Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.98-109

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Laboratory Investigation of the Behavior of Helical Piles under Monotonic Loading at Different Loading Speeds

Seyed Sajad Hosseini[1], Mohsen Keramati*[1] and Reza Hoseinpour[2]

[1]Faculty of Civil Engineering of Shahrood University, Shahrood, Iran.
[2]Faculty of Civil Engineering of Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
* coreesponding author: (Keramati@shahroodut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Recived: 3 February 2024

Revised: 4 May 2024

Accepted:5 May 2024

Keywords:

Helical Pile,
Physical Modeling,
Monotonic Test,
Loading Speed,
Ultimate Capacity.

Abstract

Today, one of the primary challenges faced by geotechnical engineers in dealing with problematic soils is to choose a suitable improvement method that, in addition to strengthening the soil, does not cause harmful damage to the environment. Helical piles are a new method that has become very popular in recent years due to the unique features of this type of pile, the most important of which is that it is environmentally friendly. Due to their unique shape and section (having one or more helices along the shaft of the pile), Helical piles have a higher load capacity than usual concrete piles. Among the advantages of using this type of pile, it can be a short installation time with minimal noise and vibration (no need to vibrate for installation), is Easy to implement due to limited access, lightweight, reduction of disturbance soil during installation, and poses less environmental risks and is compatible with nature.

According to past studies, it has been found that the current knowledge of the performance of this type of pile and the methods of predicting and determining the bearing capacity currently need to be improved, and this shows the necessity of researching the behavior of these piles.

This research, to predict the tensile behavior of Helical piles under different loading speeds and also to investigate the addition of a second helix to a single-helix Helical pile, using the 1g physical modeling device, in two cases of high (95%) and low (45%) relative densities, has been studied.

The results obtained in this study show that the effect of relative soil compaction on improving the bearing capacity of the soil was more significant than the loading speed and the number of helices. According to the results of the monotonic tests, the final bearing capacity decreased by about 56% with increasing loading speed; on the other hand, by increasing the relative density and increasing the number of helices, the final load capacity increased, respectively by about 468% and 54%.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:
Hosseini, S., Keramati, M. and Hoseinipour, R. 2025. Laboratory Investigation of the Behavior of Helical Piles under Monotonic Loading at Different Loading Speeds, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.98-109.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.64018.3300

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌های پیچشی تحت بارگذاری مونوتونیک در سرعت‌های مختلف بارگذاری

سیدسجاد حسینی [۱]، محسن کرامتی [*۱] و رضا حسین‌پور [۲]

[۱] دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

[۲] دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (Keramati@shahroodut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

واژگان کلیدی:

شمع پیچشی،

مدل‌سازی فیزیکی،

آزمایش مونونیک،

سرعت بارگذاری،

ظرفیت باربری نهایی.

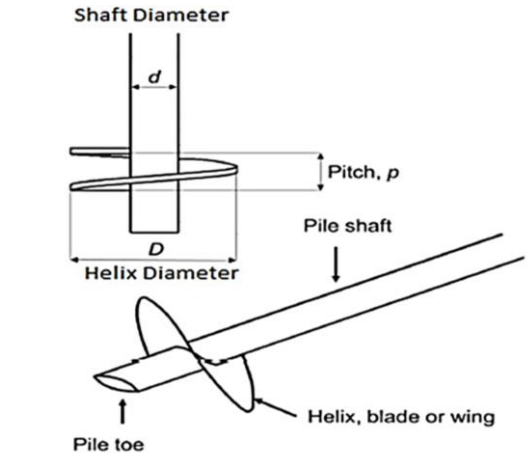
چکیده

استفاده از شمع‌های پیچشی، یکی از روش‌های نوین بهسازی است، که به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها، که مهم‌ترینش دوستدار محیط‌زیست‌بودن است، در سال‌های اخیر رواج بسیاری پیدا کرده است. از آنجایی که در هنگام واردشدن نیروهای فشاری، شافت شمع نقش اساسی و در هنگام واردشدن نیروهای کششی، بال‌ها (پره‌ها) نقش اساسی در تحمل نیروهای مذکور را ایفا می‌کنند، بنابراین پیش‌بینی رفتار شمع‌ها تحت بارگذاری کششی پیچیده‌تر از بارگذاری فشاری است. در پژوهش حاضر، به‌منظور پیش‌بینی رفتار کششی شمع‌های پیچشی تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و همچنین بررسی افزودن پره‌ی دوم به شمع پیچشی تک‌پره، با استفاده از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی g ۱، در دو تراکم نسبی بالا (۹۵٪) و پایین (۴۵٪) مطالعه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که در آزمایش‌های مونوتونیک، ظرفیت باربری نهایی با افزایش سرعت بارگذاری تا حدود ۵۶٪ کاهش یافته است؛ از طرف دیگر، با افزایش تراکم نسبی و افزایش تعداد پره‌ها، ظرفیت باربری نهایی به ترتیب تا حدود ۴۶۸ و ۵۴ درصد افزایش پیدا کرده است.

۱. مقدمه

بیشتر روش‌های بهسازی پایدار و مقاوم‌سازی خاک‌های مسئله‌دار (اعم از: سُست، واگرا، روانگرا، رمبنده، و خاک ماسه‌ای ناپایدار، و ...) پر هزینه، مدت‌دار، اجرای سخت و از همه مهم‌تر در زمینه‌ی زیست‌محیطی خسارت‌های فراوانی به محیط‌زیست وارد می‌کنند. بنابراین، امروزه مهندسان ژئوتکنیک به دنبال روش‌های نوین بهسازی و دوستدار محیط‌زیست هستند؛ که یکی از آن‌ها، مسلح‌سازی خاک‌های مسئله‌دار با کمک شمع‌های پیچشی[۱] است. شمع‌های پیچشی، نوعی از سیستم فونداسیون عمیق هستند، که در امتداد شافت شمع یک یا چند پره دارند (در شکل ۱ شماتیک اجزاء اصلی شمع‌های پیچشی مشاهده می‌شود) و انواع بارگذاری‌ها را به لایه‌های زیرین و عمیق‌تر منتقل می‌کنند.

امروزه شمع‌های پیچشی، همان‌طور که پرکو[۲] (۲۰۰۹)،[۲] و پک[۳] (۲۰۰۹)،[۳] نشان داده‌اند، به‌طور گسترده‌ای توسط بیشتر مهندس‌ها شناخته شده است و می‌توانند به‌عنوان بخشی اساسی از فونداسیون‌های عمیق استفاده شوند. کوریان و شاه[۴] (۲۰۰۹)، گزارش داده‌اند که اخیراً شمع‌های پیچشی به‌عنوان



شکل ۱. شماتیک اجزاء اصلی شمع پیچشی.[۱]

فونداسیون‌های عمیق برای تحمل نیروهای فشاری و آپلیفت[۵] (بالابرنده) تا ۳۰۰۰ کیلونیوتن استفاده می‌شوند. بنابراین، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان فونداسیونی عمیق در سازه‌های معمول استفاده کرد.[۴] همچنین به گفته‌ی

[1] Helical Pile
[2] Perko
[3] Pack
[4] Kurian & Shah
[5] Uplift

استناد به این مقاله:

حسینی، سید سجاد، کرامتی، محسن، و حسین پور، رضا، ۱۴۰۴. بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌های پیچشی تحت بارگذاری مونوتونیک در سرعت‌های مختلف بارگذاری. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۹۸-۱۰۹. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64018.3300

