

The Effect of Water Injection Pressure on the Performance of Conical Helical Piles

Somaye Akbarnezhad¹, Navid Ganjian¹*, Abolfazl Eslami², Meysam Fadaee¹

¹ Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Review History:

Received: Feb. 22, 2025

Revised: May, 10, 2025

Accepted: Jun. 25, 2025

Available Online: Jul. 03, 2025

Keywords:

Loess Soil

Conical Helical Pile

Installation Stress

Injection Pressure

Wet Implementation

ABSTRACT: Loess deposits exist in some areas of Golestan Province, and the type of sedimentation of these deposits has caused a loose honeycomb structure with low density, which is the cause of geotechnical and structural challenges. There are several solutions for improving such problematic soils, one of which is the use of conical helical piles. In this study, eight three-blade conical helical piles with a length of 6.2 m and a blade-to-diameter ratio of 3, under installation stresses of 200-400-450 kPa in two dry and wet conditions, were used to improve the performance of loess soil located at the Dashli Borun site in Golestan Province. In the dry method, the piles were installed and loaded under three stresses, and in the wet method, the optimal water injection pressure was first determined, and then the performance of the piles was examined. The results show that with increasing installation stress, the capacity of conical piles in both dry and wet states increases, and the injection pressure is an effective parameter on the behavior of these types of piles, and non-use of optimal water injection pressure causes a 45% reduction in the pile's bearing capacity.

1- Introduction

Loess is a type of soil that has undergone prolonged sedimentation processes and remains relatively stable under natural conditions. Its characteristic honeycomb and porous structure leads to significant variations in compressibility and high sensitivity upon contact with water [1, 2]. Vast areas in northeastern Iran contain collapsible loess deposits, which have caused extensive damage to infrastructure and technical structures, particularly following wetting and loading events [3]. In recent years, the use of a novel pile type called helical piles has been increasingly adopted due to their unique characteristics. Helical piles consist of a central shaft with one or more helical plates that are installed through rotation and pressure, and they have seen widespread application [4]. Various factors influence the tensile and compressive performance characteristics of helical piles, including soil type, helix geometry, number of helices, helix diameter and spacing, pitch length, shaft diameter and type, and installation angle [5, 6]. Arabameri and Eslami (2021) investigated two different geometries of uniform helical piles (single-helix and double-helix piles with spacing-to-diameter ratios of 1.5 and 3) using both dry and wet installation methods. Their results demonstrated that double-helix piles with a spacing-to-diameter ratio of 3 exhibited superior performance in terms of bearing capacity and improvement of

soil geotechnical properties. Furthermore, the wet installation method, involving compressive loading combined with water injection, resulted in improved compaction and enhanced strength parameters of loess soil compared to dry installation [7].

Limited research has been conducted on full-scale helical piles to quantitatively examine the effects of helix rotation and movement during installation on soil geotechnical properties [8]. Due to the significant limitations of individual improvement methods, this study employs a combined approach integrating hydraulic, compaction, and reinforcement techniques simultaneously. Accordingly, drilling operations incorporating static pressure through both dry and wet installation methods were conducted, using multi-helix piles as reinforcing elements to improve the loess soils in Golestan Province. The behavior of three-helix conical piles with 6.2 m length and a spacing-to-diameter ratio of 3 was investigated under both dry and wet installation conditions. In this research, piles were first installed using three different installation stresses under dry conditions to determine their bearing capacity. Additional piles were installed using the wet method with injection pressures of 2, 4, and 6 bar to identify the optimal injection pressure. Ultimately, piles were installed under optimal wet conditions (4 bar injection pressure), and their performance was evaluated.

*Corresponding author's email: n.ganjian@iau.ac.ir



Fig. 1. Image of the research site in the Dashli-Brun area (adjacent damage).

2- Methodology

The study area for this research was selected in the Dashli Borun village region, located 150 km from the center of Golestan Province in Iran near the Turkmenistan border. To accurately characterize the site soil conditions, two machine borings to depths of 15 m and one boring to 30 m were drilled using continuous core sampling methods near structures and village access roads. Figure 1 shows images of the study site in Dashli Borun and the damage to technical structures in northeastern Iran.

According to the Unified Soil Classification System (USCS), the studied soil is classified as low plasticity silt (ML) with a minimum dry density of 1.29 g/cm^3 . Based on collapse potential tests (I_c) conducted in accordance with ASTM D5333-03 standard, the degree of collapsibility falls within the severe range according to the standard's classification table. To evaluate helical pile performance at full scale, eight large-scale helical piles were installed and tested on-site in loess soils. The geometry and dimensions of the helical piles are presented in Table 1.

The pile naming convention follows this pattern: the first two letters represent "Conical Helix" (CH), the subsequent letter indicates test conditions (D for dry, W for wet), and the following three numbers sequentially represent pile height, number of helices, and helix spacing-to-diameter ratio. The three-helix conical pile with a helix spacing-to-diameter ratio of 3 ($S/D=3$) was designed for 6 m depth. The constructed conical helical piles are shown in Figure 2.

The helical piles were installed by applying torque and compressive force provided by a hydraulic drilling rig. The effects of compressive force applied at the pile tip (installation stress) and water pressure were investigated as two key factors modifying soil geotechnical properties and reducing collapse potential. The piles were installed at 6 m depth, with load testing conducted on each pile while measuring displacement at the pile head. Axial compressive load testing was performed according to ASTM D1143/

Table 1. Specifications of large-scale conical helical piles

Pile Name	CH(D or W)
Number of Helices	3
Pile Length (cm)	620
Depth of Penetration (cm)	600
Helix Diameter (cm)	35,25,20
Helix Pitch (cm)	7.62
Helix Thickness (cm)	0.8
Shaft Diameter (cm)	8.89
Thickness of Shaft (cm)	0.5
Helix Spacing Ratio	3
Distance Tip to Helix End (cm)	15



Fig. 2. View of the constructed conical helical pile.

D1143M-07(2013) standard [9]. The bearing capacity of each pile was evaluated at settlements equivalent to 5% and 10% of the average helix diameter. A loading plate, load cell, and hydraulic jack were installed at the center of each pile head, with sandbags and concrete blocks placed on the frame to provide the required reaction weight.

3- Discussion and Results

Researchers in various references [10-12] have defined the axial compressive capacity of piles at displacements equivalent to 10% of the pile diameter, ensuring sufficient displacement to mobilize the pile's ultimate capacity. Similarly, for conical helical piles, the axial compressive capacity can be defined at 10% displacement of the average helix diameter. In this study, load-displacement curves were analyzed at 5% and 10% of the average helix diameter under both dry and wet installation conditions. Figure 3 shows the load-displacement curves and capacity values at equivalent deformations for piles with $S/D=3$ ratio installed at 6m depth, comparing wet installation (4 bar water pressure) with dry

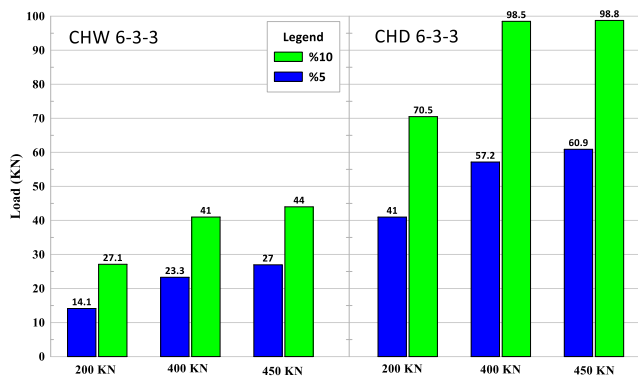


Fig. 3. Comparison of Ultimate Load in Dry and Wet Conditions.

installation under different installation stresses.

The maximum bearing capacity of helical piles was observed under dry installation at 450 kPa installation stress, reaching 98.8 kN at 10% average helix diameter displacement and 60.9 kN at 5% displacement. Corresponding values under wet conditions were 44 kN and 27 kN, respectively. The bearing capacity increased with higher installation stress, showing a 1.4-fold increase at 450 kPa compared to 200 kPa installation stress (10% displacement) in dry conditions, while wet conditions demonstrated a 1.62-fold increase. At 5% displacement, these increase factors were 1.5 (dry) and 1.9 (wet). The greater increase factors observed in wet installation at both 5% and 10% average helix diameter displacements clearly demonstrate the effectiveness of the wet installation method and water pressure in enhancing loess soil compaction and structural improvement.

