

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

سیدسجاد حسینی<sup>۱</sup>، محسن کرامتی<sup>۲\*</sup>، رضا حسین پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- [sajjadhosseini@shahroodut.ac.ir](mailto:sajjadhosseini@shahroodut.ac.ir)

۲- [Keramati@shahroodut.ac.ir](mailto:Keramati@shahroodut.ac.ir)

۳- [hoseinpour@outlook.com](mailto:hoseinpour@outlook.com)

چکیده:

استفاده از شمع‌های پیچشی، یکی از روش‌های نوین بهسازی می‌باشد که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع شمع‌ها که مهم‌ترین آن دوستدار محیط‌زیست بودن است، در سالیان اخیر رواج بسیاری پیدا کرده است. از آنجایی که در هنگام وارد شدن نیروهای فشاری، شافت شمع نقش اساسی و در هنگام وارد شدن نیروهای کششی، بال (پره‌ها) نقش اساسی در تحمل این نیروها را ایفا می‌کنند، بنابراین پیشبینی رفتار شمع‌ها تحت بارگذاری کششی پیچیده‌تر از بارگذاری فشاری است.

در این پژوهش، به منظور پیشبینی رفتار کششی شمع‌های پیچشی تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و همچنین بررسی افزودن پره دوم به شمع پیچشی تک‌پره، با استفاده از دستگاه مدلسازی فیزیکی ۱g، در دو تراکم نسبی بالا (۹۵٪) و پایین (۴۵٪) مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که در آزمایش‌های مونوتونیک، ظرفیت باربری نهایی با افزایش سرعت بارگذاری تا حدود ۵۶٪ کاهش یافته، از طرف دیگر با افزایش تراکم نسبی و افزایش تعداد پره‌ها، ظرفیت باربری نهایی به ترتیب تا حدود ۴۶۸٪ و ۵۴٪ افزایش پیدا کرده است.

واژگان کلیدی:

شمع پیچشی، مدلسازی فیزیکی، آزمایش منونونیک، سرعت بارگذاری، ظرفیت باربری نهایی.

\* محسن کرامتی، استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شاهرود.

ایمیل: [Keramati@shahroodut.ac.ir](mailto:Keramati@shahroodut.ac.ir) (نویسنده مسئول مقاله)

# Laboratory Investigation of behavior of Helical piles under monotonic loading at different loading speeds

S. Hosseini <sup>۱</sup>, M. Keramati <sup>۲</sup>, R. Hoseinipour <sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>-master's degree student of geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering of Shahrood University, Shahrood, Iran and

<sup>۲</sup>- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering of Shahrood University, Shahrood, Iran.

<sup>۳</sup>- Ph.D Student of geotechnical engineering of Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

## 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 helixes 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 piles, 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 less environmental risks and compatible with nature.

According to past studies, it has been found that the current knowledge of the performance of this type of piles 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.

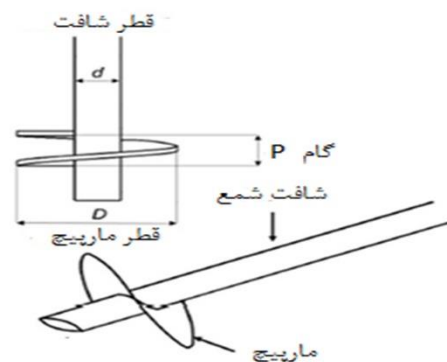
The results obtained in this study show that the effect of relative soil compaction on improving the bearing capacity of the soil was more significant than the loading speed and the number of helixes. According to the results of the monotonic tests, the final bearing capacity decreased by about 56% with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

**Keywords:** Helical pile, Physical modeling, Monotonic test, loading speed, ultimate capacity.

## ۱ - مقدمه

اکثر روش‌های بهسازی، پایدار و مقاوم‌سازی خاک‌های مسئله‌دار (اعم از سست، واگرا، روانگرا، رمبنده و خاک ماسه‌ای ناپایدار و ...) پر هزینه، مدت‌دار، اجرای سخت و از همه مهم‌تر در زمینه زیست‌محیطی خسارات فراوانی به محیط‌زیست وارد می‌کنند. بنابراین امروزه مهندسين ژئوتکنیک به دنبال روش‌های نوین بهسازی و دوستدار محیط‌زیست هستند.

یکی از این روش‌ها، مسلح‌سازی خاک‌های مسئله‌دار با کمک شمع‌های پیچشی<sup>۱</sup> است. شمع‌های پیچشی نوعی از سیستم فونداسیون عمیق است که در امتداد شافت شمع یک یا چند پره دارند (در شکل ۱ شماتیک اجزای اصلی این نوع شمع‌ها نشان داده شده است) و انواع بارگذاری‌ها را به لایه‌های زیرین و عمیق‌تر منتقل می‌کنند.



شکل ۱. شماتیک اجزای اصلی شمع پیچشی [۱]

امروزه شمع‌های پیچشی، همانطور که پرکو<sup>۲</sup> و پک<sup>۳</sup> نشان دادند به طور گسترده‌ای توسط اکثر مهندسان شناخته شده است و می‌توانند به عنوان بخشی اساسی از فونداسیون‌های عمیق مورد استفاده قرار گیرد.<sup>[۲و۳]</sup> کوریان و شاه<sup>۴</sup> گزارش کردند که اخیراً شمع‌های پیچشی به عنوان فونداسیون‌های عمیق برای تحمل نیروهای فشاری و آپلیفت<sup>۵</sup> (بالابرنده) تا ۳۰۰۰ کیلونیوتن استفاده می‌شوند. بنابراین، می‌توان از آنها به عنوان فونداسیونی عمیق در سازه‌های معمول استفاده کرد.<sup>[۴]</sup> همچنین به گفته سیلوا<sup>۶</sup>، تسوها<sup>۷</sup> و همکاران، پرز<sup>۸</sup> و همکاران، شارما<sup>۹</sup> و همکاران در سال‌های اخیر، استفاده از شمع‌های پیچشی به عنوان فونداسیون‌های عمیق در کشورهایمانند ایالات متحده و برزیل فراگیر شده است.<sup>[۵-۸]</sup> شمع‌های پیچشی عمدتاً برای مقاومت در برابر نیروهای کششی

ایجاد شده توسط گشتاورهای واژگونی و آپلیفت، در سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند،<sup>[۹]</sup> بنابراین آنها به عنوان یک جایگزین بالقوه برای شمع‌های کوبیده‌شده معمولی مانند شمع‌های دریایی، پیشنهاد شده‌اند، و به دلیل تاثیر لنگر پیچشی، ظرفیت باربری آپلیفت زیادی را فراهم می‌کنند.<sup>[۱۱-۱۳]</sup> استفاده از شمع‌های پیچشی باعث افزایش ظرفیت باربری و ظرفیت بیرون کشیدگی می‌شود.<sup>[۱۲]</sup>