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

سیلوا[6] (۲۰۱۴)، تسوها[7] و همکاران (۲۰۱۳)، پرز[8] و همکاران (۲۰۱۸)، شارما[9] و همکاران (۲۰۱۷) در سال‌های اخیر، استفاده از شمع‌های پیچشی به‌عنوان فونداسیون‌های عمیق در کشورهایی مانند ایالات متحده و برزیل فراگیر شده است.[۵-۸] شمع‌های پیچشی عمدتاً برای مقاومت در برابر نیروهای کششی ایجادشده توسط گشتاورهای واژگونی و آپلیفت، در سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند؛[۹] بنابراین، آن‌ها به عنوان یک جایگزین بالقوه برای شمع‌های کوبیده‌شده‌ی معمولی مانند شمع‌های دریایی پیشنهاد شده‌اند، و به‌دلیل تأثیر لنگر پیچشی، ظرفیت باربری آپلیفت زیادی را فراهم می‌کنند.[۱۰-۱۳] استفاده از شمع‌های پیچشی باعث افزایش ظرفیت باربری و ظرفیت بیرون‌کشیدگی نیز می‌شود.[۲]

شمع‌های پیچشی از شمع‌های نوینی هستند که در مقایسه با انواع شمع‌ها و شمع‌های سنتی، نیاز به زمان و هزینه‌ی کمتر و تجهیزات و نیروی کمتری دارند؛ لذا استفاده از آن‌ها در سال‌های اخیر رواج زیادی پیدا کرده و جزء اقتصادی‌ترین روش‌هاست. از دیگر مزایای شمع‌های پیچشی، برخلاف انواع فونداسیون‌های دیگر، قابلیت اجرا در هر نوع شرایطی از آب و هواست؛ مانند: اجرایی‌بودن در مناطق ساحلی و دریایی که امروزه رواج بیشتری دارد. از آنجا که برای شمع پیچشی نیازی به بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن نیست، سرعت نصب به مراتب بالا می‌رود. برای مثال، زمان لازم برای نصب یک شمع ۶ متری کمتر از ۱۰ دقیقه است و همچنین بلافاصله بعد از نصب شمع، می‌توان سازه را نصب و بارگذاری کرد.[۱۴]

دی برناردو[10] (۲۰۱۲)، مطابق با انجام یک برنامه‌ی آزمایش میدانی در خاک‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ دریافت که شمع‌های پیچشی نه فقط در رسوب‌های ریزدانه، بلکه در همه‌ی انواع خاک‌ها حتی در مناطق یخ‌زده و سایت‌های سنگی قابل استفاده هستند.[۱۵]

بنابراین، فونداسیون شمع‌های پیچشی در دامنه‌ی وسیعی از انواع خاک‌ها، اعم از زمین‌های شنی، سیلابی، باتلاقی، جلگه‌ای، و مناطق دارای یخبندان قابل اجرا هستند. در مناطقی که به راحتی قابل دسترسی نیستند، مانند کوهستان‌ها، استفاده از شمع‌های پیچشی توصیه شده است. برخی دیگر از مزایای اصلی استفاده از شمع‌های پیچشی برای مهندسان ژئوتکنیک، عبارت‌اند از: زمان کوتاه نصب با کمینه‌ی سر و صدا و ارتعاش (برای نصب نیازی به ویبره‌کردن نیست)، مناسب‌بودن در خاک‌های سخت، سهولت نصب با توجه به دسترسی محدود، وزن سبک، کاهش خطرهای حفاری (بی‌نیازی به حفاری و انتقال خاک از محل)، کاهش دست‌خوردگی خاک هنگام نصب، کنترل کیفیت محل با اندازه‌گیری گشتاور نصب، خطرهای کمتر محیط‌زیستی و سازگار با طبیعت (امکان استفاده‌ی مجدد و به مراتب کاهش قابل توجه هزینه)؛ در نتیجه، برای مزایای اصلی در اندازه‌ی معمول شمع‌های پیچشی، با توجه به کارایی و هزینه، انتظار می‌رود که قابلیت استفاده از آن‌ها افزایش یابد.[۱۴]

به‌طورکلی، علی‌رغم مزایای زیاد شمع‌های پیچشی، مرور بر ادبیات و سابقه‌ی موضوع (که در بخش بعد کاملاً بررسی شده است)، فقط بینش محدودی در مورد رفتار آن‌ها در مقایسه با انواع دیگر شمع‌ها ارائه می‌دهد. همان‌طور که توسط مرفیلد[11] (۲۰۱۱)، این موضوع بیان شده است،[۱۶] درک فعلی از شمع‌های پیچشی هنوز رضایت‌بخش نیست، و روش‌های طراحی موجود برای پیش‌بینی ظرفیت باربری آپلیفت ناکافی هستند، و مدل‌های ارزیابی گشتاور به‌طورکلی معتبر نیستند؛ زیرا به ویژگی‌های خاک (که در طول نصب تغییر می‌کنند) و خواص هندسی شمع بستگی دارند. بنابراین، نیاز به مطالعات بیشتری در رابطه با شمع‌های پیچشی وجود دارد.

از نوآوری پژوهش حاضر می‌توان به روش انجام آزمایش‌های مونوتونیک که به‌صورت g ۱ با کمک جعبه‌ی بزرگ‌مقیاس موجود در مجموعه‌ی آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود قرار گرفته است، اشاره کرد. همچنین، آزمایش‌ها در دو تراکم نسبی سُست و متراکم و در سرعت‌های مختلف بارگذاری انجام شده‌اند، که کاملاً تأثیر پارامترهای مذکور در ظرفیت باربری نهایی بررسی شده است و امید است در آینده بتوان از نتایج پژوهش حاضر در طراحی‌ها استفاده و به کاربرد بیشتر آن‌ها در کشورمان اضافه کرد.

۱.۱. پیشینه‌ی پژوهش

به‌طورکلی برای مطالعه‌ی رفتار پی‌های عمیق، که شمع‌های پیچشی نیز نوعی پی عمیق هستند، از ۴ روش: تحلیلی، عددی، آزمایش‌های میدانی، و روش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی، به‌دلیل پیچیدگی و غیرقابل پیش‌بینی‌بودن دقیق رفتار مصالح ژئوتکنیکی، نیاز به ساده‌سازی و فرضیات زیادی دارد، که در جواب‌ها تأثیرگذار است. از طرفی، آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس و میدانی، اگرچه جواب‌های مناسب و واقعی‌تری ارائه می‌دهند، ولی به‌دلیل زمان‌بربودن و هزینه‌ی بالا گاهی ممکن نیست. آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، نمونه‌ای از آزمایش واقعی است، که می‌توان ویژگی‌های مدل واقعی را مطالعه کرد. از ویژگی‌های اصلی مدل‌های فیزیکی، هزینه‌ی پایین، زمان کوتاه انجام آزمایش‌ها، و کنترل بیشتر و دقیق‌تر بر روی پارامترهای موردمطالعه است.[۱۷] در ادامه، مهم‌ترین مطالعات پیشین بررسی شده‌اند.

