



Investigating the uncertainty in calculating the bearing capacity of helical piles by considering different behavior modes using the Monte Carlo method

Hamed Rahmati ¹, Mohammad Hossein Bagheripour ^{2*}

¹PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

²Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 28.8.2024

Revised: 01.11.2024

Accepted: 06.01.2025

Keyword:

Helical piles

Bearing capacity

Numerical modeling

Uncertainty

Coefficient of Variation

Monte Carlo simulation

*Corresponding Author:

Mohammad Hossein

Bagheripour

Email: bagheri@uk.ac.ir

ABSTRACT

The performance and bearing capacity of helical piles, in addition to their construction and geometry, are highly dependent on characteristics of site soil. On the other hand, the soil resistance parameters have inherent uncertainty, which causes differences in the analytical results and experiments. In this paper, using Monte Carlo analysis, the uncertainty of the compressive bearing capacity of helical evaluated by stochastic parameters of cohesion, internal friction angle, and unit weight of soil. To determine different failure mode, different piles with different geometries (single-plate and double-plate piles with different S/D) were modeled in PLAXIS 2D software. The results of analytical calculations, uncertainty analysis and FEM showed that the permissible settlement of helical piles in selected soil in order to achieve ultimate bearing capacity should not be more than 5% of the piles plate diameter. Also, the ratio S/D=1.5 is the change boundary of bearing behavior from individual plate to cylindrical shear for the two-plate helical pile. The results also showed that the greater influence of bearing plates on the final uncertainties of the bearing capacity of piles, and also the bearing capacity of the cylindrical shear mode has less uncertainty than the individual bearing mode. Also, by performing the sensitivity analysis of the input parameters in the final bearing capacity uncertainties, it was observed that the greatest effect in the final uncertainties is related to the internal friction angle of the soil than to the unit weight of the soil on the output of the analysis.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The importance of soil mechanical parameters dispersion has increased stochastic analyses in geotechnical engineering day by day. In this research, with an uncertainty analysis in different failure modes of helical piles, the contribution of different parts of the pile and input parameters (soil mechanical characteristics) on the output uncertainties were studied. By modeling different two-plate piles with different distance between the plates in PLAXIS software, the behavior of piles bearing capacity and different failure modes was investigated. In general, in this research, the behavior of helical piles in Kerman soil has been investigated using finite element modeling, analytical method and reliability analysis.

Methodology

In this research, the bearing capacity of hollow steel helical piles with 2 meters length and 0.076 meters in diameter, has been studied in two cases: one load-bearing and two load-bearing plates. The modeling of these piles has been done in PLAXIS software using the elastic behavior model in a two-dimensional space using 15-node elements showed in figure 1.

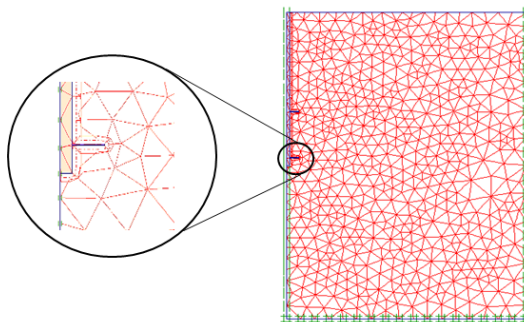


Figure1: finite element grid in PLAXIS software

By applying the vertical displacement above the main shaft of the piles, the settlement graphs against the applied load are drawn. By modeling two-plate piles with different distance between the plates (S), the changing pile bearing behavior between individual plate bearing and cylindrical shear method was investigated and the optimal distance (S) was determined in existing soil.

Assuming the behavior of individual plates bearing, the uplift and compressive capacity of multi-plate piles can be estimated using equation (1).

$$P_{ul} = \sum_{i=1}^n (q_{ult} A)_i + f_s H(\pi d) \quad (1)$$

In the case of cylindrical shear, the main bearing capacity of the pile is provided by relying on the shear strength of the soil enclosed between the load-bearing plates and the soil around the pile. In addition, according to equation (2), the lower bearing plate of the pile and the main shaft of the pile also play a role in the final bearing capacity of the pile.

$$P_{u2} = q_{ult}A_1 + T(n-1)S\pi D_{avg} + f_s H(\pi d) \quad (2)$$

To consider the uncertainty in the analysis of the bearing capacity, 3 input parameters are considered as random variables, which include the angle of internal friction (φ), cohesion (C) and unit weight (γ). These random parameters are modeled using truncated normal probability distribution functions with Monte Carlo simulation as equation (3):

$$F(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5(\frac{x-\mu}{\sigma})^2) \quad (3)$$

Results and discussion

In single helix pile, the coefficient of variation for bearing capacity of plate is 0.11 and for the frictional force of the main shaft is 0.078. The ratio of the average bearing capacity of the bearing plate (Fp) to the average frictional force of the pile wall (Fs) is equal to 6.43. For a two-plate pile with (S/D=1.5), the coefficient of variation of the bearing capacity of bottom plate, the frictional force of the main shaft, and the shear force of the soil cylinder enclosed between the two plates are 0.11, 0.1, and 0.0998, respectively. For two-plate pile with behavior of individual plates bearing (S/D=5), the coefficient of variation of the bearing capacity of plates and the frictional force of the main shaft are 0.109 and 0.078, respectively. In figure (2) shows the coefficient of variation for bearing capacity in the sensitivity analysis. The bearing capacity of helical piles is very sensitive to the internal friction angle of soil. In this study, 5% of the bearing plate diameter of helical piles can be considered a more suitable criterion to control the settlement of these piles.

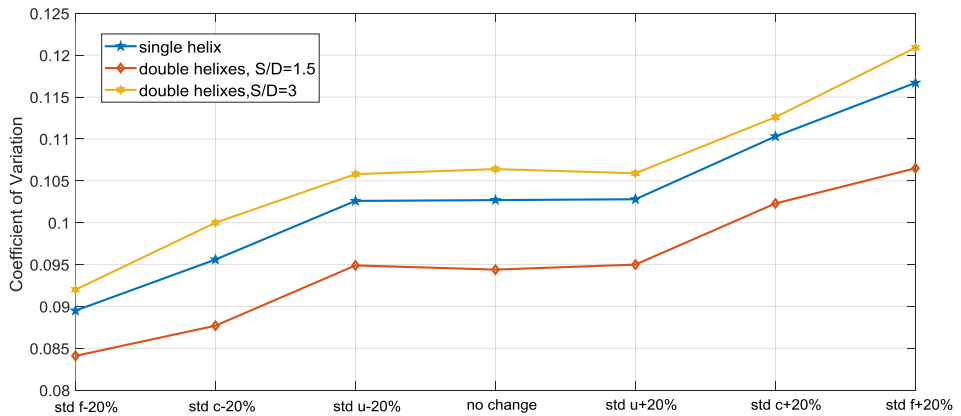




Figure (2): coefficient of variation for bearing capacity in the sensitivity analysis

Conclusion

By reliability analysis, it was determined that the largest share of the uncertainty of the bearing capacity is related to the bearing plates of the helical piles. In other words, in the calculation of the bearing capacity, some random parameters affect the calculations in several stages, which increases the uncertainty in the final bearing capacity of the piles. In helical piles, the contribution of the friction of the shaft to the bearing capacity of the plate is so low that it practically leaves a negligible effect on the final uncertainties. In the cylindrical shear failure of a double-plate pile, the frictional capacity of the shear cylinder is about 25% of the bearing capacity of the bottom plate of the pile, which makes the total bearing capacity of the pile in the cylindrical shear state equal to 64% of the bearing capacity of the individual plates mode in the uncertainty analysis, while This value is equivalent to 79% in finite element analysis. It can be said that the cylindrical shear failure mode is more conservative than the individual plates and the top plate of the pile also plays a small role in the bearing capacity, which is not included in the calculation formulas. Using the results of the finite element analysis and the obtained force-displacement diagram, and with the analytical calculations and the uncertainty analysis of the bearing capacity, it is determined that the bearing capacity of helical piles with considering the displacement equivalent to 5% of the bearing plates diameter, can be a better measure to displacement equal to 10% of the diameter of these plates. In the sensitivity analysis of the studied piles with a 20% changing in the standard deviation of each random parameters of the soil, the dispersion of the output results is reduced, and this reduction is more severe in the case of the internal friction angle of the soil and then in the case of soil adhesion reduction. This issue is important because with the help of the results of geotechnical tests, if the soil in a site has relatively good homogeneity and the deviation from the criteria of random soil parameters is small, there is no need to use high confidence coefficients in the design of geotechnical structures. On the other hand, this analysis can determine the risk limit and the worst possible case of bearing capacity and help the designer to increase the safety of the structure.



