

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Eccentricity of Loading on the Bearing Capacity of Strip Foundations in the Nearest of Soil Slope

Majid Kianpour^a, Ahad Bagherzadeh Khalkhali^{a,*}, Rouzbeh Dabiri^b, Mehdi Mahdavi Adel^c

^a Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Technical and Engineering Faculty, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^c Faculty of Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shushtar, Iran

Received: 13 December 2023; **Reviewed:** 12 November 2024, **Accepted:** 20 November 2024

Keywords:

Weak layer, Soil slope, Ultimate bearing capacity, Eccentricity, Physical model, Numerical model.

1. Introduction

Civil engineers are faced with the challenges of designing foundations that are placed on top of or nearest to slopes due to eccentricity with the presence of weak layers. In this research, using small-scale model tests, the effect of loading from the center on the load-bearing position of the strip foundation adjacent to the multi-layer sloping gable with a weak soil layer has been investigated.

2. Methodology

2.1. Soil for Bed and Weak Interlayer

The sandy soil used in the model was obtained from the silica sand factory located on Firouzkoh road. Sand is used in dry weather conditions. According to the Unified Soil Classification System (USCS), it is described as poorly graded sand (SP). and Compactable clay powder with CL classification was used for the weak layer. Clay powder with a natural moisture content of 5.5% was used consistently in all experiments.

2.2. Physical Model Setup

The geometry of the Soil-Strip Footing system is schematically shown in Fig. 1. The test is conducted under uniaxial conditions and the strip foundation is rigid. This strip foundation is located on a slope, on the other hand, the initial depth of the depression is zero. Fig. (1-a) shows a typical schematic of the foundation model on a sand bed. Studies were conducted based on load eccentricity and footing distance from changes in slope crest. Crushed silica sand with medium density (SP) was used for bed sand. Materials with weaker resistance properties (compared to sand bed) were used for the thin layer. To conduct the experiments, a small-scale physical model was designed and built. The details of these tests are shown in Fig. (1-b). In the first stage, to avoid the effect of the wall conditions of the test box on the results, its net internal dimensions are equal to 100cm (length), 70cm (width), and 70cm (height). The strip foundation is replaced by a rigid metal strip 70cm long and 7cm wide so that the experiments are not affected by the boundary constraints caused by the walls of the test box.

2.3. Experimental Tests

At the first start of the Test, the sand rain system was located directly above the sand box. Then, the following sands were deposited in 5cm thick layers by precipitation method. During the rain of sand, the density of the sand was controlled by placing cans with a certain volume in different spaces of the box. Then the sand slope ($\alpha=45^\circ$) degrees with a specific angle was made using simple templates at the specified depths and thicknesses, as well as the weak layer in the same way, then the next sand layers were poured up to the required level and by placing the foundation model in A specific location was followed from the surface of the sand bed. At the end, the vertical pressure is transferred to the foundation model by a manual hydraulic jack with a constant speed of 1mm per minute. Then a measuring gauge with an accuracy of 0.01mm measured the vertical settlement to obtain some degree of confidence in the test result, in some cases, the tests were repeated.

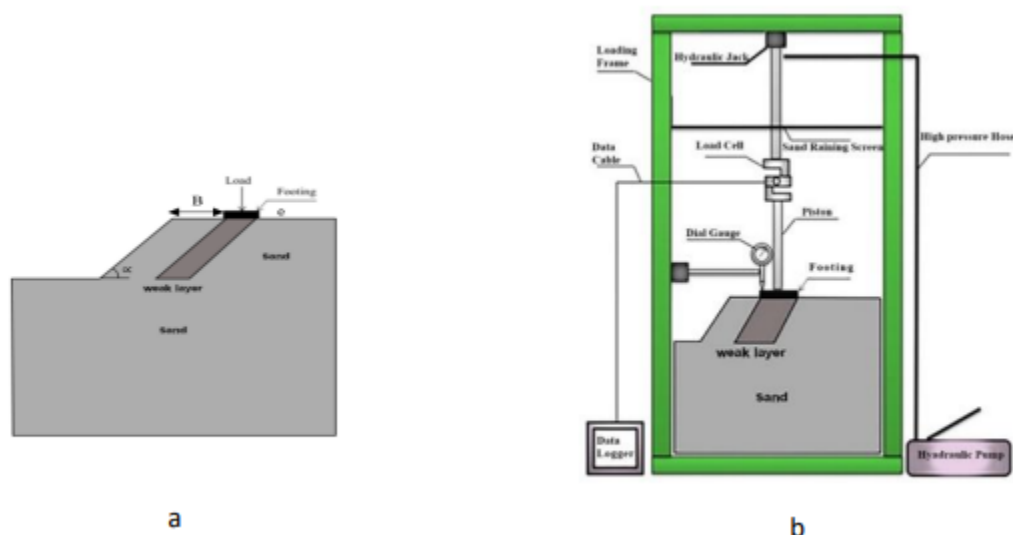


Fig. 1. a) The geometry of the Soil-Strip Footing system, **b)** Cross-sectional view of the physical model

3. Results and discussion

To evaluate the effect of load eccentricity on the bearing capacity of a strip foundation on a layered soil slope, several tests were performed with different load eccentricities. In these experiments, other parameters affecting the foundation, including the distance of the foundation from the crest of the slope, were fixed, and eccentricity was considered in two directions (away from the crest of the slope (+) and towards the crest of the slope).

The analysis of the experimental results shown in the graphs shows that the eccentricity values affect the final bearing capacity of the foundation and increase the bearing capacity by moving away from the weak layer and the crest of the slope with positive values. Also, by increasing the amount of eccentricity to negative values (i.e., approaching in any shape, by changing the slope of the sloping crown), the bearing capacity increases. The settling process of soil pressure changes to some extent. The values of the bearing capacity of the foundation in each parameter $D=0$, in the maximum state, vary in the range of 20 to 25kPa. These bearing capacity values have an average drop of 40% compared to the case of uniform sand. Also, in laboratory conditions, 6 test conditions have been performed for $D=0$, and the highest bearing capacity value occurs for the highest positive eccentricity value, i.e. $+B/4$. and the lowest value occurs for the largest eccentricity value in the steep crest (negative value).

4. Conclusions

In the present study, the behavior of strip footings adjacent to a sandy gable with a weak layer was investigated and compared using small-scale model testing and numerical analysis. The final bearing capacity of the strip foundation, which was on the gable bed, was made of sand. Based on the results described in this article, it can be said: the weak thin layer of the gable reduces both the bearing capacity and the hardness of the soil system under the foundation. The extent of this effect depends on the eccentricity and the distance of the foundation from the edge of the gable. The weak thin layer for the critical distance occurs when the

foundation is attached to the crest of the gable, the final bearing capacity is reduced by 43%, and the least effect of this condition is when the slope to the crest is equal to the width of the foundation. Comparing the results of the experimental model with the numerical results obtained in this research, which has been confirmed by different researchers, the maximum effect of these critical states varies from 20 to 43% depending on the angle of internal friction and the expansion of the sand. Also, in laboratory conditions, there are 6 laboratory states for each value. Different distances to the crest of the slope have been done, and the highest value of the bearing capacity occurs for the highest value of positive eccentricity and the lowest value for the highest value of eccentricity occurs in the negative value.

By analyzing the results of the theoretical relationships, the bearing capacity values obtained from the Mirhoff and Vesik methods give values closer to our experimental results. The bearing capacity obtained by the theory method of Mirhoff is only 2% different from the bearing capacity value obtained in the laboratory. But Hansen's method gives closer values to our numerical results and the difference between the results obtained with it is about 9.5%. The bearing capacity increases by moving away from the weak layer and the crown of the gable, and also by increasing the value of departure from the center to negative values (i.e. approaching the edge of the gable), the bearing capacity decreases. It should be noted that due to the effects of scale, the results of small-scale tests are at high stress levels, in addition, the main goal of this paper is to evaluate and predict the general trend of the behavior of strip foundations on the slope behavior of poorly graded sand and to quantify the effect of parameters. It was different from the results of the final load capacity, which was analyzed in detail.

تأثیر خروج از مرکزیت بارگذاری بر ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیروانی

مجید کیانپور¹، 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 استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

⁴ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر

دریافت: 1402/9/22، بازنگری: 1403/8/22، پذیرش: 1403/8/30، نشر آنلاین: 1403/8/22

چکیده

مهندسان اغلب هنگام طراحی فونداسیون‌هایی که در مجاورت شیب‌ها قرار دارند با چالش‌هایی مواجه می‌شوند که تأثیر خروج از مرکزیت با حضور لایه‌های ضعیف به پیچیدگی موضوع می‌افزاید. در تحقیق حاضر با استفاده از آزمون‌های مدل فیزیکی کوچک مقیاس، تأثیر بارگذاری خارج از مرکز بر ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیروانی باوجود لایه خاک ضعیف مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های نازک، علی‌رغم این‌که به‌نظر ناچیز هستند اثرات قابل توجهی بر ظرفیت باربری نهایی دارند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل فیزیکی در رابطه با پی نواری صلبی که بر روی بستر چند لایه ماسه‌ای در مجاورت شیب قرار گرفته است، انجام شد. اثرات تغییر فاصله پی از تاج شیب و شیب لایه نازک بر روی رفتار پی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصاً لایه نازک ضعیف ظرفیت باربری نهایی را کاهش داده است. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقدار خروج از مرکزیت بر روی ظرفیت باربری نهایی پی اثر گذاشته و با دور شدن پی از لایه ضعیف و تاج شیب، ظرفیت باربری افزایش یافته است. به‌علاوه وجود لایه نازک ضعیف در بستر خاکی منجر به کاهش ظرفیت باربری نهایی تا میزان 43 درصد شده است.

