

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Behavior of Single Pile and Adjacent Pile Group of Sandy Slope under Uplift Loading

Mohammad Ali Nejad Reza^{a,*}, Bayat Meysam^b

^a Department of Civil Engineering, Ahwaz Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran

^b Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Received: 07 April 2024; Reviewed: 08 June 2024; Accepted: 06 July 2024

Keywords:

Sand, Uplift capacity, Slope, Efficiency coefficient.

1. Introduction

The pile is commonly adopted to transfer a part of the building and civil engineering structural loads into deeper layers with higher stiffness and thereby allow the reduction of total settlement and differential settlement of structures in a very economical way. Piles are often used in groups and the load transfer mechanism in group piles is generally different from that of a single pile due to the pile-soil and pile-pile interaction effects which has been described by previous researchers. Previous studies indicated that the interaction between soil and structure has a significant effect on the responses of foundation and structure.

In the past researches, various researchers investigated the effect of various factors such as relative density of soil, pile embedded length ratio, pile distance from each other on the uplift bearing capacity of the pile. The research results showed that the skin bearing capacity of the pile under compressive load is more than the uplift load, and this issue increases the importance of examining the uplift bearing capacity of the pile separately

No research has been done regarding the tensile load capacity of single piles and the group of piles adjacent to the slope, so investigating the behavior of the group of piles adjacent to the slope under uplift loading is of particular importance. The main purpose of this research is to investigate the uplift capacity and efficiency coefficient of the pile group adjacent to the dry sandy slope. In this investigation, the effect of various factors such as the effects of the direction of the linear pile group in relation to the slope and the arrangement of the pile group, the relative density of the soil and the embedded length of the pile on the uplift bearing capacity and the efficiency coefficient of the pile group adjacent to the dry sandy slope have been investigated. To achieve this goal, a series of laboratory tests have been conducted on the physical model of pile group near the dry sandy slope and the results have been discussed.

2. Materials and methods

2.1. Soil properties

In this work, fine, uniform sand having an average diameter (d_{50}) of 0.18 mm 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

A large-scale experimental setup was developed to study the response of axially loaded group of piles located on sloping ground. A box of inner dimensions $1.80\text{m} \times 0.90\text{m} \times 0.90\text{m}$ (length $\times$ width $\times$ height) was prepared for the present study. The model dimensions were chosen to minimize boundary effects and the interference between the walls of the sand.

Axial load was applied through a screw jack coupled to a steel rod attached to the loading frame. A steel box was used to attach the piles cap to the screw jack and force measurement was carried out using a load cell placed between the steel box and the pile cap. The axial load was applied at the center of the piles cap with a constant strain ratio of 1.5mm/min . Steel rods with an outer diameter of 18mm were used as end-closed piles. The pile groups subjected to axial loads using a steel pile cap of size $16\text{m} \times 16\text{cm}$ and thickness of 2cm which can be regarded as rigid. The upper 2cm of the piles were fixed in the rigid steel cap.

3. Results and discussion

In this study, a total of 126 model tests were carried out on single pile and pile groups near a sloping ground. The effect of edge distance from slope crest, relative density of soil, embedded length of pile on the axial load-uplift capacity and were obtained and efficiency coefficient of the pile group discussed.

3.1. Single pile

In this section, the effect of the distance from slope crest, the relative density and the embedded length of the pile on the uplift capacity of single piles was investigated.

The results show a decrease in the uplift bearing capacity of single pile when the single is placed in the near of slope. This is due to the reduction of the confining pressure surrounding the pile when placed in the near of slope. The results show that with the increase in the relative density, the reduction in the bearing capacity of individual piles decreases, so that with the increase in the relative density of the soil from 40% to 65% and 85% , the reduction in the uplift bearing capacity of the piles decreases from 40% to 29% and 22% , respectively. The results show that the critical distance of a single pile is greater than the horizontal distance of the theoretical failure surface.

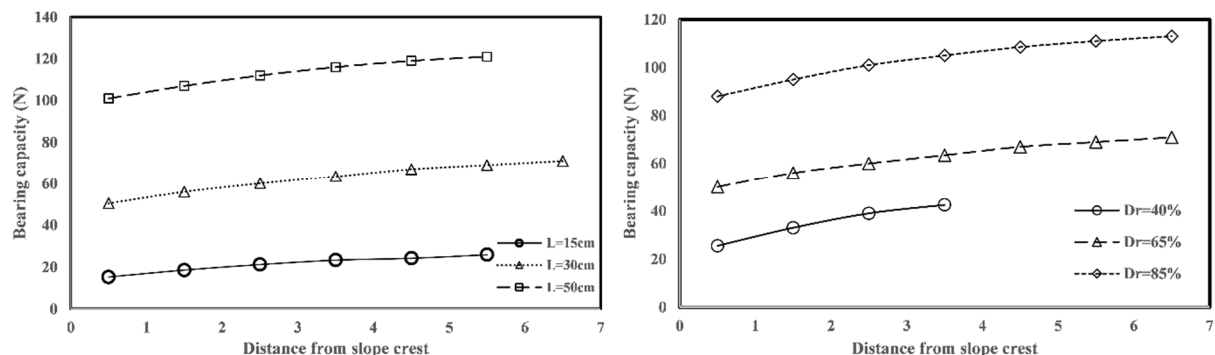


Fig. 1. Comparison of response of pile groups

3.2. Distance from slope crest

In this section, the effect of the distance of pile groups 1×2 , 1×3 , 2×2 and 3×3 from the slope crest on the bearing capacity of the pile group was investigated. The relative density of the soil was 65% , the buried length of the piles was 30cm , and the distance between the piles was 3 times the diameter of the pile. The results showed that the uplift bearing capacity of the pile group adjacent to the slope is lower than that of the Horizontal ground. The reduction of uplift capacity in linear pile groups (1×2 and 1×3) depends on the direction of the pile group with respect to crest slope. The amount of reduction in bearing capacity in the group of piles parallel to the crest slope is more than that of the group of piles perpendicular to the crest slope. The amount of reduction in the uplift capacity of pile group 1×2 and 1×3 is 33% and 39% respectively in the parallel state and 22% and 32% in the perpendicular state to the crest slope respectively. The results show that with the increase in the number of piles in the linear pile group, the load capacity reduction increases. The results showed that with the increase in the number of piles in the linear pile group, the decrease in the efficiency coefficient increases.

