایل در شیب های رسی غیراشباع پرداخته اند. همچنین، مقایسه مستقیم نتایج مدل سازی

جدول 3- مشخصات خاک قوی

مقدار	خصوصیت
34/2	حد روانی (%)
11/6	حد خمیری (%)
22/6	شاخص خمیری (%)
17/8	رطوبت بهینه (%)
1/183	وزن مخصوص خشک خاک در طی آزمایش g/cm^3
0/67	چسبندگی سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده kg/cm^2
13/1	زاویه اصطکاک داخلی سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (deg)
0/07	چسبندگی تک محوری (kg/cm^2)

جدول 4- مشخصات خاک ضعیف

مقدار	خصوصیت
-	حد روانی (%)
-	حد خمیری (%)
-	شاخص خمیری (%)
13/6	رطوبت بهینه (%)
1/176	وزن مخصوص خشک خاک در طی آزمایش g/cm^3
0/11	چسبندگی کل (برش مستقیم) kg/cm^2
22/2	زاویه اصطکاک داخلی (برش مستقیم) (deg)



شکل 4- دانه بندی خاک ضعیف

2-2- تهیه نمونه های خاک

برای تهیه نمونه های خاک مرطوب مورد نیاز پس از اختلاط خاک و آب برای اطمینان از توزیع یکنواخت رطوبت در خاک های رسی، نمونه ها پس از اختلاط با درصد رطوبت بهینه، درون کیسه های نایلونی ضخیم در بسته قرار داده شده و به مدت 24 ساعت در فضای خنک آزمایشگاه نگهداری شده و پس از آن مورد استفاده قرار گرفته اند، ولی نمونه های ماسه ای در همان روز انجام آزمایش از اختلاط خاک با درصد رطوبت بهینه تهیه گردیده و به منظور جلوگیری از اتلاف رطوبت، تا زمان استفاده در ساخت

جدول 1- متغیرهای پیش بینی شده در شیب حاوی لایه ضعیف

در پیشانی		
α (deg)	D	d
30	B	B
45	2B	2B
	3B	3B
60	4B	4B

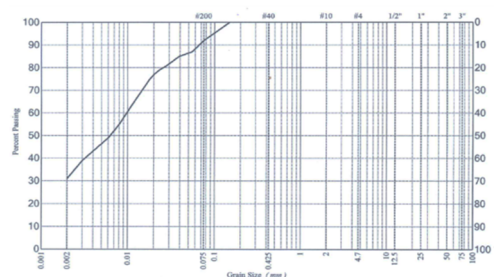
جدول 2- مقادیر متغیرهای پیش بینی شده در شیب حاوی لایه ضعیف داخلی

d	D	α (deg.)
2B	B	30
3B	2B	45
4B	3B	60

1-2- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق سیستم خاک لایه ای- پی نواری در شرایط کرنش مسطح مدل شده و خاک های مورد نظر با دو مشخصات ژئوتکنیکی متفاوت انتخاب گردیده اند. برای خاک قوی از خاک رس با خاصیت خمیری پایین که طبق طبقه بندی متحد (Unified) از نوع (CL) می باشد استفاده گردیده و برای لایه خاک ضعیف نیز طبق طبقه بندی متحد از ماسه لای دار (SM) بهره گرفته شده است که منحنی دانه بندی و مشخصات آن ها به ترتیب در شکل ها و جدول های (3) و (4) ارائه شده اند.

برای مدل پی نواری نیز با بهره گیری از قوانین تبدیل مقیاس، از قطعه ای آلومینیومی سخت با کفی صاف، طولی برابر 59/8 سانتی متر (2 میلی متر کوچک تر از عرض محفظه خاک) و عرض و ضخامت 5 سانتی متر برخوردار بوده بهره گیری شده است. اختلاف 2 میلی متری طول مدل پی و عرض محفظه خاک به منظور سهولت کارگذاری و جلوگیری از درگیری میان لبه های پی مدل و جداره محفظه در حین آزمایش در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که به منظور افزایش سختی و جلوگیری از لهیدگی محل اعمال بار انتقالی از جک بارگذاری، سطح رویی قطعه آلومینیومی با تسمه فولادی سخت روکش شده و در قسمت میانی سطح بالایی تسمه حفره ای کوچک و کاسه مانند تعبیه گردیده تا امکان کارگذاری ساچمه سخت و صیقلی فولادی برای حرکت و دوران آزادانه میان میله بارگذاری و پی فراهم شود.