کلیدواژه‌ها: لایه ضعیف، شیروانی خاکی، ظرفیت باربری نهایی، خروج از مرکزیت، مدل فیزیکی، مدل عددی.

1- مقدمه

رفتار پی در خاک‌های لایه‌ای به‌روش‌های مختلفی مورد بحث قرار می‌گیرد: به‌عنوان مثال، در نظر گرفتن ترکیبی از انواع مختلف خاک مانند ماسه یا رس است (Michalowski (1995)، Meyerhof و Hanna (1978)، Hanna و Meyerhof (1980)، Michalowski و Shi (1996)، Burd و Frydman (1996)، Kenny و Andrawes (1996)، Michalowski (1997)، Okamura و همکاران، (1997).

به‌طور کلی، آزمایش‌های مدل فیزیکی در حالت‌های مختلف، رایج‌ترین روش مطالعه برای رفتاری‌ها واقع بر شیروانی‌ها بوده است. با این حال، در مقایسه با آزمون‌های فیزیکی، تحلیل‌های عددی برای در نظر گرفتن تغییرات پارامتریک دقیق‌تر و کارآمدتر هستند. ظرفیت باربری پی‌های سطحی یکی از موضوعاتی است که در زمینه مهندسی ژئوتکنیک بسیار مورد

در این راستا مطالعات توسط Button (1953)، در قالب لایه‌های مختلف رس اشباع شده آغاز شد و توسط چندین محقق؛ از طریق مدل‌سازی عددی یا آزمایش‌های فیزیکی ادامه یافت که همگی نشان‌دهنده تأثیرات تغییرات لایه‌های بستر خاکی بر روی رفتار پی بوده است (Brown (1969)، Vesic (1973)، Meyerhof (1974)، Purushothamaraj و همکاران، (1974)، Tournier و Milović (1977)، Hanna و Meyerhof (1978)، Das و Pfeifle (1979)، Hann و Meyerhof (1980)، Kraft و Helfrich (1983)، Siraj-Eldine و Bottero (1987)، Madhav و Sharma (1991)، Tani و Craig (1995)، Burd و Frydman (1996)، Lutenegger (2006).



ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز
شاپا الکترونیکی: 2717-4077

<https://doi.org/10.22034/CEEJ.2024.59588.2306>

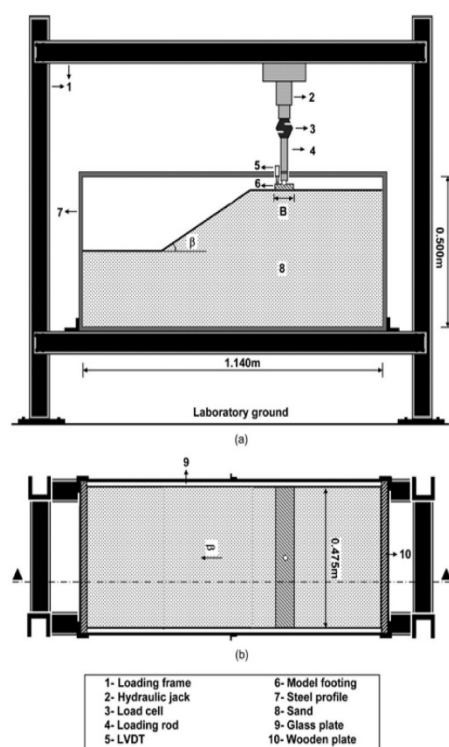
* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-6380-9937

آدرس ایمیل: majid.kianpour@srbiau.ac.ir (م. کیانپور)، a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (ا. باقرزاده خلخالی)، rouzbehdabiri@iaut.ac.ir

(ر. دبیری)، mehmahad@yahoo.com (م. مهدوی عادل).

قرار گیرند (Turker و همکاران، 2014). بنابراین در این تحقیق تأثیر خروج از مرکزیت بارگذاری بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب بررسی شده است.

Keskin و Laman (2013)، با مدل فیزیکی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای فاصله پی از تاج شیب، زاویه شیب، تراکم نسبی ماسه و عرض پی را بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر شیب ماسه‌ای بررسی کردند. در این تحقیق یک سری آزمایش مدل در جعبه فولادی با ابعاد داخلی 1.14 m (طول)، 0.475 m (عرض) و 0.5 m (عمق) مطابق شکل (2) انجام شده است.



شکل 2- طرح تجهیزات تست Keskin و Laman (2013)

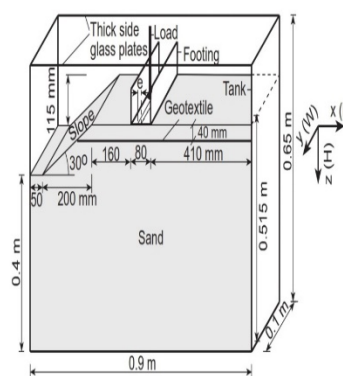
برای جلوگیری از لغزش جانبی هنگام نصب و بارگذاری مدل فونداسیون، کف و دیواره‌های عمودی جعبه صلب در نظر گرفته شده است. دوجداره جعبه آزمایش از شیشه به ضخامت 20mm ساخته شده است. در این حالت نمونه ماسه در حین آماده‌سازی و تغییر شکل ذرات ماسه در طول آزمایش قابل مشاهده بوده است. جعبه به اندازه کافی صلب بوده تا شرایط کرنش مسطح را در تمام آزمایشات مدل فراهم آورد. علاوه بر آزمایشات مدل، برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی، مجموعه‌ای از آنالیز اجزای محدود و مدل‌سازی شیب با ابعاد کامل (منطبق با مقیاس) با نرم‌افزار Plaxis سازگاری قابل قبول مشاهده شده است. از نتایج مهم این پژوهشگران می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

توجه بوده است. بسیاری از مطالعات ظرفیت باربری پی را بر مبنای تغییر شکل‌پذیری خاک تحت بار عمودی بدون خروج از مرکزیت گزارش نموده‌اند (Johari et al (2017)؛ Halder و Chakraborty (2020)؛ Wu و همکاران، (2020).

جزئیاتی در زمین مانند سطوح لغزش، ناحیه‌های گسیختگی و لایه‌های نازک وجود دارد که اثرات قابل توجهی بر رفتار سیستم خاک- پی دارد (Terzaghi، 1929)؛ Valore و همکاران، (2017)). این ویژگی‌ها را جزئیات زمین‌شناسی می‌توان امید و به اثرات بالقوه عظیم آن‌ها بر ایمنی سدها اشاره کرد که مکانیسم شکست و ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری که بر روی بستر ماسه با لایه ضعیف قرار دارند را بررسی کردند (Valore و همکاران، 2017).

بر اساس این مطالعه در اعماق کمتر از چهار برابر عرض پی لایه نازک افقی ضعیف به‌طور قابل توجهی بر ظرفیت باربری نهایی و مکانیسم شکست تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که لایه نازک ضعیف بنتونیت مرطوب، ظرفیت باربری نهایی را تا 80 درصد کاهش می‌دهد.

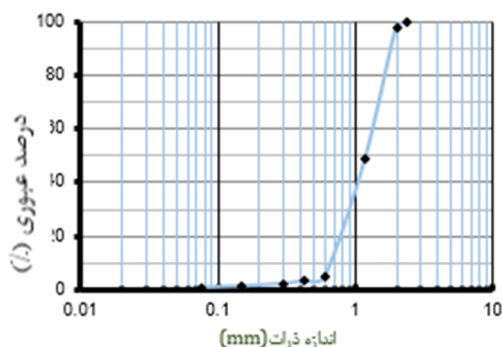
Oda و Win (1990) توجه خود را بر ظرفیت باربری نهایی پی که روی بستر ماسه‌ای با یک لایه رسی اشباع قرار دارد متمرکز کردند. در مطالعه آن‌ها از یک مخزن شیشه‌ای با ابعاد داخلی 40 سانتی‌متر طول، 6 سانتی‌متر عرض و 30 سانتی‌متر ارتفاع استفاده شد. طبق مطالعات آن‌ها جزئیاتی در شکل (1) وجود دارد که تأثیر قابل توجهی مانند سطوح گسیختگی، ناحیه‌های گسیختگی و لایه‌های نازک بر رفتار سیستم خاک- پی دارد.



شکل 1- طرح 3D جعبه آزمایش Oda و Win (1990)

چندین محقق کاهش ظرفیت باربری پی تحت تأثیر خروج از مرکزیت بار را مورد مطالعه قرار داده‌اند (Farzaneh (2010)؛ Michalowski (1998)؛ Paolucci و Pecker (1997).