شمع‌های پیچشی از شمع‌های نوینی هستند که در مقایسه با انواع شمع‌ها و شمع‌های سنتی نیاز به زمان و هزینه کمتر و تجهیزات و نیروی کمتری دارد بنا به همین دلیل استفاده از شمع‌های پیچشی در سالیان اخیر رواج زیادی داشته و جزء اقتصادی‌ترین روش‌هاست. از دیگر مزایای شمع‌های پیچشی بر خلاف انواع فونداسیون‌های دیگر قابلیت اجرا در هر نوع شرایطی از آب و هواست مانند اجرایی بودن در مناطق ساحلی و دریایی که امروزه رواج بیشتری دارد. از آنجا که برای این نوع شمع 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 می‌باشد و همچنین بلافاصله بعد از نصب شمع می‌توان سازه را نصب کرد و بارگذاری نمود.<sup>[۱۴]</sup>

دی برناردو<sup>۱۰</sup>، مطابق با یک برنامه آزمایش میدانی در خاک‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ انجام داد و دریافت که شمع‌های پیچشی نه تنها در رسوبات ریزدانه بلکه در همه انواع خاک حتی مناطق یخ زده و سایت‌های سنگی قابل استفاده هستند.<sup>[۱۵]</sup>

بنابراین فونداسیون شمع‌های پیچشی در دامنه‌ی وسیعی از انواع خاک اعم از زمین‌های شنی، سیلابی، باتلاقی، جلگه‌ای و مناطق دارای یخبندان قابل اجرا می‌باشد. در مناطقی که به راحتی قابل دسترسی نیستند مانند کوهستان‌ها، استفاده از این نوع شمع‌ها توصیه شده است. برخی دیگر از مزایای اصلی استفاده از این نوع شمع‌ها برای مهندسين ژئوتکنیک، عبارتند از، زمان کوتاه نصب با حداقل سر و صدا و ارتعاش (برای نصب نیازی به وایبره کردن نیست)، مناسب بودن در خاک‌های سخت، سهولت نصب با توجه به دسترسی محدود، وزن سبک، کاهش خطرات حفاری (عدم نیاز به حفاری و انتقال خاک از محل)، کاهش دست‌خوردگی خاک هنگام نصب، کنترل کیفیت محل با اندازه‌گیری گشتاور نصب، خطرات کمتر محیط‌زیستی و سازگار با طبیعت (امکان استفاده مجدد و به مراتب کاهش قابل توجه هزینه)، در نتیجه، برای مزایای اصلی در اندازه

معمول این نوع شمع‌ها، با توجه کارایی و هزینه، انتظار می‌رود که قابلیت استفاده از شمع‌های پیچشی افزایش یابد.<sup>[۱۴]</sup>

به طور کلی، علیرغم مزایای زیاد شمع‌های پیچشی مرور بر ادبیات و سابقه موضوع (که در بخش بعد به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد) تنها بینش محدودی در مورد رفتار آن‌ها در مقایسه با انواع دیگر شمع‌ها ارائه می‌دهد، همانطور که توسط مرفیلد<sup>[۱۱]</sup>، این موضوع بیان شد، درک فعلی از این نوع شمع‌ها هنوز رضایت‌بخش نیست، و روش‌های طراحی موجود برای پیش‌بینی ظرفیت باربری آپلیفت ناکافی هستند، و مدل‌های ارزیابی گشتاور به طور کلی معتبر نیستند، زیرا به ویژگی‌های خاک (که در طول نصب تغییر می‌کنند) و خواص هندسی شمع بستگی دارند.<sup>[۱۶]</sup> بنابراین نیاز به تحقیقات بیشتری در رابطه با شمع‌های پیچشی وجود دارد.

از نوآوری این پژوهش می‌توان به روش انجام آزمایش‌های مونوتونیک که به صورت ۱g با کمک جعبه بزرگ مقیاس موجود در مجموعه آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود قرار گرفته است اشاره نمود، همچنین آزمایش‌های در دو تراکم نسبی سست و متراکم و در سرعت‌های مختلف بارگذاری انجام شده است، که به طور کامل تاثیر این پارامترها بر ظرفیت باربری نهایی بررسی شده است و در آینده امید است از نتایج این پژوهش بتوان در طراحی‌ها استفاده نمود و به کاربرد بیشتر این شمع‌ها در کشورمان اضافه نمود.

## ۱-۱- پیشینه پژوهش

به طور کلی برای مطالعه رفتار پی‌های عمیق که شمع‌های پیچشی نیز نوعی پی عمیق هستند، از چهار روش، تحلیلی، عددی، آزمایش‌های میدانی و روش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. روش‌های تحلیلی و مدلسازی عددی به دلیل پیچیدگی و غیرقابل پیش‌بینی بودن دقیق رفتار مصالح ژئوتکنیکی، نیاز به ساده سازی و فرضیات زیادی دارد که بر روی جواب‌ها تأثیرگذار است. از طرفی آزمایش‌های بزرگ مقیاس و میدانی اگرچه جواب‌های مناسب و واقعی‌تری می‌دهد، ولی به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه بالا گاهی امکان‌پذیر نیست. آزمایش مدلسازی فیزیکی، نمونه‌ای از آزمایش واقعی است که می‌توان ویژگی‌های مدل واقعی را مطالعه نمود. از ویژگی‌های اصلی مدل‌های فیزیکی، هزینه پایین، زمان کوتاه انجام آزمایش‌ها و کنترل بیشتر و دقیق‌تر بر روی پارامترهای مورد مطالعه

است.<sup>[۱۷]</sup> در ادامه مهم‌ترین ترین تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است.

احمد و همکاران، عملکرد شمع مارپیچی مخروطی تعبیه‌شده در ماسه سست تحت بارگذاری استاتیکی و سیکلیک آپلیفت، با استفاده از تحلیل المان محدود ۳ بعدی و نرم‌افزار Plaxis 3D پرداختند، با توجه به نتایج آن‌ها، تحت تأثیر بارگذاری استاتیکی آپلیفت، هر چه تعداد مارپیچ‌ها بیشتر باشد، ظرفیت آپلیفت شمع پیچشی با افزایش تعداد مارپیچ‌ها افزایش یافته است، و به تبع جابجایی در خاک کمتر شده است، همچنین تاثیر افزایش تعداد مارپیچ‌ها در یک شمع بیشتر از افزایش مقدار فواصل بین مارپیچ‌ها تحت اثر بارگذاری مونوتونیک و سیکلیک آپلیفت، در کاهش دامنه جابجایی بوده است.<sup>[۱۸]</sup>

خزایی و اسلامی<sup>[۱۲]</sup>، از طریق مدلسازی فیزیکی در مقیاس کوچک با استفاده از دستگاه FCV<sup>۱۳</sup> (فشار همه جانبه مخروطی)، آزمایش‌های فشاری و کشش محوری با تمرکز بر رفتار نیرو-جابجایی برای ارزیابی عملکرد FCV برای شمع‌های مدل شده در خاک ماسه‌ای انجام دادند، نتایج آن‌ها نشان داده است زمانی که تعداد پره و تراکم نسبی خاک بیشتر شده است، ظرفیت باربری شمع پیچشی افزایش پیدا کرده است و عملکرد مطلوب‌تری دارند، همچنین یک شمع پیچشی با دو پره مارپیچ توانسته تقریباً معادل یک شمع فولادی عمل کرده باشد، زمانی که قطر شمع فولادی با قطر پره مارپیچ یکسان بوده است.<sup>[۱۴]</sup>

