Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 57(1) (2025) 3-24
DOI: 10.22060/ceej.2024.23365.8150

Experimental Investigation of Eccentric Loading Effect on Circular Footing Located on Sandy Bed with a Weak Thin Layer

Javad Sadeghi[1], Ahad Bagherzadeh Khalkhali[1] *, Javad Nazariafshar[2], Navid Ganjian[1]

[1] Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[2] Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: In some cases, there is a weak thin interlayer in the soil profile, which may not reveal these complications in geotechnical studies. Also, most of shallow footings are subjected to eccentric loadings that due to the existence of such loads, moments are imposed on the footing and as a result, the footing rotates and the pressure under the footing does not remain uniform. In this research, an experimental investigation has been carried out on a circular footing model located on a homogeneous sand bed with a weak thin layer with different thicknesses and depths of placement under vertical eccentric loads by a small-scale physical model of the soil-footing system. Physical model tests are performed in a cylindrical steel tank with an inner diameter of 70 cm and a height of 70 cm. Investigations have been carried out by changing the thickness and depth of placement of a weak thin layer due to eccentric loadings. The results show that the existence of a weak layer and eccentric load has increased the rotation of circular footing compared to the homogeneous sand bed. So in the sand bed with a weak thin layer, the maximum rotation of circular footing has been obtained equal to 8.2 degrees for eccentric load 0.0625D (D is the diameter of footing) and thickness of weak thin layer 0.2D and depth of placement 0.5D and the minimum rotation of circular footing for homogeneous sand with eccentric load of 0.0625D is equal to 4.5 degrees, which shows a reduction of 45%.

Review History:

Received: Jul. 22, 2024
Revised: Sep. 18, 2024
Accepted: Oct. 11, 2024
Available Online: Nov. 02, 2024

Keywords:

Bearing Capacity
Rotation of Footing
Weak Thin Layer
Eccentric Load
Circular Footing

1- Introduction

While most analytical methods are based on the assumption of soil homogeneity usually the soils in nature are not homogeneous and they may have thin layers that are not usually revealed in geotechnical studies. Although the presence of thin layers seems to have little effect, it can fundamentally affect the behavior of soil-footing and other geotechnical systems.

In many cases, circular footings, as one of the common types of shallow footings are subjected to eccentric loading in addition to centric loading, as a result of this type of loading, moments are imposed on the footing. As a result of the moments applied to the footing, the pressure under the footing does not remain uniform and rotation occurs in the footing [1].

In the literature review, very little study has been performed on the effect of eccentric loading on shallow footings [2-5]. In particular, the effects of eccentric loading on circular footing located on a sandy bed with a weak thin layer have not been studied. Therefore, in this research, the effect of eccentric loading on the rotation of circular footing located on the sandy bed with a weak thin layer is studied by small-scale physical models. The investigations were carried out by varying the thickness, and depth of the weak thin layer and eccentric loading.

The problem of the soil-circular footing system is schematically illustrated in Figure 1. The problem is investigated under the effect of eccentric loading conditions, and the circular footing is rigid. This footing rests on the soil surface; on the other hand, the initial depth of embedment is nil. Figure 1 shows a typical schematic of the footing model on the sandy bed. For the bed sand, crushed uniform silica sand (*SP*) with medium density was used. For the thin layer, materials with weak strength properties in comparison with the sandy bed were used. For the weak layer, the clay powder with *CL* classification was used. Clay with a natural moisture content of 5.5% and a very low density of 12.1 kN/m^3 was used consistently in all of the experiments.

2- Experimental method

At the test beginning, the sand-raining screen device was located directly above the test box. Then the following the sand was deposited in the 4 cm thick layers by using the training method. The weak thin layer was made using simple templates at the specified depths and thicknesses and the subsequent sand layers were poured to the required

*Corresponding author's email: a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

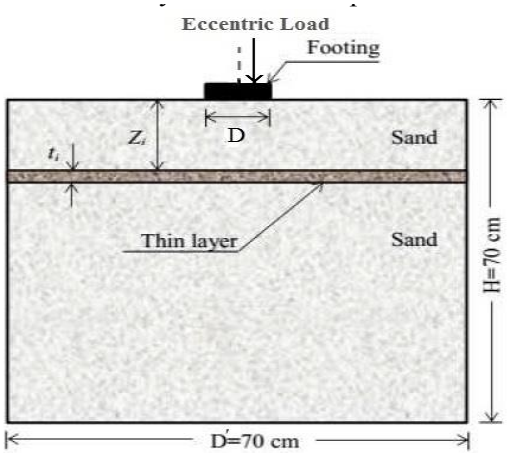


Fig. 1. Schematic view of the problem

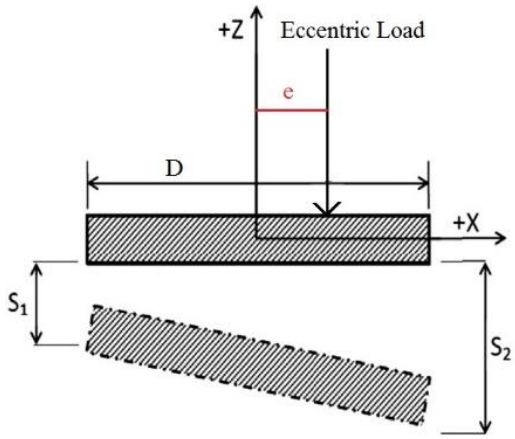


Fig. 2. Rotation of circular footing under eccentric load

Table 1. Model test program

Test type	Constant parameters	Variable parameters
CFHSB	Dr = 39 %, D_f/D= 0	Z_i/D=0.5, 1 t_i/D=0.1, 0.2 e_i/D=0, 0.0625, 0.125
CFWTL	Dr = 39 %, D_f/D= 0	Z_i/D=0.5, 1 t_i/D=0.1, 0.2 e_i/D=0, 0.0625, 0.125

level and were followed by placing the footing model at a specific location on the surface of the sandy bed. At the end, the vertical pressure is transferred to the footing model by a manual hydraulic jack at a constant rate equal to 1 mm/min. Then a dial gauge with a precision of 0.01 mm measured the vertical settlement.

3- Experimental parameters and program

The variable parameters used in the experiments (in accordance with the schematic Figure 1) and their values are shown in Table 1. First, the behavior of the circular footing resting on a uniform sand bed is investigated. Then, the behavior of the circular footing resting on the sandy bed with a weak layer at different thicknesses, depths, and loadings was investigated. Also in this research, circular footing on a homogeneous sand bed is abbreviated as CFHSB, and circular footing on a sand bed with a weak thin layer is abbreviated as CFWTL.

4- Results and discussion

When the load is applied eccentrically on the shallow footing, rotation of the footing occurs and the pressure under the footing does not remain uniform. The schematic diagram of circular footing rotation under the influence of eccentric

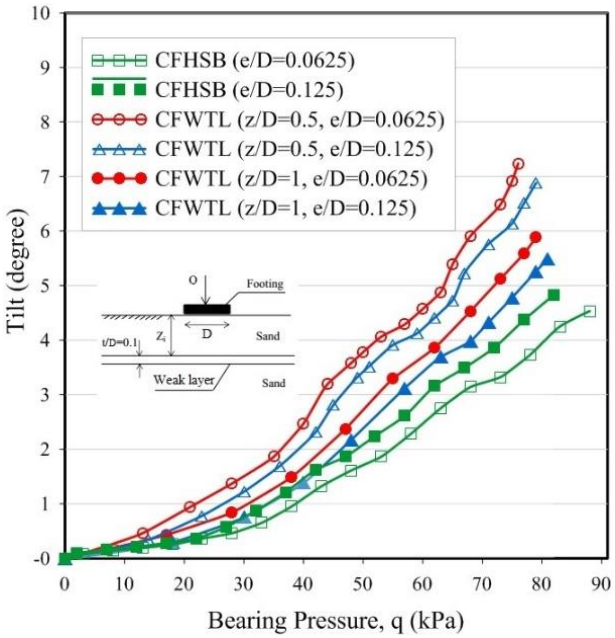


Fig. 3. Bearing pressure-tilt curve with a normalized thickness of weak thin layer equal to t/D=0.1

loading is shown in Figure 2. Also, when a footing is subjected to an eccentric loading, footing tilt is inevitable. In this study, in order to calculate the tilt of footing in degrees, two gauges have been used to measure the settlement of footing on both sides of the circular footing in the direction of eccentric loading. The tilt of the footing has been calculated according to the difference between settlements recorded by two gauges.

The bearing pressure-tilt curve of circular footing in both conditions of homogeneous sand and sand with a weak thin layer with a thickness of t/D=0.1 and t/D=0.2 at different depths and eccentric loadings are shown in Figures 3 and 4, respectively.

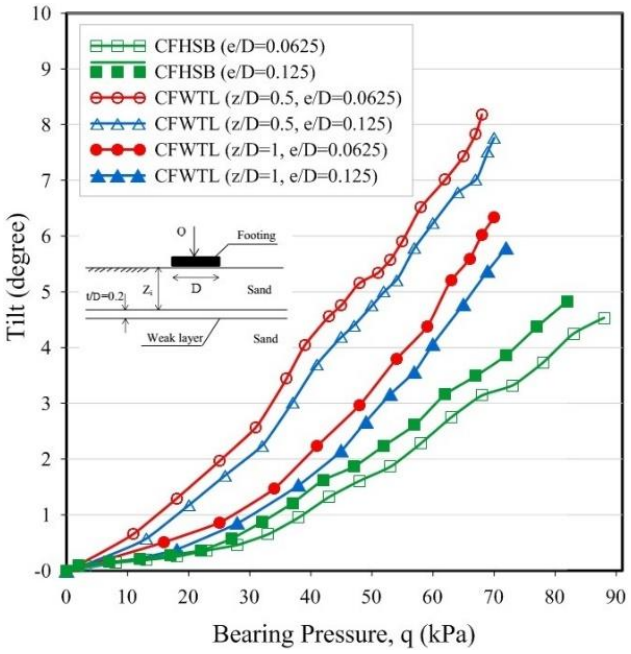


Fig. 4. Bearing pressure-tilt curve with normalized thickness of weak thin layer equal to t/D=0.2

According to Figures 3 and 4, the tilt of the circular footing for homogeneous sand increased with the increase of eccentricity and the bearing capacity decreased significantly, but for the case where a weak layer exists, when the normalized eccentric loading is equal to 0.0625 (e/D=0.0625) was applied, the tilt of the circular footing is slightly higher and the bearing capacity is slightly lower than the case where the eccentric loading was entered at the place equal to 0.125D.

