



Numerical Study of Helical Piles in Sandy Soils Under Vertical and Lateral Loads

Seyed Farhad Nabizadeh

Department of Civil Engineering, Chalous branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

Ali Zahmatkesh*

Department of Civil Engineering, Ferdows branch, Islamic Azad University, Ferdows, Iran

Amirhosein Moslemi

Department of Civil Engineering, Chalous branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

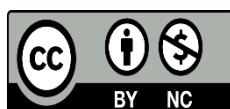
zahmatkesh@ferdowsiau.ac.ir

Keywords

Helical pile,
Helical blade,
Bearing capacity,
Shaft diameter

Abstract

The application of screw piles as a deep foundation type has increased significantly in recent years. The increasing use of helical piles can be attributed to their unique advantages, including relatively low construction and installation costs compared to other foundations, the ability to install in different soils without the need for measures such as casing, curing and maintenance (as is required for concrete piles), and the lack of need for pre-drilling. This research investigated the bearing capacity of piles by numerical modeling of 9 piles with spiral blades. By drawing load-displacement diagrams and comparing them at a constant settlement value, the bearing capacity has been calculated. The results indicated that the bearing capacity of the structure increased with increasing the shaft diameter and the number of pile blades. According to the results, the shaft diameter has a greater impact on the bearing capacity than the number of blades. The best performance of the helical spark plug system was related to the three-blade spark plug model with a diameter of 25 mm.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

بررسی عددی شمع‌های حلزونی در خاکهای ماسه‌ای تحت بارهای قائم و جانبی

سید فرهاد نبی زاده

گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

علی زحمت‌کش*

گروه مهندسی عمران، واحد فردوس، دانشگاه آزاد اسلامی، فردوس، ایران

امیرحسین مسلمی

گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

zahmatkesh@ferdowsiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۲۶ آذر ۱۴۰۳

چکیده

استفاده از شمع‌های پیچی به عنوان یک نمونه پی عمیق به طور قابل توجهی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. افزایش روز افزون استفاده از شمعهای پره‌دار حلزونی (هلیکال) را می‌توان مدیون مزایای منحصر بفرد آنها از جمله هزینه ساخت و نصب نسبتاً کم در مقایسه با سایر فونداسیون‌ها و امکان نصب در خاکهای متفاوت بدون نیاز به تمهیداتی نظیر غلاف گذاری، یا عمل‌آوری و نگهداری (همانند آنچه برای شمع‌های بتنی مورد نیاز است) و نیز عدم نیاز به پیش حفاری، دانست. این تحقیق با مدلسازی عددی ۹ نمونه شمع دارای پره حلزونی، به بررسی ظرفیت فشاری شمعها، پرداخته است. با ترسیم نمودارهای بار-تغییر مکان و مقایسه آنها در یک مقدار نشست ثابت، ظرفیت باربری محاسبه گردیده است. نتایج نشان داد که با افزایش قطر شفت و همچنین افزایش تعداد پره‌های شمع، ظرفیت باربری سازه افزایش یافته است. با توجه به نتایج، میزان قطر شفت نسبت به تعداد پره، تاثیرگذاری بیشتری بر روی ظرفیت باربری دارد. بهترین عملکرد سیستم شمع هلیکال مربوط به مدل شمع سه پره با قطر ۲۵ میلی‌متر بوده است.