عباس و علی<sup>[۱۴]</sup>، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدلسازی بارگذاری فشاری و سرعت کرنش ثابت، پارامترهای تأثیرگذار بر ظرفیت شمع‌های پیچشی تعبیه شده در خاک رس نرم قرار گرفته بر روی خاک ماسه‌ای متراکم را بررسی کردند، با توجه به نتایج آن‌ها افزودن مارپیچ به شفت شمع برای افزایش ظرفیت شمع‌های پیچشی در مقایسه شمع پیچشی و شمع فولادی معمولی، کارآمدتر بوده است و ظرفیت فشاری شمع‌های پیچشی هنگام افزایش تعداد مارپیچ، صرف نظر از نوع خاک، قطر مارپیچ و نسبت L/D افزایش یافته است.<sup>[۱۹]</sup>

جمیل<sup>[۱۵]</sup> و عباس، با کمک مدلسازی آزمایشگاهی تأثیر فاصله بین گروه شمع‌های پیچشی و تعداد پره‌های مارپیچ بر ظرفیت فشاری در خاک ماسه‌ای و رس نرم را بررسی کردند، با توجه به نتایج آن‌ها افزایش تعداد صفحه مارپیچ در شمع پیچشی باعث افزایش



شکل ۲. ماسه فیروزکوه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه فیروزکوه

پارامتر	مقدار	واحد
$D_{10}$	۰/۷۶	mm
$D_{30}$	۱/۰۷۶	mm
$D_{50}$	۱/۳۱۸	
$C_u$	۱/۸۸۹	—
$C_c$	۱/۰۸۶	—
$e_{max}$	۰/۹۶	—
$e_{min}$	۰/۶۶	—
$\gamma_{d max}$	۱۵/۶۹	$kN / m^3$
$\gamma_{d min}$	۱۳/۲۳	$kN / m^3$
$\gamma_{d(Dr=45\%)}$	۱۴/۲۲	$kN / m^3$
$\gamma_{d(Dr=95\%)}$	۱۵/۴	$kN / m^3$
$V_s(Poisson's ratio)$	۰/۳	—
$G_{soil}(shear modulus)$	$\approx 30$	Mpa
$\varphi_{(Dr=45\%)}$	۳۱/۵	—
$\varphi_{(Dr=95\%)}$	۳۸/۱	—
$C_{(Dr=45\%)}$	۰/۱۸ $\approx$	kPa
$C_{(Dr=95\%)}$	۳/۹۱ $\approx$	kPa

با توجه به مشخصات خاک که در جدول ۱ بیان شده است خاک ماسه‌ای مورد استفاده با دانه‌بندی یکنواخت و بدانه‌بندی شده (SP)<sup>۱۶</sup> مشخص می‌شود.

ظرفیت فشاری نهایی در گروه شمع‌ها شده است و هنگامی که فاصله شمع‌ها بین شمع‌های گروهی افزایش یافته، ظرفیت فشاری نهایی گروه شمع‌ها در خاک ماسه‌ای افزایش یافته در حالی که در خاک رسی نرم کاهش یافته است.<sup>[۲۰]</sup>

حسین پور و همکاران، با انجام آزمایش‌های مونوتونیک در سرعت بارگذاری ۱۸mm/min به روش مدلسازی فیزیکی ۱g، اثر افزودن مارپیچ دوم به شمع تک مارپیچ بر عملکرد آن را در خاک ماسه‌ای بررسی کردند، نتایج آن‌ها نشان داده است که افزودن مارپیچ دوم، باعث افزایش ظرفیت کششی و فشاری شده است. همچنین تاثیر افزودن مارپیچ دوم به شمع تک مارپیچ برای ظرفیت باربری کششی و فشاری مستقل از تراکم نسبی ماسه است. با این حال، هر دو عامل افزایش تراکم نسبی و تعداد پره‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شده اما تاثیر افزایش تراکم نسبی بسیار بیشتر از افزایش تعداد پره‌ها بوده است.<sup>[۲۱]</sup>

با توجه به پیشینه تحقیق 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 این مقاله در درجه اول به بررسی رفتار این نوع شمع‌ها تحت سرعت بارگذاری مختلف و در ادامه به بررسی تاثیر تراکم نسبی خاک و تعداد پره در شمع‌های پیچشی می‌پردازد و عوامل مختلف ذکر شده و تاثیر آن‌ها بر ظرفیت باربری را باهم مقایسه کرده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مصالح مورد استفاده

خاک مورد استفاده ماسه فیروزکوه (D11)، نوعی ماسه سلیکاته و می‌باشد که شکل و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در شکل ۲ و جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد و همچنین شمع‌های مورد استفاده از جنس فلزی که به ترتیب دارای یک پره و دو پره می‌باشند که در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشند.

مخزن و متراکم سازی) می توان به تراکم های نسبی مورد نظر ۴۵٪ و ۹۵٪ رسید:

$$\gamma_d = \frac{w_s}{V} \quad (1)$$

$$Dr = \frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \times \frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \quad (2)$$

که در آن،  $\gamma_d$  وزن مخصوص خاک،  $w_s$  وزن خاک،  $V$  حجم مخزن،  $Dr$  تراکم نسبی،  $\gamma_{d \min}$  وزن مخصوص حداقل و  $\gamma_{d \max}$  وزن مخصوص حداکثر هستند.



شکل ۳. تصویر شمعی های پیچی مدل شده



شکل ۴. جعبه مدلسازی بزرگ مقیاس موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود

## ۲-۲- نحوه انجام آزمایش ها

از دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس با ابعاد مخزن ۱/۲۷×۱×۱/۲۰ متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) که قابلیت انواع مدلسازی ها را دارا می باشد و در شکل ۴ قابل مشاهده است، برای انجام آزمایش های مونوتونیک استفاده شده است.

برای انجام آزمایش های، ابتدا جعبه خالی را با توجه به تراکم نسبی مورد نظر، در ۵ لایه، وزن مشخصی از خاک که در ادامه توضیح داده شده است در هر لایه پر می کنیم، پس از پر شدن جعبه، شمع را برای انجام آزمایش با سرعت مشخص ۱۵ دور بر دقیقه در خاک با کمک دریل موجود در آزمایشگاه به طوری می پیچیم که کمترین دستخوردگی در خاک ایجاد شود. نوک شمع را با یک پیچ به لودسل می بندیم تا در طول آزمایش اتصال کامل برقرار باشد. سپس با توجه به آزمایش مربوطه بارگذاری لازم را اعمال می کنیم. شکل ۵ مراحل انجام آزمایش ها را نشان می دهد.

جعبه مورد نظر به روش بارش ماسه در ۵ لایه مشخص، پر شده است و با توجه به این که دو وجه آن شیشه ای و قابل رویت هست با مشاهده تغییرات سطح خاک که جزئی می باشد کنترل تراکم نسبی در آزمایش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است.

