



مطالعه عملکرد ظرفیت باربری و نشست شمع‌های مارپیچی در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری فشاری*

مقاله پژوهشی

مسعود مکارچیان^(۳)

سجاد قلی‌پور^(۲) ID

سارا بنده خدا^(۱)

DOI:

چکیده استفاده از شمع‌های مارپیچی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و کاربرد ویژه آن‌ها در پروژه‌های مهندسی جهت بهسازی و تقویت پی‌ها رو به گسترش می‌باشد. در این پژوهش، ظرفیت باربری و نشست شمع‌های مارپیچی در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری فشاری با استفاده از روش اجزای محدود و مدل‌سازی سه بعدی توسط نرم‌افزار پلکسیس مطالعه شد. پارامترهای مختلفی شامل قطر پره‌های مارپیچی، طول شمع، فاصله پره‌های مارپیچی از یکدیگر و فاصله شمع‌های مارپیچی از یکدیگر در گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ظرفیت باربری شمع مارپیچی نسبت به شمع معمولی و بدون پره به میزان زیادی افزایش می‌یابد، به طوری که افزایش طول شمع منجر به بهبود ظرفیت باربری بطور متوسط ۵/۳۸ برابر می‌شود. افزایش فاصله پره‌های مارپیچی تا زمانی که شمع به صورت یکپارچه عمل کرده و از مکانیسم برش استوانه‌ای خارج نشود، سبب افزایش ظرفیت باربری تا ۵/۱۲ برابر شده است؛ مرز فاصله صفحات برای انتقال از رفتار برش استوانه‌ای در فاصله حدود سه برابر قطر پره به دست آمد. حداقل فاصله بین شمع‌ها در گروه جهت کاهش هم‌پوشانی مناطق تحت تنش سه برابر قطر پره مارپیچی مشاهده شد. مقادیر و روند نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با مقادیر تحلیل نظری مطابقت خوبی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی شمع مارپیچی، صفحات پره شمع، ظرفیت باربری، مدل‌سازی عددی، بارگذاری فشاری.

Study of Bearing Capacity and Settlement Performance of Helical Piles in Sandy Soil under Compressive Loading

Sara Bandehkhoda¹

Sajjad Gholipour^{2*}

Masoud Makarchian³

Abstract Use of helical piles is expanding due to their unique characteristics and special application in engineering projects for foundation improvement. In this research, the bearing capacity and settlement behavior of helical piles in sandy soil under compressive loading were studied through three-dimensional numerical modeling using the finite element method implemented in PLAXIS software. Various parameters of blade plate diameter, pile length, blade plate spacing, and pile spacing in the pile group were investigated. The results of the studies showed that the bearing capacity of helical piles increases significantly compared to conventional piles without blade plates, so that increasing the pile length leads to improved bearing capacity by an average of 5.38 times. Increasing the distance between the blade plates improves bearing capacity by 12.5 times as long as the pile continues to behave as a unified system and remains within the cylindrical shear failure mechanism; the transfer boundary of the cylindrical shear behavior was obtained at a distance of about three times the blade plate diameter. The minimum distance between the piles in the group to reduce the overlap of the stressed areas was observed to be three times the diameter of the spiral blade. The values and trends of the results obtained from the numerical analysis showed a good agreement with the values of the theoretical analysis.

Key words helical pile, blade plate, bearing capacity, numerical modeling, compressive loading.

* می‌باشد.

و تاریخ پذیرش آن

* تاریخ دریافت مقاله

Email: sara.bandehkhoda@gmail.com

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

Email: sgholipour@uut.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه.

Email: makarchian@yahoo.com

(۳) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

مقدمه

گسترش روزافزون استفاده از انواع شمع‌ها در پروژه‌های مختلف مهندسی با اهداف متفاوت شامل تقویت و بهسازی خاک در برابر بارهای قائم و جانبی (Abedini and Bolouri, 2023; Gholipour and Makarchian, 2020) استفاده به عنوان سازه‌های نگهبان و پایدارسازی زمین (Mashayekhi and Khanmohammadi, 2023; Abdollahi and Bolouri, 2018; Keshavarz and Bolouri, 2016) و جهت افزایش ظرفیت باربری زمین (Shooshpasha and Sharafkhah, 2015; Kordjazi and Pooya Nejad, 2012) لزوم بررسی شمع‌ها از نظر اندرکنش سازه و خاک مجاور (Sharafi and shams) و همچنین عملکرد و عوامل موثر بر میزان ظرفیت باربری به‌ویژه استفاده از شمع‌های مارپیچی را به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن جهت مقاوم‌سازی و جلوگیری از واژگونی سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی، بارهای کششی و فشاری، مورد توجه جامعه ژئوتکنیک قرار داده است (Tsuha and Aoki, 2011). شمع‌های مارپیچی فولادی که به منظور پشتیبانی از سازه‌ها در داخل زمین رانده می‌شوند، متشکل از یک شفت مرکزی و تعدادی صفحه مارپیچ (پره) متصل به شفت هستند که نسبت به شمع‌های متداول دارای تکنولوژی نوینی می‌باشند؛ به طوری که به کارگیری قطرهای مختلف صفحات مارپیچ به همراه طول‌های متفاوت شفت باعث افزایش ظرفیت باربری و گسترش کاربرد این نوع شمع‌ها در بسیاری از پروژه‌های مهندسی شده است (Livneh and Naggar, 2008). تعداد پره‌های شمع مارپیچی بسته به وجود شرایط مختلف سازه و خاک، متفاوت است؛ به طوری که در شمع‌های تک‌پره‌ای، به منظور پیشروی بهتر شمع درون خاک، موقعیت پره بایستی در انتهای شفت مرکزی قرار بگیرد. در شمع‌های چندپره‌ای، ممکن است قطر پره‌ها برابر و یا به تدریج با نزدیک شدن به نوک شمع، قطر پره‌ها کاهش یابد (Li, 2016).

در سالیان اخیر، کاربرد این نوع شمع‌ها در پروژه‌های مختلف مهندسی جهت پشتیبانی و علاج بخشی سازه‌های تحت بارهای مختلف به دلیل مزایایی متعدد آن همچون؛ روش نصب آسان و سریع در تمامی شرایط آب و هوایی، مقرون به صرفه بودن، امکان بارگذاری بلافاصله پس از نصب بدون نیاز به عمل‌آوری، لرزش بسیار کم در فرایند نصب، وزن کم تجهیزات نصب و پتانسیل

تقویت و ترمیم پی‌های موجود گسترش زیادی پیدا کرده‌اند (Elsherbiny and El-Naggar, 2013; Todeshkejoei et al., 2014).

تحقیقات مختلفی در رابطه با نحوه عملکرد شمع‌های مارپیچی از نظر مکانیزم باربری توسط برخی محققین انجام گرفته که در این بخش خلاصه‌ای از مهمترین نتایج به دست آمده توسط پژوهشگران مختلف ارائه می‌شود:

مبنا و اصول کلاسیک روش‌های طراحی نظری برای شمع‌های مارپیچی شامل روش برش استوانه‌ای، روش ظرفیت باربری صفحات مجزا و رابطه بین گشتاور نصب و ظرفیت باربری می‌باشد؛ در روش ظرفیت باربری صفحات مجزا، وجود فاصله کافی بین صفحه‌های مارپیچی باعث عملکرد مستقل این صفحات شده و ظرفیت باربری شمع از مجموع ظرفیت باربری همه صفحه‌ها به دست می‌آید، و در صورت کم بودن این فاصله، صفحات و شمع مارپیچی به صورت گروهی عمل کرده و ظرفیت باربری به عنوان مجموع مقاومت صفحه پایینی شمع و مقاومت جداره استوانه‌ای محاسبه می‌شود (روش برش استوانه‌ای). در رابطه با میزان حداقل فاصله بین صفحات مارپیچی که وابسته به هندسه شمع‌های مارپیچی و شرایط خاک مجاور است، تحقیقات مختلفی به منظور تعیین حداقل فاصله مابین صفحات جهت مشخص نمودن نوع روش حاکم بر گسیختگی و مکانیزم باربری انجام گرفته است. برابر نتایج این مطالعات، یکی از عوامل پارامترهای موثر در میزان ظرفیت باربری نهایی شمع‌های مارپیچی، نسبت فاصله (S/D) است؛ نسبت فاصله به عنوان نسبت فاصله دو صفحه مارپیچی مجاور به قطر متوسط این صفحات تعریف می‌شود (Zhang et al, 1998; Sakr, 2009). راثو و همکاران (Rao et al., 1991) براساس نتایج تحقیقات خود بیان می‌کنند که نسبت فاصله‌ای وجود دارد که در آن نسبت، مکانیسم شکست شمع‌های مارپیچی از روش برش استوانه‌ای به روش باربری صفحات مجزا تغییر می‌کند که این نسبت برای تحقیق ایشان، بیشتر از ۱/۵ به دست آمد. آیدین و همکاران (Aydin et al., 2011) این فاصله نسبت را به میزان ۳ گزارش کردند. براساس نظر لوتنجر (Lutenegger, 2009) تا مقدار نسبت فاصله ۲/۲۵ روش برش استوانه‌ای برای کنترل رفتار شمع دیده می‌شود، در حالی که فراتر از آن مقدار فاصله، روش باربری صفحات مجزا حاکم می‌شود. محدوده تغییر روش مکانیزم

باربری گروه‌های مختلف در مقایسه با سایر متغیرها داشته است. در ماسه متراکم، افزودن شمع بیشترین تأثیر را بر افزایش ظرفیت باربری نشان داد. ظرفیت باربری نهایی شمع پس از افزایش فاصله بین شمع‌ها تقریباً ۱۱٪ افزایش یافت (Ebrahimnezhad et al., 2026). مطالعه مشابهی تحت اثر بارگذاری ترکیبی برای ارزیابی اثر فاصله شمع‌ها در گروه شمع بر عملکرد باربری شمع‌های ماریپی در خاک‌های رسی به انجام رسیده است (Venkatesana et al., 2024).