در برخی از پروژه‌ها، پی‌ها ممکن است بر روی بسترهای حاکی لایه‌ای یا بسترهای سنگی حاوی لایه‌های ضعیف خاک



شکل 3- منحنی توزیع اندازه ذرات برای ماسه

جدول 1- خصوصیات مهندسی ماسه مورد استفاده در پژوهش

شماره استاندارد	مقدار	ویژگی
ASTM DC136	2/38	حداکثر دانه‌ها، D_{max} (mm)
	1/45	60% قطر مربوط به D_{60} (mm)
	1/25	اندازه متوسط دانه‌ها D_{50} (mm)
	0/9	30% قطر مربوط به D_{30} (mm)
	0/67	اندازه مؤثر دانه‌ها D_{10} (mm)
	2/16	ضریب یکنواختی C_u
ASTM D854	0/83	ضریب انحنای C_c
	2/66	وزن مخصوص دانه‌های ماسه G_s
ASTM D4254	19/85	وزن مخصوص خلأ حداکثری γ_{dmax} (KN/m^3)
ASTM D4253	17/33	وزن مخصوص خلأ حداقل γ_{dmin} (KN/m^3)
	15/71	وزن مخصوص خشک γ_d (KN/m^3)
	41	چگالی نسبی D_r (%)
ASTM D2487	SP	طبقه‌بندی (USCS)
ASTM D3080	38	زاویه اصطکاک داخلی
ASTM D3080	0	زاویه اتساع

تعیین چگالی نسبی، D_r مطابق با استانداردهای ASTM D4253 و D4254 بود. از آنجایی که نسبت $\frac{B}{d_{50}}$ بیشتر از 50 است، اثرات اندازه ذرات ناچیز بوده است. بر اساس مطالعات انجام شده، اثر ریزدانه‌ها بر رفتار فشاری ماسه سیلیس بد دانه‌بندی شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

بر این اساس با افزایش ریزدانه، درجه خردشدن ذرات تمایل به کاهش داشته است. پارامترهای مقاومت برشی ماسه با هفت آزمایش برشی مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D3080 تعیین شده است. این آزمایش چندین بار برای تنش‌های قائم متفاوت بر روی خاک انجام شده و در هر آزمایش بیشینه تنش برشی با توجه به تنش قائم وارد بر نمونه مشخص گردیده است. پس از اتمام آزمایش می‌توان یک نمودار تنش برشی - تنش قائم رسم نمود و در آن بیشینه تنش برشی را بر اساس تنش قائم

• ظرفیت باربری با افزایش فاصله فونداسیون به نسبت عرض پی تا میزان پنج تقریباً خطی افزایش می‌یابد. در شرایط فراتر از این نسبت، ظرفیت باربری نهایی ثابت می‌ماند و مشابه فونداسیون واقع در سطح افقی می‌باشد.

• ظرفیت باربری فونداسیون نواری واقع بر شیب ماسه به‌طور قابل توجهی به زاویه شیب، تراکم نسبی ماسه و عرض پی بستگی دارد.

• نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب، ظرفیت باربری نهایی پی کاهش یافته است.

• سازگاری بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در فرآیند رفتاری کلی مشاهده شده است. با این حال، مقادیر ظرفیت باربری نهایی به‌دست آمده از آنالیز اجزای محدود مقادیر بالاتری نسبت به آزمایش‌های مدل نشان داده‌اند. در مطالعات قبلی، تأثیر وجود یک لایه ضعیف واقع در زیر پی‌های نواری عمدتاً بررسی شده است. بررسی شیب‌ها و تأثیر وجود لایه ضعیف در آن‌ها بر ظرفیت پی‌ها اهمیت بیشتری دارد که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر شیب لایه خاک، بررسی تأثیر خروج از مرکزیت و اثرات مثبت و منفی آن بر ظرفیت باربری پی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

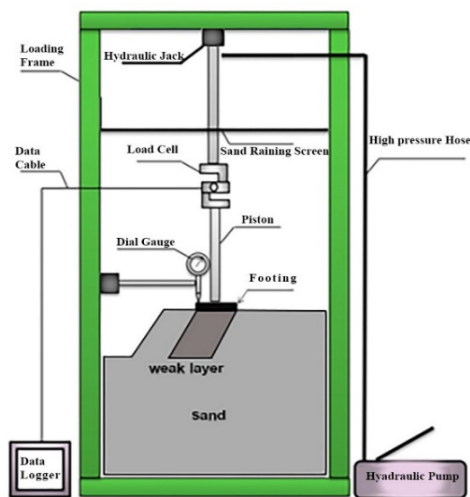
اولین نوآوری در این تحقیق، ارزیابی تأثیر خروج از مرکزیت بارگذاری بر ظرفیت باربری یک پی نواری واقع بر خاک با لایه ضعیف است. همچنین ارزیابی تأثیر فواصل افقی مختلف پی از تاج شیب بر ظرفیت باربری پی نواری صلب در اولویت بعدی تحقیق قرار گرفته داشته است.

2- مدل‌سازی آزمایشگاهی

2-1- خصوصیات مصالح

خاک ماسه‌ای استفاده شده در مدل از کارخانه ماسه سیلیس واقع در جاده فیروزکوه تهیه شده است. ماسه به‌صورت خشک شده در فضای محیط استفاده شده است. مطابق با سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک (USCS)، خاک، ماسه با دانه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی شده است. در شکل (3) منحنی دانه‌بندی ماسه سیلیسی نشان داده شده است. برای دستیابی به تراکم نسبی یکنواخت در آزمایش‌ها، از روش بارش ماسه برای نمونه‌سازی استفاده شده است. برای هر آزمایش، جعبه خالی و دوباره پر گردیده است. برخی از خواص فیزیکی ماسه در جدول (1) نشان داده شده است.

سپس هر لایه خاک به ضخامت 5cm داخل جعبه ریخته و به تراکم نسبی مورد نظر رسیده است. این مراحل تا جایی ادامه می‌یابد که جعبه آزمایش تا سطح زیر فونداسیون پر شود.



شکل 5- نمای مقطعی از مدل فیزیکی

3-2- جعبه تست

مسئله تحت شرایط کرنش مسطح بررسی شده است. برای دستیابی به تراکم مورد نیاز ماسه، فونداسیون را به صورت لایه‌ای ریخته و فشرده می‌کنند. ارتفاع فونداسیون 20cm است. شکل (6) جزئیات سیستم مدل فیزیکی را با شیب ماسه‌ای آماده نشان می‌دهد. فشار با استفاده از جک هیدرولیکی با سرعت جابه‌جایی ثابت 1mm/min به فونداسیون منتقل شده است.



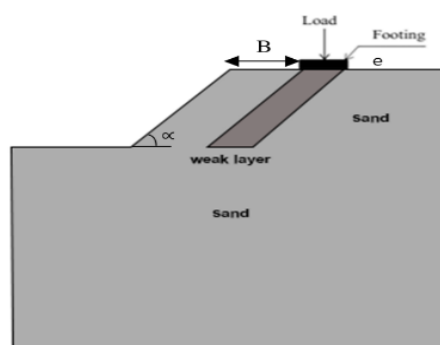
شکل 6- سیستم مدل فیزیکی هنگام بارگذاری در شیب ماسه‌ای

مشخص کرد. با اتصال نقاط مشخص شده بر روی نمودار پوش گسیختگی خاک، حاصل شده که نزدیک به پوش گسیختگی ارائه شده بر اساس معیار موهر کولمب است. شیب خط رسم شده در این نمودار برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک است. پارامترهای مقاومت برشی ماسه تابع سطح تنش مؤثر بوده و برای عمق مؤثر در مدل خاک در مقیاس کوچک، سطح تنش کمتر از حدود چهار کیلوپاسکال است. نتیجه آزمایش برش مستقیم مربوط به سطح تنش‌های مدل ($1\text{ kPa} < d < 4\text{ kPa}$) در جدول (1) ارائه شده است.

2-2- روش آزمایش

هندسه سیستم Soil-Strip Footing به صورت شماتیک در شکل (4) نشان داده شده است. آزمایش تحت شرایط تک‌محوری بررسی شده است و پی نواری، صلب است. این پی نواری در یک شیب قرار گرفته و از طرف دیگر عمق مدفون آن صفر است. شکل (4) شماتیک معمولی از مدل فونداسیون را بر روی یک بستر ماسه‌ای نشان می‌دهد. مطالعات بر اساس خروج از مرکزیت بارگذاری و فاصله پی از تغییرات تاج شیب انجام شده است. ماسه سیلیسی خرد شده با چگالی متوسط (SP) برای ماسه بستر استفاده شده است. برای لایه نازک از موادی با خواص مقاومتی ضعیف‌تر (در مقایسه با بستر ماسه‌ای) استفاده و برای انجام آزمایشات، یک مدل آزمایشی در مقیاس کوچک طراحی و ساخته شده است.

جزئیات این آزمایشات در شکل (5) نشان داده شده است. برای جلوگیری از تأثیر شرایط دیواره جعبه آزمایش بر روی نتایج، ابعاد خالص داخلی آن برابر با 100cm (طول)، 70cm (عرض) و 70cm (ارتفاع) می‌باشد. فونداسیون نواری با یک نوار فلزی صلب به طول 70 cm و عرض 7 cm جایگزین شده تا آزمایش‌ها تحت تأثیر محدودیت‌های مرزی ناشی از دیواره‌های جعبه آزمایش قرار نگیرند.



شکل 4- فونداسیون نواری

نتیجه آزمایش برش مستقیم مربوط به سطوح تنش مدل $(1kPa < \sigma_v < 4kPa)$ در جدول (2) ارائه شده است.

3- روش آزمایشگاهی

در اولین مرحله شروع آزمایش، صفحه نمایش بارش ماسه دقیقاً بالای جعبه ماسه قرار داشته و سپس ماسه‌های ریز به روش بارش ماسه در لایه‌های ضخامت 5cm رسوب داده شد. در هنگام بارش ماسه، با قرار دادن قوطی‌های با حجم مشخص در مکان‌های مختلف جعبه، تراکم ماسه کنترل شده است. سپس شیب ماسه‌ای $(\alpha = 45^\circ)$ درجه با زاویه مشخص با استفاده از قالب‌های ساده در اعماق و ضخامت‌های مشخص شده و همچنین لایه ضعیف به همان صورت ساخته شده است. در مرحله بعد، لایه‌های ماسه‌ای بعدی تا سطح مورد نیاز ریخته شد و با قرار دادن مدل فونداسیون در محل مشخصی از سطح بستر ماسه‌ای دنبال گردیده است. در انتها فشار عمودی توسط جک هیدرولیک دستی با سرعت ثابت برابر با 1mm/min به مدل فونداسیون منتقل شده است. یک گیج اندازه‌گیری با دقت 0.01mm به صورت دقیق نشست عمودی را اندازه‌گیری کرده است.