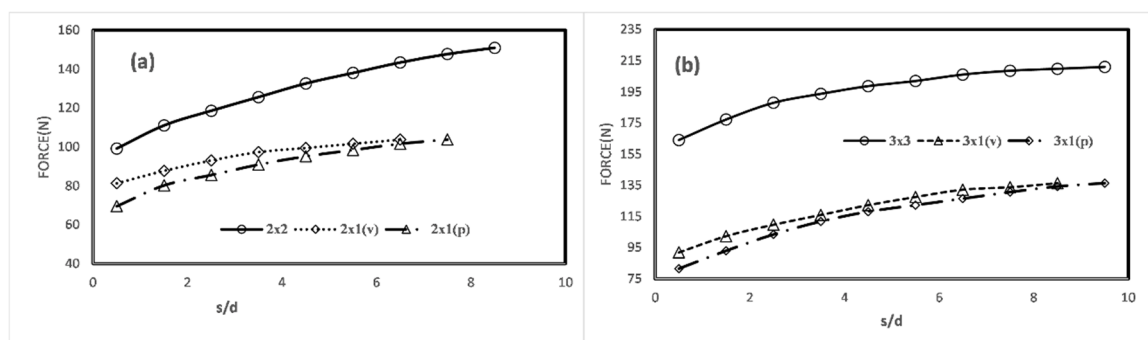


Fig. 2. Comparison of response of pile groups

3.3. Effect of relative density

In this section, the effect of relative density of soil on the bearing capacity and efficiency coefficient of the pile group located on the crest slope was investigated. The results showed that the amount of reduction in uplift capacity in linear pile groups (1×2 and 1×3) located at the crest slope with different relative densities depends on the direction of the pile group in relation to the crest slope, and the amount of load capacity reduction. In the group of piles parallel to the top of the gable, it is more than in the group of piles perpendicular to the crest slope. The results showed that the increase in relative density increased the uplift capacity of 2×2 and 3×3 pile groups.

Table 1. Comparison of the uplift capacity of the pile group at the slope crest and horizontal ground

		2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)	2×2	3×3
$Dr=40\%$	Crest slope	38	45	42	48	55	95
	Horizontal level	53	53	69	69	71.5	111
$Dr=65\%$	Crest slope	69.5	81	83	92	99	164
	Horizontal level	104	104	136	136	151	211
$Dr=85\%$	Crest slope	137	155	154	165	170	301
	Horizontal level	172	172	231	231	253	376

3.3. Effect of embedded length

In this section, the effect of the embedded length of the pile on the bearing capacity and efficiency coefficient of the pile group located on the crest slope was investigated.

The results showed that increasing the embedded length of the pile increased the uplift capacity of the 2×2 and 3×3 square pile groups. The effect of increasing the embedded length of the pile on increasing the uplift capacity in the 3×3 pile group was more than the 2×2 pile group.

The results showed that in 2 and 3 linear pile groups, the efficiency coefficient of the pile group depends on the direction of the pile group to the crest slope. The results showed that for every 3 embedded lengths of the pile, the efficiency coefficient of the pile group located at the top of the gable decreases with the increase in the number of piles.

Table 2. Comparison of the uplift capacity of the pile group at the slope crest and horizontal ground

		2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)	2×2	3×3
$L_d=15\text{cm}$	Crest slope	23	31	35	44	48	70
	Horizontal level	40	40	52	52	57	84
$L_d=30\text{cm}$	Crest slope	69.5	81.2	83	92	99	164
	Horizontal level	104	104	136	136	160	211
$L_d=50\text{cm}$	Crest slope	143	155	195	210	212	267
	Horizontal level	164	164	218	218	238	300

4. Conclusions

The results of this research can be summarized as follows:

- 1) As the relative density of the soil and the embedded length of the single pile increases, the influence of the slope on the tensile load capacity of a single pile located on crest slope decreases.
- 2) The direction of the linear pile group relative to the crest slope has an effect on the value of the efficiency coefficient and uplift capacity of the pile group. The pile group perpendicular to slope has a higher uplift capacity and efficiency factor than the pile group parallel to slope.
- 3) Increasing the relative density of the soil has a greater effect on increasing the uplift capacity of the linear pile parallel to the top of the slope than the group of piles perpendicular to the slope, and with the increase of the relative density of the soil, the effect of the direction of the linear pile relative to the crest slope decreases.
- 4) By increasing the number of piles from 4 to 9, the uplift capacity of the pile group located on the crest slope decreases, and at a distance of 6.5 times the diameter of the pile from crest slope, the difference in the percentage of the uplift capacity of pile groups 4 and 9 decreases. It is reduced and the effect of the number of piles in the pile group on the reduction of the uplift capacity of the pile adjacent to the slope can be ignored.
- 5) Increasing the length of the embedded pile has a greater effect on increasing the uplift capacity of the linear pile parallel to slope than the group of piles perpendicular to the slope, and with the increase of the embedded length of the pile, the effect of the direction of the linear pile relative to the crest slope decreases.
- 6) The increase in the length of the embedded pile is more due to the increase in the capacity of the 3x3 group located at the crest slope than the 2x2 pile group.

بررسی رفتار شمع منفرد و گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای تحت بارگذاری کششی

رضا محمدعلی نژاد^{1*}، میثم بیات²

¹ گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز

² گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد

دریافت: 1403/1/19، بازنگری: 1403/3/19، پذیرش: 1403/4/16، نشر آنلاین: 1403/4/16

چکیده

درک رفتار گروه شمع مجاور شیروانی عامل مهمی در طراحی سازه‌های بلند مجاور شیروانی است. در خصوص رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری قائم تحقیقات بسیار کمی صورت پذیرفته است. لذا مطالعه در خصوص رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری محوری از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این تحقیق بررسی ظرفیت باربری و ضریب راندمان کششی گروه شمع قائم تحت بارگذاری محوری واقع در رأس شیروانی ماسه‌ای به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی می‌باشد به این منظور یک سری آزمایش‌های مدل فیزیکی با بارگذاری کششی بر روی شمع منفرد و گروه‌های شمع 2×2 ، 2×1 ، 3×1 و 3×3 واقع در رأس شیروانی ماسه‌ای خشک انجام گرفته و اثر عوامل مختلفی همانند فاصله اثر تراکم خاک، طول مدفون شمع‌ها، جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی و فاصله گروه شمع از رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان کششی گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل فیزیکی نشان می‌دهد، ظرفیت باربری و ضریب راندمان کششی گروه شمع به عواملی همانند فاصله شمع‌ها از رأس شیروانی، تعداد شمع‌ها و نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی نشان می‌دهد که ضریب راندمان گروه شمع در تراکم‌ها و طول‌های مدفون مختلف شمع، با افزایش تعداد شمع‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون شمع و تراکم نسبی خاک اثر جهت قرارگیری گروه خطی 2×1 و 3×1 نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان گروه شمع کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ماسه، ظرفیت باربری کششی، شیروانی، ضریب راندمان.