احمد و همکاران (۲۰۲۲)، به مطالعه‌ی عملکرد شمع مارپیچی مخروطی تعبیه‌شده در ماسه‌ی سُست تحت بارگذاری استاتیکی و سیکلیک آپلیفت، با استفاده از تحلیل المان محدود ۳ بُعدی و نرم‌افزار Plaxis ۳D پرداخته و دریافته‌اند که تحت تأثیر بارگذاری استاتیکی آپلیفت، هر چه تعداد مارپیچ‌ها بیشتر باشد، ظرفیت آپلیفت شمع پیچشی با افزایش تعداد مارپیچ‌ها افزایش می‌یابد، و به تبع آن، جابجایی در خاک کمتر می‌شود. همچنین تأثیر افزایش تعداد مارپیچ‌ها در یک شمع بیشتر از افزایش مقدار فواصل بین مارپیچ‌ها تحت اثر بارگذاری مونوتونیک و سیکلیک آپلیفت در کاهش دامنه‌ی جابجایی بوده است.[۱۸]

خزایی و اسلامی (۲۰۱۶)، از طریق مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک با استفاده از دستگاه FCV[12] (فشار همه‌جانبه‌ی مخروطی)، آزمایش‌های فشاری و کشش‌محوری با تمرکز بر رفتار نیرو- جابجایی برای ارزیابی عملکرد FCV برای شمع‌های مدل‌شده در خاک ماسه‌ای انجام داده و دریافته‌اند زمانی که تعداد پره و تراکم نسبی خاک بیشتر شده است، ظرفیت باربری شمع پیچشی

[6] Silva
[7] Tsuha
[8] Perez
[9] Sharma
[10] Di Bernardo
[11] Merifield
[12] Frustum Confinning Vessel

افزایش پیدا کرده است و عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند. همچنین یک شمع پیچشی با دو پره‌ی مارپیچ توانسته است تقریباً معادل یک شمع فولادی در زمانی که قطر شمع فولادی با قطر پره‌ی مارپیچ یکسان بوده است، عمل کند.[۱۴]

عباس و علی (۲۰۲۰)، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل‌سازی با بارگذاری فشاری و سرعت کرنش ثابت، پارامترهای تأثیرگذار در ظرفیت شمع‌های پیچشی تعبیه‌شده در خاک رس نرم قرارگرفته بر روی خاک ماسه‌ای متراکم را بررسی کردند؛ که با توجه به نتایج آن‌ها، افزودن مارپیچ به شفت شمع برای افزایش ظرفیت شمع‌های پیچشی در مقایسه‌ی شمع‌های پیچشی و فولادی معمولی کارآمدتر بوده و ظرفیت فشاری شمع‌های پیچشی هنگام افزایش تعداد مارپیچ، صرف‌نظر از نوع خاک، قطر مارپیچ و نسبت L/D افزایش یافته است.[۱۹]

جمیل و عباس (۲۰۲۱)، با کمک مدل‌سازی آزمایشگاهی، تأثیر فاصله بین گروه شمع‌های پیچشی و تعداد پره‌های مارپیچ در ظرفیت فشاری در خاک ماسه‌ای و رس نرم را بررسی کردند و دریافتند که افزایش تعداد صفحه‌ی مارپیچ در شمع پیچشی باعث افزایش ظرفیت فشاری نهایی درگروه شمع‌ها شده و هنگامی که فاصله‌ی شمع‌ها بین شمع‌های گروهی افزایش یافته است، ظرفیت فشاری نهایی گروه شمع‌ها در خاک ماسه‌ای افزایش یافته است، در حالی که در خاک رسی نرم کاهش یافته است.[۲۰]

حسین‌پور و همکاران (۲۰۱۳)، با انجام آزمایش‌های مونوتونیک در سرعت بارگذاری ۱۸ (mm/min) به روش مدل‌سازی فیزیکی g ۱، اثر افزودن مارپیچ دوم به شمع تک‌مارپیچ در عملکرد آن را در خاک ماسه‌ای بررسی کردند و دریافتند که افزودن مارپیچ دوم، باعث افزایش ظرفیت‌های کششی و فشاری شده است. همچنین تأثیر افزودن مارپیچ دوم به شمع تک‌مارپیچ برای ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری مستقل از تراکم نسبی ماسه بوده است. با این حال، هر دو عامل افزایش تراکم نسبی و تعداد پره‌ها، باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شده است، اما تأثیر افزایش تراکم نسبی بسیار بیشتر از افزایش تعداد پره‌ها بوده است.[۲۱]

با توجه به پیشینه‌ی پژوهش مشخص است که مطالعات متعددی در رابطه با اثر تعداد مارپیچ و نوع خاک و ... انجام شده است، و مطالعه‌ای در رابطه با سرعت‌های بارگذاری مختلف انجام نشده است؛ بنابراین، در نوشتار حاضر در درجه‌ی اول به بررسی رفتار شمع‌های پیچشی تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و در ادامه، به بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک و تعداد پره در آن‌ها پرداخته و عوامل مختلف ذکرشده و تأثیر آن‌ها در ظرفیت باربری با هم مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مصالح استفاده‌شده

خاک استفاده‌شده از ماسه‌ی فیروزکوه (D۱۱)، نوعی ماسه‌ی سیلیکاته بوده است، که شکل و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در شکل ۲ و جدول ۱ مشاهده می‌شود. همچنین شمع‌های استفاده‌شده از جنس فلزی، که به ترتیب یک‌پره و دوپره بوده‌اند، در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.



شکل ۲. ماسه‌ی فیروزکوه.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی فیروزکوه.

Parameter	Value	Unit
D_{10}	0.76	mm
D_{30}	1.076	mm
D_{50}	1.318	mm
C_u	1.889	–
C_c	1.061	–
e_{max}	0.96	–
e_{min}	0.66	–
$\gamma_{d\ max}$	15.69	kN/m^3
$\gamma_{d\ min}$	13.23	kN/m^3
$\gamma_{d\ (Dr=45\%)}$	14.22	kN/m^3
$\gamma_{d\ (Dr=95\%)}$	15.4	kN/m^3
$\nu_{s\ (poisson's\ ratio)}$	0.3	–
$G_{soil\ (shear\ modulus)}$	≈ 30	MPa
$\Phi_{\ (Dr\ =45\%)}$	31.5	–
$\Phi_{\ (Dr\ =95\%)}$	38.1	–
$C_{\ (Dr\ =45\%)}$	0.80 ≈ 0	kPa
$C_{\ (Dr\ =95\%)}$	3.91 ≈ 0	kPa



شکل ۳. تصویر شمع‌های پیچشی مدل‌شده.

با توجه به مشخصات خاک که در جدول ۱ ارائه شده است، خاک ماسه‌ای استفاده‌شده با دانه‌بندی یکنواخت و بددانه‌بندی‌شده (SP)[۱۳] مشخص شده است.

۲.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس با ابعاد مخزن ۱/۲۰×۱×۱/۲۷ متر (به ترتیب طول، عرض، و ارتفاع) که قابلیت انواع مدل‌سازی‌ها را دارد (شکل۴)، برای انجام آزمایش‌های مونوتونیک استفاده شده است.

[13] Sand Poorly Graded



شکل ۴. جعبه‌ی مدل‌سازی بزرگ‌مقیاس موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود.



شکل ۵. مراحل انجام آزمایش‌ها؛ (الف) پُرکردن جعبه، (ب) ترازکردن شمع، (ج) اتصال شمع با لودسل، (د) انجام آزمایش‌های مونوتونیک با سرعت‌های مختلف بارگذاری در تراکم‌های نسبی متفاوت، (ه) اعمال بارگذاری بر روی شمع.

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا جعبه‌ی خالی با توجه به تراکم نسبی موردنظر، در ۵ لایه، وزن مشخصی از خاک، که در ادامه توضیح داده شده است، در هر لایه پُر شد. سپس شمع برای انجام آزمایش با سرعت مشخص ۱۵ دور بر دقیقه در خاک با کمک دریل موجود در آزمایشگاه به طوری پیچیده شد که کمترین دست‌خوردگی در خاک ایجاد شود. نوک شمع با یک پیچ به لودسل بسته شد تا در طول آزمایش اتصال کامل برقرار باشد. سپس با توجه به آزمایش مرتبط، بارگذاری لازم اعمال شده است. در شکل ۵، مراحل انجام آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

جعبه‌ی موردنظر به روش بارش ماسه در ۵ لایه‌ی مشخص پُر شد و با توجه به اینکه دو وجه آن شیشه‌ای و قابل رؤیت بوده است، با مشاهده‌ی تغییرات سطح خاک که جزئی است، کنترل تراکم نسبی در آزمایش‌های مختلف بررسی شده است.

جدول ۲. برنامه‌ی آزمایش‌های مونوتونیک.