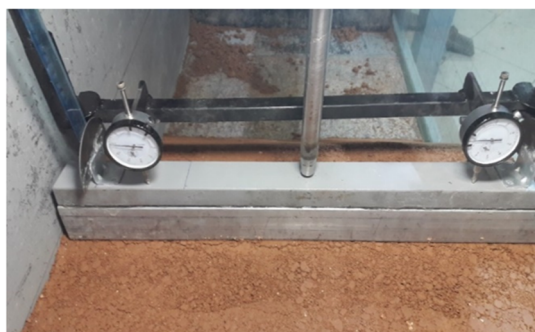


شکل 3- دانه بندی خاک قوی

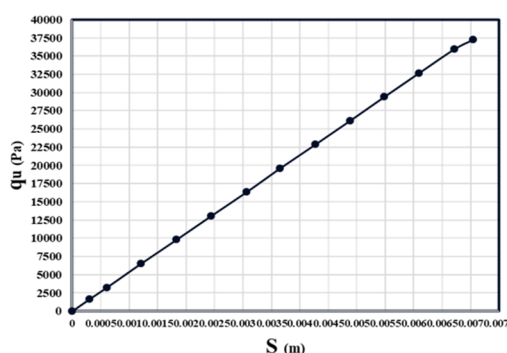
معادل پنج برابر عرض پی (25cm) تکرار گردیده و پس از آن کل خاک درون محفظه با استفاده از تیغه فولادی سخت نازک و لبه تیز، تحت زاویه مورد نظر برش داده شده است (شکل (6)). در ادامه، پس از استقرار پی مدل در موقعیت مورد نظر و کارگذاری سیستم اندازه‌گیری و تجهیزات بارگذاری بر روی پی مدل (شکل (7))، ضمن اندازه‌گیری و ثبت نیرو و جابه‌جایی، بارگذاری با نرخ تعیین شده (1mm/min) تا مرحله گسیختگی اعمال شده است که نمونه منحنی تنش-جابه‌جایی شیب 45 درجه حاوی لایه ضعیف میانی در شکل (8) ارائه شده است.



شکل 6- برش شیب‌دار لایه‌های خاک متراکم شده



شکل 7- جای‌گذاری مدل پی، گجج‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی و شفت اعمال نیرو



شکل 8- نمونه منحنی جابه‌جایی- تنش زیر پی مدل فیزیکی شیب 45 درجه حاوی لایه ضعیف رویی

مدل در محیط خنک و درون کیسه‌های نایلونی ضخیم در بسته نگهداری شده‌اند.

3-2- مشخصات دستگاه مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس و روند کار در آزمایشگاه

اجزای مختلف دستگاه بارگذاری ابداعی مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس برخوردار از قابلیت برش شیب‌دار خاک که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر طراحی و ساخته شده است (شکل (5)) عبارتند از:

قاب (بدنه اصلی) دستگاه

محفظه آزمایش

میله (شفت) بارگذاری

جابه‌جایی سنج

نیروسنج الکترونیکی

موتور الکتریکی اعمال نیرو

صفحات صلب فولادی برای تراکم لایه‌ها

تیغه فولادی سخت نازک و لبه تیز جهت برش لایه‌ها با شیب مورد نظر



شکل 5- قاب دستگاه و تجهیزات الحاقی

در فرآیند ساخت مدل‌های فیزیکی، به منظور تحقق شرایط کرنش مسطح و دوری از اثرات مرزی جداره‌های محفظه بر نتایج آزمایش‌ها، با بهره‌گیری از قوانین تبدیل مقیاس، ابعاد خالص داخلی محفظه برابر 150cm (طول)، 60cm (عرض) و 50cm (ارتفاع) انتخاب و به منظور کنترل ضخامت لایه‌ها، جداره شیشه‌ای آن به صورت شطرنجی با شبکه‌های 5 سانتی‌متری تقسیم‌بندی گردیده است. در هنگام اجرای هر لایه نیز وزن خاک مرطوب بر اساس وزن واحد حجم خاک و تراکم نسبی مورد نظر تعیین و پس از توزین دقیق و انتقال به محفظه آزمایش، بلافاصله تسطیح و تا حصول تراکم نسبی مورد نظر (کاهش ضخامت لایه تا تراز مورد نظر) متراکم گردیده است. این مراحل در 5 لایه و حصول ضخامتی

3- اثر مقیاس

یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس، کاهش ابعاد مدل نسبت به نمونه واقعی است که می‌تواند باعث بروز تفاوت‌هایی در تنش‌ها، تغییرشکل‌ها و رفتارهای مکانیکی خاک شود. به‌منظور کاهش تبعات این پدیده که اثر مقیاس نامیده می‌شود باید قوانین مشابه‌سازی نظیر مشابهت هندسی، فیزیکی و مکانیکی رعایت شوند. یک مدل فیزیکی در واقع کوچک شده نمونه واقعی به مقیاس مورد نظر است و اگر بر اساس اصول صحیح طراحی و ساخته شود، رفتار آن شباهت زیادی با نمونه واقعی خواهد داشت. البته باید توجه داشت که بنابه دلایلی نظیر اثر مقیاس، رفتار یک مدل فیزیکی به‌طور کامل بر رفتار نمونه واقعی منطبق نبوده و لازم است تفسیر نتایج مدل‌های فیزیکی با توجه به استدلال‌های مهندسی و اثر مقیاس که به معنای تأثیر کوچک کردن نمونه واقعی بر رفتار است انجام شود.