عملکرد شمع‌های ماریپی تحت بارهای ترکیبی از طریق تحلیل عددی بررسی شد که بر پایه نتایج مشاهده شد، ظرفیت باربری محوری شمع‌های ماریپی در هر دو جهت با افزایش تدریجی نسبت بار جانبی به بار عمودی کاهش می‌یابد و به دلیل اثر $P-\Delta$ ، ظرفیت باربری یک شمع تک ماریپی کمتر از یک شمع دو ماریپی است. زمانیکه نسبت بار جانبی بزرگتر می‌شود، سطح لغزش خاک شمع‌های دو ماریپی از صفحه ماریپی به میله لنگر گسترش می‌یابد و شمع دو ماریپی بیشتر مستعد چنین روندی است (Feng et al., 2025).

عملکرد شمع‌های ماریپی در تثبیت شیب‌های خاکی توسط وفایی و مکارچیان (۱۳۹۹) با بکارگیری نرم‌افزار آباکوس از طریق مطالعه تأثیر پارامترهایی شامل قطر پره‌ها، فاصله پره‌ها از یکدیگر، طول شمع و تعداد ردیف شمع‌ها در گروه شمع در سه حالت چیدمان‌های یک، دو و سه ردیفه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که متغیرهای قطر پره‌ها، فاصله پره‌ها، طول شمع و تعداد ردیف شمع‌ها با ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی، رابطه مستقیمی دارند. به‌طوری که تأثیر این پارامترها در طول‌های کم شمع مشهود نبوده، ولی در نزدیکی طول بحرانی شمع قابل توجه ملاحظه گردید.

براساس گزارش نتایج پژوهش وودکوک (Woodcock, 2012)، تعداد صفحات ماریپی در شمع ماریپی به‌طور خاص بر رفتار و عملکرد آن تأثیرگذاری قابل توجهی ندارد، در حالی که مطابق نظر لوتنجر (Lutenegger, 2009)، تعداد صفحات ماریپی بر روی ظرفیت باربری نهایی در روش ظرفیت باربری صفحات مجزا تأثیرگذار بوده، ولی فاصله ماریپی خیلی موثر نمی‌باشد.

در بررسی تأثیرات گروه شمع ماریپی بر عملکرد باربری (Perko, 2009)، به‌منظور جلوگیری از اثرات گروه شمع، فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها، می‌تواند حدود ۴ برابر قطر صفحه باربر

باربری توسط نصر (Nasr, 2009) به میزان بزرگ‌تر از عدد ۲ پیشنهاد شده است.

نتایج آزمایش ظرفیت باربری بارگذاری فشاری محوری براساس منحنی بار-نشست (Adi et al., 2020) نشان داد که با افزایش قطر صفحه ماریپی، میزان تحمل بار بیشتر شده و بیشترین ظرفیت باربری برای حالت سه صفحه به‌ازای قطر صفحه ۴۵ سانتی‌متر به‌دست آمد که بیانگر این موضوع است که افزایش قطر صفحه مستقیماً با افزایش ظرفیت باربری فشاری محوری متناسب می‌باشد.

انجام آزمایش‌های واقعی در محل به‌همراه تحلیل عددی به‌منظور بررسی مکانیزم انتقال بار بین شمع ماریپی و خاک اطراف به‌ازای فاصله سه برابری قطر صفحات از یکدیگر نشان داد که میزان باربری به‌عنوان مجموع ظرفیت مخروط برشی و صفحه انتهایی به‌دست می‌آید (Livneh and El-Naggar, 2008). تأثیر نصب شمع‌های ماریپی بر میزان دست‌خوردگی خاک اطراف شمع و ظرفیت باربری قائم آن‌ها در خاک ماسه‌ای متراکم بررسی شد (Saleem et al., 2021) که نتایج حاصله نشان داد، خاک در امتداد بدنه و جداره شمع ماریپی دست‌خورده می‌شود، ولی اختلال خاک در زیر نوک شمع تقریباً ناچیز است. همچنین با افزایش میزان نسبت قطر بدنه به قطر صفحات ماریپی، مقدار دست‌خوردگی خاک نیز افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده بیانگر این موضوع است که با افزایش قطر شمع ماریپی، ظرفیت باربری انتهایی شمع نیز افزوده می‌شود.

بررسی رفتار بار-جابجایی پیکربندی‌های مختلف شمع ماریپی از نظر هندسه شامل قطر ماریپی و نسبت فاصله (S/D) در چگالی‌های مختلف خاک تحت شرایط بارگذاری کششی و فشاری با استفاده از دستگاه FCV-AUT مطالعه و آزمایش‌های شمع در مقیاس کامل تحت شرایط تزریق انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش قطر ماریپی، چگالی خاک و نسبت S/D ظرفیت باربری فشاری را افزایش می‌دهد و در فرآیند تزریق، شمع سه ماریپیچه عملکرد بهتری در مقایسه با شمع دو ماریپیچه نشان داده و ظرفیت شمع را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد (Ahmadnezhada et al., 2024).

مطالعه نتایج مدل‌سازی فیزیکی گروه‌های شمع ماریپی کوچک مقیاس در ماسه خشک با چگالی‌های نسبی نشان داد که در ماسه شل، افزایش چگالی نسبی خاک بیشترین تأثیر را بر ظرفیت

مارپیچی در نظر گرفته شود؛ به طوری که فاصله کمتر از ۴ برابر قطر صفحه باربر مارپیچی لزوماً، نشان دهنده کاهش بازدهی گروه نیست و در این حالت نیز می‌تواند تحلیل گروه شمع انجام شود. مطالعه تأثیر هندسه و طول شمع در نشست گروه شمع‌های مارپیچی از طریق انجام تحلیل عددی توسط نرم‌افزار پلکسیس (باقری و سلیقه‌زاده، ۱۳۹۸) نشان داد که گروه شمع‌های مارپیچی که شامل ترکیب مناسبی از شمع‌های پره‌دار با طول‌های متنوع بوده، دارای کارایی و بهره‌وری به مراتب بیشتری است. تغییرات زیاد فاصله بین شمع‌ها باعث اختلال عملکرد حباب‌های تنش و هم‌چنین افزایش نشست می‌شود. فاصله بهینه میان شمع‌های دارای صفحات پره‌ای در گروه شمع جهت رسیدن به اهداف اقتصادی طرح، استفاده از گروه ترکیبی با طول‌های مختلف شمع پیشنهاد شده است. هم‌چنین مطابق نتایج تحلیل، برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی روش برش استوانه‌ای کارآمدتر ارزیابی و گزارش شده است.

عملکرد شمع‌های مارپیچی واقع در خاک ماسه‌ای با تعداد پره‌های مختلف در شرایط تزریق آب و سیمان، از طریق مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه و با کمک دستگاه فشار همه‌جانبه مخروطی بررسی شده (نبی‌زاده و جانعلی‌زاده، ۱۳۹۵)، که نتایج حاصله بیانگر کاهش ظرفیت باربری در حالت شمع سه‌پره نسبت به شمع دوپره می‌باشد؛ در حالت شمع سه‌پره، به دلیل احتمال دست‌خوردگی خاک، فشار جانبی نیز کم می‌شود، در صورتی‌که با انجام عملیات تزریق در خاک، مقاومت شمع حدود ۴٪ نسبت به شمع دوپره افزایش می‌یابد. در حالت کلی افزایش ظرفیت باربری پس از تزریق در شمع مارپیچی تک‌پره حدود ۱۴٪، حالت شمع دوپره حدود ۲۱٪ و برای حالت شمع سه‌پره حدود ۲۴٪ اندازه‌گیری شده است.

رفتار ریزش‌های مارپیچی تحت بارگذاری‌های محوری و جانبی به روش اجزای محدود و انجام آزمایش‌های در مقیاس کامل واقع بر خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده بررسی شد (Papadopoulou et al., 2014). باستناد نتایج مشاهده شد که تحت بار کششی، بالاترین پره مارپیچی، بیشترین سهم از ظرفیت باربری را داشته است؛ در حالی‌که تحت بارگذاری فشاری پایین‌ترین پره مارپیچی، ظرفیت باربری را تقویت می‌کند. بررسی رفتار گروه‌های شمع مارپیچی در معرض بارگذاری ترکیبی بالاآمدگی و جانبی (Venkatesan et al., 2024) با در نظر گرفتن آرایش‌های مختلف مستطیلی، مثلثی و مربعی و هم‌چنین فواصل

مختلف بین شمع‌های مارپیچی توسط مدل المان محدود سه‌بعدی برای پیش‌بینی پاسخ بار-جابجایی گروه نشان داد که تأثیر بارگذاری ترکیبی، ظرفیت جانبی شمع مارپیچی گروهی را کاهش می‌دهد. فاصله بین شمع‌های مارپیچی نیز تأثیر قابل توجهی بر پاسخ به بارگذاری ترکیبی دارد.

مقایسه ظرفیت باربری کششی سه نوع شمع مارپیچی مدل‌سازی شده در آزمایشگاه واقع بر خاک ماسه‌ای با فواصل مختلف بین صفحات در دو حالت درجا و پیچشی توسط کماسی و مکارچیان (۱۳۹۸) نشان داد که به علت دست‌خوردگی خاک ناشی از پیچاندن شمع‌ها، ظرفیت باربری نهایی شمع‌های درجا نسبت به شمع‌های پیچشی بیشتر است. با افزایش فاصله بین صفحات مارپیچی، ظرفیت بالارانش نیز در هر دو حالت افزایش می‌یابد که حداکثر ظرفیت بالارانش شمع‌های مارپیچی در بیشترین جابه‌جایی رخ می‌دهد.

مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۷ نمونه شمع مارپیچی دارای یک و دو صفحه با بررسی تأثیر قطر محور شمع و مساحت قسمت مدفون شمع بر ضریب لنگر پیچشی انجام گرفت که نتایج نشان داد، لنگر پیچشی مورد نیاز برای نصب شمع مارپیچی به‌طور مستقیم به طول مدفون شمع و مقاومت برشی خاک بستگی دارد (Harnish, 2015).

مدلسازی عددی نتایج بارگذاری فشاری در مقیاس کامل با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS جهت بررسی مکانیسم انتقال بار شمع مارپیچ معمولی در انواع مختلف خاک شنی و رسی انجام و ظرفیت‌های باربری نهایی مدل‌سازی عددی با مقادیر نظری مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش نظری، ظرفیت نهایی شمع‌های مارپیچ را در ماسه متوسط و متراکم بیش از حد پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین براساس نتایج مشاهده شده که شکل مکانیزم شکست بلوکی در خاک رس با خاک ماسه‌ای متفاوت است (Jahanshahi and Janalizadeh, 2021).

تأثیر صفحات مارپیچی مخروطی با قطرهای کاهشی از بالا به پایین به جای تعداد یکسان مارپیچ‌های یکسان از طریق مطالعه عددی جهت بررسی کسب حداکثر ظرفیت فشاری در پروفیل‌های خاک همگن و ناهمگن با بررسی مکانیسم‌های شکست منفرد و استوانه‌ای مطالعه شد. بر پایه نتایج، بهترین نسبت فاصله به قطر مارپیچ برای بیشترین ظرفیت باربری دو به دست آمد. نتایج نشان داد که شمع‌های مارپیچ مخروطی ظرفیت فشاری بهتری نسبت به شمع‌های مارپیچ یکنواخت با تعداد

مواد و روش‌ها

مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش برای مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل عددی شمع‌های مارپیچی از نرم‌افزار تخصصی PLAXIS 3D, V.2020, Update4 استفاده شده است؛ به‌طوری که شمع مارپیچی به‌صورت المان‌های سازه‌ای دارای جنس فولاد متشکل از شفت مرکزی از نوع دایره توخالی و صفحات مارپیچی دایره‌ای به شکل مدل صفحه‌ای دارای ضخامت معادل و استفاده از مدل رفتاری الاستیک خطی، مدل‌سازی شده است. در همه مدل‌ها فاصله پایین‌ترین پره مارپیچی تا نوک شمع، مقدار ثابت و برابر ۷۰ cm فرض شده است. شمع مارپیچی مرجع برای مدل‌سازی‌ها با سه صفحه مارپیچی در نظر گرفته شده که در هر بخش با توجه به پارامتر مورد بررسی شامل قطر پره، طول شمع، فاصله پره‌ها و ... تغییرات لازم در آن اعمال و نتایج تحلیل شده است. تصویری از هندسه نمونه مدل شمع مرجع در شکل (۱) و مشخصات مصالح و هندسه موردنظر برای شمع‌ها برگرفته از آزمایش‌های میدانی Sakr (۲۰۱۱)، در جدول (۱) مشاهده می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی بستر خاک از خاک ماسه‌ای مورد استفاده در پژوهش Sakr (۲۰۱۱) به‌صورت دو لایه به عمق کل ۳۱/۵ متر و با در نظرگیری مدل رفتاری مور-کلمب برای خاک دارای مشخصات بشرح جدول (۲) استفاده شده است.

یکسان مارپیچ‌های یکسان ارائه می‌دهد. همچنین، شمع‌های مارپیچ مخروطی تقریباً تغییرات بار-نشست مشابهی با شمع‌های مارپیچی به شکل ناقص دارند که استفاده از مارپیچ‌های مخروطی به دلیل عملکرد فنی و اقتصادی آنها سودمند است (Ghazavi et al., 2022).

پیش‌بینی نشست شمع‌های مارپیچ تحت بارگذاری فشاری از طریق مطالعه مدل آماری و یادگیری ماشین توسط الگوریتم‌هایی مانند درخت‌های تصمیم‌گیری، جنگل‌های تصادفی و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارزیابی شد. بر پایه نتایج مشاهده شد که مدل‌های یادگیری ماشین مانند درخت‌های تصمیم‌گیری و جنگل‌های تصادفی، مدل بهتری را برای شمع‌های با قطر بزرگ با مقادیر R2 به ترتیب ۰٫۹۲ و ۰٫۹۶ ارائه می‌دهند (Shuman et al., 2024).

در سالیان اخیر، علیرغم گستردگی استفاده از این نوع شمع‌ها به جهت داشتن ویژگی‌های خاص و کاربرد آن در سرتاسر دنیا، با توجه به عدم شناخت کامل در ایران، به‌طور کامل مورد استفاده قرار نگرفته و رواج نیافته است. از این رو هدف اصلی مطالعه، بررسی مهمترین پارامترهای موثر در بیشترین میزان افزایش باربری نسبت به شمع‌های معمولی در جهت شناخت نحوه رفتار آن‌ها در شرایط مختلف و کاربرد آن‌ها در پروژه‌های عمرانی می‌باشد. لذا در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس بررسی جامعی از پارامترهای موثر شامل مشخصات هندسی شمع همچون قطر پره، طول شمع، فاصله پره‌ها از یکدیگر و فاصله شمع‌ها در گروه شمع‌های مارپیچی واقع بر بستر خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری فشاری انجام شد.



شکل ۱ شماتیک هندسه مدل مرجع شمع مارپیچی [Sakr, 2011]

جدول ۱ مشخصات مصالح و هندسه شمع‌های مارپیچی [Sakr, 2011]

نوع ویژگی	شفت مرکزی	صفحات مارپیچی
وزن مخصوص (kN/m^3)	۷۸	۷۸
مدول الاستیسیته (kN/m^2)	۲٫۱ ev	۲٫۱ ev
ضریب پواسون	۰٫۳	۰٫۳
طول (m)	۷-۱۳	-
قطر (mm)	۳۲۴	۷۶۲
ضخامت جداره (mm)	۹/۵	۲۵/۴

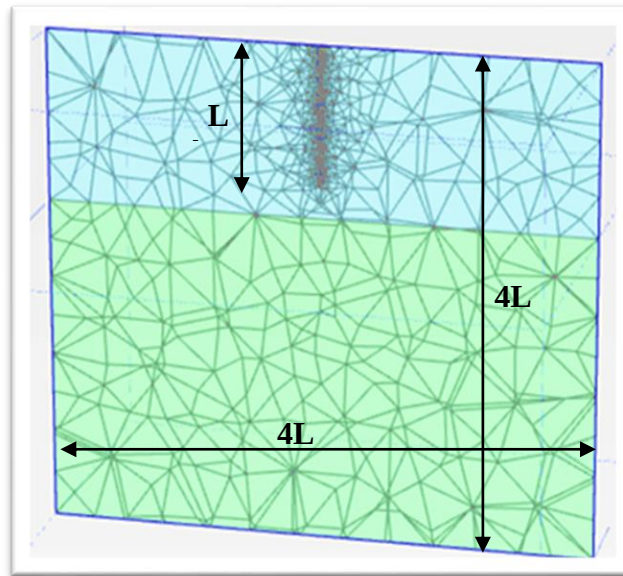
جدول ۲ مشخصات خاک ماسه‌ای مورد استفاده در مدل‌سازی [Sakr, 2011]

مشخصات پارامترها	لایه اول	لایه دوم
عمق (m)	۰/۰-۱۱/۴	۱۱/۴-۳۱/۵
نوع مدل رفتاری	مور-کلمب	مور-کلمب
وزن مخصوص غیراشباع (kN/m^3)	۱۸	۲۰
وزن مخصوص اشباع (kN/m^3)	۲۰	۲۱
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۳۳
c' (kN/m^2)	۱	۱
ϕ' (درجه)	۳۵	۴۰
ψ' (درجه)	۵	۱۰
E (MPa)	۴۸	۷۷

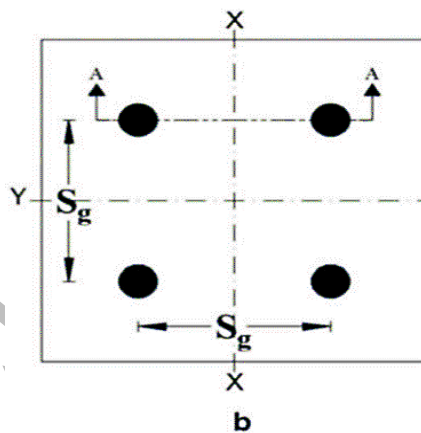
نحوه مدل‌سازی

به منظور کاهش تاثیر نامطلوب شرایط مرزی بر نتایج، نسبت به عوامل موثر در مدل‌سازی شامل ابعاد و هندسه مدل‌سازی و نوع شبکه‌بندی، تحلیل حساسیت‌سنجی انجام شد. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت نسبت به محدودسازی مرزهای مدل و همچنین با استناد به مراجع معتبر (Flip, 1997; Salehi, 2013; Georage, 2017)، مدل سه‌بعدی با ابعاد $4L \times 4L$ در سطح و ارتفاع $3.5L$ (طول شمع ماریپیچی) برای مدل‌سازی مناسب در نظر گرفته شد. برای انتخاب نوع شبکه‌بندی نیز با تحلیل حساسیت، شبکه مناسب جهت برخورداری از دقت کافی در نتایج انتخاب شد، به طوری که شبیه‌سازی مدل‌ها به صورت کامل و با المان‌های هرمی ۱۰ گرهی انجام گرفت. به منظور شبکه‌بندی لایه‌های خاک از شبکه‌های با ابعاد متوسط و برای شمع‌های ماریپیچی از شبکه‌بندی دارای ابعاد بسیار ریز استفاده شد که در شکل (۲)