Test ID	Relative density (Dr) (%)	Helical pile model	Speed of test (V) (mm/min)
Test 1	45%	Single-helix	90
Test 2	45%	Single-helix	500
Test 3	45%	Double-helix	90
Test 4	45%	Double-helix	500
Test 5	95%	Single-helix	90
Test 6	95%	Single-helix	500
Test 7	95%	Double-helix	90
Test 8	95%	Double-helix	500

با استفاده از روابط ۱ و ۲، و داشتن حجم کل مخزن و میزان خاک برای پُرشدن هر لایه (پس از عملیات پُرکردن در حالت عادی مخزن و متراکم‌سازی) می‌توان به تراکم‌های نسبی موردنظر ۴۵ و ۹۵ درصد رسید:

$$\gamma_d = \frac{w_s}{V} \quad (۱)$$

$$Dr = \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \times \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \quad (۲)$$

که در آن، γ_d وزن مخصوص خاک، w_s وزن خاک، V حجم مخزن، D_r تراکم نسبی، $\gamma_{d\min}$ وزن مخصوص کمینه، و $\gamma_{d\max}$ وزن مخصوص بیشینه هستند.

۳.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

در مجموع، ۳۲ آزمایش مونوتونیک انجام شده‌اند، که به دو دسته‌ی بارگذاری کششی و فشاری تقسیم می‌شوند. برای هر آزمایش، آزمون تکرار برای اطمینان از نتیجه در نظر گرفته شده است (۱۶ آزمون تکرار). T[14]، C[15]، Dr[16]، و V[17] به ترتیب بیانگر آزمایش‌های کششی، آزمایش‌های فشاری، تراکم نسبی خاک، و سرعت بارگذاری هستند، که در ادامه، جزئیات هر آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. ارائه و تحلیل نتایج

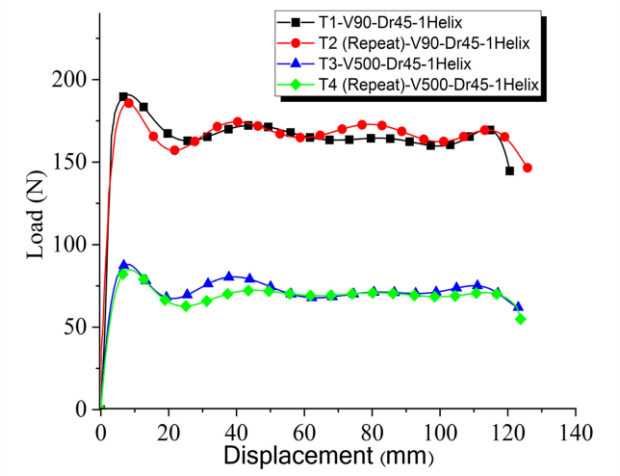
در ادامه، به ترتیب نتایج به‌دست‌آمده از تأثیر سرعت بارگذاری، درصد تراکم نسبی، و تعداد پره در ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع‌های پیچشی تک‌پره و دوپره به صورت نمودار در شکل ۶ مشاهده می‌شود و توضیحات لازم بیان شده است. به‌دلیل هم‌پوشانی و تطبیق نتایج آزمایش‌های اصلی و تکرار، منحنی‌های مربوط به آزمایش‌های تکرار فقط در شکل ۶ نشان داده شده‌اند و در بقیه‌ی شکل‌ها، منحنی‌های مربوط به آزمایش تکرار ارائه نشده است.

۱.۳. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی و فشاری

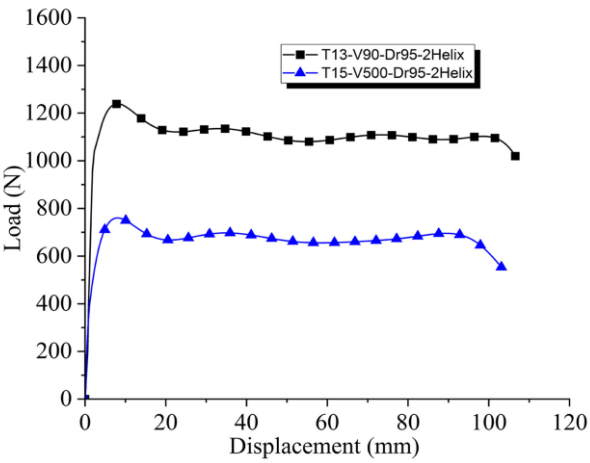
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با افزایش سرعت بارگذاری از ۹۰ (mm/min) به ۵۰۰ (mm/min)، ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع‌های پیچشی تک‌پره و دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪، به‌طور مشابه در حدود ۵۲٪ و تا بیشینه‌ی ۵۶٪

[14] Tension
[15] Compression
[16] Relative density
[17] Velocity (Loading speed)

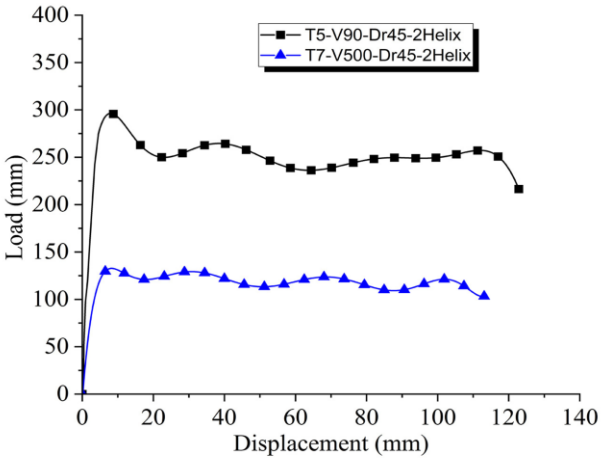
کاهش یافته است (شکل‌های ۶ الی ۹). همچنین مقایسه‌ی اخیر در تراکم‌های نسبی ۹۵ و ۳۰ درصد و بیشینه‌ی ۴۰ درصد بوده است (شکل‌های ۱۰ الی ۱۳). نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که افزایش سرعت بارگذاری از ۹۰ (mm/min) به ۵۰۰ (mm/min)، باعث کاهش در ظرفیت باربری فشاری و کششی شده است، که می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت بارگذاری، سرعت جابجایی شمع در خاک بیشتر و به تبع آن، گیرداری بین شمع و خاک کمتر شده است؛ بنابراین، ظرفیت باربری در هر دو حالت کششی و فشاری کاهش یافته است.



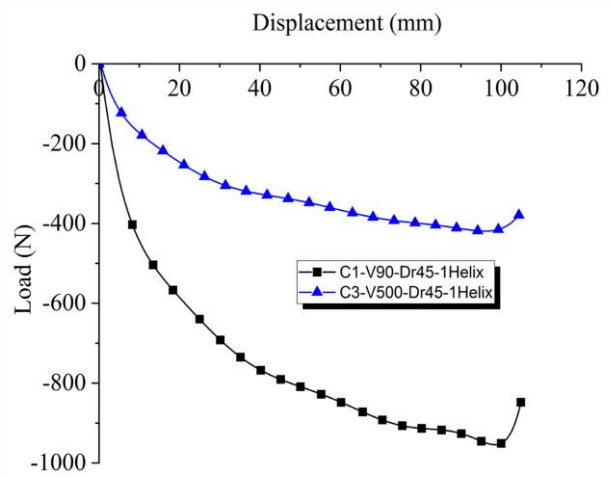
شکل ۶. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۴۵٪



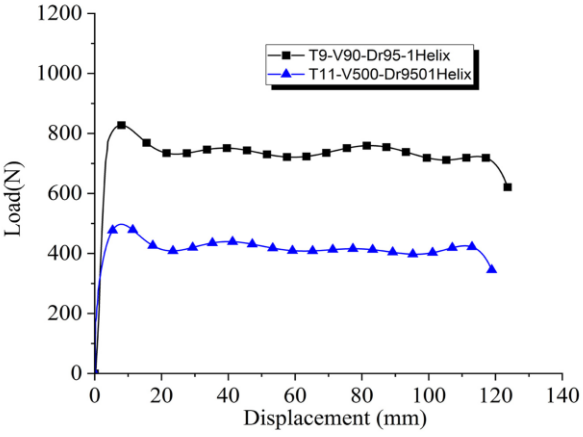
شکل ۹. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪



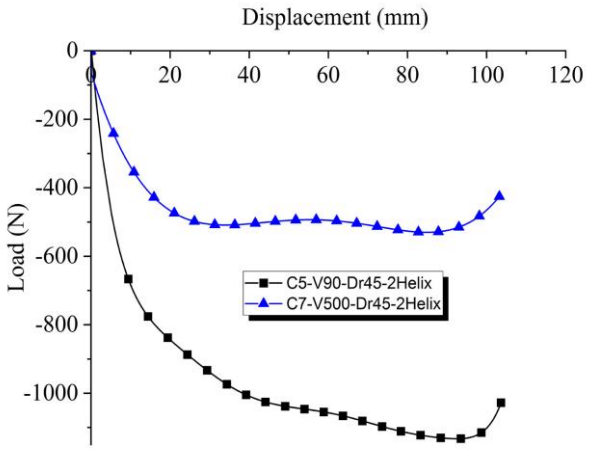
شکل ۷. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪



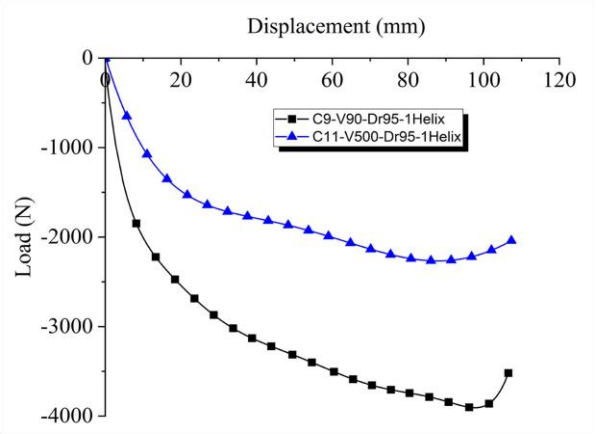
شکل ۱۰. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪



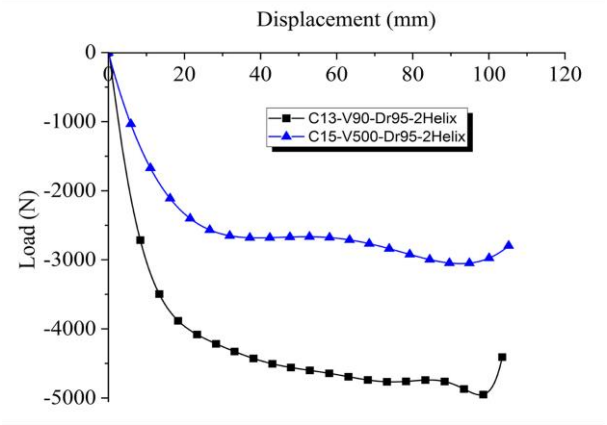
شکل ۸. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۴۵٪



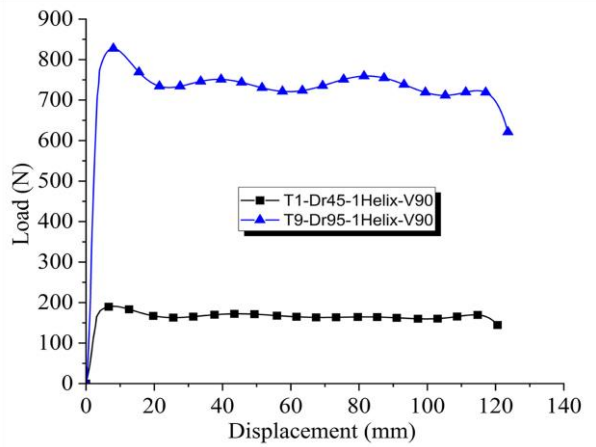
شکل ۱۱. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در تراکم نسبی ۹۵٪



شکل ۱۲. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪.



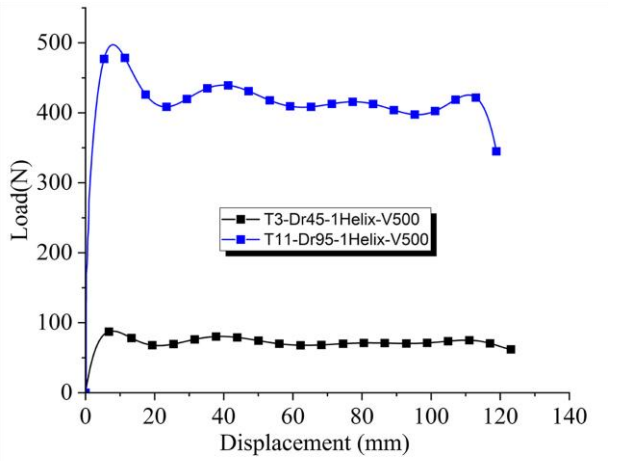
شکل ۱۳. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در تراکم نسبی ۹۵٪.



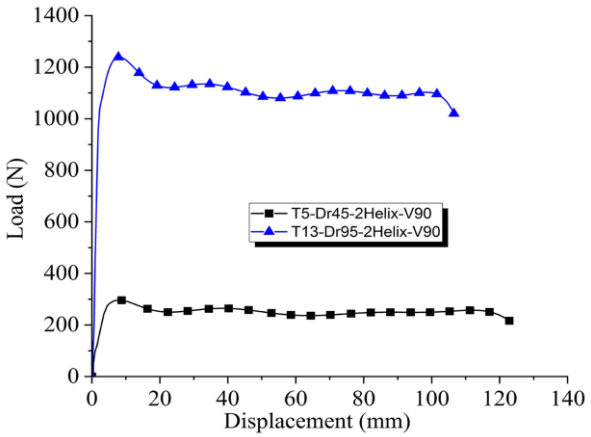
شکل ۱۴. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

۲.۳. تأثیر تراکم نسبی خاک در ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری

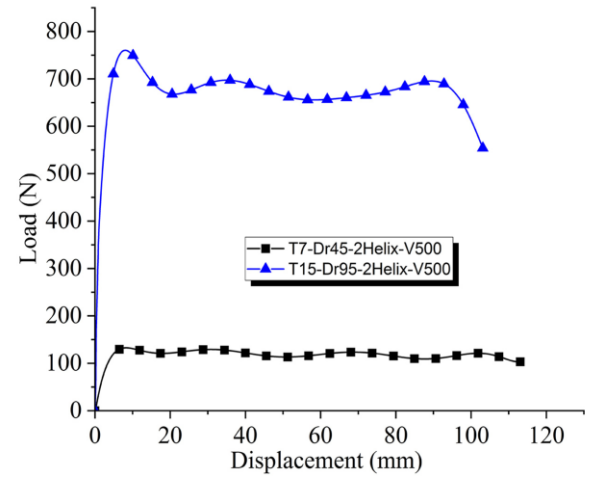
با افزایش درصد تراکم نسبی خاک از ۴۵ به ۹۵ درصد، ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع پیچشی تک‌پره و دوپره در حدود ۳۰۹٪ تا بیشینه‌ی ۴۶۸٪ افزایش یافته است، که مقدار ۳۰۹٪ مربوط به سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min) و ۴۶۸٪ مربوط به سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min) بوده است، که نتایج آن در شکل‌های ۱۴ الی ۲۱ مشاهده می‌شود و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده



شکل ۱۵. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).