با استفاده از روابط ۱ و ۲ و داشتن حجم کل مخزن و میزان خاک برای پر شدن هر لایه (پس از عملیات پر کردن در حالت عادی



(الف)



(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۵. عکس مراحل انجام آزمایش‌ها؛ (الف) پر کردن جعبه، (ب) تراز کردن شمع، (ج) اتصال شمع با لودسل، (د) انجام آزمایش‌های مونونیک با سرعت‌های مختلف بارگذاری در تراکم نسبی‌های متفاوت، (ه) اعمال بارگذاری بر روی شمع

نسخه

## ۲-۳- برنامه آزمایش‌ها

در مجموع ۳۲ آزمایش مونوتونیک انجام شده است که به دو دسته بارگذاری کششی و فشاری تقسیم می‌شود، برای هر آزمایش، تست تکرار برای اطمینان از نتیجه در نظر گرفته شده است (۱۶ تست تکرار).  $^{17}T$ ،  $^{18}C$ ،  $^{19}Dr$  و  $^{20}V$  به ترتیب بیانگر آزمایش‌های کششی، آزمایش‌های فشاری، تراکم نسبی خاک و سرعت بارگذاری می‌باشد که در ادامه جزئیات هر آزمایش در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲. برنامه آزمایش‌های مونوتونیک

شماره تست (T)	تراکم نسبی (Dr)	شمع پیچشی مدل شده	سرعت بارگذاری (V) (mm/min)
تست ۱	۴۵٪	تک پره	۹۰
تست ۲	۴۵٪	تک پره	۵۰۰
تست ۳	۴۵٪	دو پره	۹۰
تست ۴	۴۵٪	دو پره	۵۰۰
تست ۵	۹۵٪	تک پره	۹۰
تست ۶	۹۵٪	تک پره	۵۰۰
تست ۷	۹۵٪	دو پره	۹۰
تست ۸	۹۵٪	دو پره	۵۰۰

ظرفیت باربری فشاری و کششی شده است که دلیل این موضوع می‌تواند این باشد، با افزایش سرعت بارگذاری، سرعت جابجایی شمع در خاک بیشتر شده است و به تبع گیرداری بین شمع و خاک کمتر شده است بنابراین ظرفیت باربری در هر دو حالت کششی و فشاری کاهش یافته است.

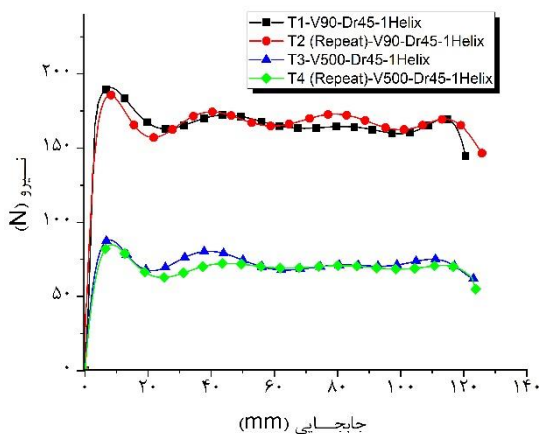
### ۳- ارائه و تحلیل نتایج

در ادامه به ترتیب نتایج بدست آمده از تاثیر سرعت بارگذاری، درصد تراکم نسبی و تعداد پره بر ظرفیت کششی و فشاری شمع پیچشی تک پره و دو پره به صورت نمودار نشان داده شده و توضیحات مربوطه بیان شده است. به دلیل همپوشانی و تطبیق نتایج آزمایش‌های اصلی و تکرار منحنی‌های مربوط به آزمایش‌های تکرار فقط در شکل ۶ نشان داده شده است و در بقیه شکل‌ها منحنی‌های مربوط به آزمایش تکرار ارائه نشده است.

### ۳-۱- تاثیر سرعت بارگذاری بر ظرفیت باربری کششی و

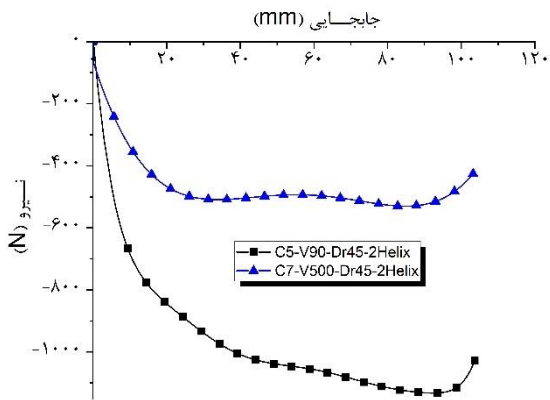
#### فشاری

با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش سرعت بارگذاری از  $90 \text{ mm/min}$  به  $500 \text{ mm/min}$  ظرفیت کششی و فشاری شمع پیچشی تک پره و دو پره در تراکم نسبی ۴۵٪، به طور مشابه در حدود ۵۲٪ و حداکثر تا ۵۶٪ کاهش یافته است (شکل ۶ تا ۹)، همچنین این مقایسه در تراکم نسبی ۹۵٪، ۳۰٪ و حداکثر ۴۰٪ می‌باشد (شکل ۱۰ تا ۱۳). این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت بارگذاری از  $90 \text{ mm/min}$  به  $500 \text{ mm/min}$  باعث کاهش در

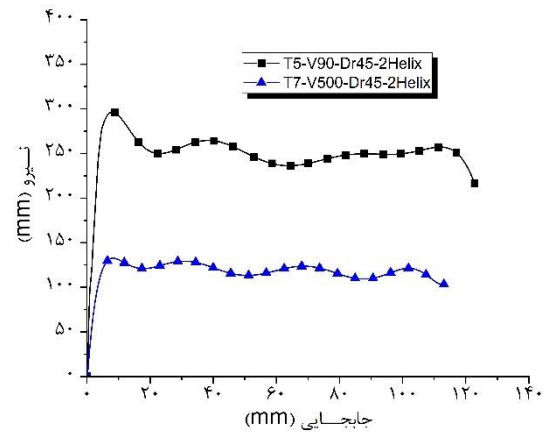


شکل ۶. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع تک پره در تراکم نسبی ۴۵٪

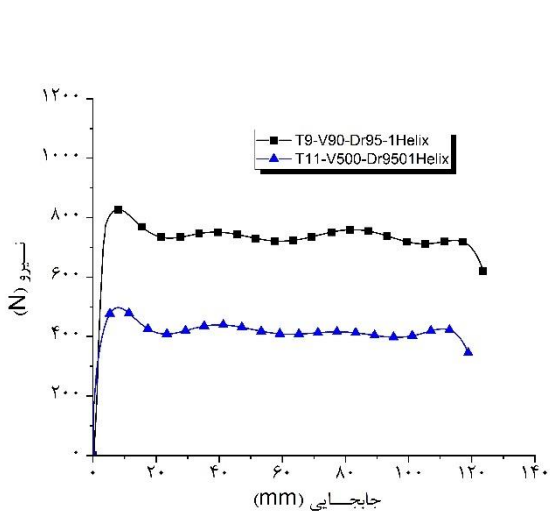




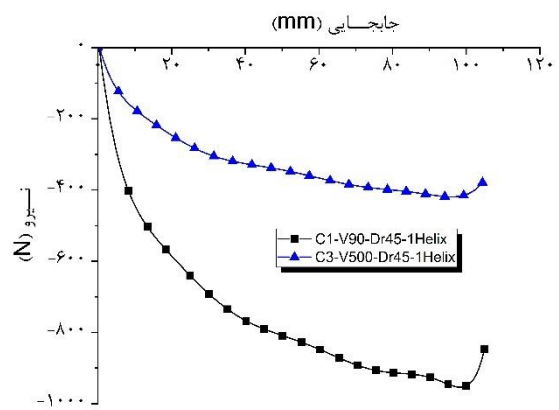
شکل ۹. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪



