

Effect of degree of freedom of movement on the bearing capacity and efficiency coefficient of pile group adjacent to sandy slope

Reza Mohammad-Ali nejad¹, Meysam Bayat^{2*}, Bahram Nadi², Mohammad Siroos Pakbaz³

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Understanding the behavior of the pile group near the slope is an important factor in designing a heavy structure adjacent to the slope. There are very little research on the vertical capacity and efficiency coefficients of pile group near slope, so the study about the behavior of pile group adjacent of the slope is very important. The purpose of this study is to investigate and compare the bearing capacity and efficiency coefficient of vertical pile group under axial loading in the near sandy slopes in two modes of free horizontal movement and no free horizontal pile movement by testing the physical model of pile group. Also in the study, horizontal force applied to the pile group with free lateral movement is investigated with the FLAC3D software. For this purpose, a series of experiments were performed on the physical model of 2×2 , 2×1 , 3×1 and 3×3 pile groups adjacent to the dry sandy slope without horizontal displacement and the results were obtained with previous research of other researchers in which the lateral displacement of the pile group has been free, compared. The results of the physical model tests show that the bearing capacity and efficiency coefficient of the pile group is dependent on the pile distance, the pile group configuration, and the liner pile-group direction relative to the slope direction. Also, the results of the physical model tests show that the bearing capacity and efficiency coefficient of the pile group with free lateral movement have higher values than the pile group without lateral movement. Numerical analysis results show that the lateral force applied to the pile group decreases by increasing the spacing of the piles, and the ratio of horizontal force to axial force in the linear pile group decreases with increasing number of piles.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 December 2021

Revise Date: 16 June 2022

Accept Date: 24 June 2022

Keywords:

Pile group

Slope

Efficiency coefficient

Sand

Bearing capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321897.2678>

*Corresponding author: Meysam Bayat.

Email address: bayat.m@pci.iau.ac.ir

اثر درجه آزادی حرکت سرشمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای

رضا محمد علی نژاد^{۱*}، میثم بیات^{۲*}، بهرام نادى^۲، محمد سیروس پاکباز^۳

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران و معماری، اهواز، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

چکیده

درک رفتار گروه شمع مجاور شیروانی عامل مهمی در طراحی سازه‌های سنگین مجاور شیروانی است. در خصوص ظرفیت باربری قائم و ضریب راندمان 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 و مقایسه ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع قائم تحت بارگذاری محوری در مجاورت شیروانی ماسه‌ای در دو حالت آزاد بودن و مقید بودن جابجایی افقی سرشمع به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی می‌باشد. همچنین در این تحقیق، نیروی افقی اعمال شده به گروه شمع با حرکت جانبی آزاد به کمک نرم افزار *FLAC3D* مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور یک سری آزمایش‌های مدل فیزیکی بر روی گروه‌های شمع 2×2 ، 2×1 ، 3×1 و 3×3 مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک که در مقابل جابجایی افقی سرشمع مقید گردیده بود، انجام گرفته و نتایج حاصل با تحقیقات قبلی که در آن جابجایی افقی سرشمع آزاد بوده است، مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل فیزیکی نشان می‌دهد، ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع به عواملی همانند فاصله شمع‌ها، تعداد شمع‌ها و نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. همچنین نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی نشان می‌دهد، ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع با حرکت جانبی آزاد دارای مقادیر بیشتری نسبت به گروه شمع فاقد حرکت جانبی می‌باشد. نتایج آنالیز عددی نشان می‌دهد نیروی جانبی اعمال شده به گروه شمع با افزایش فاصله شمع‌ها کاهش می‌یابد و نسبت نیروی افقی به نیروی محوری در گروه شمع خطی با افزایش تعداد شمع‌ها کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: گروه شمع، شیروانی، ضریب راندمان، ماسه، ظرفیت باربری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321897.2678	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.321897.2678	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۰۳	۱۴۰۱/۰۴/۰۳	۱۴۰۱/۰۳/۲۶	۱۴۰۰/۱۰/۰۷
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				میثم بیات		
				bayat.m@pci.iau.ac.ir		

۱- مقدمه

شمع‌ها با انتقال بار سازه‌های مختلف به لایه‌های عمیق‌تر با سختی بالاتر، امکان کاهش نشست متقارن و نامتقارن سازه‌ها را فراهم می‌کنند. شمع‌ها اغلب به صورت گروهی استفاده می‌شوند. گروه شمع به عنوان پی سازه‌هایی همانند دکل‌های انتقال، پایه‌های پل، سازه‌های بلند و ... استفاده می‌گردد. این سازه‌ها اغلب در کنار و روی شیروانی مستقر می‌گردند و تحت اثر بارهای افقی، قائم و یا ترکیب نیروهای افقی و قائم قرار می‌گیرند. مکانیسم انتقال بار در شمع‌های گروهی به دلیل اثرات متقابل شمع-خاک و شمع-شمع به‌طور کلی با شمع منفرد متفاوت است [۶-۱]. 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 فونداسیون بگذارد [۷-۱۰].

قابل اطمینان‌ترین روش برای بررسی رفتار گروه شمع تحت بار جانبی یا محوری، انجام آزمایش بر روی نمونه‌های واقعی گروه شمع است [۱۱-۱۳]. با این حال، هزینه زیاد و زمان‌بر بودن آزمایش بر روی شمع در حالت واقعی و تنوع ذاتی زیاد لایه‌های خاک و شرایط آزمایش، انجام آزمایش‌ها در مقیاس واقعی را برای محققان غیر عملی می‌کند [۱۴]؛ بنابراین، آزمون‌های مدل فیزیکی به عنوان ابزاری قدرتمند برای درک روند فیزیکی اندرکنش خاک و شمع و تعیین عوامل مهم کنترل‌کننده اندرکنش خاک و شمع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵].

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص رفتار شمع منفرد و گروه شمع در مجاورت شیروانی تحت بارگذاری جانبی به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی و آنالیز عددی صورت پذیرفته است. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد و گروه شمع نزدیک شیروانی به عوامل مختلفی مانند فاصله از رأس شیروانی، شیب شیروانی، نسبت طول به قطر شمع، زبری سطح شمع و تراکم نسبی خاک بستگی دارد [۱۶-۲۸]. اما در خصوص رفتار گروه شمع در مجاورت شیروانی تحت بار قائم تحقیقات کمی صورت پذیرفته است و رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری قائم به خوبی درک نشده است [۲۸-۴۰].

خاتی و ساوانت^۱ [۳۱] با استفاده از آزمایش مدل فیزیکی، به بررسی اثر نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بر روی رفتار گروه شمع خطی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زمانی که شمع‌ها در جهت عمود بر شیروانی قرار می‌گرفتند، شمع‌ها تأثیر بیشتری بر روی عملکرد هم می‌گذاشتند و باعث می‌شدند ظرفیت باربری جانبی شمع در این حالت کمتر از حالت موازی با شیروانی شود.

شاکل و ان جی^۲ [۴۰] به بررسی رفتار گروه شمع در مجاورت ترانشه‌های عمیق در خاک رسی پرداختند. نتایج شاکل و ان جی نشان داد که بیشترین میزان نشست گروه شمع تحت یک بار قائم ثابت در فاصله افقی برابر با ۷۵٪ عمق ترانشه از لبه ترانشه عمق به وقوع می‌پیوست و با افزایش طول شمع‌ها اثر ترانشه بر روی ظرفیت باربری گروه شمع کاهش می‌یافت.

محمد علی نژاد و همکاران [۴۱] به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری قائم گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. محمد علی نژاد و همکاران اثر فاصله شمع‌ها از یکدیگر، اثر تعداد شمع در گروه شمع و اثر نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری قائم گروه شمع را مورد بررسی قرار دادند. در بررسی انجام شده توسط محمد علی نژاد و همکاران، گروه شمع علاوه بر تغییر مکان قائم دارای تغییر مکان افقی نیز بود. نتایج تحقیقات محمد علی نژاد و همکاران نشان می‌داد که با افزایش فاصله از رأس شیروانی اثر شیروانی بر روی پاسخ گروه شمع کمتر می‌گردد و پاسخ گروه شمع به حالت زمین مسطح نزدیک می‌گردد.