4- Conclusions

This study employed eight piles that underwent rapid static compressive load testing on loess soils in the Dashli Borun region, yielding the following key findings:

- The investigation revealed critical water pressure effects: insufficient pressure (below optimal) failed to adequately reduce interparticle friction, resulting in suboptimal compaction. Conversely, excessive pressure caused particle washout and excessive displacement, both contributing to reduced pile performance and bearing capacity. The identified optimal pressure balanced these factors, maximizing bearing capacity while maintaining soil integrity for conical multi-helix pile installation.
- A consistent positive correlation emerged between installation stresses and bearing capacity across both dry and wet conditions. Notably, the wet method demonstrated a steeper improvement gradient (higher rate of capacity increase per unit stress) compared to dry installation. This

enhanced response underscores the combined effectiveness of water pressure and wet installation in densifying loess soils and improving their structural characteristics. The water-mediated particle rearrangement creates a more homogeneous, densely packed soil matrix that responds more efficiently to increasing loads than dry compaction alone.

References

- [1] J. Wu, N. Yang, P. Li, C. Yang, Influence of moisture content and dry density on the compressibility of disturbed loess: A case study in Yan'an City, China, *Sustainability*, 15(7) (2023) 6212.
- [2] A. Zivari, M. Siavoshnia, H. Rezaei, Effect of lime-rice husk ash on geotechnical properties of loess soil in Golestan province, Iran, *International Journal of Geo-Engineering*, 14(1) (2023) 20.
- [3] A. Karimi, H. Khademi, M. Kehl, A. Jalalian, Distribution, lithology and provenance of peridesert loess deposits in northeastern Iran, *Geoderma*, 148(3-4) (2009) 241-250.
- [4] S. Clemence, A. Lutenegeger, Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks, *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 9(1) (2015) 21-41.
- [5] S. Clemence, A. Ghaly, A review of model-scale laboratory investigations of helical anchors and screw piles, in: *1st International geotechnical symposium on helical foundations*, 2013, pp. 25-45.
- [6] ME. Mahmoudi Mehrizi, M. Jalali Moghadam, *Mechanical Soil Restraints from Design to Implementation*, Amirkabir University 2016 (In Persian).
- [7] M. Arabameri, A. Eslami, Microstructure and strength effect on bearing capacity of helical piles installed in Golestan loess, *International Journal of Civil Engineering*, 19(8) (2021) 923-940.
- [8] M. Arabameri, A. Eslami, Wet and dry installation effects on the capacity of helical piles in loess deposits, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(4) (2022) 486-498.
- [9] ASTM, D1143 / D1143M-07 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. ASTM International, (2013)e1.
- [10] H.A. Perko, *Helical piles: a practical guide to design and installation*, John Wiley & Sons, 2009.
- [11] K.M. Tappenden, *Predicting the axial capacity of screw piles installed in Western Canadian soils*, (2007).
- [12] K. Terzaghi, Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundations, in: *Proceedings, ASCE*, 1942, pp. 311-323.



تأثیر فشار تزریق آب بر عملکرد شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی

سمیه اکبرنژاد^۱، نوید گنجیان^{۲*}، ابوالفضل اسلامی^۲، میثم فدایی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

خاک لسی

شمع پیچشی مخروطی

تنش نصب

فشار تزریق

اجرا به روش تر

خلاصه: نوع رسوب‌گذاری نهشته‌های لسی موجود در برخی نواحی استان گلستان سبب ایجاد ساختار لانه‌زنبوری سست با دانسیته بسیار پایین در این مصالح شده و این ویژگی، عامل بروز چالشهای ژئوتکنیکی و سازه‌ای بسیاری بوده است. راهکارهای متعددی برای بهسازی این قبیل خاک‌های مسئله‌دار وجود دارد که یکی از این راهکارها، استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی می‌باشد. در این تحقیق، از مدل‌سازی با ابعاد واقعی شمع‌های پیچشی مخروطی جهت بررسی کارایی این شمع‌ها استفاده شده است. در این راستا، هشت شمع پیچشی پره‌ای مخروطی سه پره با طول ۶/۲ متر و نسبت فاصله پره‌ها به قطر ۳، تحت تنش‌های نصب ۲۰۰-۴۰۰-۴۵۰ کیلوپاسکال در دو شرایط اجرای خشک و مرطوب برای بهبود عملکرد خاک لسی واقع در سایت داشلی برون واقع در استان گلستان اجرا شده است. در اجرا به روش خشک، شمع‌ها تحت سه تنش، نصب و بارگذاری گردیده و در اجرا به روش مرطوب ابتدا اقدام به تعیین فشار تزریق بهینه آب نموده و سپس عملکرد شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش تنش نصب، ظرفیت شمع‌های مخروطی در دو حالت خشک و مرطوب افزایش یافته و فشار تزریق پارامتر موثر بر روی رفتار این گونه شمع‌ها می‌باشد که عدم استفاده از فشار تزریق بهینه آب باعث کاهش ۴۵ درصدی ظرفیت باربری شمع می‌شود.

۱- مقدمه

مسئله‌دار، مسلح نمودن خاک با استفاده از پی‌های گسترده شمع^۱ و یا شمع‌های سنتی می‌باشد که خیام و همکاران (۲۰۲۱) ظرفیت باربری پی‌های گسترده شمع^۱ را تحت تأثیر اندرکنش پیچیده بین خاک زیر سازه و المان‌های گسترده شمع^۱ مورد تحلیل و بررسی نیز قرار دارند[۵]. در سال‌های اخیر استفاده از نوع جدیدی از شمع‌ها به نام شمع پیچشی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی که داراست رو به افزایش است. شمع‌های مارپیچ متشکل از شافت مرکزی و دارای یک یا چند پره بوده که با چرخش و فشار، نصب می‌شوند و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۶].

عوامل مختلفی بر ویژگی‌های عملکرد کششی و فشاری شمع‌های مارپیچ مانند نوع خاک، شکل پره، تعداد پره، قطر و فاصله بین پره‌ها، گام مارپیچ، قطر و نوع شافت، زاویه نصب تأثیر می‌گذارند [۷، ۸]. عرب‌عامری و اسلامی (۲۰۲۱)، به بررسی دو هندسه مختلف شمع‌های مارپیچی یکنواخت (شمع‌های تک‌مارپیچ و دو مارپیچ با نسبت فاصله به قطر ۱/۵ و ۳) با استفاده از دو روش نصب خشک و مرطوب پرداختند که نتایج نشان

لس نوعی خاک است که دوره طولانی رسوب‌گذاری را تجربه می‌کند و در شرایط طبیعی نسبتاً پایدار است. مشخصه‌های ساختاری لانه‌زنبوری و متخلخل، تغییرات قابل توجه در تراکم‌پذیری و حساسیت بالا در تماس با آب از ویژگی‌های مهم این خاک می‌باشد. تراکم‌پذیری لس تحت تأثیر عوامل زیادی مانند درصد رطوبت، چگالی خشک، ساختار، الگوی قرارگیری ذرات و میزان تنش وارده است [۱، ۲]. مناطق گسترده‌ای از شمال شرق ایران خاک‌های رمنده‌ی لسی را در بر گرفته و سبب ایجاد خسارت‌های گسترده‌ای به تأسیسات زیربنایی و ابنیه فنی به‌خصوص پس از مرطوب شدن و اعمال بار بوده‌اند[۳]. روش‌های بهسازی این خاک‌ها به پنج دسته عملیات خاکی، متراکم‌سازی، فیزیکی - شیمیایی، هیدرولیکی و مسلح‌سازی تقسیم می‌شوند. انتخاب روش بهسازی به نیازهای یک پروژه و ویژگی‌های ژئوتکنیکی زمین بستگی دارد[۴]. یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های



روابط هاپربولیک، بار-جابجایی، بار نهایی و سختی اولیه شمع‌ها را بر اساس معیارهای مختلف محاسبه کردند. نتایج نشان داد که عواملی مانند نسبت قطر ماریچ یا منبسط‌شده به قطر شفت، سطح مقطع شفت و نوک شمع و جهت بارگذاری بیشترین تأثیر را بر رفتار بار-جابجایی شمع‌ها دارند. همبستگی‌های به‌دست‌آمده از پایگاه داده با اندازه‌گیری‌های هشت شمع ماریچ و منبسط‌شده در مقیاس واقعی را به‌خوبی مطابقت می‌دهد [۱۳]. علاوه بر این، اسماعیل‌زاده و اسلامی (۲۰۲۴) رفتار بار-جابجایی انواع مختلف شمع (شمع مرسوم، ماریچی و منبسط شونده) را تحت فشار و کشش با استفاده از آزمایش‌های مدل سازی شده در مقیاس کوچک در دانشگاه صنعتی امیرکبیر^۲ و آزمایش‌های میدانی در مقیاس واقعی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شمع‌های ماریچ و منبسط شونده نصب شده به روش جکینگ به دلیل حداقل دست‌خوردگی خاک، بالاترین مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. همچنین، شمع‌های ماریچ و منبسط‌شده عملکرد کششی بهتری نسبت به شمع‌های معمولی نشان دادند [۱۴].