بررسی عدم قطعیت در محاسبه ظرفیت باربری شمع‌های ماریپیچی با در نظر گرفتن مدهای رفتاری مختلف به روش مونت کارلو

حامد رحمتی^۱ , محمد حسین باقری پور^{۲*} 

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

کارایی و ظرفیت باربری شمع‌های ماریپیچی، علاوه بر نحوه‌ی ساخت و هندسه آن‌ها، به شدت به خاک محل اجرا وابسته می‌باشد. از طرفی پارامترهای مقاومتی خاک دارای عدم قطعیت ذاتی هستند که این موضوع باعث بروز اختلاف در نتایج محاسباتی و آزمایش‌های واقعی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از آنالیز مونت کارلو، عدم قطعیت ظرفیت باربری فشاری شمع‌های ماریپیچی با استفاده از پارامترهای غیر قطعی چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین حالت‌های شکست مختلف، شمع‌هایی با هندسه‌های متفاوت (شمع تک‌صفحه‌ای و دوصفحه‌ای با S/D های متفاوت) در نرم‌افزار plaxis دو بعدی مدل‌سازی شدند. نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی، آنالیز عدم قطعیت و مدل‌سازی المان محدود نشان داد که نشست مجاز شمع‌های ماریپیچی در خاک مورد نظر به‌منظور دستیابی به ظرفیت باربری نهایی نباید بیشتر از ۵٪ قطر صفحه باربر باشد. همچنین برای این خاک، نسبت $S/D=1.5$ مرز تغییر رفتار باربری شمع ماریپیچی دوصفحه‌ای از حالت باربری صفحات مجزا به برش استوانه‌ای می‌باشد. نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر بیشتر صفحه‌های باربر در عدم قطعیت‌های نهایی ظرفیت باربری است و همچنین ظرفیت باربری حالت برشی استوانه‌ای از عدم قطعیت‌های نهایی نسبت به حالت باربری صفحات مجزا برخوردار می‌باشد. همچنین با انجام آنالیز حساسیت پارامترهای مقاومتی خاک در عدم قطعیت‌های نهایی و پراکندگی ظرفیت باربری خروجی مشخص گردید که بیشترین تأثیر در ایجاد عدم قطعیت‌های نهایی مربوط به زاویه اصطکاک داخلی خاک است و وزن مخصوص خاک تأثیر بسزایی در همگرایی یا واگرایی داده‌های خروجی ندارد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

کلید واژگان:

شمع‌های ماریپیچی

ظرفیت باربری

مدل‌سازی عددی

عدم قطعیت

ضریب تغییرات آنالیز

مونت کارلو

*نویسنده مسؤل:

محمد حسین باقری پور

پست الکترونیکی:

baqheri@uk.ac.ir



مقدمه

در سال‌های اخیر پی‌های عمیق با شمع‌های مارپیچی تک صفحه یا چند صفحه‌ای مورد اقبال مهندسان ژئوتکنیک قرار گرفته است و عموماً در ساخت ساختمان‌های پیش‌ساخته و موقت مورد استفاده قرار گرفته است. موارد دیگر استفاده از این ریز شمع‌ها عبارت‌اند از: پی خطوط انتقال نیرو، خطوط لوله، بهسازی سازه‌های موجود، پایدارسازی گودبرداری‌ها و شیروانی‌های قائم، احداث مخازن هوایی مایعات و سازه‌های ساحلی. این نوع شمع در مقایسه با انواع دیگر دارای مزایای متعددی از قبیل عدم ایجاد ارتعاش بر روی پی و ساختمان‌های مجاور در حین ساخت، سرعت نصب قابل توجه و سهولت اجرا می‌باشد. این شمع‌ها گزینه مناسبی برای جایگزینی انواع فونداسیون‌های عمیق برای کارفرما از نظر اجرائی و اقتصادی است [۱-۳].

تحقیقات قبلی در مورد رفتار شمع‌های مارپیچی در خاک‌های رسی عمدتاً بر رفتار شمع‌های چند صفحه‌ای بارگذاری شده در فشار محوری یا کشش با عمق دفن متفاوت (H) (عمق دفن بالاترین صفحه مارپیچ)، قطر صفحه (D) و فاصله‌ی میان صفحه‌های برابر (S) متمرکز شده است. شمع‌های مارپیچی از دو قسمت پیشرو و قسمت اضافی تشکیل شده‌اند [۴]. در شکل (۱) پارامترهای هندسی S، H، D و قابل مشاهده می‌باشند. قسمت پیشرو، قسمت ابتدایی شمع است که صفحه‌های برابر روی آن نصب می‌شوند، با توجه به عمق نصب، قسمت‌های اضافی هم سازه با شفت اصلی به قسمت پیشرو متصل می‌شود تا صفحه‌های برابر در عمق مورد نظر نصب شوند. تعداد و فاصله‌ی صفحه‌ها، قطر شفت، طول شمع و قطر صفحه‌ها متغیر و با توجه به نوع و ابعاد پروژه تعیین می‌گردند [۵]. نصب شمع‌های مارپیچی با اعمال فشار و گشتاور هم‌زمان روی شفت اصلی انجام می‌گیرد. بنا بر توصیه محققان سرعت پیشنهادی برای نصب این شمع‌ها بین ۵ تا ۲۰ دور در دقیقه می‌باشد [۶]. این نیروی محوری و گشتاور پیچشی باید در حدی باشد که پیشرفت شمع مارپیچی در داخل زمین در یک دور کامل چرخش حدوداً برابر ۸۰ درصد گام صفحه‌های برابر (W) باشد تا دست‌خوردگی خاک در طی عملیات نصب شمع به حداقل برسد. مقدار نیروی محوری لازم برای نصب، متناسب با شرایط خاک و پیکربندی صفحات مارپیچی متفاوت است [۷]. برای شمع‌های چند صفحه‌ای، متداول‌ترین روش‌ها برای محاسبه ظرفیت باربری، «روش باربری صفحات مجزا» و «روش برشی استوانه‌ای» می‌باشند، در شکل (۱) نمای کلی این دو حالت نشان داده شده است. برای روش باربری صفحات مجزا، فرض بر این است که مقاومت خاک بالا یا پایین هر صفحه برابر تحت کشش یا فشار، تعیین‌کننده‌ی ظرفیت باربری کلی شمع می‌باشد. در روش برشی استوانه‌ای، علاوه بر صفحه‌ی برابر پایینی شمع، فرض بر این است که کل حجم محبوس خاک بین صفحه‌های برابر به صورت یکپارچه با تأمین مقاومت برشی، ظرفیت باربری شمع را تعیین می‌کنند. وقوع هر کدام از دو مکانیسم اصلی مرتبط با ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی عمدتاً به نوع خاک و فاصله بین صفحات برابر بستگی دارد [۸؛ ۹]. در همین راستا محققان مختلفی نظرات و پیشنهاد‌های خود را بر پایه نتایج آزمایشگاهی ارائه کرده‌اند.

ناریشما و همکاران^۳ (۱۹۹۱) [۱۰] آزمایش‌های بیرون کشیدگی را روی مدل‌های شمع چند صفحه‌ای در خاک رس با فاصله متفاوت بین صفحات انجام دادند. آن‌ها یک سطح گسیختگی استوانه‌ای را پیرامون خاک

^۱ individual bearing method

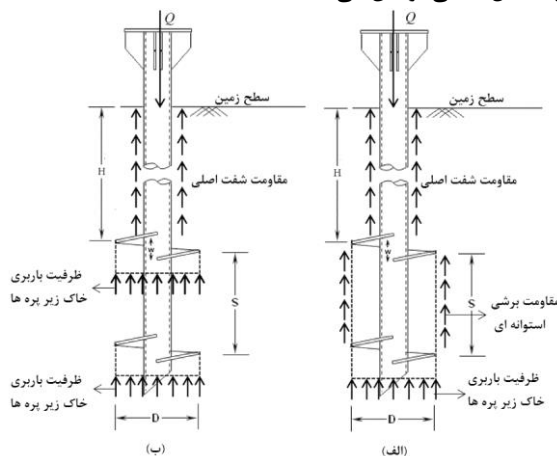
^۲ cylindrical shear method

^۳ Narasimha Rao et al.

محبوس بین صفحه‌های بالا و پایین برای شمع‌های با نسبت S/D بین ۱ تا ۱/۵ مشاهده کردند و برای نسبت $S/D=4$ هیچ شکست استوانه‌ای مشاهده نشد. وانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۳) [۱۱] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های LDFE (Large Deformation Finite Element) به این نتیجه رسیدند که مکانیسم برشی استوانه‌ای برای خاک رس در نسبت فاصله $S/D \leq 3.2$ غالب است. برای شمع‌های ماریچی چند صفحه‌ای در ماسه، لوتنگر^۲ (۲۰۱۱) [۱۲] از آزمایش‌های میدانی به این نتیجه رسید که انتقال از مکانیسم برشی استوانه‌ای به رفتار باربری صفحات مجزا در مقادیر $S/D > 3$ رخ میدهد. در مطالعه‌ای دیگر نوکنده و جانعلیزاده^۳ (۲۰۲۱) [۱۳] رفتار فشاری شمع‌های منفرد و گروه‌های شمع‌های ماریچی را در هر دو خاک شنی و رسی از طریق مدل‌سازی (Finite Element Method) FEM در نرم‌افزار ABAQUS بررسی کردند. آن‌ها مدل‌های عددی کالیبره شده برای مطالعه مکانیسم انتقال بار شمع‌های ماریچی منفرد و یافتن نسبت فاصله بین صفحات ماریچی بهینه استفاده کردند. آن‌ها با مطالعه‌ی مکانیسم انتقال بار یک شمع ماریچی معمولی در انواع مختلف خاک شنی و رسی نشان دادند که افزایش پارامترهای مقاومت خاک باعث می‌شود سهم هر ماریچی در ظرفیت باربری نهایی در خاک چسبنده تقریباً برابر باشد. باین‌حال، چنین افزایشی در پارامترهای مقاومتی برای خاک بدون چسبندگی باعث ایجاد اختلاف بیشتر در ظرفیت باربری هر کدام از صفحات ماریچی می‌شود. شومان و همکاران^۴ (۲۰۲۳) [۱۴] مطالعه‌ای را با هدف توسعه یک رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد شمع‌های ماریچی با قطر کوچک و بارگذاری محوری انجام دادند. آن‌ها از یک مدل عددی FEM کالیبره شده برای بررسی عملکرد شمع‌های ماریچی در دولایه خاک تحت بار عمودی استفاده کردند. در پژوهش ایشان، محدوده ظرفیت‌های محاسبه شده در مقابل اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های بارگذاری (Qc/Qm) ۰/۶۸ تا ۲/۶۷ است که میانگین $Qc/Qm = 1.10$ برآورد کلی این پژوهش بود. لی و همکاران^۵ (۲۰۲۳) [۱۵] با توسعه یک مدل LDFE برای شمع‌های ماریچی دو صفحه‌ای، بارگذاری محوری و عوامل کنترل‌کننده حالت‌های شکست آن‌ها را بررسی نمودند. در پژوهش ایشان مشاهده شد که با افزایش فاصله بین صفحات ماریچی، حالت شکست به تدریج از یک حالت برشی استوانه‌ای به یک حالت شکست انتقالی و سپس به حالت باربری صفحات مجزا تغییر کرد. آن‌ها همچنین نشان دادند که فاکتورهای باربری صفحه‌ی پایینی شمع ماریچی بدون تغییر باقی می‌ماند، اما فاکتورهای باربری صفحه بالایی با عمق نصب و حالت‌های شکست تغییر می‌کند. وانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۳) [۱۶] از تجزیه و تحلیل FEM برای بررسی تأثیر عواملی مانند نسبت قطر صفحه‌ی ماریچی به شفت اصلی و عمق نصب صفحه ماریچی بر ظرفیت باربری و مکانیسم‌های شکست شمع‌های ماریچی تک‌صفحه‌ای با شفت توخالی در خاک رس استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده توسط آن‌ها حاکی از این بود که ظرفیت باربری نهایی تک‌محوری یک شمع ماریچی در جهات مختلف در حالتی که نسبت L_H/L_S (طول نوک شمع تا سطح خاک نسبت به فاصله‌ی پایین صفحه باربر تا سطح