در خصوص ظرفیت باربری قائم و ضریب راندمان گروه‌های شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری قائم تحقیقات بسیار کمی صورت پذیرفته است، لذا بررسی رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری محوری از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق بررسی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک در شرایط مقید بودن حرکت جانبی سرشمع است و در

¹ Khati and Sawant

² Shakeel and NG

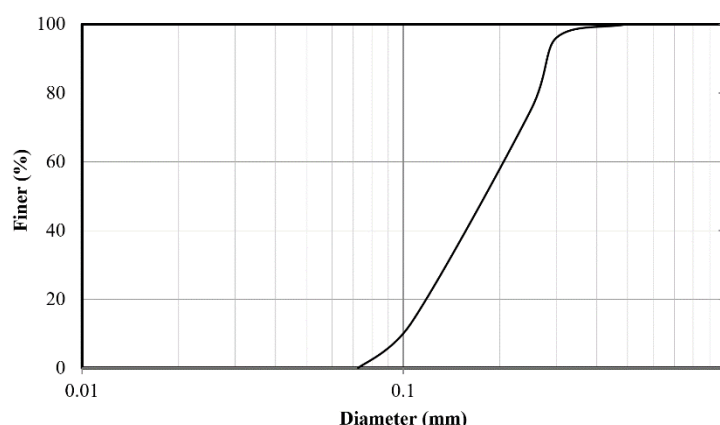
ادامه مقایسه، مقادیر بدست آمده با ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع با حرکت جانبی مجاز تحت اثر بارگذاری قائم می‌باشد. در این بررسی اثر عوامل مختلفی همانند اثرات فاصله گروه شمع از رأس شیروانی، فاصله شمع‌ها از یکدیگر، جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به شیروانی و چینش گروه شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان و نیروی جانبی گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای بررسی شده است. برای نیل به این هدف مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی گروه شمع مدفون شده در مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک انجام شده است و سپس مدل فیزیکی آزمایش‌های انجام شده در نرم‌افزار FLAC3D مدل شده و نیروهای جانبی اعمال شده بر گروه شمع محاسبه گردیده و نتایج حاصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و روش انجام کار

۲-۱-۱- خاک

ماسه استفاده شده در این تحقیق، ماسه ریزدانه خشک شهرستان رامهرمز واقع در جنوب غرب کشور بود. نمودار دانه‌بندی ماسه مورداستفاده، در شکل شماره ۱ و ویژگی‌های این ماسه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. ماسه بر اساس روش طبقه‌بندی متحد از نوع SP بوده و از آزمایش برش مستقیم جهت تعیین زاویه اصطکاک ماسه استفاده گردید.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه مورداستفاده در مدل فیزیکی

۲-۱-۲- روش انجام آزمایش

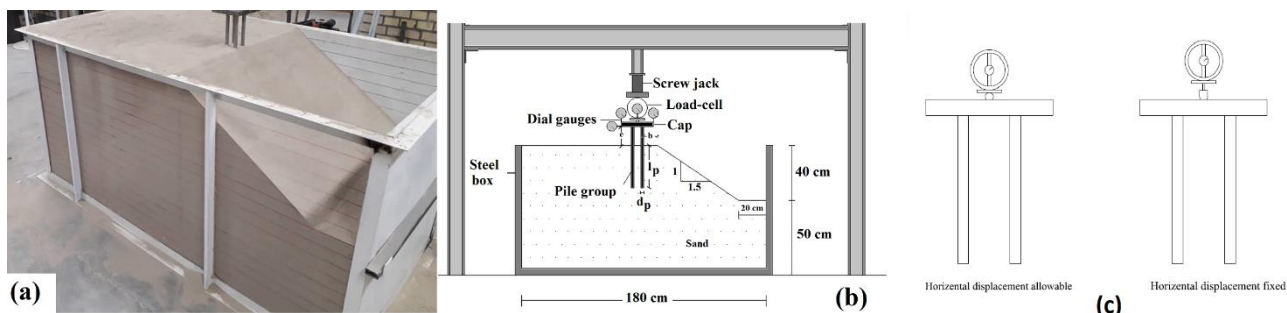
در این مطالعه از شمع‌های فولادی توپر به قطر ۱۸ میلی‌متر و به طول ۴۵ سانتیمتر و از سرشمع فولادی به ابعاد ۱۶×۱۶ سانتیمتر و ضخامت ۲ سانتیمتر استفاده گردید. طول مدفون شمع‌ها در تمامی آزمایش‌ها برابر با ۳۰ سانتیمتر و زاویه شیروانی ۳۳/۷ درجه در نظر گرفته شده بود (نسبت طول مدفون به قطر شمع‌ها برابر ۱۶/۶۷ در نظر گرفته شد)؛ از این رو فاصله قائم مرکز سرشمع تا سطح خاک ۱۴ سانتیمتر بوده است. بالای شمع‌ها به طول ۲ سانتیمتر در سرشمع ثابت گردیده بود در نتیجه شرایط اتصال گیردار شمع به سرشمع مهیا شده بود.

جدول ۱: 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
۱۶/۹	۱۳/۸۸	۲/۶۵	۳۵	۰/۱	۰/۱۸	۲/۰۲	۰/۸۲

ابعاد داخلی باکس مورد استفاده در این تحقیق $180 \times 90 \times 90$ سانتیمتر در نظر گرفته شد. از روش آنالیز حساسیت به کمک نرم افزار FLAC3D جهت تعیین ابعاد باکس استفاده گردیده بود. ابعاد باکس به گونه‌ای تعیین گردیده بود تا اثر مرزهای جانبی بر روی نتایج به حداقل برسد. نحوه قرارگیری گروه شمع و اعمال بار به گروه شمع در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. به منظور مشاهده و کنترل اجرای شیروانی، در وجه جلویی باکس از ورق پلکسی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده بود. جابجایی قائم سرشمع توسط دو گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر که در دو لبه سرشمع قرار داشتند، اندازه‌گیری گردید و متوسط جابجایی قائم اندازه‌گیری شده توسط دو گیج قرار داده شده بر روی و لبه سرشمع به عنوان جابجایی قائم گروه شمع در نظر گرفته شد. از جک اسکرو برقی جهت بارگذاری قائم استفاده گردید و در تمامی آزمایش‌ها، بارگذاری به صورت جابجایی با سرعت ثابت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر مرکز سرشمع اعمال گردید و نیرو اعمال شده به وسیله یک نیروسنج که مابین سرشمع و قاب فولادی قرار داده شده بود، اندازه‌گیری می‌گردید. نیرو بر سرشمع به گونه‌ای اعمال می‌گردید که گروه شمع تنها قادر به تغییر مکان قائم باشد و از تغییر مکان افقی گروه شمع جلوگیری می‌گردید. بارگذاری تا جابجایی قائمی برابر با ۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌گردید. برنامه آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است. در این تحقیق از گروه‌های شمع $(1 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 2, 3 \times 3)$ (شکل شماره ۳) استفاده گردید. در این آزمایش‌ها فاصله شمع‌ها در گروه شمع‌ها $3d_p, 4d_p, 5d_p$ در نظر گرفته شد (d_p قطر شمع می‌باشد). از روش تراکم کاهش یافته به منظور دستیابی به یک تراکم یکسان در تمامی لایه‌ها، جهت اجرای شیروانی استفاده گردید. خاک ماسه‌ای خشک در لایه‌هایی به ضخامت ۵ سانتیمتر تا رسیدن به تراکم مورد نظر کوبیده می‌گردید. تراکم نهایی مورد نظر برای لایه‌ها ۶۵٪ در نظر گرفته شد. به هنگام رسیدن شیروانی به تراز نوک شمع، گروه شمع در محل مورد نظر 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 ۴ گیره به لبه‌های جعبه محکم می‌گردیدند و سپس سایر لایه‌های خاک تا تراز نهایی اجرا می‌گردید.

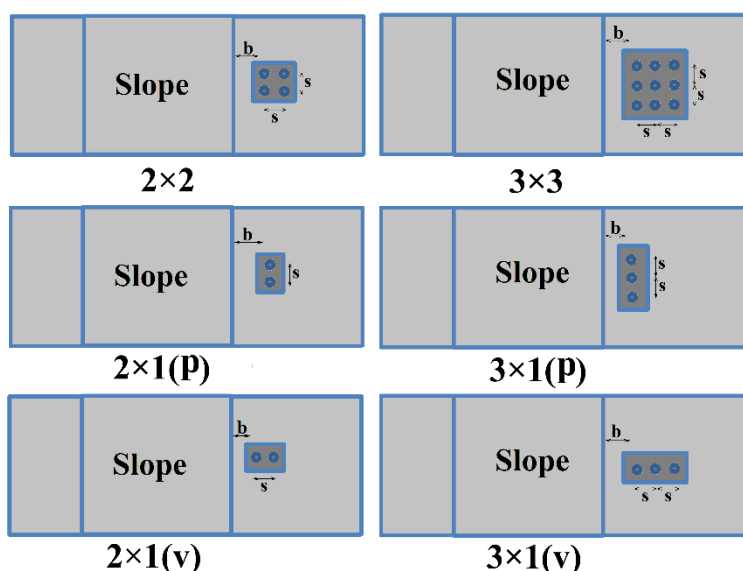
از مفاهیم آنالیز عددی به منظور استفاده از نتایج این تحقیق، جهت نمونه‌هایی با مقیاس بزرگ می‌توان استفاده نمود. در صورتی که λ ضریب مقیاس هندسه مدل (نسبت اندازه واقعی به اندازه مدل آزمایشگاهی) باشد و از خاک واقعی در مدل‌سازی استفاده گردد، برای آزمایش‌های تحت شتاب 1g، ضرایب مقیاس را می‌توان از جدول (۳) استخراج نمود. جزئیات مربوط به تحلیل ابعادی در تحقیق محمد علی نژاد و همکاران [۴۱] نشان داده شده است.



