University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 56 (2026), Issue 3, 1-9

EXTENDED ABSTRACT

Axial Bearing Capacity of Pile Group Located on Crest of Sandy Slope

Ali Gotabi [a], Reza Mohammad Ali Nejad [b,*], Kheirollah Masihpour [c]

[a] *M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*
[b] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*
[c] *Instructor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*

Received: 23 February 2025; **Reviewed:** 17 July 2026; **Accepted:** 30 September 2026

Keywords:
Pile group, Bearing capacity, Slope, Sand, Physical model.

1. Introduction

Pile groups are widely used as foundations for high-rise buildings, bridge piers, and power transmission structures. Some of these structures are constructed adjacent to or on slopes. Over the past few decades, significant research has been conducted on the lateral bearing capacity of pile groups near slopes. However, no studies have yet addressed the axial bearing capacity of pile groups in proximity to slopes. Therefore, investigating the behavior of pile groups near slopes under axial loading is of considerable importance.

In this study, physical model tests were employed to examine the bearing capacity of 2×2 and 1×2 pile groups situated on the crest of a medium-density sand slope. The effects of factors such as pile spacing, embedded pile length, and the orientation of the linear pile group relative to the slope crest on the bearing capacity, tilting, and horizontal displacement of the pile head were investigated.

2. Methodology

2.1. Soil properties

In this work, fine, uniform sand having an average diameter (d_{50}) of 0.18mm was collected from Ramhormoz, located in Khuzestan province in Iran. The sand was used to construct the slope models in a dry state. The sand has been classified as poorly graded (SP) according to Unified Soil Classification System.

2.2. Experimental setup and testing program

In this study, solid steel piles with a diameter of 18 mm were used. The spacing between the piles was set at three times the pile diameter, and the embedded length of the piles was 40cm. Steel pile caps with dimensions of 15×15cm and a thickness of 2cm were utilized. The slope angle was set at 33.7 degrees, with a slope height of 50cm and a soil relative density of 60%.

A test box with internal dimensions of 180×90×90cm was used in this research. The dimensions of the box were determined to ensure that the lateral boundaries would not influence the test results. The absence of boundary effects was verified through sensitivity analysis using PLAXIS3D software. Before each test, a thin layer of oil was applied to the inner walls of the box to reduce friction between the soil and the box walls. The arrangement of the pile group and the loading setup are illustrated in Fig. 1.

Publisher: University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2025.65500.2413
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0002-5432-759X
E-mail addresses: aghotabi@gmail.com (Ali Ghotabi), reza@iau.ac.ir (Reza Mohammad Ali Nejad), masihpor95@gmail.com (Kheirollah Masihpour).

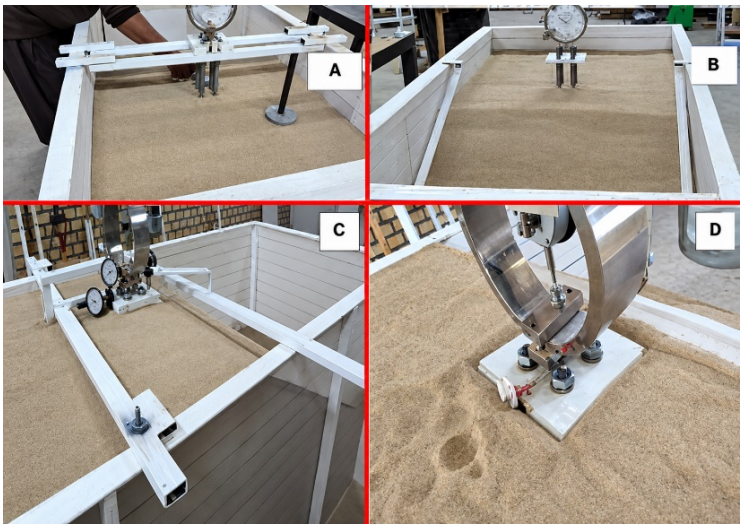


Fig. 1. a) Positioning the pile group at the desired location, **b)** Anchoring the piles at the last 15cm of the slope execution, **c)** Positioning the force gauge and gauges, **d)** Displacement of the pile head at the end of the test

To observe and control the construction of the slope, a 10 mm thick plexiglass sheet was installed on the front face of the box.

3. Results and discussion

3.1. Effect of pile space

In this section, a 2×2 pile group consisting of piles with a diameter of 18 mm, an embedded length of 400 mm, and center-to-center spacings of 3, 4, and 5 times the pile diameter was modeled on both flat ground and the crest of a sand slope.

The results presented in Fig. 2 indicate that the bearing capacity of the pile group adjacent to the slope increases as the spacing between the piles increases. This is attributed to the enhanced lateral stiffness of the pile group with greater pile spacing. The findings are consistent with the results reported by Mohammad Ali Nejad and colleagues. The bearing capacity of the pile group increased from 1812 N to 2097 N and 2320 N as the pile spacing increased from 3 to 4 and 5 times the pile diameter, respectively. This represents an increase of 15.7% and 28% in the bearing capacity of the pile group.

The results in Table 1 demonstrate that as the pile spacing increases from 3 to 4 and 5 times the pile diameter, the reduction factor (RF) increases from 0.68 to 0.74 and 0.78, respectively. This indicates a reduction in the influence of the slope on the bearing capacity of the pile group as the spacing between the piles increases from 3 to 4 and 5 times the pile diameter.

These findings highlight the importance of pile spacing in optimizing the bearing capacity of pile groups, particularly in slope conditions. The increased spacing reduces the interaction effects between the piles and mitigates the adverse influence of the slope, leading to improved performance of the foundation system.

The results in Table 1 indicate that the horizontal displacement of the pile head decreases as the spacing between the piles increases. This is attributed to the increased stiffness of the pile group with greater pile spacing. The horizontal displacement of the pile head decreased from 0.57mm to 0.51mm and 0.47mm as the pile spacing increased from 3 to 4 and 5 times the pile diameter, respectively. This represents a reduction of 11% and 18% in the horizontal displacement of the pile head.

Additionally, the rotation of the pile head decreases with an increase in the center-to-center spacing of the piles. As the spacing increased from 3 to 4 and 5 times the pile diameter, the tilting decreased from 0.8% to 0.72% and 0.67%, respectively. This corresponds to a reduction of 10% and 16% in the tilting.

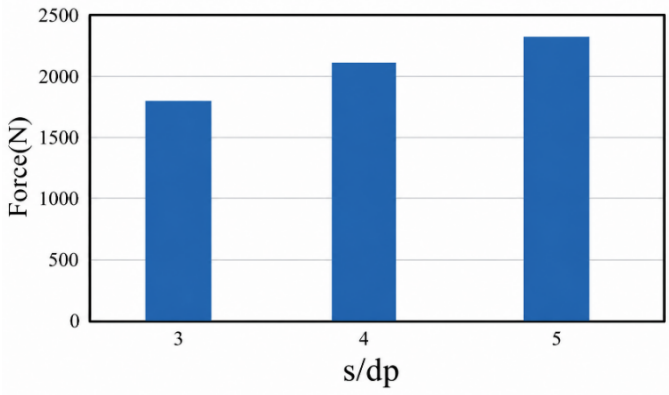


Fig. 2. Bearing capacity of pile group

Table 1. Horizontal l displacement and tilting of pile group

Pile spacing (d_p)			
	3	4	5
horizontal l displacement (mm)	0.57	0.51	0.47
Tilting (%)	0.8	0.72	0.67

3.2. Effect of embedded pile length

In this section, a 2×2 pile group consisting of piles with a diameter of 18mm and embedded lengths of 150mm, 300mm, and 400mm, with a center-to-center spacing of 3 times the pile diameter, was modeled on both flat ground and the crest of a slope. The slope had a gradient of 1:1.5 (Hs:Vs) and a height of 500mm.