^۱Wang et al.^۲Lutenegeger^۳Nowkandeh & Janalizadeh^۴Shuman et al.^۵Li et al.^۶Wang et al.

خاک) ثابت باشد، با افزایش D_H/D_S (نسبت قطر صفحات برابر به قطر شفت اصلی) افزایش می‌یابد. به تازگی مطالعات قابلیت اطمینان و استفاده از داده‌های غیر قطعی در زمینه‌ی شمع‌های مارپیچی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. اسپاگنولی و همکاران^۱ (۲۰۱۹) [۱۷] در پژوهشی به مطالعه‌ی نیروی بالا کشیدگی شمع‌های مارپیچی با نسبت‌های S/D مختلف در خاک‌های رسی پرداختند. در این پژوهش آن‌ها با استفاده از تحلیل مونت کارلو چگونگی تاثیر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی بر عمق نصب بر اساس نیروی بالا کشیدگی مورد نیاز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از تاثیر زیاد ناهمگنی ژئوتکنیکی بر طول شمع و در نتیجه گشتاور نصب می‌باشد. چنگ و همکاران^۲ (۲۰۲۲) [۱۸] در پژوهشی به منظور بررسی تاثیر پراکندگی ذاتی داده‌های ژئوتکنیکی بر مقاومت بیرون کشیدگی انکرهای مارپیچی، از یک تحلیل المان محدود تصادفی^۳ با تغییر شکل بزرگ سه بعدی استفاده کردند. در پژوهش ایشان مشخص گردید که تغییرپذیری مکانی پارامترهای مقاومتی خاک به طور قابل توجهی بر مکانیسم شکست انکرهای مارپیچی تاثیر می‌گذارد. همچنین با مطالعه‌ی پارامتریک نشان دادند که ضریب تغییرات و مقیاس‌های عمودی تغییر در مقاومت خاک می‌تواند تاثیر زیادی بر ظرفیت بیرون کشیدگی داشته باشد، در حالی که تاثیر نوسانات مقیاس‌های افقی بی‌اهمیت است. چنگ و همکاران (۲۰۲۳) [۱۹] با استفاده از روش المان محدود تصادفی و مدل سازی تغییرات مکانی مقاومت خاک به عنوان یک میدان تصادفی، اثر فرآیند نصب را بر مقاومت بیرون کشیدگی شمع‌های مارپیچی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به وسیله شبیه‌سازی مونت کارلو برای بررسی گشتاور نصب و ظرفیت بیرون کشیدگی شمع‌های مارپیچی نشان دادند که با عمق نفوذ متفاوت، اثر نصب و همچنین توزیع تصادفی مقاومت خاک به طور قابل توجهی بر ظرفیت بیرون کشیدگی شمع‌ها تاثیر می‌گذارد. آن‌ها همچنین عنوان کردند که گشتاور نصب در مدل‌سازی‌های مونت کارلو به‌طور قابل توجهی حول نتایج تحلیل قطعی نوسان می‌کند.



شکل (۱) (الف) مدل شکست استوانه‌ای، (ب) مدل شکست صفحات مجزا

¹ Spagnoli et al.

² Cheng et al.

³ Random finite element analysis

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ی شمع‌های ماریپیچی و ماهیت رفتاری خاک، لزوم استفاده از تحلیل‌های غیر قطعی و مدل‌سازی‌های تصادفی به منظور دستیابی به نتایج بهتر و تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر در طراحی و اجرای این شمع‌ها روز به روز بیشتر احساس می‌شود. برای درک بهتر میزان عدم قطعیت و پراکندگی داده‌های ظرفیت باربری می‌توان عوامل ایجادکننده‌ی این پراکندگی را که در حقیقت پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشند با یک تحلیل عدم قطعیت مدل‌سازی نمود و اثرات آن را مورد تحلیل و بررسی قرار داد.

با توجه به کمبود مطالعات عدم قطعیت پیرامون ظرفیت باربری فشاری شمع‌های ماریپیچی و تاثیر همگنی پارامترهای مقاومتی خاک بر میزان پراکندگی ظرفیت باربری این شمع‌ها، در این پژوهش تلاش گردیده است تا یک تحلیل عدم قطعیت در ظرفیت باربری شمع‌های ماریپیچی در حالت‌های اصلی باربری انجام گرفته و سهم پارامترهای ورودی بر عدم قطعیت‌های خروجی موردبررسی قرار گیرد. با توجه به این‌که مکانیزم رفتاری شمع‌های ماریپیچی تا حد زیادی به نوع خاک بستگی دارد، مدل‌سازی‌المان محدود این شمع‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مقاومتی نمونه خاک به‌دست‌آمده از سایت دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام می‌گیرد و مرز بین رفتار باربری صفحات مجزا و برش استوانه‌ای تعیین می‌شود. پس‌ازاین مرحله، محاسبات تحلیلی ظرفیت باربری شمع‌ها انجام گرفته و با انجام آنالیز عدم قطعیت، پراکندگی ظرفیت باربری شمع‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد و با انجام آنالیز حساسیت روی پارامترهای مقاومتی خاک، تاثیر گذاری پراکندگی هر کدام از این پارامترها بر عدم قطعیت ظرفیت باربری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

ظرفیت باربری شمع‌های ماریپیچی

استفاده از فرمول‌های رایج محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سطحی و عمیق بر مبنای تئوری‌های ترزاقی^۱، می‌رهوف^۲، هانسن^۳ و وسیک^۴ از پرکاربردترین روش‌های طراحی این شمع‌ها می‌باشند [۴]. از دیگر روش‌های کاربردی در محاسبه ظرفیت باربری این شمع‌ها می‌توان به تئوری‌های طراحی و محاسبه ظرفیت باربری مبتنی بر لنگر پیچشی لازم برای نفوذ شمع در خاک و همچنین استفاده از عدد آزمایش نفوذ استاندارد اشاره کرد [۲۰؛ ۲۱]. با فرض رفتار صفحات مجزا، ظرفیت کششی و فشاری شمع‌های چند صفحه‌ای از مجموع ظرفیت باربری مربوط به صفحات ماریپیچی به اضافه مقاومت اصطکاکی شفت اصلی است که با استفاده از رابطه (۱) می‌توان آن را تخمین زد.

$$P_{ul} = \sum_{i=1}^n (q_{ult} A)_i + f_s H (\pi d) \quad (1)$$

در رابطه فوق، P_{ul} ظرفیت نهایی باربری شمع در حالت رفتاری صفحات مجزا، q_{ult} ظرفیت فشاری نهایی خاک، A مساحت صفحات باربر شمع، f_s ضریب اصطکاک بین شمع و خاک، H طول شفت اصلی شمع از سطح

¹ Terzaghi

² Meyerhof

³ Hansen

⁴ Vesic

زمین تاروی صفحه‌ی باربر بالایی و d قطر شفت اصلی شمع می‌باشد و اندیس i نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی صفحه‌های باربر شمع می‌باشند.

در حالت باربری برشی استوانه‌ای، عمده‌ی ظرفیت باربری شمع با اتکا بر مقاومت برشی خاک محصورشده بین صفحات باربر و خاک اطراف شمع تأمین می‌شود. علاوه بر آن، مطابق رابطه (۲) صفحه باربر پایینی شمع و شفت اصلی شمع نیز در ظرفیت باربری نهایی شمع نقش‌آفرینی می‌کنند.

$$P_{u2} = q_{ult}A_1 + T(n-1)S\pi D_{avg} + f_s H(\pi d) \quad (2)$$

در معادله بالا، P_{u2} ظرفیت نهایی باربری شمع در حالت باربری برشی استوانه‌ای، A_1 مساحت صفحه باربر پایینی شمع، T ضریب اصطکاک داخلی خاک، S فاصله بین صفحات باربر شمع و D_{avg} قطر میانگین صفحات باربر شمع می‌باشند.