1- مقدمه

فنداسیون بگذارد (Nasrollahzadeh و Hafez، 2022؛ Sharafkhah و Shoooshpasha، 2018؛ Sun و همکاران، 2021؛ Tianzhing و همکاران، 2020).

در صورت قرار گرفتن شمع منفرد و گروه شمع در مجاورت شیروانی بر پیچیدگی‌های پاسخ فنداسیون می‌افزاید. در تحقیقات گذشته، محققین مختلفی اثر عوامل مختلفی همانند درصد تراکم، نسبت طول مدفون شمع، فاصله شمع‌ها از یکدیگر و شکل سطح مقطع شمع بر روی ظرفیت باربری شمع را مورد بررسی قرار دادند (Emirler و همکاران، 2020؛ Tolun و همکاران، 2024؛ Xu و همکاران، 2024؛ Jerin و همکاران، 2022؛ Khan و همکاران،

گروه شمع به‌عنوان پی سازه‌هایی همانند دکل‌های انتقال، پایه‌های پل، آبرسازهای دریایی و ... استفاده می‌گردد. این سازه‌ها اغلب در کنار و روی شیروانی مستقر می‌گردند و تحت اثر بارهای کششی قرار می‌گیرند. مکانیسم انتقال بار در شمع‌های گروهی به دلیل اثرات متقابل شمع - خاک و شمع - شمع به‌طور کلی با شمع منفرد متفاوت است (Meyerhof، 1976؛ Nourdlund، 1963؛ Paik و Salgado، 2003؛ Conte و همکاران، 2021).

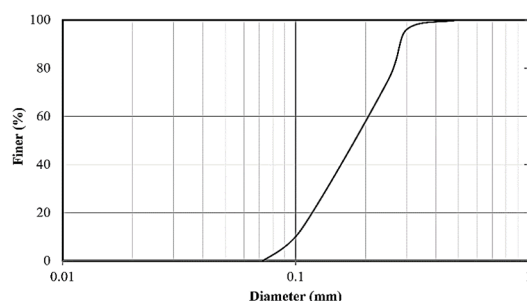
نتایج مطالعات قبلی نشان داد که، اثر متقابل شمع - خاک یک پدیده پیچیده است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل زیادی قرار گرفته و تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ



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 و به طول 30، 45 و 65 سانتی‌متر و از سرشمع فولادی به ابعاد 16×16 سانتی‌متر و ضخامت 2 سانتی‌متر استفاده گردید. طول مدفون شمع‌ها در آزمایش‌ها برابر با 15، 30 و 50 سانتی‌متر و زاویه شیروانی 33/7 درجه در نظر گرفته شده بود. از این رو فاصله قائم مرکز سرشمع تا سطح خاک 14 سانتی‌متر بوده است. به منظور تأمین شرایط اتصال گیردار شمع به سرشمع، بالای شمع‌ها به طول 2 سانتی‌متر در سرشمع ثابت گردیده بود.



شکل 1- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در مدل فیزیکی

ابعاد داخلی باکس مورد استفاده در این تحقیق 180×90×90 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ابعاد باکس به گونه‌ای تعیین گردیده بود تا مرزهای جانبی اثری بر روی نتایج آزمایش‌ها نداشته باشد. بر اساس پیشنهاد محققین جهت عدم تأثیرگذاری مرزها بر روی نتایج آزمایش‌های کششی، مرزها از لبه خارجی شمع‌ها می‌بایست حداقل 3 تا 8 برابر قطر شمع‌ها و نوک شمع‌ها از کف مدل 8 برابر قطر شمع فاصله داشته باشد (Shanker و همکاران، 2007؛ Gaaver، 2013؛ Kishida، 1963؛ Robinsky و Morrison، 1964).

در این تحقیق فاصله مرزها از لبه خارجی شمع‌های بزرگترین گروه شمع (گروه شمع 3×3)، 21 برابر قطر شمع‌ها و فاصله بلندترین شمع (با طول مدفون 50 سانتی‌متر)، 22 برابر قطر شمع می‌باشد. عدم تأثیرپذیری نتایج از مرزهای جانبی به کمک نرم-افزار PLAXIS3D نیز کنترل گردید. نحوه قرارگیری گروه شمع و اعمال بار به گروه شمع در شکل (2) نشان داده شده است. به منظور مشاهده و کنترل اجرای شیروانی، در وجه جلویی باکس از ورق پلکسی به ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شده بود. جابه‌جایی قائم سر شمع توسط دو گیج با دقت 0/01 میلی‌متر که در دو لبه سر شمع قرار داشتند، اندازه‌گیری گردید و متوسط جابه‌جایی قائم اندازه‌گیری شده توسط دو گیج قرار داده شده بر روی و لبه

Guang، 2023 و همکاران، 2021؛ TEL-Nemr و همکاران، 2024؛ Yang و همکاران، 2024؛ Xu و همکاران، 2024).

نتایج تحقیقات برخی از محققین نشان می‌دهد که ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع تحت بار فشاری از بار کششی بیشتر بوده و این موضوع اهمیت بررسی ظرفیت باربری کششی شمع به صورت مجزا را دوچندان می‌نماید.

Mohammad Alinejad و همکاران (2021 و 2023) به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر عوامل مختلف همانند فاصله شمع‌ها از یکدیگر، طول مدفون شمع، شیب شیروانی و فاصله گروه شمع از رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی تحت بار فشاری پرداختند.

Swant و Khati (2018 و 2020) به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع با آرایش خطی و مربعی پرداختند. Chen و همکاران (2022) به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر شیب شیروانی و فاصله شمع‌ها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع دوتایی مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند.

Jiang و Liu (2024) به بررسی عددی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه پرداختند. در خصوص ظرفیت باربری کششی شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی تحقیقاتی صورت نپذیرفته است، لذا بررسی رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری کششی از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق بررسی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک می‌باشد. در این بررسی اثر عوامل مختلفی همانند اثرات جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به شیروانی و چینش گروه شمع، تراکم نسبی خاک و طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای بررسی شده است. برای نیل به این هدف مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی شمع منفرد و گروه شمع مدفون شده در مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک انجام شده است و نتایج حاصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

2- آزمایش‌های آزمایشگاهی

2-1-2- مصالح و روش انجام کار

2-1-1-2- خاکی

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. ماسه بر اساس روش طبقه‌بندی متحد از نوع SP بوده

موردنظر برای لایه‌ها 40٪، 65٪ و 85٪ در نظر گرفته شد. به‌هنگام رسیدن شیروانی به تراز نوک شمع، گروه شمع در محل موردنظر مستقر می‌گردید به این منظور در این تحقیق از دو میله استفاده گردید که از زیر سرشمع در جهت عرضی جعبه آزمایش عبور کرده و انتهای آن‌ها توسط چهار گیره به لبه‌های جعبه محکم می‌گردیدند و سپس سایر لایه‌های خاک تا تراز نهایی اجرا می‌گردید. از مفاهیم آنالیز عددی به‌منظور استفاده از نتایج این تحقیق، جهت نمونه‌هایی با مقیاس بزرگ می‌توان استفاده نمود. در صورتی که λ ضریب مقیاس هندسه مدل (نسبت اندازه واقعی به‌اندازه مدل آزمایشگاهی) باشد و از خاک واقعی در مدل‌سازی استفاده گردد، برای آزمایش‌های تحت شتاب $1g$ ، ضرایب مقیاس را می‌توان از جدول (3) استخراج نمود.