With a reduction in the embedded length from 40cm to 25cm and 15cm, the bearing capacity of the pile group adjacent to the slope decreased from 1812N to 1476N and 1173N, respectively. This represents a reduction of 19% and 35% in the bearing capacity of the pile group. As the embedded length of the piles increased, the reduction factor (RF) also increased, indicating a decrease in the influence of the slope on the bearing capacity of the pile group. When the embedded length was reduced from 40cm to 25cm and 15cm, the RF decreased from 0.68 to 0.64 and 0.6, respectively.

Furthermore, the horizontal displacement of the pile group located on the slope crest increased as the embedded length decreased. When the embedded length was reduced from 40cm to 25cm and 15cm, the horizontal displacement increased from 0.57mm to 0.67mm and 0.86mm, respectively.

Similarly, the tilting of the pile head increased with a reduction in the embedded length. As the embedded length decreased from 40cm to 25cm and 15cm, the pile head tilting increased from 0.8% to 1.15% and 1.75%, respectively.

These findings underscore the significant influence of embedded pile length on the bearing capacity, horizontal displacement, and tilting behavior of pile groups in slope conditions. Increasing the embedded length enhances the stability and performance of the pile group, while reducing the embedded length exacerbates the adverse effects of the slope. These results provide valuable insights for optimizing the design of pile foundations in slope environments.

Table 2. Bearing capacity of pile group

Embedded Pile Length (cm)			
	15	30	40
Horizental level	1955	2307	2643
Slope crest	1173	1476	1812
RF	0.6	0.64	0.68

3.3. Effect of linear pile group orientation relative to the slope

In this section, a 1×2 pile group consisting of piles with a diameter of 18mm, an embedded length of 400mm, and a center-to-center spacing of 3 times the pile diameter was modeled on the crest of a sand slope. The slope had a gradient of 1:1.5 (Hs:Vs) and a height of 500mm. The experimental results are presented in Table 3.

The bearing capacity of the linear pile group is influenced by its orientation relative to the slope crest. The bearing capacity of the 1×2 pile group oriented perpendicular to the slope crest (1×2v) is 6% higher than that of the 1×2 pile group oriented parallel to the slope crest (1×2p). The reduction factor (RF) for the 1×2 pile group perpendicular to the slope crest (1×2v) is also higher than that of the pile group parallel to the slope crest. Specifically, the RF for the 1×2v pile group is 7% greater than that of the 1×2p pile group.

The horizontal displacement of the pile head is also dependent on the orientation of the pile group relative to the slope crest. The horizontal displacement of the pile head for the 1×2 pile group perpendicular to the slope crest (1×2v) is 8% less than that of the 1×2 pile group parallel to the slope crest (1×2p).

The tilting of the pile head for the 1×2 pile group perpendicular to the slope crest (1×2v) and the 1×2 pile group parallel to the slope crest (1×2p) was measured at 1.3% and 1.6%, respectively. This indicates that the tilting of the pile head for the 1×2p pile group is 23% greater than that of the 1×2v pile group.

These results demonstrate that the orientation of the pile group relative to the slope crest significantly

Table 3. Horizontal displacement and tilting of linear pile group

	Pile group		
	2×1(p)	2×1(v)	2×2
horizontal l displacement (mm)	0.88	0.81	0.57
`Tilting (%)	1.6	1.3	0.8

4. Conclusions

1. The bearing capacity of the pile group adjacent to the slope increases as the spacing between the piles increases. This is due to the increase in the lateral stiffness of the pile group with greater spacing between the piles. The bearing capacity of the pile group increased by 15.7% and 28%, respectively, as the pile spacing increased from 3 times the pile diameter to 4 and 5 times the pile diameter, rising from 1812N.
2. The bearing capacity of the pile group adjacent to the slope decreases with a reduction in the embedded length of the piles. When the embedded length of the piles was reduced from 40cm to 25cm and 15cm, the bearing capacity of the pile group adjacent to the slope decreased by 19% and 35%, respectively.

The bearing capacity of a linear pile group perpendicular to the slope is greater than that of a pile group parallel to the slope. The bearing capacity of a 2×1 pile group perpendicular to the slope crest is 6% higher than that of a 2-pile group parallel to the slope crest.

ظرفیت باربری محوری گروه شمع واقع بر رأس شیروانی ماسه‌ای

علی قطابی[1]، رضا محمد علی نژاد*[2]، خیرالله مسیح‌پور[3]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[2] استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[3] مربی گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دریافت: 1403/12/5، بازنگری: 1405/4/26، پذیرش: 1405/4/8، نشر آنلاین: 1405/7/8

چکیده

از گروه شمع به‌عنوان پی ساختمان‌های بلند و پل‌ها استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت و یا روی شیروانی مستقر می‌گردند. درخصوص اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع تحقیقات زیادی صورت گرفته است؛ اما درخصوص اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری محوری گروه شمع، تاکنون تحقیقاتی صورت نگرفته است. در این تحقیق، به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای خشک و با تراکم متوسط پرداخته می‌شود. در این مقاله، گروه‌های شمع 2×2 و 1×2 با شمع‌های فولادی با قطر 18 میلی‌متر بر روی رأس شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط مدل گردیدند و اثر عواملی همانند فاصله شمع‌ها از یکدیگر، طول مدفون شمع‌ها و جهت قرارگیری شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری محوری، چرخش سرشمع و جابه‌جایی افقی سرشمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد، با افزایش فاصله بین شمع‌ها از 3 به 4 و 5 برابر قطر شمع، ظرفیت باربری محوری گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای به‌ترتیب 15/7% و 28% افزایش یافته و چرخش سرشمع کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد ظرفیت باربری گروه شمع خطی عمود بر راستای رأس شیروانی از ظرفیت باربری محوری گروه شمع موازی رأس شیروانی 6% بیشتر می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش طول مدفون شمع، اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری محوری گروه شمع، کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: گروه شمع، ظرفیت باربری، شیروانی، ماسه، مدل فیزیکی.

1- مقدمه

از گروه شمع به‌عنوان پی بسیاری از سازه‌های مستقر در دریا و خشکی استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند. لذا بررسی اثر شیروانی بر روی رفتار شمع منفرد و گروه شمع حائز اهمیت می‌باشد.

تاکنون در خصوص ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی تحقیقات زیادی صورت گرفته است (Kumar و همکاران، 2024؛ Shao و همکاران، 2024؛ Jala و همکاران، 2025؛ Kangal، 2025؛ Wang و همکاران، 2025؛ Bahri و Arabani، 2025؛ Kayalvizhi و همکاران، 2023؛ Khati و همکاران، 2024).