نمونه‌ای از مقطع عرضی شبکه‌بندی المان محدود برای بستر خاک و شمع مشاهده می‌شود. جهت شبیه‌سازی اندرکنش خاک و سازه در سطوح فصل مشترک خاک و المان‌های سازه‌ای شمع‌های ماریپیچی، از ضریب کاهش مقاومت سطوح فصل مشترک ($R_{interface}$) به مقدار ۰/۶۷ برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی گروه شمع، فاصله کلاهک شمع از هر طرف مرزهای مجاور قائم، به اندازه دو برابر طول شمع مدنظر قرار گرفته و شمع به صورت متقارن در محدوده مدل شبیه‌سازی شد. عمق کلی مدل نیز مانند تک‌شمع، در فاصله حدود ۳/۵ برابر طول شمع انتخاب شد (Lees, 2013). شکل (۳) نمای شماتیک از نوع مدل‌سازی گروه شمع ماریپیچی را نشان می‌دهد. کلاهک گروه شمع به صورت المان سازه‌ای از جنس فولاد دارای مشخصات مصالح مطابق جدول (۱) مدل‌سازی شد.



شکل ۲ نمونه مقطع عرضی از شبکه بندی المان محدود لایه های خاک و شمع ماریچی



شکل ۳ نمای شماتیک از نحوه مدل سازی گروه شمع ماریچی

حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمون بارگذاری میدانی در شکل (۴) ارائه شده است. همچنین مطابق منحنی همبستگی در شکل (۵)، ضریب همبستگی دو حالت تقریباً نزدیک یک به دست آمده که بیانگر مناسب بودن روند و نحوه مدل سازی و مطابقت خوب بین نتایج آزمایش میدانی و مدل سازی عددی می باشد.

دلیل اختلاف نتایج مقادیر ظرفیت باربری مدل سازی عددی نسبت به آزمایش های میدانی اینگونه تفسیر می شود که در مدل سازی عددی با تعریف المان های فصل مشترک خاک و المان های سازه های شمع های ماریچی جهت شبیه سازی اندرکنش خاک و سازه در سطوح فصل مشترک، و اعمال ضریب کاهش مقاومت سطوح فصل مشترک، مقادیر ظرفیت باربری در

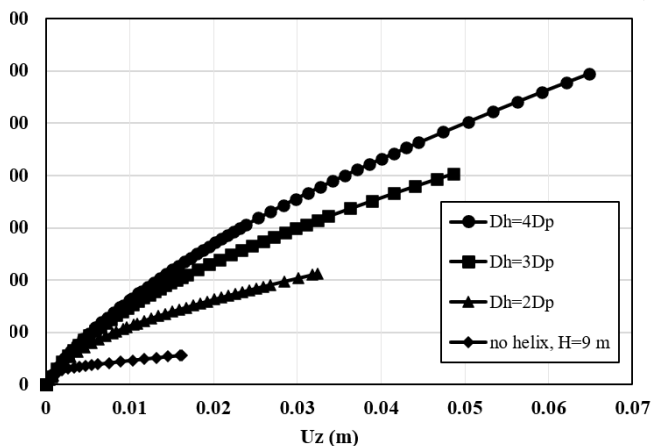
صحت سنجی مدل سازی در نرم افزار

با توجه به ضرورت انجام صحت سنجی نرم افزار و مدل سازی در تحلیل های عددی، در این تحقیق جهت برآورد هرچه دقیق تر ظرفیت باربری و نشست شمع های ماریچی با شرایط مختلف، مدل سازی عددی نرم افزار پلکسیس از طریق داده های اندازه گیری شده توسط sakr (۲۰۱۱) برای شمع ماریچی تحت بارگذاری میدانی انجام گرفت؛ داده ها برای طول مدفون شمع ۹ متری واقع در خاک ماسه ای دو لایه با تراز آب زیرزمینی در عمق ۳/۶ متر زیر سطح زمین می باشد. به دلیل اهمیت بررسی رفتار ظرفیت باربری و نشست شمع های ماریچی، صحت منحنی بار-جابجایی به دست آمده توسط نرم افزار، از طریق مقایسه نتایج

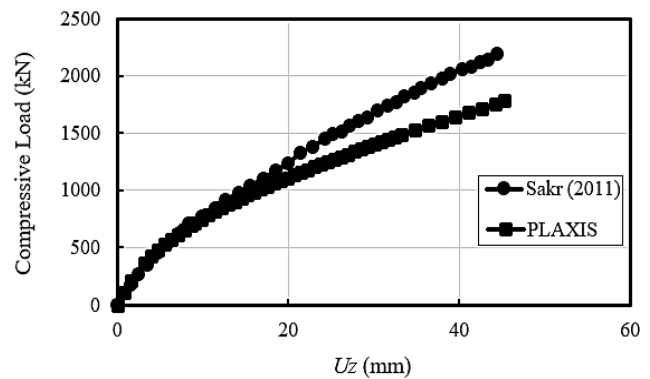
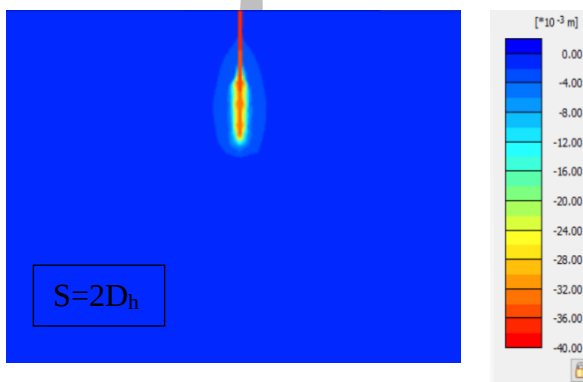
مدل سازی عددی، مقداری کاهش می یابد.

۲-۴	D_h/D_p	نسبت قطر پره به قطر شفت
۲-۴	S/D_h	نسبت فاصله بین دو پره به قطر پره
۱-۴	S_g/D_h	نسبت فاصله شمع ها به قطر پره

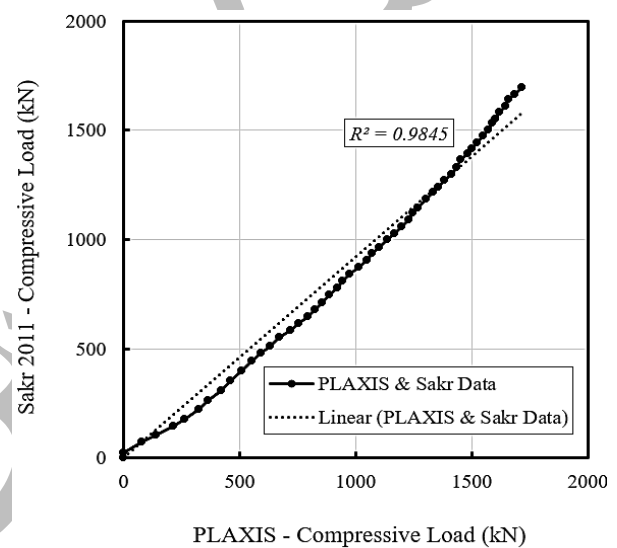
نتایج تحلیل عددی به صورت منحنی های بار-جابجایی ارائه و ظرفیت باربری نهایی شمع مارپیچی با استفاده از معیار گسیختگی FHWA، به ازای جابجایی به میزان ۵ درصد قطر صفحه پره در محل سر شمع به دست آمد؛ مطابق این معیار در شمع های مارپیچی در حالتی که قطر پره بزرگ تر از ۶۱۰ میلی متر باشد، استفاده از معیار گسیختگی FHWA مناسب و متداول می باشد (Elsherbiny and El Naggar, 2013). نمونه ای از منحنی های بار-جابجایی به دست آمده از تحلیل مدل سازی عددی برای شمع با طول ۹ متر دارای سه پره با فواصل سه برابر قطر پره از همدیگر، در شکل (۶) مشاهده می شود. همچنین نمونه مقطع عرضی از تصویر جابجایی و حباب تنش اطراف شمع ها در مدل سازی عددی برای تشریح تاثیر فاصله پره های شمع مارپیچی تحت بار فشاری در شکل (۷) مشاهده می شود.