El Sawwaf (2005) ضمن معرفی اختلاف تراز تنش به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تفاوت رفتاری میان مدل‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس در مدل‌سازی‌های تحت شتاب ثقل $1g$ ، پیشنهاد نموده است که استفاده از مدل‌های $1g$ فقط در پیش‌بینی رفتارهای کلی و عمومی نمونه‌های اصلی به‌کار برده شوند. Ozkahrman و Wartman (2007) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی با استفاده از روش نوین مدل‌سازی مدل‌ها و ساخت چند مدل از یک شیب خاکی چسبیده با مقیاس‌ها و اندازه‌های هندسی مختلف به بررسی قوانین تشابه میان مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس در شرایط $1g$ پرداخته و بیان نموده‌اند دست‌یابی به نتایج قابل اعتماد در مدل‌سازی‌های فیزیکی کوچک مقیاس مستلزم رعایت دقیق و هم‌زمان تشابه هندسی (تناسب ابعاد)، تشابه فیزیکی (تطابق وزن واحد حجم و چگالی مصالح) و سازگاری مکانیکی (تناسب پارامترهای مقاومتی نظیر چسبندگی و مدول الاستیسیته) است و حتی انحراف‌های کوچک و عدم تطابق ناخواسته در تشابه‌سازی‌های فیزیکی و مکانیکی که اغلب از محدودیت‌های آزمایشگاهی و یا خصوصیات مصالح نشأت می‌گیرند می‌توانند به بروز اختلافات محسوس و اثرگذاری در نتایج حاصله در مقایسه با نمونه‌های با ابعاد واقعی به‌ویژه در الگوی گسیختگی و نشست منجر شوند. به‌علاوه، این محققین بر بهره‌گیری از تحلیل‌های عددی در کنار مدل‌سازی‌های کوچک مقیاس در شرایط $1g$ برای پشتیبانی و کالیبراسیون نتایج مدل‌سازی فیزیکی، توصیه نموده‌اند.

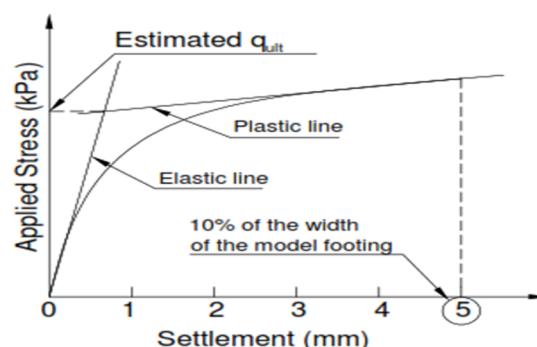
4- کالیبراسیون پارامترهای ژئومکانیکی

در این تحقیق ضمن رعایت اصول مشابه‌سازی، کالیبراسیون پارامترهای ژئومکانیکی خاک‌ها و لحاظ اثر مقیاس در مدل‌سازی‌های فیزیکی، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها با یکدیگر

لازم به‌ذکر است که به‌منظور حصول اطمینان از تحقق تراکم و رطوبت مورد نظر در لایه‌های شیب‌های مدل، با کارگذاری قالب فولادی جدار نازک کوچک دارای حجم معین در مراحل اجرای خاک‌ریزی و تراکم لایه‌ها دربرخی آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی، نسبت به تعیین وزن مخصوص و میزان رطوبت درجای نمونه‌ها اقدام گردیده که نتایج حاصله نشانگر اختلافات ناچیز و قابل قبول بوده است. همچنین به‌منظور کاهش اصطکاک و چسبندگی لایه‌های خاک و جداره محفظه، قبل از انتقال خاک مرطوب و تراکم لایه‌ها، دیواره‌های محفظه با یک لایه بسیار نازک وازلین آغشته گردیده‌اند.

2-4- تحلیل عددی

پس از ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی کوچک مقیاس با مدل‌سازی‌های عددی هم مقیاس کالیبره شده توسط نسخه 7 نرم‌افزار Flac 2D، ارزیابی مدل‌های عددی با ابعاد واقعی به‌عنوان موضوع نهایی تحقیق در دستور کار قرار داده شد. در این مرحله، تحلیل مدل‌ها با کالیبراسیون مجدد و گام به گام پارامترهای ژئومکانیکی به‌دست آمده از آزمایش‌های برش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده و مقاومت فشاری محدود نشده (برای رس غیراشباع دارای رطوبت بهینه به عنوان خاک قوی) و برش مستقیم (برای ماسه غیراشباع دارای رطوبت بهینه به‌عنوان خاک ضعیف) تا حصول توافق و سازگاری مطلوب میان نتایج مدل‌های فیزیکی ادامه داده شد. لازم به‌ذکر است که نرم‌افزار Flac مستقیماً قادر به محاسبه ظرفیت باربری نبوده و به‌همین لحاظ در هر تحلیل با اعمال و افزایش تدریجی تنش زیر پی، مقادیر جابه‌جایی متناظر تعیین گردیده و پس از ترسیم منحنی تنش- جابه‌جایی، مطابق شکل (9) با استفاده از روش تقاطع خطوط مماس دو بخش ابتدایی و انتهایی نمودار، تنش متناظر محل تقاطع خطوط مماس به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی پی تعیین گردیده است (Vanapalli و همکاران، 2007).