واژگان کلیدی: شمع هلیکال، پره حلزونی، ظرفیت فشاری، قطر شافت

مقدمه

بارهای طراحی بزرگ، خاک ضعیف در عمق‌های سطحی و محدودیت‌های سایت بعضی از دلایل استفاده از پی‌های عمیق می‌باشد. استفاده از شمع‌های پیچی به عنوان یک نمونه پی عمیق به طور قابل توجهی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. بکارگیری آنها بعنوان فونداسیون سازه‌های سبک نظیر دکلها و پایپ رکها، مقاوم سازی فونداسیون های موجود و پایدارسازی دیواره‌های گودبرداری، تعدادی از زمینه‌های کاربرد این شمعها را شامل می‌شوند. پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده است، متغیرهایی نظیر قطر شافت، قطر پرها، تعداد پرها، فواصل پرها از یکدیگر، عمق استقرار هلیکس‌ها نسبت به سطح خاک، نوع خاک، درصد رطوبت خاک و میزان تراکم خاک را بعنوان پارامترهای موثر بر ظرفیت فشاری شمعهای هلیکال معرفی کرده اند. هم اکنون بیش از ۵۰ شرکت در سراسر دنیا انواع مختلف شمعهای پیچی را تولید می‌کنند [۲ و ۱]. در ۱۷۰ سال گذشته به صورتهای مختلفی از شمعهای پیچی استفاده شده است. الکساندر میچل، یک مهندس عمران ایرلندی است که به عنوان مخترع اولین شمع حلزونی که در طراحی پایه برای فانوس‌های دریایی استفاده شد شناخته شده است [۳]. شمع‌های پیچی، شمع‌هایی هستند که جنس آنها فلزی بوده و به صورت یک پیچ بزرگ ساخته می‌شوند. این شمع‌ها به سبب وجود پره‌های پیچی در سرتاسر طول شمع درگیری مناسبی با خاک اطراف دارند و لذا نسبت به شمع‌های مشابه مقاومت بالاتری را در برابر فشار و بر کنش از خود نشان می‌دهند [۴].

در سال‌های ۱۸۵۶ تا اواخر ۱۹۰۰ کم کم شمع‌های پیچی در سراسر کشور انگلستان مورد توجه قرار گرفت. گسترش و استفاده مخلوع شمع‌های بیجی در داخل بریتانیا باعث معرفی و جهانی شدن این روش شد. در اوایل قرن ۱۹ ام میلادی فردی بنام الکساندر میشل^۱ به کشور آمریکا سفر کرد تا دانش این روش را منتقل و معرفی کند. در نتیجه این روش معرفی و شناخت از شمع‌های مارپیچ، در طول ۴۰ سال تعداد بالغ بر ۱۰۰ عدد فانوس دریایی با استفاده از روش شمع‌های مارپیچ در سواحل شرقی در شمال کشور آمریکا احداث شد [۵ و ۶].

در بین سال‌های ۱۸۹۰ تا ۱۹۲۰ اختراعات تقریباً در مرحله اول مربوط به مهارهای ریسمانی، دیواره‌های تاسیسات پایه‌های دکل و خطوط لوله معطوف بود، که این دوران میتوان ورود روش مهار مارپیچ به عرصه صنعت و تاسیسات شناخت. از نظر تاریخی، این دوران با تعداد زیادی از انواع پروژه‌های زیر بنایی قابل توجه در کشور آمریکا که شامل تعدادی از سد های بزرگ، کانال‌های

انتقال آب، پروژه های راهسازی بین ایالتی قرار گرفته است [۵]. در گذر ۳۰ سال گذشته بطور کلی این روش در صنعت ساختمان سازی و پروژه‌های ساختمانی و عمرانی دیگر ورود پیدا کرده است و با توسعه و گسترش روز افزون این روش می‌شود رد پای آن را در محیط اطراف خود مشاهده کرد که می‌توان مواردی همچون، خانه‌هایی با قابلیت جابجایی به دیواره‌های حائل و انواع شمع های مارپیچ و را نام برد. این دوره را می‌توان عرصه ورود مهار های مارپیچ به صنعت ساختمانی نامید، روش مهار مارپیچ امروزه مورد توجه و استفاده گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز و انواع پروژه‌های مهندسی قرار گرفته است [۷]. هنگامی که طراحان برای کاربرد های معین بدرستی طراحی و اجرا کند می‌توان از مهارهای مارپیچ برای حفظ لنگر و گشتاور واژگونی، نیروهای فشاری، بارهای بالا آمدگی و حتی نیز بارهای افقی و جانبی مورد استفاده قرار داد.