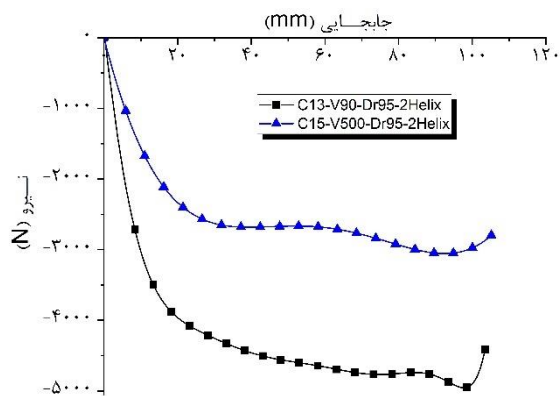
شکل ۷. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪



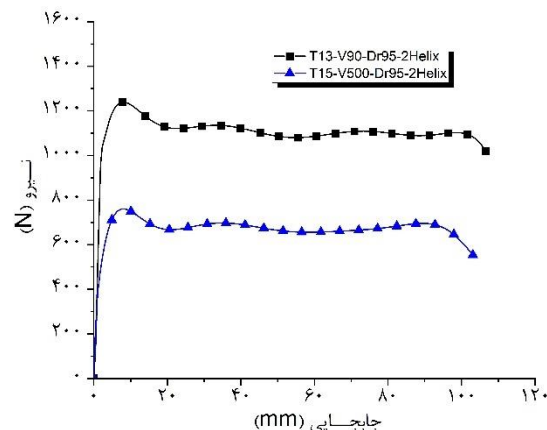
شکل ۱۰. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪



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



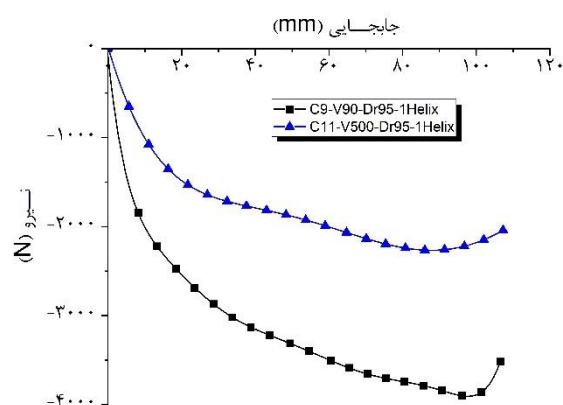
شکل ۱۳. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در تراکم نسبی ۹۵٪



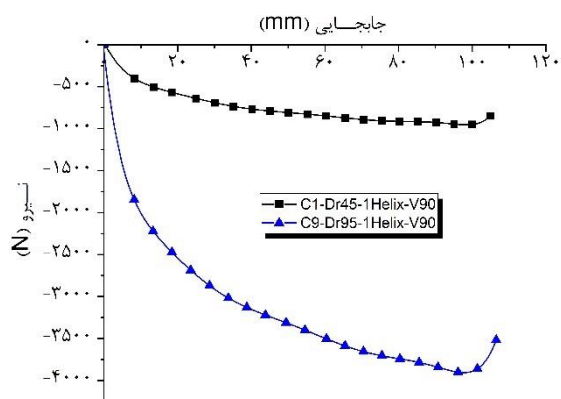
شکل ۱۱. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در تراکم نسبی ۹۵٪

### ۳-۲- تاثیر تراکم نسبی خاک بر ظرفیت باربری کششی و فشاری

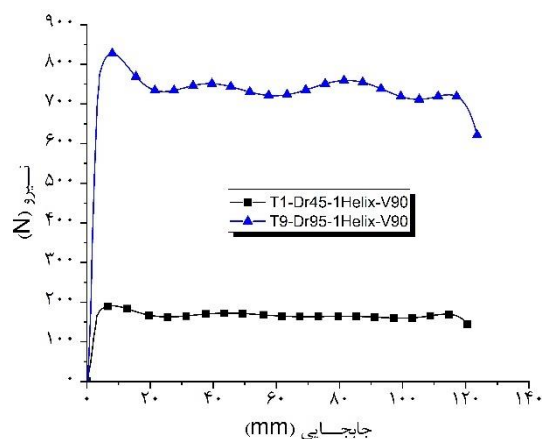
با افزایش درصد تراکم نسبی خاک از ۴۵٪ به ۹۵٪، ظرفیت کششی و فشاری شمع پیچشی تک‌پره و دو پره در حدود ۳۰۹٪ تا حداکثر ۴۶۸٪ افزایش یافته است که مقدار ۳۰۹٪ مربوط به سرعت بارگذاری ۹۰ mm/min و ۴۶۸٪ مربوط به سرعت بارگذاری ۵۰۰ mm/min بوده است که این نتایج در شکل‌های ۱۴ تا ۲۱ قابل مشاهده می‌باشد، با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که با افزایش درصد تراکم نسبی خاک از ۴۵٪ به ۹۵٪ ظرفیت باربری کششی و فشاری به طول قابل توجه‌ای افزایش یافته است که دلیل این موضوع نزدیک شدن ذرات خاک نسبت بهم (متراکم بودن خاک) و گیرداری بیشتر بین خاک و شمع می‌باشد.



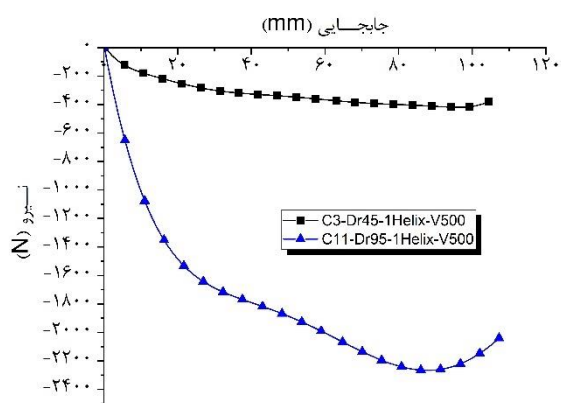
شکل ۱۲. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪



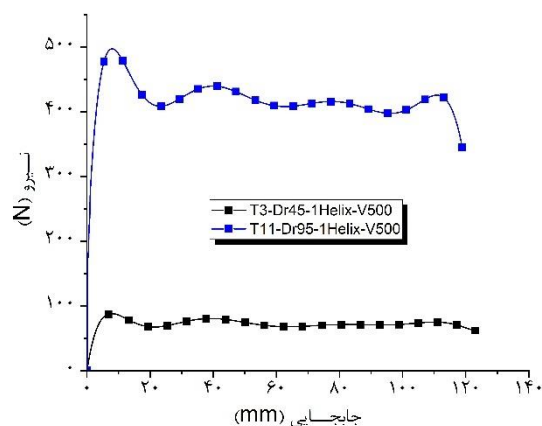
شکل ۱۶. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۹۰mm/min