سرشمع به‌عنوان جابه‌جایی قائم گروه شمع در نظر گرفته شد. از جک اسکرو برقی جهت بارگذاری قائم استفاده گردید و در تمامی آزمایش‌ها، بارگذاری به‌صورت جابه‌جایی با سرعت ثابت $1/5$ میلی‌متر بر دقیقه بر مرکز سرشمع اعمال گردید و نیرو اعمال‌شده به‌وسیله یک نیروسنج که مابین سرشمع و قاب فولادی قرار داده شده بود، اندازه‌گیری می‌گردید. برنامه آزمایش‌های انجام‌شده در جدول (2) ارائه شده است. در این تحقیق از گروه‌های شمع 1×1 ، 2×2 ، 3×3 ، 3×2 (شکل (3)) استفاده گردید. در این آزمایش‌ها فاصله شمع‌ها در گروه شمع‌ها $3d_p$ در نظر گرفته شد (d_p قطر شمع می‌باشد). از روش تراکم کاهش‌یافته به‌منظور دستیابی به یک تراکم یکسان در تمامی لایه‌ها، جهت اجرای شیروانی استفاده گردید. خاک ماسه‌ای خشک در لایه‌هایی به ضخامت 5 سانتی‌متر تا رسیدن به تراکم مورد نظر کوبیده می‌گردید. تراکم نهایی

جدول 1- پارامترهای خاک ماسه‌ای استفاده شده در مدل فیزیکی

$\gamma_{\max} (KN / m^3)$	$\gamma_{\min} (KN / m^3)$	G_s	$\Phi (^{\circ})$	D_{10}	D_{50}	C_u	C_c
16/9	13/88	2/65	35	0/1	0/18	2/02	0/82



شکل 2- جزئیات مدل فیزیکی استفاده شده در تحقیق

جدول 2- برنامه آزمایش‌های مدل فیزیکی

هدف	تعداد آزمایش‌های کششی	فاصله شمع‌ها	گروه شمع
بررسی اثر فاصله از رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع	66	3	2×1 , 3×1 , 2×2 , 3×3
بررسی اثر طول مدفون بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان	12	3	2×1 , 3×1 , 2×2 , 3×3
بررسی اثر تراکم نسبی خاک بروی ظرفیت باربری و ضریب راندمان	12	3	2×1 , 3×1 , 2×2 , 3×3
شمع منفرد در تراکم 40٪	5	-	-
شمع منفرد در تراکم 65٪	8	-	-
شمع منفرد در تراکم 85٪	8	-	-
شمع منفرد با طول مدفون 15 سانتی‌متر	7	-	-
شمع منفرد با طول مدفون 50 سانتی‌متر	7	-	-

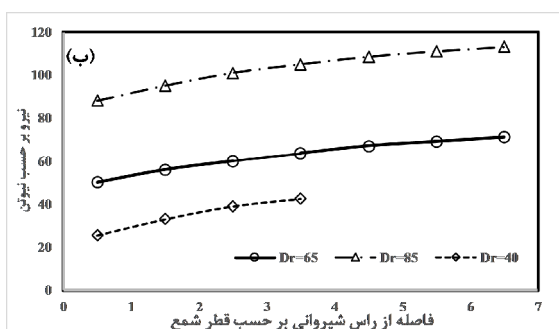
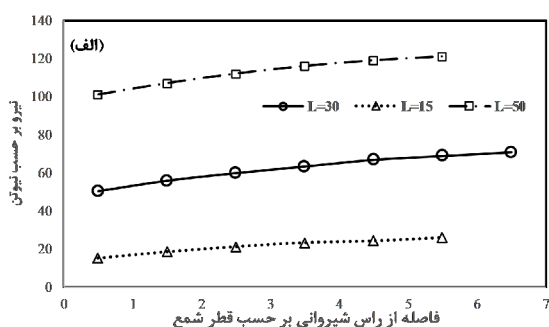
محاسبه ظرفیت باربری کششی برای گروه شمع 3×3 به عنوان نمونه در شکل (4) ارائه شده است. جهت بررسی رفتار گروه شمع از ضرایب راندمان تعریف شده در زیر استفاده گردید:

$$\eta_t = \frac{Q_t}{\sum_{i=1}^n Q_{i,t}} \quad (1)$$

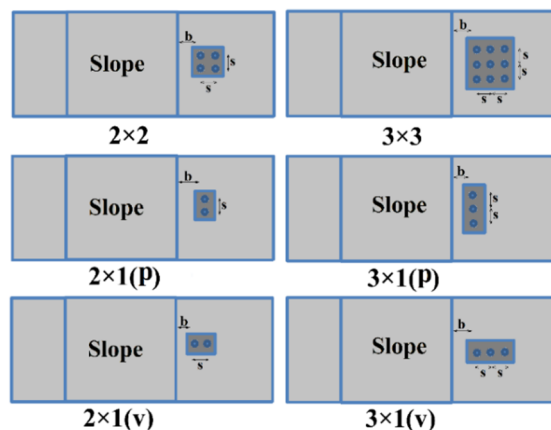
η_t ضریب راندمان کششی گروه شمع
 Q_t ظرفیت باربری کششی گروه شمع
 $Q_{i,t}$ ظرفیت باربری کششی هر شمع

2-2-1- شمع منفرد

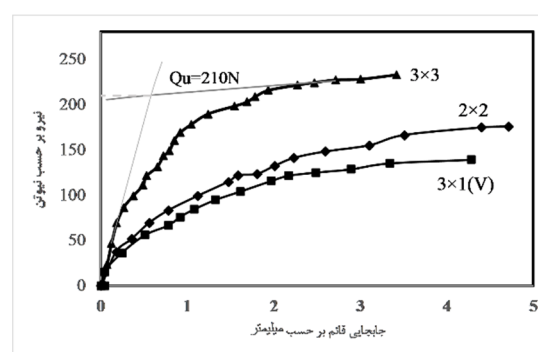
با توجه به این که جهت محاسبه ضریب راندمان نیاز به تعیین مقدار ظرفیت باربری شمع منفرد می باشد به همین دلیل در این بخش، 35 آزمایش بر روی شمع منفرد صورت پذیرفت. در این بخش اثر فاصله از رأس شیروانی، تراکم نسبی و طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد مورد بررسی قرار گرفت. تراکم نسبی خاک ماسه ای خشک 40٪، 65٪ و 85٪ و طول مدفون شمع 15، 30 و 50 سانتی متر (با تراکم 65٪) در نظر گرفته شده بود. نتایج آزمایش ها در شکل (5) ارائه شده است. برای انجام آزمایش ها ابتدا ظرفیت باربری کششی شمع بر روی زمین مسطح اندازه گیری می گردید و در گام بعدی شمع منفرد در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیروانی قرار داده می شد و ظرفیت باربری کششی آن اندازه گیری می گردید.