Sivapriya و همکاران (2024) به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی به‌دلیل کاهش فشار مقاوم بسیج شده روبه‌روی شمع از ظرفیت باربری شمع منفرد و گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح کمتر می‌باشد.

Sivapriya و James (2024) به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع، ظرفیت باربری جانبی گروه شمع به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077
https://doi.org/10.22034/ceej.2025.65500.2413

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 09166910051
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0002-5432-759X
آدرس ایمیل: aghotabi@gmail.com (ع. قطابی)، reza@iau.ac.ir (ر. محمد علی نژاد)، masihpor95@gmail.com (خ. مسیح‌پور).

Lateh و همکاران (2024) به‌کمک روش المان محدود سه‌بعدی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی پی‌های شمع‌دار پرداختند. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که هنگامی‌که پی شمع‌دار در فاصله 8 برابر قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای قرار می‌گیرد؛ می‌توان از اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی پی شمع‌دار صرف‌نظر کرد.

Jala و همکاران (2025) به‌کمک روش المان محدود سه‌بعدی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد پرداختند. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد با افزایش تراکم خاک، ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد افزایش یافته و با افزایش شیب شیروانی، ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد کاهش می‌یابد.

Rathod و همکاران (2024) به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری گروه شمع 2×2 از شمع منفرد بیشتر است.

Khati و Sawant (2021) به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع 2×2 مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش تراکم خاک ماسه‌ای اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری جانبی گروه شمع افزایش می‌یابد.

Perumalsamy و Ranganathan (2024) به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش تراکم خاک از 25٪ به 45٪، ظرفیت باربری گروه شمع واقع در رأس شیروانی 50٪ افزایش می‌یابد.

Tiwari و همکاران (2024) به‌کمک روش المان محدود سه‌بعدی به بررسی اثر شیروانی ماسه‌ای و رسی بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد پرداختند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که شیب شیروانی بیشترین اثر را بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد دارد. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری شمع منفرد در شیروانی رسی 1/7 تا 2 برابر ظرفیت باربری جانبی شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای می‌باشد.

Mohammad Alinejad و همکاران (2021، 2023 و 2024) به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری محوری گروه شمع خود ایستا [1] پرداختند. در آزمایش‌های انجام شده توسط آن‌ها، مرکز سرشمع از سطح افقی به‌اندازه عرض سرشمع فاصله داشت. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری محوری گروه شمع مجاور شیروانی به‌دلیل کاهش فشار محصورکننده جانبی نسبت به ظرفیت باربری جانبی گروه شمع واقع بر زمین مسطح کمتر می‌باشد. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری محوری گروه شمع مجاور شیروانی به‌فاصله شمع‌ها از یکدیگر، طول مدفون شمع‌ها، شیب شیروانی، فاصله گروه شمع از رأس شیروانی، تراکم خاک و جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد.

در چند دهه اخیر، درخصوص ظرفیت باربری جانبی گروه شمع مجاور شیروانی تحقیقات زیادی شده است. اما درخصوص ظرفیت باربری محوری گروه شمع مجاور شیروانی تاکنون تحقیقاتی صورت نپذیرفته است. لذا بررسی رفتار گروه‌های شمع در مجاورت شیروانی تحت بار محوری، حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق، به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع 2x2 و 2x1 مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط پرداخته می‌شود و اثر عواملی همانند تعداد فاصله شمع‌ها، طول مدفون شمع‌ها و جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری محوری، چرخش سرشمع (نسبت تفاوت جابه‌جایی قائم دو لبه سرشمع به عرض سرشمع) و جابه‌جایی افقی سرشمع مورد بررسی قرار گرفت.

2- آزمایش‌های آزمایشگاهی

2-1- مصالح و روش انجام

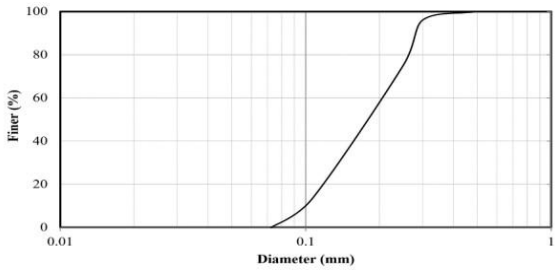
2-1-1- خاک

در این پژوهش، از ماسه ریزدانه خشک شهرستان رامهرمز واقع در جنوب غرب کشور استفاده گردید. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل (1) و ویژگی‌های این ماسه در جدول (1) ارائه شده است. دانه‌بندی خاک به‌کمک آزمایش دانه‌بندی به‌روش خشک تعیین گردید. ماسه بر اساس روش طبقه‌بندی متحد از نوع SP بوده و از آزمایش برش مستقیم جهت تعیین زاویه اصطکاک ماسه استفاده گردید.

2-1-2- روش انجام آزمایش

در این مطالعه، از شمع‌های فولادی توپر به قطر 18 میلی‌متر، فاصله شمع‌ها 3، 4 و 5 برابر قطر شمع و طول مدفون 15، 25 و 40 سانتی‌متر و از سرشمع فولادی به ابعاد 15x15 سانتی‌متر و ضخامت 2 سانتی‌متر استفاده گردید. زاویه شیروانی 33/7 درجه و ارتفاع شیروانی 50 سانتی‌متر و تراکم خاک 60% در نظر گرفته شده بود. در این تحقیق، از امکانات انجام آزمایش مدل فیزیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامهرمز استفاده گردید. از یک جعبه با ابعاد داخلی 90x90x180 سانتی‌متر در این تحقیق استفاده گردید.

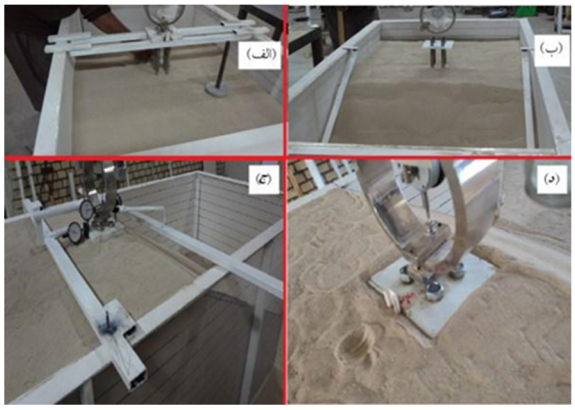
1. Free-standing pile group



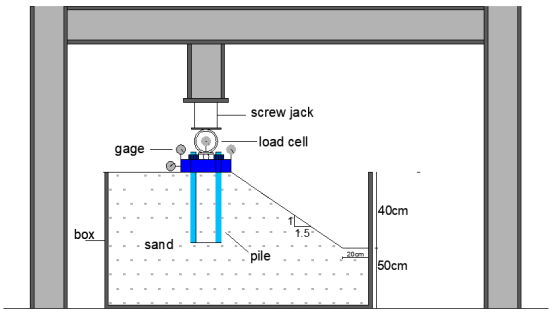
شکل 1- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در این تحقیق

ابعاد باکس به‌گونه‌ای تعیین گردید تا مرزهای جانبی اثری بر روی نتایج آزمایش‌ها نداشته باشد. عدم تأثیرپذیری نتایج از مرزهای جانبی به‌کمک آنالیز حساسیت و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D کنترل گردید. مطابق پیشنهاد محققین مختلف عرض باکس می‌بایست شش برابر عرض سرشمع باشد که در این تحقیق این نسبت رعایت شده است (Sharafkhah و Shooshpasha، 2018 و 2020).