تحقیقات محدودی بر روی شمع‌های ماریچ در مقیاس واقعی انجام شده است که بتواند به طور کمی اثرات چرخش و حرکت ماریچ‌ها را در حین نصب بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک بررسی نماید [۱۰]. اهمیت شرایط اجرا، تعداد ماریچ، فاصله پره، فشار آب و تنش نصب برای به حداکثر رساندن عملکرد شمع‌های ماریچ بسیار مهم است و در صورت استفاده صحیح، این شمع‌ها ساختار خاک را بهبود می‌بخشند و یک راه‌حل قوی برای پی‌ها در خاک‌های رملی می‌باشند. به دلیل نقاط ضعف عمده هریک از روش‌های بهسازی به‌تنهایی، در تحقیق حاضر از ترکیب روش‌های بهسازی (هیدرولیکی، تراکم و مسلح‌سازی) به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است. به همین منظور با انجام عملیات حفاری توأم با فشار استاتیکی به روش نصب خشک و مرطوب و استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای به عنوان المان مسلح به بهسازی خاک‌های لسی استان گلستان اقدام گردید. رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی سه پره با طول ۶/۲ متر با نسبت فاصله به قطر ۳، در دو شرایط اجرای خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا شمع‌ها در حالت خشک با سه تنش نصب مختلف اجرا و ظرفیت باربری آنها تعیین گردید. همچنین شمع‌هایی نیز به روش مرطوب تحت فشار تزریق ۲، ۴ و ۶ بار اجرا و سپس فشار تزریق بهینه به‌دست‌آمده و در نهایت، شمع‌ها در شرایط مرطوب، تحت فشار تزریق بهینه ۴ بار اجرا و رفتار آنها بررسی شده است.

داد شمع‌های دو ماریچ با نسبت فاصله به قطر ۳ عملکرد بهتری از نظر ظرفیت باربری و بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک دارند. و همچنین در روش نصب مرطوب با اعمال بار فشاری و تزریق آب، منجر به بهبود تراکم و افزایش پارامترهای مقاومتی خاک لسی نسبت به روش نصب خشک می‌شود [۹]. همچنین عرب‌عامری و اسلامی (۲۰۲۱) در پژوهشی دیگر به بررسی حدود ۱۳ شمع ماریچ یکنواخت به طول ۳ متر، قطر پره ۲۵۰ میلی‌متر و فاصله پره‌های ۷۵۰ میلی‌متر با دو روش مختلف نصب خشک و مرطوب بر روی خاک‌های لسی پرداختند و آزمایش بارگذاری استاتیکی برای همه شمع‌های ماریچ انجام دادند. نتایج نشان داد که آزمایش‌های بارگذاری شمع به شدت به میزان رطوبت در زمان آزمایش، به نیروی فشردگی و فشار تزریق آب بستگی دارد. در نهایت، شمع‌های نصب‌شده مرطوب، ساختار پایدارتری نسبت به شمع‌های خشک شده داشته اند [۱۰]. در بهینه‌سازی فاصله ماریچ‌ها کانگ شائو و همکاران^۱ (۲۰۲۲) دریافتند که پارامتر بسیار مهمی، برای به حداکثر رساندن بار محوری نهایی شمع‌های ماریچ است. علاوه بر این، چگالی نسبی و تعداد ماریچ‌ها به طور قابل توجهی بر عملکرد شمع در کشش و فشار تأثیر می‌گذارد [۱۱].

انواع مختلف شمع‌های ماریچ به طور گسترده مورد مطالعه میدانی و آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند تا عملکرد آنها از دیدگاه ظرفیت باربری و اندرکنش آنها با خاک بررسی شود. در مطالعه‌ی حسین‌پور و همکاران (۲۰۲۴) نتایج مدل‌سازی فیزیکی شمع ماریچ مقیاس شده 1g در ماسه خشک با چگالی نسبی ۴۰٪ و ۹۰٪ ارائه شد. نتایج نشان داد که بار نهایی فشاری شمع‌های تک و دو ماریچ برای هر دو شرایط چگالی ماسه به طور قابل‌توجهی بالاتر از بار نهایی کششی آنها است. خاک بالای ماریچ‌ها که بار کششی را تحمل می‌کند، در طول نصب شمع دچار دست‌خوردگی می‌شود و پیش‌بینی بار نهایی کششی در مقایسه با ظرفیت فشاری را دشوارتر می‌کند. دست‌خوردگی خاک بالای ماریچ‌ها در طول نصب، باعث تفاوت در ظرفیت‌های کششی و فشاری می‌شود [۱۲].

با مقایسه شمع ماریچ با انواع شمع‌های سنتی پارامترهایی از قبیل هندسه شمع، عمق جای‌گذاری، قطر شفت و... مورد بررسی قرار گرفت. رحیمی و اسلامی (۲۰۲۴) رفتار بار-جابجایی شمع‌های ماریچ و منبسط‌شده را در سیستم‌های ژئوتکنیکی بررسی کردند و پارامترهایی مانند عمق جای‌گذاری، هندسه شمع و جهت بارگذاری محوری را ارزیابی کردند. آنها با استفاده از یک پایگاه داده از ۸۰ آزمایش بارگذاری محوری و تحلیل

جدول ۱. ترکیب شیمیایی لس مورد مطالعه (تحلیل XRF)

Table 1. Chemical composition of loess (XRF Analysis)

ترکیبات	مقادیر (%)
سیلیکا (SiO ₂)	۵۴/۲۲
آلومینا (Al ₂ O ₃)	۹/۷۷
اکسید سدیم (Na ₂ O)	۲/۰
منیزیم (MgO)	۴/۰۵
اکسید پتاسیم (K ₂ O)	۲/۵۰
اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)	۴/۲۲
اکسید کلسیم (CaO)	۱۳/۷۸
افت حرارتی	۹/۴۶

¹ X-ray fluorescence

۲- موقعیت سایت

لس در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در مناطق آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک وجود داشته [۱۵] و با توجه به ویژگی‌های ساختاری و ترکیب آن، اغلب قابلیت رمبندگی دارند [۱۶]. در سیل سال ۱۳۹۷ خسارت عمده‌ای به ساختمان‌ها و ابنیه فنی راه‌آهن و سیلوهای ذخیره مواد در منطقه شمال استان گلستان که تحت پوشش خاک‌های لسی می‌باشد، وارد شد. به همین دلیل منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، ناحیه روستای داشلی برون در ۱۵۰ کیلومتری مرکز استان گلستان در کشور ایران و نزدیک با مرز کشور ترکمنستان انتخاب شد. موقعیت مکانی محل مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. ترکیبات شیمیایی لس عمدتاً سیلیس، آلومینا و اکسید کلسیم است. ترکیب شیمیایی لس محدوده مورد مطالعه، در جدول ۱ خلاصه شده است [۲].

میزان بارندگی متوسط سالانه این منطقه حدود ۲۱۴ میلی‌متر است. از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی و بر اساس روش آمبرژه^۱ منطقه مورد مطالعه جزو اقلیم نیمه‌بیابانی خشک و سرد محسوب می‌شود [۱۷]. تصاویر محل مورد مطالعه در منطقه داشلی برون خسارات وارده به ابنیه فنی در شمال شرق ایران در شکل ۲ نشان داده شده است.