5- Conclusions

The horizontal weak thin layer and eccentric loadings decrease both the ultimate bearing capacity and stiffness of the soil-footing system.

The maximum rotation of the circular footing from the moment of applying the load until it reaches the ultimate bearing capacity is related to the case where the thickness of the weak layer is 0.2D and the eccentric loading is 0.0625D and the location of the weak layer is at a depth of 0.5D and the rotation value of the circular footing, in this case, in this case, is equal to 8.2 degrees. Also, the minimum rotation of the circular footing corresponds to the case where the sand is homogeneous and the eccentric loading is 0.0625D and the tilt value of the circular footing in this case is equal to 4.5 degrees.

References

[1] H. Mahiyar, A.N. Patel, Analysis of angle shaped footing under eccentric loading, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 126(12) (2000) 1151-1156.

[2] K. Papadopoulou, G. Gazetas, Eccentricity effects on bearing capacity of strip and square footings on two-layered clay, Geotechnical and Geological Engineering, 37 (2019) 4099-4120.

[3] A.M. Basha, E.A. Eldisouky, Effect of eccentric loads on the behavior of circular footing with/without skirts resting on sand soil, International Journal of Geo-Engineering, 14(1) (2023) 13.

[4] Q.N. Pham, S. Ohtsuka, K. Isobe, Y. Fukumoto, T. Hoshina, Ultimate bearing capacity of rigid footing under eccentric vertical load, Soils and Foundations, 59(6) (2019) 1980-1991.

[5] A. TaghaviGhalesari, M.K. Tabari, A.J. Choobbasti, N. EsmaeilpourShirvani, Behavior of eccentrically loaded shallow foundations resting on composite soils, Journal of Building Engineering, 23 (2019) 220-230.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۱، سال ۱۴۰۴، صفحات ۳ تا ۲۴
DOI: 10.22060/ceej.2024.23365.8150

بررسی آزمایشگاهی اثر بارگذاری خارج از مرکز بر پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف

جواد صادقی[۱]، احد باقرزاده خلخالی[۱*]، جواد نظری افشار[۲]، نوید گنجیان[۱]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- گروه مهندسی عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

خلاصه: در برخی موارد، در پروفیل خاک، میان‌لایه نازک ضعیف وجود دارد که امکان دارد در مطالعات ژئوتکنیک این عوارض آشکار نشوند. همچنین بسیاری از پی‌های سطحی تحت بارگذاری‌های خارج از مرکز قرار می‌گیرند که به‌دلیل وجود اینگونه بارها، لنگرهایی به پی تحمیل می‌شود و در نتیجه پی دچار چرخش می‌شود و فشار زیر پی یکنواخت نمی‌ماند. در این تحقیق آزمایشگاهی بر روی یک مدل پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و همراه با لایه نازک ضعیف با ضخامت و عمق قرارگیری متفاوت تحت بارگذاری‌های خارج از مرکز عمودی، به‌وسیله مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس سیستم خاک – پی انجام شده است. آزمایش‌های مدل فیزیکی در مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، انجام شده است. بررسی‌ها با تغییر ضخامت و عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف در اثر بارهای خارج از مرکز انجام گرفته است. نتایج بیانگر آن است که وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز باعث افزایش چرخش پی دایره‌ای نسبت به بستر ماسه‌ای همگن شده است، به‌طوری‌که در بستر ماسه‌ای با وجود لایه‌ی نازک ضعیف، بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز D ۰/۰۶۲۵ (D قطر پی است) و ضخامت لایه نازک ضعیف D ۰/۲ و عمق قرارگیری D ۰/۵ برابر با ۸/۲ درجه به‌دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای ماسه همگن با بار خارج از مرکز D ۰/۰۶۲۵ برابر با ۴/۵ درجه به‌دست آمده است که نشان می‌دهد، کاهش ۴۵ درصدی داشته است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

کلمات کلیدی:
ظرفیت باربری
چرخش پی
لایه نازک ضعیف
بار خارج از مرکز
پی دایره‌ای

۱- مقدمه

خاک فاکتوری مهم و مؤثر در پیدایش و شکل‌گیری هر اکوسیستم طبیعی است. بر اثر فرسایش سنگ مادر، لایه‌ای نازک از خاک تشکیل می‌شود و به مرور زمان لایه‌های جدیدتری از خاک روی لایه اولیه قرار می‌گیرند. با گذشت زمان لایه‌های زیرین تغییرشکل می‌دهند و در نهایت پروفیل خاک شکل می‌گیرد. به همین دلیل تشکیل میان‌لایه ها درون اکثر پروفیل‌های خاک اجتناب‌ناپذیر است و به دلیل اهمیت همین میان‌لایه‌ها در این تحقیق اثر میان‌لایه نازک ضعیف درون پروفیل خاک بررسی شده است.

درحالی‌که اکثر روش‌های تحلیلی، بر اساس فرض همگنی خاک بنا شده‌اند، معمولاً خاک‌های موجود در طبیعت به‌صورت همگن نبوده و ممکن است دارای لایه‌های نازک باشند که معمولاً در مطالعات ژئوتکنیک آشکار نمی‌شوند، علی‌رغم آنکه به نظر می‌رسد وجود لایه‌های نازک تأثیر ناچیزی داشته باشد، اساساً می‌تواند بر رفتار خاک – پی و دیگر سیستم‌های ژئوتکنیکی، مؤثر باشد.

در بسیاری از موارد، علاوه بر بارگذاری مرکزی، پی‌ها در معرض بارگذاری خارج از مرکز قرار می‌گیرند که درنتیجه‌ی این نوع بارگذاری، لنگرهایی به پی تحمیل می‌شود. در اثر لنگرهایی که به پی وارد می‌شود، فشار زیر پی یکنواخت نمی‌ماند و چرخش در پی اتفاق می‌افتد. شیب پی با افزایش بار خارج از مرکز افزایش می‌یابد و ظرفیت باربری به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد؛ بنابراین، اندازه‌های پی افزایش می‌یابد و طراحی را غیراقتصادی می‌کند[۱].

در پیشینه تحقیق مطالعه ظرفیت باربری نهایی خاک دو لایه (به‌عنوان مثال قرارگیری خاک قوی بر روی خاک ضعیف و یا بر عکس) نسبتاً انجام شده[۲-۴] و مطالعه بر روی خاک سه لایه نیز صورت گرفته است[۵-۷]؛ همچنین تأثیر بار خارج از مرکز بر پی‌های سطحی صورت‌گرفته است[۸-۱۰و ۳] ولی در خصوص اثر بارگذاری خارج از مرکز بر پی دایره‌ای با وجود لایه نازک ضعیف مطالعات بسیار اندکی انجام شده است. در این بخش

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

مطالعات انجام شده در خصوص خاک‌های لایه لایه در بخش‌های: وجود لایه نازک، خاک دو لایه، خاک چند لایه در اثر بارهای مرکزی و خارج از مرکز ارائه می‌شود.

والور و همکاران، اثر وجود یک‌لایه نازک ضعیف افقی بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای متراکم را بررسی و گزارش نمودند که چنانچه عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک کمتر از حدود چهار برابر عرض پی (۴ B) باشد، به طور قابل‌ملاحظه‌ای بر روی مکانیسم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی پی اثرگذار است. همچنین در این تحقیق مشخص گردیده که وجود یک‌لایه ضعیف نازک، در مواردی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری تا حد ۸۰ درصد شود[۱۱].

عسکری و همکاران، با انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس، رفتار پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک را بررسی نمودند. مطابق این تحقیق برای بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک ضعیف ساخته شده از پودر رس، لایه ضعیف در عمق بحرانی ۱ B (B عرض پی)، بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای و سختی سیستم خاک – پی داشته است[۱۲].

ای ساواف برای شناخت رفتار پی نواری تحت اثر بار خارج از مرکز مستقر بر ماسه مسلح با ژئوگرید، مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی و عددی را با چندین شکل چیدمان از لایه‌های ژئوگرید با تعداد، طول، خروج از مرکزیت لایه همراه با اثر دانسیته نسبی ماسه و خروج از مرکزیت بار مورد بررسی قرار داده است.

ای ساواف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی، ملاحظه نموده که نسبت ظرفیت باربری با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید دارای طول مهاری مناسب، بهبود (ارتقا) می‌یابد. برای حالت و شرایط مطالعه شده، تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید، سه‌لایه تعیین و نسبت طول لایه ژئوگرید به عرض پی (B) بزرگ‌تر از چهار پیشنهاد گردیده است. همچنین، تأثیر مسلح کننده خاک بر نسبت ظرفیت باربری در مقادیر کمتر خروج از مرکزیت بار و دانسیته‌های نسبی بیشتر، افزایش می‌یابد[۱۳].

دستپاک و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی بر روی یک مدل پی دایره‌ای تحت بار خارج از مرکز بر روی ماسه تقویت‌شده با ژئونت پرداختند. برای این منظور، پنج سری آزمایش به‌منظور ارزیابی تأثیر بعد تقویت‌کننده و بار خارج از مرکز بر ظرفیت باربری، نشست و چرخش پی انجام شد. در این تحقیق نمودار ظرفیت باربری و تغییر در موقعیت خط چرخش در سطوح مختلف بار برای شرایط تقویت‌شده و تقویت نشده ارائه شده است[۱۴].

ژئورگیادیس و باترفیلد نتایج بررسی پاسخ پی بر روی شن و ماسه، تحت بارهای خارج از مرکز و مایل ارائه دادند. در این تحقیق دستگاهی ساخته شد که می‌توانست به طور همزمان بارهایی را بر پی‌ها در هر گریز از مرکز و شیب، بدون اعمال محدودیت بر جابه‌جایی پی اعمال کند. نتایج آزمایشگاهی، در مقایسه با داده‌های منتشر شده، تفسیر شدند و روشی برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌های عمودی و افقی و چرخش پی‌های بارگذاری شده بر روی ماسه ارائه شد[۱۵].