شکل ۲: جزئیات مدل فیزیکی استفاده شده در تحقیق

۲-۲- نتایج

در این تحقیق در مجموع ۶۱ آزمایش برای شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای با زاویه شیب $33/7$ درجه انجام داده شد. در این مطالعه ابتدا ظرفیت باربری گروه شمع در حالت زمین مسطح اندازه‌گیری گردید و سپس گروه شمع موردنظر در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیب قرار داده شد و ظرفیت باربری گروه شمع تحت بار قائم اندازه‌گیری گردید و در مراحل بعدی گروه شمع در فواصل دورتر از رأس شیب قرار داده شد. افزایش فاصله از رأس شیروانی تا زمانی که ظرفیت باربری گروه شمع با حالت زمین مسطح برابر می‌گردید، ادامه پیدا کرد. جهت محاسبه ظرفیت باربری گروه شمع روش‌های مختلفی وجود دارد و با توجه به اینکه تعیین ظرفیت باربری گروه شمع به اِزاء نشست معادل 10% قطر شمع به‌طور وسیعی مورد پذیرش محققین مختلفی قرار دارد [۴۲] از این روش جهت تعیین ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع استفاده گردید.



شکل ۳: نحوه قرار گروه‌های شمع نسبت به رأس شیروانی

جدول (۳) خلاصه ضرایب مقیاس آنالیز عددی

هدف	تعداد آزمایش‌ها	فاصله شمع‌ها	گروه شمع
بررسی اثر فاصله شمع‌ها بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع	۷	$3d_p$	2×2
	۷	$4d_p$	2×2
	۶	$5d_p$	2×2
بررسی اثر تعداد شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع	۹	$3d_p$	3×3
بررسی اثر جهت قرارگیری گروه شمع بر روی ظرفیت باربری گروه شمع	۴	$3d_p$	$2 \times 1(v)$
	۶	$3d_p$	$2 \times 1(p)$
بررسی اثر افزایش تعداد شمع و جهت قرارگیری گروه شمع خطی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع	۴	$3d_p$	$3 \times 1(v)$
	۷	$3d_p$	$3 \times 1(p)$

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

در این تحقیق، جهت مقایسه ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی باحالت زمین مسطح از ضریب کاهش ظرفیت باربری (RF) که عبارت است از نسبت ظرفیت باربری گروه شمع در مجاور شیروانی به ظرفیت باربری گروه شمع در حالت زمین مسطح استفاده گردید.

جهت مقایسه ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی باحالت زمین مسطح از ضریب کاهش ضریب راندمان (RG) که عبارت است از نسبت ضریب راندمان گروه شمع در مجاور شیروانی به ضریب راندمان گروه شمع در حالت زمین مسطح استفاده گردید.

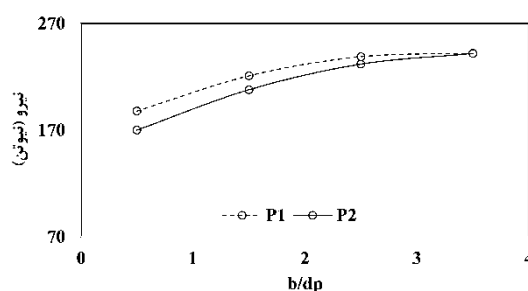
۲-۲-۱- شمع منفرد

با توجه به اینکه جهت محاسبه ضریب راندمان نیاز به داشتن مقدار ظرفیت باربری شمع منفرد می‌باشد به همین دلیل در این بخش، ۹ آزمایش بر روی شمع منفرد با تغییر مکان افقی و بدون تغییر مکان افقی صورت پذیرفت. ظرفیت باربری گروه‌های شمع در شکل (۴) مقایسه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری شمع منفرد بدون حرکت جانبی در فواصل یکسان از رأس شیروانی کمتر می‌باشد و با افزایش فاصله از رأس شیروانی اثر درجه آزادی سرشمع بر روی ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.

۲-۲-۲- اثر فاصله بین شمع‌ها

در این بخش اثر فاصله شمع‌ها از یکدیگر در یک گروه شمع متشکل از چهار شمع (۲×۲) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج برای سه فاصله شمع (۳، ۴ و ۵ برابر قطر شمع) در شکل‌های (۵) الی (۷) ارائه شده است.

تغییرات ظرفیت باربری محوری و مقادیر RF و RG گروه‌های شمع در برابر نسبت فاصله گروه شمع به قطر شمع برای فواصل مختلف شمع‌ها برای هر دو گروه شمع (با و بدون حرکت جانبی) در شکل‌های (۵) الی (۸) ارائه شده است. نتایج محمد علی نژاد و همکاران [۴۱] برای گروه شمع با حرکت جانبی آزاد با GP1(41) و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های بر روی گروه شمع بدون حرکت جانبی افقی با GP2 مشخص شده است. همان‌طور که در نتایج ارائه شده نشان داده شده است، ظرفیت باربری قائم گروه شمع با افزایش فاصله از لبه شیروانی به رفتار گروه شمع واقع در زمین مسطح نزدیک شده است. نتایج به دست آمده جهت برای گروه‌های شمع GP1, GP2 هنگامی که در رأس شیروانی قرار می‌گیرند در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع GP2 هنگامی که در رأس شیروانی قرار می‌گیرد نسبت به گروه شمع GP1 کاهش بیشتری دارد.

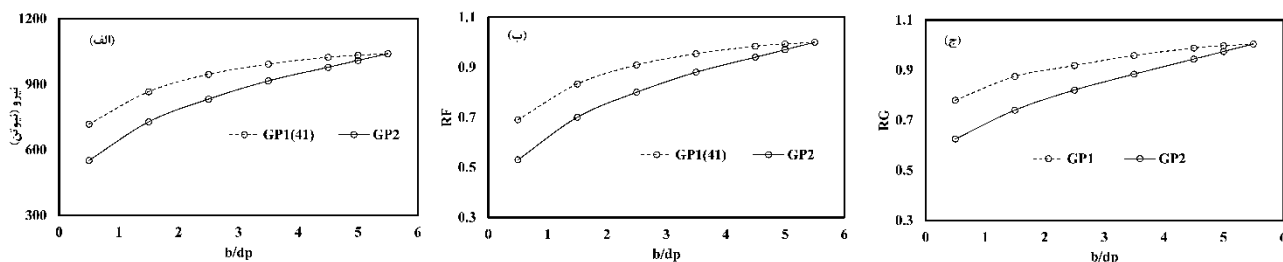


شکل ۴: تغییرات ظرفیت باربری شمع منفرد در مقابل فاصله از رأس شیروانی (P1 شمع با تغییر مکان جانبی P2 شمع بدون تغییر مکان جانبی)

همان طور که نتایج نشان داده است اثر شیروانی بر روی گروه شمع GP2 بیشتر می باشد و تأثیر فاصله شمع بر ظرفیت بارمحوری هر دو گروه شمع به نسبت b/dp بستگی دارد. ظرفیت بارمحوری هر دو گروه شمع با فاصله شمع $S = 5dp$ نسبت به گروه های شمع با فاصله شمع $S = 3dp$ و $S = 4dp$ به مقدار b/dp حساسیت کمتری دارد. نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده با نتایج تحقیق محمد علی نژاد و همکاران که بر روی گروه شمع مجاور شیروانی با آزاد بودن جابجایی افقی انجام گرفت همخوانی دارد. در تمام موارد، ظرفیت باربری محوری گروه شمع GP1 نسبت به گروه شمع GP2 بیشتر می باشد. شکل های (۵) الی (۷) نشان می دهد در هر دو حالت بارگذاری افزایش b/dp از $0/5$ به $5/5$ منجر به افزایش مقدار RF می شود و اثرات منفی شیروانی بر ظرفیت باربری گروه شمع در مقادیر بالاتر b/dp قابل اغماض است. از طرف دیگر، تأثیر فاصله از رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع در هر دو گروه شمع به فاصله شمع ها در گروه شمع بستگی دارد، به طوری که با افزایش فاصله شمع برای یک مقدار فاصله مشخص از لبه شیروانی اثر شیروانی بر این گروه شمع ها کاهش می یابد. پاسخ گروه شمع در شیروانی با فاصله شمع $S = 5dp$ در حال نزدیک شدن به وضعیت زمین مسطح در مقدار $b = 4.5dp$ است و پس از آن می توان از تأثیر شیروانی صرف نظر کرد و در این حالت مقدار RF به یک نزدیک می شود. با این حال، مقدار RF برای گروه شمع با فاصله شمع $S = 3dp$ در مقدار $b = 5.5dp$ به یک نزدیک شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، با افزایش فاصله شمع ها اثر درجه آزادی شمع ها بر روی ظرفیت باربری و RF کاهش می یابد. همچنین با توجه اشکال (۵) الی (۷) با افزایش فاصله از رأس شیروانی، ضریب راندمان گروه های شمع RG1 و RG2 افزایش می یابد و اثر شیروانی بر روی گروه شمع GP2 بیشتر می باشد. با افزایش فواصل شمع ها در هر دو حالت بارگذاری اثر شیروانی بر روی ضریب راندمان کمتر شده و برای یک فاصله مشخص از رأس شیروانی در هر دو حالت بارگذاری با افزایش فاصله شمع ها ضریب راندمان گروه شمع افزایش می یابد.