شکل ۶ نتایج بار-جابجایی برحسب تاثیر قطرهای مختلف پره های شمع مارپیچی در شمع ۹ متری



شکل ۴ مقایسه نمودارهای بار-جابجایی جهت صحت سنجی



شکل ۵ ضریب همبستگی بین نتایج آزمایش میدانی و مدل سازی عددی

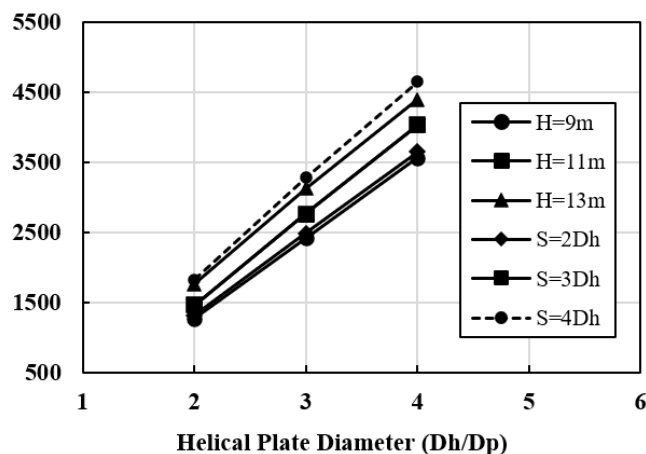
نتایج و بحث

در این پژوهش، تاثیر پارامترهای موثر بر عملکرد شمع های مارپیچی شامل مشخصات هندسی شمع همچون قطر پره (D_h)، طول شمع مارپیچی (H)، فاصله صفحات پره از یکدیگر (S) و فواصل شمع ها از یکدیگر (S_g) در گروه شمع واقع بر خاک ماسه ای تحت بارگذاری فشاری مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی مدل ها، قطر شفت مرکزی شمع (D_p) مقدار ثابت به میزان ۳۲۴ mm در نظر گرفته شد و محدوده مورد مطالعه برای سایر پارامترها که به صورت نسبت متغیرهای مختلف است، مطابق جدول (۳) می باشد.

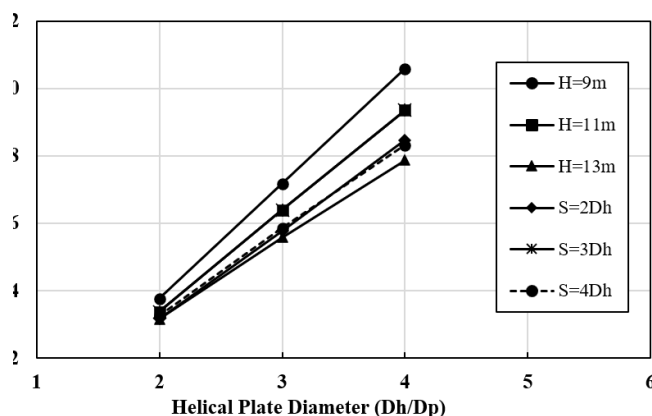
جدول ۳ محدوده پارامترهای مورد بررسی برای هندسه شمع های مارپیچی

محدوده	پارامتر مورد مطالعه
۷-۱۳	طول شمع (m) H

مارپیچی در حالت وجود پره و Q_0 ظرفیت باربری نهایی شمع ساده بدون وجود پره در شرایط یکسان مدل سازی می باشد.



شکل ۸. تاثیر افزایش قطر پره های شمع مارپیچی بر ظرفیت باربری

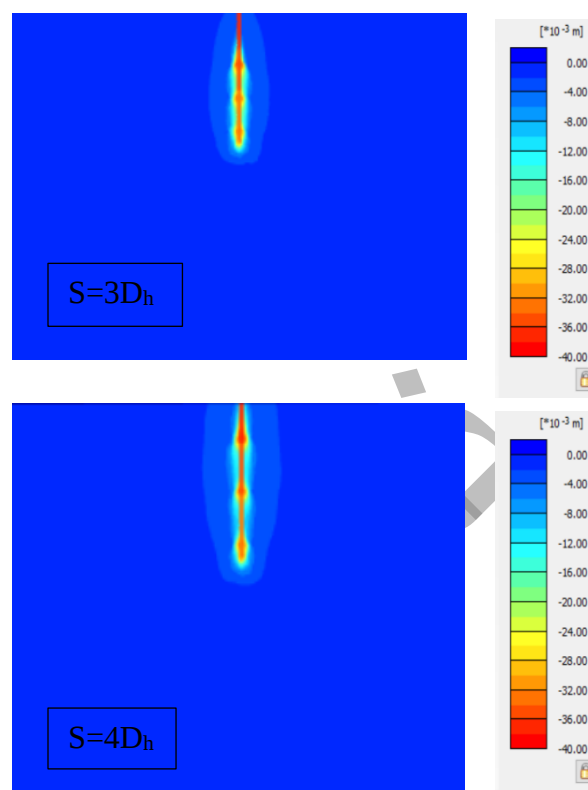


شکل ۹. تاثیر افزایش قطر پره های شمع مارپیچی بر ظرفیت باربری

روند منحنی ها بیانگر این است که در تمامی حالت ها با افزایش قطر پره مارپیچی، به دلیل افزایش سطح باربری، میزان ظرفیت باربری شمع افزایش یافته است؛ به طوری که بیشترین تاثیر افزایش قطر مربوط به قطر پره در حالت چهار برابری قطر شفت و کمترین تاثیر نیز برای حالت متناظر قطر دو می باشد. به ازای پارامترهای مختلف مورد مطالعه، متوسط افزایش باربری ناشی از افزایش قطر پره ها، برای حالت های (D_h/D_p) دارای مقادیر ۲، ۳ و ۴، به ترتیب برابر با ۳/۳۵، ۶/۱۹ و ۸/۹۹ به دست آمد.

تاثیر طول شمع

در این بخش تاثیر طول شمع مارپیچی با سه پره بررسی شد که نمونه ای از منحنی ها را بار-جابجایی برای طول های مختلف شمع در شکل (۱۰) مشاهده می شود. مقایسه نتایج کمی و روند

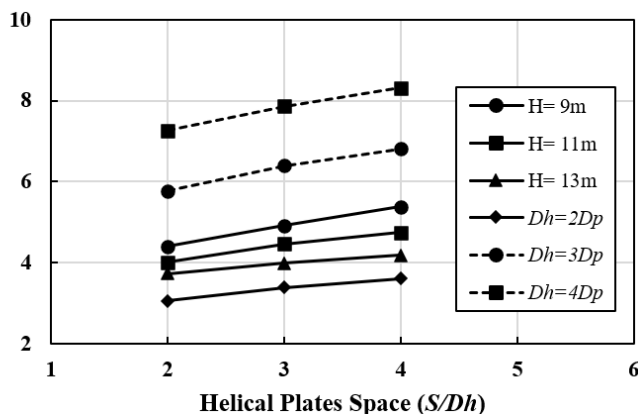


شکل ۷. مقطع عرضی از تصویر جابه جایی برای تاثیر فاصله پره های شمع مارپیچی

تأثیر قطر پره ها

در این بخش تاثیر تغییرات قطر پره های شمع مارپیچی دارای سه پره در حالتی که قطر شفت مرکزی ثابت و نسبت اندازه قطر پره به قطر شفت تغییر می یابد، مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج شکل (۶)، در حالت کلی مشاهده می شود که با افزایش قطر پره به دلیل بسیج حجم بیشتری از خاک اطراف شمع در برابر بارهای وارده، میزان ظرفیت باربری فشاری افزایش می یابد. روند افزایش ظرفیت باربری در نتیجه افزایش قطر پره، در قطرهای بیشتر به تدریج کم می شود، زیرا به دلیل ثابت بودن ضخامت پره و در نتیجه افزایش قطر پره، با کاهش میزان صلبیت خمشی صفحه پره احتمال خم شدن و کم شدن پره افزایش یافته و ظرفیت باربری کاهش می یابد.

به منظور مقایسه بهتر میزان تاثیر قطر پره ها بر رفتار و ظرفیت باربری شمع های مارپیچی، نمودارهای ظرفیت باربری برحسب نسبت قطر پره های مارپیچی به قطر شفت (D_h/D_p) مطابق شکل (۸) و همچنین نمودار نسبت باربری شمع دارای پره نسبت به حالت بدون پره (Q/Q_0) برحسب نسبت قطر پره ها در شکل (۹) ارائه شده است؛ به طوری که Q ظرفیت باربری نهایی شمع



شکل ۱۲ تاثیر افزایش فاصله پره‌های شمع مارپیچی بر حسب (Q/Q_0)

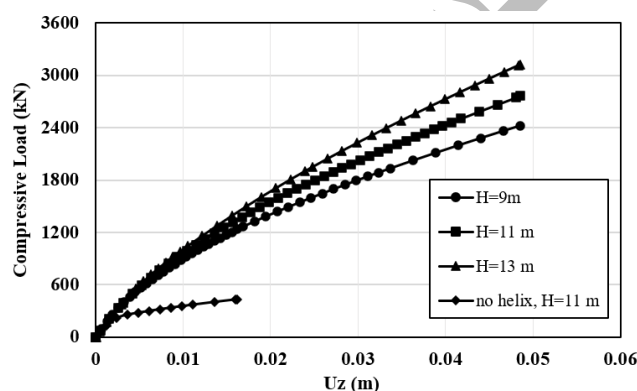
جدول ۴ مقادیر عددی نسبت ظرفیت باربری شمع مارپیچی بر شمع معمولی (Q/Q_0)

پارامتر مورد مطالعه	طول شمع (m)		
	۱۳	۱۱	۹
$S=2D_h$	۳/۷۳	۴/۰	۴/۴
$S=3D_h$	۳/۹۹	۴/۴۶	۴/۹۱
$S=4D_h$	۴/۱۸	۴/۷۴	۵/۳۸
$D_h=2D_p$	۳/۱۵	۳/۳۸	۳/۶۱
$D_h=3D_p$	۵/۵۸	۶/۴۰	۷/۱۸
$D_h=4D_p$	۷/۸۷	۹/۳۶	۱۰/۵۹
متوسط پارامترها	۴/۷۵	۵/۳۹	۶/۰۱