شکل 5- نمودار جابه جایی نیروی شمع منفرد



شکل 3- نحوه قرار گروه های شمع نسبت به رأس شیروانی



شکل 4- نمودار جابه جایی در مقابل نیرو برای گروه شمع 3×3 ، 2×2 و 3×1 واقع در رأس شیروانی

جدول 3- خلاصه ضرایب مقیاس آنالیز عددی

ضریب مقیاس	پارامتر
λ	طول
1	دانسیته
λ	تنش
$\lambda^{1/2}$	کرنش
$\lambda^{3/4}$	سرعت
$\lambda^{1/2}$	مدول برشی

2-2-2- نتایج

در این تحقیق در مجموع 126 آزمایش برای شمع منفرد و گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی و زمین مسطح ماسه ای انجام داده شد. در این مطالعه ابتدا ظرفیت باربری گروه شمع در حالت زمین مسطح اندازه گیری گردید و سپس گروه شمع مورد نظر در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیب قرار داده شد و ظرفیت باربری گروه شمع تحت بار قائم اندازه گیری گردید. در حالت تراکم نسبی 65٪ فاصله گروه شمع از رأس شیروانی را تا مرحله ای که ظرفیت باربری کششی با حالت زمین مسطح برابر گردد، افزایش داده شد. نمودار جابه جایی در مقابل نیرو برای گروه شمع 3×3 ، 2×2 و 3×1 واقع در رأس شیروانی به عنوان نمونه در شکل (4) ارائه شده است. نحوه

تئوری با حالت زمین مسطح برابر می‌شود) با فاصله افقی سطح گسیختگی از وجه خارجی شمع بر روی زمین (X_G) که از روش Chattoadhyay و Pise (1986) محاسبه گردیده است، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که فاصله بحرانی شمع منفرد از فاصله افقی سطح گسیختگی تئوری بیشتر می‌باشد به عبارت دیگر تا زمانی که سطح گسیختگی تئوری شمع منفرد رأس شیروانی را قطع می‌نماید از اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی نمی‌توان صرف نظر نمود.

2-2-2- اثر فاصله گروه شمع از رأس شیروانی

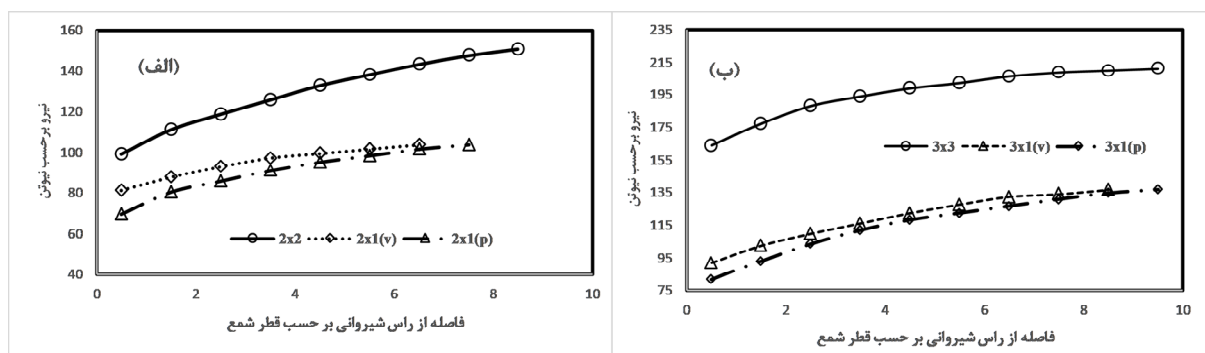
در این بخش اثر فاصله گروه‌های شمع 2×1 ، 3×1 و 2×2 از رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. تراکم خاک 65% و طول مدفون شمع‌ها 30 سانتی‌متر و فاصله شمع‌ها از یکدیگر سه برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی گروه شمع در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیروانی قرار داده می‌شد و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید. در گام‌های بعدی با قرار دادن گروه شمع در فواصل بیشتر از رأس شیروانی ظرفیت باربری کششی گروه شمع اندازه‌گیری می‌گردید و این عملیات تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری کششی با حالت زمین مسطح برابر می‌شد ادامه پیدا می‌کرد. نتایج حاصل در شکل‌های (6) و (7) ارائه شده است.

در گام‌های بعدی با قرار دادن گروه شمع در فواصل بیشتر از رأس شیروانی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد اندازه‌گیری می‌گردید و این عملیات تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری کششی با حالت زمین مسطح برابر می‌شد داده پیدا می‌کرد. نتایج نشان‌دهنده کاهش ظرفیت باربری کششی شمع در هنگام قرار گرفتن شیروانی در مجاورت شیروانی می‌باشد. این امر به علت کاهش فشار محصورکننده شمع هنگام قرارگیری در مجاورت شیروانی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تراکم نسبی میزان کاهش ظرفیت باربری شمع منفرد کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش تراکم نسبی خاک از 40% به 65% و 85% میزان کاهش ظرفیت باربری کششی شمع از 40% به ترتیب به 29% و 22% کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش طول مدفون شمع در یک تراکم نسبی یکسان میزان کاهش ظرفیت باربری کششی شمع کاهش می‌یابد. به طوری که در تراکم نسبی خاک یکسان با افزایش طول مدفون شمع از 15 سانتی‌متر به 30 و 50 سانتی‌متر میزان کاهش ظرفیت باربری کششی خاک از 51% به ترتیب به 29% و 16% کاهش پیدا می‌کند.