شکل 9- روش تقاطع مماس‌ها برای تعیین ظرفیت باربری نهایی (Vanapalli و همکاران، 2007)

مقایسه شده‌اند تا ضمن ارزیابی توافق و سازگاری کلی رفتاری، اختلافات ناشی از اثر مقیاس ارزیابی شوند. از این‌رو در مدل‌سازی فیزیکی ابعاد پلان پی و هندسه شیب‌ها با مقیاس معین $n=30$ کاهش یافته‌اند، اما اندازه ذرات خاک مورد استفاده در مدل فیزیکی و نمونه واقعی یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

4-1- کالیبراسیون مدل عددی کوچک مقیاس

در اولین گام اساسی مدل‌سازی عددی، لازم است نمونه‌ها با ابعاد هندسی و مشخصات فیزیکی کاملاً مشابه مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس توسط نرم افزار Flac 2D شبیه‌سازی و تحلیل گردند تا ضمن انتخاب مناسب‌ترین مدل رفتاری مصالح و کالیبراسیون و اصلاح نتایج آزمایش‌های متداول، پارامترهای ژئومکانیکی معتبر و مناسب برای خاک‌های موردنظر حاصل شده و امکان مقایسه داده‌های کلیدی خروجی از شبیه‌سازی عددی نظیر ظرفیت باربری نهایی حاصل از منحنی تنش-جابجایی با داده‌های اندازه‌گیری شده از مدل‌سازی فیزیکی فراهم شود.

مطابق نظر پژوهشگرانی نظیر Vanapalli و همکاران (2007)، Fredlund و همکاران (2012) و Al-Badran و Abdullah (2025)، در خاک‌های غیر اشباع، چسبندگی ظاهری حاصل از آزمایش‌های تعیین پارامترهای مقاومت برشی نظیر برش مستقیم، سه محوری و مقاومت فشاری محدود نشده، به‌طور کامل ناشی از پیوندهای شیمیایی یا سیمان شدگی میان ذرات (چسبندگی واقعی) نیست، بلکه بخشی از آن حاصل فشار منفی آب منفذی یا مکش ایجاد شده در ساختار خاک است. از این‌رو، مطابق توصیه این محققان، در هنگام مدل‌سازی عددی مسائل لازم است انتخاب و کالیبراسیون پارامترهای ژئوتکنیکی از طریق مقایسه و انطباق نتایج حاصله با نتایج اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی تعیین گردند.

Vanapalli و همکاران (2007) با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل بر روی نمونه‌های خاک رسی اشباع نشده به بررسی سهم مکش ماتریک بر ظرفیت باربری تحت شرایط زهکشی نشده پرداخته و اعلام نمودند که ظرفیت باربری نهایی خاک‌های غیراشباع را می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدوده نشده (برش تک‌محوری) انجام شده بر روی نمونه خاک‌های اشباع نشده برخوردار از عیار رطوبت همسان تعیین نمود. به همین لحاظ در این تحقیق نیز با مدل‌سازی عددی شیب‌های رسی با نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده همراه با مدول ارتجاعی و نسبت‌های پواسون کالیبره شده توافق و سازگاری قابل قبولی میان نتایج دو رویکرد مدل‌سازی کوچک مقیاس فیزیکی و عددی حاصل گردیده است.

همچنین مطابق نظر محققانی نظیر Fredlund و همکاران (2012) هنگامی که آزمایش برش مستقیم بر روی یک خاک

ماسه‌ای غیراشباع انجام می‌شود چسبندگی کلی حاصل از محل تقاطع پوش گسیختگی با محور تنش برشی در اصل نمایانگر چسبندگی ظاهری بوده و شامل دو جزء چسبندگی واقعی و چسبندگی کاذب ناشی از مکش می‌باشد که جزء دوم آن به‌شدت به‌میزان رطوبت خاک و مکش موجود در زمان آزمایش وابسته بوده و پایداری بلندمدت یکسانی همانند چسبندگی واقعی ندارد. به‌همین لحاظ، چسبندگی ظاهری حاصل از آزمایش برش مستقیم انجام شده بر روی ماسه‌های غیراشباع نباید به‌عنوان یک پارامتر معتبر مهندسی دائمی در طراحی و مدل‌سازی به‌کار گرفته شود، بلکه جایگزینی محدوده محافظه‌کارانه 1000 تا 4000 پاسکال را برای چنین خاک‌هایی که در آزمایش برش مستقیم چسبندگی نسبتاً بالایی را نشان می‌دهند، جهت تحلیل و ارزیابی تطابق و توافق نتایج مدل‌سازی عددی هم مقیاس با نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی را توصیه نموده‌اند. از این‌رو، در این تحقیق به‌منظور کالیبره نمودن نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی کوچک مقیاس، چندین مدل عددی هم مقیاس با تغییر گام به‌گام پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول ارتجاعی، نسبت پواسون و چسبندگی‌های متفاوت در محدوده ذکر شده توسط نرم‌افزار فلک دوبعدی مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده شده و مشخص گردید نتایج تحلیل عددی در شرایط اعمال چسبندگی برابر 3000 پاسکال توافق و سازگاری قابل قبول و مطلوبی با نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی نشان داده‌اند.