اعمال چسبندگی ایجاد شده بین خاک و شفت اصلی شمع، با توجه به مشخصات جداره‌ی شمع (فولاد ساده بدون اندود، گالوانیزه یا دارای پوشش‌های رنگی و اپوکسی) از طریق رابطه (۳) در محاسبات لحاظ می‌گردد.

$$f_s = \alpha c + \sigma'_{avg} \tan(\delta\phi) \quad (3)$$

و در این رابطه، α ضریب چسبندگی بین شفت و خاک و δ ضریب کاهش زاویه اصطکاک می‌باشند.

تعریف پارامترهای غیرقطعی

با استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شده بر روی خاک رس موجود در سایت دانشگاه باهنر کرمان، پارامترهای مقاومتی خاک موردنظر به صورت قطعی محاسبه شده و در جدول (۱) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (۱) مشخصات خاک کرمان در سایت دانشگاه شهید باهنر

مدل	γ_{dry} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	ν	C (kN/m^2)	$\phi(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	E (kN/m^2)
موهر-کولمب	۱۴/۷	۱۸	۳۵/۱	۱۱	۱۸/۵	۰	۱۸۲۰۰

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در تحلیل ظرفیت باربری شمع‌های ماریچی، ۳ پارامتر ورودی به‌عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است که شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، چسبندگی (C) و وزن واحد (γ) می‌باشند. این پارامترهای تصادفی با استفاده از توابع توزیع احتمال نرمال قطع شده مدل‌سازی می‌شوند. پارامترهای مربوط به هندسه محیط و شمع نیز به‌عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته می‌شوند. توابع توزیع پارامترهای تصادفی فوق به شرح زیر است [۲۲]:

$$F(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5(\frac{x-\mu}{\sigma})^2) \quad (4)$$

¹ Truncated normal probability distribution functions

که در رابطه فوق، X پارامتر موردنظر، μ میانگین پارامتر موردنظر و σ انحراف معیار پارامتر موردنظر می‌باشد.

$$\mu_x - 3\sigma_x \leq x \leq \mu_x + 3\sigma_x \quad (5)$$

مطابق رابطه (۵) برای ایجاد پارامترهای موردنیاز در تحلیل غیرقطعی، با در نظر گرفتن ± 3 برابر انحراف معیار در محدوده μ میانگین، معادل ۹۹/۷۳٪ از سطح زیر منحنی چگالی نرمال پوشش داده می‌شود. لازم به ذکر است که برای انتخاب داده‌های اولیه با توجه به ماهیت ذاتی پارامترهای مقاومتی خاک، باید شرایط زیر برای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن واحد رعایت شود:

$$\mu_x - 3\sigma_x > 0 \quad (6)$$

برای پوشش بهتر بازه‌ی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک، در پژوهش‌های مختلف عدد انحراف از معیار را به صورت درصدی از میانگین یا با یک عدد ثابت مشخص می‌کنند. در این پژوهش با توجه به توصیه‌های محققان پیشین، مقادیر انحراف از معیار برای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص به ترتیب $(1/5)$ ، $(1/5)$ (degree) و $(0/5)$ (kN/m³) در نظر گرفته می‌شود [۲۳-۲۵].

مدلسازی و تحلیل المان محدود شمع‌های مارپیچی

پارامترهای هندسی و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی شمع‌های مارپیچی مورد مطالعه در این پژوهش در جدول (۲) آورده شده است. مدل‌سازی این شمع‌ها در نرم‌افزار Plaxis دو بعدی با استفاده از مدل رفتاری الاستیک و رفتار خاک با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب در یک محیط دوبعدی با استفاده از المان‌های ۱۵ گره‌ای انجام شده است. با اعمال جابجایی عمودی در بالای شفت اصلی شمع‌ها نمودارهای نشست در مقابل بار، برای نقاطی که در مدل‌سازی مشخص می‌گردد، رسم می‌شود. برای مدل‌سازی اندرکنش شمع و خاک، فصل مشترکی^۱ در جدار شمع و در تماس با خاک مدل‌سازی می‌گردد تا نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر گردد. مدلسازی رفتار فصل مشترک شمع و خاک به وسیله‌ی پارامترهای مقاومتی آن به صورت ضریبی بین ۰ و ۱ از خصوصیات خاک محیط در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. در روابط (۷) تا (۹)، φ_i ، C_i و ψ_i به ترتیب زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی و زاویه اتساع سطوح مشترک است که با استفاده از ضریب فصل مشترک (R_{int}) با مشخصات خاک رابطه دارند.

$$C_i = R_{int} C_{soil} \quad (7)$$

$$\tan \varphi_i = R_{int} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil} \quad (8)$$

$$\psi_i = 0 \text{ for } R_{int} < 1, \text{ otherwise } \psi_i = \psi_{soil} \quad (9)$$

جدول (۲) پارامترهای هندسی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی شمع‌های مارپیچی

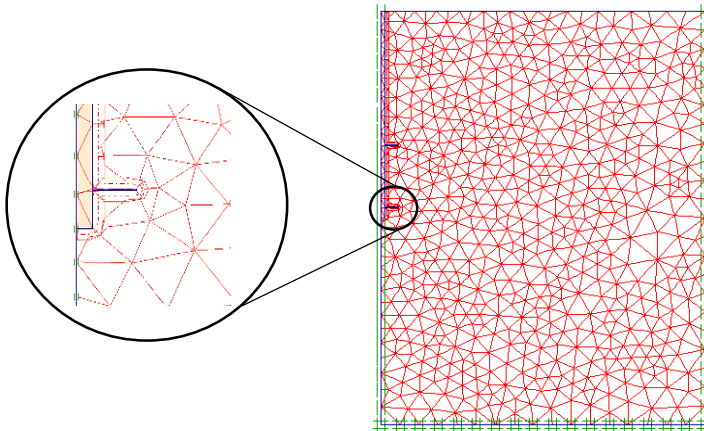
اندازه	پارامتر
۲ m	طول شمع
۰/۰۷۶ m	قطر شفت اصلی
۰/۳۰۳ m	قطر صفحات برابر

¹ Interface elements

۰/۹ m و ۰/۴۵ m	فاصله بین صفحات باربر
۰/۰۰۵ m	ضخامت صفحات باربر
۰/۰۰۴ m	ضخامت شفت اصلی
۲۱ * ۱۰۷ (kN/m ²)	مدول الاستیسیته فولاد
۷۸ (kN/m ³)	وزن مخصوص فولاد
۰/۳	ضریب پواسون فولاد

برای به حداقل رساندن اثرات مرزی بر رفتار شمع‌های مارپیچی در مدل‌های عددی المان محدود، ابعاد افقی مدل المان محدود حداقل بیست برابر قطر صفحه‌ی مارپیچ و عمق خاک زیر شمع مارپیچ حداقل ده برابر قطر صفحه‌ی مارپیچ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مدل‌ها برای تمامی شمع‌های موردنظر به شرح زیر می‌باشد:

- مرز پایین مدل صلب فرض شده و در همه جهات محدود می‌شود ($U_x = U_y = U_z = 0$).
 - مرزهای عمودی در دو طرف مدل‌ها در جهت X و Y محدود شده و در جهت Z آزاد می‌باشند. ($U_x = U_y = 0$).
 - سطح بالای مدل که متناظر سطح خاک می‌باشد نیز در تمامی جهات آزاد می‌باشد.
- در شکل (۲) شبکه‌بندی المان محدود شمع مارپیچی دو صفحه‌ای با نسبت $S/D=2$ قابل مشاهده می‌باشد.



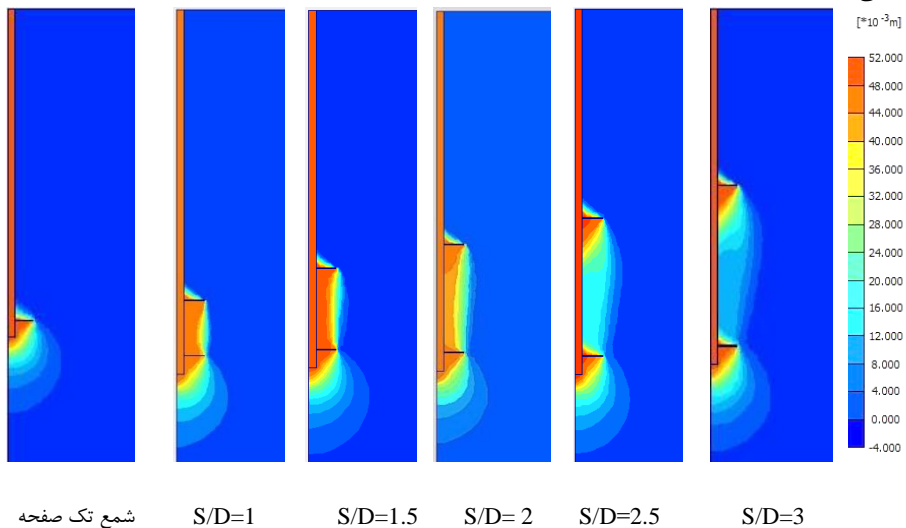
شکل (۲) شبکه‌بندی المان محدود در نرم‌افزار Plaxis

با مدل‌سازی شمع‌های دو صفحه‌ای، فاصله‌ی بهینه‌ی S به منظور تأمین حالت باربری برش استوانه‌ای معادل $1/5$ برابر قطر صفحات باربر تعیین گردید. به دلیل نزدیکی نتایج در برخی از این مدل‌سازی‌ها، از آن‌ها صرف نظر شده و در شکل (۳) نتایج تحلیل المان محدود در نرم‌افزار Plaxis برای شمع تک صفحه‌ای و 5 شمع دو صفحه‌ای با نسبت‌های S/D متفاوت 1 ، $1/5$ ، 2 ، $3/5$ و 3 آورده شده است. با توجه به نتایج جابجایی خاک اطراف شمع، در نسبت‌های $S/D < 1/5$ روند تأثیرگذاری شمع بر خاک اطراف خود تغییر کرده و از حالت برش استوانه‌ای به حالت

باربری صفحات مجزا تغییر می‌کند و با توجه به نتایج مدل‌سازی‌های المان محدود، در نسبت‌های $S/D < 3$ تغییر محسوسی در مقدار ظرفیت باربری نهایی شمع ایجاد نمی‌گردد. به منظور بررسی رفتار شمع‌های ماریچی در حالت باربری صفحات مجزا، در ادامه‌ی این پژوهش از نسبت $S/D=3$ استفاده می‌گردد. پس‌از این مرحله، نتایج با محاسبات آنالیز تحلیلی مقایسه می‌گردد.