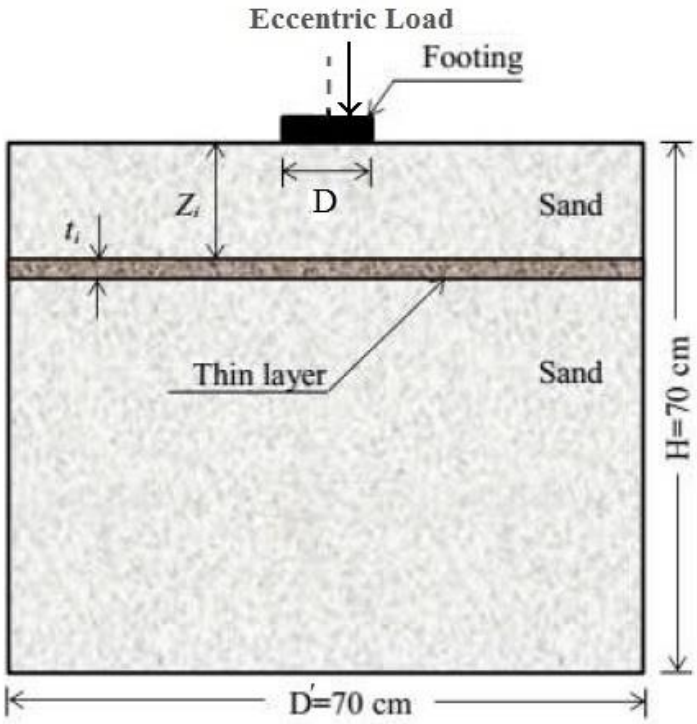
با بررسی پیشینه تحقیق فوق، کاملاً واضح است که تحقیقات محدودی در رابطه با اثر توده خاک‌های لایه‌ای و به‌ویژه حالت لایه‌های خاک حاوی لایه نازک ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی و همچنین چرخش پی دایره‌ای در اثر بارگذاری خارج از مرکز انجام شده است، به‌نظر می‌رسد زمینه انجام تحقیقات و مطالعات بیشتر، می‌تواند به‌طور محسوسی به افزایش شناخت شرایط رفتاری و اثرات پارامترهای موجود در طبیعت و واقعیت بر ظرفیت باربری و چرخش پی‌ها منجر گردد. بنابراین در این مطالعه، تأثیر بارگذاری خارج از مرکز بر روی پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف افقی با دانسیته نسبی متوسط و کمّی کردن تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج چرخش نهایی پی دایره‌ای به عنوان نوآوری این مطالعه نسبت به مطالعات دیگر می‌باشد که به‌وسیله مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس سیستم خاک – پی بررسی می‌گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲- ۱- طراحی و ساخت دستگاه آزمایش، مخزن آزمایش، پی مدل و سیستم بارگذاری

شکل کلی مسئله مورد بررسی شامل لایه‌های ماسه، میان‌لایه نازک، پی دایره‌ای، بارگذاری خارج از مرکز و ابعاد مخزن در شکل ۱ نشان داده شده است. پی دایره‌ای به‌صورت صلب بوده و بر روی سطح بستر قرار می‌گیرد، یعنی عمق مدفون صفر در نظر گرفته می‌شود. خاک بستر شامل دو نوع مصالح است: بستر ماسه‌ای و یک‌لایه ضعیف با ضخامت t. برای ماسه بستر از ماسه سیلیسی شکسته با دانسیته نسبی متوسط و با طبقه‌بندی SP استفاده شده است. جنس لایه‌نازک از مصالح با خصوصیات مقاومتی ضعیف نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس طراحی و ساخته شده است (شکل ۲).

آزمایش‌های مدل فیزیکی به‌وسیله مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، انجام شده است. در مرحله اول به‌منظور دوری از تأثیرات شرایط جداره مخزن بر نتایج، قبل از شروع



شکل ۱. شکل کلی مسئله مورد بررسی

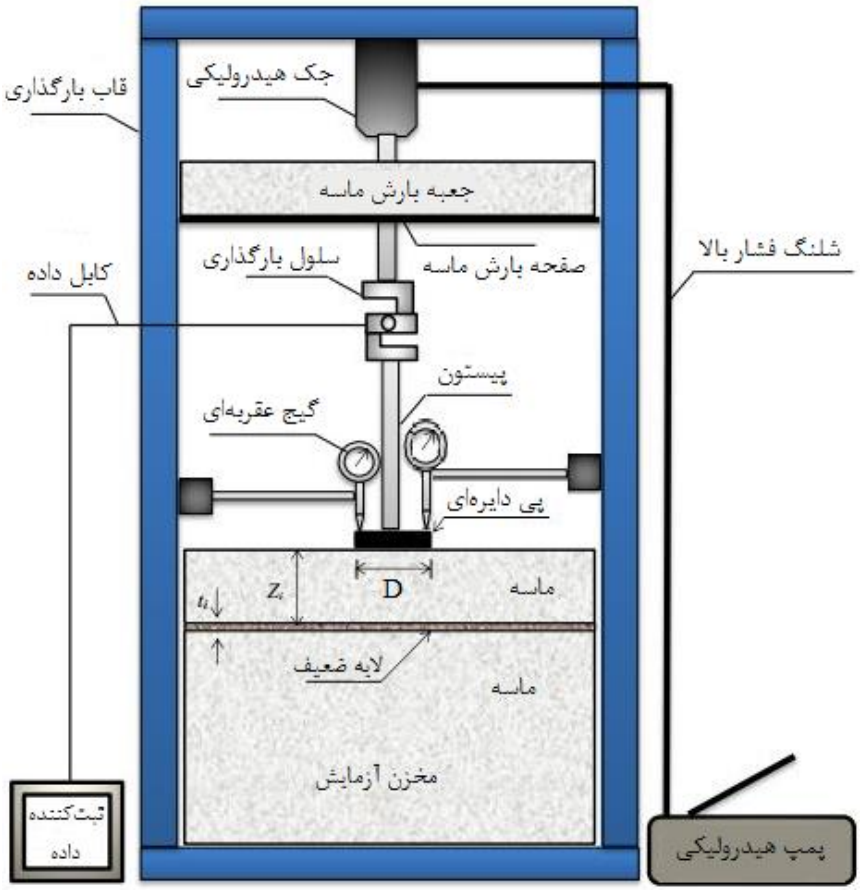
Fig. 1. Schematic of physical model

نمونه‌سازی، سطوح داخلی مخزن با روغن مخصوص روغن‌کاری می‌شود. برای رسیدن به دانسیته موردنظر، جعبه بارش در قسمت بالایی چهارچوب بارگذاری طراحی و ساخته شده است؛ و ماسه از ارتفاع ثابت ۶۰ سانتی‌متر تخلیه شده است.

پی صلب مدل به‌وسیله ورق فولادی به قطر ۸ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر، مدل‌سازی گردید و پی مدل در مرکز مخزنی که از مصالح ماسه‌ای و میان‌لایه نازک ضعیف به ارتفاع مشخص مطابق با برنامه‌ی آزمایش‌ها پر شده است، قرار داده می‌شود. باتوجه‌به نمودارهای حباب تنش (منحنی‌های هم تنش) بر اساس نظریه بوسینسک، در عمقی حدود ۴ R و فاصله از مرکز پی حدود ۲ R از هر طرف پی، تنش قائم به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد و چنانچه این معیار ۵٪ تنش قائم نیز در نظر گرفته شود، فواصل مذکور حدود ۵/۵ R و ۲/۵ R خواهد بود[۱۶]؛ بنابراین عمق و شعاع مخزن استوانه‌ای، به‌ترتیب ۱۷/۵ R و ۸/۷۵ R (از هر طرف) است و مرزهای مخزن هیچ‌گونه تأثیر منفی بر پاسخ مدل فیزیکی ندارد.

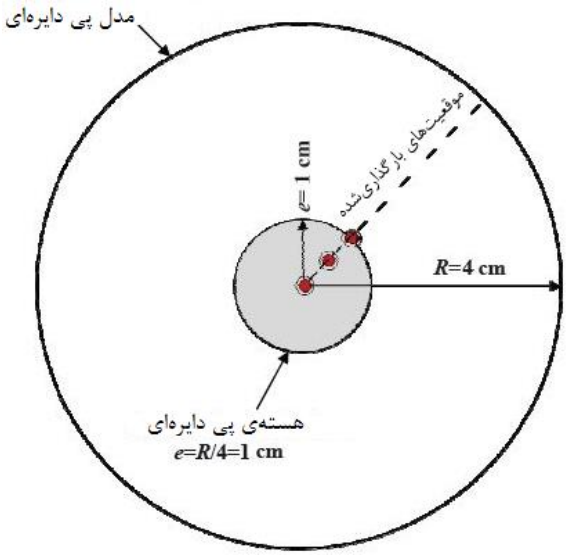
در این تحقیق باتوجه‌به اینکه پی دایره‌ای زیر بار برون‌محوری قرار داده می‌شود، برای پی هسته‌ی پی تعریف می‌شود به‌طوری‌که اگر بار خارج از مرکز درون‌هسته‌ی پی وارد شود، همه‌ی پی، تنش فشاری را تحمل می‌کند و اگر بارگذاری در مرز هسته وارد شود، تنش فشاری در گوشه پی صفر می‌شود. برای پی دایره‌ای، مرز هسته $\frac{R}{4}$ است و بارگذاری درون مرز هسته، باعث می‌شود که مساحت کل پی، تحت‌فشار قرار بگیرد[۱۷]. به همین دلیل دو مقدار خروج از مرکزیت یکی در مرز هسته و دیگری نصف مرز هسته در برنامه‌های آزمایش پی دایره‌ای در نظر گرفته شده است. در این تحقیق همان‌طور که در برنامه‌های آزمایش نشان داده می‌شود، سه بارگذاری فرض شده است، مرکزی (e=۰)، خارج از مرکز و درون‌هسته (e=۰/۵ cm) و خارج از مرکز و روی مرز هسته (e=۱ cm). هسته‌ی پی و موقعیت‌های بارگذاری شده در شکل ۳ نشان‌داده‌شده است.