شمع‌های مارپیچ از دویست سال گذشته تا به حال در صنعت ساخت و ساز در دنیا استفاده می‌شوند. شمع‌های مارپیچ از دسته پیهای عمیق فولادی پیش ساخته با یک یا چند پره هستند که بر اثر چرخش و اعمال گشتاور، درون زمین قرار می‌گیرند تا سازه را حمایت کنند. از شمع‌های مارپیچ در پروژه های متعددی در سراسر دنیا استفاده می‌شود. این شمعها افزون بر نیروی فشاری، نیروی کششی را نیز تحمل می‌کنند. محققین مختلفی به بررسی رفتار شمع‌های مارپیچ پرداخته‌اند که در جدول (۱)، خلاصه‌ای از کار محققین و نتایج آنها ارائه شده است.

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اباکوس، شمع‌های مارپیچ تحت بارهای قائم و جانبی مدلسازی شده در خاک ماسه‌ای واقع در سواحل نوشهر مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعه پارامتریک برای محاسبه میزان ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها در خاک ماسه‌ای انجام شده است.

¹ - Alexander Mitchell



جدول ۱- جمع بندی تحقیقات قبلی

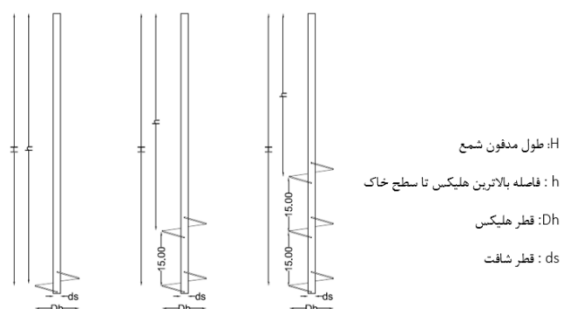
نام محقق	سال	موضوع	نتایج
فلاحپور و شوش پاشا ^[۱۱]	۱۳۹۴	ارزیابی ظرفیت باربری قائم شمع تحت بار جانبی در خاک ماسه ای بابلسر	مطابق نتایج بدست آمده وجود بار جانبی به همراه بار قائم باعث کاهش ظرفیت باربری در خاک ماسه ای نسبت به حالتی که بار جانبی وجود ندارد.
نبی زاده و جانعلیزاده ^[۱۴]	۱۳۹۵	مطالعه آزمایشگاهی و صحرایی عملکرد شمعهای پیچی در خاک ماسه‌های	عمل تزریق در شمع های سه پره باعث افزایش مقاومت بیشتری نسبت به شمع های تک پره و دو پره شده است.
نافع پسند و همکاران ^[۱۲]	۱۳۹۷	به ارزیابی تحلیل ظرفیت باربری پیچشی گروه شمع های مایل تحت بارهای جانبی برون محور	با بررسی کرنش های به وجود آمده ناشی از تغییر شکل گروه شمع های مایل ملاحظه شد که با افزایش نسبت فاصله شمع ها به قطر از میزان اندرکنش شمع-خاک-شمع کاسته شده و شمع ها تقریباً بصورت منفرد عمل کرده و باعث ایجاد کرنش های کمتر در خاک اطراف می شوند.
گاراگانی و ملکی ^[۵]	۲۰۱۹	بررسی ظرفیت بار شمع های مارپیچ با جنبه های مختلف هندسی در خاک های شنی و خاکی: یک مطالعه عددی	بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می شود که برای هر دو نوع خاک مورد مطالعه، افزایش قطر مارپیچ منجر به افزایش ظرفیت بار می شود.
غوش و سامال ^[۶]	۲۰۲۰	بررسی ظرفیت نهایی کشش انکر مارپیچی با استفاده از تجزیه و تحلیل عناصر محدود	جایی که عمدتاً تعداد صفحات مارپیچ، عمق صفحات مارپیچ بالا و پایین ترین و نسبت فاصله بین صفحات مارپیچ به قطر صفحه متفاوت است. تغییر منحنی بار-جابجایی برای هر پیکربندی انکر بدست می آید و متعاقباً، ظرفیت بالا بردن نهایی هر انکر با استفاده از روش دو مماس تعیین می شود.
معمار و همکاران ^[۱۳]	۱۳۹۹	ارزیابی اثر شکل مقطع شمع در ظرفیت باربری جانبی گروه شمع در خاک ماسه‌ای	نتایج نشان دادند که مقاومت جانبی گروه شمع بالدار، مربعی و H نسبت به شمع لوله ی ساده به ترتیب برابر با ۱/۴، ۱/۱۹ و ۰/۸۵ بوده‌است. با افزایش فاصله بین شمع ها از میزان نیروی قابل تحمل هر شمع حدود ۹۷٪ الی ۱۳۳٪ افزایش یافته است
عباس و علی ^[۷]	۲۰۲۱	بررسی مقایسه عملکرد محوری شمع پیچ با شمع های معمولی در لایه رسی نرم پوشانده با خاک شنی	نتایج نشان داد که شمع‌های پیچی با مارپیچ تکی و دوگانه می‌توانند در برابر نشست شمع مقاومت کنند که ۴۵٪ بیشتر از شمع‌های معمولی است وقتی که شمع پیچ در خاک شنی متراکم از طریق خاک رس نرم قرار می‌گیرد.
باک و همکاران ^[۸]	۲۰۲۱	بررسی پاسخ محوری و کارایی مواد شمع‌های مارپیچ مخروطی	نتایج تجربی نشان داد که مقاومت اصطکاکی شمع‌های مارپیچ مخروطی به طور مداوم با نشست افزایش می‌یابد
فیاض و همکاران ^[۹]	۲۰۲۱	به ارزیابی اثرات SSI بر سختی شمع‌های مارپیچ منفرد و گروهی در ماسه خشک از آزمون‌های میز لرزان بزرگ	در نتیجه منجر به کاهش بیشتر سختی و فرکانس‌های طبیعی شد. این اثرات باید در طراحی لرزه‌ای پی‌های شمع مارپیچ در نظر گرفته شود
سلیم و همکاران ^[۱۰]	۲۰۲۲	بررسی تجربی ظرفیت بیرون کشیدن شمع‌های مارپیچ در خاک نرم	همچنین، نتایج نشان داد که ظرفیت خروج شمع‌ها با افزایش نسبت ابعادی افزایش می‌یابد و به خوبی با نتایج به‌دست‌آمده از لحاظ نظری مطابقت دارد.