مطابق شکل (۳) در نسبت $S/D=2$ رفتار باربری شمع ترکیبی از حالت برش استوانه‌ای و صفحات مجزا می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است، در شمع‌های دو صفحه‌ای همواره خاک محصور شده بین صفحات تحت تأثیر بارگذاری بوده و تغییر شکل‌های اندکی را تجربه می‌کند. اما میزان تأثیرگذاری این تغییر شکل‌ها در ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها با افزایش مقدار S/D کاهش یافته و در نسبت‌های $S/D < 3$ قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

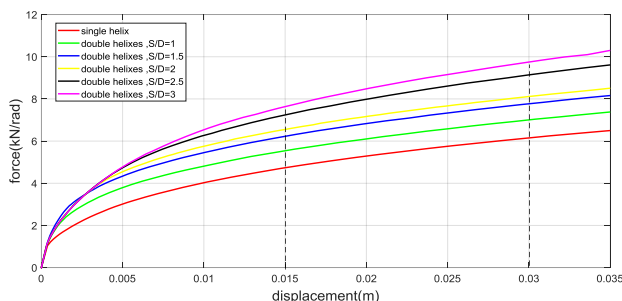
در تحلیل شمع‌های ماریچی، کنترل ظرفیت باربری به دو روش صورت می‌گیرد، در روش اول گسیختگی خاک زیر شمع ملاک تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع می‌باشد و در روش دوم نیروی متناظر با مقدار نشست مجزا شمع تعیین‌کننده‌ی ظرفیت باربری می‌باشد. به منظور کنترل نشست شمع‌های ماریچی تحت بارگذاری محوری، استفاده از مقادیر مرتبط با قطر شمع برای کنترل میزان نشست مجزا، در بین پژوهشگران متداول تر می‌باشد.



شکل (۳) نتایج جابجایی خاک اطراف شمع در تحلیل المان محدود شمع‌های ماریچی

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، ظرفیت باربری شمع‌های پیچی در جابجایی معادل ۱۰٪ قطر شمع معادل ۶/۲، ۷، ۷/۸۷، ۸/۱، ۹/۱۳ و ۹/۸، کیلو نیوتن بر رادیان به ترتیب برای شمع تک صفحه‌ای و شمع‌های دو صفحه‌ای با S/D های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ می‌باشد. مطابق انتظار، ظرفیت باربری با افزایش صفحات برابر در شمع‌های ماریچی افزایش می‌یابد، اما در حالتی که شمع با دو صفحه‌ی برابر مورد تحلیل قرار گرفته

است، با افزایش فاصله بین صفحات $(S/D=1-3)$ و تغییر مد رفتاری شمع از حالت استوانه برشی به صفحات مجزا، ظرفیت باربری شمع نیز افزایش یافته است. همچنین بر پایه برخی دیگر از پیشنهادها^۱ پژوهشگران پیشین، جابجایی معادل ۵٪ قطر صفحه باربر نیز به عنوان معیاری برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی پیشنهاد شده است [۲۷؛ ۲۸].



شکل (۴) نمودار نیرو در برابر جابجایی برای شمع‌های مارپیچی

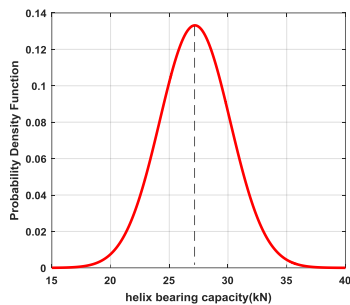
تحلیل عدم قطعیت در ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی

پس از تحلیل عددی و استخراج نمودارهای نیرو-جابجایی شمع‌های مورد مطالعه، با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار Matlab، تحلیل عدم قطعیت به روش مونت کارلو، برای ظرفیت باربری کلی شمع‌های مارپیچی موردنظر و همچنین آنالیز مجزای هر بخش از رابطه‌های ظرفیت باربری (۱) و (۲) به منظور بررسی سهم هر بخش در ظرفیت باربری کلی شمع و میزان عدم قطعیت آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در گام اول، تحلیل شمع تک صفحه‌ای انجام گرفته است. شکل (۵-الف) مربوط به نمودار تابع چگالی تجمعی^۱ و شکل (۵-ب) مربوط به تابع چگالی احتمال^۲ ظرفیت باربری صفحه‌ی شمع می باشد. شکل (۵-ج) و (۵-د) نیز به ترتیب مربوط به تابع چگالی تجمعی و تابع چگالی احتمال برای مقاومت اصطکاکی جداره شمع می‌باشد. با توجه به توابع شکل (۵) مقدار میانگین و انحراف از معیار اجزای رابطه (۱) ظرفیت باربری، به دست می‌آید و می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) ضریب تغییرات^۳ و میزان پراکندگی هر یک از آن‌ها را محاسبه کرد.

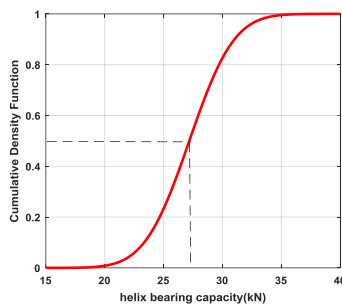
¹ Cumulative Density Function (CDF)

² Probability Density Function (PDF)

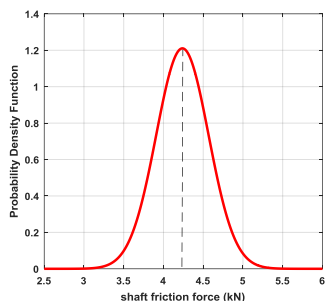
³ Coefficient of Variation (CV)



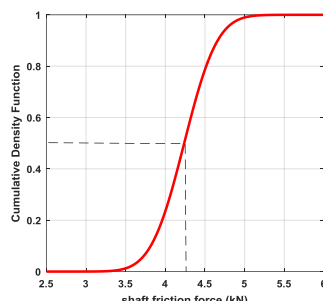
(ب)



(الف)



(د)



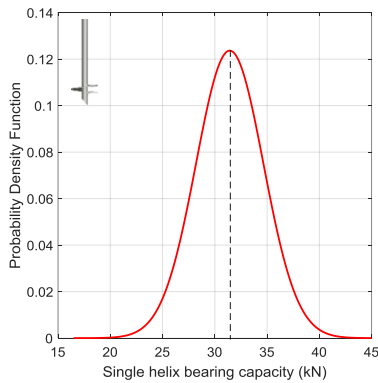
(ج)

شکل (۵) - (الف) نمودار CDF ظرفیت باربری صفحه برای شمع تک صفحه، (ب) نمودار PDF ظرفیت باربری صفحه برای شمع تک صفحه
(ج) نمودار CDF ظرفیت باربری جدار شفت برای شمع تک صفحه، (د) نمودار PDF ظرفیت باربری جدار شفت برای شمع تک صفحه

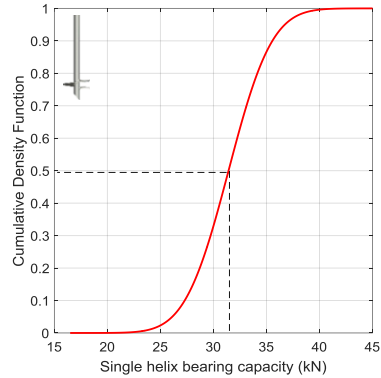
$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (10)$$

ضریب تغییرات ظرفیت باربری صفحه‌ای باربر شمع و نیروی اصطکاکی جداره‌ی شفت اصلی شمع به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۰۷۸ می‌باشد. از آنجایی که کم بودن ضریب تغییرات نشانگر همگنی داده‌های مورد نظر است، در بین دو گروه از داده‌ها آن گروهی که ضریب تغییرات کمتری دارند از دقت بیشتری برخوردار هستند و عدم قطعیت آن‌ها کمتر می‌باشد. با توجه میانگین نمودارهای PDF و CDF شکل (۵)، در شمع تک صفحه‌ای مورد مطالعه، صفحه‌ی باربر شمع سهم بیشتری از ظرفیت باربری کلی شمع بر عهده دارد. نسبت میانگین ظرفیت باربری صفحه باربر (F_p) به میانگین نیروی اصطکاکی جدار شمع (F_s) معادل ۶/۴۳ می‌باشد. با توجه به مشارکت چند باره‌ی پارامترهای غیر قطعی در محاسبه‌ی ظرفیت باربری صفحه‌ی باربر، عدم قطعیت زیادی در ظرفیت باربری این صفحه پدید می‌آید که با توجه به مشارکت بیشتر در ظرفیت باربری کلی شمع، باعث افزایش عدم قطعیت در ظرفیت باربری کلی شمع ماریچی تک‌صفحه‌ای می‌شود. به منظور بررسی عدم قطعیت در ظرفیت باربری کلی شمع تک صفحه‌ای، شبیه‌سازی مونت کارلو با در نظر گرفتن هم زمان صفحه باربر و اصطکاک جداره شفت انجام شده است. نتایج نمودارهای تابع چگالی تجمعی و تابع چگالی احتمال مربوط به این تحلیل در شکل (۶) قابل

مشاهده می‌باشد. با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌های نهایی موجود در شکل (۶)، ضریب تغییرات ظرفیت باربری کلی شمع در حدود ۱۰٪ می‌باشد (۰/۱۰۲). کاهش ضریب تغییرات ظرفیت باربری کلی شمع نسبت به ضریب تغییرات مؤلفه‌های جزئی آن ناشی از همپوشانی دامنه تغییرات پارامترهای مشترک و بزرگ‌تر شدن عدد میانگین داده‌های کلی می‌باشد.