به‌منظور شناسایی دقیق خاک محل، دو گمانه ماشینی با اعماق ۱۵ و یک گمانه به عمق ۳۰ متر به روش مغزه‌گیری ممتد در نزدیکی ابنیه و راه

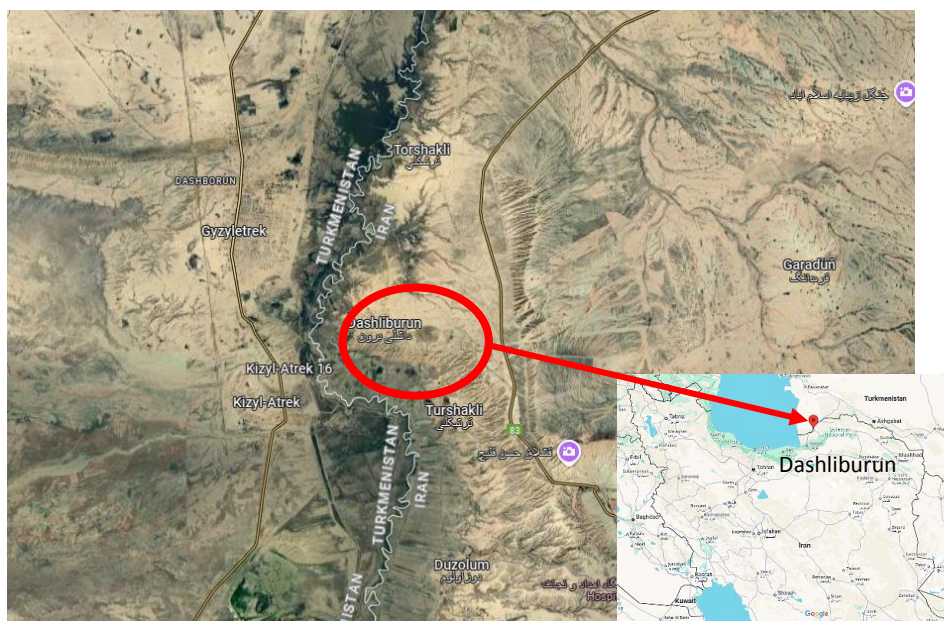
دسترسی روستا در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۸ دقیقه عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه، مطابق شکل ۳ حفاری شد و همچنین به دلیل نیاز به نمونه‌های بیشتر اقدام به برداشتن نمونه بلوکی (تهیه نمونه دست نخورده) از سطح ترانشه گردید و در ادامه پروفیل خاک از سطح زمین در شکل ۴ نشان داده شد.

نمونه‌برداری به دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده انجام شده است. برای انجام آزمایش‌ها و تعیین مشخصات و پارامترهای مقاومت طبیعی خاک در آزمایشگاه از نمونه دست‌نخورده و برای آزمایش‌های فیزیکی از نمونه دست‌خورده استفاده شده است.

منحنی دانه‌بندی خاک پایه در شکل ۵ و مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. خواص فیزیکی پایه لس مطابق با استاندارد ASTM D4318 [۱۸]، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تعیین شد و کلیه آزمایشات ارائه شده در جدول ۳ مطابق استاندارد ASTM انجام گردید. بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه (USCS)^۲، خاک مورد مطالعه سیلت (ML) با حد روانی کم و حداقل چگالی خشک ۱/۲۹ gr/cm³ بوده و با توجه به انجام آزمایش شاخص رمبندگی (I_p^۳) مطابق استاندارد ASTM D5333-03، درجه رمبندگی آن طبق جدول ارائه شده در استاندارد در محدوده شدید قرار دارد.

2. Unified Soil Classification System
3. Collapse index

1. Amberger



شکل ۱. موقعیت مکانی محل مورد مطالعه در نقشه

Fig. 1. Location of the study site on the map



شکل ۲. تصاویر محل مورد مطالعه در منطقه داشلی برون (الف) خسارت وارده در کنار محور (ب) وقوع ناپایداری

Fig. 2. Images of the research site in the Dashli Borun area: a) Road collapse, b) Instability occurrence



شکل ۳. الف) عملیات حفاری گمانه‌ها در منطقه داشلی برون، ب) برداشت نمونه بلوکی

Fig. 3. a) Drilling operations at the Dashli Borun site, b) Collection of block samples

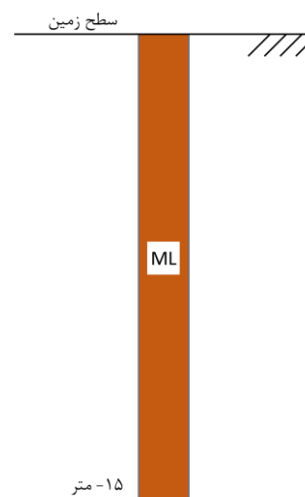
مخروطی سه پره با نسبت فاصله میان‌پره‌ای به قطر پره سه ($S/D=3$) برای عمق شش متری ساخته شده است. برای نصب در عمق ۶ متری از یک شافت به طول ۳ متر به عنوان اکستنشن استفاده گردیده و شمع تحت بار فشاری قرار گرفته است. طرح شماتیک و شمع‌های اجرایی پیچشی مخروطی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

شمع پیچشی از طریق اعمال گشتاور و نیروی فشاری که توسط یک ماشین هیدرولیک (ماشین حفار) تأمین گردیده، در درون زمین فرو رانده می‌شود. شمع پیچشی باید به گونه‌ای نصب گردد که کمترین کج‌شدگی را نسبت به راستای قائم داشته باشد. پس از اطمینان از قائم بودن شمع، نیروی گشتاور به شمع‌های پیچشی اعمال و با نیروی فشاری به درون زمین رانده می‌شود. تصاویری از دستگاه حفاری به همراه شمع‌های پیچشی برای دو روش مرطوب و خشک مطابق شکل ۷ نشان داده شده است.

بررسی اثر نیروی فشاری اعمال شده بر انتهای شمع و یا همان تنش نصب و فشار آب به عنوان دو عامل مهمی می‌باشند که باعث تغییر مشخصات ژئوتکنیکی خاک و کاهش پتانسیل رمبندگی می‌شوند.

۴- عملکرد شمع حین نصب

برای کنترل تنش وارده بر خاک توسط پره‌ها از وزن ماشین حفاری به عنوان تنش نصب به شمع استفاده شده است. در دستگاه حفاری از دو جک ۸ تن فشاری به صورت سری برای پایین بردن شمع پیچشی و اعمال نیرو بر شمع‌ها در حین چرخش استفاده شده است. با توجه به اینکه جک‌ها هیدرولیک بوده، بنابراین با نصب گیج فشار در مسیر شیر کنترل جک‌ها فشار



شکل ۴. پروفیل خاک از سطح زمین

Fig. 4. Soil profile from the ground surface

۳- اجرای شمع‌های پیچشی

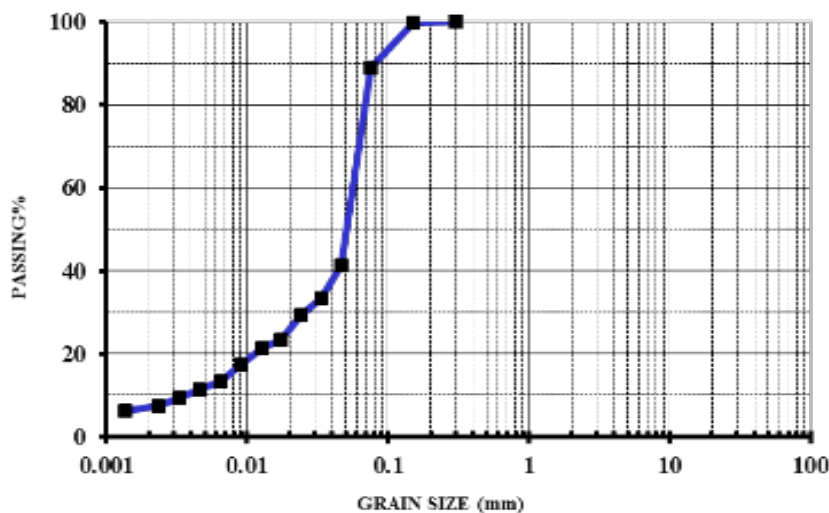
جهت بررسی عملکرد شمع پیچشی در مقیاس واقعی^۱ ۸ شمع بزرگ مقیاس پیچشی در محل بر روی خاک‌های لسی طبق جدول ۴ نصب و اجرا شده است. هندسه و ابعاد شمع‌های پیچشی طبق جدول ۵ بوده است. بر اساس جدول ۵ نحوه نام‌گذاری شمع‌ها به این صورت است که دو حرف لاتین ابتدای نام‌گذاری، مخفف Conical Helix، حرف بعدی شرایط انجام آزمایش (خشک یا مرطوب) و سه عدد بعدی به ترتیب بیانگر ارتفاع شمع، تعداد پره و نسبت فاصله پره به قطر است. شمع پیچشی