وقتی یک پی تحت بار خارج از مرکز قرار می‌گیرد، چرخش پی اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه به‌منظور محاسبه چرخش پی، دو گیج برای اندازه‌گیری نشست پی در دو گوشه پی و در جهت اعمال بار خارج از مرکز به‌کارگرفته‌شده است. کج‌شدگی پی باتوجه‌به اختلاف بین نشست‌های ثبت‌شده توسط دو گیج محاسبه شده است. همچنین اثر لایه‌های نازک ضعیف روی چرخش پی‌ها، به‌عنوان یک موضوع ناشناخته، برای شناسایی



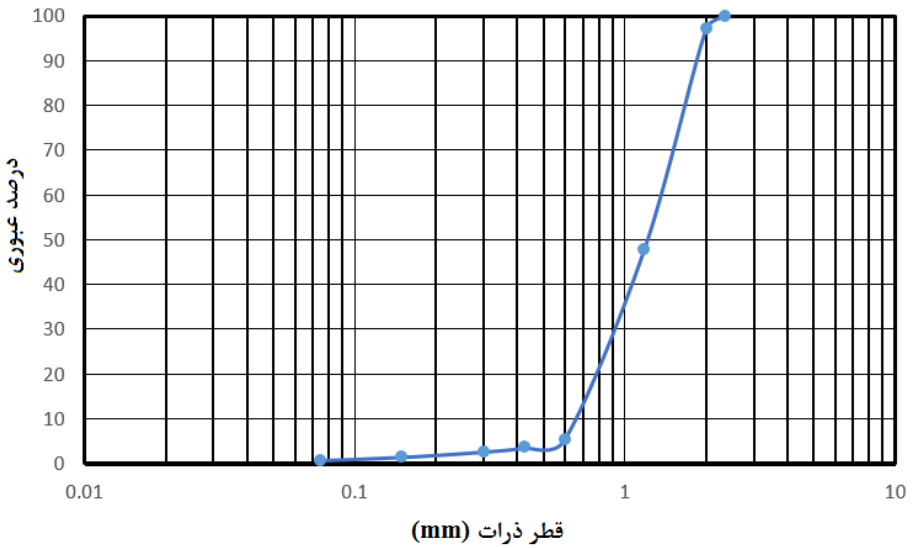
شکل ۲. نمایی از مدل فیزیکی ساخته شده

Fig. 2. A view of the physical model and loading frame



شکل ۳. هسته‌ی پی برای پی دایره‌ای و موقعیت‌های بارگذاری شده

Fig. 3. Footing core for circular footing and loaded locations



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی ماسه

Fig. 4. Gradation curve for sand

اثر لایه‌های نازک ضعیف روی BCR که این پارامتر به‌عنوان نسبتی بی‌بعد از ظرفیت باربری نهایی در خاک ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف به خاک ماسه‌ای همگن تعریف می‌شود (رابطه (۱))، برای پی‌های بارگذاری شده به‌صورت مرکزی و خارج از مرکز در این مطالعه بررسی شده است.

$$BCR = \frac{q_{u(CFWTL)}}{q_{u(CFHSB)}} \qquad (۱)$$

که در آن q_u(CFWTL) فشار باربری ماسه دارای لایه نازک ضعیف و q_u(CFHSB) فشار باربری ماسه یکنواخت است.

بار به‌وسیله جک هیدرولیکی دستی و با سرعت ۱ mm/min به پی منتقل می‌شود. بار اعمالی از طریق جک هیدرولیکی، به کمک لود سل نصب شده به پیستون جک و با ظرفیت ۵۰ kN ثبت می‌گردد. برای ثبت نشست‌های پی، از گیج‌های عقربه‌ای بادقت ۰/۰۱ mm استفاده شده است.

۲- ۲- خصوصیات ماسه بستر

ماسه بستر، از کارخانه‌های تولید ماسه سیلیسی غرب ایران، با سیلیس حدود ۹۶ درصد، تأمین شده است. ماسه در شرایط خشک‌شده در هوا استفاده شده است. مطابق طبقه‌بندی یکنواخت، ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) توصیف می‌گردد. توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش الک‌خشک بر طبق استاندارد[۱۸]ASTM D422-90 به‌دست‌آمده و در شکل ۴ نشان‌داده‌شده است. برای دستیابی به دانسیته نسبی یکسان در آزمایش‌ها، ماسه به روش بارش‌خشک، از ارتفاع سقوط یکسان ریخته می‌شود. برخی از مشخصات فیزیکی ماسه در جدول ۱ نمایش‌داده‌شده است.

دانسیته نسبی، Dr ، مطابق استانداردهای شماره ASTM D 4253-00 و ASTM D4254-00 (ASTM, 2004a, 2004b) تعیین شده است [۱۹و ۲۰]. از آنجا که نسبت D/d_{50} بزرگتر از ۵۰ است؛ لذا مطابق توصیه بسیاری از محققان(به عنوان مثال تیلور، تویوساوا و همکاران)، اثر اندازه ذرات را می‌توان ناچیز در نظر گرفت[۲۱و ۲۲].

پارامترهای مقاومت برشی ماسه که تابعی از سطح تنش نرمال است، به‌وسیله سه آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است. قابل‌ذکر است که سطح تنش در توده خاک مدل کوچک‌مقیاس برای عمق مؤثر، کمتر از حدود ۴۶ kPa است. نتیجه آزمایش برش مستقیم متناظر با سطح تنش مدل ($16kPa < \sigma_v < 46kPa$) در شکل ۵ ارائه شده است.

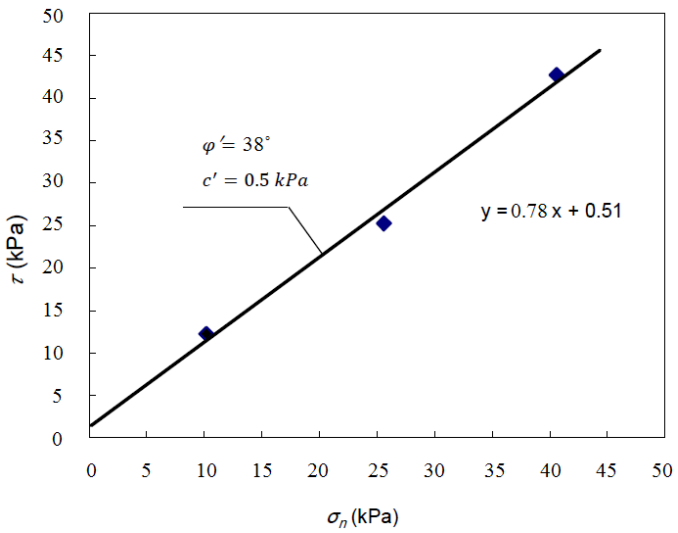
۲- ۳- خصوصیات لایه ضعیف

برای لایه ضعیف از مصالح با خصوصیات مقاومت برشی کمتر نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. در این تحقیق برای لایه ضعیف از پودر خاک رس CL با دانسیته بسیار کم، استفاده شده است. پودر خاک رس مصرفی با رطوبت طبیعی ۵/۵ درصد در تمامی آزمایش‌ها، به‌صورت ثابت استفاده شده

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی ماسه در آزمایش‌های مدل

Table 1. Geotechnical parameters of sand used in model tests

خصوصیات	مقدار
حداکثر اندازه دانه، Dmax (mm)	۲/۳۶
اندازه متناظر با ۶۰ درصدریزتر، D60(mm)	۱/۴۴
اندازه متوسط دانه، D50(mm)	۱/۲۶
اندازه متناظر با ۳۰ درصد ریزتر، D30(mm)	۰/۹
اندازه مؤثر، D10(mm)	۰/۶۵
ضریب یکنواختی، Cu	۲/۱۵
ضریب خمیدگی، Cc	۰/۸۴
چگالی ویژه، Gs	۲/۶۴
وزن مخصوص خشک حداکثر، γ_{dmax} (kN/m^3)	۱۹/۸۶
وزن مخصوص خشک حداقل، γ_{dmin} (kN/m^3)	۱۳/۷۴
وزن مخصوص خشک، γ_d (kN/m^3)	۱۵/۷۲
دانسیته نسبی، Dr (%)	۳۹
طبقه‌بندی خاک، (USCS)	SP
زاویه اصطکاک داخلی موثر، φ'	۳۸
چسبندگی موثر (kPa)، c'	۰/۵



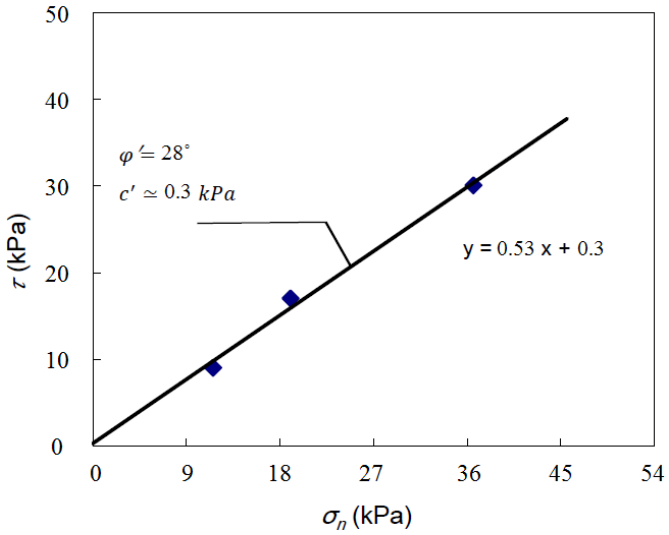
شکل ۵. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه بستر، با سطح تنش مؤثر (16kPa < σv < 46kPa)

Fig. 5. Results of direct shear test on sand bed, with effective stress level (16 kPa < σv < 46 kPa)

جدول ۲. پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح ضعیف در آزمایش‌های مدل

Table 2. Geotechnical parameters of weak materials in model tests.

خصوصیات	مقدار
چگالی ویژه، Gs	۲/۶۶
وزن مخصوص، (kN/m^3)	۱۲/۱
حد روانی، LL (%)	۲۷
حد خمیری، PL (%)	۱۹
نشانه خمیری، PI (%)	۸
طبقه‌بندی خاک، (USCS)	CL
درصد رطوبت، ω (%)	۵/۵
زاویه اصطکاک داخلی موثر، φ'	۲۸
چسبندگی موثر (kPa)، c'	۰/۳



شکل ۶. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی لایه ضعیف، با سطح تنش مؤثر (16kPa < σv < 46kPa)

Fig. 6. Results of direct shear test on weak layer, with effective stress level (16 kPa < σv < 46 kPa)

است. مشخصات فیزیکی مصالح ضعیف در جدول ۲ نشان‌داده‌شده است.

پارامترهای مقاومت برشی خاک رس، به‌وسیله سه آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است. باتوجه‌به اینکه جنس مصالح لایه ضعیف رسی بوده و امکان شکستگی دانه‌ها در آن منتفی است؛ لذا نتایج پارامترهای مقاومت برشی وابسته به سطح تنش نخواهد بود، نتیجه آزمایش برش مستقیم متناظر با سطح تنش مدل $16kPa < \sigma_v < 46kPa$ در شکل ۶ ارائه شده است. قابل‌ذکر است باتوجه‌به اینکه رطوبت خاک رس بسیار کم بوده، به همین دلیل چسبندگی آن شبیه به خاک‌های دانه‌ای، تقریباً صفر به‌دست‌آمده است.