² - Ghosh and Samal³ - Bak et al.⁴ - Fayez et al.⁵ - Saleem

۲- مدلسازی

جدول ۳ - خواص شمع پیچشی به کار رفته در پژوهش

۲۰۹	Gpa	مدول الاستیسیته
۲۵۰	Mpa	تنش تسلیم
۰/۳	-	ضریب پواسون



شکل ۱- نمایش شمع‌های دارای یک، دو و سه هلیکس و معرفی

پارامترها

در این پژوهش مدلسازی آزمایشات انجام شده توسط نبی‌زاده [۱۴] در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. شکل (۱) شماتیک مدل آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. شافت‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع فولاد St-37 با قطرهای ۱۶ میلیمتر، ۲۰ میلیمتر و ۲۵ میلیمتر و به طول ۷۷ سانتیمتر بوده است. پره‌ها از نوع فولاد St-37 با ضخامت ۳ میلیمتر و قطر ۱۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق از تعداد یک پره، دو پره و سه پره بر روی هر شافت استفاده شد به گونه‌ای که در شمع‌های دارای یک پره، پره در منتهی الیه شافت نصب گردید، و در شمع‌های دارای دو پره، پره اول در منتهی الیه شافت و پره دوم به فاصله ۱۵ سانتیمتر از پره اول بر روی شافت نصب شد. همچنین در شمع‌های دارای سه پره، پره‌ها با فاصله ۱۵ سانتیمتر از یکدیگر نصب شدند (شکل (۱)). تحلیلها استاتیکی غیر خطی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت.

در جداول (۲) و (۳) مشخصات مصالح شمع و خاک مورد استفاده در مدلسازی ارائه شده است. برای مدلسازی خاک از المان سالیید^۶، و مدل رفتاری مورکولمب^۷ و برای مدلسازی شمع از المان پوسته^۸ و با در نظر گرفتن رفتار الاستیک، استفاده شده است. بار فشاری به صورت جابجایی به نوک شمع وارد شده که مقدار آن برابر با ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. حل معادلات در آباکوس به روش ضمنی^۹ انجام شده است.