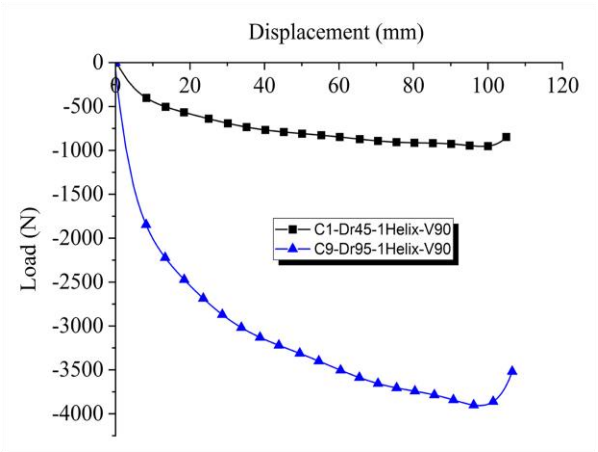


شکل۱۶. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

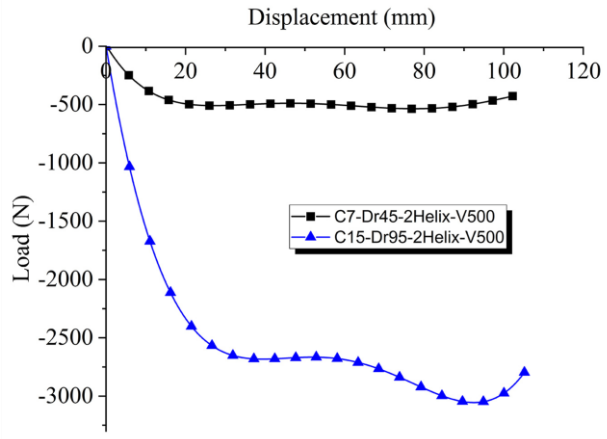


شکل ۱۷. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).

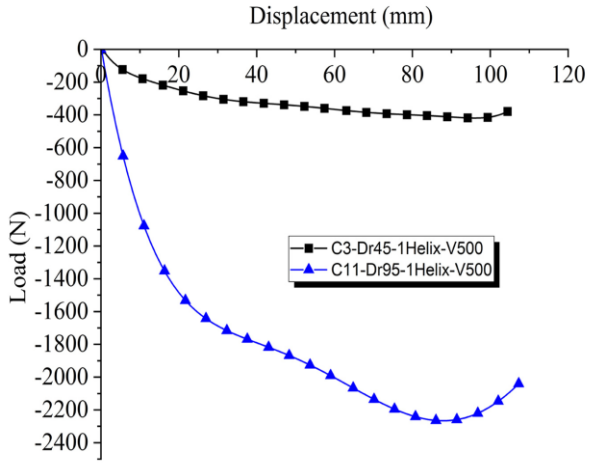
مشخص است که با افزایش درصد تراکم نسبی خاک از ۴۵ به ۹۵ درصد، ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، که دلیل آن نزدیک‌شدن ذرات خاک نسبت به هم (متراکم‌بودن خاک) و گیرداری بیشتر بین خاک و شمع است.



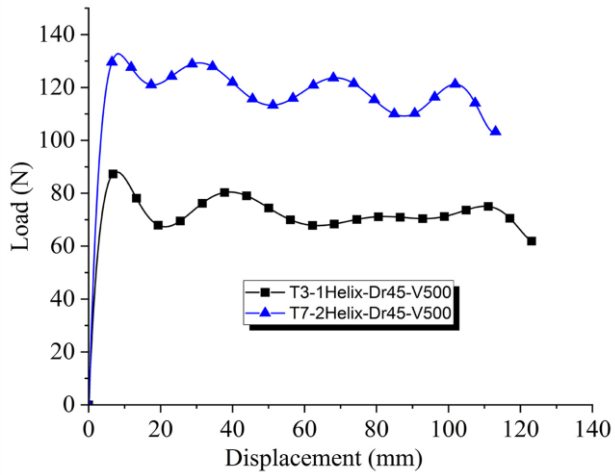
شکل ۱۸. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



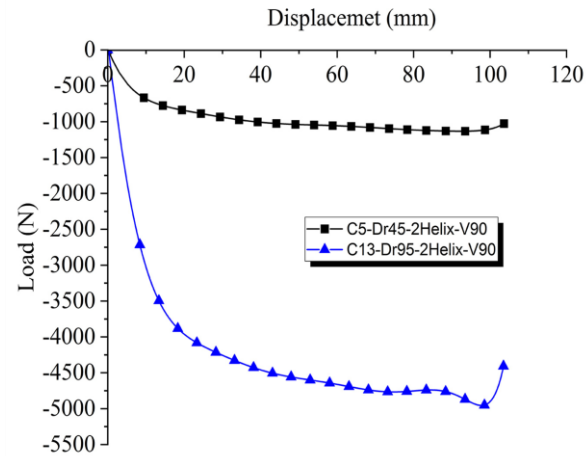
شکل ۲۱. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



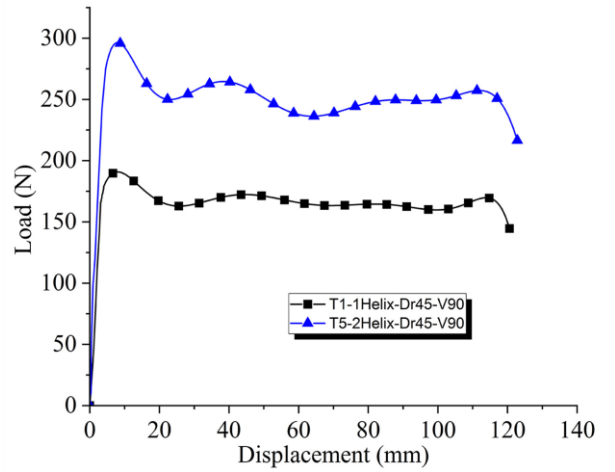
شکل ۱۹. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در سرعت بارگذاری۹۰ (mm/min).



شکل ۲۳. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



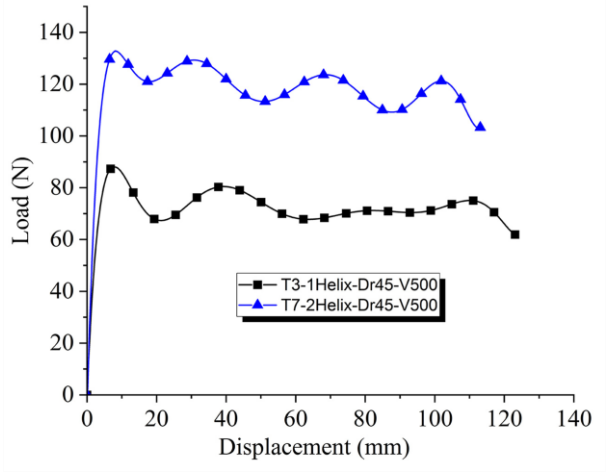
شکل ۲۰. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



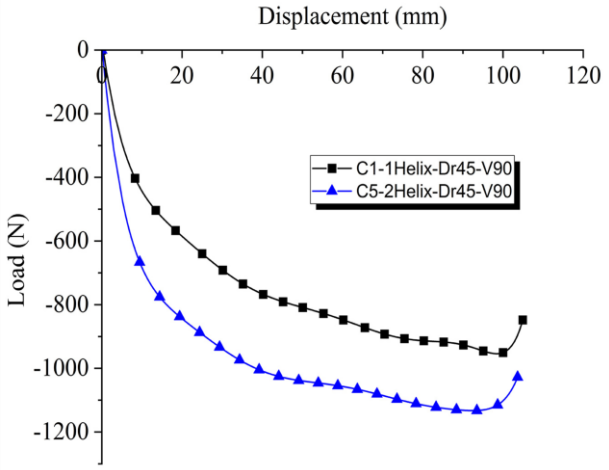
شکل ۲۲. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