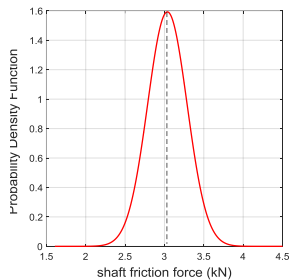
(ب)



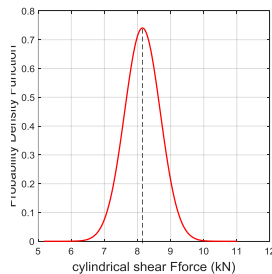
(الف)

شکل (۶) - (الف) نمودار CDF ظرفیت باربری کلی شمع تک صفحه، (ب) نمودار PDF ظرفیت باربری کلی شمع تک صفحه

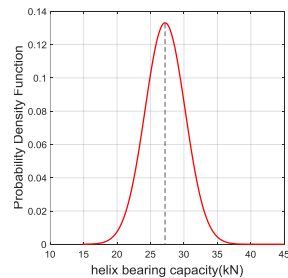
در مرحله‌ی بعدی تحلیل عدم قطعیت در ظرفیت باربری یک شمع دو صفحه‌ای با نسبت $S/D=1.5$ انجام گرفته است. نتایج حاصل از آنالیز مونت کارلو برای سه جزء دخیل در ظرفیت باربری کلی این شمع در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، ضریب تغییرات ظرفیت باربری صفحه‌ی باربر شمع، نیروی اصطکاکی جداره‌ی شفت اصلی شمع و نیروی برشی استوانه خاکی محصور شده بین دو صفحه‌ی باربر به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۱، ۰/۰۹۹۸ می‌باشد.



(ج)



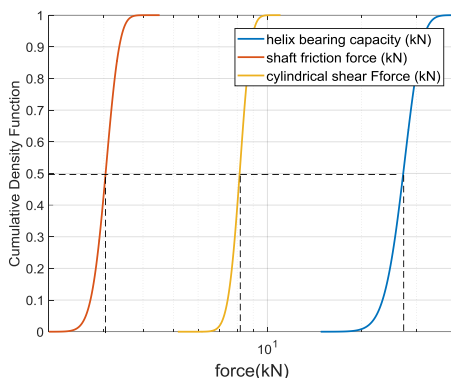
(ب)



(الف)

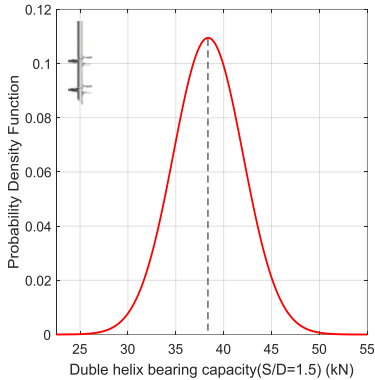
شکل (۷) - (الف) نمودار PDF ظرفیت باربری صفحات باربر در شمع دوصفحه‌ای ($S/D=1.5$)، (ب) نمودار PDF ظرفیت باربری استوانه برشی خاک محبوس بین دو صفحه، (ج) نمودار PDF ظرفیت باربری جداره شفت اصلی در شمع دوصفحه‌ای ($S/D=1.5$)

علی‌رغم تفاوت ناچیز ضریب تغییرات اجزای رابطه (۲)، همان‌گونه که در شکل (۸) قابل مشاهده است فرم کلی نمودار تابع چگالی تجمعی هر ۳ جزء شمع تقریباً مشابه بوده و داده‌های این سه جزء تقریباً پراکندگی یکسانی نسبت به میانگین خود دارند. همان‌گونه که در بالا ذکر شد، ماهیت غیر قطعی پارامترهای مقاومتی خاک که نقش اساسی را در ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی ایفا می‌کنند باعث پراکندگی نتایج خروجی در آنالیزهای عدم قطعیت ظرفیت باربری این شمع‌ها می‌شوند. با توجه به شکل (۹) ضریب پراکندگی ظرفیت باربری شمع مارپیچی ۲ صفحه‌ای با نسبت $S/D=1.5$ برابر $0.944/0$ می‌باشد.

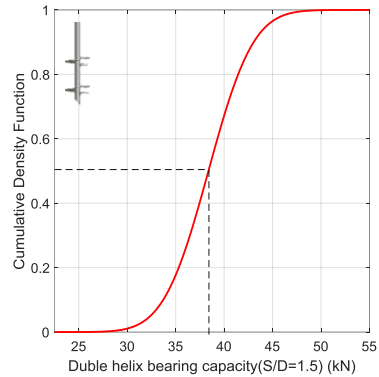


شکل (۸) نمودار CDF اجزای رابطه ظرفیت باربری شمع دوصفحه‌ای ($S/D=1.5$)

برای بررسی حالت شکست صفحات مجزا در تعیین ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی چندصفحه‌ای، با توجه به توصیه‌های پژوهشگران پیشین فاصله بین دو صفحه باربر شمع به قدری افزایش می‌یابد تا صفحات شمع به‌طور جداگانه در ظرفیت باربری کلی شمع دخیل شوند. در قسمت قبل با تحلیل المان محدود شمع‌های مارپیچی دوصفحه‌ای، با نسبت‌های S/D متفاوت، با توجه به قطر ۳۰ سانتی‌متری صفحات باربر شمع، فاصله ۹۰ سانتی‌متر بین دو صفحه به‌عنوان فاصله‌ی ایجادکننده‌ی حالت باربری مجزا انتخاب می‌گردد.



(ب)

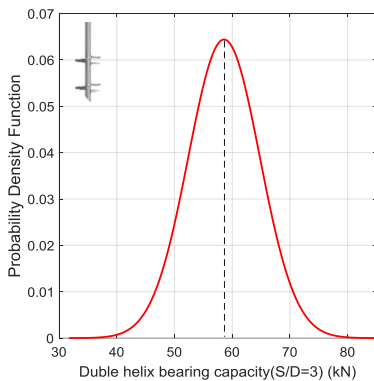


(الف)

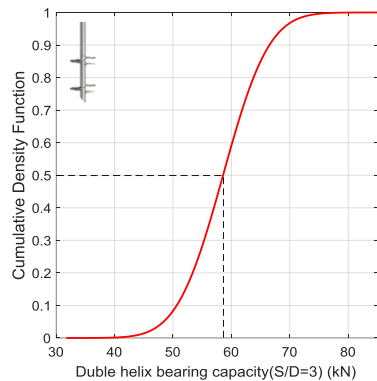
شکل (۹) - (الف) نمودار CDF ظرفیت باربری کلی شمع دوصفحه‌ای با نسبت $S/D=1.5$ ؛ (ب) نمودار

PDF ظرفیت باربری کلی شمع دوصفحه‌ای با نسبت $S/D=1.5$

همانند محاسبه ظرفیت باربری شمع تک صفحه‌ای، ظرفیت باربری شمع دوصفحه‌ای با حالت باربری صفحات مجزا نیز از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. این رابطه از دو جزء مجزا برای تعیین ظرفیت باربری شمع تشکیل شده است. مطابق محاسبات شمع تک صفحه‌ای، سهم باربری هر یک از اجزای رابطه (۱) برای شمع دو صفحه‌ای با نسبت $S/D=3$ نیز تعیین گردید. نتایج ضریب تغییرات ظرفیت باربری صفحه‌های باربر شمع و نیروی اصطکاکی جداره‌ی شفت اصلی به ترتیب $0/109$ ، $0/1078$ می‌باشد. قابل ذکر است با در نظر گرفتن شفت توخالی برای شمع، ظرفیت باربری کلی صفحات شمع از لحاظ تئوری بین دو صفحه به صورت یکسان توزیع می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل (۱۰) - (الف) نمودار CDF ظرفیت باربری شمع دوصفحه‌ای با نسبت $S/D=3$ ؛ (ب) نمودار PDF

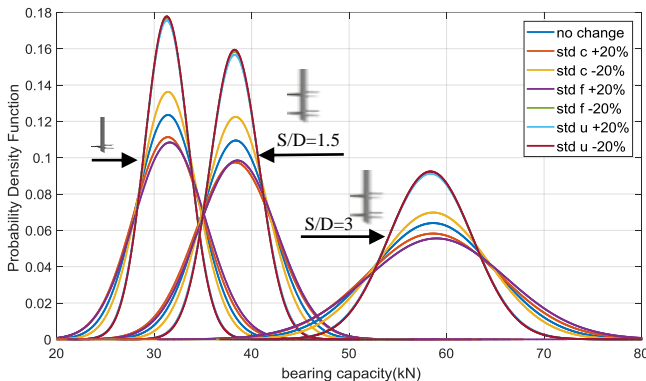
ظرفیت باربری شمع دوصفحه‌ای با نسبت $S/D=3$

با توجه به شکل (۱۰) می‌توان ضریب تغییرات نتایج ظرفیت نهایی ظرفیت باربری شمع دو صفحه ای با نسبت $S/D=3$ را محاسبه کرد. در این شمع نیز صفحات باربر شمع سهم بیشتری از ظرفیت باربری کلی شمع را بر عهده دارند. نسبت میانگین ظرفیت باربری صفحات شمع (F_{ps}) به میانگین نیروی اصطکاکی جدار شمع (F_s) برابر $12/83$ می‌باشد. در این حالت عمده‌ی ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی توسط صفحات باربر تأمین می‌شود و بسیاری از پژوهشگران از بخش مقاومت اصطکاکی جدار شمع‌های مارپیچی به دلیل ناچیز بودن مقدار آن و همچنین در جهت افزایش ضریب اطمینان شمع صرف نظر می‌کنند [۱۴؛ ۱۶؛ ۲۹].