جدول ۲- خواص خاک به کار رفته در پژوهش

وزن مخصوص خشک	kg/cm ³	۱/۵۴۶
زاویه اصطکاک	درجه	۳۷
چسبندگی	kg/cm ²	۰/۰۵
مدول الاستیسیته	kg/cm ²	۲۷۰

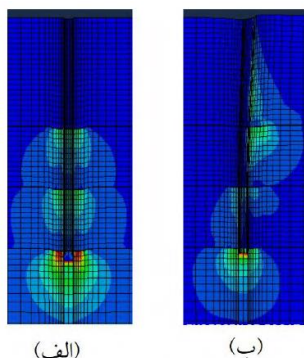
^۶ - Solid^۷ - Mohr-Coulomb^۸ - Shell^۹ - Implicit

۳- نتایج و تحلیل

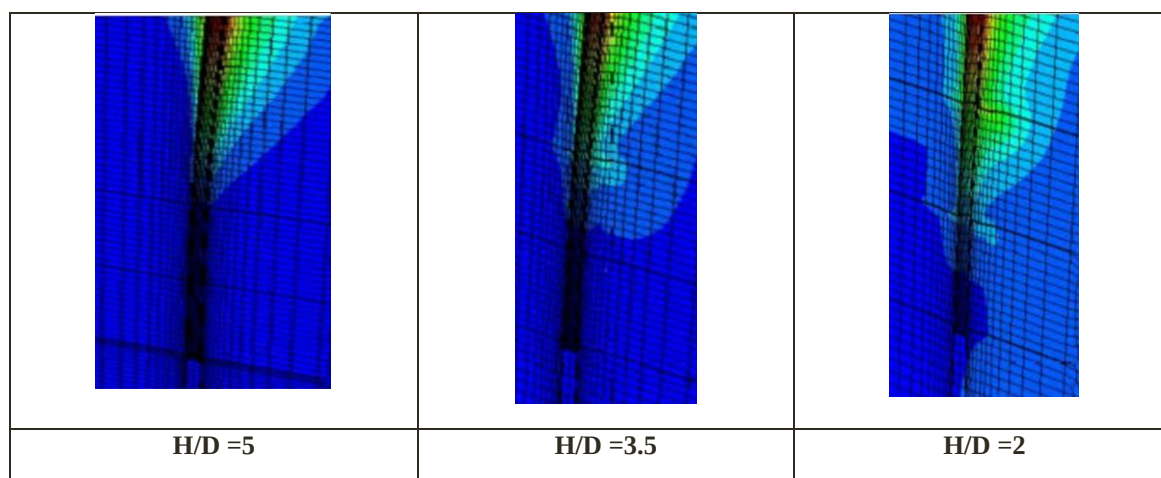
حالت بدون بار جانبی و همرا با بار جانبی یکسان بوده و این موضوع دوباره بیانگر حساسیت بسیار بالای انتخاب عمق مدفون مناسب برای شمع مارپیچ می‌باشد.

برای فهمیدن بیش‌تر مکانسیم انتقال بار، کانتورهای جابه جایی خاک در راستای اعمال بار جانبی در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش عمق مدفون شمع، تداخل کانتورهای جابه جایی افقی با صفحات مارپیچ کم‌تر شده؛ به طوری که در نسبت H/D برابر با ۵ تقریباً هیچ گونه تداخلی دیده نمی‌شود. این روند منجر به افزایش ظرفیت باربری فشاری شمع تحت بار جانبی در عمق مدفون بالاتر شده است.

جهت درک بیش‌تر مکانسیم گسیختگی شمع مارپیچ، معمولاً از آنالیز حالت تنش استفاده می‌شود. در شکل (۲) کانتورهای تنش شمع مارپیچ سه پره در نسبت H/D برابر با ۳/۵، تحت بار محوری خالص و در ترکیب با بار جانبی نشان داده شده است. در شکل (۲) میتوان دریافت که صفحات شمع مارپیچ تحت بار محوری خالص، تاثیر به سزایی در ظرفیت باربری محوری این گونه از شمع‌ها دارند. همچنین زمانی که بار محوری و جانبی با هم اثر داده می‌شوند، مشاهده می‌شود که بار جانبی عملاً یک سمت از کانتورهای تنش دو صفحه بالایی را حذف کرده؛ در نتیجه کاهش بسیار شدیدی در ظرفیت باربری فشاری شمع رخ میدهد؛ اگرچه از شکل میتوان دریافت که حباب تنش ایجاد شده در پایین‌ترین صفحه مارپیچ، در