۳.۳ . تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی و فشاری

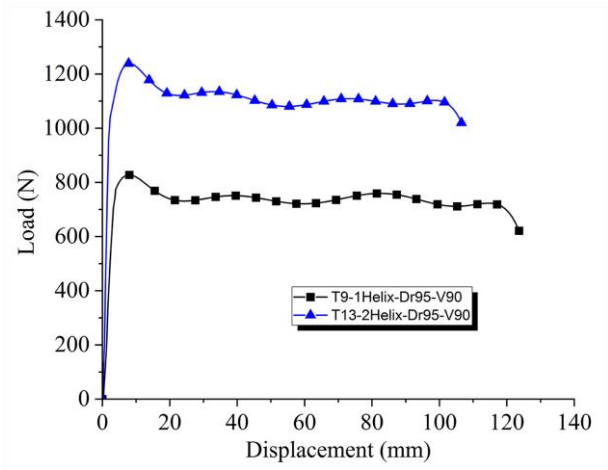
نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها برای تأثیر تعداد پره نشان داده است که با افزایش تعداد پره (از ۱ به ۲)، ظرفیت کششی شمع پیچشی دوپره نسبت به تک‌پره در تراکم‌های نسبی۴۵ و ۹۵ درصد در حدود ۵۰ تا ۵۴ درصد افزایش یافته است (شکل‌های ۲۲ الی ۲۵). در حالی که همین مقایسه برای تأثیر تعداد پره در ظرفیت فشاری در حدود ۱۸و بیشینه‌ی ۳۸ درصد بوده است (شکل‌های ۲۶ الی ۲۹). نتایج نشان می‌دهند ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری شمع دوپره نسبت به شمع تک‌پره (افزایش تعداد پره از ۱ به ۲)، باعث افزایش ظرفیت باربری شده است؛ که دلیل آن وجود پره‌ی دوم و ایجاد گیرداری بیشتر شمع در خاک است.



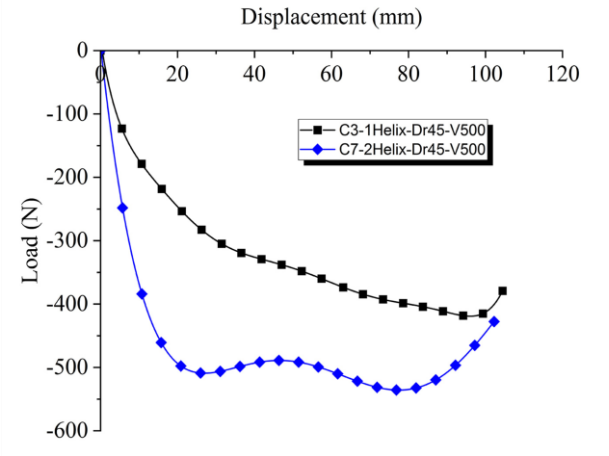
شکل ۲۳. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



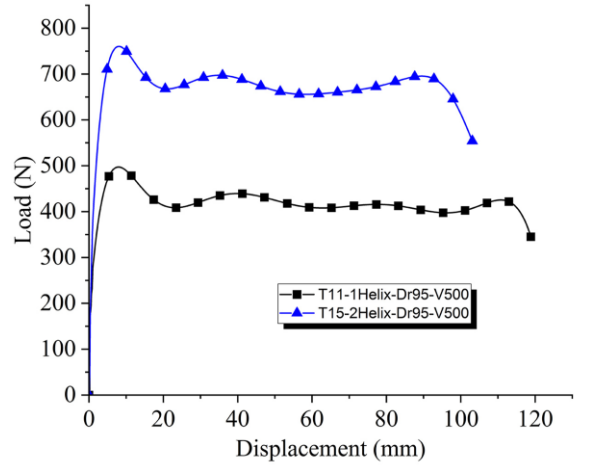
شکل ۲۶. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



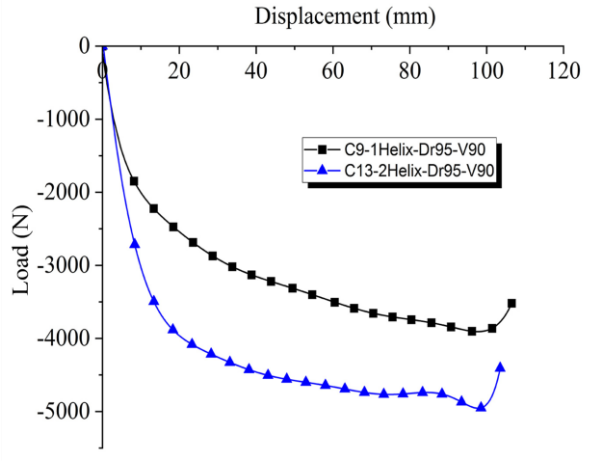
شکل ۲۴. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



شکل ۲۷. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



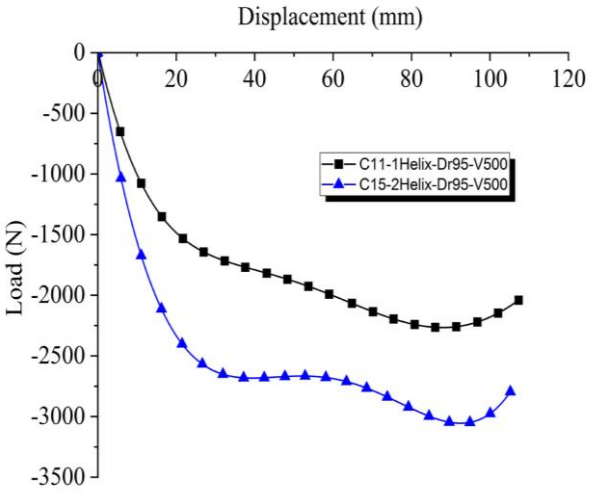
شکل ۲۵. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



شکل ۲۸. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری تک‌پره تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

۴.۳. نسبت ظرفیت کششی به فشاری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، که جزئیات آن در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است، ظرفیت نهایی کششی شمع تک‌پره حدود ۲۰٪ ظرفیت نهایی فشاری در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۵ درصد است؛ در حالی که در شمع دوپره، ظرفیت نهایی کششی حدود ۲۵٪ ظرفیت نهایی فشاری در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۵ درصد است، که این موضوع نشان می‌دهد پیش‌بینی رفتار کششی در مقابل پیش‌بینی رفتار فشاری کار دشوارتری است، زیرا در هنگام آزمایش‌های کششی، پره‌ها در محدوده‌ی خاک دست‌خورده‌ی بالای خود بررسی شده‌اند، در حالی



شکل ۲۹. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪ وسرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).

که در آزمایش‌های فشاری، عملکرد پره‌ها در برابر خاک دست‌خورده زیر آن‌هاست.

۴. نتیجه‌گیری

شمع‌های پیچشی به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند، در سراسر جهان به شکل روزافزون استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مونوتونیک که با کمک دستگاه مدل‌سازی فیزیکی ۱gانجام شده است، تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله: سرعت بارگذاری، تراکم نسبی خاک، و تعداد پره در ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع‌های پیچشی تک‌پره و دوپره تجزیه و تحلیل شده است، که نتایج اصلی به این شرح هستند:

۱. با افزایش سرعت بارگذاری، ظرفیت‌های نهایی کششی و فشاری شمع‌های تک‌پره و دوپره تا بیشینه‌ی حدود ۵۶٪ کاهش پیدا کرده است، که می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت بارگذاری، سرعت جابجایی شمع در خاک بیشتر می‌شود، بنابراین سبب ایجاد گیرداری کمتر بین خاک و شمع می‌شود.