4-2- کالیبراسیون مدل عددی با مقیاس واقعی

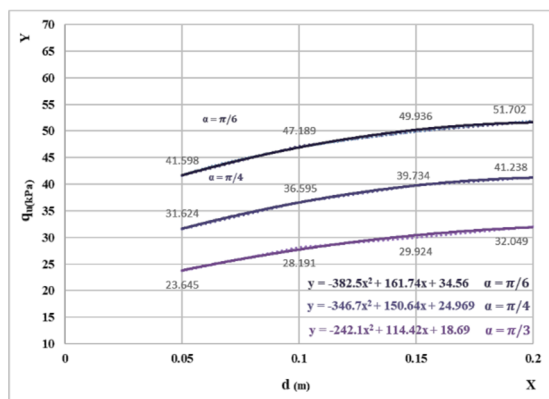
پس از حصول توافق و سازگاری میان نتایج مدل‌های عددی کوچک مقیاس کالیبره شده با نتایج مدل‌های فیزیکی، مدل‌های با ابعاد واقعی (30 برابر ابعاد مدل‌های آزمایشگاهی) در شرایط کرنش مسطح مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده شدند. مهم‌ترین و اساسی‌ترین دستاورد تحلیل مدل‌های با ابعاد واقعی، لزوم توجه به محدودیت ذاتی اثر مقیاس بر مدل‌سازی و لزوم کالیبراسیون پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از آزمایش‌های متداول آزمایشگاهی، به‌ویژه چسبندگی در خاک‌های غیراشباع می‌باشد. در فرآیند تحلیل عددی این‌گونه مدل‌های مشخص گردید که استفاده مجدد از چسبندگی کالیبره شده در تحلیل‌های عددی کوچک مقیاس در تحلیل‌های بزرگ مقیاس، باعث بروز خطای محاسباتی و نتایج غیرواقع‌بینانه می‌شود. از این‌رو، کالیبراسیون مجدد چسبندگی خاک‌ها ضرورت دارد. به‌همین لحاظ در این مرحله نیز با بهره‌گیری رویکرد تعدیل گام به‌گام، کالیبراسیون مجدد چسبندگی در مدل‌های بزرگ مقیاس انجام شده و نتایج حاصله در جداول (5) تا (7) ارائه شده‌اند.

5- نتایج و بحث

با توجه به اهداف تحقیق، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی در قالب نمودارهای تغییرات ظرفیت باربری نهایی (q_u) در مقابل فاصله لبه پی از تاج شیب به (d) که در واقع تابعی از ضخامت لایه ضعیف مایل (D) می‌باشد در سه زاویه 60، 45 و 30 درجه ترسیم گردیده‌اند.

5-1- شیب‌های حاوی لایه ضعیف در پیشانی

در اولین مرحله از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی، ارزیابی رفتار شیب‌های حاوی لایه ضعیف در پیشانی در دستور کار قرار داده شده و نمودارهای q_u - d و معادلات مربوط به مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی به‌ترتیب در شکل‌های (10) و (11) و روابط (1) تا (6) ارائه شده‌اند.



شکل 10- تغییرات ظرفیت باربری نهایی در مقابل فاصله لبه پی از تاج شیب در مدل‌سازی فیزیکی شیب‌های حاوی لایه ضعیف در پیشانی

$$q_u = -382.5d^2 + 161.74d + 34.56 \quad \alpha = 30 \text{ (deg.)} \quad (1)$$

$$q_u = -346.7d^2 + 150.64d + 24.969 \quad \alpha = 45 \text{ (deg.)} \quad (2)$$

$$q_u = -242.1d^2 + 114.42d + 18.69 \quad \alpha = 60 \text{ (deg.)} \quad (3)$$

$$q_u = -0.4706d^2 + 5.8667d + 36.068 \quad \alpha = 30 \text{ (deg)} \quad (4)$$

$$q_u = -0.462d^2 + 6.4442d + 22.497 \quad \alpha = 45 \text{ (deg)} \quad (5)$$

$$q_u = -0.2184d^2 + 3.3199d + 21.34 \quad \alpha = 60 \text{ (deg)} \quad (6)$$

جدول 5- مشخصات خاک رس در مدل‌سازی با مقیاس واقعی

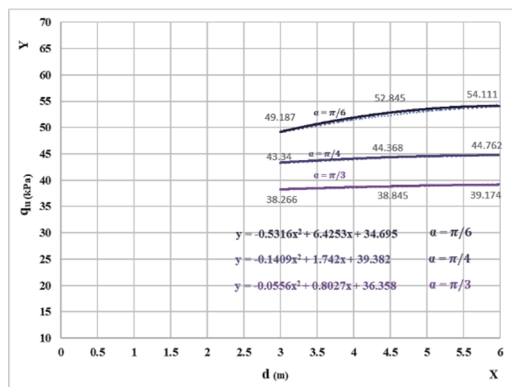
مقدار	خصوصیت
1393	وزن مخصوص خاک غیر اشباع با رطوبت بهینه kg/m^3
17167/5 (2/5 C_u)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 30 درجه N/m^2
20601 (3 C_u)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 45 درجه N/m^2
24035 (3/5 C_u)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 60 درجه N/m^2
13/1	زاویه اصطکاک داخلی (deg)
4.000.000	ضریب ارتجاعی N/m^2
0/4	نسبت پواسون