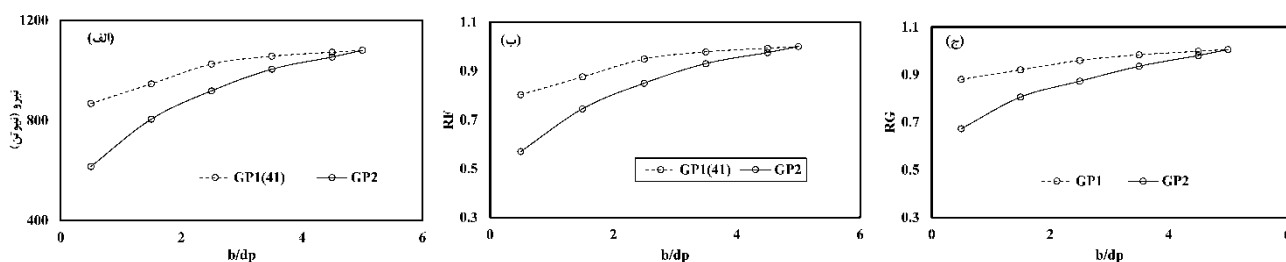
جدول (۴) مقایسه نیروها و ضرایب کاهش بار و ضریب راندمان گروه های شمع GP1 و GP2 واقع در رأس شیروانی

	ظرفیت باربری (نیوتن)			RF			RG		
	3dp	4dp	5dp	3dp	4dp	5dp	3dp	4dp	5dp
GP1	۷۱۷/۶	۸۶۷	۸۸۰	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۸۸	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۴
GP2	۵۵۱/۲	۶۱۶	۷۸۰	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۸۷



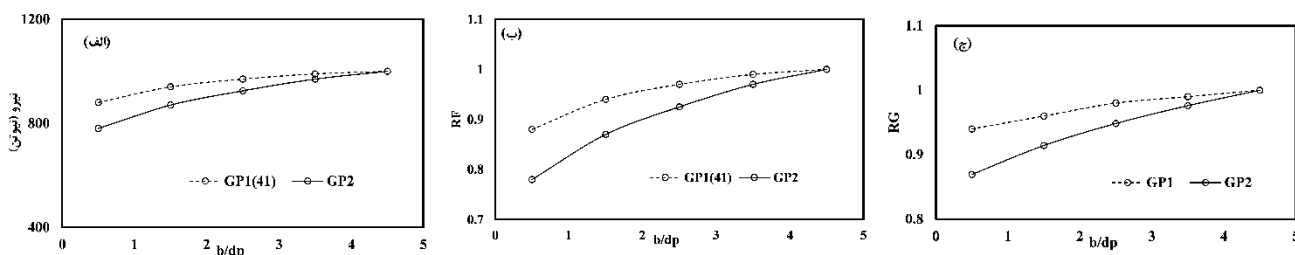
شکل ۵: مقایسه رفتار گروه شمع ۲×۲ با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع)

الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG



شکل ۶: مقایسه رفتار گروه شمع ۲×۲ با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۴ برابر قطر شمع)

الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG

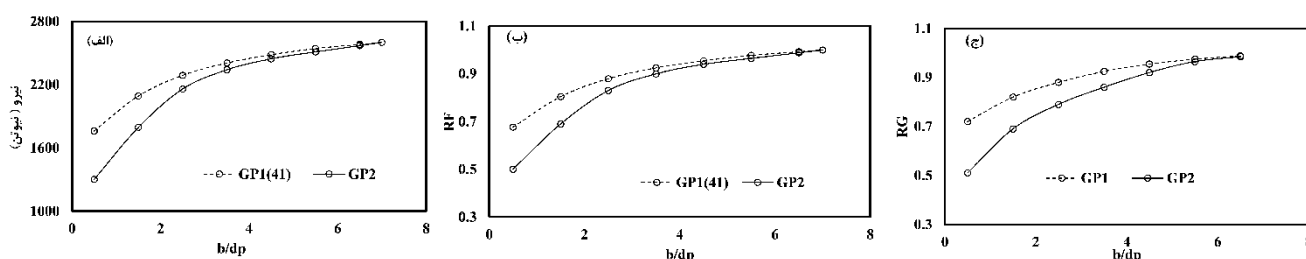


شکل ۷: مقایسه رفتار گروه شمع ۲×۲ با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۵ برابر قطر شمع)

الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG

۲-۲-۳- اثر تعداد شمع در گروه شمع

در این بخش یک سری آزمایش بر روی گروه‌های شمع متشکل از ۹ شمع انجام شد. تراکم نسبی ماسه در این بخش نیز برابر با ۶۵٪ در نظر گرفته شد. فاصله شمع ۳ برابر قطر شمع بوده و فاصله از رأس شیروانی از ۰/۵ تا ۷ برابر قطر شمع تغییر یافت. شکل (۸) تغییرات ظرفیت باربری، RF و RG گروه شمع ۳×۳ برای فواصل مختلف از لبه شیروانی را نشان می‌دهد. پاسخ هر دو گروه شمع متشکل از ۹ شمع، مشابه گروه شمع متشکل از ۴ شمع، با افزایش فاصله از رأس شیروانی در حال نزدیک شدن به رفتار گروه شمع متناظر در زمین مسطح است. نتایج نشان می‌دهد که اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع GP2 بیشتر بوده و با افزایش فاصله این تأثیر کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در فواصل بیش از 4.5dp از رأس شیروانی RF مستقل از درجه آزادی حرکت سرشمع می‌باشد. افزایش تعداد شمع‌ها از ۴ به ۹ تأثیر مهمی در مقدار RF برای هر دو گروه شمع‌ها ندارد. با توجه به نتایج حاصل شده ضریب RG در هر دو گروه شمع با افزایش فاصله از رأس شیروانی افزایش می‌یابد و اثر تأثیر شیروانی بر روی گروه شمع GP2 بیشتر می‌باشد.



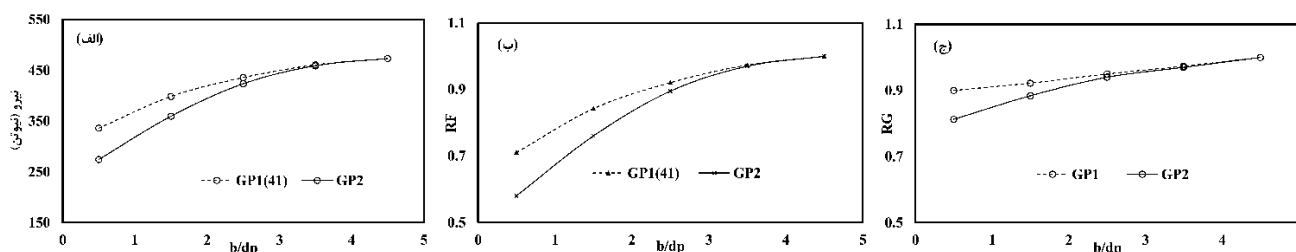
شکل ۸: مقایسه رفتار گروه شمع ۳×۳ با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع)

الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG

۲-۲-۴- اثر جهت گروه شمع در شمع‌های خطی

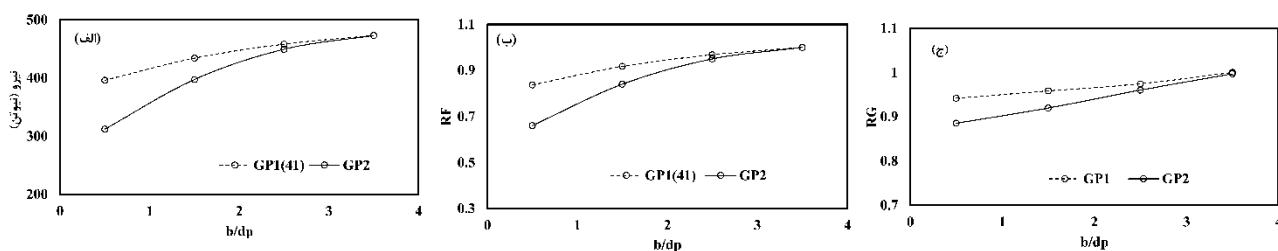
به منظور بررسی تأثیر جهت گروه شمع خطی نسبت به جهت شیروانی، مطابق شکل (۲) یک سری آزمایش بر روی گروه‌های شمع خطی متشکل از دو و سه شمع در یک ردیف انجام گردید. تأثیر جهت گروه شمع بر ظرفیت باربری محوری و مقدار RF و RG بر روی گروه شمع ۲ تایی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر ظرفیت باربری و مقادیر RF, RG برای هر دو گروه شمع GP1, GP2 در جدول (۵) ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که فاصله از لبه شیروانی برای هر دو گروه شمع، تأثیر بیشتری بر روی پاسخ گروه شمع خطی موازی با شیروانی نسبت به پاسخ گروه شمع خطی عمود بر شیروانی دارد. همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است، گروه شمع عمود بر شیروانی، ظرفیت باربری محوری و ضریب راندمان بیشتری نسبت به گروه شمع موازی با شیروانی برای یک فاصله مشخص از لبه شیروانی دارد. با این حال، اثر جهت گروه شمع خطی با توجه به جهت شیروانی بر ظرفیت باربری محوری و ضریب راندمان با افزایش فاصله از لبه شیروانی کاهش می‌یابد. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که اثر شیروانی بر روی گروه شمع GP2 بیشتر می‌باشد و برای گروه شمع ۲ تایی در فاصله 2.5dp از رأس شیروانی می‌توان از اثر آزادی سرشمع بر روی پاسخ گروه شمع صرف نظر کرد. تأثیر شیروانی بر روی گروه شمع ۳ تایی در شکل (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. در اینجا نیز نتایج مشابه گروه‌های شمع خطی متشکل از دو شمع در یک ردیف به دست آمده است. مقایسه بین گروه شمع خطی متشکل از ۲ و ۳ شمع نشان می‌دهد که اثر شیروانی در پاسخ گروه شمع خطی با افزایش تعداد شمع‌ها برای یک فاصله از لبه شیروانی، افزایش می‌یابد. همانند شمع ۲ تایی، در گروه شمع ۳ تایی نیز نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که اثر شیروانی بر روی گروه شمع GP2 بیشتر می‌باشد و در فاصله 2.5dp از رأس شیروانی می‌توان از اثر آزادی سرشمع بر روی پاسخ گروه شمع صرف نظر کرد.



شکل ۹: مقایسه رفتار گروه شمع ۲ تایی موازی رأس شیروانی با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع)

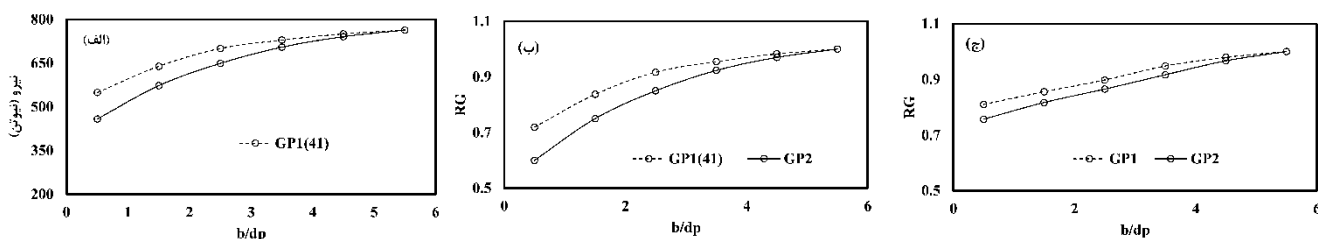
الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG



شکل ۱۰: مقایسه رفتار گروه شمع ۲ تایی عمود بر رأس شیروانی با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG

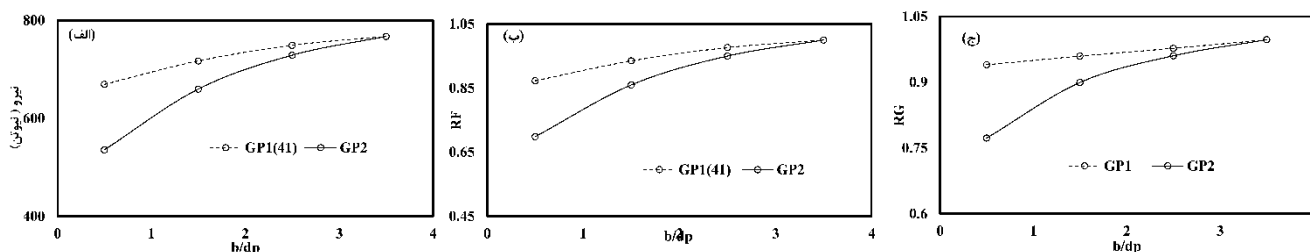
جدول (۵) مقایسه ظرفیت باربری و مقادیر RF, RG گروه‌های خطی ۲ و ۳ تایی واقع در رأس شیروانی

		ظرفیت باربری (نیوتن)	RF	RG
2×1(P)	GP1	۳۳۶	۰/۷۱	۰/۹
	GP2	۲۷۴	۰/۵۸	۰/۸۱
2×1(v)	GP1	۳۹۶	۰/۸۳	۰/۹۴
	GP2	۳۱۲	۰/۶۶	۰/۸۸
3×1(P)	GP1	۵۴۹	۰/۷۱	۰/۸۱
	GP2	۴۵۸	۰/۶۰	۰/۷۵
3×1(v)	GP1	۶۶۹	۰/۸۷	۰/۹۴
	GP2	۵۳۵	۰/۷۰	۰/۷۷



شکل ۱۱: مقایسه رفتار گروه شمع ۳ تایی موازی با رأس شیروانی دارای تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع)

الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG



شکل ۱۲: مقایسه رفتار گروه شمع ۳ تایی عمود بر رأس شیروانی با تغییر مکان جانبی و بدون تغییر مکان جانبی (فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع)

الف) تغییرات ظرفیت باربری (ب) تغییرات RF (ج) تغییرات RG

۲-۳-مدل‌سازی عددی

در این بخش آزمایش‌های مدل فیزیکی انجام‌شده توسط محمد علی نژاد و همکاران مدل گردیده و نیروهای افقی اعمال گردیده بر گروه شمع محاسبه گردید. با توجه به اینکه در هنگام بارگذاری گروه شمع مجاور شیروانی گروه شمع علاوه بر جابجایی قائم مقداری دچار جابجایی افقی نیز می‌گردید و ظرفیت باربری گروه شمع در نشست معادل ۱۰٪ قطر شمع محاسبه می‌گردید، در این بخش نیروی افقی اعمال‌شده بر گروه شمع در زمان نشست قائم گروه شمع برابر با ۱۰٪ قطر شمع، اندازه‌گیری گردیده و تأثیر پارامترهای مختلف موردبررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳-۱-اعتبارسنجی

در این بخش برخی از گروه‌های شمع موردبررسی در بخش قبل را در نرم‌افزار FLAC3D مدل گردید و ظرفیت باربری به‌دست‌آمده برای گروه‌های شمع مختلف با نتایج آزمایشگاهی را با یکدیگر مقایسه گردید.

۲-۳-۱-۱-جزئیات مدل‌سازی نرم‌افزاری

از مدل موهر-کولمب که یکی از متداول‌ترین مدل‌های مورداستفاده برای مدل کردن خاک‌های ماسه‌ای در روش‌های المان محدود و تفاضل محدود می‌باشد، جهت مدل کردن خاک ماسه‌ای خشک استفاده گردید. مهم‌ترین پارامترهای لازم جهت استفاده از مدل موهر-کولمب عبارت‌اند از زاویه اصطکاک خاک، ضریب حجمی (مدول بالک)، مدول برشی، دانسیته و چسبندگی خاک است. مقادیر پارامترهای مورداستفاده در این مدل در جدول (۶) ارائه شده است. از آزمایش برش مستقیم جهت تعیین زاویه اصطکاک خاک استفاده گردید و جهت تعیین مدول بالک و مدول برشی، ابتدا مدول الایسیته خاک به روش نونا با استفاده از نتایج برش مستقیم تعیین گردید و سپس از رابطه مربوطه مقادیر مدول برشی و مدول بالک محاسبه شد [۴۳]. ضریب پواسن خاک نیز از روش کلمنت محاسبه گردید [۴۴].