1. Full scale

جدول ۲. مشخصات مرتبط با دانه بندی خاک مورد بررسی

Table 2. specification of Soil Gradation

عمق نمونه (متر)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	ضریب انحنا (C _c)	ضریب یکنواختی (C _u)
۶	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۵۶	۳/۱۴	۱۵/۳۵



شکل ۵. منحنی دانه بندی خاک لسی مورد بررسی در تحقیق حاضر

Fig. 5. Grain size distribution curve

جدول ۳. خواص خاک لس گلستان (منطقه داشلی برون)

Table 3. Physical properties of loess soil in Golestan Province (Dashli Borun Area)

مقدار	خصوصیات	مقدار	خصوصیات
۲۱	زاویه اصطکاک خاک (ϕ°)	ML	نوع خاک
۱۰	زاویه اصطکاک اشباع (ϕ'°)	۱۷	چسبندگی طبیعی خاک C (kPa)
۲۷	حد روانی LL (%)	۴	چسبندگی اشباع خاک C' (kPa)
۴	شاخص خمیری PI (%)	۵	رطوبت طبیعی خاک (%)
۲۳	حد خمیری PL (%)	۲/۶۸	چگالی مخصوص
۲۰	شاخص رمبندگی (I_e) (%)	۱/۱۱	نسبت تخلخل اولیه
۱۱ الی ۱۵	محدوده اعداد نفوذ استاندارد (N _{SPT})	۱/۲۹	دانسیته (gr/cm^3)

جدول ۴. برنامه مدل های مقیاس واقعی اجرا شده

Table 4. Helical pile installation program

شرایط اجرا	فشار تزریق آب (bar)	تنش نصب (kPa)
خشک	-	۲۰۰-۴۰۰-۴۵۰
مرطوب	۴	۲۰۰-۴۰۰
	۲-۴-۶	۴۵۰

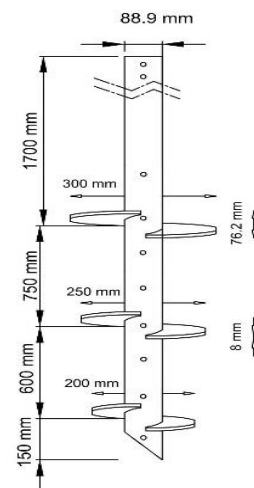
جدول ۵. خواص خاک لس گلستان (منطقه داشلی برون)

Table 5. Physical properties of loess soil in Golestan Province (Dashli Borun Area)

نام شمع	تعداد پره	طول شمع (cm)	عمق نفوذ (cm)	قطر پره (cm)	طول گام پره (cm)	ضخامت پره (cm)	قطر شفت (cm)	ضخامت شفت (cm)	نسبت فاصله پره ها	فاصله نوک شمع تا پره انتهایی (cm)
CH(D or W) 6.3.3	۳	۶۲۰	۶۰۰	۲۰-۲۵-۳۵	۷/۶۲	۰/۸	۸/۸۹	۰/۵	۳	۱۵



(ب)



(الف)

شکل ۶. الف) طرح شماتیک شمع پیچشی مخروطی ب) تصویر شمع های اجرایی

Fig. 6. a) Schematic design, b) constructed conical helical pile



شکل ۷. جزئیات تجهیزات اجرایی (الف) اجرای نصب مرطوب (ب) اجرای نصب خشک
Fig. 7. Details of the equipment a) wet installation, b) dry installation



شکل ۸. استفاده از نیروسنج برای تبدیل فشار به نیرو
Fig. 8. Conversion of Pressure to Force Utilizing a Load Cell

پمپاژ آب وصل شد. همچنین از مخزن فشارشکن یک شلنگ به پشت لوله هدایت‌کننده شمع متصل شده و از شلنگ دیگر به عنوان شیر اطمینان استفاده شده تا در صورت مسدود شدن مسیر آب توسط گل و یا کم بودن دبی آب پمپ خراب نشود.

شمع‌های پیچشی در عمق ۶ متر نصب شدند و تست بارگذاری روی هر شمع انجام و سپس جابه‌جایی در بالای شمع اندازه‌گیری شده است. آزمایش بارگذاری استاتیکی محوری فشاری مطابق استاندارد ASTM D1143/ D1143M-07(2013) صورت گرفته است [۱۹].

ظرفیت باربری هر شمع در نشست ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره مورد بررسی قرار گرفته است. در مرکز بالای شمع یک صفحه بارگذاری،

وارد به شمع در هر لحظه از زمان ثبت شد. برای تبدیل فشار به نیرو برای استفاده از آن در تحلیل‌ها، با قرار دادن یک نیروسنج در زیر راد هدایت‌کننده مقدار اعداد به دست آمده از گیج فشار به نیرو تبدیل شد (شکل ۸). روش اجرا به این صورت می‌باشد که با اعمال فشار توسط جک‌های دستگاه حفاری فشار روغن در گیج قرائت شده و همزمان با آن نیروی ایجاد شده در نیروسنج قرائت می‌گردد. در پایان در هر فشار قرائت شده توسط گیج فشار روغن با نیروی معادل آن توسط نیروسنج بدست می‌آید. در روش مرطوب برای تزریق آب، از یک پمپ و مخزن کنترل فشار به همراه دبی‌سنج استفاده گردید. در ابتدا مخزن آب به پمپ متصل شد. سپس پمپ آب توسط شلنگ‌های فشار قوی به یک مخزن فشارشکن جهت کنترل نوسان و اثر ضربه در حین



شکل ۹. انجام بارگذاری استاتیکی شمع پیچشی فشاری

Fig. 9. Static axial load testing for compression test

و ۷۵۰ میلیمتر و عمق نصب ۶ متر برای روش نصب خشک در میدان، تحت تنش‌های نصب مختلف می‌باشد. همچنین جدول ۶ مربوط به ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی در تغییر شکل معادل با ۵، ۱۰ درصد قطر میانگین پره‌ها در روش نصب خشک می‌باشد. در روش نصب خشک در تنش نصب متوسط ۴۵۰ کیلوپاسکال در زیر پره‌ها، بیشترین و در تنش نصب ۲۰۰ کیلوپاسکال کمترین ظرفیت باربری حاصل شده‌است. دست‌خوردگی کمتر و تمرکز تنش در این شمع سبب شده تغییر زیادی در ظرفیت باربری شمع بر اساس تغییر تنش نصب ایجاد شود.

۵-۲- اثر فشار تزریق آب در روش مرطوب

۵-۲-۱- تعیین فشارتزریق بهینه

نمودار شکل ۱۱ و جدول ۷ به ترتیب شامل منحنی‌های بار-جابجایی و مقادیر ظرفیت باربری در تغییر شکل معادل با ۵، ۱۰ درصد میانگین قطر پره‌ها مربوط به شمع پیچشی مخروطی برای فشارهای آب ۲ و ۴ و ۶ بار و در تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. علت بررسی تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال به دلیل ماکسیمم بودن ظرفیت باربری در حالت خشک بوده است. نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی، با تغییر فشار تزریق آب به شدت تغییر می‌کند. در فشار آب ۶ بار نسبت به فشار آب ۴ بار ظرفیت باربری شمع در تغییر مکان قائم ۲۵ میلی‌متر به مقدار ۵۳ درصد کاهش یافته و در فشار آب ۲ بار نسبت به فشار آب ۴ بار معادل ۴۱ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