اگرچه ابعاد باکس در این تحقیق مناسب می‌باشد؛ اما برای اطمینان از عدم تأثیرگذاری دیواره‌های باکس بر روی نتایج، قبل از هر آزمایش جهت کاهش اصطکاک بین خاک و دیواره باکس، یک لایه نازک روغن بر روی دیواره‌های باکس اجرا گردید (30). به‌منظور مشاهده و کنترل اجرای شیروانی، در وجه جلویی باکس از ورق پلکسی به‌ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شده بود. شیروانی ماسه‌ای خشک در 18 لایه به ضخامت 5 سانتی‌متر تا رسیدن به تراکم موردنظر متراکم گردید. به‌منظور دستیابی به یک تراکم یکسان در تمامی لایه‌ها، از روش تراکم کاهش‌یافته جهت تراکم شیروانی استفاده گردید (31). تراکم نهایی مورد نظر برای لایه‌ها 60% درنظر گرفته شد. تراکم نسبی خاک در هر لایه به‌کمک حجم و وزن خاک مورد نیاز هر لایه کنترل گردید. با توجه به این‌که خاک بین شمع‌ها و خاک اطراف شمع همانند سایر نقاط شیروانی باید تا تراکم مورد نظر متراکم گردند، لذا از کوبه‌هایی با سایز مختلف جهت متراکم نمودن خاک بین شمع‌ها و اطراف شمع‌ها استفاده گردید. در زمان اجرای شیروانی، به‌هنگام رسیدن شیروانی به تراز نوک شمع، گروه شمع در محل مورد نظر مستقر می‌گردید. بدین‌منظور، از دو میله استفاده گردید که از زیر سرشمع در جهت عرضی جعبه آزمایش عبور کرده و انتهای آن‌ها توسط 4 گیره به لبه‌های جعبه محکم می‌گردیدند (شکل (2-الف)). سپس اجرای سایر لایه‌های خاک تا تراز نهایی ادامه پیدا کرد. لازم به‌ذکر است برای اجرای سه لایه پایانی شیروانی، به‌منظور دستیابی به تراکم مدنظر خاک ماسه‌ای واقع در زیر سرشمع، سرشمع برداشته می‌شد و شمع‌ها به‌کمک یک اشل فولادی در محل خود ثابت می‌شدند (شکل (2-ب)) و در انتهای پروسه اجرای شیروانی، مجدداً سرشمع به گروه شمع متصل می‌گردید. بارگذاری از طریق جک اسکرو برقی متصل شده به قاب بارگذاری، بر روی مرکز سرشمع اعمال گردید. در تمامی‌آزمایش‌ها، بارگذاری به‌صورت جابه‌جایی با سرعت ثابت 1/5 میلی‌متر بر دقیقه بر مرکز سرشمع اعمال گردید و نیروی اعمال شده به‌وسیله یک رینگ نیروسنج که مابین سرشمع و قاب فولادی قرار داده شده بود، اندازه‌گیری می‌گردید. جابه‌جایی قائم سرشمع توسط دو گیج 30 میلی‌متری با دقت 0/01 میلی‌متر، که در دو لبه سرشمع قرار داشتند، اندازه‌گیری گردید (شکل (2-د)) و متوسط جابه‌جایی قائم اندازه‌گیری شده توسط این دو گیج، به‌عنوان جابه‌جایی قائم گروه شمع درنظر گرفته شد. جابه‌جایی جانبی سرشمع توسط یک گیج با دقت 0/01 میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. در تمامی آزمایش‌ها، بارگذاری تا جابه‌جایی قائم 25 میلی‌متر اعمال گردید. نحوه قرارگیری گروه شمع در مجاورت شیروانی در شکل (3) نشان داده شده است. برنامه آزمایش‌های انجام‌شده در جدول (2) ارائه شده است.



شکل 2- الف) نحوه قرارگیری گروه شمع در محل مدنظر، ب) نحوه مهار شمع‌ها در 15 سانتی‌متر انتهایی اجرای شیروانی، ج) نحوه قرارگیری نیروسنج و گیج‌ها، د) جابه‌جایی سرشمع در انتهای آزمایش



شکل 3- نحوه قرارگیری گروه شمع در مجاورت شیروانی

در این تحقیق، از گروه‌های شمع 2x2 و 2x1 استفاده گردید. در این آزمایش‌ها فاصله شمع‌ها در گروه‌های شمع 3dp، 4dp و 5dp درنظر گرفته شد (dp قطر شمع می‌باشد). از مفاهیم آنالیز عددی به‌منظور استفاده از نتایج این تحقیق، جهت نمونه‌هایی با

مقیاس بزرگ می‌توان استفاده نمود. درصورتی‌که λ ضریب مقیاس هندسه مدل باشد (نسبت اندازه واقعی به‌اندازه مدل آزمایشگاهی) و از خاک واقعی در مدل‌سازی استفاده گردد، برای آزمایش‌های تحت شتاب 1g، ضرایب مقیاس را می‌توان از جدول (3) استخراج نمود.

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی ماسه مورد استفاده در تحقیق

ویژگی	مقدار
$(\gamma_d)_{max}\ (KN/m^3)$	16/90
$(\gamma_d)_{min}\ (KN/m^3)$	13/88
G_s	2/65
$\Phi\ (^o)$	35
D_{10}	0/01
D_{50}	0/18
C_u	2/05
C_c	0/82
Passing 200 sieve (%)	0
Soil type: USCS	SP

جدول 2- برنامه آزمایش‌های مدل فیزیکی

هدف بررسی	تعداد آزمایش‌ها		
اثر فاصله شمع‌ها	6	$3d_p,4d_p,5d_p$	400
اثر طول مدفون شمع‌ها	4	$3d_p$	150.250.400
اثر جهت قرارگیری گروه شمع	3	$3d_p$	400

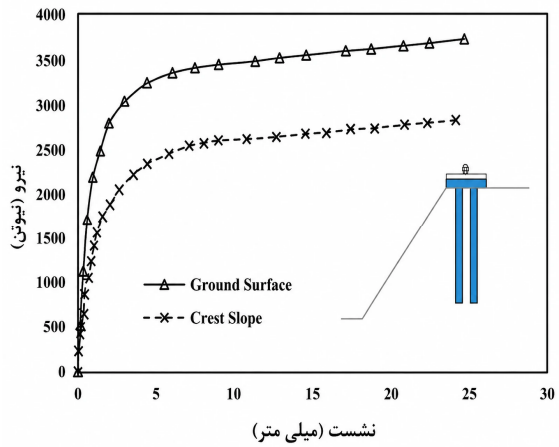
جدول 3- خلاصه ضرایب مقیاس آنالیز عددی

پارامتر	ضریب مقیاس
طول	λ
دانسیته	1
تنش	λ
کرنش	$\lambda^{0.5}$
سرعت	$\lambda^{0.75}$
مدول برشی	$\lambda^{0.5}$