جدول (۶) پارامترهای ورودی خاک در مدل‌سازی عددی

ϕ (°)	c	ν	E	K	G
30	.	0.29	13.2MPa	10.43MPa	5.12MPa

با توجه به حساسیت مدل به ابعاد زون‌های شبکه مش بندی شده، از آنالیز حساسیت جهت تعیین ابعاد زون‌های اطراف گروه شمع از آنالیز حساسیت استفاده گردید.

در نرم‌افزار FLAC3D شمع توسط مشخصات هندسی و ویژگی‌های مواد و خصوصیات کوپل فنر تعریف می‌گردد. المان‌های شمع به‌وسیله کوپل فنرهای برشی و نرمال با اثر متقابل تعریف شده است. کوپل فنرها غیرخطی بوده و به‌وسیله فنرهای لغزنده نیرو و لنگر را به شبکه منتقل می‌کنند. رفتار برشی سطح مشترک خاک و شمع ماهیت اصطکاک و چسبندگی دارد و فنرهای کوپل برشی مربوط به هر المان شمع به گره‌های المان متصل می‌گردد. رفتار نرمال سطح مشترک خاک و شمع نیز ماهیت اصطکاک و برشی دارد و توسط سیستم فنر-لغزنده در نقاط گره‌ای در امتداد محور شمع مدل می‌گردد.

با توجه به توضیحات داده‌شده شمع‌ها به‌وسیله المان سازه‌ای شمع با رفتار الاستیک خطی مدل گردیدند. مشخصات المان‌های شمع و مشخصات سطح مشترک خاک و شمع در جدول شماره ۷ ارائه شده است.

جدول (۷) مشخصات هندسی و ویژگی‌های شمع‌ها

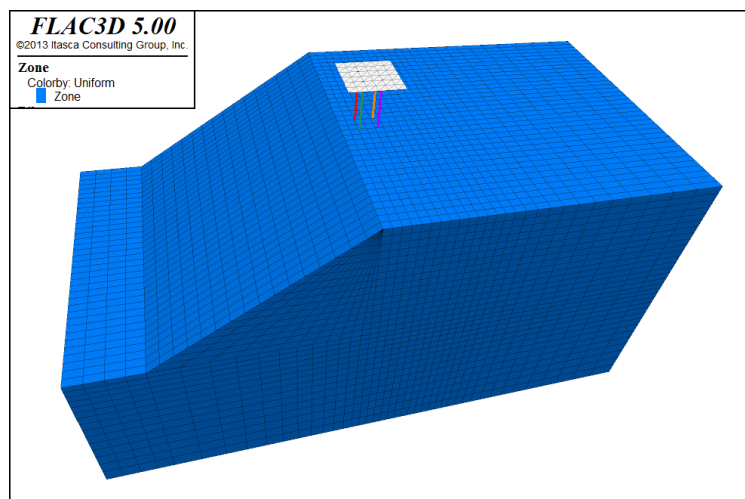
$J(m^4)$	$I(m^4)$	$A(m^2)$	P(m)	E(GPa)	$k_s(N/m/m)$	$k_n(N/m/m)$	ν	ϕ_s	ϕ_n	c_s	c_n
$1.02e^{-8}$	$5.1e^{-9}$	$2.5e^{-5}$	$2.5e^{-5}$	200	$8.8e^7$	$2.64e^7$	0.3	24	24	0	0

جدول (۸) مشخصات المان پوسته‌ای

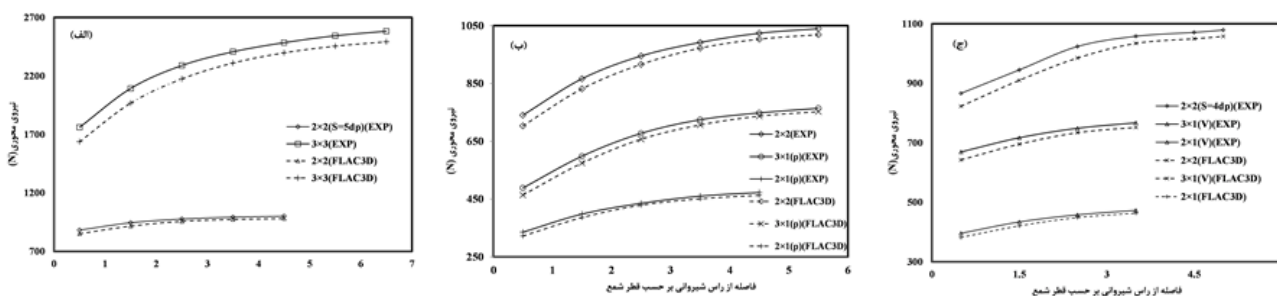
E(GPa)	ν	t (m)
۲۰۰	۰/۳	۰/۰۲

مهم‌ترین پارامترهای لازم جهت مدل کردن رفتار برشی و نرمال سطح مشترک خاک و شمع عبارت است از (۱) سختی برشی و نرمال (k_s, k_n) ، چسبندگی در جهت برشی و نرمال (c_s, c_n) ، زاویه اصطکاک در جهت برشی و نرمال (ϕ_s, ϕ_n) . از روش دبایسی به دلیل همخوانی خوب با نتایج عملی، جهت تعیین پارامترهای فصل مشترک خاک و شمع استفاده گردید [۳۱]. مشخصات هندسی و ویژگی‌های شمع‌ها در جدول (۷) ارائه شده است. سرشمع گروه شمع به وسیله المان سازه‌ای پوسته ایزوتروپیک با رفتار الاستیک خطی تعریف گردید. مشخصات المان پوسته‌ای در جدول (۸) ارائه شده است. المان پوسته به وسیله اتصال گیردار به شمع‌ها متصل گردید.

نمونه‌ای از مدل ساخته شده در نرم‌افزار در شکل (۱۳) ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی و مدل فیزیکی در شکل ۱۴ ارائه شده است. از نتایج حاصله می‌توان مشاهده نمود ظرفیت باربری به دست آمده از نرم‌افزار FLAC3D حدود ۲٪ الی ۷٪ با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مدل آزمایشگاهی تفاوت دارد و این تفاوت در رأس شیروانی حداکثر است و با افزایش فاصله از رأس شیروانی این تفاوت کمتر می‌گردد.



شکل ۱۳: گروه شمع مدل شده در نرم‌افزار FLAC3D



شکل ۱۴: مقایسه نتایج ظرفیت باربری محوری حاصل از نرم افزار FLAC3D و نتایج فیزیکی محمد علی نژاد و همکاران [۴۱]

الف) گروه شمع ۹ تایی و $2 \times 2(S=5dp)$ (ب) گروه شمع $2 \times 2(S=3dp)$ ، $2 \times 1(p)$ و $3 \times 1(p)$ (ج) گروه شمع $2 \times 2(S=4dp)$ ، $2 \times 1(v)$ و $3 \times 1(v)$

۲-۳-۲- نیروی جانبی ایجادشده در گروه شمع

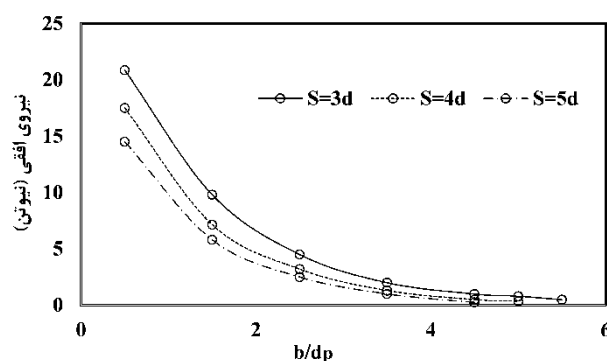
در این بخش نیروی افقی اعمال شده بر گروه شمع هنگامی که نشست قائم گروه شمع معادل ۱۰٪ قطر شمع می باشد، اندازه گیری گردید و تأثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. در این بخش از ضریب بدون بعد RV که عبارت است از نسبت نیروی افقی به نیروی محوری گروه شمع، استفاده گردید.

۲-۳-۲-۱- اثر فاصله شمعها

در این بخش به بررسی اثر فاصله شمعها بر روی نیروی جانبی اعمال شده بر روی گروه شمع در نشست قائمی معادل ۱۰٪ قطر شمع پرداخت می شود. نتایج حاصل در شکل ۱۵ ارائه شده است. از نتایج مشخص است که بیشترین نیروی جانبی اعمال شده بر گروه شمع در رأس شیروانی می باشد و با افزایش فواصل شمعها از یکدیگر به دلیل کمتر شدن جابجایی افقی گروه شمع، نیروی جانبی اعمال شده کاهش می یابد. همچنین بر اساس نتایج مشخص است که نیرو جانبی اعمال شده به گروه شمع با افزایش فاصله از رأس شیروانی، کاهش می یابد. مقایسه نیرویهای محوری و افقی اعمال شده بر شمعها در نشست معادل ۱۰٪ قطر شمع در جدول (۹) ارائه شده است همان طور که مشاهده می گردد نیروی افقی اعمال شده بر گروه شمع بسیار کمتر از نیروی محوری شمعها می باشد.