در این تحقیق دو گروه آزمایش انجام شده است که ابتدا رفتار پی بر روی یک بستر شیب ماسه‌ای یکنواخت قرار داده شده و سپس در مرتبه دوم رفتار پی در بستر شیب ماسه‌ای با لایه ضعیف مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایشات فاصله پی، تاج شیب و همچنین خروج از مرکزیت بار متغیر بوده است.

4- نتایج مدل‌سازی فیزیکی

منحنی‌های بار- نشست پی از نتایج مدل آزمایش به دست آمده است. قابل توجه است که نشست پی (S) نسبت به عرض پی (B) $(S/B, \%)$ نرمال شده است. پارامترهای متغیر آزمایش به صورت e و D نشان داده شده است که پارامتر e نشان‌دهنده خروج از مرکزیت بار و پارامتر D نشان‌دهنده فاصله لایه ضعیف از تاج شیب است.

4-1- مقایسه منحنی‌های بار- نشست

منحنی بار- نشست پی نواری که بر روی خاک شنی یکنواخت قرار دارد در شکل (8) نشان داده شده است. مطابق شکل (8)، مقدار ظرفیت باربری نهایی 37.6kPa و مقدار نشست متناظر با حداکثر تغییر شکل، 26mm و مقدار نشست نسبی، $(\frac{S}{B}, \%)$ 32.5% است. شکل (9) لایه‌بندی خاک را در آزمایشگاه نشان داده و برای مقایسه و تأیید، مقادیر ظرفیت باربری نهایی با روش‌های تحلیلی محققین مختلف، Meyerhof, 1963:

بار اعمال شده توسط سلول بار ثبت و با استفاده از جک هیدرولیکی از طریق سیستم بارگذاری انجام شده است. نشست‌های فونداسیون توسط یک کرنش‌سنج با دقت حداقل 0.01mm اندازه‌گیری شده است.

2-4 ویژگی‌های لایه ضعیف

شیب لایه ضعیف از موادی ساخته شده است که خواص مقاومت برشی کمتری نسبت به بستر ماسه‌ای داشته است. برای لایه ضعیف از پودر خاک رس قابل تراکم با طبقه‌بندی CL استفاده شده است. پودر خاک رس با رطوبت طبیعی 5.5% به‌طور مداوم در تمام آزمایش‌ها استفاده شده است. برخی از خواص مهندسی ضعیف لایه نازک در جدول (2) نشان داده شده است. به‌دلیل رطوبت کم خاک رس، فشار منفذی و در نتیجه فشار منفذی اضافی در آزمایش‌ها وجود نخواهد داشت. پارامترهای مقاومت برشی رس نیز با هفت آزمایش برش مستقیم تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومت برشی مواد لایه نازک ضعیف به‌عنوان تابعی از سطح تنش مؤثر نیستند.

جدول 2- خواص فیزیکی لایه ضعیف مورد استفاده در

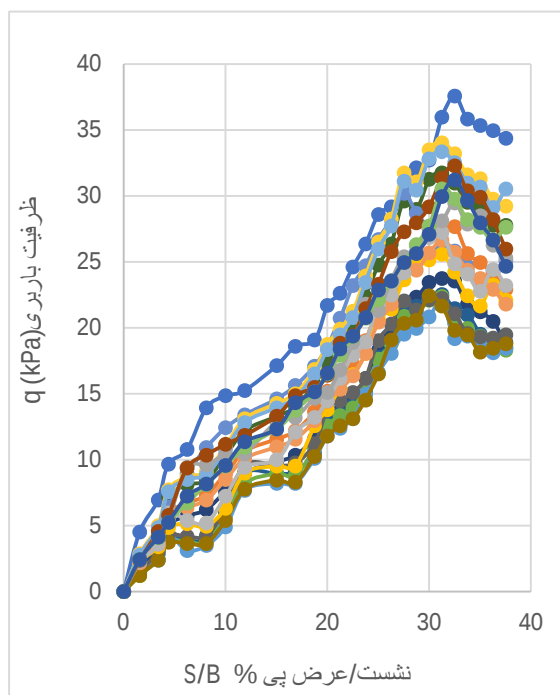
آزمون‌های مدل		
شماره استاندارد	مقدار	مشخصات
ASTM D854	2/68	وزن مخصوص دانه‌های خشک G_s
ASTM D6683	17/1	وزن مخصوص γ (kN/m^3)
ASTM D4318	26	حد روانی (%)
	18	حد پلاستیک (%)
	8/1	شاخص پلاستیک (%)
ASTM D2487	CL	طبقه‌بندی (USCS)
ASTM D2216	5/5	درصد رطوبت (%)
ASTM D3080	28	زاویه اصطکاک داخلی
ASTM D3080	0/35	چسبندگی مؤثر (kg/cm^2)



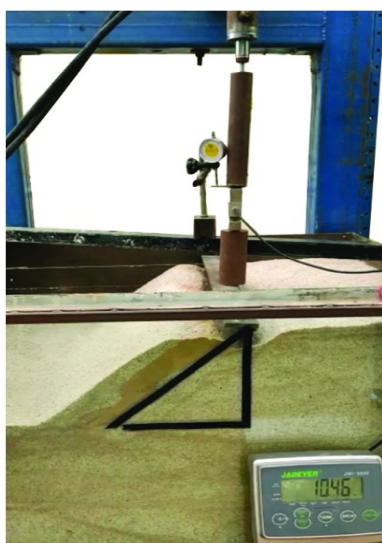
شکل 7- نتیجه توزیع جابه‌جایی عمودی آزمایش شماره 14 پایه نواری (نشست مجاز)

4-2- منحنی بار - نشست با حضور لایه ضعیف

شکل (10) ظرفیت باربری پی نواری واقع در مجاورت شیروانی در مقابل نسبت نشست به عرض پی را نشان می‌دهد و ظرفیت باربری نهایی برای حالت بستر ماسه‌ای یکنواخت با بستر ماسه‌ای شامل لایه ضعیف مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که یک لایه ضعیف نازک، هم ظرفیت باربری نهایی و هم سختی سیستم خاک- پی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

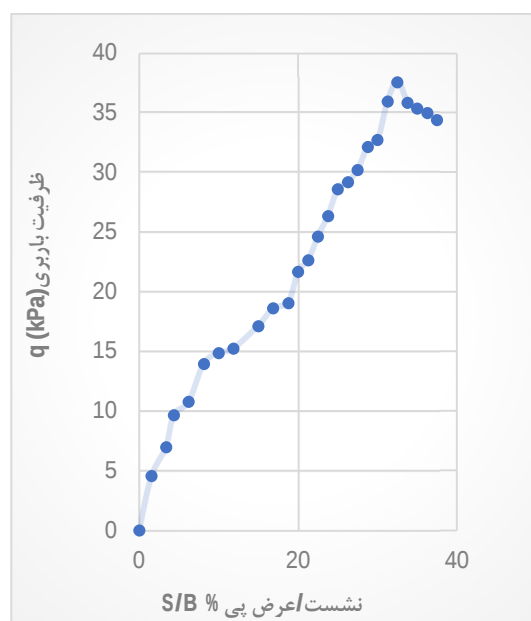


شکل 10- منحنی بار - نشست پی نواری بر روی ماسه یکنواخت (خط سیاه) و خاک شنی با لایه ضعیف (خطوط رنگی)

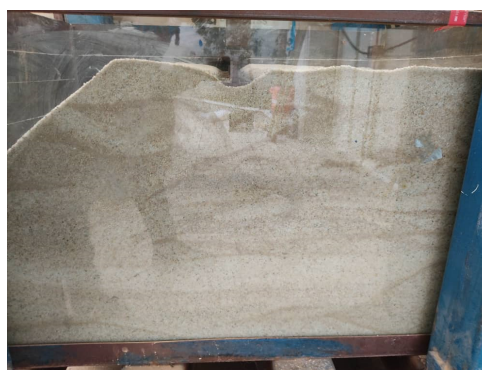


شکل 11 - گسیختگی خاک در زیر پی نواری بر روی یک شیب ماسه‌ای با لایه ضعیف

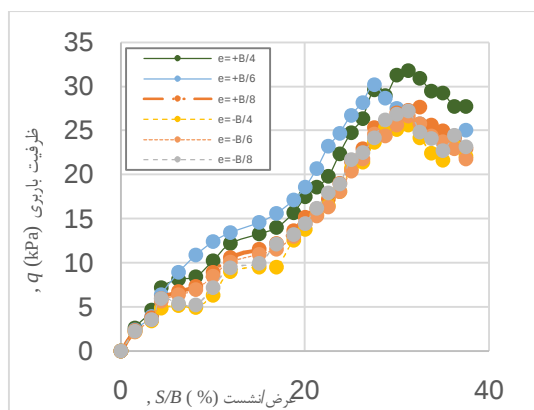
Vesic, 1973؛ Hansen, 1970) برای زاویه مقاومت برشی مربوط به سطح تنش مدل محاسبه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل خشکی ماسه، برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی، چسبندگی ماسه نادیده گرفته شده است. با توجه به نتایج، مقادیر تحلیلی محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشته است. با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، انتخاب زاویه اصطکاک داخلی مطابق با سطح تنش مؤثر واقعی در مدل فیزیکی کوچک مقیاس تأیید می‌شود. بر اساس نتایج، سختی سیستم خاک- پی، قبل از نزدیک شدن به نقطه اوج که به صورت A_q/A_s تعریف می‌شود، در صورت استفاده از لایه نازک ضعیف کمتر از یک، مربوط به خاک یکنواخت است.