شکل ۲- کانتورهای تنش شمع مارپیچ سه پره با نسبت $H/D=3/5$:
(الف) تحت بار محوری خالص، (ب) تحت ترکیب بارهای محوری و جانبی



شکل ۳- کانتورهای جابه جایی جانبی شمع مارپیچ سه پره برای نسبت های H/D متفاوت

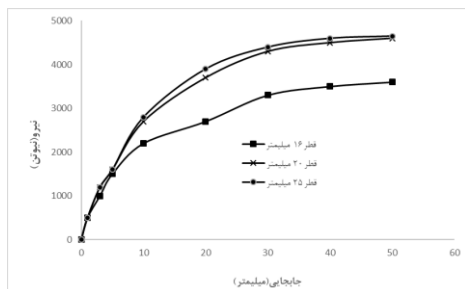
شکل (۴)، تاثیر تعداد پره شمع روی ظرفیت باربری در قطره‌های مختلف شمع را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شمع یک پره، مشاهده می‌گردد که در حالتی که قطر شفت ۲۵ میلی‌متر باشد ظرفیت باربری شمع و خاک نسبت به حالتی که قطر شفت ۲۰ میلی‌متر، ۱ درصد و در حالتی قطر شفت ۱۶ میلی‌متر باشد ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. برای شمع دو پره، در حالتی که قطر شفت ۲۵ میلی‌متر باشد ظرفیت باربری شمع و خاک نسبت به حالتی که قطر شفت ۲۰ میلی‌متر، ۲ درصد و در حالتی قطر شفت ۱۶ میلی‌متر باشد ۲۴ درصد افزایش می‌یابد. برای شمع سه پره در حالتی که قطر شفت ۲۵ میلی‌متر باشد ظرفیت باربری شمع و خاک نسبت به حالتی که قطر شفت ۲۰ میلی‌متر، ۵ درصد و در حالتی قطر شفت ۱۶ میلی‌متر باشد ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

شکل (۵)، تاثیر تعداد قطر شمع روی ظرفیت باربری در پره‌های مختلف شمع را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای شمع با قطر ۱۶ میلی‌متر، در حالتی که تعداد پره شمع ۳ عدد باشد ظرفیت باربری شمع و خاک نسبت به حالت ۲ پره، ۱۲٫۵ درصد و در حالت ۱ پره، ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین برای شمع با قطر ۲۰ میلی‌متر، در حالتی که تعداد پره شمع ۳ عدد باشد ظرفیت باربری شمع و خاک نسبت به حالت ۲ پره، ۱۳ درصد و در حالت ۱ پره، ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. در نهایت برای شمع با قطر ۲۵ میلی‌متر، در حالتی که تعداد پره شمع ۳ عدد باشد ظرفیت باربری شمع و خاک نسبت به حالت ۲ پره، ۱۴ درصد و در حالت ۱ پره، ۱۶ درصد افزایش می‌یابد.

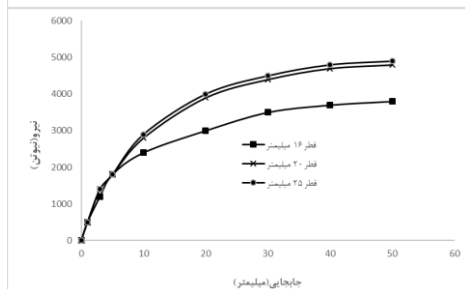
جدول ۴. بیشینه نتایج به دست آمده از تحلیل مدل‌ها