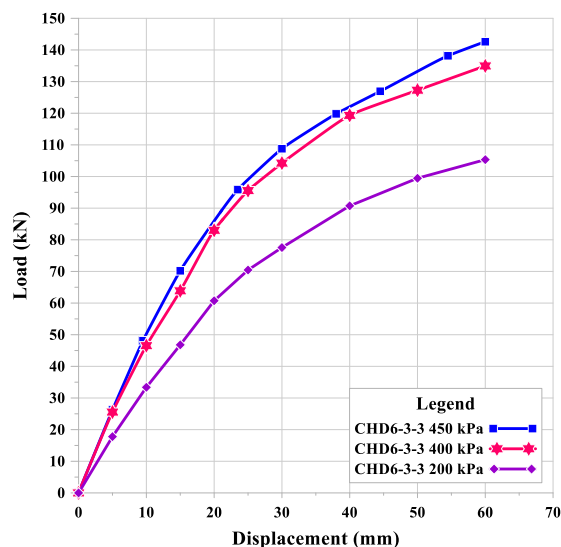
لودسل و جک هیدرولیکی نصب و کیسه‌های ماسه و بلوک‌های بتنی روی فریم برای تأمین وزن مورد نیاز قرار داده شد. همچنین این وزن بیشتر از ۱/۲ برابر حداکثر بار تأمین شده تا اطمینان از پایداری تیر بدهد و قرائت بار و جابه‌جایی توسط دیتالاگر اندازه‌گیری شده است. جابه‌جایی رأس شمع توسط سه گیج جابه‌جایی در بازه‌های زمانی منظم ثبت گردیده و میانگین مقادیر قرائت شده به‌عنوان جابه‌جایی رأس شمع لحاظ شده است. شکل ۹ نمایی از سیستم بارگذاری بر شمع را نشان می‌دهد.

۵- بحث و مقایسه

محققان در مراجع مختلف [۲۰-۲۲] ظرفیت فشاری محوری شمع‌ها را تحت جابجایی معادل ۱۰ درصد قطر شمع تعریف کرده‌اند. این تعریف تضمین می‌کند که جابجایی کافی برای بسیج کردن ظرفیت انتهایی شمع وجود دارد. به طور مشابه، برای شمع‌های مخروطی ظرفیت فشاری محوری شمع‌های مارپیچ را می‌توان معادل جابجایی ۱۰٪ قطر متوسط پره تعریف کرد. در این راستا نمودار بار-جابجایی در ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره‌ها در دو حالت خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه نتایج حاصل به ترتیب ارائه می‌شود.

۵-۱- اثر تنش در روش نصب خشک

شکل ۱۰ حاوی نمودارهای بار-جابجایی مربوط به شمع پیچشی مخروطی با قطر پره‌های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلیمتر، فاصله بین پره‌های ۶۰۰



شکل ۱۰. نمودار بارگذاری شمع پیچشی مخروطی تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب خشک

Fig. 10. Load-displacement of the conical helical pile under varying installation stresses in the dry installation condition

جدول ۶. ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی سه‌پره تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب خشک.

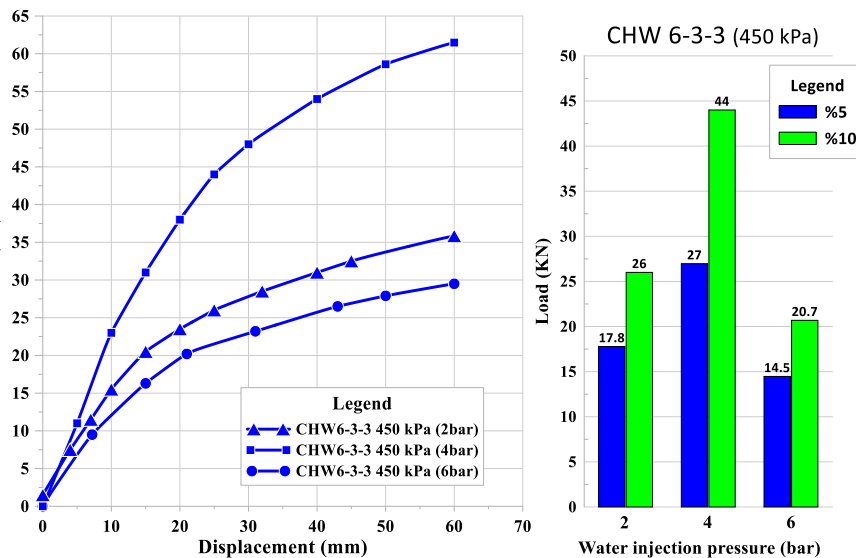
Table 6. The bearing load of the three-helix conical helical pile under various installation stresses in the dry installation condition

ظرفیت باربری فشاری (kN)		تنش نصب (kPa)	نوع شمع مخروطی
جابه‌جایی متناظر ۱۰ درصد قطر پره	جابه‌جایی متناظر ۵ درصد قطر پره		
۷۰/۵	۴۱	۲۰۰	CHD 6.3.3
۹۸/۵	۵۷/۲	۴۰۰	CHD 6.3.3
۹۸/۸	۶۰/۹	۴۵۰	CHD 6.3.3

جدول ۷. ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی سه‌پره تحت فشار تزریق‌های متفاوت در حالت نصب مرطوب

Table 7. The bearing load of the three-helix conical helical pile under various installation stresses in Ultimate load of the three-helix conical helical pile under different injection pressures in the wet installation condition

ظرفیت باربری فشاری (kN)		فشار آب (bar)	تنش نصب (kPa)	نوع شمع مخروطی
جابه‌جایی متناظر ۱۰ درصد قطر پره	جابه‌جایی متناظر ۵ درصد قطر پره			
۲۶	۱۷/۸	۲	۴۵۰	CHW 6.3.3
۴۴	۲۷	۴	۴۵۰	CHW 6.3.3
۲۰/۷	۱۴/۵	۶	۴۵۰	CHW 6.3.3



شکل ۱۱. نمودار بارگذاری شمع پیچشی مخروطی تحت فشار تزریق‌های متفاوت.

Fig. 11. Load-displacement records of the conical helical pile under different injection pressures

مخروطی در فشار آب ۴ بار و تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال بدست آمده است. در فشار آب بهینه، خاک در محدوده پره‌های شمع پیچشی مطابق شکل (۱۲) نشست کرده و سبب افزایش تراکم و متعاقباً افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود. تعیین فشار آب بهینه نقش بسیار مهمی در اجرای صحیح شمع‌های پیچشی به روش نصب مرطوب و بالا بردن ظرفیت باربری شمع‌ها دارد. با افزایش تغییر مکان قائم شمع در هنگام بارگذاری به اختلاف ظرفیت باربری شمع‌ها تحت فشارهای متفاوت آب تزریق شده افزوده می‌شود. در فشار آب ۴ بار بیشترین ظرفیت باربری برای شمع پیچشی پره ای سه پره مخروطی اتفاق می‌افتد.

۵-۲-۳- اثر تنش نصب مرطوب

پس از تعیین فشار بهینه، اثر فشار نصب تحت تنش‌های مختلف در حالت مرطوب مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۳ و جدول ۹ به ترتیب نمودار بار-جابجایی و مقادیر ظرفیت باربری در تغییر شکل‌های معادل و عمق نصب ۶ متر برای روش نصب مرطوب تحت فشار تزریق آب ۴ بار برای تنش‌های نصب مختلف می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش نصب غالباً سبب افزایش ظرفیت باربری شده‌است. در روش نصب مرطوب، در تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال بیشترین و در تنش نصب ۲۰۰ کیلوپاسکال کمترین ظرفیت باربری حاصل شده‌است.

عرب‌عامری و اسلامی در سال ۲۰۲۱ بر روی خاک لسی با شمع‌های پیچشی یکنواخت سه پره به بررسی اثر فشار تزریق آب بهینه پرداختند که مهم‌ترین پارامتر موثر بر ظرفیت باربری در هنگام نصب شمع می‌باشد. بر اساس نتایج تحقیق انجام شده، فشار آب کم باعث عدم تخریب ساختار خاک لس و تراکم کمتر خاک اطراف شمع می‌شود و فشار آب زیاد باعث آب‌شستگی و خالی شدن خاک اطراف پره‌ها شده است [۱۰]. در این تحقیق نیز با توجه به متفاوت بودن هندسه شمع پیچشی نتایج مشابهی مشاهده گردید و در دو حالت فشار تزریق کم و زیاد، سبب کاهش ظرفیت باربری در حدود ۴۵ درصد در مقایسه با تزریق بهینه گردید.