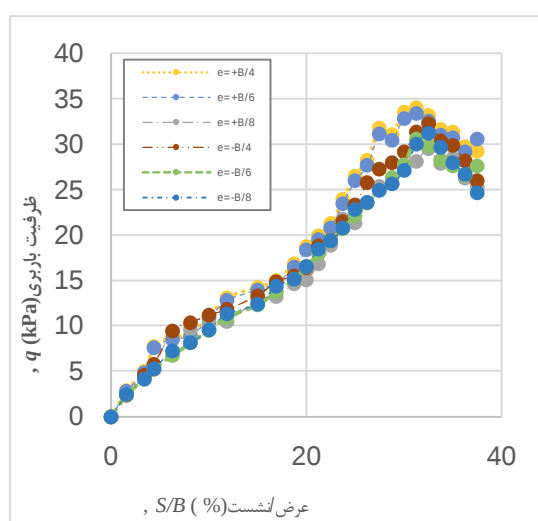
شکل 8- منحنی بار - نشست پی نواری بر روی ماسه یکنواخت



شکل 9- گسیختگی خاک در زیر پی نواری بر روی یک شیب ماسه‌ای یکنواخت



شکل 13- منحنی بار - نشست پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای با لایه ضعیف ($D=0.5b$)

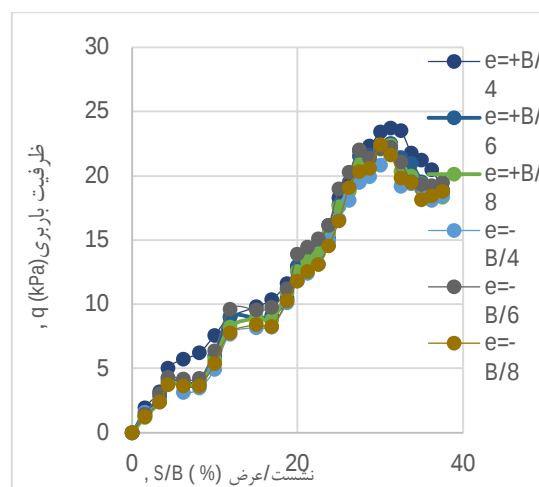


شکل 14- منحنی بار - نشست پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای با لایه ضعیف ($D=B$)

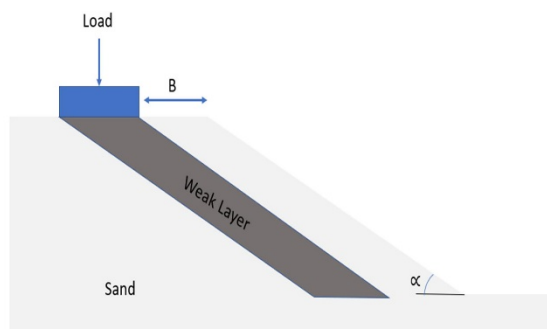
با مقایسه نمودارهای شکل (15)، مشخص می‌شود که با افزایش مقدار D ، یعنی فاصله پی نواری از تاج شیب، مقادیر ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد. کمترین مقدار ظرفیت باربری برای $D=0$ و بالاترین مقادیر برای $D=B$ رخ می‌دهد. با افزایش فاصله بین پی و تاج شیب، افزایش 43% در ظرفیت باربری پی نواری (از 23.75 kPa به 34.07 kPa) رخ می‌دهد. بر اساس این شکل، تغییرات ظرفیت باربری روند مشابهی دارد و با افزایش پارامتر D ، ظرفیت باربری و سختی افزایش می‌یابد. این نتیجه برای سایر خروج از مرکزیت بار نیز به دست آمده است. بر اساس نتایج، نزدیکترین مقادیر ظرفیت باربری به حالت یکنواخت ماسه زمانی است که $D=B$ فاصله پی تا تاج شیب برابر با عرض پی است. کمترین ظرفیت بار (بزرگترین تفاوت با حالت یکنواخت ماسه) نیز زمانی رخ می‌دهد که فونداسیون در تاج شیب و $D=0$ قرار گیرد.

5- تأثیر خروج از مرکزیت بار بر ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیروانی خاکی

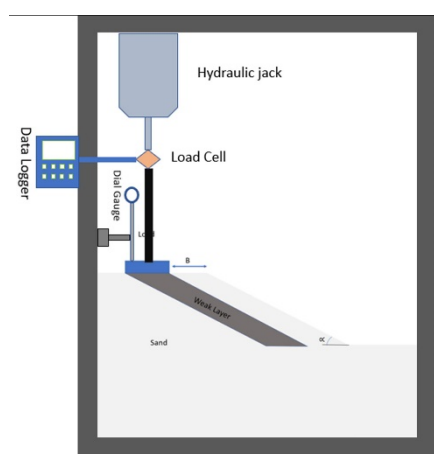
برای ارزیابی اثر خروج از مرکزیت بار بر ظرفیت باربری یک پی نواری بر روی یک شیب خاکی لایه‌بندی شده، چندین آزمایش با خروج از مرکزیت بار متفاوت انجام شده است. در این آزمایش‌ها سایر پارامترهای تأثیرگذار بر روی پی از جمله فاصله پی از تاج شیب ثابت بود و خروج از مرکزیت در دو جهت (دور از تاج شیب و به سمت تاج شیب) در نظر گرفته شده است. شکل‌های (12)، (13) و (14) نتایج را به ترتیب برای $D=b$ ، $D=0$ ، $D=0.5b$ (که b عرض پی و D فاصله تا تاج شیروانی) خروج از مرکز بار مختلف نشان می‌دهند. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقادیر خروج از مرکز بارگذاری بر ظرفیت باربری نهایی پی تأثیر می‌گذارد و با دور شدن از لایه ضعیف و تاج شیب، ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش مقدار خروج از مرکزیت، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. مقادیر ظرفیت باربری فونداسیون در هر پارامتر $D=0$ در حداکثر حالت، در محدوده 20-25 kPa متغیر است. این مقادیر ظرفیت باربری نسبت به حالت ماسه یکنواخت دارای افت متوسط 40% هستند. همچنین در شرایط آزمایشگاهی 6 حالت تست برای $D=0$ انجام شده است که بیشترین مقدار ظرفیت باربری برای بالاترین مقدار خروج از مرکزیت مثبت یعنی $+B/4$ رخ می‌دهد و کمترین مقدار برای بیشترین مقدار خروج از مرکزیت در تاج شیب (مقدار منفی) رخ می‌دهد. برای بررسی تأثیر فاصله پی و فاصله لایه ضعیف از تاج شیب، آزمایشاتی انجام شده است. در این آزمایشات، خروج از مرکزیت بارگذاری ثابت بود و فقط این فاصله متغیر بوده است. شکل (15) نتایج سه آزمایش را با خروج از مرکزیت بار یکسان ($e=+B/4$) و مقادیر مختلف D (فاصله پی تا تاج شیب) نشان می‌دهد.



شکل 12- منحنی بار - نشست پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای با لایه ضعیف ($D=0$)

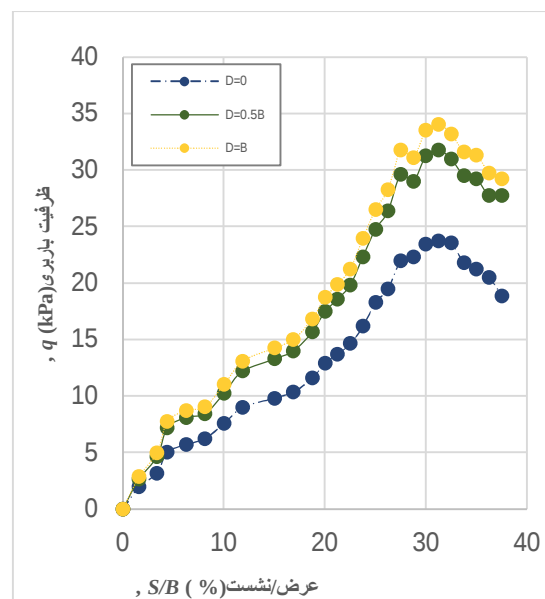


شکل 16- طرح مدل آزمایش



شکل 17- نمای بخش مدل فیزیکی

یک مدل عددی پی نواری صلب که بر روی توده سنگی تحت شرایط کرنش صفحه ای SIGMA/W قرار دارد نیز در شکل (17) نشان داده شده است. پی و توده سنگ بی وزن هستند و به ترتیب توسط عناصر صفحه صلب و عناصر جامد مدل می شوند. شرایط در سطح مشترک بین صفحات و سنگ ها ناهموار است. پارامترهای متغیر آزمایش در شکل (17) به صورت a ، B ، e نشان داده شده است. در این طرح، پارامتر e نشان دهنده خروج از مرکزیت بار است و پارامتر B نشان دهنده فاصله لایه ضعیف از لبه مایل است. زاویه α نیز امتداد شیروانی را نشان می دهد. برای آزمایش ظرفیت باربری توده خاک، مدل فیزیکی و نمونه اولیه در مراحل مختلف ایجاد شده است. این مراحل باید مرحله به مرحله انجام و تکمیل شود. برای جلوگیری از تأثیر شرایط دیواره جعبه آزمایش بر روی نتایج، اولین مرحله این است که ابعاد خالص داخلی جعبه آزمایش را به 150cm (طول) 60cm (عرض) و 50cm (ارتفاع) تنظیم گردد. فونداسیون نواری مدل به کمک یک قطعه فلزی سفت به طول 60cm و عرض 5cm جایگزین می شود. سپس خاکریز را به صورت لایه و هر لایه خاک را داخل جعبه به ضخامت 5cm ریخته و با تراکم نسبی 50% متراکم می شود. این مراحل تا رسیدن به سطح ارتفاع زیر پی انجام می شود. همان طور که در این مقاله اشاره شد مدل فیزیکی