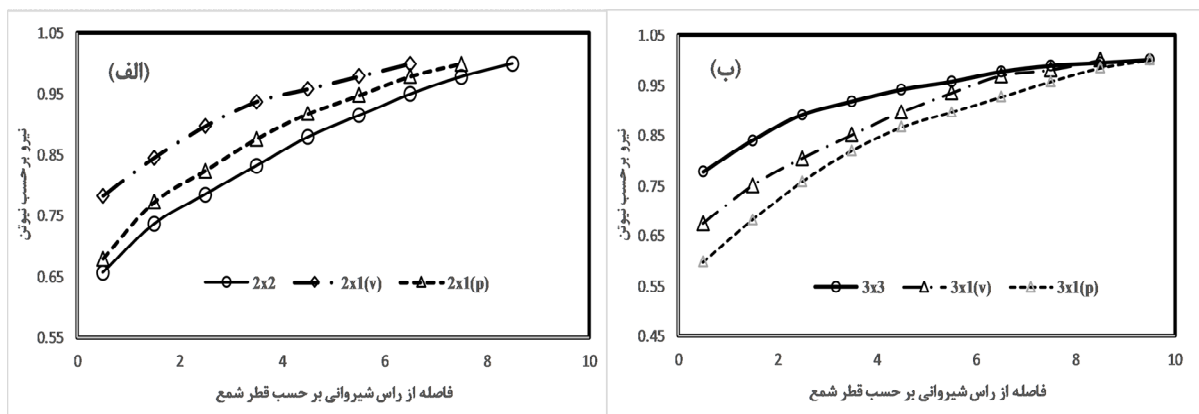
نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از رأس شیروانی ظرفیت باربری کششی شمع افزایش می‌یابد و اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی کاهش می‌یابد. در جدول (4) میزان کاهش ظرفیت باربری شمع منفرد مستقر در رأس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح ارائه شده است. در جدول (4) فاصله بحرانی برای شمع منفرد (فاصله‌ای از رأس شیروانی که ظرفیت باربری با حالت زمین مسطح برابر می‌باشد به عبارت دیگر در صورتی که سطح گسیختگی

جدول 4- میزان کاهش ظرفیت باربری شمع منفرد مستقر در رأس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح

	طول مدفون شمع 15 سانتی‌متر			طول مدفون شمع 50 سانتی‌متر	
	$Dr=40\%$	$Dr=65\%$	$Dr=85\%$	$Dr=65\%$	$Dr=65\%$
درصد کاهش ظرفیت باربری	40	29	22	51	16
طول بحرانی (s/d_p)	3/5	6/5	6/5	5/5	5/5
X_G (فاصله بر حسب قطر شمع)	2/8	4/5	6	3/6	4/8



شکل 6- تغییرات ظرفیت باربری گروه شمع نسبت به فاصله از رأس شیروانی



شکل 7- تغییرات میزان کاهش ظرفیت باربری گروه شمع نسبت به فاصله از رأس شیروانی

جدول 5- مقایسه ضریب راندمان کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح

	2x1 (p)	2x1 (v)	3x1 (p)	3x1 (v)	2x2	3x3
در رأس شیروانی	0/66	0/69	0/52	0/49	0/43	0/30
زمین مسطح	0/72	0/72	0/64	0/64	0/53	0/33
درصد تغییرات	8/5	4/2	33	23	19	12/3

ضریب راندمان کششی در گروه‌های شمع خطی (2×1 و 3×1) به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. و میزان کاهش ضریب راندمان در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. میزان کاهش در ضریب راندمان کششی گروه شمع 2×1 و 3×1 در حالت موازی با رأس شیروانی به ترتیب 8% و 33% می‌باشد و در حالت عمود بر رأس شیروانی به ترتیب 4/2% و 23% می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع خطی میزان کاهش ضریب راندمان افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد شمع از 4 به 9 عدد میزان کاهش ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر روی رأس شیروانی از 19% به 12/3% کاهش می‌یابد.

2-2-3- اثر تراکم نسبی خاک

در این بخش اثر تراکم نسبی خاک بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. تراکم خاک 40%، 65% و 85% و طول مدفون شمع‌ها 30 سانتی‌متر و فاصله شمع‌ها از یکدیگر سه برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها برای هرکدام از تراکم‌های ذکر شده در بالا، ابتدا ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی گروه شمع در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیروانی قرار داده می‌شد و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید.

نتایج نشان داد که در ظرفیت باربری کششی گروه شمع مجاور شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح کمتر می‌باشد. میزان کاهش ظرفیت باربری کششی در گروه‌های شمع خطی (2×1 و 3×1) به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. میزان کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. میزان کاهش در ظرفیت باربری کششی گروه شمع 2×1 و 3×1 در حالت موازی به ترتیب 33% و 39% می‌باشد و در حالت عمود بر رأس شیروانی به ترتیب 22% و 32% می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع خطی میزان کاهش در ظرفیت باربری شمع افزایش می‌یابد برای گروه شمع دوتایی در فاصله 5/5 برابر قطر شمع و برای گروه شمع سه‌تایی در فاصله 6/5 برابر قطر شمع از رأس شیروانی اثر جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به شیروانی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد شمع از 4 به 9 عدد میزان کاهش ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی رأس شیروانی از 35% به 23% کاهش می‌یابد و در فاصله 6/5 برابر قطر شمع از رأس شیروانی اختلاف درصد کاهش ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع 4 و 9 تایی کم شده و می‌توان از اثر تعداد شمع‌های موجود در گروه شمع بر روی کاهش ظرفیت باربری جانبی شمع مجاور شیروانی صرف‌نظر کرد.

مقادیر ضریب راندمان در جدول (5) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در ضریب راندمان کششی گروه شمع مجاور شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح کمتر می‌باشد. میزان کاهش

نتایج حاصل در جدول (6) ارائه شده است. نتایج نشان داد که میزان کاهش ظرفیت باربری کششی در گروه‌های شمع خطی (2×1 و 3×1) مستقر در رأس شیروانی با تراکم نسبی‌های مختلف به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد و میزان کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. افزایش تراکم نسبی تأثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی با رأس شیروانی دارد و با افزایش تراکم نسبی خاک مقدار عددی نسبت ظرفیت باربری کشش گروه شمع موازی شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر شیروانی،

افزایش یافت و در نتیجه با افزایش تراکم نسبی تأثیر جهت گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی کمتر گردید. مقادیر ظرفیت باربری کششی گروه شمع در حالت زمین مسطح و در رأس شیروانی برای تراکم‌های مختلف در جدول (7) ارائه شده است. در گروه شمع 2×1 با افزایش تراکم نسبی از 40% به 65% و 85% نسبت ظرفیت باربری کشش گروه شمع موازی شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر شیروانی از مقدار 0/84 به ترتیب به مقادیر 0/87 و 0/89 افزایش می‌یابد و این نسبت در گروه شمع 3×1 از مقدار 0/89 به ترتیب به مقادیر 0/91 و 0/93 افزایش می‌یافت.