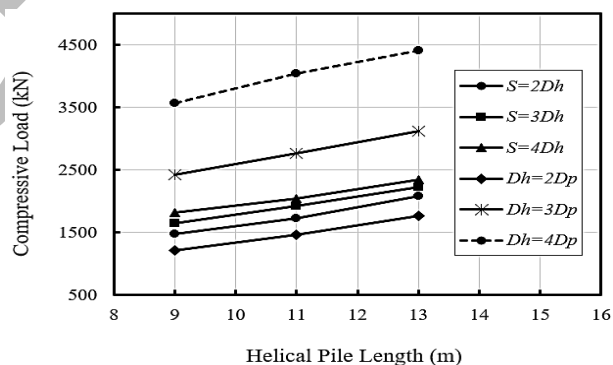
تاثیر فاصله پره‌ها از یکدیگر

تاثیر فاصله پره‌های شمع مارپیچی بر مقادیر و عملکرد باربری در این بخش مورد بررسی قرار گرفت. مطابق معیار FHWA، مقدار جابه‌جایی به میزان ۵ درصد قطر پره به شمع اعمال که با توجه به ثابت بودن قطر پره‌ها، مقدار جابه‌جایی نیز ثابت است. برابر روند منحنی‌های بار-جابه‌جایی در شکل (۱۳)، مشاهده شد که با افزایش فاصله پره‌های شمع مارپیچی میزان ظرفیت باربری فشاری در خاک ماسه‌ای افزایش می‌یابد، ولی روند افزایش برای فاصله صفحات از $(S/D_h=2)$ به $(S/D_h=3)$ نسبت به افزایش فاصله از ۳ به ۴ بیشتر به دست آمد. رفتار شمع‌های مارپیچی با چند پره در خاک ماسه‌ای به نسبت فاصله (S/D_h) ، نوع خاک و تراکم آن بستگی دارد. روند افزایش ظرفیت باربری فشاری تا زمانی ادامه دارد که با افزایش فاصله بین پره‌ها، گسیختگی از حالت مکانیسم برش استوانه‌ای خارج نشود و در صورت تجاوز

منحنی‌ها در شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش طول شمع، به دلیل افزایش طول گیرداری و مدفون شمع در خاک و با عملکرد بهتر در برابر نیروهای محرک، میزان ظرفیت باربری فشاری تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین برای حالت‌هایی که فاصله بین پره‌ها تغییر یافت، افزایش فاصله پره‌ها باعث کاهش عملکرد یکپارچه خاک بین پره‌ها شده و با تغییر مکانیزم گسیختگی از حالت مکانیسم برش استوانه‌ای، میزان تاثیر افزایش طول شمع بر افزایش ظرفیت باربری فشاری کمتر مشاهده شد.



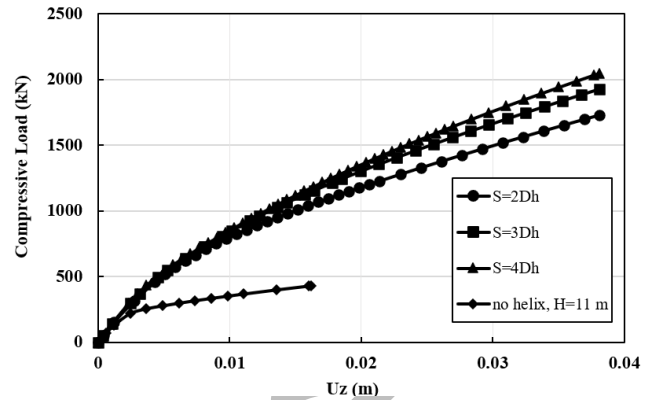
شکل ۱۰ نتایج بار-جابه‌جایی بر حسب طول‌های مختلف شمع مارپیچی



شکل ۱۱ تاثیر افزایش طول شمع مارپیچی بر ظرفیت باربری فشاری

به منظور مقایسه بهتر و کمی‌تر تاثیر طول شمع در حالت وجود پره‌ها، منحنی‌های باربری (Q/Q_0) ارائه شده در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با وجود افزایش ظرفیت باربری با افزایش طول شمع، لیکن تاثیرگذاری پره‌ها در بهبود باربری نسبت به طول شمع بیشتر بوده و بیشترین میزان بهبود در کمترین طول شمع به دست آمده است؛ باستناد خلاصه مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول (۴)، مشاهده می‌شود که متوسط میزان بهبود باربری به ازای پارامترهای مختلف، برای شمع مارپیچی با طول‌های ۹، ۱۱ و ۱۳ متری، به ترتیب برابر ۶/۰۱، ۵/۳۹ و ۴/۷۵ به دست آمده است.

فاصله صفحات از مقدار معین، منجر به فرار خاک حد فاصل دو پره شده و هر کدام از صفحات به صورت مستقل عمل می نمایند و به دلیل از بین رفتن عملکرد یکپارچه خاک، مکانیسم باربری صفحات مجزا رخ می دهد.



شکل ۱۳ نتایج بار-جابجایی برحسب فواصل پره های مختلف شمع مارپیچی (شمع ۱۱ متری)

مقایسه جامع میزان تاثیر فاصله پره های شمع بر رفتار باربری شمع های مارپیچی برحسب فاصله پره های مارپیچی (S/D_h) و نسبت باربری شمع مارپیچی شمع ساده بدون پره در شکل (۱۲) نشان می دهد که میانگین کارآمدی فاصله پره های مارپیچی به ازای نسبت فاصله پره مارپیچی به قطر شفت برابر با مقادیر ۲، ۳ و ۴، به ترتیب به میزان ۴/۷۰، ۵/۱۶ و ۵/۵۰ به دست آمده است.

ملاحظه می گردد که در تمامی حالت ها با افزایش فاصله پره های مارپیچی ظرفیت باربری شمع افزایش یافته است. بیشترین تاثیر افزایش برای حالت نسبت فاصله ۴ بوده، ولی روند افزایشی ظرفیت باربری با تغییر نسبت فاصله پره ها از ۲ به ۳ مقدار بیشتری بوده است. دلیل رفتار مشاهده شده می تواند بدین گونه تفسیر گردد که در فاصله های بیشتر، امکان ایجاد مکانیسم صفحات مجزا و رفتار مستقل پره ها بیشتر است که باستناد نتایج مطالعات پیشین، انتقال رفتار برش استوانه ای به رفتار صفحات مجزا در ماسه، در فاصله نسبی حدود ۳ ($S/D_h=3$) رخ می دهد (Lutenegger, 2011; Brown et al., 2014).

تاثیر فاصله شمع ها در گروه شمع

در این بخش تاثیر فاصله شمع های مارپیچی در گروه شمع، بررسی شده است؛ به طوری که چهار شمع مارپیچی دارای

کلاهک شمع، به صورت گروهی با آرایش مربعی در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. شمع های ۹ متری دارای سه پره که تعداد پره، قطر شفت مرکزی، قطر صفحات مارپیچی و فاصله صفحات ثابت در نظر گرفته شده و فقط فاصله مرکز به مرکز شمع ها در گروه شمع متغیر است. با توجه به قطر صفحات مارپیچی برای هر کدام از گروه های شمع مارپیچی، جابه جایی به میزان ۵ درصد قطر پره و برای گروه شمع معمولی نیز جابه جایی به میزان ۵ درصد قطر شفت مرکزی به شمع اعمال شده است.

شکل (۱۴) روند نتایج و جدول (۵) نیز خلاصه مقادیر عددی ظرفیت باربری گروه شمع را متناسب با فاصله شمع ها از یکدیگر نشان می دهد؛ حداقل مقدار ظرفیت باربری در حالتی است که فاصله شمع ها در گروه از یکدیگر $S_g=1D_h$ است. به طوری که با افزایش فاصله شمع ها در گروه، ظرفیت باربری افزایش می یابد؛ زیرا هنگامی که شمع ها در فاصله نزدیک به هم قرار داشته باشند، احتمال بیشتری وجود دارد که حباب های تنش محدوده هر شمع در تعامل و برخورد با حباب های تنش شمع های اطراف باشند که این موضوع باعث کاهش ظرفیت باربری گروه شمع می شود. بنابراین با افزایش فاصله شمع های گروه به محدوده فواصل مناسب، ظرفیت باربری افزایش می یابد. بر این اساس، به منظور به حداقل رساندن تاثیر برهم کنش بین شمع های مارپیچی گروهی و کسب حداکثر راندمان گروه شمع، حداقل فاصله بین شمع ها در گروه شمع، بایستی $S_g=3D_h$ در نظر گرفته شود (Nowkandeh and Choobasti, 2021). تفاوت مشهود رفتار باربری گروه شمع در جابه جایی های بزرگ تر، موید تاثیرگذاری مکانیسم شکست بر ظرفیت باربری گروه شمع مارپیچی در خاک ماسه ای می باشد.

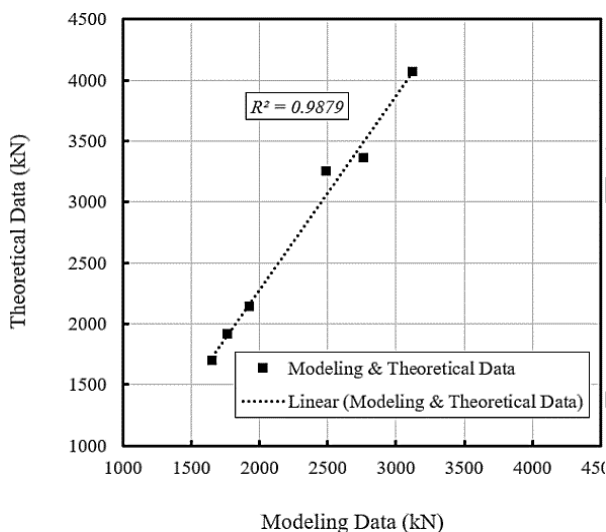
لازم به ذکر است در شمع های گروهی، افزایش فاصله بین شمع ها در گروه تا زمانی موثر است که فاصله بین شمع ها سبب کاهش هم پوشانی مناطق تحت تنش شود. ولی هنگامی که فاصله شمع ها در گروه در نسبت های زیاد قرار داشته باشد، شیب و روند افزایشی ظرفیت باربری گروه با افزایش فاصله به تدریج کاهش می یابد. به این صورت که با افزایش بیشتر فاصله شمع های گروه از یکدیگر، شمع ها به صورت کاملاً انفرادی عمل کرده و روند افزایش ظرفیت باربری با افزایش فاصله کاهش می یابد.