نوع شمع	ظرفیت مدل براساس مقدار جابجایی (N)	بیشینه جابجایی مدل (mm)
قطر ۱۶ میلی‌متر-یک پره	۳۶۴۳	۵۰
قطر ۱۶ میلی‌متر-دو پره	۳۶۶۱	۴۳
قطر ۱۶ میلی‌متر-سه پره	۳۹۶۱	۳۴
قطر ۲۰ میلی‌متر-یک پره	۴۵۷۱	۵۰
قطر ۲۰ میلی‌متر-دو پره	۴۵۹۱	۴۳
قطر ۲۰ میلی‌متر-سه پره	۴۷۹۱	۳۴
قطر ۲۵ میلی‌متر-یک پره	۴۵۹۷	۵۰
قطر ۲۵ میلی‌متر-دو پره	۴۶۹۸	۴۳
قطر ۲۵ میلی‌متر-سه پره	۴۹۷۶	۳۴

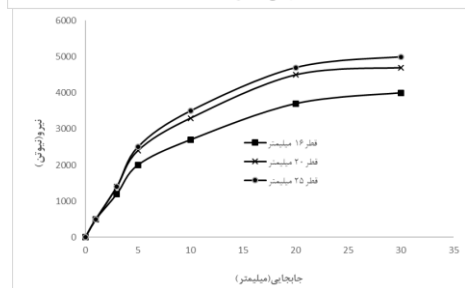
شمع یک
پره



شمع دو
پره



شمع سه
پره

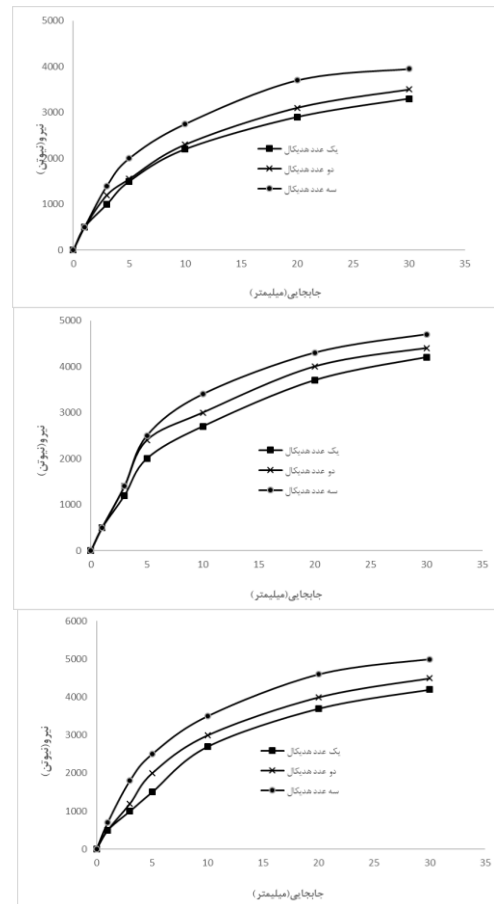


شکل ۴- مقایسه تاثیر تعداد پره شمع در ظرفیت شمع‌ها

بر خاک دارد. تغییر قطر شافت نیز می تواند تاثیری مثبت در کنترل تنش ها داشته باشد، به نحوی که افزایش قطر شافت با افزایش سطح تنش باعث کاهش تنش های وارده بر خاک می گردد. افزایش روند بارگذاری جانبی، باعث تداخل کانتورهای جابه جایی جانبی و قائم می شود. این رویکرد منجر به کاهش ظرفیت باربری فشاری شده است. با بیشتر شدن عمق مدفون تاثیر بار جانبی کاهش می یابد. ظرفیت باربری فشاری شمع های مارپیچ تحت بار جانبی به شدت تابع عمق مدفون با نسبت H/D نسبت عمق مدفون بالاترین پره به قطر پره می باشد، به گونه ای که با بیشتر شدن این نسبت، تاثیر بار جانبی کاهش می یابد.