جدول ۹: مقایسه نیروهای محوری و افقی اعمال شده بر گروه شمعها 2×2 واقع در رأس شیروانی در نشست قائم معادل ۱۰٪ قطر شمع

	$2 \times 2(S=3dp)$	$2 \times 2(S=4dp)$	$2 \times 2(S=5dp)$
نیروی محوری (نیوتن)	۷۱۷/۶	۸۶۷	۸۸۰
نیروی افقی (نیوتن)	۲۰/۸۶	۱۷/۵	۱۴/۷
RV	۰/۰۲۹	۰/۰۲	۰/۰۱۷



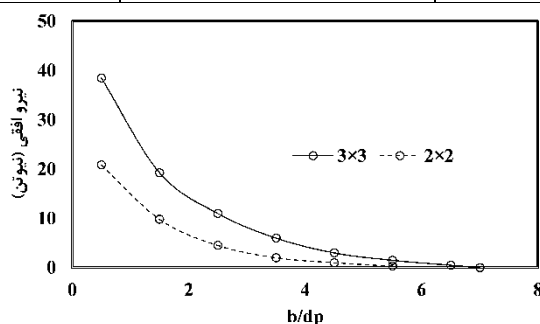
شکل ۱۵: تغییرات نیروی جانبی اعمال شده بر گروه شمع ۴ تایی در نشست قائم ۱۰٪ قطر شمع در مقابل فاصله از رأس شیروانی

۲-۲-۳-۲- اثر تعداد شمع

در این بخش به بررسی نیروی جانبی اعمال شده به گروه شمع ۳×۳ و مقایسه آن با گروه شمع ۲×۲ پرداخته می شود. همان طور که مشاهده می نماید نیروی جانبی اعمال شده به گروه شمع با افزایش فاصله از رأس شیروانی، کاهش می یابد. در فاصله 4.5dp از رأس شیروانی می توان از اثر تعداد شمع بر روی نیروی جانبی شمع صرف نظر کرد. مقایسه نیروی محوری و افقی اعمال شده بر روی گروه های شمع ۹ و ۴ تایی در جدول (۱۰) ارائه شده است. از نتایج حاصله مشخص است که نسبت نیروی افقی به نیروی محوری با افزایش تعداد شمع کاهش می یابد.

جدول ۱۰: مقایسه نیروهای محوری و افقی اعمال شده بر گروه شمعها ۲×۲ واقع در رأس شیروانی در نشست قائم معادل ۱۰٪ قطر شمع

	2×2(S=3dp)	3×3(S=3dp)
نیروی محوری (نیوتن)	۷۱۷/۶	۱۷۶۰/۷
نیروی افقی (نیوتن)	۲۰/۹	۳۸/۵
RV	۰/۰۲۹	۰/۰۲۲



شکل ۱۶: مقایسه تغییرات نیروی جانبی اعمال شده بر گروه شمع ۴ و ۹ تایی در نشست قائم ۱۰٪ قطر شمع در مقابل فاصله از رأس شیروانی (فاصله شمعها ۳ برابر قطر شمع)

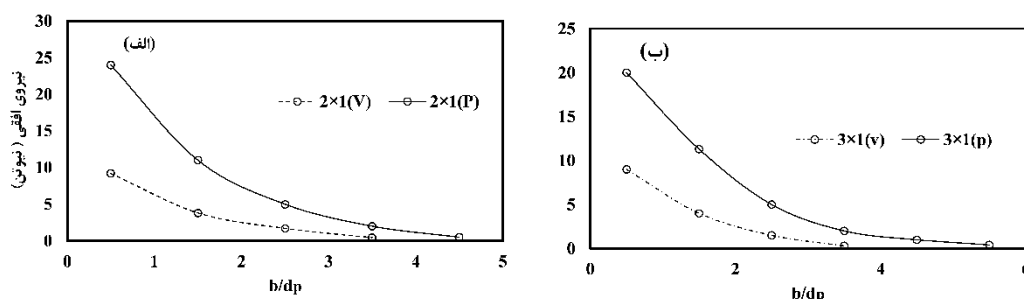
۲-۲-۳-۲- اثر نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسب به رأس شیروانی

در این بخش به بررسی اثر نحوه قرارگیری گروه های شمع ۲×۱ و ۳×۱ نسبت به رأس شیروانی بر روی نیروی جانبی اعمال شده بر گروه شمع در نشست می شود. در آن ظرفیت باربری محوری گروه شمع اندازه گیری می گردد، پرداخته می شود. نتایج در شکل ۱۷ ارائه شده است. در گروه شمع ۳×۱ نحوه قرارگیری گروه شمع تأثیر زیادی بر روی نیروی جانبی دارد. همان طور که مشاهده می گردد به گروه شمع ۳

تایی عمود بر شیروانی واقع در رأس شیروانی، نیروی جانبی اعمال شده کمتر می‌باشد. در گروه شمع 2×1 نیز همانند گروه شمع 3×1 در صورتیکه گروه شمع عمود بر رأس شیروانی قرار بگیرد به دلیل کاهش جابجایی افقی ایجاد شده نیروی جانبی اعمالی به مراتب کمتر می‌باشد و با افزایش فاصله از رأس شیروانی نیروی‌های جانبی کاهش می‌یابند. مقایسه نیروهای افقی و محوری اعمال شده بر گروه‌های شمع خطی ۲ و ۳ تایی در نشت معادل ۱۰ درصد قطر شمع در جدول (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور نتایج ارائه شده مشخص است نسبت نیروی افقی به نیروی محوری با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع خطی، کاهش می‌یابد.

جدول ۱۱: مقایسه نیروهای محوری و افقی اعمال شده بر گروه‌های شمع خطی ۲ و ۳ تایی واقع در رأس شیروانی در نشست قائم معادل ۱۰٪ قطر شمع

	$2 \times 1(P)$	$2 \times 1(V)$	$3 \times 1(P)$	$3 \times 1(V)$
نیروی محوری (نیوتن)	۳۳۶	۳۹۶	۵۴۹	۶۶۹
نیروی افقی (نیوتن)	۲۴	۹/۲	۲۰	۹
RV	۰/۰۷۱	۰/۰۲۳	۰/۰۳۶	۰/۰۱۳



شکل ۱۷: نیروی جانبی اعمال شده بر گروه شمع در مقابل فاصله از رأس شیروانی الف) گروه شمع ۲ تایی ب) گروه شمع ۳ تایی

۳- نتیجه گیری

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

- ۱- اثر شیروانی بر روی گروه شمع بدون حرکت جانبی بیشتر بوده و ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع فاقد حرکت جانبی نسبت به گروه شمع دارای حرکت جانبی در فواصل یکسان از رأس شیروانی کمتر می‌باشد.
- ۲- حضور شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری قائم و ضریب راندمان گروه شمع شده با افزایش فاصله از رأس شیروانی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع افزایش یافته و به مقدار حالت مسطح نزدیک می‌گردد.
- ۳- با افزایش فاصله شمع‌ها در گروه شمع اثر کاهشی شیروانی بر روی ضریب راندمان و ظرفیت باربری هر دو گروه شمع کاهش می‌یابد. رفتار گروه شمع مجاور شیروانی بدون تغییر مکان جانبی با نتایج تحقیق محمد علی نژاد و همکاران که بر روی گروه شمع مجاور شیروانی با آزاد بودن جابجایی افقی انجام گرفت، همخوانی دارد.
- ۴- نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی در مقدار ضریب راندمان و ظرفیت باربری گروه شمع تأثیرگذار است. نتایج حاصله نشان می‌دهد رفتار گروه شمع خطی همانند نتایج تحقیق خانی و ساوانت در خصوص رفتار گروه شمع تحت بار جانبی، به نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد.

- ۵- افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع باعث کاهش بیشتر ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی می‌گردد.
- ۶- نیروی جانبی اعمال شده بر روی گروه شمع در نشست قائم معادل ۱۰٪ قطر شمع، نسبت به نیروی محوری بسیار کمتر می‌باشد.
- ۷- نیروی جانبی اعمال شده به گروه شمع به فاصله شمع‌ها بستگی دارد و با افزایش فاصله شمع‌ها نیروی جانبی اعمال شده کمتر می‌گردد.
- ۸- افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع باعث افزایش نیروی جانبی اعمال شده بر گروه شمع می‌گردد. ولی نسبت نیروی افقی به نیروی محوری کاهش می‌یابد.
- ۹- در گروه شمع خطی با افزایش تعداد شمع‌ها نسبت نیروی افقی به نیروی محوری در نشست قائم معادل ۱۰ درصد قطر شمع کاهش می‌یابد.