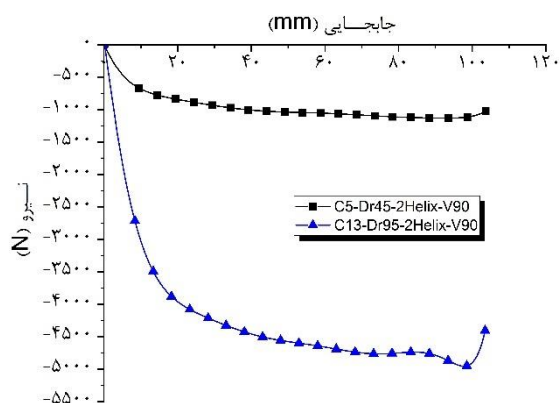
شکل ۱۴. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۹۰mm/min



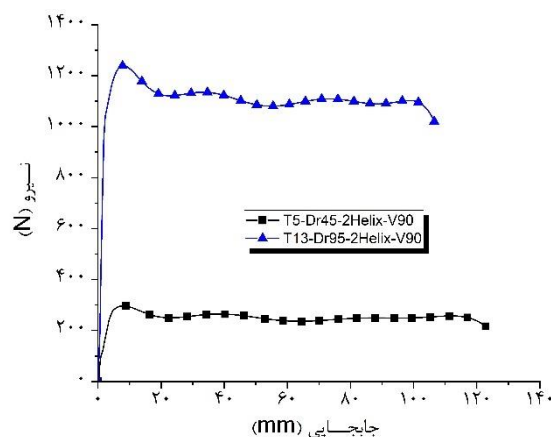
شکل ۱۷. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۵۰mm/min



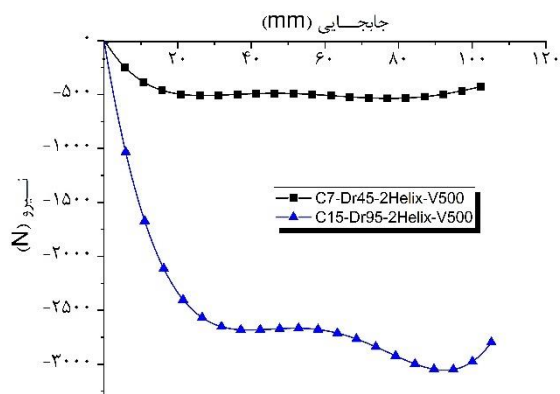
شکل ۱۵. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۵۰mm/min



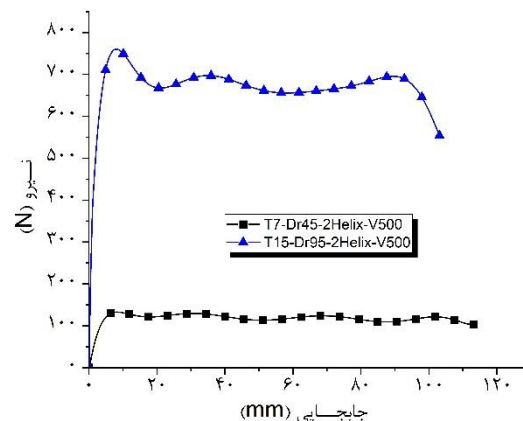
شکل ۲۰. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۹۰mm/min



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



شکل ۲۱. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۵۰mm/min

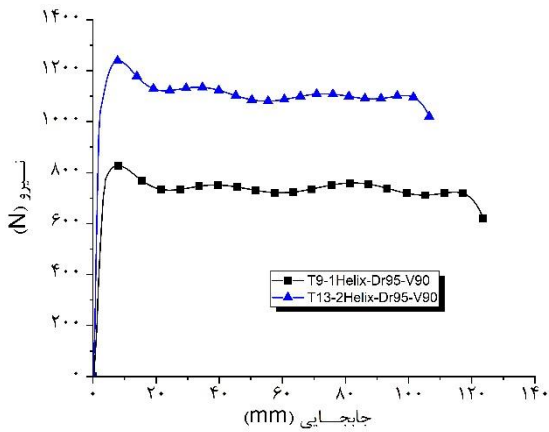


شکل ۱۹. تاثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۹۰mm/min

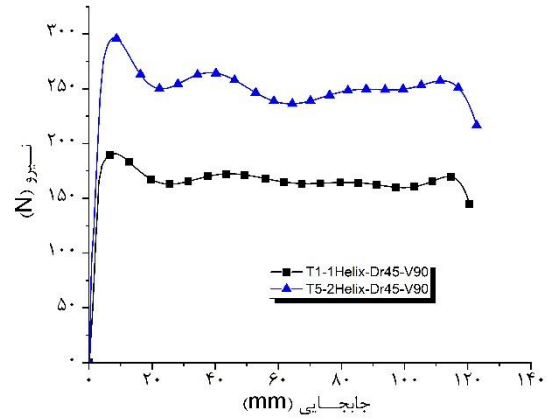
### ۳-۳- تاثیر تعداد پره بر ظرفیت باربری کششی و فشاری

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها برای تاثیر تعداد پره نشان داده است که با افزایش تعداد پره (از یک به دو) ظرفیت کششی شمع پیچشی دو پره نسبت به تک پره در تراکم نسبی ۴۵٪ و ۹۵٪ در حدود ۵۰٪ تا ۵۴٪ افزایش یافته است (شکل ۲۲ تا ۲۵) در حالی که همین مقایسه برای تاثیر تعداد پره بر ظرفیت فشاری در حدود ۱۸٪ و حداکثر ۳۸٪ می‌باشد (شکل ۲۶ تا ۲۹). نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری کششی و فشاری شمع دوپره نسبت به تک پره

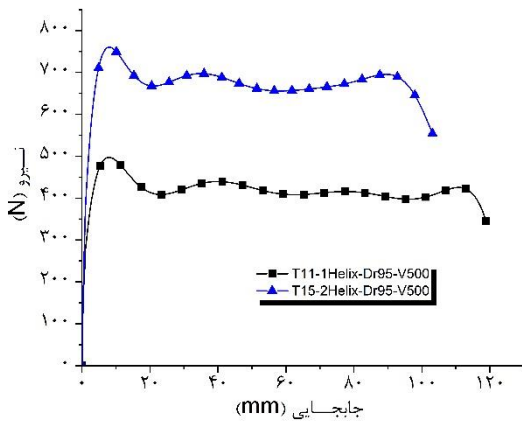
(افزایش تعداد پره از یک به دو) باعث افزایش ظرفیت باربری شده است و دلیل آن وجود پره دوم و ایجاد گیرداری بیشتر شمع در خاک می باشد.