جدول (۳) نتایج کلی ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی

نوع شمع	نتایج تحلیلی (kN)	المان محدود ۵٪ قطر صفحه (kN)	المان محدود ۱۰٪ قطر صفحه (kN)	میانگین آنالیز مونت کارلو (kN)
تک صفحه	۳۱/۱۲۳	۳۰/۱۴۴	۳۸/۳۰۸	۳۱/۴۱۹
دو صفحه ($S/D=1.5$)	۳۷/۸۹۶	۳۸/۹۳۶	۴۸/۹۸۴	۳۸/۳۹۶
دو صفحه ($S/D=3$)	۵۸/۷۶۲	۴۸/۳۵۶	۶۱/۵۴۴	۵۸/۵۹۶

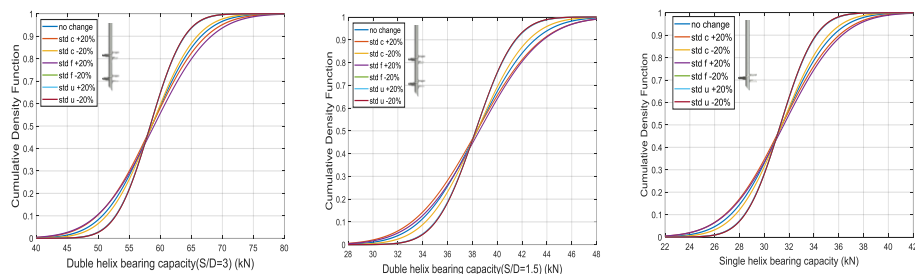
نتایج کلی ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی مورد بحث در این مقاله در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به این حقیقت که عدم قطعیت نتایج خروجی در هر فرآیند محاسباتی رابطه‌ی مستقیمی با پارامترهای ورودی و میزان عدم قطعیت در این پارامترها دارد [۳۱؛ ۳۰]، به منظور بررسی سهم هر یک از پارامترهای ورودی در محاسبات ظرفیت باربری و عدم قطعیت نهایی و پراکندگی نتایج خروجی، آنالیز حساسیت با تغییرات انحراف از معیار پارامترهای مقاومتی خاک با ثابت در نظر گرفتن میانگین آن‌ها انجام می‌شود.



شکل (۱۱) نمودارهای PDF آنالیز حساسیت ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی

در شکل (۱۱) توابع چگالی احتمال مجموع ظرفیت باربری با در نظر گرفتن تغییرات مثبت و منفی ۲۰٪ در انحراف معیار پارامترهای مقاومتی خاک ارائه شده است، کاهش ۲۰ درصدی انحراف از معیار نشان دهنده‌ی افزایش همگنی خاک و افزایش آن نشان دهنده‌ی افزایش ناهمگنی خاک می‌باشد و آنالیز حساسیت پارامترهای

مقاومتی تاثیر افزایش یا کاهش همگنی خاک را در همگرایی یا واگرایی نتایج باربری نهایی بررسی می کند. در این شکل ۳ دسته از نمودارهای تابع چگالی احتمال قابل مشاهده است که به ترتیب از راست به چپ مربوط به شمع دوصفحه‌ای با نسبت $S/D=3$ ، شمع دو صفحه‌ای با نسبت $S/D=1.5$ و شمع تک صفحه‌ای می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، با کاهش انحراف از معیار پارامترهای ورودی، تابع چگالی احتمال جمع‌تر شده و میزان پراکندگی ظرفیت‌های باربری کاهش می‌یابد و برعکس با افزایش انحراف از معیار پارامترهای ورودی، نمودارهای تابع چگالی احتمال بازتر شده و پراکندگی خروجی‌های مربوط به ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر عدم قطعیت داده‌های خروجی با افزایش دامنه تغییرات پارامترهای غیرقطعی افزایش می‌یابد.

ج) $S/D=3$ ب) $S/D=1.5$

الف) شمع تک صفحه

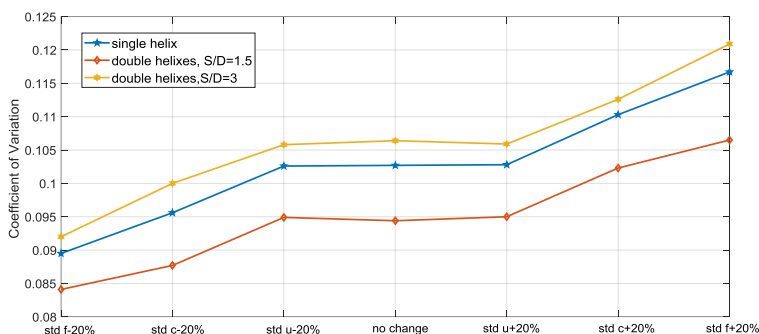
شکل (۱۲) نمودارهای CDF آنالیز حساسیت ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی

به منظور درک بهتر تأثیر تغییر انحراف از معیار پارامترهای تصادفی ورودی بر نتایج خروجی در هر یک از شمع‌های مورد مطالعه در این پژوهش، نمودارهای تابع چگالی تجمعی هر یک از شمع‌ها به صورت جداگانه در شکل (۱۲) ارائه شده است. نتایج حاصل از محاسبه ضریب پراکندگی ظرفیت باربری در حالت‌های مختلف تغییر در انحراف از معیار داده‌های ورودی در جدول (۴) دسته‌بندی شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۳) و جدول (۴) مشاهده می‌گردد، ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی حساسیت زیادی به زاویه اصطکاک داخلی خاک دارد به طوری که در شمع تک صفحه‌ای با افزایش ۲۰ درصدی انحراف از معیار زاویه اصطکاک با ثابت نگه‌داشتن میانگین آن، خروجی‌های ظرفیت باربری شمع دچار ۱۴ درصد افزایش در پراکندگی می‌شوند، در حالی که با افزایش ۲۰ درصدی انحراف از معیار وزن مخصوص خاک، پراکندگی خروجی‌های ظرفیت باربری دچار تغییر محسوسی نمی‌گردند. همچنین در یک شمع دوصفحه‌ای، در حالت باربری برشی استوانه‌ای ($S/D=1.5$)، پراکندگی داده‌های ظرفیت باربری نسبت به حالت باربری صفحات مجزا کمتر است و در نتیجه عدم قطعیت در حالت برشی استوانه‌ای کمتر از حالت دیگر می‌باشد.

جدول (۴) ضریب تغییرات ظرفیت باربری در آنالیز حساسیت پارامترها

شمع دو صفحه (S/D=3)	شمع دو صفحه (S/D=1.5)	شمع تک صفحه	
۰/۱۰۶۴	۰/۰۹۴۴	۰/۱۰۲۷	CV 0%
۰/۱۱۲۶	۰/۱۰۲۳	۰/۱۱۰۳	STDC + 20%
۰/۱۰۰۰	۰/۰۸۷۷	۰/۰۹۵۶	STDC - 20%
۰/۱۲۰۹	۰/۱۰۶۵	۰/۱۱۶۷	STDφ + 20%
۰/۰۹۲۰	۰/۰۸۴۱	۰/۰۸۹۵	STDφ - 20%
۰/۱۰۵۹	۰/۰۹۵۰	۰/۱۰۲۸	STDγ + 20%
۰/۱۰۵۸	۰/۰۹۴۹	۰/۱۰۲۶	STDγ - 20%



شکل (۱۳) ضریب تغییرات ظرفیت باربری در آنالیز حساسیت پارامترها

نتیجه گیری

در این مطالعه، مقاومت فشاری شمع های مارپیچی تک صفحه ای و دو صفحه ای در حالت باربری صفحات مجزا و برش استوانه ای از طریق مدل سازی المان محدود در نرم افزار Plaxis دو بعدی و تحلیل عدم قطعیت به روش مونت کارلو با استفاده از نرم افزار Matlab بررسی شد. با محاسبه سهم هر یک از اجزای هندسی شمع ها در ظرفیت باربری نهایی آن و انجام آنالیز قابلیت اطمینان، مشخص گردید که بیشترین سهم عدم قطعیت ظرفیت باربری مربوط به صفحه های باربر شمع ها می باشد. این عدم قطعیت علاوه بر سهم بیشتر صفحات باربر در ظرفیت باربری کلی که باعث افزایش اثرگذاری این صفحه ها می شود، ناشی از تاثیر گذاری چند باره ی برخی از پارامترهای مقاومتی خاک در روابط تحلیلی محاسبه ظرفیت باربری صفحه ها می باشد. به عبارت دیگر در محاسبه ظرفیت باربری صفحه های باربر برخی از پارامترهای تصادفی در چند مرحله بر محاسبات اثرگذار هستند که این مسئله باعث افزایش عدم قطعیت نهایی می شود. در شمع های مارپیچی سهم اصطکاک جداره شفت نسبت به ظرفیت باربری صفحه به قدری پایین است که عملاً در عدم قطعیت های نهایی اثر ناچیزی از خود به جا می گذارد و اکثر مهندسان حتی از سهم باربری آن نیز در باربری کلی شمع در جهت افزایش ایمنی صرف نظر می کنند. در حالت باربری برشی استوانه ای برای شمع دو صفحه ای، نیروی اصطکاک استوانه برشی در حدود ۲۵٪ ظرفیت باربری صفحه ی پایینی شمع می باشد که این مسئله باعث کاهش ۳۶٪ ظرفیت باربری نسبت به حالت صفحات مجزا در