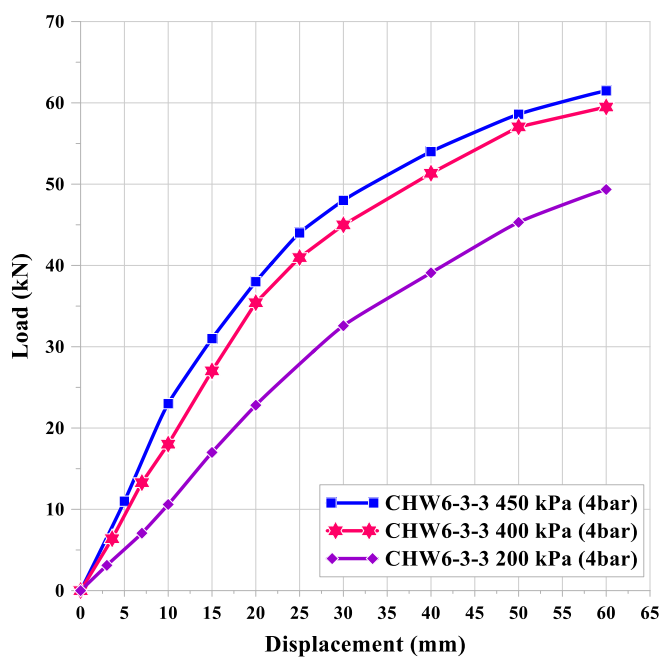
۵-۲-۲- بررسی کیفی اثر فشار تزریق آب بهینه در هنگام اجرا

کاهش ظرفیت باربری در فشار آب ۶ بار به دلیل جابه‌جایی زیاد و شسته شدن ذرات خاک لس و شسته شدن آن از کنار لوله مرکزی شمع یا حرکت آنها به درون خاک لس مطابق شکل (۱۲ الف) می‌باشد. جابه‌جایی زیاد ذرات خاک لس در اثر جریان و فشار آب، سبب تغییر در تعداد و حجم حفرات و همچنین ساختار قرارگیری آنها شده و این تغییرات سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. همچنین در صورت کم بودن فشار آب، خاک لس اشباع نشده و یا به دلیل فشار کم آب، گل درون شفت مرکزی شمع پیچشی مطابق شکل (۱۲ ب) پر می‌شود. بیشترین ظرفیت باربری شمع پیچشی



شکل ۱۲. بررسی کیفی اثر فشار آب در اجرا الف) خالی شدن اطراف شفت به دلیل فشار آب زیاد ب) پر شدن شفت مرکزی توسط گل ج) نشست خاک مناسب خاک در فشار آب ۴ بار.

Fig. 12. Examining different water pressures during wet installation of helical piles (a) Space around the shaft due to high water pressure (b) Filled central shaft by mud (c) Proper soil settlement at the water pressure of 4 bars.



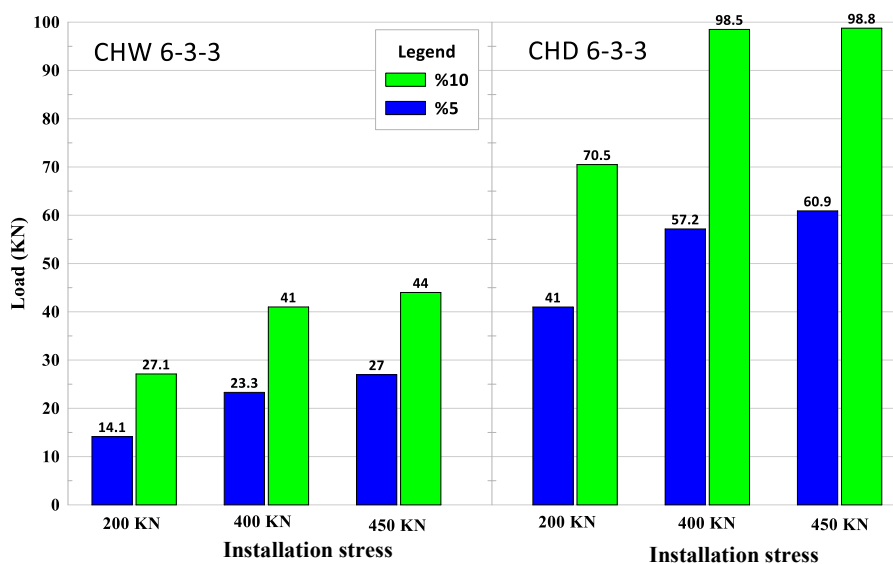
شکل ۱۳. نمودار بارگذاری شمع پیچشی مخروطی تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب مرطوب در فشار تزریق بهینه ۴ بار.

Fig. 13. Loading curve of the conical helical pile under various installation stresses in the wet installation condition (water pressure of 4 bar)

جدول ۷. ظرفیت باربری شمع پیچشی پره ای سه پره تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب مرطوب در فشار تزریق بهینه ۴ بار.

Table 7. Ultimate load of the three-helix conical helical pile under various installation stresses in the wet installation condition (water pressure of 4 bar).

ظرفیت باربری فشاری (kN)		فشار آب (bar)	تنش نصب (kPa)	نوع شمع مخروطی
جابه‌جایی متناظر ۵ درصد قطر پره	جابه‌جایی متناظر ۱۰ درصد قطر پره			
۱۴/۱	۲۷/۱	۴	۲۰۰	CHW 6.3.3
۲۳/۳	۴۱	۴	۴۰۰	CHW 6.3.3
۲۷	۴۴	۴	۴۵۰	CHW 6.3.3



شکل ۱۴. مقایسه ظرفیت باربری در حالت نصب خشک و مرطوب.

Fig. 14. Comparison of Ultimate Load in Dry and Wet Conditions

این اعداد به ترتیب برابر با ۴۴ و ۲۷ کیلونیوتن بوده است. با افزایش تنش سربار میزان ظرفیت باربری بیشتر شده که در حالت خشک در تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال نسبت به تنش نصب ۲۰۰ کیلوپاسکال با افزایش ضریب ۱/۴ برابری در ۱۰ درصد قطر میانگین پره و در حالت مرطوب این روند صعودی برابر با ضریب ۱/۶۲ بوده است. در نشست ۵ درصد قطر میانگین پره در حالت های نصب خشک و مرطوب این ضریب افزایشی به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۱/۹ می‌باشد. با توجه به ضرایب افزایشی بیشتر در ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره‌ها در حالت نصب مرطوب، نشان‌دهنده اثرگذاری روش نصب مرطوب و همچنین اثر فشار آب در تراکم خاک لس و بهسازی

۵-۳- مقایسه عملکرد دو اثر نصب خشک و مرطوب

در شکل ۱۴ نمودار بار-جابجایی و مقادیر ظرفیت باربری در تغییر شکل معادل در حالت (S/D=3) با عمق نصب ۶ متر به روش نصب مرطوب با فشار آب ۴ بار و در حالت خشک، تحت تنش های نصب متفاوت ارائه شده است.

بیشترین ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی در تنش نصب خشک ۴۵۰ کیلوپاسکال برابر با ۹۸/۸ کیلونیوتن در نشست ۱۰ درصد قطر میانگین پره مشاهده شده، در حالی که در همین تنش نصب در ۵ درصد جابجایی قطر پره مقدار ۶۰/۹ کیلو نیوتن بدست آمده است. به طور مشابه در حالت مرطوب

ساختار خاک می‌باشد.