جدول 6- مقایسه ظرفیت باربری کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح

		2×1 (p)	2×1 (v)	3×1 (p)	3×1 (v)	2×2	3×3
Dr=40%	در رأس شیروانی	38	45	42	48	55	95
	زمین مسطح	53	53	69	69	71/5	111
	درصد کاهش ظرفیت باربری	28	15	39	30	23	14
Dr=65%	در رأس شیروانی	69/5	81/2	83	92	99/1	164
	زمین مسطح	103/7	103/7	136/3	136/3	15/9	211
	درصد کاهش ظرفیت باربری	33	22	39	32	34	22
Dr=85%	در رأس شیروانی	137	155	154	165	170	301
	زمین مسطح	172	172	230/5	230/5	253	376/3
	درصد کاهش ظرفیت باربری	21	10	33	28	33	20

جدول 7- مقایسه ضریب راندمان کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح

		2×1 (p)	2×1 (v)	3×1 (p)	3×1 (v)	2×2	3×3
Dr=40%	در رأس شیروانی	0/75	0/7	0/55	0/45	0/43	0/3
	زمین مسطح	0/63	0/63	0/54	0/54	0/42	0/33
Dr=65%	در رأس شیروانی	0/66	0/69	0/52	0/49	0/43	0/30
	زمین مسطح	0/72	0/72	0/64	0/64	0/53	0/33
Dr=85%	در رأس شیروانی	0/78	0/8	0/58	0/54	0/44	0/33
	زمین مسطح	0/76	0/76	0/68	0/68	0/56	0/37

بستگی به جهت گروه شمع به رأس شیروانی دارد. نتایج نشان داد با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع در هر 3 درصد تراکم نسبی، ضریب راندمان گروه شمع مستقر در رأس شیروانی کاهش می‌یابد.

2-2-4- اثر طول مدفون شمع

در این بخش اثر طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. تراکم خاک 65% و طول مدفون شمع‌ها 15 و 30 و

نتایج نشان داد که افزایش دانسیته نسبی باعث افزایش ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع 2×2 و 3×3 مستقر در رأس شیروانی گردید. در گروه شمع 2×2 با افزایش تراکم نسبی از 40% به 65% و 85% ظرفیت باربری کششی به ترتیب 80% و 209% افزایش یافته بود و در گروه شمع 3×3 این درصد افزایش به ترتیب 72% و 216% بود. مقادیر ضریب راندمان کششی برای تراکم‌های مختلف در جدول (7) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در گروه‌های شمع خطی دو و سه‌تایی ضریب راندمان گروه شمع

قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. میزان کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. افزایش طول مدفون شمع، تأثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی با رأس شیروانی دارد. با افزایش طول مدفون شمع مقدار عددی نسبت ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر شیروانی، افزایش یافت و در نتیجه با افزایش طول مدفون شمع تأثیر جهت گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی کمتر می‌شود.

50 سانتی‌متر و فاصله شمع‌ها از یکدیگر سه برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها برای هر کدام از طول‌های مدفون ذکر شده در بالا، ابتدا ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی گروه شمع در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیروانی قرار داده می‌شد و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید. نتایج حاصل در جدول (8) ارائه شده است. نتایج نشان داد که میزان کاهش ظرفیت باربری کششی در گروه‌های شمع خطی (2×1 و 3×1) مستقر در رأس شیروانی با طول‌های مختلف مدفون شده به جهت

جدول 8- مقایسه ظرفیت باربری کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح

		2×1 (p)	2×1 (v)	3×1 (p)	3×1 (v)	2×2	3×3
$L_d=15\text{cm}$	در رأس شیروانی	23	31	35	44	48	70
	زمین مسطح	40	40	52	52	57	84
	درصد کاهش ظرفیت باربری	43	23	34	15	16	17
$L_d=30\text{cm}$	در رأس شیروانی	69/5	81/2	83	92	99	164
	زمین مسطح	103/7	103/7	136/3	136/3	160	211
	درصد کاهش ظرفیت باربری	33	22	39	32	34	22
$L_d=50\text{cm}$	در رأس شیروانی	143	155	195	210	212	267
	زمین مسطح	164	164	218	218	238	300
	درصد کاهش ظرفیت باربری	13	6	7	4	11	11

جدول 9- مقایسه ضریب راندمان کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح

		2×1 (p)	2×1 (v)	3×1 (p)	3×1 (v)	2×2	3×3
$L_d=15\text{cm}$	در رأس شیروانی	0/77	0/80	0/75	0/68	0/61	0/36
	زمین مسطح	0/77	0/77	0/67	0/67	0/55	0/36
$L_d=30\text{cm}$	در رأس شیروانی	0/66	0/69	0/52	0/49	0/43	0/30
	زمین مسطح	0/72	0/72	0/64	0/64	0/53	0/33
$L_d=50\text{cm}$	در رأس شیروانی	0/71	0/71	0/64	0/61	0/49	0/27
	زمین مسطح	0/69	0/69	0/61	0/61	0/50	0/28

شمع 2×2 با افزایش طول مدفون شمع از 15 سانتی‌متر به 30 و 50 سانتی‌متر ظرفیت باربری کششی به ترتیب 106% و 341% افزایش یافته بود و این درصد افزایش در گروه شمع 3×3 به ترتیب 134% و 381% بود.

مقادیر ضریب راندمان کششی گروه شمع برای طول‌های مدفون 15، 30 و 50 سانتی‌متر در جدول (9) ارائه شده است. نتایج نشان داد که در گروه‌های شمع خطی دو و سه تایی ضریب راندمان گروه شمع بستگی به جهت گروه شمع به رأس شیروانی دارد. نتایج نشان داد برای هر 3 طول مدفون شمع، ضریب راندمان

در گروه شمع 2×1 با افزایش طول مدفون شمع از 15 سانتی - متر به 30 و 50 سانتی‌متر مقدار عددی نسبت ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر شیروانی از مقدار 0/74 به ترتیب به مقادیر 0/86 و 0/92 افزایش می‌یابد و این نسبت در گروه شمع 3×1 از مقدار 0/80 به ترتیب به مقادیر 0/90 و 0/93 افزایش می‌یابد.