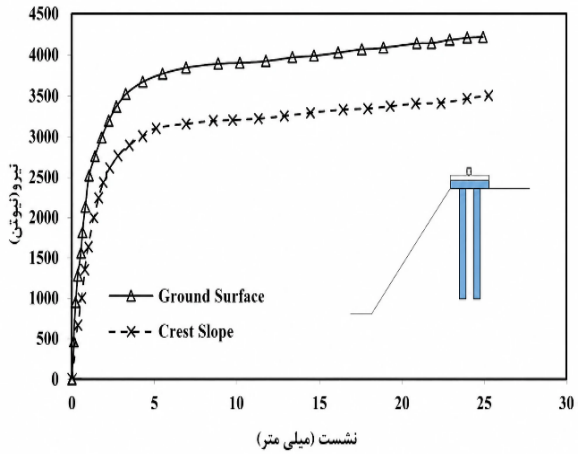
3- نتایج

3-1- اثر فاصله بین شمع‌ها

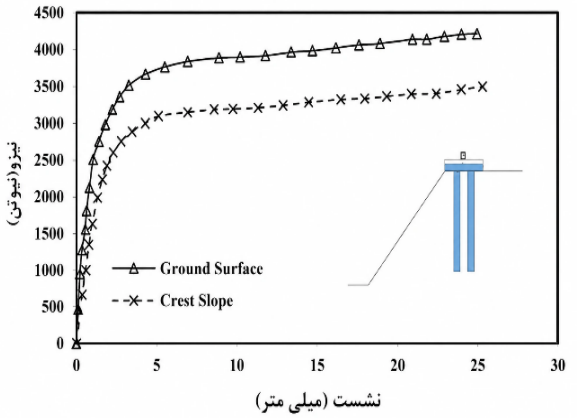
در این بخش، اثر فاصله شمع‌ها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری، چرخش سرشمع و جابه‌جایی افقی گروه شمع 2x2 واقع در رأس شیروانی ماسه‌ای خشک مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت، گروه‌های شمع 2x2 با شمع‌هایی با قطر 18 میلی‌متر و طول مدفون 40 سانتی‌متر و فاصله مرکزبه‌مرکز 3، 4 و 5 برابر قطر شمع، بر روی زمین مسطح و رأس شیروانی ماسه‌ای مدل گردیدند. شیب شیروانی 1: 1/5 (Hs:Vs) و ارتفاع شیروانی 50 سانتی‌متر درنظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها، در شکل‌های (4) تا (7) و جدول (4) ارائه شده است.



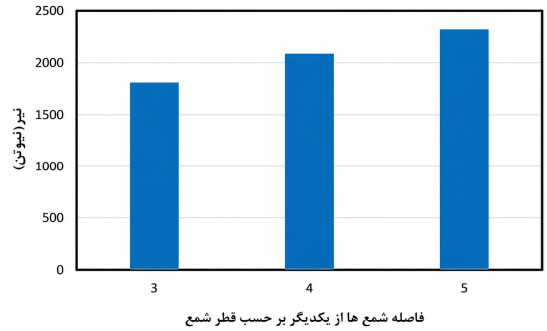
شکل 4- منحنی بار- نشست گروه شمع برای فاصله شمع‌های سه برابر قطر



شکل 5- منحنی بار- نشست گروه شمع برای فاصله شمع‌های چهار برابر قطر



شکل 6- منحنی بار- نشست گروه شمع برای فاصله شمع‌های پنج برابر قطر



شکل 7- اثر فاصله شمع‌ها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی

برای تعیین ظرفیت باربری گروه شمع از روش 10٪ قطر (نیروی اعمالی جهت نشستی معادل 10٪ قطر شمع که در این تحقیق، نیرو معادل نشست 1/8 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود) استفاده گردید (Mohammad Alinejad و همکاران، 2024).

برای مقایسه بهتر نتایج، ظرفیت باربری محوری گروه شمع 2×2 واقع بر رأس شیروانی در شکل (7) رسم گردیده است. نتایج شکل (7) نشان می‌دهد که ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی با افزایش فاصله بین شمع‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش سختی جانبی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها می‌باشد افزایش سختی جانبی گروه شمع می‌باشد. همچنین با افزایش فاصله بین شمع‌ها، میزان هم‌پوشانی سطوح حباب تنش در زیر نوک شمع‌ها کمتر شده و این امر باعث افزایش ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌گردد. نتایج به‌دست آمده، با نتایج Mohammad Alinejad و همکاران هم‌خوانی دارد. ظرفیت باربری گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر شمع از 1812 نیوتن به‌ترتیب به 2097 و 2320 نیوتن افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش 15/7% و 28٪ ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌باشد. برای بیان اثر شیروانی ماسه‌ای بر روی ظرفیت باربری گروه شمع از ضریب کاهش ظرفیت باربری RF که به‌صورت فرمول زیر تعریف می‌گردد، استفاده گردید:

$$RF = \frac{Q_{ps}}{Q_{pg}} \quad (1)$$

Q_{ps} و Q_{pg} به‌ترتیب ظرفیت باربری گروه شمع در مجاورت شیروانی و ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌باشد. مقادیر RF به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌ها در جدول (4) ارائه شده است. نتایج جدول (4) نشان می‌دهد که با افزایش فاصله شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر ضریب RF از مقدار 0/68 به‌ترتیب به 0/74 و 0/78 افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع با افزایش فاصله شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر می‌باشد.

گروه شمع به‌دلیل نامتقارن بودن محیط خاک در مجاورت شیروانی و تفاوت سختی و مقاومت خاک در دو سمت گروه شمع در حین بارگذاری قائم به سمت شیروانی دچار جابه‌جایی افقی می‌گردد. میزان جابه‌جایی افقی سرشمع در نشست معادل 10 در قطر شمع (1/8 میلی‌متر) در جدول (5) ارائه شده است. نتایج جدول (5) نشان می‌دهد که جابه‌جایی افقی سرشمع با افزایش فاصله شمع‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش سختی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها می‌باشد. جابه‌جایی افقی سرشمع با افزایش فاصله شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر شمع از 0/57 میلی‌متر به‌ترتیب به 0/51 و 0/47 میلی‌متر کاهش یافت که این امر نشان‌دهنده کاهش 11٪ و 18% در میزان جابه‌جایی افقی سرشمع می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین معیارهای سرویس‌پذیری سازه‌های بلند واقع بر روی گروه شمع، میزان کج‌شدگی سرشمع پس از بارگذاری می‌باشد. میزان کج‌شدگی سرشمع از تقسیم تفاوت نشست دو لبه سرشمع به فاصله بین دو لبه به‌دست می‌آید (Chen و همکاران، 2021).

حداکثر میزان پیشنهادی برای مقدار کج‌شدگی سرشمع برابر با 0/2٪ می‌باشد. میزان کج‌شدگی سرشمع برای فواصل مختلف شمع‌ها در جدول (5) ارائه شده است. نتایج جدول (5) نشان می‌دهد که با افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها، چرخش سرشمع کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از 3 به 4 و 5 برابر قطر شمع، میزان چرخش سرشمع از 0/8% به‌ترتیب به مقادیر 0/72٪ و 0/67٪ کاهش یافت. این امر نشان‌دهنده کاهش 10٪ و 16٪ در میزان چرخش سرشمع می‌باشد.