۲. با افزایش تراکم نسبی خاک، ظرفیت‌های نهایی کششی و فشاری تا بیشینه‌ی حدود ۴۶۸٪ افزایش یافته است، که دلیل آن نزدیک‌شدن ذرات خاک به هم و به‌تبع گیرداری بیشتر بین خاک و شمع بوده است.

۳. با افزایش تعداد پره (از ۱ به ۲)، ظرفیت‌های نهایی و کششی تا بیشینه‌ی حدود ۵۴٪ افزایش یافته است. مشخص است که با افزایش تعداد پره، شمع

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های کششی.

Test ID	Relative density (Dr) (%)	Helical pile model	Speed of test (V) (mm/min)	Ultimate tension capacity (Q_t)
T 1	45%	Single-helix	90	190.82
T 1 (Repeat test)	45%	Single-helix	90	185.78
T 3	45%	Single-helix	500	87.99
T 3 (Repeat test)	45%	Single-helix	500	84.76
T 5	45%	Double-helix	90	296.4
T 5 (Repeat test)	45%	Double-helix	90	284.46
T 7	45%	Double-helix	500	132.79
T 7 (Repeat test)	45%	Double-helix	500	127.1
T 9	95%	Single-helix	90	827.47
T 9 (Repeat test)	95%	Single-helix	90	803.31
T 11	95%	Single-helix	500	497.25
T 11 (Repeat test)	95%	Single-helix	500	479.2
T 13	95%	Double-helix	90	1238.91
T 13 (Repeat test)	95%	Double-helix	90	1197.73
T 15	95%	Double-helix	500	760.27
T 15 (Repeat test)	95%	Double-helix	500	716.46

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های فشاری.

Test ID	Relative density (Dr) (%)	Helical pile model	Speed of test (V) (mm/min)	Ultimate tension capacity (Q_t)
C 1	45%	Single-helix	90	954.12
C 1 (Repeat test)	45%	Single-helix	90	942.26
C 3	45%	Single-helix	500	419.21
C 3 (Repeat test)	45%	Single-helix	500	404.33
C 5	45%	Double-helix	90	1132.77
C 5 (Repeat test)	45%	Double-helix	90	1108.56
C 7	45%	Double-helix	500	535.78
C 7 (Repeat test)	45%	Double-helix	500	530.12
C 9	95%	Single-helix	90	3906.2
C 9 (Repeat test)	95%	Single-helix	90	3849.52
C 11	95%	Single-helix	500	2266.18
C 11 (Repeat test)	95%	Single-helix	500	2181.18
C 13	95%	Double-helix	90	4955.52
C 13 (Repeat test)	95%	Double-helix	90	4885.28
C 15	95%	Double-helix	500	3055.12
C 15 (Repeat test)	95%	Double-helix	500	2985.25

پیچشی در خاک بیشتر مهار می‌شود؛ بنابراین، به‌موجب آن گیرداری بین خاک و شمع با وجود پره‌ی دوم افزایش می‌یابد و به تبع آن، ظرفیت نهایی و کششی شمع پیچشی تیز افزایش می‌یابد.

۴. از بین ۳ پارامتر مختلفی که بررسی و تجزیه و تحلیل شده‌اند، مشخص است که تأثیر تراکم نسبی خاک در ظرفیت باربری شمع پیچشی بیشتر بوده است.

۵. با توجه به نتایج مشخص است که ظرفیت کششی در تمام آزمایش‌ها بیشتر از ظرفیت فشاری بوده است، که به‌دلیل دست‌خورده‌شدن خاک بالای پره در هنگام نصب شمع است. بنابراین، در آزمایش‌های کششی (حرکت شمع رو به بالا)، خاک دست‌خورده‌ی بالای پره‌ی شمع باعث مقاومت می‌شود؛ در حالی که در آزمایش‌های فشاری (حرکت شمع رو به پایین)، خاک دست‌نخورده‌شده زیر پره مقاومت می‌کند، لذا ظرفیت فشاری شمع از ظرفیت کششی بیشتر خواهد بود.

References- منابع

1. Spagnoli, G. and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. 2020.A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system. *Marine Georesources and Geotechnology*, *38*(9), pp. 1013–1036. https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1729905.
2. Perko, H.A. 2009. *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons.
3. Pack, J.S. 2009. Practical design and inspection guide for helical piles and helical tension anchors. *IMR, Inc., Denver, Colorado, Revision*, 2.
4. Kurian, N.P. and Shah, S.J. 2009 .Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method. *Canadian Geotechnical Journal*, *46*(6), pp. 627–638. https://doi.org/10.1139/T09-008.
5. Silva, B.C. 2014 .Estimation of uplift capacity of helical anchors based on SPT test. M. Sc. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, University of São.
6. Tsuha, C. de H.C. 2013 .Influence of multiple helix configuration on the uplift capacity of helical anchors.*Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, 18.
7. Perez, Z.A. 2018 .Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, *55*(8), pp. 1067–1080. https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0137.
8. Sharma, M., Samanta, M. and Sarkar, S. .Laboratory study on pullout capacity of helical soil nail in cohesionless soil. *Canadian Geotechnical Journal*, *54*(10), pp. 1482–1495. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0243.

9. Liu, H., Zubeck, H.K. and Schubert, D.H. .Finite-element analysis of helical piers in frozen ground. *Journal of Cold Regions Engineering*, *21*(3), pp. 92–106. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2007)21:3(92).

10. Spagnoli, G. and Gavin, K. 2015 .Helical piles as a novel foundation system for offshore piled facilities. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. OnePetro. https://doi.org/10.2118/177604-MS.

11. Al-Baghdadi, T.A. 2015.Modelling of laterally loaded screw piles with large helical plates in sand. in *Frontiers in offshore geotechnics III: proceedings of the 3rd international symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2015)*. Taylor & Francis Books Ltd, pp. 503–508.

12. Fateh, A.M.A., Eslami, A. and Fahimifar, A. 2017. Direct CPT and CPTu methods for determining bearing capacity of helical piles. *Marine georesources & geotechnology*, *35*(2), pp. 193–207. https://doi.org/10.1080/1064119X.2015.1133741.

13. Spagnoli, G. 2018 .A sensitivity analysis on the parameters affecting large diameter helical pile installation torque.depth and installation power for offshore applications', *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, *12*(3), pp. 171–185. https://doi.org/10.1080/19375247.2019.1595996.

14. Khazaei, J. and Eslami, A. 2016 .Geotechnical Behavior of Helical Piles Via Physical Modeling by Frustum Confining Vessel (FCV). *International Journal of Geography and Geology*, *5*(9), pp. 167–181. https://doi.org/10.18488/journal.10/2016.5.9/10.9.167.181.

15. Di Bernardo, G. 2012 .Helical pile Deck foundation. *New Jersey Deck Boulder, USA* .

16. Merifield, R.S. 2011 .Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *137*(7), pp. 704–716. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000478.

17. Zare, M. 2013 .Frustum confining vessel (FCV) for investigation of deep foundations performance. in *Proc., 38th Annual Int. Conf. on Deep Foundation, Deep Foundation Institute, Phoenix, AZ*, pp. 545–553.

18. Ali, A.S., Salim, N.M. and Baqir, H.H. 2022 .The Performance of Taper Helical Pile Embedded in Loose Sand Under Uplift Static and Cyclic Load Using 3D-Finite Element Analysis. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 12033. https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012033.

19. Abbas, H.O. and Ali, O.K. 2020 .Parameters affecting screw pile capacity embedded in soft clay overlaying dense sandy soil. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 12117. https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012117.

20. Jamill, A.S. and Abbas, H.O. 2021.Effect of Screw Piles Spacing on Group Compressive Capacity in Soft Clay. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1076*(1), p. 012098. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1076/1/012098.

21. Hoseinpour, R., Keramati, M. and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. 2023 .Effect of the Addition of a Second Helix on the Helical Pile Performance in Sand. *International Journal of Civil Engineering*, pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/s40999-023-00893-7.