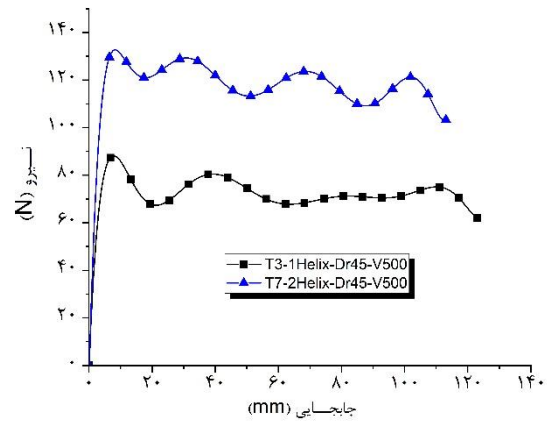
شکل ۲۴. تاثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰mm/min



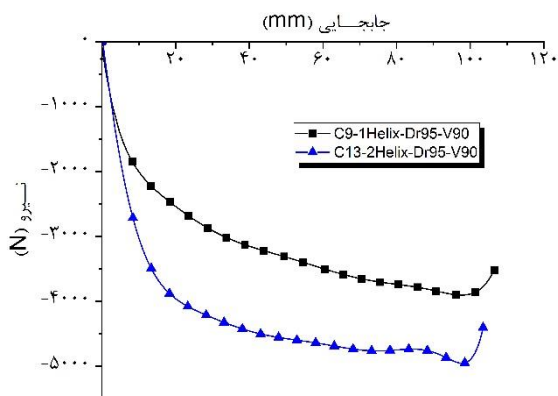
شکل ۲۲. تاثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰mm/min



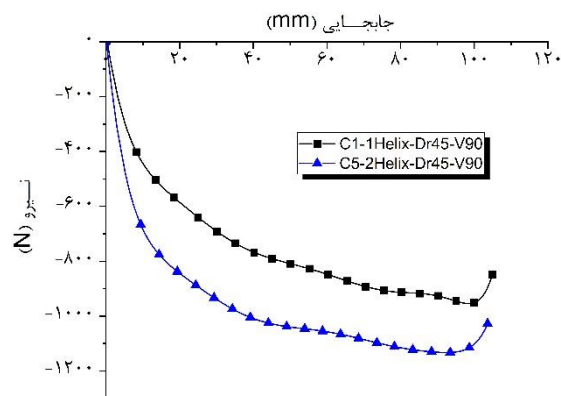
شکل ۲۵. تاثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰mm/min



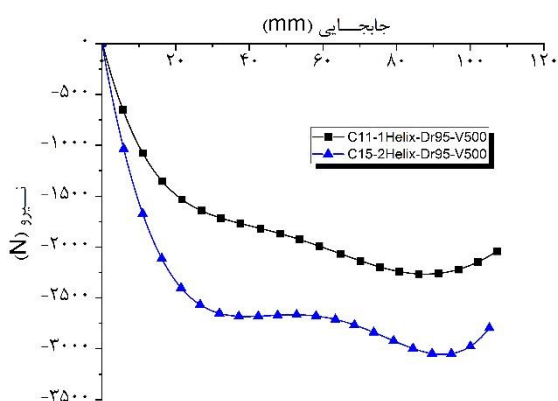
شکل ۲۳. تاثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰mm/min



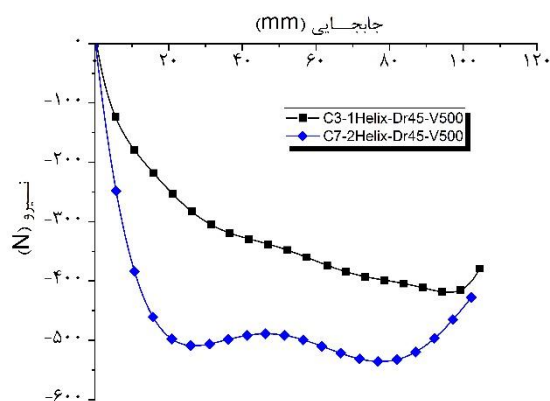
شکل ۲۸. تاثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری تک پره در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ mm/min



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



شکل ۲۹. تاثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع تک پره در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ mm/min



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

### ۳-۴ - نسبت ظرفیت کششی به فشاری

با توجه به نتایج بدست آمده که جزئیات آن در جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده می باشد ظرفیت نهایی کششی شمع تک پره حدود ۲۰٪ ظرفیت نهایی فشاری در تراکم نسبی ۴۵٪ و ۹۵٪ می باشد، در حالی که در شمع دو پره ظرفیت نهایی کششی حدود ۲۵٪ ظرفیت نهایی فشاری در تراکم نسبی ۴۵٪ و ۹۵٪ می باشد که این موضوع

نشان می‌دهد پیش‌بینی رفتار کششی در مقابل پیش‌بینی رفتار فشاری کار دشوارتری می‌باشد زیرا در هنگام آزمایش‌های کششی، پره‌ها در محدوده خاک دستخورده بالای خود مورد بررسی قرار گرفته‌اند در حالی که در آزمایش‌های فشاری عملکرد پره‌ها در برابر خاک دستخورده زیر آن‌ها می‌باشد.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های کششی

شماره تست (T)	تراکم نسبی (Dr)	شمع پیچشی مدل شده	سرعت بارگذاری (V) (mm/min)	ظرفیت نهایی کششی ( $Q_t$ )
تست ۱	۴۵٪	تک پره	۹۰	۱۹۰/۸۲
تست تکرار	۴۵٪	تک پره	۹۰	۱۸۵/۷۸
تست ۳	۴۵٪	تک پره	۵۰۰	۸۷/۹۹
تست تکرار	۴۵٪	تک پره	۵۰۰	۸۴/۷۶
تست ۵	۴۵٪	دو پره	۹۰	۲۹۶/۴
تست تکرار	۴۵٪	دو پره	۹۰	۲۸۴/۴۶
تست ۷	۴۵٪	دو پره	۵۰۰	۱۳۲/۷۹
تست تکرار	۴۵٪	دو پره	۵۰۰	۱۲۷/۱
تست ۹	۹۵٪	تک پره	۹۰	۸۲۷/۴۷
تست تکرار	۹۵٪	تک پره	۹۰	۸۰۳/۳۱
تست ۱۱	۹۵٪	تک پره	۵۰۰	۴۹۷/۲۵
تست تکرار	۹۵٪	تک پره	۵۰۰	۴۷۹/۲
تست ۱۳	۹۵٪	دو پره	۹۰	۱۲۳۸/۹۱
تست تکرار	۹۵٪	دو پره	۹۰	۱۱۹۷/۷۳
تست ۱۵	۹۵٪	دو پره	۵۰۰	۷۶۰/۲۷
تست تکرار	۹۵٪	دو پره	۵۰۰	۷۱۶/۴۶

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های فشاری

شماره تست (C)	تراکم نسبی (Dr)	شمع پیچشی مدل شده	سرعت بارگذاری (V) (mm/min)	ظرفیت نهایی فشاری ( $Q_c$ )
تست ۱	۴۵٪	تک پره	۹۰	۹۵۴/۱۲
تست تکرار	۴۵٪	تک پره	۹۰	۹۴۲/۲۶
تست ۳	۴۵٪	تک پره	۵۰۰	۴۱۹/۲۱
تست تکرار	۴۵٪	تک پره	۵۰۰	۴۰۴/۳۳
تست ۵	۴۵٪	دو پره	۹۰	۱۱۳۲/۷۷
تست تکرار	۴۵٪	دو پره	۹۰	۱۱۰۸/۵۶

تست ۷	۴۵٪	دو پره	۵۰۰	۵۳۵/۷۸
تست تکرار	۴۵٪	دو پره	۵۰۰	۵۳۰/۱۲
تست ۹	۹۵٪	تک پره	۹۰	۳۹۰۶/۲
تست تکرار	۹۵٪	تک پره	۹۰	۳۸۴۹/۵۲
تست ۱۱	۹۵٪	تک پره	۵۰۰	۲۲۶۶/۱۸
تست تکرار	۹۵٪	تک پره	۵۰۰	۲۱۸۱/۱۸
تست ۱۳	۹۵٪	دو پره	۹۰	۴۹۵۵/۵۲
تست تکرار	۹۵٪	دو پره	۹۰	۴۸۸۵/۲۸
تست ۱۵	۹۵٪	دو پره	۵۰۰	۳۰۵۵/۱۲
تست تکرار	۹۵٪	دو پره	۵۰۰	۲۹۸۵/۲۵

۳. با افزایش تعداد پره (از یک به دو) ظرفیت نهایی و کششی حداکثر تا حدود ۵۴٪ افزایش یافته است. مشخص است که با افزایش تعداد پره، شمع پیچشی در خاک مهار بیشتری می‌شود بنابراین به موجب آن گیرداری بین خاک و شمع با وجود پره دوم افزایش یافته است و به تبع آن ظرفیت نهایی و کششی شمع پیچشی افزایش یافته است.