جدول 4- میزان ظرفیت باربری (نیوتن) و RF برای گروه شمع با فواصل شمع 3، 4 و 5 برابر قطر شمع واقع در رأس شیروانی

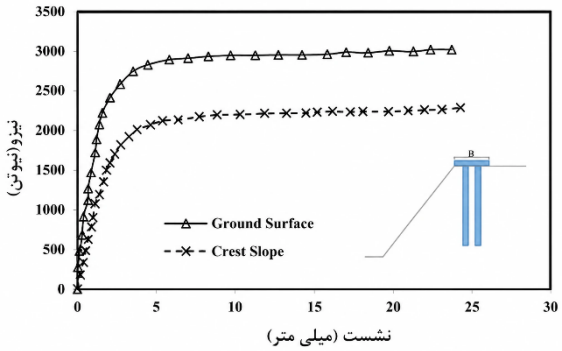
فاصله شمع‌ها از یکدیگر (برحسب قطر شمع)			
	3	4	5
زمین مسطح	2643	2828	2975
رأس شیروانی	1812	2097	2320
RF	0/68	0/74	0/78

جدول 5- میزان جابه‌جایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل 10 درصد قطر شمع برای گروه شمع با فواصل شمع 3، 4 و 5 برابر قطر شمع

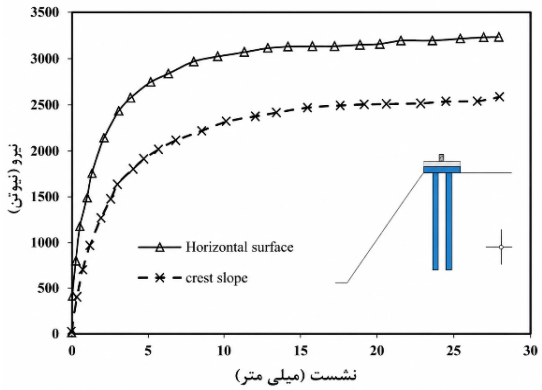
فاصله شمع‌ها از یکدیگر (بر حسب قطر شمع)			
	3	4	5
جابه‌جایی افقی سرشمع (میلی‌متر)	0/57	0/51	0/47
دوران سرشمع (درصد)	0/8	0/72	0/67

2-3- اثر طول مدفون شمع

در این بخش، اثر طول مدفون شمع‌ها بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، گروه شمع 2×2 با شمع‌هایی با قطر 18 میلی‌متر و طول مدفون 15، 30 و 40 سانتی‌متر و با فاصله مرکز به مرکز سه برابر قطر شمع بر روی زمین مسطح و رأس شیروانی مدل گردید. شیب شیروانی 1: 1/5 (Hs:Vs) و ارتفاع شیروانی 50 سانتی‌متر درنظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها، در شکل‌های (8) و (9) ارائه شده است. نتایج شکل‌های (8) و (9) نشان می‌دهند که با کاهش طول مدفون شمع، ظرفیت باربری گروه شمع واقع بر رأس شیروانی کاهش می‌یابد. با کاهش طول مدفون از 40 سانتی‌متر به 25 و 15 سانتی‌متر ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی از 1812 نیوتن به‌ترتیب به 1476 و 1173 نیوتن کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش 19٪ و 35٪ در ظرفیت باربری گروه شمع می‌باشد. دلیل این موضوع، افزایش میزان مهار جانبی شمع‌های بلندتر و کاهش اثر مرز آزاد بر روی ظرفیت باربری نوک شمع‌ها به‌دلیل فاصله افقی بیشتر مرکز نوک شمع‌های بلندتر نسبت به شیروانی می‌باشد.



شکل 8- منحنی بار- نشست گروه شمع برای فاصله شمع‌های سه برابر قطر و طول مدفون 30 سانتی‌متر



شکل 9- منحنی بار- نشست گروه شمع برای فاصله شمع‌های سه برابر قطر و طول مدفون 15 سانتی‌متر

جدول 6- میزان ظرفیت باربری و RF برای گروه شمع چهارتایی با طول مدفون 25 و 40 سانتی‌متر

	طول مدفون شمع‌ها (cm)		
	15	25	40
زمین مسطح	1955	2307	2643
رأس شیروانی	1173	1476	1812
RF	0/6	0/64	0/68

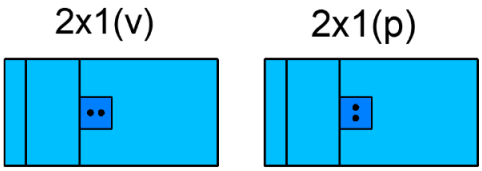
مقدار RF برای گروه‌های شمع مختلف در جدول (6) ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که که با افزایش طول مدفون شمع ضریب RF بیشتر می‌گردد که این امر نشان‌دهنده کاهش اثر شیروانی بر ظرفیت باربری محوری گروه شمع با افزایش طول مدفون شمع می‌باشد. با کاهش طول مدفون از 40 سانتی‌متر به 25 و 15 سانتی‌متر، RF از 0/68 نیوتن به 0/64 و 0/6 کاهش یافت. میزان جابه‌جایی افقی سرشمع در نشست معادل 10 درصد قطر شمع در جدول (7) ارائه شده است. نتایج جدول (7) نشان می‌دهد با کاهش طول مدفون شمع، میزان جابه‌جایی افقی گروه شمع واقع بر رأس شیروانی افزایش می‌یابد. با کاهش طول مدفون از 40 سانتی‌متر به 25 و 15 سانتی‌متر میزان جابه‌جایی افقی از 0/57 میلی‌متر به‌ترتیب به 0/67 و 0/86 میلی‌متر افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش 17٪ و 50% جابه‌جایی افقی سرشمع می‌باشد. دلیل این امر افزایش مهار جانبی شمع‌ها بلندتر و کاهش سختی جانبی گروه شمع با کاهش طول مدفون شمع‌ها می‌باشد. میزان کج‌شدگی سرشمع برای طول‌های مدفون مختلف شمع‌ها در جدول (7) ارائه شده است. نتایج جدول (7) نشان می‌دهد که با کاهش طول مدفون شمع، کج‌شدگی سرشمع افزایش می‌یابد. با کاهش طول مدفون از 40 سانتی‌متر به 25 و 15 سانتی‌متر میزان کج‌شدگی سرشمع از 0/8٪ به‌ترتیب به 1/15٪ و 1/75 ٪ افزایش یافت.