۲- ۴- روند انجام آزمایش‌ها

مدل‌سازی فیزیکی و ساخت نمونه مدل آزمایشگاهی دارای مراحلی است که به‌صورت گام به گام انجام می‌گیرد. در مرحله اول به‌منظور دوری از تأثیرات شرایط جداره مخزن بر نتایج، قبل از شروع نمونه‌سازی، سطوح

داخلی مخزن با روغن مخصوص روغن‌کاری می‌شود. در شروع آزمایش، جعبه دستگاه بارش، در بالای مخزن آزمایش و در ارتفاع مشخص نصب می‌شود و سپس ماسه در لایه‌های با ضخامت ۴ cm به روش بارش اجرا شده است. کنترل دانسیته ماسه بارشی، با قراردادن قوطی‌هایی با حجم مشخص در نقاط مختلف مخزن صورت‌گرفته است. لایه‌های نازک ضعیف با استفاده از شابلون‌های ساده در عمق‌ها و ضخامت‌های مشخص اجرا شده‌اند و لایه‌های بعدی ماسه تا رسیدن به سطح موردنیاز اجرا شده‌اند.

پی دایره‌ای مدل در موقعیت مرکز مخزن بر روی سطح ماسه قرار داده می‌شود. در نهایت بار به‌وسیله جک هیدرولیکی دستی با سرعت mm/min ۱ به پی مدل اعمال می‌شود. سپس توسط گیج عقربه‌ای، نشست پی مدل با دقت ۰/۰۱ mm اندازه‌گیری می‌شود. همچنین به دلیل بار خارج از مرکز، نشست‌های پی در دو لبه انتهایی آن توسط دو گیج که در دو طرف پی و در جهت بار خارج از مرکز قرار دارند، برای محاسبه چرخش پی دایره‌ای استفاده شده است. در تعدادی از موارد، برای اطمینان از نتایج، آزمایش‌ها تکرار شده‌اند.

۳- پارامترها و برنامه آزمایشگاهی

پارامترهای متغیر در آزمایش‌ها)مطابق با شکل شماتیک ۱ (و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ به‌صورت پارامتریک نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس طراحی و ساخته شده است. پانزده آزمایش برای مطالعه‌ی اثر بارهای مرکزی و برون محوری روی یک پی دایره‌ای، برای هر دو ماسه‌ی همگن (یکنواخت) و ماسه با لایه نازک ضعیف انجام شد. این ۱۵ تست شامل سه گروه آزمایش‌ها روی یک پی دایره‌ای برای مطالعه اثر بارهای مرکزی و خارج از مرکز متفاوت (۰/۱۲۵ ,e/D = ۰, ۰/۰۶۲۵) روی پاسخ بار – تغییرمکان ماسه انجام شد. همچنین در این آزمایش‌ها دو مقدار برای ضخامت لایه نازک و برای عمق قرارگیری این لایه نیز دو مقدار در نظر گرفته شده است تا بتوان اثر این دو پارامتر یعنی ضخامت و عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف را بر روی نتایج بررسی کنیم.

در این تحقیق، پی دایره‌ای روی بستر ماسه‌ای همگن به‌اختصار با حروف CFHSB[1] و پی دایره‌ای روی بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف به اختصار با حروف CFWTL[2] بیان می‌شود.

۴- اثر مقیاس

مدل فیزیکی در واقع نمونه واقعی کوچک شده است که اگر به درستی طراحی و ساخته شود، تقریباً رفتاری مشابه نمونه واقعی خواهد داشت. با این حال، باید توجه داشت که رفتار یک مدل فیزیکی کاملا با رفتار نمونه واقعی مطابقت ندارد و نتایج مدل‌های فیزیکی باید با توجه به استدلال‌های مهندسی تفسیر شوند. تغییر در اندازه یک مدل پی کم عمق منجر به تغییر در ظرفیت باربری آن می شود. دلایل مختلفی برای ظهور اثر مقیاس در مدل‌سازی پی کم عمق وجود دارد. با این حال، یکی از دلایل اصلی تغییر مکانیسم شکست پی در هنگام کاهش مقیاس است که باعث ایجاد اثر مقیاس می‌شود [۲۳].

به طورکلی در مدل‌های فیزیکی سازه‌های خاکی این بحث مطرح می‌شود که باید تعداد بی‌نهایت دانه‌های خاک در سطح مشترک خاک و سازه یا سطح تماس لایه‌های خاک و در مرزهای مدل وجود داشته باشد. بنابراین، کوچک‌کردن دانه‌ها در مدل‌های خاک معمول نیست زیرا تعداد دانه‌های خاک در منطقه قرارداد آنقدر زیاد است که می‌توان آن را بی‌نهایت فرض کرد[۲۳]. بنابراین، در این مطالعه، ابعاد پلان مدل پی در n=۷/۵ کاهش می‌یابد. با این حال، اندازه دانه‌های خاک در نمونه فیزیکی و نمونه واقعی یکسان فرض می‌شود. بنابراین، تفاوت در سطح تنش را می‌توان یکی از عوامل اصلی دیگر برای تفاوت رفتاری بین مدل فیزیکی و نمونه واقعی در مدل‌سازی تحت شتاب گرانشی (g ۱) در نظر گرفت. بر این اساس، ای ساواف استفاده از مدل های g ۱ را تنها برای پیش‌بینی رفتارهای کلی و عمومی نمونه‌های اصلی پیشنهاد کرد[۲۴]. مویر وود از تجزیه و تحلیل ابعادی و معادلات شباهت برای ارائه ضرایب مقیاس مورد استفاده در مهندسی ژئوتکنیک استفاده کرد که برخی از آنها در جدول ۴ ارائه شده است[۲۵]. امکان تعمیم نتایج مدل فیزیکی به نمونه اصلی با استفاده از ضرایب مقیاس و استفاده گسترده از مدل‌سازی فیزیکی وجود دارد.

۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایش‌های مدل‌فیزیکی پی‌دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف در اثر بارگذاری‌های مرکزی و خارج از مرکز، ارائه شده است. برای تعیین ظرفیت‌باربری نهایی پی‌دایره‌ای، ترسیم منحنی‌های فشار – نشست برای پی مدل‌ها موردنیاز است. در این منحنی‌ها، نشست پی (S) بر حسب قطر پی (D) به‌صورت نسبت (S/D, %) ارائه شده است.

1. Circular Footing on Homogeneous Sand Bed
2. Circular Footing on Sandy Bed with Weak Thin Layer

جدول ۳. برنامه آزمایش‌های مدل فیزیکی

Table 3. Program of model tests

شماره آزمایش	نوع آزمایش	پارامترهای ثابت	پارامترهای متغیر
۱	ماسه همگن (بدون لایه‌نازک) (CFHSB)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰$, $t_i/D = ۰$, $e/D = ۰$
۲	ماسه همگن (بدون لایه‌نازک) (CFHSB)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰$, $t_i/D = ۰$, $e/D = ۰/۰۶۲۵$
۳	ماسه همگن (بدون لایه‌نازک) (CFHSB)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰$, $t_i/D = ۰$, $e/D = ۰/۱۲۵$
۴	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰/۵$, $t_i/D = ۰/۱$, $e/D = ۰$
۵	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰/۵$, $t_i/D = ۰/۱$, $e/D = ۰/۰۶۲۵$
۶	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰/۵$, $t_i/D = ۰/۱$, $e/D = ۰/۱۲۵$
۷	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰/۵$, $t_i/D = ۰/۲$, $e/D = ۰$
۸	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰/۵$, $t_i/D = ۰/۲$, $e/D = ۰/۰۶۲۵$
۹	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۰/۵$, $t_i/D = ۰/۲$, $e/D = ۰/۱۲۵$
۱۰	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۱$, $t_i/D = ۰/۱$, $e/D = ۰$
۱۱	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۱$, $t_i/D = ۰/۱$, $e/D = ۰/۰۶۲۵$
۱۲	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۱$, $t_i/D = ۰/۱$, $e/D = ۰/۱۲۵$
۱۳	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۱$, $t_i/D = ۰/۲$, $e/D = ۰$
۱۴	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۱$, $t_i/D = ۰/۲$, $e/D = ۰/۰۶۲۵$
۱۵	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$Dr = ۳۹ \%$, $D_f/D = ۰$	$Zi/D = ۱$, $t_i/D = ۰/۲$, $e/D = ۰/۱۲۵$

جدول ۴. ضرایب اثر مقیاس [۲۵]

Table 4. Coefficients of scale effect

کمیت	مدل آزمایشگاهی (۱g)
طول	$۱/n$
چگالی جرمی	۱
تنش	$۱/n$
نیرو	$۱/n^۳$
نیرو در طول	$۱/n^۲$

جدول ۵. مقایسه ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای مدل با روابط تحلیلی محققان مختلف

Table 5. Comparison of the ultimate bearing capacity of circular footing model with the analytical formula of different researchers

Martin, (2005)	Vesic, (1973)	Meyerhof, (1963)		زاویه حداکثر مقاومت برشی (درجه) و چسبندگی (kPa)
۵۸	۷۸	۶۴	N_γ	۳۸°, ۰/۵ (kPa)
۸۷/۷۲	۹۲/۳	۷۶/۴۵	q_u (kPa)	

با توجه به این‌که بار اعمالی به‌صورت کرنش – کنترل به‌وسیله جک هیدرولیکی و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده است، بنابراین پس از گسیختگی خاک بستر زیر پی، تغییر شکل در سیستم خاک – پی ادامه خواهد یافت، اما بار اعمالی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود و تمایل به برآمدگی کمی در اطراف خاک مجاور در هر دو طرف پی را می‌توان در اکثر مراحل بارگذاری مشاهده کرد. شایان ذکر است به این موضوع در مقاله کلیدی وسیک ۱۹۷۳ نیز اشاره شده است[۲۶].

۵- ۱- رفتار پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه ضعیف تحت بارهای مرکزی و خارج از مرکز

منحنی فشار – نشست پی دایره‌ای در هر دو شرایط ماسه همگن و ماسه دارای لایه‌نازک ضعیف با ضخامت t/D=۰/۱ و t/D=۰/۲ در اعماق و خروج از مرکزیت‌های موردنظر به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش‌داده‌شده است و برای هر منحنی، نقطه معادل با ظرفیت باربری نهایی با رنگ نارنجی مشخص شد. مطابق منحنی فشار – نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن که در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است، مقدار ظرفیت باربری نهایی ۹۷/۲ کیلوپاسکال و مقدار نشست متناظر با نقطه اوج، ۸ میلی‌متر و مقدار نشست نسبی (S/D, %) ۱۰ درصد به‌دست‌آمده است. مطابق شکل، وجود نقطه اوج در منحنی فشار – نشست، بیانگر گسیختگی برشی کلی است.