نتایج نشان داد که افزایش طول مدفون شمع باعث افزایش ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع مربعی 2×2 و 3×3 گردید. تأثیر افزایش طول مدفون شمع بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی در گروه شمع 3×3 از گروه شمع 2×2 بیشتر بود. در گروه

- sand", *Ocean Engineering*, 2022, 266, 112847. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112847>
- Conte, Enrico, Pugliese L, Toroncon A, Vena M, "A simple approach for evaluating the bearing capacity of piles subjected to inclined loads", *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21 (11), 04021224. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002215)
- De Sanctis L, Di Leora R, Garala TK, Fagnoli P "Centrifuge modelling of the behaviour of pile groups under vertical eccentric load", *Soils and Foundations*, 2021, 61 (2), 465-479. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.01.006>
- Emirler B, Mustafa T, Abdulazim Y, "Investigation on determining uplift capacity and failure mechanism of the pile groups in sand", *Ocean Engineering*, 2020, 218, 108145. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108145>
- Gaaver KE, "Uplift capacity of single piles and pile groups embedded in cohesionless soil", *Alexandria Engineering Journal*, 2013, 52 (3), 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.01.003>
- Jerin, Joseph, Kummur S, Sawant VA, "An experimental and numerical comparative study on the uplift capacity of single granular pile anchor and rough pile in sand", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 16 (4), 499-513. <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1999077>
- Kang J, Kim Y, Khnag G, "Uplift capacity of single vertical belled pile embedded at shallow depth", *Geomechanics and Engineering*, 2023, 35 (2), 165-179. <https://doi.org/10.12989/gae.2023.35.2.165>
- Khati BS, Sawant VA, "Experimental study of laterally loaded pile group in square arrangement near sloping ground", *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21 (2), 04020257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001911)
- Khati BS, Sawant VA, "Variation in lateral load capacity of pile embedded near slope with ground inclination and edge distance", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1541149>
- Khati BS, Singh B, Sawant VA, "Comparison of lateral response of pile group in series and parallel arrangement near sloping ground", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 14 (6), 686-695. <https://dx.doi.org/10.21608/njace.2024.341286>
- Kishida H, "Stress distribution by model piles in sand", *Soils and Foundations*, 1963, 4 (1), 1-23. <https://doi.org/10.3208/sandf1960.4.1>
- LIU P, Chong J, "Analytical method for laterally loaded short piles near clay slopes considering the soil-pile-slope surface deformation mechanism", *Ocean Engineering*, 2024, 296, 117036. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117036>
- Meyerhof GG, "Bearing capacity and settlement of pile foundations", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102 (3), 197-228. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000243>
- Mohammad Alinejad R, Bayat M, Pakbaz M, "Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading", *Arabian Journal of Geosciences*, 2021,

گروه شمع مستقر در رأس شیروانی با افزایش تعداد شمع‌ها، کاهش می‌یابد.

3- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

(1) با افزایش تراکم نسبی خاک میزان تأثیر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد واقع در رأس شیروانی کمتر می‌گردد.

(2) با افزایش طول مدفون شمع منفرد تأثیر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد واقع در رأس شیروانی کمتر می‌گردد.

(3) نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی در مقدار ضریب راندمان و ظرفیت باربری کششی گروه شمع تأثیرگذار است. گروه شمع عمود بر شیروانی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان بیشتری نسبت به گروه شمع موازی شیروانی دارد.

(4) افزایش تراکم نسبی خاک بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی شمع خطی موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی تأثیر بیشتری داشته و با افزایش تراکم نسبی خاک، تأثیر جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی کمتر می‌شود.

(5) با افزایش تعداد شمع از 4 به 9 عدد میزان کاهش در ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی رأس شیروانی کاهش می‌یابد و در فاصله 6/5 برابر قطر شمع از رأس شیروانی این اختلاف کمتر شده و می‌توان از اثر تعداد شمع‌های موجود در گروه شمع بر روی کاهش ظرفیت باربری کششی شمع مجاور شیروانی صرف نظر کرد.

(6) افزایش طول مدفون شمع بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی شمع خطی موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر شیروانی تأثیر بیشتری داشته و با افزایش طول مدفون شمع، تأثیر جهت قرارگیری شمع خطی نسبت به رأس شیروانی کمتر می‌شود.

(7) افزایش طول مدفون شمع بر روی افزایش ظرفیت گروه 3×3 مستقر در رأس شیروانی نسبت به گروه شمع 2×2 بیشتر می‌باشد.

4- مراجع

- Chattopadhyay BC, Pise PJ, "Uplift capacity of piles in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112, 9, 888-904.
- Chen Lujie, Chong J, Pang L, "Lateral capacity of a two-pile group foundation model located near slope in

- 14, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09123-7>
- Mohammad Alinejad R, Bayat M, Pakbaz M, "Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2023, 67 (2), 382-391. <https://doi.org/10.3311/PPci.18334>
- Nasrollahzadeh E, Hataf N, "Experimental and numerical study on the bearing capacity of single and groups of tapered and cylindrical piles in sand", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 16 (4), 426-437. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1651042>
- Nordlund RL, "Bearing capacity of piles in cohesionless soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963, 89 (3), 1-35.
- Paik K, Salgado R, "Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129 (1), 46-57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:1(46))
- Robinsky EL, Morrison CF, "Sand displacement and compaction around model friction piles", *Canadian Geotechnical Journal*, 1964, 1 (2), 81-93.
- Sun T, Yang F, Cui X, Huang Z, Lyu X, Ma R, Zhang X, "Model Test Study on the Vertical Uplift Bearing Characteristics of Soil Continuous Solidified Pile Group Foundations", *Buildings*, 2024, 14 (3), 849. <https://doi.org/10.3390/buildings14030849>
- Shanker KP, Basudhar K, Patra N, "Uplift capacity of single piles: predictions and performance", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, 25, 151-161. <https://doi.org/10.1007/s10706-006-9000-z>
- Sharafkhah M, Shooshpasha I, "Physical modeling of behaviors of cast-in-place concrete piled raft compared to free-standing pile group in sand", *Journal of Rock Mech Geotech Engineering*, 2018, 10, 703-716. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.007>
- TEL-Nemr M, Azzam R, Gaber KE, Ashour O, "Numerical investigation of the behavior of group-finned piles in sandy soil subjected to tensile loads", *Nile Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2024, 4 (1), 1-21. <https://dx.doi.org/10.21608/njace.2024.341286>
- Tolun M, Emirler B, Ertugrul OL, Yildiz A, "Effect of dilatancy on tension response of completely rough piles embedded in granular soils", *Ocean Engineering*, 2024, 292, 116507. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116507>
- Tianzhong MA, Yanpeng ZHU, Xiaohui YANG, "Calculation of bearing capacity and deformation of composite pile foundation with long and short piles in loess areas", *Advances in Civil Engineering*, 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/8829779>
- Xu Y, Fu Y, Chen Z, "Experimental study and design formula of the uplift performance of screw anchor foundations in silty clays", *Acta Geotechnica*, 2024, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02267-2>