جدول 6- مشخصات خاک ماسه ضعیف رویی در مدل‌سازی عددی با مقیاس واقعی

مقدار	خصوصیت
1335	وزن مخصوص خاک غیر اشباع با رطوبت بهینه kg/m^3
2697/75 (0/25 $C_{d.sh.}$)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 30 درجه N/m^2
5395/5 (0/5 $C_{d.sh.}$)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 45 درجه N/m^2
9711/9 (0/9 $C_{d.sh.}$)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 60 درجه N/m^2
22/2	زاویه اصطکاک داخلی (deg)
20.000.000	ضریب ارتجاعی N/m^2
0/35	نسبت پواسون

جدول 7- مشخصات خاک ماسه ضعیف میانی در مدل‌سازی عددی با مقیاس واقعی

مقدار	خصوصیت
1335	وزن مخصوص خاک غیر اشباع با رطوبت بهینه kg/m^3
1618/65 (0/15 $C_{d.sh.}$)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 30 درجه N/m^2
4316/4 (0/4 $C_{d.sh.}$)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 45 درجه N/m^2
8093/25 (0/75 $C_{d.sh.}$)	چسبندگی عملیاتی در زاویه شیب 60 درجه N/m^2
22/2	زاویه اصطکاک داخلی (deg)
20.000.000	ضریب ارتجاعی (N/m^2)
0/35	نسبت پواسون



شکل 13- تغییرات ظرفیت باربری نهایی در مقابل فاصله لبه پی از تاج شیب در مدل سازی عددی شیب های حاوی لایه ضعیف داخلی

$$q_u = -0.5316d^2 + 6.425d + 34.695 \quad \alpha = 30 \text{ (deg)} \quad (10)$$

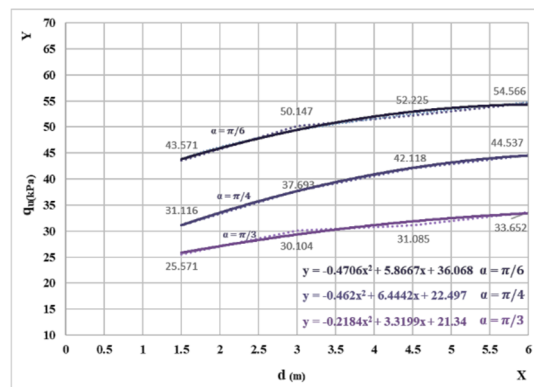
$$q_u = -0.1409d^2 + 1.742d + 39.382 \quad \alpha = 45 \text{ (deg)} \quad (11)$$

$$q_u = -0.0556d^2 + 0.8027d + 36.358 \quad \alpha = 60 \text{ (deg)} \quad (12)$$

در این شیب ها نیز کلیه موارد ذکر شده برای شیب های حاوی لایه ضعیف در پیشانی شامل تأثیر زاویه شیب، فاصله لبه پی از تاج شیب و زاویه شیب لایه ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی صادق می باشند، ولی یکی از نکات مهم و قابل توجه حاصل از نتایج رفتاری این گونه شیب ها در مقایسه با شیب های حاوی لایه ضعیف در پیشانی این است که در این شیب ها به واسطه نقش آفرینی بسیار موثر چسبندگی لایه مقاوم رویی که با محصور نمودن لایه ضعیف داخلی باعث افزایش پایداری آن می گردد، اثر وجود شیب در فواصل کمتری از لبه پی تا تاج شیب محو گردیده و ظرفیت باربری نهایی ثابت می ماند. دومین نکته مهم حاصل از تحلیل رفتاری این گونه شیب ها در مقایسه با حالت قبلی حاکی از آن است که در زوایا و فواصل یکسان پی از تاج شیب ظرفیت باربری نهایی در حالت اخیر به واسطه نقش آفرینی لایه مقاوم واقع در پیشانی، نسبت به حالت قبلی افزایش محسوس و معناداری نشان می دهد.

6- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر مقیاس بر ظرفیت باربری نهایی شیب های رسی دارای لایه ضعیف مایل تحت اثر پی نواری، با استفاده از 21 آزمایش مدل کوچک مقیاس و مدل سازی عددی متناظر در مقیاس واقعی با نرم افزار Flac 2D مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، اثر زاویه شیب، ضخامت لایه ضعیف و محل قرارگیری آن (در پیشانی یا داخل شیب) بر رفتار باربری شیب ها ارزیابی شد. مهم ترین نتایج این تحقیق به شرح زیر است:



شکل 11- تغییرات ظرفیت باربری نهایی در مقابل فاصله لبه پی از تاج شیب در مدل سازی عددی شیب های حاوی لایه ضعیف در پیشانی