بارگذاری فشاری، A_H مساحت صفحه مارپیچ پایینی، P_s محیط شفت شمع مارپیچی تعریف می شود.

جدول ۶ مقایسه مقادیر ظرفیت باربری مدل سازی عددی و مقادیر نظری

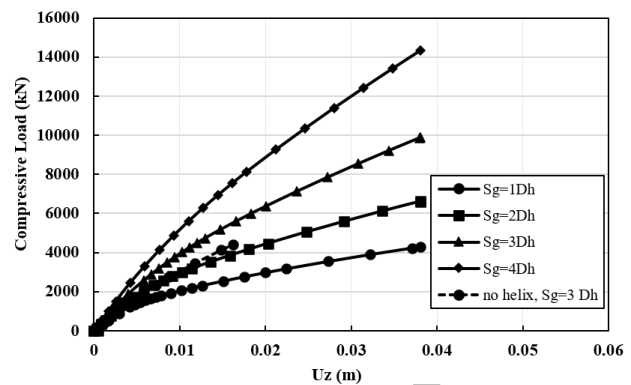
شمع های مارپیچی

نسبت مقادیر نظری به مدل سازی	مقادیر روابط نظری (kN)	مقادیر مدل سازی عددی (kN)	فاصله صفحات مارپیچی	قطر صفحات مارپیچ (m)	طول شمع (m)
1.08	1914	1765	$3D_p$	$2D_p$	13
1.3	4068	3127	$3D_p$	$3D_p$	13
1.02	1694	1655	$3D_p$	0.762	9
1.1	2140	1928	$3D_p$	0.762	11
1.3	3251	2493	$2D_p$	$3D_p$	11
1.2	3362	2765	$3D_p$	$3D_p$	11



شکل ۱۵ ضریب همبستگی بین مقادیر مدل سازی عددی و روابط نظری

مقایسه نتایج نشان می دهد که از لحاظ روند تغییر پارامترها، نتایج مدل سازی عددی با نتایج روابط نظری تطابق خوب و قابل قبولی دارد. به عنوان نمونه، با افزایش قطر صفحات مارپیچی، طول شمع و فاصله صفحات از یکدیگر، ظرفیت باربری هر دو حالت افزایش یافته است. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر مدل سازی عددی و مقادیر روابط نظری در شکل (۱۵) نیز بیانگر تطابق مناسب و نزدیک نتایج مدل سازی عددی و روابط تئوری است. براساس مقادیر جدول (۶)، ظرفیت های باربری محاسبه شده توسط روابط نظری، بزرگ تر از مقادیر مدل سازی های عددی است. از عمده دلایل این تفاوت می توان به محیط و شرایط مدل سازی نرم افزار، شبکه بندی آن و ... اشاره نمود، همچنین در



شکل ۱۴ بررسی تاثیر فاصله شمع های مارپیچی در گروه شمع

جدول ۵ نتایج ظرفیت باربری گروه شمع مارپیچی بطور نمونه و تیپ $(S=3D_h, D_h=0.762 \text{ m}, L=9 \text{ m})$.

فاصله شمع ها (S_g)	ظرفیت باربری (kN)
$S_g=1D_h$	۴۲۹۵
$S_g=2D_h$	۶۶۰۲
$S_g=3D_h$	۹۸۷۹
$S_g=4D_h$	۱۴۳۳۵
no helix, $S_g=3D_h$	۴۴۱۰

مقایسه نتایج تحلیل عددی با مقادیر نظری

به منظور بررسی کیفی نتایج پژوهش جاری، مقادیر حاصل از مدل سازی عددی با مقادیر متناظر روابط نظری ظرفیت باربری شمع های مارپیچی محاسبه شده از طریق روابط تئوری موجود (روابط (۱) و (۲)، (Mitsch and Clemence, 1985))، مورد مقایسه قرار گرفت. جدول (۶) خلاصه نتایج ظرفیت باربری را برای شمع های مختلف و شکل (۱۵)، ضریب همبستگی نتایج دو حالت را نشان می دهد.

$$Q_c = Q_{\text{helix}} + Q_{\text{bearing}} + Q_{\text{shaft}} \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_n^2 - H_1^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_H N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (2)$$

که Q_c ظرفیت فشاری نهایی شمع مارپیچی، Q_{helix} مقاومت برشی بسیج شده در امتداد سطح گسیختگی استوانه ای، Q_{bearing} ظرفیت باربری انتهایی شمع در فشار و Q_{shaft} مقاومت توسعه یافته در امتداد شفت فولادی است، به طوری که D_a قطر متوسط صفحه مارپیچ، H_n فاصله تا پایین ترین صفحه مارپیچ، H_1 فاصله تا بالاترین صفحه مارپیچ، K_s ضریب فشار جانبی خاک در

روابط ظرفیت باربری، فرض صلب بودن صفحات مارپیچی و همچنین بسیج کامل مقاومت برشی خاک اطراف شمع و صفحات مارپیچی می‌تواند با واقعیت مدل‌سازی متفاوت باشد. شایان ذکر است بررسی دقیق‌تر نتایج، مستلزم شرایط کاملاً مشابه و یکسان در پارامترهای دو حالت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ظرفیت باربری و نشست شمع‌های مارپیچی واقع در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری فشاری از طریق بررسی تاثیر پارامترهای مختلف شامل قطر پره‌های شمع (D_h)، طول شمع (H)، فاصله پره‌ها از یکدیگر (S) و فواصل شمع‌های مارپیچی از یکدیگر در گروه شمع (S_g) بر میزان مقادیر تنش- کرنش شمع‌های مارپیچی با روش اجزای محدود و در محیط نرم‌افزار پلکسیس سه‌بعدی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که خلاصه نتایج حاصله به شرح ذیل قابل ارائه می‌باشد:

- ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی نسبت به شمع معمولی بدون پره، برای تمامی حالت‌ها و پارامترهای مورد بررسی به‌طور چشمگیری افزایش نشان داد.
- با افزایش قطر صفحات مارپیچی به‌دلیل درگیری حجم بیشتری از خاک اطراف شمع در برابر بارهای وارده، ظرفیت باربری در محدود $3/35$ تا $8/99$ برابر افزایش یافت. این روند در ابتدا سریع‌تر بوده و با افزایش بیشتر قطر پره‌ها روند افزایشی به‌تدریج کم می‌شود، زیرا ضخامت صفحه پره ثابت بوده و با افزایش قطر پره، احتمال کمانش و خم شدن پره نیز افزایش می‌یابد.
- افزایش طول شمع مارپیچی باعث افزایش طول گیرداری و کاهش احتمالی حرکت شمع در برابر نیروهای محرک منجر به افزایش ظرفیت باربری به‌طور متوسط حدود $5/38$ برابر شد.
- زیاد شدن فاصله صفحات مارپیچی از یکدیگر تا زمانی که از مکانیسم برش استوانه‌ای خارج نشود، باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. با افزایش بیش از حد فاصله بین پره‌ها، به‌دلیل احتمال فرار خاک بین دو پره و رخداد عملکرد مستقل صفحات، مکانیسم باربری صفحات مجزا ایجاد می‌شود. در این مطالعه انتقال مکانیزم از رفتار برش استوانه‌ای به صفحات مجزا در فاصله $S=3D_h$ مشاهده شد، به‌طوری که در نسبت فاصله کمتر از مقدار سه، روند افزایش ظرفیت باربری بیشتر بوده و پس از آن، شیب روند

افزایشی کمتر می‌شود. میزان افزایش متوسط ظرفیت باربری به‌ازای پارامترهای مختلف مورد مطالعه در حدود $5/12$ برابر به‌دست آمد.

- افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌های مارپیچی در گروه شمع (S_g) تا زمانی که افزایش فاصله، سبب کاهش هم‌پوشانی مناطق تحت تنش شود، ظرفیت باربری گروه افزایش می‌یابد که برای مطالعه حاضر به‌منظور کاهش اثر تاثیر برهم‌کنش بین شمع‌های مارپیچی، حداقل فاصله $S_g=3D_h$ به‌دست آمد.