شکل 15- منحنی بار - نشست پی نواری بر روی خاک ماسه ای با لایه ضعیف ($e=B/4$)

6- مدل سازی عددی

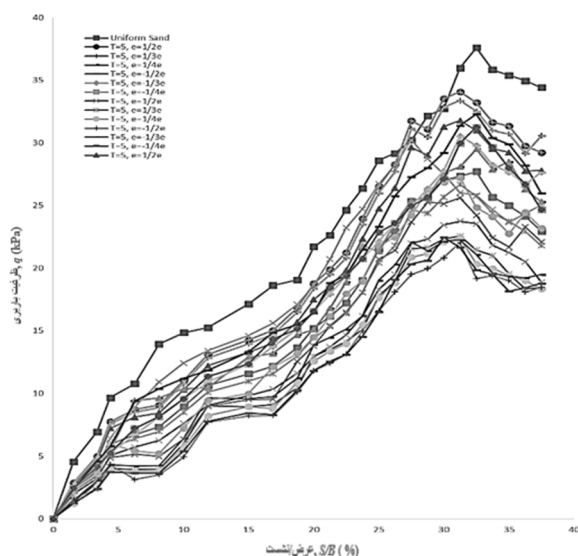
مدل سازی عددی بر اساس مدل فیزیکی کوچک شده انجام گردیده است. در این تحلیل، فاکتورهای ظرفیت باربری از منحنی بار - جابه جایی به دست می آید. ضمناً نشست عمودی یکنواخت فونداسیون برای تخمین روش آزمایشگاهی واقعی و محاسبه سختی بالای پی و ناهمواری آن در نظر گرفته شده است. روش های مختلفی مانند تفاضل محدود، روش اجزای محدود، عناصر مرزی و ... برای تجزیه و تحلیل عددی موجود است. رفتار خاک های طبقه بندی شده را می توان با مدل های سازنده خطی یا غیرخطی موجود در بسته های المان محدود نرم افزارهای کاربردی ژئوتکنیکی مانند، ABAQUS، FLAC، PLAXIS و GEO-STUDIO مدل سازی کرد. یک تحلیل گسترده المان محدود با استفاده از بسته نرم افزاری Geo-Studio2D انجام شد. یک مدل عددی تأیید شده توسط نتایج آزمایشگاهی می تواند وابستگی نتایج به شرایط آزمایشگاهی را کاهش داده و اقتصادی شدن پژوهش و عدم نیاز به تکرار آزمایش ها را حاصل کند.

Geo-Studio 2D یک بسته نرم افزاری دوبعدی المان محدود است که برای آنالیز استاتیکی و دینامیکی خاک و سنگ استفاده می شود. در این تحقیق با توجه به توانایی نرم افزار در مدل سازی تقارن محور، پی های دایره ای یا مدور ایجاد شده است. برای ایجاد مدل و انجام محاسبات از سیستم المان محدود Geo-Studio استفاده شده است. در این مورد، تنش های مجهول به صورت خطی و متناسب با هر عنصر متفاوت است. تصویری از مش بندی المان محدود را می توان در شکل (16) مشاهده کرد که با استفاده از نرم افزار Geo-Studio ساخته شده است.

7- نتایج مدل عددی

همان‌طور که در جدول (3) مشاهده می‌شود گروه آزمایشی که دارای مقادیر بیشتر B می‌باشند در مقایسه با سایر حالات، مقدار ظرفیت باربری بالاتری داشته و در مقایسه با فاصله با تاج شیب هرچه این مقدار کوچکتر شود منجر به کاهش ظرفیت باربری شده است. منحنی‌های بار-نشست پی‌ها حاصل از تحلیل عددی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در جدول (3) این نتایج با ذکر حالات مدل آورده شده است. قابل توجه است که نشست پی (S نسبت به عرض پی B) بدون بعد به صورت نسبت ($\frac{S}{B} = 35\%$) ارائه می‌شود.

اولین گام بررسی رفتار پی نواری در یک شیب یکنواخت ماسه‌ای بوده است. با توجه به منحنی بار-نشست نتایج، مقدار ظرفیت باربری نهایی 37.6 kPa و مقدار نشست مربوط به مقدار پیک 26 mm و مقدار نشست نسبی ($\frac{S}{B} = 32.5\%$) منحنی‌های بار-نشست با حضور لایه ضعیف به ضخامت $t=50$ میلی‌متر در حالات مختلف در شکل (18) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که لایه نازک ضعیف هم ظرفیت باربری و هم سختی سیستم خاک-پی را کاهش داده است. بررسی تأثیر زاویه شیب بر نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب، ظرفیت باربری تعیین شده کاهش یافته است. بحرانی‌ترین مقدار زاویه شیب α برابر با 45° درجه است که در ادامه روش آزمایش به عنوان مقدار بحرانی در نظر گرفته شده است. آزمایشات انجام شده در شرایط مختلف نشان می‌دهد که ظرفیت باربری با افزودن یک لایه ضعیف کاهش می‌یابد و وجود آن تأثیر منفی دارد.



شکل 18- منحنی فشار- نشست پی نواری روی ماسه با یک لایه ضعیف برای تمام مقادیر B

طراحی شده یک مخزن فولادی مستطیلی به ابعاد 1 m طول، 0.7 m عرض و 0.7 m عمق می‌باشد. آزمایش بر روی ظرفیت باربری فونداسیون با نصب فونداسیون فولادی به عرض 8 cm طول 70 cm و ضخامت 3.5 cm انجام شده است. برای دستیابی به تراکم ماسه مورد نیاز از روش بارش ماسه استفاده شد. شبیه‌سازی بارگذاری با اعمال فشار به پی نواری انجام شد. فشار اعمال شده در توده خاک توسط یک گیج صفحه‌ای با دقت اندازه‌گیری حداقل 0.01 mm اندازه‌گیری گردیده است. لازم به ذکر است که استفاده از جک هیدرولیک دستی برای اعمال بار ممکن است باعث تغییر در نرخ بار شود. با این حال، در شرایط بار استاتیکی، تأثیر نرخ بارگذاری بر نشست و ظرفیت باربری پی سطحی ناچیز است (Bildik و Laman, 2015). برای استخراج داده‌های بار و جابه‌جایی برای تجزیه و تحلیل، یک سیستم جمع‌آوری شده توسط جک هیدرولیک با سرعت جابه‌جایی ثابت 1 mm/min به فونداسیون استفاده شده است. بار اعمال شده با سیلندر هیدرولیک توسط لودسل نصب شده بر روی شفت سیلندر هیدرولیک ثبت شده است.

6-1- خلاصه روش آزمایش

در ابتدای آزمایش، حفاظ بارش ماسه مستقیماً بالای جعبه آزمایش قرار می‌گیرد. سپس بستر خاکی در لایه‌هایی به ضخامت 5 cm به روش بارندگی ساخته شده است. در زمان بارش ماسه با قرار دادن قوطی‌هایی با حجم معین در نقاط مختلف جعبه، تراکم ماسه کنترل شده است. حال برای تشکیل توده خاکی شیب‌دار از قالب‌های ساده برای ایجاد شیب ماسه‌ای با زاویه مشخص در عمق، ضخامت مشخص و لایه ضعیف استفاده گردیده است. سپس لایه‌های بعدی ماسه را تا سطح مورد نظر ریخته و سپس مدل فونداسیون را در نقطه خاصی از سطح بستر شنی قرار می‌دهند در نهایت فشار عمودی توسط سیلندر هیدرولیک دستی با سرعت ثابت 1 mm/min به مدل فونداسیون منتقل شده است. سپس از دستگاه اندازه‌گیری عددی برای اندازه‌گیری نشست عمودی توده خاک با دقت 0.01 mm استفاده گردیده است. در برخی موارد، آزمایش‌ها برای دستیابی به سطح معینی از اطمینان در نتایج آزمون تکرار می‌شد. در ادامه نتایج ظرفیت هر آزمون برای متغیرهای مختلف مدل فیزیکی بررسی گردید. پارامترهای متغیر مورد استفاده در آزمایشات (طبق طرح 1) و مقادیر آن‌ها در جدول (2) آمده است.