جدول 7- میزان جابه‌جایی افقی سرشمع در نشست معادل 10 درصد قطر شمع برای گروه شمع با طول مدفون 15، 25 و 40 سانتی‌متر

	طول مدفون شمع (سانتی‌متر)		
	15	25	40
جابه‌جایی افقی سرشمع (میلی‌متر)	0/86	0/67	0/57
کج‌شدگی سرشمع (درصد)	1/75	1/15	0/80

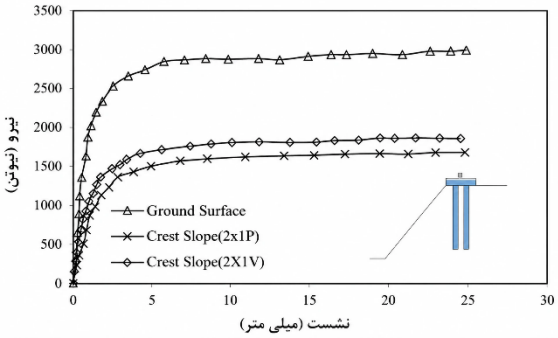
3-3- اثر جهت گروه شمع خطی نسبت به شیروانی

در این بخش، تأثیر جهت قرارگیری گروه شمع خطی 2×1 نسبت به رأس شیروانی (شکل (10)) بر روی ظرفیت باربری گروه شمع خطی مستقر بر رأس شیروانی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل 10- نحوه فرار گیری گروه شمع دوتایی نسبت به رأس شیروانی

در این بخش، گروه شمع 2×1 با شمع‌هایی با قطر 18 میلی‌متر و طول مدفون 40 سانتی‌متر و فاصله مرکز به مرکز سه برابر قطر شمع، بر روی رأس شیروانی ماسه‌ای و زمین مسطح مدل گردید. شیب شیروانی 1: 1/5 (Hs:Vs) ارتفاع شیروانی 50 سانتی‌متر درنظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها در شکل (11) و جدول (8) ارائه شده است.



شکل 11- منحنی بار - نشست گروه شمع 2×1 برای فاصله شمع‌های سه برابر قطر و طول مدفون 25 سانتی‌متر

نتایج شکل (11) و جدول (8) نشان می‌دهد که ظرفیت باربری گروه شمع خطی به‌جهت گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. ظرفیت باربری گروه شمع 2×1 عمود بر راستای رأس شیروانی ((2×1(v))، 6% از ظرفیت باربری گروه شمع دوتایی موازی با راستای رأس شیروانی ((2×1(p)) بیشتر می‌باشد. دلیل بیشتر بودن ظرفیت باربری گروه شمع عمود بر راستای رأس شیروانی، قرارگیری شمع ردیف دوم در فاصله بیشتری از رأس شیروانی و درنتیجه کاهش اثر مرز آزاد بر روی ظرفیت باربری شمع ردیف دوم می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها با نتایج Mohammad Alinejad و همکاران هم‌خوانی دارد. نشان جدول (8) نشان می‌دهد که مقدار ضریب RF گروه شمع 2×1 عمود بر راستای رأس شیروانی ((2×1(v))، از ضریب RF گروه شمع موازی رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. مقدار ضریب RF گروه شمع 2×1 عمود بر راستای رأس شیروانی ((2×1(v))، 6% از مقدار RF گروه شمع دوتایی موازی با راستای رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد مقدار RF گروه شمع 2×2 ، 13٪ از مقدار RF گروه شمع عمود بر رأس شیروانی و 21٪ از مقدار RF گروه شمع موازی رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. دلیل این امر، سختی جانبی بیشتر گروه شمع 2×2 نسبت به گروه شمع 2×1 می‌باشد.

جدول 8- میزان ظرفیت باربری و RF برای گروه شمع 2 و 4تایی

	گروه شمع		
	2×1(p)	2×1(v)	2×2
زمین مسطح	2290	2290	2643
رأس شیروانی	1303	1386	1812
RF	0/56	0/6	0/68

میزان جابه‌جایی افقی سرشمع در نشست معادل 10 درصد قطر شمع در جدول (9) ارائه شده است. نتایج جدول (9) نشان می‌دهد که جابه‌جایی افقی سرشمع گروه شمع به جهت قرارگیری سرشمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. جابه‌جایی افقی سرشمع گروه شمع خطی دوتایی عمود بر راستای رأس شیروانی ((2×1(v))، 8% از جابه‌جایی افقی سرشمع گروه شمع دوتایی موازی با راستای رأس شیروانی ((2×1(p))، کمتر می‌باشد. مقدار جابه‌جایی افقی گروه شمع 2×2، 30٪ از مقدار جابه‌جایی افقی گروه شمع دوتایی عمود بر راستای رأس شیروانی ((2×1(v)) و 35٪ از مقدار جابه‌جایی افقی گروه شمع دوتایی موازی با راستای رأس شیروانی ((2×1(p))، کمتر می‌باشد.

نتایج جدول (9) نشان می‌دهد که میزان کج‌شدگی سرشمع گروه شمع دوتایی به‌جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. میزان کج‌شدگی سرشمع گروه شمع دوتایی عمود بر راستای رأس شیروانی 2×1(v) و گروه شمع دوتایی موازی با راستای رأس شیروانی 2×1(p) به‌ترتیب 1/3٪ و 1/6٪ می‌باشد که نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که کج‌شدگی سرشمع گروه شمع 2×1(p)، 23٪ از میزان کج‌شدگی سرشمع گروه شمع 2×1(v) بیشتر می‌باشد. نتایج جدول (9) نشان می‌دهد که میزان کج‌شدگی گروه‌های شمع ((2×1(v)) و ((2×1(p)) به‌ترتیب 63٪ و 100٪ از گروه شمع 2×2 بیشتر می‌باشد.

جدول 9- میزان جابه‌جایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل 10 درصد قطر شمع برای گروه شمع 2 و 4تایی

	گروه شمع		
	2×1(p)	2×1(v)	2×2
جابه‌جایی افقی سرشمع (میلی‌متر)	0/88	0/811	0/57
دوران سرشمع (درصد)	1/6	1/3	0/80

4- نتیجه‌گیری

از شمع به‌عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت شیروانی ساخته

می‌شوند. در چند دهه اخیر، مطالعات زیادی درخصوص اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع انجام گرفته؛ اما درخصوص ظرفیت باربری محوری گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی تاکنون تحقیقاتی صورت نپذیرفته است. در این تحقیق، به‌کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی، به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع 2×2 و 2×1 مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای خشک پرداخته شد و اثر عواملی مانند فاصله شمع‌ها، طول مدفون شمع‌ها و جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به شیروانی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند برای تعیین دقیق ظرفیت باربری پی پل‌ها و سازه‌های مجاور شیروانی توسط مهندسین مورد استفاده قرار گیرد.

1) در محدوده فاصله بین شمع‌های بررسی شده (3 تا 5 برابر قطر شمع)، ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی با افزایش فاصله بین شمع‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش سختی جانبی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها و کاهش میزان هم‌پوشانی سطوح حباب تنش در زیر نوک شمع‌ها می‌باشد. ظرفیت باربری گروه شمع با افزایش فاصله شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر شمع نیوتن به‌ترتیب 15/7٪ و 28% افزایش یافت.

2) در محدوده طول مدفون شمع‌های بررسی شده (15 تا 40 سانتی‌متر)، ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی با کاهش طول مدفون شمع، کاهش می‌یابد. با کاهش طول مدفون شمع از 40 سانتی‌متر به 25 و 15 سانتی‌متر ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به‌ترتیب 19٪ و 35٪ کاهش یافت.