مطابق با شکل ۱۴، مقایسه بین دو اثر در شرایط خشک (CHD) و مرطوب (CHW) نشان می‌دهد که عملکرد ظرفیت باربری شمع‌ها در شرایط خشک به مراتب بهتر بوده است. به‌طور خاص، در تنش نصب ۲۰۰ کیلو نیوتن، ظرفیت باربری در نشست ۵ درصد از ۱۴/۱ کیلو نیوتن در حالت مرطوب به ۴۱/۰ کیلو نیوتن در حالت خشک افزایش یافته که معادل افزایش ۱۹۱ درصدی است. در همین تنش نصب و برای نشست ۱۰ درصد، مقدار ظرفیت باربری از ۲۷/۱ به ۷۰/۵ کیلو نیوتن رسیده و ۱۶۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. با افزایش تنش نصب به ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلو نیوتن نیز همین روند مشاهده می‌شود؛ در تنش نصب ۴۰۰ کیلو نیوتن، ظرفیت باربری در نشست ۵ درصد، ۱۴۵ درصد و در نشست ۱۰ درصد، ۱۴۰ درصد افزایش داشته است. همچنین، در تنش نصب ۴۵۰ کیلو نیوتن، مقدار افزایش در نشست‌های ۵ و ۱۰ درصد برابر ۱۲۵ درصد برآورد شده است. شمع‌های ماریچ به روش نصب خشک ظرفیت باربری بالاتری نسبت به شمع‌های نصب‌شده به روش مرطوب دارند. این تفاوت به علت استفاده از آب در روش نصب مرطوب و تأثیر آن بر تغییر وضعیت تنش مؤثر خاک در طول آزمایش بارگذاری استاتیک شمع‌ها می‌باشد. به همین دلیل، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در روش نصب مرطوب نسبت به روش نصب خشک کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این، افزایش تنش نصب باعث ایجاد تنش در زیر هر پره شمع ماریچ می‌شود که این تنش‌ها موجب تخریب ساختار لانه‌زنبوری خاک لس گردیده و در نهایت، پتانسیل فروریزشی در هر دو روش نصب خشک و مرطوب کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودار فوق و مقایسه دو روش نصب خشک و مرطوب پس از مرطوب نمودن خاک اختلاف کمتری با افزایش تنش‌های نصب ایجاد شده و نرخ افزایش در حالت مرطوب در ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره ۱/۹ و ۱/۶۲ برابر در مقایسه با روش خشک می‌باشد که نشان‌دهنده این است ساختار پایدارتری نسبت به روش نصب خشک ایجاد کرده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از سه تکنیک هم‌زمان، مرطوب‌سازی با رویکرد غرقاب‌سازی و استفاده از نیروی فشاری در انتهای شمع با رویکرد متراکم‌سازی و استفاده از شمع به‌عنوان تسلیح‌کننده خاک استفاده شده است. تمامی آزمایش‌های بارگذاری شمع برای شرایط خشک و مرطوب خاک لسی رمنده با در نظر گرفتن کلیه جوانب اقتصادی و فنی و اجرایی در میدان انجام

شده است. هشت عدد شمع تحت آزمایش بارگذاری فشاری استاتیکی سربع بر روی خاک‌های لسی واقع در منطقه داشلی برون قرار گرفته و نتایج حاصل به‌صورت زیر قابل‌بیان بوده است:

- در روش نصب خشک شمع‌های پیچشی، چرخش پره‌ها در درون خاک، ساختار آن را به‌هم‌ریخته و استفاده از نیروی فشاری در پشت شمع هم‌زمان با حرکت رو به پایین شمع سبب می‌شود خاک زیر پره‌ها فشرده می‌شود. در روش نصب مرطوب، علاوه بر عملکرد تخریبی پره‌ها هنگام نفوذ و اثر تراکمی نیروی فشاری در پشت شمع، فشار آب نیز سبب تخریب ساختار خاک می‌شود. همچنین به جهت مقاومت بالای خاک‌های لسی، نفوذ شمع در حالت خشک نیاز به اعمال نیروی پیچشی بالایی دارد که استفاده از آب تحت‌فشار هنگام اجرای شمع، سبب راحتی نصب می‌شود.
- در فشار آب کم، آب به‌عنوان عامل کاهنده اصطکاک بین دانه‌ها به‌خوبی عمل نکرده و خاک کمتر متراکم می‌شود. همچنین در فشار آب زیاد ذرات خاک شسته شده و جابه‌جایی زیادی داشته و این دلیل سبب عملکرد ضعیف‌تر و ظرفیت باربری کمتر شمع می‌شود، در نتیجه در فشار آب بهینه ظرفیت باربری به مقدار حداکثر خود رسیده که مناسب‌ترین فشار جهت اجرای شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی بوده است.
- با افزایش تنش نصب میزان ظرفیت باربری در دو حالت خشک و مرطوب افزایش یافته است. ولی نرخ افزایش در حالت مرطوب بیشتر از حالت خشک بوده است که این موضوع نشان‌دهنده اثرگذاری روش نصب مرطوب و فشار آب در تراکم خاک لسی و بهسازی در ساختار خاک می‌باشد.
- در تحقیق‌های آتی می‌تواند اثر زمان بارگذاری بعد از اجرا بر ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی پره‌ای و همچنین ضخامت ورق پره‌ها بر منحنی ظرفیت باربری - نشست بررسی گردد.

منابع

- [1] J. Wu, N. Yang, P. Li, C. Yang, Influence of moisture content and dry density on the compressibility of disturbed loess: A case study in Yan'an City, China, Sustainability, 15(7) (2023) 6212.
- [2] A. Zivari, M. Siavoshnia, H. Rezaei, Effect of lime-rice husk ash on geotechnical properties of loess soil in Golestan province, Iran, International Journal of Geo-Engineering, 14(1) (2023) 20.

- Civil Engineering, 22(2) (2024) 289-302.
- [13] A. Rahimi, A. Eslami, J.S. McCartney, Hyperbolic load–displacement analysis of helical and expanded piles: database approach, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 177(5) (2024) 448-467.
- [14] M. Esmailzade, A. Eslami, J.S. McCartney, Comparison of frustum confining vessel (FCV) and full-scale testing for helical and expanded piles geotechnical performance, *Marine Georesources & Geotechnology*, 43(2) (2025) 284-304.
- [15] H. Luo, F. Wu, J. Chang, J. Xu, Microstructural constraints on geotechnical properties of Malan Loess: a case study from Zhaojiaan landslide in Shaanxi province, China, *Engineering Geology*, 236 (2018) 60-69.
- [16] H. Yan, J. Ma, J. Niu, Z. Xie, Q. Wang, W. Zhu, X. Yang, Comprehensive Analysis of Collapsible Loess, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2023, pp. 03007.
- [17] H.R. Asgari, A. Rashno, C. Bairramkomaki, A. Boali, E. Rashno, Investigation study of soil salinity mapping using Landsat data (case study: Dashli borun, Golestan province), (2020).
- [18] ASTM, D4318-17 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, (2017) e1.
- [19] ASTM, D1143 / D1143M-07 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. ASTM International, (2013)e1.
- [20] H.A. Perko, *Helical piles: a practical guide to design and installation*, John Wiley & Sons, 2009.
- [21] K.M. Tappenden, Predicting the axial capacity of screw piles installed in Western Canadian soils, (2007).
- [22] K. Terzaghi, Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundations, in: *Proceedings, ASCE*, 1942, pp. 311-323.
- [3] A. Karimi, H. Khademi, M. Kehl, A. Jalalian, Distribution, lithology and provenance of peridesert loess deposits in northeastern Iran, *Geoderma*, 148(3-4) (2009) 241-250.
- [4] I. Jefferson, D. Evstatiev, D. Karastanev, The treatment of collapsible loess soils using cement materials, in: *GeoCongress 2008: Geosustainability and geohazard mitigation*, 2008, pp. 662-669.
- [5] A. Abdolrezayi, N. Khayat, Comparative three-dimensional finite element analysis of piled raft foundations, *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(1) (2021) 19-36.
- [6] S. Clemence, A. Lutenegeger, Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks, *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 9(1) (2015) 21-41.
- [7] ME. Mahmoudi Mehrizi, M. Jalali Moghadam, *Mechanical Soil Restraints from Design to Implementation*, Amirkabir University 2016 (In Persian).
- [8] S. Clemence, A. Ghaly, A review of model-scale laboratory investigations of helical anchors and screw piles, in: *1st International geotechnical symposium on helical foundations*, 2013, pp. 25-45.
- [9] M. Arabameri, A. Eslami, Microstructure and strength effect on bearing capacity of helical piles installed in golestan loess, *International Journal of Civil Engineering*, 19(8) (2021) 923-940.
- [10] M. Arabameri, A. Eslami, Wet and dry installation effects on the capacity of helical piles in loess deposits, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(4) (2022) 486-498.
- [11] K. Shao, Q. Su, J. Liu, K. Liu, Z. Xiong, T. Wang, Optimization of inter-helix spacing for helical piles in sand, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(3) (2022) 936-952.
- [12] R. Hoseinpour, M. Keramati, C. de Hollanda Cavalcanti Tsuha, Effect of the addition of a second helix on the helical pile performance in sand, *International Journal of*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Akbarnezhad, N. Ganjian, A. Eslami, M. Fadaee, The Effect of Water Injection Pressure on the Performance of Conical Helical Piles, Amirkabir J. Civil Eng., 57(5) (2025) 851-870.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23936.8233](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23936.8233)