واژه‌نامه

Bearing Capacity	ظرفیت باربری
FHWA	آیین نامه اداره راه آمریکا
Helical Plate	صفحه مارپیچی
PLAXIS	نرم‌افزار پلکسیس
Q	ظرفیت باربری شمع دارای پره
Q ₀	ظرفیت باربری شمع بدون پره
Q _{helix}	ظرفیت باربری صفحه مارپیچی
Q _{bearing}	ظرفیت باربری انتهایی
Q _{shaft}	ظرفیت باربری جداره
H ₁	فاصله تا بالاترین صفحه پره
D _a	قطر متوسط صفحه
H _n	فاصله تا پایین‌ترین صفحه پره
k _s	ضریب فشار جانبی خاک
P _s	محیط شفت
A _H	مساحت صفحه پایین
D _p	قطر شفت مرکزی
S _g	فاصله شمع‌ها از یکدیگر
D _h	قطر صفحه پره
H	طول شمع
S	فاصله صفحات پره
R _{interface}	ضریب اصطکاک سطح مشترک مصالح

سپاسگزاری

مراجع

- [1] S. Abedini, and J. Bolouri Bazzaz, "Investigation of lateral behavior micropiled foundation under combined lateral and vertical loading," *Ferdowsi Civil Engineering*, 36(4), pp. 55-76, 2023.
- [2] S. Gholipour, and M. Makarchian, "Experimental and Numerical Study of Load-Bearing and Settlement Behavior of Circular Skirted foundations Compared to other Types of Foundations," *Ferdowsi Civil Engineering*, 33(3): 85-104, 2020.
- [3] M. A. Mashayekhi, M. Khanmohammadi, "Numerical Investigation of Concrete and Helical Pile-supported Embankments Under Railway Traffic Loading," *Ferdowsi Civil Engineering*, 36(3): 47-62, 2023.
- [4] M. Abdollahi, J. Bolouri Bazzaz, "Experimental Study of the Excavation Using Pile-Anchorage System," *Ferdowsi Civil Engineering*, 31(4): 79-96, 2018.
- [5] J. Keshavarz, J. Bolouri Bazzaz, "Evaluation of Horizontal Displacement of Long Piles Subject to Lateral Loading in Sandy Soil," *Ferdowsi Civil Engineering*, 28(1): 65-80, 2016.
- [6] I. Shooshpasha, M. Sharafkhah, "Experimental Study on Parameters Affecting on Pile Tension Capacity in Sand," *Ferdowsi Civil Engineering*, 26(1): 39-48, 2015.
- [7] A. Kordjazi, F. Pooya Nejad, "Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Axially Loaded Piles Using a Support Vector Machine," *Ferdowsi Civil Engineering*, 24(1): 71-90, 2012.
- [8] H. Sharafi, Y. shams maleki, "Numerical Analysis of Pile-Soil Interface Strength Properties Effects on the Lateral Stiffness of p-y Curves," *Ferdowsi Civil Engineering*, 30(1): 93-112, 2018.
- [9] A. Mahboubi, K. Panaghi, "The Effects of Piles Spacing and Length to Diameter Ratios on the Soil-Pile-Structure Interaction Phenomenon," *Ferdowsi Civil Engineering*, 25(1): 1-14, 2014.
- [10] C. Tsuha, and N. Aoki, "Quality control of helical piles in sand," 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 64th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2011.
- [11] B. Livneh, and M. H. El Naggar, "Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, no. 8, pp. 1142-115, 2008.
- [12] W. Li, "Axial and Lateral Behavior of Helical Piles under Static Loads," Master's Thesis. University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, Alberta, Canada, 2016.
- [13] Z. H. Elsherbiny, and M. H. El Naggar, "Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study," *Canadian Geotechnical Journal*, (2013). Vol. 50, no. 12, pp. 1191-120, 2013.
- [14] C. Todeshkejoei, J. P. Hambleton, S. A. Stanier, and C. Gaudin, "Modelling installation of helical anchors in clay," Proceedings 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp. 917-922, 2014.
- [15] D. J. Y. Zhang, R. Chalaturnyk, P. K. Robertson, D. C. Sego, and G. Cyre, "Screw anchor test program (Part I): Instrumentation, site characterization and installation," Proceedings of the 51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, 1998.
- [16] M. Sakr, "Performance of helical piles in oil sand," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, no. 9, pp. 1046-1061, 2009.
- [17] M. Sakr, "Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesionless soils," *DFI*

Journal, The Journal of the Deep Foundations Institute, Vol. 5, no. 1, pp. 39-57, 2011.

- [18] S. N. Rao, Y. V. S. N. Prasad, and M. D. Shetty, "The behaviour of model screw piles in cohesive soils," *Soils and Foundations*, Vol. 31, no. 2, pp. 35-50, 1991.
- [19] M. Aydin, T. D. Bradka, and D. A. Kort, "Osterberg cell load testing on helical piles," *In Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, pp. 66-74, 2011.
- [20] A. J. Lutenecker, "Cylindrical shear or plate bearing? Uplift behavior of multi-helix screw anchors in clay," *Contemporary Topics in Deep Foundations*, ASCE, pp. 456-46, 2009.
- [21] M. H. Nasr, "Performance-based design for helical piles," *Contemporary Topics in Deep Foundations*, ASCE, pp. 496-503, 2009.
- [22] S. Adi, F. Fatnanta, and S. Satibi, "Compressive Capacity of Helical pile Foundation on Peat with variation of Helical Pile Diameter," *ASTONJADRO*, Vol. 11, no. 1, pp. 76-85, 2021. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v11i1.5708>.
- [23] B. Livneh, and M. H. El Naggar, "Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, no. 8, pp. 1142-1155, 2008.
- [24] M. A. Saleem, A. A. Malik, and J. Kuwano, "Model study of screw pile installation impact on ground disturbance and vertical bearing behaviour in dense sand," *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 710, no. 1, p. 012056, 2021.
- [25] M. Ahmadnezhada, M. Naghipoura, and A.M. Askari Fateh, "Load-displacement behavior of helical pile using Frustum Confining vessel (FCV) and full-scale testing in Babolsar sand," *Marine Georesources and Geotechnology*, 2024, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2024.2389168>.
- [26] H. Ebrahimnezhad, M. Keramati, and R. Hoseinpour, "Investigation of monotonic behavior of different-pattern helical pile groups in sandy soils," *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 17, no. 2, 2026. <https://doi.org/10.1186/s40703-025-00255-3>.
- [27] V. Venkatesana, M. Mayakrishnan, S. Kumar Shukla, "Effect of pile spacing in helical pile groups in soft clays under combined loading," *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 42, no. 4, 2024. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2023.2196962>.
- [28] B. Feng, J. Lin, M. Zhu, Q. LÜ, P. Li, and Z.h. Sun, "Investigation on bearing characteristics of helical pile under combined vertical and lateral loads," *Journal of Physics: Conference Series 3006*, 2025. doi:10.1088/1742-6596/3006/1/012044.
- [29] M. Makarchian and N. Vafaea., "Numerical Investigation of Helical Piles Performance in Stabilization of Earth Slopes," *The Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 50, no. 98, pp. 53-64, 2020. [In Persian].
- [30] J. Woodcock, "Finite element analysis of screw piles," *Proceedings of the 1st Civil and Environmental Engineering Student Conference*, 2012, Imperial college, London, 1-5.
- [31] H. A. Perko, "Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation," John Wiley & Sons, 2009.
- [32] S. Bagheri, and A. Salighezade, "Investigating the effect of pile geometry and length on the settlement of a group of bladed piles," 6th. National Congress on civil engineering, architecture and urban development, 2019, Tehran, Iran. [In Persian].
- [33] F. Nabizadeh, and A. Janalizadeh, "Laboratory and field study of the performance of helical piles in sandy soil," *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Vol. 3, no. 3, pp. 5-15, 2016. [In Persian].
- [34] K. Papadopoulou, H. Saroglou, and V. Papadopoulos, "Finite element analyses and experimental investigation of

helical micropiles,” *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 32, no. 4, pp. 949-96, 2014.

- [35] V. Venkatesan, M. Mayakrishnan, and S. Kumar Shukla, “Effect of pile spacing in helical pile groups in soft clays under combined loading,” *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 42, no. 4, 2024, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2023.2196962>.
- [36] M. Makarchian, and A. komasi, “Laboratory comparison of tensile bearing capacity of helical piles in in-situ and torsional states,” Eleventh National Congress on Civil Engineering papers, 2019, Fars, Shiraz. [In Persian].
- [37] J. L. Harnish, “Helical Pile Installation Torque and Capacity Correlations,” Master’s Thesis, University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Canada., 2015.
- [38] M. Jahanshahi Nowkandeh, and A. Janalizadeh Choobbasti, “Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 80, pp. 4001–4023, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02158-w>.
- [39] M. Ghazavi, Y. Ghomi, P. Heidari, and B. Mohammadzadeh, “Effects of helix shapes and locations on compression capacity of helical piles for offshore foundations,” *Marine Georesources and Geotechnology*, 2022. Doi:10.1080/1064119X.2022.2081827.
- [40] N. M. Shuman, M. Sadik Khan, and F. Amini, “Efficient machine learning model for settlement prediction of large diameter helical pile in c- Φ soil,” *AI in Civil Engineering*, Vol. 3, no. 10, 2024. <https://doi.org/10.1007/s43503-024-00028-4>.
- [41] L. Salhi, O. Nait-Rabah, C. Deyrat, and C. Roos, “Numerical modeling of single helical pile behavior under compressive loading in sand,” *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 18, pp. 4319-4338, 2013.
- [42] M. Philippe, “Maillages d’éléments finis pour les ouvrages de géotechnique,” Conseils et recommandations. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pp. 39-64., 1997.
- [43] B. E. George, S. Banerjee, and S. R. Gandhi, “Numerical analysis of helical piles in cohesionless soil,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 14, no. 4, pp. 361-375, 2017.
- [44] M. J. Brown, A. J. Brennan, and L. Hamilton, “Optimising the Compressive Behavior of Screw Piles in Sand for Marine Renewable Energy Applications,” International Conference on Piling & Deep Foundations, Stockholm, Sweden, 2014.
- [45] Z. H. Elsherbiny, and M. H. El Naggar, “Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, no. 12, pp. 1191-1203, 2013.
- [46] A. Lees, “Geotechnical Finite Element Analysis,” *ICE publishing*, 2013.
- [47] A. J. Lutenegeger, “Behavior of multi-helix screw anchors in sand,” Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, Toronto.
- [48] M. J. Nowkandeh, and A. J. Choobbasti, “Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 80, no. 5, pp. 4001-4023, 2021.
- [49] M. P. Mitsch, and S. P. Clemence, “The uplift capacity of helix anchors in sand,” Proceedings of Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, pp. 26–47, 1985.