۴. از بین ۳ پارامتر مختلفی که مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، مشخص است که تاثیر تراکم نسبی خاک بر ظرفیت باربری شمع پیچشی بیشتر بوده است.

۵. با توجه به نتایج مشخص است که ظرفیت کششی در تمام آزمایش‌های بیشتر از ظرفیت فشاری بوده است که دلیل آن این است در هنگام نصب شمع، خاک بالای پره دستخوردده شده است بنابراین در آزمایش‌های کششی (حرکت شمع رو به بالا)، خاک دستخوردده بالای پره‌ی شمع باعث مقاومت می‌شود در حالی که در آزمایش‌های فشاری (حرکت شمع رو به پایین)، خاک دست‌نخورده شده زیر پره مقاومت کرده، بنابراین ظرفیت فشاری شمع از ظرفیت کششی بیشتر بوده است.

### پانوشتها

۱. Helical Pile
۲. Perko
۳. Pack

### ۴ - نتیجه‌گیری

شمع‌های پیچشی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند در سراسر جهان به شکل روز افزون استفاده می‌شوند. در این مطالعه با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مونوتونیک که با کمک دستگاه مدلسازی فیزیکی انجام شده است، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله سرعت بارگذاری، تراکم نسبی خاک و تعداد پره بر ظرفیت کششی و فشاری شمع پیچشی تک‌پره و دوپره مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است که نتایج اصلی به شرح زیر می‌باشد:

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

۲. با افزایش تراکم نسبی خاک ظرفیت نهایی کششی و فشاری حداکثر تا حدود ۴۶٪ افزایش یافته است، که دلیل آن نزدیک شدن ذرات خاک بهم و به تبع گیرداری بیشتر بین خاک و شمع بوده است.

۴. Kurian and Shah

۵. Uplift

۶. Silva

۷. Tsuha

۸. Perez

۹. Sharma

۱۰. Di Bernardo



- ١١. Merifield
- ١٢. Khazaei and Eslami
- ١٣. Frustum Confining Vessel
- ١٤. Abbas and Ali
- ١٥. Jamill
- ١٦. Sand Poorly Graded

- ١٧. Tension
- ١٨. Compression
- ١٩. Relative density
- ٢٠. Velocity (Loading speed)

## (References) منابع

١. Spagnoli, G. and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. (٢٠٢٠) 'A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system', *Marine Georesources and Geotechnology*, ٣٨(٩), pp. ١٠١٣-١٠٣٤. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1729905>.
٢. Perko, H.A. (٢٠٠٩) *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons.
٣. Pack, J.S. (٢٠٠٩) 'Practical design and inspection guide for helical piles and helical tension anchors', *IMR, Inc., Denver, Colorado, Revision*, ٢.
٤. Kurian, N.P. and Shah, S.J. (٢٠٠٩) 'Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method', *Canadian Geotechnical Journal*, ٤٦(٦), pp. ٦٢٧-٦٣٨. <https://doi.org/10.1139/T09-008>.
٥. Silva, B.C. (٢٠١٤) 'Estimation of uplift capacity of helical anchors based on SPT test'. M. Sc. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, University of São.
٦. Tsuha, C. de H.C. *et al.* (٢٠١٣) 'Influence of multiple helix configuration on the uplift capacity of helical anchors', *Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, ١٨.
٧. Perez, Z.A. *et al.* (٢٠١٨) 'Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand', *Canadian Geotechnical Journal*, ٥٥(٨), pp. ١٠٦٧-١٠٨٠. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0137>.
٨. Sharma, M., Samanta, M. and Sarkar, S. (٢٠١٧) 'Laboratory study on pullout capacity of helical soil nail in cohesionless soil', *Canadian Geotechnical Journal*, ٥٤(١٠), pp. ١٤٨٢-١٤٩٥. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0243>.
٩. Liu, H., Zubeck, H.K. and Schubert, D.H. (٢٠٠٧) 'Finite-element analysis of helical piers in frozen ground', *Journal of Cold Regions Engineering*, ٢١(٣), pp. ٩٢-١٠٦. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2007\)21:3\(92\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2007)21:3(92)).
١٠. Spagnoli, G. and Gavin, K. (٢٠١٥) '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>.
١١. Al-Baghdadi, T.A. *et al.* (٢٠١٥) '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. ٥٠٣-٥٠٨.
١٢. Fateh, A.M.A., Eslami, A. and Fahimifar, A. (٢٠١٧) 'Direct CPT and CPTu methods for determining bearing capacity of helical piles', *Marine georesources & geotechnology*, ٣٥(٢), pp. ١٩٣-٢٠٧. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2015.1133741>.
١٣. Spagnoli, G. *et al.* (٢٠١٨) '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*, ١٢(٣), pp. ١٧١-١٨٥. <https://doi.org/10.1080/19375247.2019.1595996>.
١٤. Khazaei, J. and Eslami, A. (٢٠١٦) 'Geotechnical Behavior of Helical Piles Via Physical Modeling by Frustum Confining Vessel (FCV)', *International Journal of Geography and Geology*, ٥(٩), pp. ١٦٧-١٨١. <https://doi.org/10.18488/journal.10/2016.5.9/10.9.167.181>.
١٥. Di Bernardo, G. (٢٠١٢) 'Helical pile Deck foundation', *New Jersey Deck Boulder, USA* [Preprint].
١٦. Merifield, R.S. (٢٠١١) 'Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ١٣٧(٧), pp. ٧٠٤-٧١٦. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000478](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000478).
١٧. Zare, M. *et al.* (٢٠١٣) '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. ٥٤٥-٥٥٣.
١٨. Ali, A.S., Salim, N.M. and Baqir, H.H. (٢٠٢٢) '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. ١٢٠٣٣. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012033>.

۱۹. Abbas, H.O. and Ali, O.K. (۲۰۲۰) 'Parameters affecting screw pile capacity embedded in soft clay overlaying dense sandy soil', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. ۱۲۱۱۷. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/1/012117>.

۲۰. Jamill, A.S. and Abbas, H.O. (۲۰۲۱) 'Effect of Screw Piles Spacing on Group Compressive Capacity in Soft Clay', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, ۱۰۷۶(۱), p. ۰۱۲۰۹۸. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1076/1/012098>.

۲۱. Hoseinpour, R., Keramati, M. and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. (۲۰۲۳) 'Effect of the Addition of a Second Helix on the Helical Pile Performance in Sand', *International Journal of Civil Engineering*, pp. ۱-۱۴. <https://doi.org/10.107/s40999-023-00893-7>.

پایگاه نشریات علمی