منابع

- [1] Perlow JM. Helical Pile Acceptance Criteria, Design Guidelines, and Load Test Verification. *Geo-Frontiers Adv. Geotechnical Engineering*. 2011; 94-102. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)11](https://doi.org/10.1061/41165(397)11)
- [2] Cerato AB, Victor R. Effects of Long-Term Dynamic Loading and Fluctuating Water Table on Helical Anchor Performance for Small Wind Tower Foundations. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2009; 23:251-61 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000013)
- [3] Vesic AS. Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. 1971; 1183-1205. <https://doi.org/10.1061/JSEFAQ.0001659>
- [4] Wang L, Zhang P, Ding H, Tian Y, Qi X. The uplift capacity of single-plate helical pile in shallow dense sand including the influence of installation. *Marine Structures*. 2020; 71, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102697>
- [5] Garakaki AA, Maleki J. Load Capacity of Helical Piles with Different Geometrical Aspects in Sandy and Clayey Soils: A Numerical Study. In *International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures*. 2019; Springer, Cham, 73-84. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34178-7_7
- [6] Ghosh P, Samal S. Ultimate pullout capacity of isolated helical anchor using finite element analysis. In *Soil Dynamics and Earthquake Geotechnical Engineering*. 2019; Springer, Singapore. 237-245. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0562-7_26
- [7] Abbas HO, Ali OK. Comparing the axial performance of screw pile with ordinary piles in soft clay layer overlaying sandy soil. In *Modern Applications of Geotechnical Engineering and Construction*. 2021; Springer, Singapore. 119-132. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9399-4_11



شکل ۵- مقایسه تاثیر قطر شمع در ظرفیت شمع ها

قطر
شفت
۱۶
میلی
متر

قطر
شفت
۲۰
میلی
متر

قطر
شفت
۲۵
میلی
متر

با توجه به شکلهای (۴) و (۵) می توان مقدار جابجایی به نیروی وارده شده برای هر یک از مدل ها را تا انتهای تحلیل را مشاهده نمود. در جدول (۴) میزان بیشینه جابجایی و ظرفیت باربری هر کدام از مدل ها نشان داده شده که در بخش نتیجه گیری از این نتایج استفاده و نتیجه گیری های لازم استخراج شده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد و تاثیر تغییر در تعداد پره و تغییر قطر شافت در شمع های حلزونی پرداخته شد. تغییر در تعداد پره تاثیر زیادی در کاهش تنش های وارده بر پره ها و در نهایت تنش های وارده

[8] Bak HM, Halabian AM, Hashemolhosseini, H, Rowshanzamir M. Axial response and material efficiency of tapered helical piles. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021; 13(1), 176-187.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.04.007>

[9] Fayez AF, El Naggar MH, Cerato AB. Assessment of SSI effects on stiffness of single and grouped helical piles in dry sand from large shake table tests. Bulletin of Earthquake Engineering. 2021; 1-40. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01257-z>

[10] Saleem HD, Aldefae AH, Mearek SM. Effect of Wing Ratio of Single Helix Screw Pile on Ultimate Compression Capacity Embedded in Cohesionless Soil. In Geotechnical Engineering and Sustainable Construction, 2022; Springer, Singapore. 367-378. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6277-5_29

[۱۱] فلاحپور، محمد؛ شوش پاشا، عیسی. ارزیابی ظرفیت باربری قائم شمع تحت بار جانبی در خاک ماسه‌ای بابلسر. دومین همایش ملی مهندسی سازه ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۴. شناسه ملی کنفرانس: ISSEE02.

<https://www.symposia.ir/ISSEE02>

[۱۲] نافع پسند، بهنام؛ هادیانی، نوید؛ اقبالی، امیر حسین. تحلیل ظرفیت باربری پیچشی گروه شمع‌های مایل تحت بارهای جانبی برون محور. کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران، ۱۳۹۷. شناسه ملی کنفرانس: CAUM01.

<https://cum2018.com.siteindices.com/>

[۱۳] معمار، میثم؛ زمردیان، سید محمدعلی؛ وکیلی، امیرحسین. بررسی اثر شکل مقطع شمع در ظرفیت باربری جانبی گروه شمع در خاک ماسه‌ای. مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۳۶، شماره ۳، ۱۳۹۹: ۴۷-۳۹. <https://doi.org/10.24200/j30.2019.53173.2536>

[۱۴] نبی زاده، سید فرهاد؛ جانعلی زاده؛ عسکر، مطالعه آزمایشگاهی و صحرایی عملکرد شمع‌های پیچی در خاک ماسه‌ای، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۳، شماره ۳، ۱۳۹۵: ۱۵-۵.

<https://doi.org/10.22065/jsce.2016.40247>