با ملاحظه نمودارها و معادلات به دست آمده مشخص است که در یک فاصله ثابت پی از تاج شیب، ظرفیت باربری نهایی با افزایش زاویه شیب به واسطه تشدید نقش محدوده کننده پیشانی شیب در توسعه مناسب و کافی ناحیه مقاوم در خاک بستر، کاهش می یابد. علاوه بر آن در یک زاویه شیب ثابت، ظرفیت باربری نهایی حاصل از مدل سازی های فیزیکی و عددی با افزایش فاصله پی از تاج شیب تا حد معینی (بسته به زاویه شیب) افزایش می یابد که نشان دهنده اثرگذاری قابل ملاحظه فاصله پی تا تاج شیب در افزایش محدودیت جانبی و مقاومت در برابر حرکت رو به بیرون خاک می باشد، اما پس از عدول فاصله مذکور اثر شیب محو گردیده و ظرفیت باربری نهایی ثابت خواهد ماند. لازم به ذکر است که به دلیل استقرار لایه ضعیف مایل در لبه پی، ظرفیت باربری نهایی در زوایای مختلف یکسان نبوده و با افزایش زاویه انحراف لایه ضعیف کاهش محسوس و معناداری نشان می دهد که مبین کاهش نیروی مقاوم و افزایش نیروی محرک می باشد.

5-2- شیب های حاوی لایه ضعیف داخلی

در دومین مرحله از مدل سازی ها، به بررسی رفتار شیب های حاوی لایه ضعیف داخلی پرداخته شده و نتایج حاصل از این مرحله نیز در قالب نمودارهای $q_u - d$ و معادلات به دست آمده به ترتیب در شکل های (12) و (13) و روابط (7) تا (12) داده شده اند.

$$q_u = -379.4d^2 + 147.17d + 36.79 \quad \alpha = 30 \text{ (deg)} \quad (7)$$

$$q_u = -124.2d^2 + 50.67d + 36.759 \quad \alpha = 45 \text{ (deg)} \quad (8)$$

$$q_u = -163.6d^2 + 72.96d + 26.912 \quad \alpha = 60 \text{ (deg)} \quad (9)$$

- Engineering, 2016, 50 (1), 97-110.
<https://doi.org/10.22059/IJMG.2016.57859>
- Debnath L, "Seismic bearing capacity of shallow strip footing embedded in slope resting on two-layered soil", *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2021, 43 (3), 285-306.
<https://doi.org/10.2478/sgem2021-0021>
- Dhatrak AI, Gandhi N, "Bearing capacity of footing on reinforced fly ash slope", *International Journal of Engineering Research and Application*, 2016, 6 (8), 56-61.
- El Sawwaf MA, "Strip footing behavior on pile and sheet pile-stabilized sand slope", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 43 (1), 41-54. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:6\(705\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:6(705))
- El Sawwaf MA, "Behavior of Strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope", *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25 (1), 50-60.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.06.001>
- El Sawwaf MA, Azzam WR, Kassem EM, "An experimental study of the behavior of a strip footing adjacent to reinforced sand slope above a soft pocket", *International Journal of Geomate*, 2021, 21 (87), 118-127.
<https://doi.org/10.21660/2021.87.j2369>
- Fredlund DG, Rahardjo H, Fredlund MD, "Unsaturated soil mechanics in engineering practice", *Jone Wiley and Sons, Inc*, 939, 2012.
- Kadhm Salman H, Jawad FW, Al-Ameri AFI, "Bearing capacity factor of shallow foundation on reinforced sloped clayey soil", *International Review of Civil Engineering*, 2022, 13 (4), 318-325.
<http://doi.org/10.15866/ireee.v13i4.21896>
- Keskin MS, Laman M, "Model studies of bearing capacity of strip footing on sand slope", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, 17 (4), 699-711.
<https://doi.org/10.1007/s12205-013-0406-x>
- Kianpour M, Bagherzadeh Khalkhali A, Dabiri R, Mahdavi Adeli M, "Numerical study on the ultimate bearing capacity of the strip foundations on the inclined multi-layered soil mass with a weak layer", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2024, 48 (2024), 3511-3519.
<https://doi.org/10.1007/s40996-024-01350-8>
- Luo, Zh-G, Ding XM, Qu, Q, Fang HQ, "Bearing capacity and deformation behavior of rigid strip footing on coral sand slopes", *Ocean Engineering*, 2023, 267 (2023), 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113317>
- Mansouri T, Abbeche Kh, "Experimental bearing capacity of eccentrically loaded foundation near a slope", *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2019, 41 (1), 33-41.
<https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0004>
- Mazouz B, Mansouri T, Baazouzi M, Abbeche K, "Assessing the effect of underground void on
- (1) خاک‌های غیراشباع در مدل‌های کوچک‌مقیاس به دلیل وجود مکش بافتی دارای مقاومت برشی بیشتری نسبت به مقیاس واقعی هستند، اما با افزایش ابعاد مدل و افزایش سطح تنش‌ها، اثر مکش به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در بسیاری از موارد عملاً از بین می‌رود.
- (2) استفاده از مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس بدون در نظر گرفتن اثر مقیاس و کالیبراسیون مناسب پارامترهای ژئومکانیکی، به‌ویژه چسبندگی، می‌تواند منجر به برآورد بیش از واقع ظرفیت باربری نهایی شود. از این رو، لحاظ کردن اثر مقیاس برای تعمیم نتایج آزمایشگاهی به شرایط واقعی ضروری است.
- (3) در مدل‌های با ابعاد واقعی، چسبندگی عملیاتی مورد نیاز برای انطباق نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تابع زاویه شیب بوده و با افزایش زاویه شیب افزایش می‌یابد. این نکته بیانگر تأثیر متقابل هندسه شیب و شرایط تنش بر پارامترهای مقاومتی مؤثر است.
- (4) در تمامی حالت‌های بررسی شده، کاهش زاویه شیب موجب افزایش ظرفیت باربری نهایی گردید. همچنین با افزایش فاصله لبه پی از تاج شیب، ظرفیت باربری تا یک فاصله بحرانی افزایش یافته و پس از آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند. مقدار این فاصله بحرانی در شیب‌های حاوی لایه ضعیف تابع موقعیت و زاویه لایه ضعیف است.
- (5) مقایسه دو حالت قرارگیری لایه ضعیف نشان داد که در شیب‌های دارای لایه ضعیف داخلی، ظرفیت باربری نهایی به‌طور محسوسی بیشتر از شیب‌های دارای لایه ضعیف در پیشانی است. این رفتار ناشی از نقش محصورکنندگی لایه مقاوم رویی و افزایش پایداری لایه ضعیف داخلی است.
- (6) در طراحی پی‌های نواری واقع بر شیب‌های لایه‌ای، صرف استفاده از روابط متداول ظرفیت باربری یا نتایج مدل‌های کوچک‌مقیاس بدون در نظر گرفتن اثر مقیاس و شرایط غیراشباع می‌تواند منجر به خطا در ارزیابی ظرفیت باربری و ایمنی سازه شود.