برای مقایسه و صحت‌سنجی مدل، مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت با روش‌های تحلیلی محققان مختلف (روابط (۲) تا (۷)) [۲۶-۲۸] برای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی متناظر با سطح تنش مدل محاسبه و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج، مقادیر محاسباتی با روش‌های وسیک و مارتین با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد.

$$q_u = 0.3\gamma.D.N_\gamma.S_\gamma + 1.3C.N_C.S_C \quad (۲)$$

$$N_q = \tan^2(45+\frac{\varphi}{2}).e^{\pi.\tan\varphi} \quad (۳)$$

$$N_\gamma = 2(N_q+1)\tan\varphi \qquad \text{(Vesic, 1973)} \quad (۴)$$

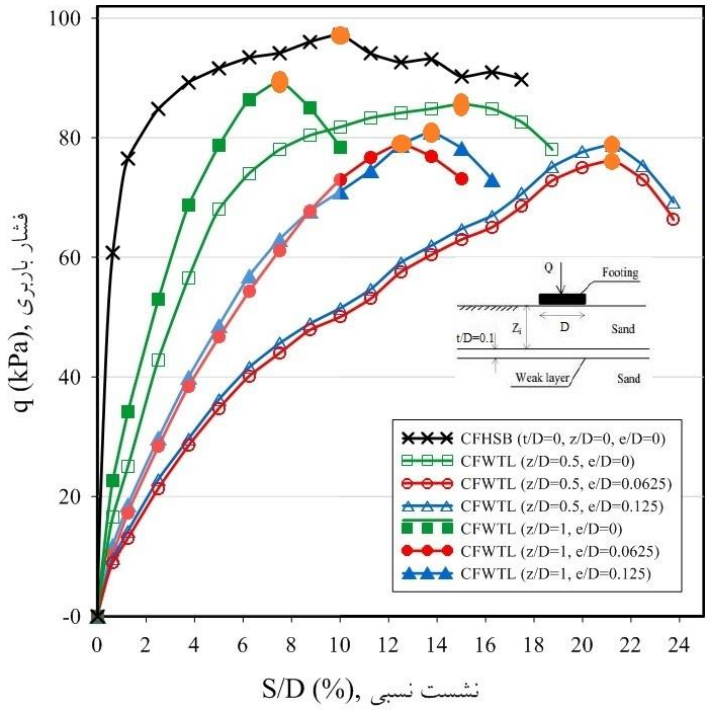
$$N_\gamma = (N_q-1)\tan 1.4\varphi \qquad \text{(Meyerhof, 1963)} \quad (۵)$$

$$N_\gamma = (N_q-1)\tan 1.32\varphi \qquad \text{(Martin, 2005)} \quad (۶)$$

$$N_C = (N_q-1)\cot\varphi \quad (۷)$$

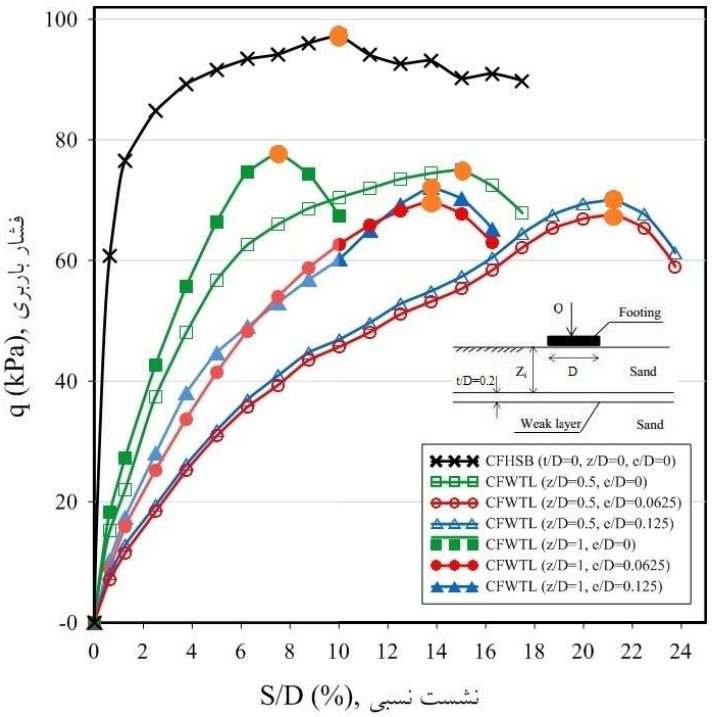
مطابق شکل‌های ۷ و ۸، وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک- شالوده شده است. بدیهی است تأثیر لایه ضعیف با ضخامت بیشتر و بار خارج از مرکز مشهودتر است. بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی در عمق بحرانی D ۰/۵ و خروج از مرکزیت D ۰/۰۶۲۵ و ضخامت لایه ضعیف D ۰/۲ به میزان ۳۰ درصد (از ۹۷/۲ کیلوپاسکال به ۶۷/۵۶ کیلوپاسکال) رخ داده است.

مطابق شکل‌های ۷ و ۸ سختی سیستم خاک – پی تا قبل از نقطه اوج که به‌صورت $\Delta q/\Delta s$ تعریف می‌شود، با وجود لایه نازک ضعیف کمتر از حالت خاک همگن است. نشست متناظر با نقطه اوج منحنی‌ها، با وجود لایه نازک ضعیف و خروج از مرکزیت، بیشتر از خاک همگن است (برای خاک



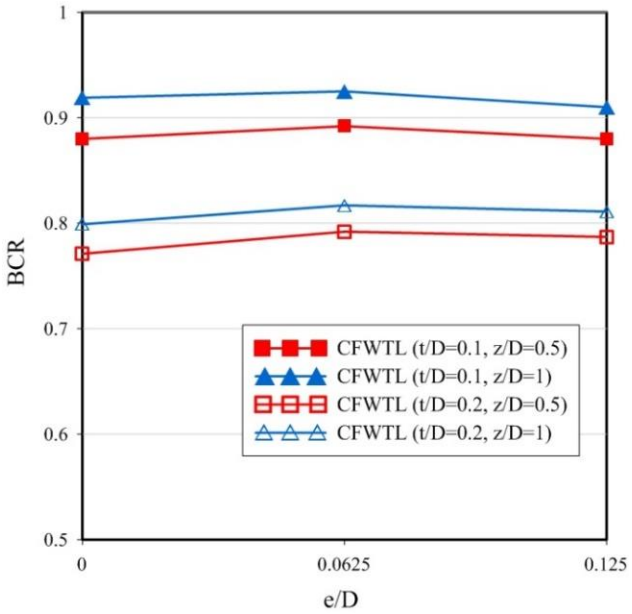
شکل ۷. منحنی فشار – نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت t/D=۰/۱

Fig. 7. The pressure-settlement curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer with thickness of t/D=0.1



شکل ۸. منحنی فشار – نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت t/D=۰/۲

Fig. 8. The pressure-settlement curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer with thickness of t/D=0.2.



شکل ۹. مقایسه مقادیر بی‌بعد شده ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای (BCR) نسبت به خروج از مرکزیت‌های بی‌بعد شده

Fig. 9. Comparison of normalized values of the ultimate bearing capacity of circular footing (BCR) versus normalized eccentric loads.

همگن ۸ میلی‌متر و با وجود لایه نازک ضعیف و بار خارج از مرکز، بین ۱۰ تا ۱۷ میلی‌متر متغیر است). لازم به ذکر است که پارامتر $\Delta q/\Delta s$ به‌نوعی مدول سکانتی در منحنی‌های فشار- نشست است که بر اساس شیب خط سکانتی تعریف می‌شود.

نتایج فوق نشان‌دهنده تأثیر وجود لایه‌نازک ضعیف و بار خارج از مرکز بر ظرفیت باربری نهایی پی و سختی سیستم خاک- پی دارد. میزان این تأثیر به‌طورکلی بستگی به اختلاف مقاومت برشی بین لایه ضعیف و ماسه بستر و ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف و بار خارج از مرکز دارد.

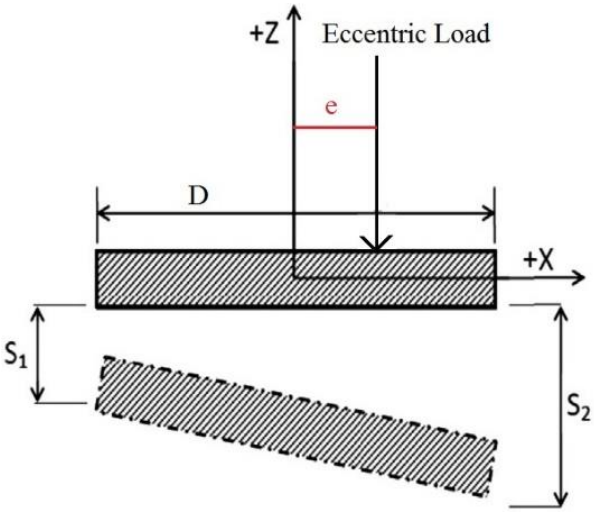
همانطورکه از شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، وجود لایه نازک ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به بستر ماسه‌ای همگن شده است و بارگذاری خارج از مرکز باعث کاهش بیشتر ظرفیت باربری نهایی و افزایش نشست پی دایره‌ای شده است. به‌طوری‌که اگر بارگذاری خارج از مرکز و عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف برابر با z/D=۰/۵ باشد، نشست‌های پی نسبت به حالت‌های دیگر بسیار افزایش یافته است.

مقادیر نسبت بی‌بعدشده ظرفیت باربری نهایی (BCR) برای حالت‌های مختلف در شکل ۹ مقایسه شده‌اند. مطابق شکل ۹، اگر بارگذاری خارج از مرکز در نصف مرز هسته (e/D=۰/۰۶۲۵) به پی اعمال شود، نسبت بی‌بعدشده ظرفیت باربری نهایی (BCR) برای همه‌ی حالت‌ها کمی بیشتر از بارگذاری مرکزی و بارگذاری خارج از مرکز دیگر یعنی وقتی بار در مرز هسته (e/D=۰/۱۲۵) اعمال شده، به‌دست آمده است.