سه گروه آزمایش، انجام شده که ابتدا رفتار پی که روی یک شیب ماسه‌ای یکنواخت قرار دارد، بررسی می‌شود. سپس در سری دوم و سوم آزمایشات رفتار پی در بستر شیب ماسه‌ای با لایه ضعیف در ضخامت‌ها، عمق‌ها و زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 3- نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی

شماره تست	داده های تست	ظرفیت باری نهایی (آزمایشگاهی)	ظرفیت باربری نهایی (عددی)
1	T=0, e=0, B=0, D=15	35/587	38/43
2	T=5, e=1/2e, B=0	23/750	26/19
3	T=5, e=1/3e, B=0	22/560	25/67
4	T=5, e=1/4e, B=0	22/410	24/92
5	T=5, e=-1/2e, B=0	22/040	24/15
6	T=5, e=-1/3e, B=0	22/246	23/78
7	T=5, e=-1/4e, B=0	22/459	23/56
8	T=5, e=1/2e, B=0.5B	31/789	29/49
9	T=5, e=1/3e, B=0.5B	30/223	28/9
10	T=5, e=1/4e, B=0.5B	27/771	27/21
11	T=5, e=-1/2e, B=0.5B	25/620	26/44
12	T=5, e=-1/3e, B=0.5B	26/685	26/14
13	T=5, e=-1/4e, B=0.5B	27/235	25/86
14	T=5, e=1/2e, B=B	34/071	30/24
15	T=5, e=1/3e, B=B	33/378	29/78
16	T=5, e=1/4e, B=B	32/292	29/28
17	T=5, e=-1/2e, B=B	29/5	28/66
18	T=5, e=-1/3e, B=B	30/558	28/85
19	T=5, e=-1/4e, B=B	31/250	29/57

در این مطالعه، رفتار پی های نواری در شیروانی های ماسه ای با لایه نازک ضعیف در یک آزمون مدل در مقیاس کوچک برای ارزیابی اثرات خروج از مرکزیت، فاصله پی از لبه شیب و زاویه شیب بر ظرفیت باربری مورد بررسی قرار گرفته است. در خصوص شالوده نواری بر روی بستر ماسه ای نتایج زیر را می توان خلاصه نمود:

- لایه نازک ضعیف در لایه بندی خاک شیب دار هم ظرفیت باربری و هم سختی سیستم پی- خاک را کاهش یافته است. بزرگی این اثر به خروج از مرکزیت و فاصله پی از لبه شیب بستگی داشته است.

- لایه نازک ضعیف به ازاء فاصله بحرانی $B=0$ منجر به کاهش بیشتر ظرفیت باربری 41% (از 23.56 kPa به 33.6 kPa) شده است. نزدیک ترین مقادیر ظرفیت باربری به شرایط یکنواخت ماسه در $B=B$ رخ داده است.

- کمترین ظرفیت باربری نیز در $B=0$ رخ داده است.
- بررسی تأثیر زاویه شیب بر نتایج به دست آمده نشان داده که با افزایش زاویه شیب، ظرفیت باربری به دست آمده کاهش یافته است. بحرانی ترین مقدار زاویه α در 45 درجه بوده است.
- مقایسه نتایج مدل آزمایشی با نتایج تحلیلی تحقیق حاضر مؤید انتخاب تراز مقاومت برشی متناسب با سطح تنش پایین

نتایج همچنین نشان می دهد که ظرفیت باربری با افزایش مقدار B یعنی فاصله پی نواری از لبه شیب افزایش می یابد. با افزایش فاصله بین پی و لبه شیب، ظرفیت باربری پی نواری 43% افزایش می یابد (از 23.75 kPa به 34.07 kPa). شکل (18) نشان می دهد که ظرفیت باربری برای همه مقادیر B روندهای مشابهی دارد و با افزایش پارامتر B و خروج از مرکزیت، مقدار ظرفیت باربری نسبت به لبه شیب افزایش می یابد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، ظرفیت باربری انواع آزمایش در جدول (3) نشان داده شده است.

یک مدل عددی معتبر با کالیبراسیون آن توسط نتایج آزمایشگاهی می تواند نیاز به آزمایش برای شرایط مختلف را کاهش دهد. مدل سازی عددی SIGMA/W در این تحقیق یک مدل المان محدود دو بعدی برای ارزیابی حالات مختلف و تغییرات پارامتریک را فراهم کرده است. این نرم افزار قادر به نمایش نمودارهای بار- نشست و تعیین تغییر شکل مجاز حداکثر تنش که بیانگر ظرفیت باربری نهایی می باشد، لحاظ شده است. پارامترهای مقاومت برشی جداول (1) و (2) به دست آمده از آزمایش برش مستقیم برای مدل سازی عددی خاک های رسی و ماسه ای استفاده شده است. برای به دست آوردن نتایج مطلوب، 19 مدل عددی بر اساس توضیحات ارائه شده در جدول (3) ساخته شده است. جدول (3) نتایج تحلیل عددی شالوده نواری را بر روی بستر، با و بدون لایه ضعیف به ترتیب نشان می دهد که از نتایج عددی به دست آمده است. نتایج عددی ارائه شده در جدول (3) و شواهد آزمایشگاهی به وضوح نشان می دهد که ضخامت لایه رسی ضعیف و عمق لایه به طور قابل توجهی بر ظرفیت باربری خاک لایه ای تأثیر می گذارد. شکل های (19) تا (22) به ترتیب نتایج جابجایی پی های نواری را برای آزمایش شماره 14 و 2 نشان می دهند. مطابق نتایج به دست آمده می توان گفت که اندازه روباره و محل لایه ضعیف تأثیر زیادی در افزایش یا کاهش ارزش نهایی ظرفیت باربری پی دارد. به عنوان مثال در این تحقیق کمترین مقدار کاهش ظرفیت باربری نسبت به تست شماره (1) 11% کاهش داشته و بدترین حالت 42% کاهش ظرفیت باربری فونداسیون نواری را ثبت نموده است. مدل سازی عددی انجام شده با توجه شباهت نتایج با مدل های فیزیکی، می تواند برای ارزیابی های پارامتریک مورد توجه قرار گیرد.

همان طور که در جدول (3) نشان داده شده است، گروه آزمایش با مقدار برابر B و فاصله بیشتر نسبت به سایر مقادیر پارامتر B دارای بالاترین مقادیر ظرفیت باربری است. با کاهش این مقدار و نزدیک کردن لایه ضعیف به بالای شیب، مقدار ظرفیت باربری کاهش می یابد.

مقادیر ظرفیت باربری در حداکثر حالت در محدوده 20-25 kPa متغیر است. این مقادیر ظرفیت باربری در مقایسه با شرایط یکنواخت ماسه به طور متوسط 40% کاهش داشته است. علاوه بر این، در شرایط آزمایشگاهی، شش حالت آزمایش برای هر مقدار B انجام شد که بیشترین مقدار ظرفیت باربری برای بالاترین مقدار خروج از مرکزیت مثبت و کمترین مقدار برای بیشترین مقدار خروج از مرکزیت در مقدار منفی رخ داده است. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از روابط نظری نشان داده که مقادیر ظرفیت باربری تعیین شده با روش های Vesic و Meyerhof به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر بوده است. ظرفیت باربری تعیین شده توسط روش نظری Meyerhof با ظرفیت باربری تعیین شده در آزمایشگاه تنها دو درصد متفاوت است.

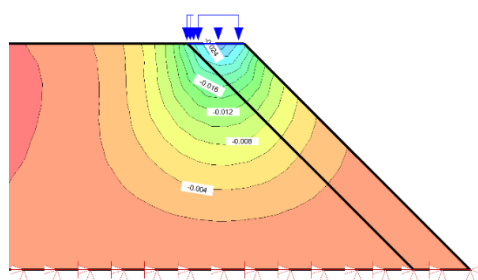
سپس روش Vesic مقادیر واقعی بیشتری از ظرفیت باربری نهایی را نسبت به روش Henssen بیان می کند. اختلاف با نتیجه آزمایشگاهی 9.5% است. ظرفیت باربری هرچه از لایه ضعیف و لبه شیب دورتر شود، افزایش بیشتر شده است. علاوه بر این، ظرفیت باربری با افزایش خروج از مرکزیت به مقادیر منفی کاهش یافته است (یعنی با نزدیک شدن به لبه شیب). لازم به ذکر است که نتایج آزمایشات در مقیاس کوچک به دلیل تأثیرات مقیاس نمی تواند مستقیماً در مسائل دنیای واقعی اعمال شود. یکی از راه های کاهش اثرات مقیاس، انجام آزمایش های مدل فیزیکی در مقیاس کوچک در بارهای بالا است. همچنین هدف اصلی این مطالعه ارزیابی و پیش بینی روند کلی رفتار شالوده نواری در شیب های ماسه ای با لایه آبرفتی نازک و تعیین کمیت تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج ظرفیت باربری بود.

8- نتیجه گیری

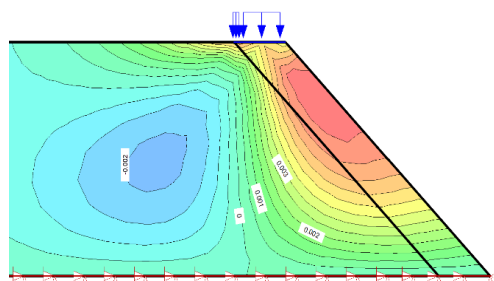
در پژوهش حاضر، رفتار پی نواری در مجاورت شیروانی ماسه ای با لایه ضعیف با استفاده از آزمایش مدل در مقیاس کوچک و تحلیل عددی متناظر بررسی و مقایسه شد. قابل توجه است که هدف از این مطالعه بررسی اثرات خروج از مرکزیت و فاصله پی از تاج شیروانی بر ظرفیت باری نهایی پی نواری که بر روی بستر شیروانی از جنس ماسه ای بوده، انتخاب شده است. بر اساس نتایج شرح داده شده در این مقاله می توان گفت:

- لایه نازک ضعیف شیروانی هم زمان ظرفیت باربری و سختی سیستم خاک زیر پی را کاهش می دهد. وسعت این اثر به خروج از مرکزیت و فاصله پی از لبه شیروانی بستگی دارد.
- حداکثر تأثیر لایه نازک ضعیف برای شالوده در فاصله بحرانی اتفاق می افتد که پی چسبیده به تاج شیروانی باشد و ظرفیت باری نهایی تا 43% کاهش می یابد و کمترین اثر این حالت زمانی می باشد که فاصله تا تاج شیب برابر با عرض پی شود.