3) در گروه شمع 2×1، ظرفیت باربری گروه شمع خطی عمود بر شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع موازی شیروانی به‌دست آمد. ظرفیت باربری گروه شمع 2×1 عمود بر راستای رأس شیروانی، 6٪ از ظرفیت باربری گروه شمع دوتایی موازی با رأس شیروانی بیشتر بود.

4) در محدوده فاصله بین شمع‌های بررسی شده (3 تا 5 برابر قطر شمع)، با افزایش فاصله بین شمع‌ها، اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر، ضریب RF از مقدار 0/68 به‌ترتیب به 0/74 و 0/78 افزایش می‌یابد.

5) در محدوده طول مدفون شمع‌های بررسی شده (15 تا 40 سانتی‌متر)، اثر شیروانی بر ظرفیت باربری گروه شمع با افزایش طول مدفون شمع کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون از 15 سانتی‌متر به 30 و 40 سانتی‌متر، ضریب RF از 0/6 به 0/64 و 0/68 افزایش یافت.

6) در محدوده فاصله بین شمع‌های بررسی شده (3 تا 5 برابر قطر شمع)، با افزایش فاصله بین شمع‌ها، میزان چرخش سرشمع کاهش یافت. با افزایش فاصله شمع‌ها از 3 برابر قطر شمع به 4 و 5 برابر قطر شمع، میزان چرخش سرشمع از مقدار 0/8 به‌ترتیب به 0/72 و 0/68 کاهش یافت.

7) در محدوده طول مدفون شمع‌های بررسی شده (15 تا 40 سانتی‌متر)، با افزایش طول مدفون شمع میزان چرخش سرشمع کاهش یافت. با افزایش طول مدفون شمع از 150 میلی‌متر به 300 و 400 میلی‌متر، میزان چرخش سرشمع از 1/75٪ به 1/15% و 0/8٪ کاهش یافت.

5- مراجع

Bahri A, Arabani M, “Effect of geometric characteristics of helical piles on the lateral displacement in sandy slopes by loading surcharge”, Results in Engineering, 2025, 25. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103896

Chen J, Guo X, Sun R, Rajesh S, Jiang S, Xue J, “Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand”, Geotextiles and Geomembranes,2021, 49 (2), 399-412. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.011

Jala Y, Sawant VA, Mishra A, “Numerical study on lateral response of piles in sandy slopes employing a hardening soil model”, Marine Georesources and Geotechnology, 2025 Feb, 1, 43 (2), 218-231. https://doi.org/10.1080/1064119X.2024.2324045

Jala Y, Sawant VA, Mishra A, “Development of py curves from numerical study of long piles in sandy slope”, Ocean Engineering, 2025, 319, 120275. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120275

Kangal O, “Lateral behavior of piles on slopes in cohesive soils under drained conditions”, Master's Thesis, Middle East Technical University, 2025.

Kayalvizhi SK, Kasinathan M, Sanjay Kumar S, “Experimental study on evaluating the lateral load capacity of raker pile in sloping ground”, Australian Journal of Civil Engineering, 2023, 21 (1), 20-33. https://doi.org/10.1080/14488353.2022.2059136

Khati BS, Sawant VA, “Experimental study of laterally loaded pile group in square arrangement near sloping ground”, International Journal of Geomechanics, 2021 Feb 1, 21 (2), 04020257. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001911

Khati, Bhishm S, Sawant VA, Ashish G, “Influence of edge distance on experimental py curves for piles near slope”, Geomechanics and Geoengineering, 2024, 19 (1), 245-260. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001911337847

Lateh S, Chub-Uppakarn T, Jongpradist P, Chompoorat T, Swasdi S, Srisakul W, “Effect of soil slope on lateral response of piled raft foundations in cohesive soil”, Geotechnical Engineering, 2024, 55 (1), 39-47. https://doi.org/10.14456/seagj.2024.5

Maralapalle VC, Nadaf MB, Dutta S, Zende AA, Mishra SS, Charhate S, “Loadsettlement and skin friction behaviour of piles in dry sand: experimental and numerical study”, Sādhanā, 2023, 49 (1). https://doi.org/10.1007/s12046-023-02362-2

Mohammad Alinejad R, Bayat M, “Bearing capacity of post grouted drilled pile near a sandy slope”, Journal of Structural and Construction Engineering, 2025. https://doi.org/10.22065/jsce.2025.484828.3551

Mohammad Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS, “Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading”, Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14, 1-12. https://doi.org/10.1007/s12517-021-09123-7

Mohammad Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS, “Experimental study of axially loaded pile group near a sloping ground”, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2023, 76 (2), 382-391. https://doi.org/10.3311/PPci.18334

Mohammad Alinejad R, Bayat M, “Investigating the Behavior of Single Pile and Adjacent Pile Group of Sandy Slope under Uplift Loading”, Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024. https://doi.org/10.22034/ceej.2024.61105.2343

Mohammad-Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS, “Effect of degree of freedom of movement on the bearing capacity and efficiency coefficient of pile group adjacent to sandy slope”, Journal of Structural and Construction Engineering, 2023, 10 (1), 95-113. https://doi.org/10.22065/ceej.2022.321897.2678

Perumalsamy K, “Ranganathan S, “Single pile in cohesionless soil in sloping ground under lateral loading”, International Journal of Geo Engineering, 2022 Dec, 13 (1), 8-29. https://doi.org/10.1186/s40703-022-00173-8

Rathod K, Munaga T, Siddhardha R, Gonavaram KK, “Effect of sloping ground on the pile behaviour under varying static lateral loads”, Indian Geotechnical Journal, 2024 Jun, 54 (3), 725-740. https://doi.org/10.1007/s40098-023-00841-1

Shao X, Jiang C, Fu Y, Cao R, “A modified failure wedge model for modeling soil-pile interaction of laterally loaded piles in sand considering slope effect”, International Journal of Geomechanics, 2024, 24 (10), 1-14. https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-10256

Sharafkhah M, Shooshpasha I, “Physical modeling of behaviors of cast-in-place concrete piled raft compared to freestanding pile group in sand”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10 (4), 617-703. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.007

Sharafkhah M, Shooshpasha I, “A laboratory study of the effect of piles asymmetric arrangement on the behavior of piled raft foundation in sand”, International Journal of Geotechnical Engineering, 2020. https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1427658

Sivapriya SV, Shailesh R. G, “Evaluating the lateral capacity of flexible pile group subjected to lateral load in sloping ground”, 2024. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4810996/v1

Sivapriya SV, Jijo J, “Pile group response to static lateral load in cohesionless slope crest for varying eccentricity: a 1-g laboratory study”, Indian Geotechnical Journal 2024, 1-13. https://doi.org/10.1007/s40098-024-01132-z

Tiwari A, Suneet K, Nitin D, “Assessing the lateral load resistance of piles placed in marine soil on slopes”, Arabian Journal for Science and Engineering, 2024, 50, 14977-14986. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09848-z

Wang Z, Zhou H, Sheil B, “Effects of scour on the lateral response of piles in sand: centrifuge tests and numerical investigation”, Acta Geotechnical, 2025, 3, 1-20. https://doi.org/10.1007/s11440-02402521-7