۵- ۲- چرخش پی دایره‌ای در اثر بارهای خارج از مرکز با وجود لایه نازک ضعیف

وقتی‌که بار به‌صورت خارج از مرکز بر پی سطحی وارد می‌شود، چرخش پی اتفاق می‌افتد و فشار زیر پی یکنواخت نمی‌ماند. شکل شماتیک چرخش پی دایره‌ای تحت تأثیر بار خارج از مرکز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری چرخش پی تحت تأثیر بار خارج از مرکز، نشست‌های پی در دو لبه انتهایی آن توسط دو گیج عقربه‌ای که در دو طرف پی و در جهت بار خارج از مرکز قرار دارند، برای محاسبه چرخش پی دایره‌ای استفاده شد. در شکل ۱۱ نمایی از چرخش پی دایره‌ای با اعمال بار خارج از مرکز با وجود لایه نازک ضعیف در مدل فیزیکی کوچک مقیاس نشان داده شده است.

منحنی فشار – چرخش پی دایره‌ای در هر دو شرایط ماسه همگن و ماسه دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت t/D=۰/۱ و t/D =۰/۲ در اعماق و خروج از مرکزیت‌های مختلف به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۱۴ مقادیر چرخش نهایی پی دایره‌ای مربوط به لحظه‌ی شروع بارگذاری خارج از مرکز تا وقتی‌که پی دایره‌ای به



شکل ۱۰. چرخش پی دایره‌ای ناشی از بار خارج از مرکز

Fig. 10. Rotation of circular footing due to eccentric load

شکل ۱۱. نمایی از چرخش پی دایره‌ای در اثر بارگذاری خارج از مرکز با وجود لایه نازک ضعیف در مدل فیزیکی کوچک مقیاس

Fig. 11. A view of circular footing rotation due to eccentric loading with a weak thin layer in small scale physical model

ظرفیت باربری نهایی می‌رسد، برای بستر ماسه‌ای همگن و بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف تحت تأثیر بارهای خارج از مرکز نشان داده شده است. مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، شیب پی برای ماسه همگن با افزایش خروج از مرکزیت افزایش و ظرفیت باربری به طور قابل توجهی کاهش یافته است ولی برای حالتی‌که لایه ضعیف وجود دارد وقتی که بار خارج از مرکز بی‌بعد شده (e/D) در محلی برابر با ۰/۰۶۲۵ وارد شد، شیب پی کمی بیشتر و ظرفیت باربری کمی کمتر از حالتی‌که بار در محلی برابر با D ۰/۱۲۵ وارد شد، به‌دست آمده است.

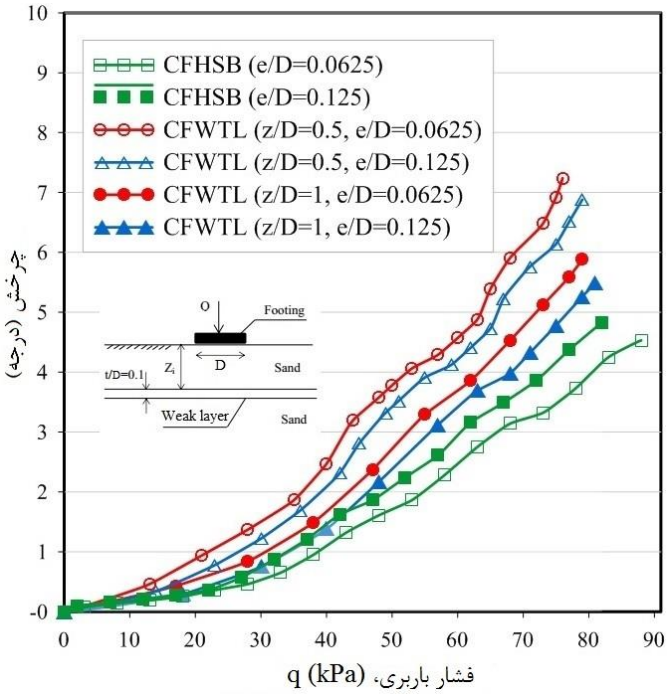
مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، چرخش پی دایره‌ای تحت تأثیر بار خارج از مرکز با وجود لایه ضعیف با ضخامت بیشتر (یعنی t/D=۰/۲)، بیشتر از حالتی‌که ضخامت لایه ضعیف کمتر (یعنی t/D=۰/۱) است، به‌دست آمده است. بیشترین چرخش پی دایره‌ای از لحظه‌ی اعمال بار تا وقتی‌که به ظرفیت باربری نهایی می‌رسد، مربوط به حالتی است که ضخامت لایه ضعیف D ۰/۲ و بار خارج از مرکز D ۰/۰۶۲۵ و محل قرارگیری لایه ضعیف در عمق D ۰/۵ است و مقدار چرخش پی دایره‌ای در این حالت برابر با ۸/۲ درجه به‌دست آمده است. همچنین کمترین چرخش پی دایره‌ای مربوط به حالتی است که ماسه همگن و بار خارج از مرکز D ۰/۰۶۲۵ است و مقدار کج‌شدگی پی دایره‌ای در این حالت برابر با ۴/۵ درجه به‌دست آمده است.

در این مطالعه نشان داده شد که برای بستر ماسه‌ای همگن با افزایش e/D، چرخش پی دایره‌ای کمی بیشتر شده است ولی در صورت وجود لایه نازک ضعیف به ازای ۱ و Z/D =۰/۵ با افزایش e/D ، چرخش پی دایره‌ای کمی‌کمتر شده است به‌طوری‌که چرخش برای e/D = ۰/۱۲۵ کمی‌کمتر از چرخش برای e/D=۰ /۰۶۲۵ شده است، که دلیل آن می‌تواند وجود لایه نازک ضعیف و تغییر در مکانیزم گسیختگی باشد. مقادیر چرخش نهایی پی دایره‌ای برای تمامی حالت‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

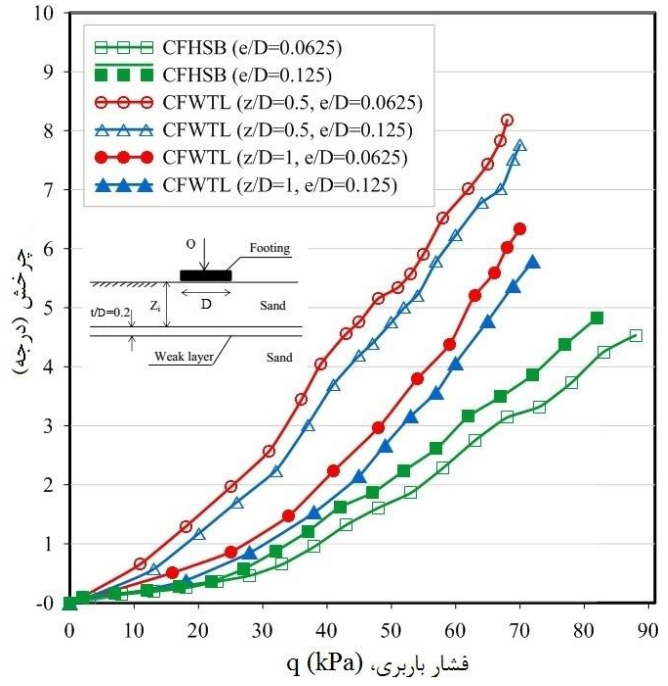
رفتار پی‌دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف، به‌وسیله آزمایش‌های مدل کوچک مقیاس بررسی شده است. هدف از این مطالعه، تعیین تأثیر بارهای عمودی خارج از مرکز بر چرخش پی‌دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک افقی ضعیف در ضخامت‌ها و عمق‌های قرارگیری متفاوت است. بر اساس تحقیقات، نتیجه‌گیری‌های اصلی زیر را می‌توان ارائه نمود:

- وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز، باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی پی و سختی سیستم خاک- پی شده است. میزان این تأثیر بستگی به ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف دارد.



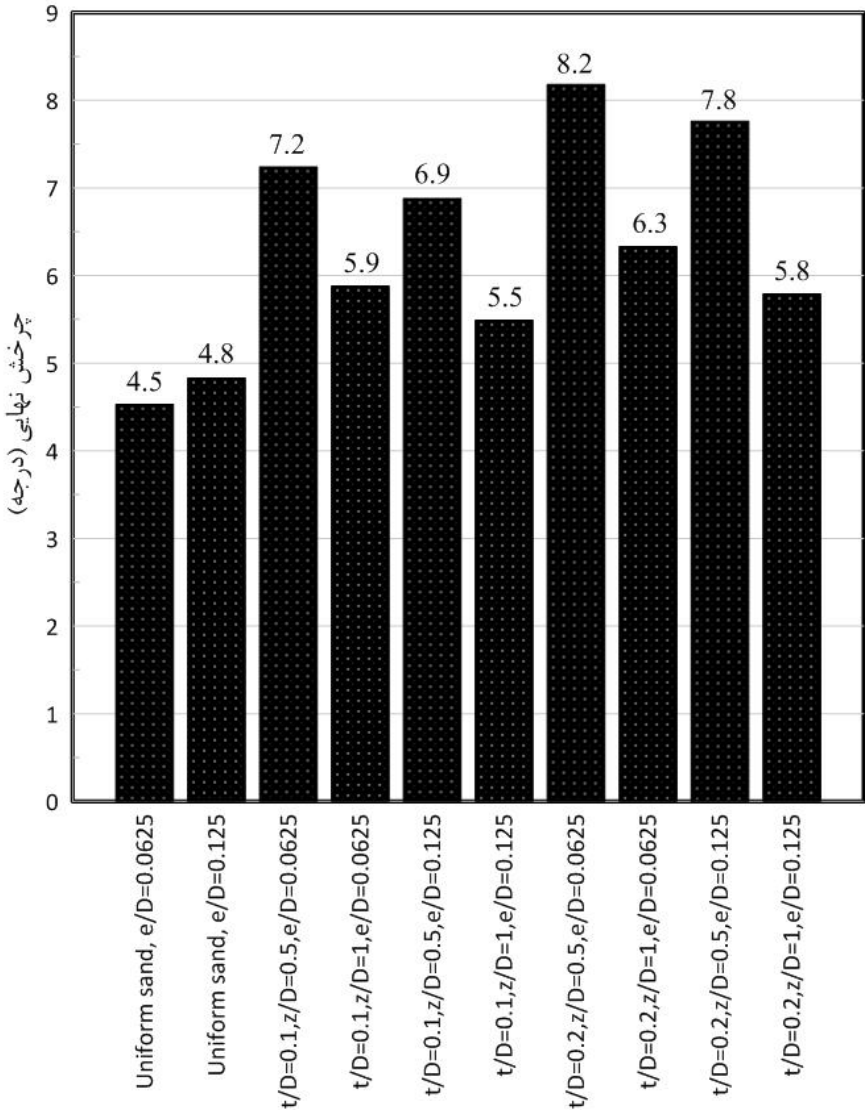
شکل ۱۲. منحنی فشار - چرخش پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت t/D=۰/۱