7- مراجع

- Abdullah BA, Al-Badran YM, "Shear strength behaviour of unsaturated soils: A Review", *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 2024, 2 (2), 536-546.
<https://doi.org/10.61268/sje1356>
- Chakraborty D, Kumar J, "Bearing capacity of foundations on slopes", *Geomechanics and Geoengineering*, 8 (4), 274-285.
<https://doi.org/10.1080/17486025.2013.770172>
- Choudhary AK, Jha JN, Gill KS, "Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on reinforced flyash slope", *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28 (4), 393-402.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.007>
- Crusoe Jr GE, Qing-xiang C, Ji-sen Sh, Liu H, Barvor YJ, "Effects of weak layer angle and thickness on the stability of rock slopes", *International Journal Mining and Geo-*

- Taher NR, Gor M, Aksoy HS, Awlla HA, "Numerical investigation of the effect of slope angle and height on the stability of a slope composed of sandy soil", Gumushane University Journal of Science and Technology, 2022, 12 (2), 664-675.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.105141>
- Tian W, Peiffer H, Malengier BS, Xue S, Chen Z, Slope stability analysis method of unsaturated soil slopes considering pore gas pressure caused by rainfall infiltration, applied sciences, 2022, 12 (21), 1-19.
<https://doi.org/10.3390/app122111060>
- Vanapalli SK, Oh WT, Puppla AJ, "Determination of the bearing capacity of unsaturated soils under undrained loading conditions", Proceedings of the 60th Canadian Geotechnical Conference, 2007, 21-24 October, Ottawa, 1002-1009.
- strip footing sitting on a reinforced sand slope with numerical modeling, Engineering, technology and applied science research, 2022, 12 (4), 9005-9011.
<https://doi.org/10.48084/etasr.5131>
- Ozkahriman F, Wartman J, "Investigation of 1-g similitude laws by "modeling-of-models" Exercise". Advanced in measurement and modeling of soil behavior, 2007, 200, 1-9.
[https://doi.org/10.1061/40917\(236\)21](https://doi.org/10.1061/40917(236)21)
- Pourmohammadi K, Bagherzadeh Khalkhali A, Dabiri R, Mahdavi Adeli M, "Experimental and numerical Study of weak soil layer effects on ultimate bearing capacity of Strip Foundations resting on Inclined layered soil masses", Geomechanics and Engineering, 2025, 41 (5), 481-491.
<https://doi.org/10.12989/gae.2025.41.5.481>
- Pusadkar SS, Mankar AU, "Performance of strip footings on slope reinforced with inclined pile", International Journal of Civil Engineering and Technology, 2016, 7 (3), 211-222.
- Ray R, Choudhary ShSh, Roy LB, Kaloop M, Samui P, Kurup P, Ahn J, Hu JW, "Reliability analysis of reinforced soil slope stability using GA-ANFIS, RFC, and GMDH soft computing techniques", Case studies in construction materials, 2023, 18 (2023), 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01898>
- Susanti EI, Munawir A, Zaika Y, Dewi SM, "An experimental study of bearing capacity and slope stability of residual slope model with pile reinforcement", Civil engineering and Architecture, 2023, 11 (4), 2219-2230.
<https://doi.org/10.13189/cea.2023.110439>