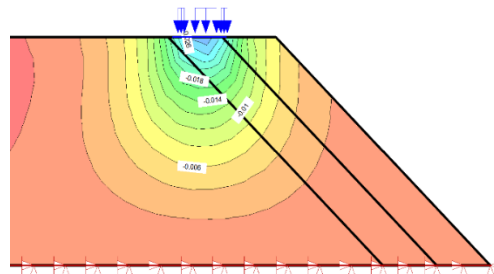
به عنوان انتخاب مناسب برای مدل سازی های عددی مدل های فیزیکی است.



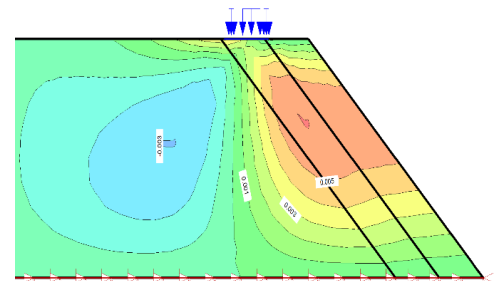
شکل 19- نتیجه توزیع جابه جایی عمودی تست شماره 2 پی نواری (نشست مجاز)



شکل 20- نتیجه توزیع جابه جایی افقی آزمایش شماره 2



شکل 21- نتیجه توزیع جابه جایی عمودی تست شماره 14 (نشست مجاز)



شکل 22- نتیجه توزیع جابه جایی افقی تست پی نواری شماره 14

- 2010.
- Frydman S, Burd HJ, "Numerical studies of bearing-capacity factor", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123 (1), 20.
- Hanna AM, Meyerhof GG, "Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 17, 300-303.
- Hansen JB, "A revised and extended formula for bearing capacity", *Danish Geotechnical Institute, Bull*, 1970, 28, 5-11.
- Halder K, Chakraborty D, "Influence of soil spatial variability on the response of strip footing on geocell-reinforced slope", *Computers and Geotechnics*, 2020, 122.
- <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103533>
- Johari R, Koomen P, Pekelis L, Walsh D, "Peeking at a/b tests: why it matters, and what to do about it", *Proceedings of the 23rd ACM sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2017, 1517-1525.
- <https://doi.org/10.1145/3097983.3097992>
- Keawsawasvong S, Thongchom C, Likitlersuang S, "Bearing capacity of strip footing on Hoek-Brown rock mass subjected to eccentric and inclined loading", *Transp Infrastructure, Geotechnol*, 2021, 8, 189-200.
- Kenny MJ, Andrawes KZ, "The bearing capacity of footings on a sand layer overlying soft clay", *Geotechnique*, 1996, 47 (2), 339-345.
- Keskin MS, Laman M, "Model studies of bearing capacity of strip footing on sand slope", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013, 17, 699-711.
- <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0406-x>
- Kraft LM, Helfrich JSC, "Bearing capacity of shallow footing, sand over clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 1983.
- Madhav MR, Sharma JSN, "Bearing capacity of clay overlain by stiff soil", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1991, 117 (12), 1941-1948.
- Masayuki H, Yang W, Shintaro K, Yukio N, Norimasa Y, "Effect of fines on the compression behaviour of poorly graded silica sand", *Geomechanics and Engineering*, 2017, 12 (1), 127-138.
- Meyerhof GG, "Some Recent Research on the bearing capacity of foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, 1963, 1 (1), 16-26.
- Meyerhof GG, "Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 1974, 11, 223-229.
- Meyerhof GG, Hanna AM, "Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load", *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15 (4), 565-572.
- Michalowski RL, "Stability of uniformly reinforced slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1996, 123 (6), (17).
- Michalowski RL, Shi L, "Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 313, 421-428.
- Michalowski RL, Shi L, "Closure to 'Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils'", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 121, No. 5.
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1995\)121:5\(421\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1995)121:5(421))
- ارزیابی داده‌های فیزیکی و عددی نشان می‌دهند که حداکثر تأثیر شرایط بارگذاری خارج از مرکزیت و حضور لایه ضعیف در بستر یک شیروانی در حالات مرزی از 20-43 بر مقدار ظرفیت باربری مؤثر می‌باشد که البته این درصد بستگی مستقیمی به زاویه اصطکاک داخلی و اتساع ماسه می‌باشد.
 - همچنین در شرایط آزمایشگاهی 6 حالت آزمایشگاهی برای هر فاصله تا تاج شیب انجام شده است که بیشترین مقدار ظرفیت باربری برای بالاترین مقدار خروج از مرکزیت مثبت و کمترین مقدار برای بیشترین مقدار خروج از مرکزیت منفی رخ می‌دهد.
 - با تجزیه و تحلیل نتایج روابط نظری، مقادیر ظرفیت باربری به‌دست آمده از روش‌های Vesic و Meyerhof مقادیر نزدیک-تری به نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر را می‌دهد. ظرفیت باربری به‌دست آمده از روش تئوری Meyerhof تنها 2% با مقدار ظرفیت باربری به‌دست آمده در آزمایشگاه متفاوت است. اما روش Henssen مقادیر نزدیک‌تری به نتایج عددی تحقیق را می‌دهد و اختلاف نتایج به‌دست آمده با آن در حدود 9/5% است.
 - ظرفیت باربری با دور شدن از لایه ضعیف و تاج شیروانی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار خروج از مرکزیت به مقادیر منفی (یعنی نزدیک شدن به لبه شیروانی) ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.
- ### 9- مراجع
- Bildik S, Laman M, "Experimental Investigation of the effects of pipe location on the bearing capacity", *Geomechanics and Engineering*, 2015.
- <http://doi.org/10.12989/gae.2015.8.2.221>
- Bolton MD, Lau CK, "Scale effects in the bearing capacity of granular soils", *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 1989, 2, 895-898.
- Brown JD, Meyerhof GG, "Experimental study of bearing capacity in layered clays", *7th international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1969.
- Burd HJ, Frydman S, "Bearing Capacity of Plane-strain Footings on Layered Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 34, 241-253.
- Button SJ, "The bearing capacity of footings on two-layer cohesive subsoil", *Proceedings of 3rd International conference Conf, SMFE, Zurich*, 1953, 1, 332-335.
- Cerato AB, Lutenegeger AJ, "Determining intrinsic compressibility of fine-grained soils", *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 (8), 872-877.
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2004\)130:8\(872\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2004)130:8(872))
- Farzaneh O, Ganjian N, Askari F, "Rotation-translation mechanisms for upper-bound solution of bearing capacity problems", *Computers and Geotechnics*,

- Wu Y, Zhou X, Gao Y, Shu S, "Bearing capacity of embedded shallow foundations in spatially random soils with linearly increasing mean undrained shear strength", *Computer and Geotechnic*, 2020, 122.
- Michalowski RL, You L, "Effective width rule in calculations of bearing capacity of shallow footings", *Computers and Geotechnics*, 1998.
- Oda M, Win S, "Ultimate bearing capacity tests on sand with clay layer", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116 (12), 1902-1906.
- Okamura M, Takemura J, Kimura T, "Centrifuge model tests on bearing capacity and deformation of sand layer overlying clay", *Soils Foundation*, 1997, 37 (1), 73-88.
- Paolucci R, Pecker A, "Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on dry soils", *Soils and Foundations*, 1997.
- Pfeifle TW, Das BM, "Model tests for bearing capacity in sand", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1979, 105, 1112-1116.
- Purushothamaraj P, Ramiah BK, Rao KNV, "Bearing capacity of strip footings in two layered cohesive-friction soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 11, 32-45.
- Siraj-Eldine K, Bottero A, "Étude expérimentale de la capacité portante d'une couche de sol pulvérulent d'épaisseur limitée", *Canadian Geotechnical Journal*, 1987. <https://doi.org/10.1139/t87-029>
- Tani K, Craig WH, "Bearing capacity of circular foundation on soft clay of strength increasing with depth", *Soils Foundation*, 1995, 35 (4), 21-35.
- Taylor RN, "Centrifuges in modelling: principles and scale effects", *Geotechnical Centrifuge Technology* (Taylor R. N. (ed.)), Blackie Academic and Professional, London, UK, 1995, 19-33.
- Terzaghi K, "Effects of minor geologic details on the safety of dams", *Geology and Engineering for Dams and Reservoirs*, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication, 1929, 215, 31-44.
- Turker E, Sadoglu E, Cure E, Uzuner BA, "Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Strip Footings Close to Geotextile-Reinforced Sand Slope", *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51, 884-895. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0055>
- Tournier JP, Milović DM, "Etude expérimentale de la capacité portante d'une couche compressible d'épaisseur limitée", *Géotechnique*, 1977, 27 (2), 111-123.
- Toyosawa Y, Itoh K, Kikkawa N, Yang JJ, Liu F, "Influence of model footing diameter embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity test", *Soils and Foundations*, 2013, 53 (2), 349-356.
- Valore C, Ziccarelli M, Muscolino SR, "The bearing capacity of footings on sand with a weak layer", *Geotechnical Research*, 2017, 4 (1), 12-29. <https://doi.org/10.1680/jgere.16.00020>
- Vesic AS, "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99 (SM1), 45-73.
- Vesic AS, "Bearing Capacity of Shallow Foundations", *Foundation Engineering Hand Book*, Edited by Hsai-Yang Fang, Van Nostrand Reinhold Book Co., New York, 1975, 144-165.