Fig. 12. The pressure-rotation curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer and thickness of t/D=0.1



شکل ۱۳. منحنی فشار - چرخش پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت t/D=۰/۲

Fig. 13. The pressure-rotation curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer and thickness of t/D=0.2



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر چرخش نهایی پی دایره‌ای، برای بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف تحت تأثیر بارهای خارج از مرکز

Fig. 14. Comparison of ultimate rotation values of circular footing for homogeneous sand bed, with a weak thin layer under the influence of eccentric loads

- وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز باعث افزایش چرخش پی دایره‌ای نسبت به‌حالتی‌که بستر ماسه‌ای همگن است، شده است.
- برای ماسه همگن بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز ۰/۱۲۵ D برابر با ۴/۸ درجه به‌دست آمده است و به‌میزان ۷ درصد افزایش چرخش پی نسبت به ماسه همگن با بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D (از ۴/۸ درجه به ۴/۵ درجه)، رخ داده است.
- برای بستر ماسه‌ای با وجود لایه‌ی نازک ضعیف، بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D و ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۲ D و عمق قرارگیری ۰/۵ D برابر با ۸/۲ درجه به‌دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای ماسه همگن با بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D برابر به‌دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز ۰/۱۲۵ D و ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۱ D و عمق قرارگیری ۱ D برابر با ۵/۵ درجه به‌دست آمده است که کاهش ۳۳ درصدی را نشان داده است.
- برای بستر ماسه‌ای همگن و بستر ماسه‌ای با وجود لایه‌ی نازک ضعیف، بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D و ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۲ D و عمق قرارگیری ۰/۵ D برابر با ۸/۲ درجه به‌دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای ماسه همگن با بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D برابر

با ۴/۵ درجه به‌دست آمده است که کاهش ۴۵ درصدی را نشان داده است.

- با توجه به نتایج بیان شده برای بستر ماسه‌ای همگن چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D (بارگذاری در نصف مرز هسته) نسبت به بارگذاری خارج از مرکز دیگر (بارگذاری در مرز هسته) کاهش ۷ درصدی را نشان داده است ولی برای بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز ۰/۰۶۲۵ D نسبت به بارگذاری خارج از مرکز دیگر کمی بیشتر شده است، به طوری‌که وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۱ D و عمق قرارگیری ۰/۵ D است به‌میزان ۵ درصد افزایش و وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۱ D و عمق قرارگیری ۱ D است، به میزان ۷ درصد افزایش و وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۲ D و عمق قرارگیری ۰/۵ D است، به میزان ۵ درصد افزایش و وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف ۰/۲ D و عمق قرارگیری ۱ D است، به میزان ۸ درصد افزایش نشان داده شده است.
- با مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی محققان مختلف، مقادیر به‌دست آمده از نتایج تحلیلی وسیک و مارتین با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد، به‌طوری‌که روش تحلیلی وسیک کاهش ۵ درصدی و روش تحلیلی مارتین کاهش ۹ درصدی را نسبت به نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داده است و به‌همین دلیل روابط تحلیلی قبلی با نتایج آزمایشگاهی این تحقیق مطابقت نزدیکی را نشان داده است، همچنین نشان‌دهنده انتخاب صحیح پارامترهای مقاومت برشی متناظر با سطح تنش مؤثر در مدل فیزیکی بوده است.
- از دیگر نتایج این تحقیق این است که در تحقیقات صحرایی، هرگز نباید جزئیات کوچک زمین‌شناسی همانند لایه‌های نازک ضعیف و بارهای خارج از مرکز نادیده گرفته شود. در این تحقیق به‌منظور کم کردن اثر مقیاس، انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک مقیاس در سطح تنش‌های زیاد انجام شده است. از طرفی هدف اصلی این تحقیق، پیش‌بینی روند کلی رفتار پی دایره‌ای با حضور لایه نازک ضعیف و بار خارج از مرکز و کمّی کردن تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج چرخش نهایی پی دایره‌ای بوده است.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

BCR	نسبت $q_{u\ (CFWTL)}$ به $q_{u\ (CFHSB)}$
c'	چسبندگی، kPa
D	قطر پی، cm
D'	قطر مخزن مدل فیزیکی، cm
D_r	دانسیته نسبی
D_f	عمق مدفون پی، m
e	خروج از مرکزیت بار
G_s	چگالی ویژه
H	ارتفاع مخزن مدل فیزیکی، cm
LL	حد روانی
N_q,N_γ,N_c	ضرایب ظرفیت باربری
PI	نشانه خمیری
PL	حد خمیری
q	فشار باربری، kPa
$q_{u(CFWTL)}$	فشار باربری ماسه دارای لایه نازک ضعیف، kPa
$q_{u(CFHSB)}$	فشار باربری ماسه یکنواخت، kPa
R	شعاع پی دایره‌ای
S	نشست پی، mm
t_i	ضخامت لایه نازک ضعیف، mm
Z_i	عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف، mm
γ	وزن مخصوص، $kN/m3$
γ_d	وزن مخصوص خشک، kN/m^3
γ_{dmax}	وزن مخصوص خشک حداکثر، kN/m^3
γ_{dmin}	وزن مخصوص خشک حداقل، kN/m^3
φ'	زاویه اصطکاک داخلی، درجه
τ	تنش برشی، kPa
σ_n	تنش نرمال، kPa
σ_v	تنش قائم، kPa
ω	درصد رطوبت
$\Delta q/\Delta s$	نسبت تغییرات فشار باربری به تغییرات نشست

منابع

[1] H. Mahiyar, A.N. Patel, Analysis of angle shaped footing under eccentric loading, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 126(12) (2000) 1151-1156.

[2] M.J. Kenny, K.Z. Andrawes, The bearing capacity of footings on a sand layer overlying soft clay, Geotechnique, 47(2) (1997) 339-345.

[3] K. Papadopoulou, G. Gazetas, Eccentricity effects on bearing capacity of strip and square footings on two-layered clay, Geotechnical and Geological Engineering, 37 (2019) 4099-4120.

[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. Ziccarelli, C. Valore, S.R. Muscolino, V. Fioravante, Centrifuge tests on strip footings on sand with a weak layer, Geotechnical Research, 4(1) (2017) 47-64.

[6] G. Misir, M. Laman, Estimating the bearing capacity of single reinforced granular fill overlying clay, Geotextiles and Geomembranes, 46(6) (2018) 817-829.

[7] A.M. Hanna, G.G. Meyerhof, Ultimate bearing capacity of foundations on a three-layer soil, with special reference to layered sand, Canadian Geotechnical Journal, 16(2) (1979) 412-414.

[8] A.M. Basha, E.A. Eldisouky, Effect of eccentric loads on the behavior of circular footing with/without skirts resting on sand soil, International Journal of Geo-Engineering, 14(1) (2023) 13.

[9] Q.N. Pham, S. Ohtsuka, K. Isobe, Y. Fukumoto, T. Hoshina, Ultimate bearing capacity of rigid footing under eccentric vertical load, Soils and Foundations, 59(6) (2019) 1980-1991.

[10] A. TaghaviGhalesari, M.K. Tabari, A.J. Choobbasti, N. EsmaeilpourShirvani, Behavior of eccentrically loaded shallow foundations resting on composite soils, Journal of Building Engineering, 23 (2019) 220-230.

[11] C. Valore, M. Ziccarelli, S.R. Muscolino, The bearing capacity of footings on sand with a weak layer, Geotechnical Research, 4(1) (2017) 12-29.

[12] M. Askari, A.B. Khalkhali, M. Makarchian, N. Ganjian, The bearing capacity of circular footings on sand with thin layer: An experimental study, Geomechanics and Engineering, 27(2) (2021) 123-130.

[13] M. El Sawwaf, Experimental and numerical study of eccentrically loaded strip footings resting on reinforced sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(10) (2009) 1509-1518.

[14] P. Dastpak, S. Abrishami, S. Sharifi, A. Tabaroei, Experimental study on the behavior of eccentrically loaded circular footing model resting on reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 48(5) (2020) 647-654.

[15] M. Georgiadis, R. Butterfield, Displacements of footings on sand under eccentric and inclined loads, Canadian Geotechnical Journal, 25(2) (1988) 199-212.

[16] V. Murthy, 12 of of K of, in: Geotechnical Engineering, CRC Press, 2002, pp. 409-409.

[17] E. Badakhshan, A. Noorzad, Effect of footing shape and load eccentricity on behavior of geosynthetic reinforced sand bed, Geotextiles and Geomembranes, 45(2) (2017) 58-67.

[18] D. ASTM 422-90, 1990, Standard test method for particle-size analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[19] D. ASTM, 4253-00, 2004a, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[20] D. ASTM, 4254-00, 2004b, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[21] R. Taylor, Centrifuges in modelling: principles and scale effects, in: Geotechnical centrifuge technology, CRC Press, 2018, pp. 19-33.

[22] Y. Toyosawa, K. Itoh, N. Kikkawa, J.J. Yang, F. Liu, Influence of model footing diameter and embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity tests, Soils and foundations, 53(2) (2013) 349-356.

[23] A. Fakher, Research Methods in Geotechnics, University of Tehran Press, Tehran, Iran, 2014, in Persian.

[24] M.A. El Sawwaf, Strip footing behavior on pile and sheet pile-stabilized sand slope, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(6) (2005) 705-715.

[25] D. Muir Wood, Geotechnical modeling, Spong Press, London, United Kingdom, 2004.

[26] A.S. Vesić, Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99(1) (1973) 45-73.

[27] G.G. Meyerhof, Some recent research on the bearing capacity of foundations, Canadian geotechnical journal, 1(1) (1963) 16-26.

[28] C. Martin, Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics, Proc. IACMAG. Turin, (2005) 441-450.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Sadeghi, A. Bagherzadeh Khalkhali, J. Nazariafshar, N. Ganjian, Experimental investigation of eccentric loading effect on circular footing located on sandy bed with a weak thin layer, Amirkabir J. Civil Eng., 57(1) (2025) 3-24.

DOI: 10.22060/ceej.2024.23365.8150

این صفحه عمداً خالی است