تحلیل عدم قطعیت باشد در حالی که این مقدار در تحلیل المان محدود معادل ۲۱٪ می باشد. با توجه به این نتایج می توان گفت در حالت باربری برش استوانه ای، صفحه بالایی شمع نیز در ظرفیت باربری سهم اندکی ایفا می کند که در فرمول های محاسباتی این شمع ها دخیل نشده است و به طور کلی حالت برشی استوانه ای نسبت به صفحات مجزا محافظه کارانه تر است. با استفاده از نتایج تحلیل المان محدود و نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آن در کنار محاسبات تحلیلی و آنالیز عدم قطعیت ظرفیت باربری، مشخص می گردد که نتایج ظرفیت باربری شمع های مارپیچی با در نظر گرفتن جابجایی معادل ۵٪ قطر صفحات برابر می تواند معیار بهتری نسبت به جابجایی معادل ۱۰٪ قطر این صفحات باشد. در آنالیز حساسیت شمع های مورد مطالعه در این پژوهش، به وضوح میزان تأثیر پراکندگی پارامترهای تصادفی خاک در عدم قطعیت های نهایی ظرفیت باربری آن ها قابل مشاهده است، به طوری که با تغییر ۲۰ درصدی انحراف از معیار هر یک از پارامترهای تصادفی خاک با ثابت ماندن میانگین و انحراف از معیار بقیه پارامترها، پراکندگی نتایج خروجی تغییر می یابد و این مسئله در مورد زاویه اصطکاک داخلی خاک و پس از آن در مورد چسبندگی خاک شدت بیشتری دارد. این مسئله از این جهت مورد اهمیت قرار دارد که به کمک نتایج آزمایش های ژئوتکنیکی چنانچه خاک در سائیتی از همگنی نسبتاً خوبی برخوردار باشد و انحراف از معیار پارامترهای تصادفی خاک کم باشد، نیاز به استفاده از ضرایب اطمینان بالا در طراحی سازه های ژئوتکنیکی نیست و طراحی ها بهینه و اقتصادی صورت می گیرند. از طرفی در صورت ناهمگنی شدید در پارامترهای مقاومتی خاک، این آنالیز می تواند حد خطر و بدترین حالت ممکن ظرفیت باربری را مشخص نماید و در جهت افزایش ایمنی سازه به طراح کمک نماید.

References

- [1] Alnmr, A., Ray, R. P., & Alsirawan, R. (2023). A State-of-the-Art Review and Numerical Study of Reinforced Expansive Soil with Granular Anchor Piles and Helical Piles. *Sustainability*, 15(3), 2802. <https://doi.org/10.3390/su15032802>
- [2] Hussein, A. F., & El Naggar, M. H. (2023). Dynamic performance of driven and helical piles in cohesive soil. *Acta Geotechnica*, 18(3), 1543-1568. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01649-8>
- [3] Vignesh, V., & Mayakrishnan, M. (2020). Design parameters and behavior of helical piles in cohesive soils—A review. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(22), 1194. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06165-1>
- [4] Vali, R., & Parsamanesh, M. (2022). Statistical Analysis of the Skirted Ring Footings Located on Sandy Soil. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(1), 35-58. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.330537.2019>
- [5] Lutenegeger, A. J. (2011). Historical development of iron screw-pile foundations: 1836–1900. *The International Journal for the History of Engineering & Technology*, 81(1), 108-128. <https://doi.org/10.1179/175812109X12547332391989>
- [6] Chance, A. (2006). Design Methodology: Chance Helical Anchor/Pile Bearing Capacity. *Hubbell Power Systems*. <http://www.helicalpier.com/wp-content/uploads/2013/09/Helical-Pile-Design-Methodology.pdf>
- [7] Bobbitt, D., & Clemence, S. (1987, 7-11 December). *Helical anchors: application and design criteria*. 9 Southeast Asian geotechnical conference. Bangkok, Thailand. <http://pascalfrancis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=7565244>

- [8] Perez, Z. A., Schiavon, J. A., Tsuha, C. d. H. C., Dias, D., & Thorel, L. (2018). Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(8), 1067-1080 . <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0137>
- [9] Sakr, M. (2009). Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(9), 1046-1061 <https://doi.org/10.1139/T09-04> .
- [10] Rao, S. N., Prasad, Y., & Shetty, M. D. (1991). The behaviour of model screw piles in cohesive soils. *Soils and Foundations*, 31(2), 35-50 . https://doi.org/10.3208/sandf1972.31.2_35
- [11] Wang, D., Merifield, R., & Gaudin, C. (2013). Uplift behaviour of helical anchors in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(6), 575-584 . <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0350>
- [12] Lutenecker, A. J. (2011, 2-6 October). *Behavior of multi-helix screw anchors in sand*. In Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto, Canada. http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11_Paper126.pdf
- [13] Nowkandeh, M. J., & Choobbasti, A. J. (2021). 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*, 80, 4001-4023 . <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02158-w>
- [14] Shuman, N. M., Khan, S., & Amini, F. (2023). Settlement based load capacity curve for single helix helical pile in c- ϕ soil. *Soils and Foundations*, 63(1), 101265 . <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101265>
- [15] Li, W., Islam, N., & Deng, L. (2023). Large deformation finite element analyses of axially loaded helical piles in cohesive soil. *Computers and Geotechnics*, 164, 105819 . <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105819>
- [16] Cheng, P., Guo, J., Yao, K., & Chen, X. (2023). Numerical investigation on pullout capacity of helical piles under combined loading in spatially random clay. *Marine Georesources & Geotechnology*, 41(10), 1118-1131 . <https://doi.org/10.1080/1064119X.2022.2120843>
- [17] Spagnoli, G., de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C., Oreste, P., & Mendez Solarte, C. M. (2018). *A sensitivity analysis on the parameters affecting large diameter helical pile installation torque, depth and installation power for offshore applications*. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 12(3), 171-185 . <https://doi.org/10.1080/19375247.2019.1595996>
- [18] Cheng, P., Liu, Y., Li, Y. P., & Yi, J. T. (2022). A large deformation finite element analysis of uplift behaviour for helical anchor in spatially variable clay. *Computers and Geotechnics*, 141, 104542 . <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104542>
- [19] Cheng, P., Liu, Y., & Yi, J.-T. (2023, 23-26 July). *Effect of Installation on the Uplift Capacity of Helical Pile Considering Soil Spatial Variability*. In Geo-Risk 2023, Virginia, USA. <https://doi.org/10.1061/9780784484999.036>
- [20] Fang, H.-Y. (2012). *Foundation engineering handbook*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5>

- [21] Parry, R. H. (1977). Estimating bearing capacity in sand from SPT values. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(9), 1014-1019 .
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000484>
- [22] Johari, A., & Javadi, A. (2012). Reliability assessment of infinite slope stability using the jointly distributed random variables method. *Scientia Iranica*, 19(3), 423-429 .
<https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.04.006>
- [23] Johari, A., & Rahmati, H. (2019). System reliability analysis of slopes based on the method of slices using sequential compounding method. *Computers and Geotechnics*, 114, 103116 .<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103116>
- [24] Gholampour, A., & Johari, A. (۲۰۱۹). Reliability-based analysis of braced excavation in unsaturated soils considering conditional spatial variability. *Computers and Geotechnics*, 115, 103163 .<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103163>
- [25] Johari, A., Rahmati, H., Zarei, F., & Hekmatzadeh, A. (2016, 15-17 November). Probabilistic analysis of infinite slope with implementing soil and geometric parameters uncertainties 5th international conference on geotechnical engineering and soil mechanics, Tehran-Iran .
https://www.researchgate.net/publication/365995934_Probabilistic_analysis_of_infinite_slope_with_implementing_soil_and_geometric_parameters_uncertainties
- [26] Yu, Y., Damians, I. P., & Bathurst, R. J. (2015). Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil-structure interactions. *Computers and Geotechnics*, 65, 164-174 .<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.12.009>
- [27] Elsherbiny, Z. H., & El Naggar, M. H. (2013). Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(12), 1191-1203 .<https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0487>
- [28] Sakr, M. (2011). Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesionless soils. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 5(1), 39-57. <https://doi.org/10.1179/dfi.2011.004>
- [29] Shao, K., Su, Q., Liu, J., Liu, K., Xiong, Z., & Wang, T. (2022). Optimization of inter-helix spacing for helical piles in sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(3), 936-952 .<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.11.007>
- [30] Johari, A., & Talebi, A. (2021). Stochastic analysis of piled-raft foundations using the random finite-element method. *International Journal of Geomechanics*, 21(4), 04021020 .<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103707>
- [31] Johari, A., & Fooladi, H. (2020). Comparative study of stochastic slope stability analysis based on conditional and unconditional random field. *Computers and Geotechnics*, 125, 103707 .[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001966](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001966)