۴- منابع

- [1] Viladkar, M., Bhargava, P. Godbole, P. (2006). Static soil-structure interaction response of hyperbolic cooling towers to symmetrical wind loads. *Engineering structures*. 28(9): p. 1236-1251.
- [2] Vu, A.T. Matsumoto, T. Kobayashi, S. (2018). Model load tests on battered pile foundations and finite-element analysis. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. [online] 8(1): p. 33-54. Available at: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/jphmg.16.00010>
- [3] Xiang, B., Zhang, M.L. Zhou, L. (2015). Field lateral load tests on slope-stabilization grouted pipe pile groups. *Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*. [online] 141(4). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001220>
- [4] Zhang, L., MacVay, M.C., Han, S.J. (2002). Effects of dead loads on the lateral response of battered pile groups. *Canadian Geotechnical Journal*. 39(3): p. 561-575.
- [5] Zhang, S., Wei, Y. Chen, T. Zhang X. (2020). Centrifuge modeling of batter pile foundations in laterally spreading soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. [online] 135. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726119309935>
- [6] Zhou, Y. and Tokimatsu, K. (2018). Numerical evaluation of pile group effect of a composite group. *Soils and foundations*. [online] 58(4). P. 1059-1067. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080618300799?via%3Dihub>
- [7] Rollins, K.M. Sparks, A.E. and K.T. Peterson. (2000). Lateral load capacity and passive resistance of full-scale pile group and cap. *Transportation research record*. 1736(1). p. 24-32.
- [8] Sales, M.M., Salgado, R. Choi, Y. (2017). Load-settlement behaviour of model pile groups in sand under vertical load. *Journal of Civil Engineering and Management*. 23(8): p. 1148-1163.
- [9] Shafaghhat, A. Khabbaz, H. and Fatahi, B. (2022). Axial and Lateral Efficiency of Tapered Pile Groups in Sand Using Mathematical and Three-Dimensional Numerical Analyses. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, [online] 36(1). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0001680>
- [10] Rollins, K.M. and Sparks, A.E. (2002). Lateral resistance of full-scale pile cap with gravel backfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 128(9): p. 711-723.
- [11] Peng, W., Zhao M. ZHAO, H. (2020). A two-pile foundation model in sloping ground by finite beam element method. *Computers and Geotechnics*. [online] 122.
- [12] Reul, O. Randolph, M. (2003). Piled rafts in over consolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses. *Geotechnique*. 53(3): p. 301-315.
- [13] Rollins, K.M., Lane, D. Gerber, T.M. (2005). Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131(1): p. 115-125.
- [14] Ong, D. Ong, D.E.L. Cho, Y.K. (2015). Severe damage of a pile group due to slope failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [online] 141(5). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001294>
- [15] Noonan, D. and Nixon, J. (1972). The determination of Young's modulus from the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*. 9(4): p. 504-507.

- [16] Han, F. Prezzi, M, Salgado, R. (2021). Group Efficiencies for Design of Non-Displacement Pile Groups in Sand, in *IFCEE 20*. p. 303-313.
- [17] Al-Omari, R.R., Fattah, M.Y. and Kallawi, A.M. (2019). Laboratory study on load carrying capacity of pile group in unsaturated clay. *Arabian Journal for Science and Engineering*. [online] 44(5). Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13369-018-3483-9>.
- [18] Al-Khazaali, M. Vanapalli, S.K. (2019). Experimental investigation of single model pile and pile group behavior in saturated and unsaturated sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [online] 145(12). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0002176>.
- [19] Padmavathi, M. Madhav, M. R. (2018) Response of Four Pile Group Subjected to Eccentric Loading. in *International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"*. Springer.
- [20] Koteswara, V.R. Padavala, H. Chennarapu, H. (2020). Experimental and numerical investigation of pile group with and without building frame subjected to axial load. *Indian Geotechnical Journal*. 50(3): p. 473-484.
- [21] Cheng, Z. Sritharan, S. Ashlock, J.C. (2021). Behavior of a Pile Group Supporting a Precast Pile Cap under Combined Vertical and Lateral Loads. *Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*. [online] 147(9). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0002592>.
- [22] Liu, S. Zhang, Q. q. and Feng, R. (2021). Model Test Study on Bearing Capacity of Nonuniformly Arranged Pile Groups. *International Journal of Geomechanics*. [online] 21(10). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0002181>.
- [23] Jiang, C., Liu, L. and He, J. (2020), Effect of the proximity of slope and pile shape on lateral capacity of piles in clay slopes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, [online] p. 1-15. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2020.1858452?journalCode=tece20>
- [24] Liu, P., et al. (2021). A method for predicting lateral deflection of large-diameter monopile near clay slope based on soil-pile interaction. *Computers and Geotechnics*, [online] 135. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X21001841>
- [25] Kranthikumar, A. Jakka, R.S. (2021). Effect of Edge Distance on Lateral Capacity of Piles in Cohesionless Soil Slopes. *Indian Geotechnical Journal*, [online] 50(6): p. 925-934. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2020.1858452?journalCode=tece20>
- [26] Khati, B.S. Sawant, V. (2021). Experimental study of laterally loaded pile group in square arrangement near sloping ground. *International Journal of Geomechanics*. [online] 21(2). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0001911>
- [27] Liu, P. Ahmari, S. (2020). Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles at the crest of clay slopes. *Computers and Geotechnics*. [online] 126. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nag.1094>
- [28] Nimityongskul, N. Ashford, S.A. Ramayajhi, D. (2018). Full-scale tests on effects of slope on lateral capacity of piles installed in cohesive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [online] 144(1): p. 04017103. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001805>
- [29] Hazari, S. Roy, S. and Ghosh, S. (2021). Stability Analysis of Layered Soil Slope Using Truncated Pile with Numerical Solution. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. [online]. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40515-021-00174-7>.
- [30] Lei, H. Liu, Xu. (2021). Stability analysis of slope reinforced by double-row stabilizing piles with different locations. *Natural Hazards*. [online] 106(1). Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04446-2>.
- [31] Sojoudi, Y. Sharafim, H. (2021). Study of soil deformation pattern in earth slope stabilised with pile. *European journal of environmental and civil engineering*. [online] 25(2) p 205-225. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2018.1521751?journalCode=tece20>
- [32] Xu, X., et al. (2021). Stability analysis of rainfall-triggered toe-cut slopes and effectiveness evaluation of pile-anchor structures. *Journal of Earth Science*. 32(5): p. 1104-1112.
- [33] Mazaheri, A.R. Guo, Z. and Huang, Yu. (2021). Limit Analysis, Numerical, and Physical Modeling of Pile Stabilized Slopes using Image Processing Analyses. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. [online] 45(2): p. 891-900. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12583-021-1474-3>
- [34] Ilyas, T. Budi S.S, Chow L,Y. (2004). Centrifuge model study of laterally loaded pile groups in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130(3): p. 274-283.
- [35] Kavitha, P. Beena, K. Narayanan, K. (2016) A review on soil–structure interaction analysis of laterally loaded piles. *Innovative Infrastructure Solutions*. 1(1): p. 1-15.
- [36] McCabe, B. and Lehane, B. (2016). Behavior of axially loaded pile groups driven in clayey silt. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 132(3): p. 401-410.
- [37] Mezazigh, S. and Levacher, D. (1998). Laterally loaded piles in sand: slope effect on py reaction curves. *Canadian Geotechnical Journal*. 35(3): p. 433-441.

- [38] Motallebiyan, A., Bayat, M, and Nadi, B. (2020). Analyzing the Effects of Soil-Structure Interactions on the Static Response of Onshore Wind Turbine Foundations Using Finite Element Method. *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 53(1): p. 189-205.
- [39] Shakeel M, NG, C.W (2021), Performance of existing piled raft and pile group due to adjacent multipropped excavation: 3D centrifuge and numerical modeling. *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering*. [online] 147(4.) Available at: <https://repository.ust.hk/ir/Record/1783.1-107799>
- [40] Shakeel M, Ng CWW (2018) Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay. *Comput Geotech* 96:55–72. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.010>
- [41] Mohammad Ali nejad, R. Bayat mesam, Nadi Bahram, Pakbaz mohammad siroos. (2021). Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading. *Arabian Journal of Geosciences*. [online] 14(23). Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-021-09123-7>
- [42] Jesmani, M.; Kasrania, A.; Kamalzare, M. (2018). Finite Element Modelling of Undrained Vertical Bearing Capacity of Piles Adjacent to Different Types of Clayey Slopes. *Int. J. Geotech. Eng.*, , [online] 12 (2). p146–154. Available at: <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1254398>.
- [43] Noonan, D. K. J.; Nixon, J. F. (1972). The Determination of Young's Modulus from the Direct Shear Test. *Can. Geotech. J.* 9 (4), 504–507.
- [44] Clement, L.H.; Polo, Jesus. (1988). Pile Group Settlement Using Independent Shaft and Point Load., *Can. Geotech. j.* 114 (4)