

Soil Subsidence Around the Pile under Lateral Cyclic Loading in Granular Soil

Javad Keshavarz, Jafar Bolouri Bazaz*

Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,

ABSTRACT: In many structures, such as offshore wind turbines, single piles are used in the foundation. These structures are subjected to cyclic loads such as wind and waves. The cyclic load applied to the foundation causes a convective flow of soil around the pile and also to appear subsidence around the pile. The geometry of soil subsidence is influenced by loading frequency, pile embedded length, and soil density. The amount of subsidence based on the number of cycles around the pile, the impact of cyclic loads on the pile's bearing capacity, and variations in loading frequency on the subsidence around the pile have consistently been topics of interest among researchers. To address this question, an experimental program was designed to provide answers. In this research, piles with different embedded lengths have been subjected to one-way cyclic loading. Cyclic tests have been performed with three various frequencies in loose and dense sandy soil. The results of the tests indicate that the depth and radius of the soil subsidence around the pile are various, according to the embedded length of the pile, loading frequency, and soil density. Based on past research and laboratory data, a relationship to estimate soil subsidence depth has been provided and the constant coefficients of this equation have been determined and calibrated. As a result, it is possible to predict the amount of soil subsidence around the pile in each cycle by using this relationship. Also, the results of static loading of the pile before and after applying cyclic loading show that the bearing capacity of the pile may increase or decrease, depending on the soil density in the initial state and the redistribution of soil particles after cyclic loading. In addition, the loading frequency has no considerable effect on the static bearing capacity after cyclic loading.

Review History:

Received: Sep. 26, 2022

Revised: Jan. 25, 2025

Accepted: Apr. 02, 2025

Available Online: Apr. 21, 2025

Keywords:

Pile

Cyclic Loading

Frequency

Sandy Soil

Static Bearing Capacity

1- Introduction

In recent decades, wind turbine construction has increased globally due to growing demand for renewable energy, with monopiles being the dominant foundation type making up 79% of offshore installations in Europe [1].

While much research has examined soil-pile interaction under lateral cyclic loading [2, 3], fewer studies have addressed the subsidence of surrounding soil. Experimental and field evidence shows that such loading can trigger the convective motion of soil particles around the pile, resulting in time-dependent subsidence [4]. This may reduce, have no effect on, or even improve pile bearing capacity [5], while increasing deformation, depending on initial conditions and loading characteristics [6, 7].

This convective movement termed *ratcheting* creates voids at the pile-soil interface, allowing sand migration and local densification [8]. Particle flow is typically more intense behind the pile, causing asymmetric subsidence [9]. As shown in Figure 1, this affected zone can extend up to 1.5 pile diameters laterally and vertically. Two phases characterize the process: initial densification with subsidence and increased

resistance, followed by a convective phase with reduced subsidence and stiffness gain, driven by redistribution of shear stress toward weaker zones [10].

This study investigates the effects of loading frequency and pile embedment depth in dense and loose sands on subsidence and static bearing capacity. Cyclic one-way loading was applied at three frequencies to piles with varying embedments. Additionally, by reformulating time-based subsidence models using the number of cycles as the main variable, a more practical predictive approach is proposed.

2- Materials and Method

Wind turbine foundations are installed in various soils, from compacted sands to stiff clays and rocks. For instance, the North Sea soil layers are sandy [11]. This study focuses on sand-pile interaction, similar to previous research [12]. The soil used is Firouzkooch sand, classified as poorly graded sand (SP).

A PVC pipe with a diameter of 63 mm and embedded lengths of 400 mm, 600 mm, and 800 mm was used as the pile. Length-to-diameter ratios between 6 and 13 were chosen

*Corresponding author's email: bolouri@um.ac.ir



Fig. 1. Convective movement of sand particles around the pile [9].

to represent both rigid and flexible piles.

The laboratory setup consists of a loading system, soil container, rainfall apparatus, and data recording system (Figure 4). The pile is subjected to cyclic lateral loading using a motor-controlled system and load cell. The loading frequency used in this study is between 0.07 Hz and 0.28 Hz, in line with typical loading frequencies for wind turbine foundations [13].

The soil container was filled layer by layer with sand, maintaining the pile's verticality. After installation, cyclic loading was applied, and displacement sensors measured lateral movement and soil settlement. Loading ratios of 0.4 ($\xi_b = 0.4$) and 0 ($\xi_c = 0.4$) were used for 5000 cycles at three different frequencies. Static tests were conducted to determine the pile's bearing capacity before cyclic tests.

To minimize scale effects, the experimental parameters followed dimensional analysis, with a scale ratio of 1:60.

A key limitation of this study is the exclusion of water, which would affect sand behavior by altering pore pressure during cyclic loading. While dry sand tests may offer results similar to saturated sand tests, water-flushing effects, and particle mobility would likely complicate the results [14].

3- Results and Discussion

This study investigates the subsidence behavior around piles embedded in loose and dense sand subjected to cyclic lateral loading at three different frequencies (0.07 Hz, 0.14 Hz, and 0.28 Hz) and varying embedment depths.

Subsidence increases with greater pile embedment depth due to higher applied loads. Increasing the loading frequency results in an average 10% increase in subsidence, especially in shorter piles. Over 60% of total subsidence occurs in the first 200 cycles, with more than 20% occurring in just the first 10 cycles.

A time-dependent model initially used for scour around piles [15] was applied to subsidence data [14], expressed by:

$$\frac{Y}{Y_e} = a \left\{ 1 - \exp \left[-C \left(\frac{t}{T_e} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

Experimental data fit this model well ($R^2 = 0.99$) for both loose and dense sand. Coefficient values closely align with those reported in previous research [14], supporting the model's validity. Minor differences are attributed to soil gradation and compaction.

Since frequency is variable, number of cycles replaces time as the key parameter:

$$\frac{S}{S_e} = a \left\{ 1 - \exp \left[-C \left(\frac{N}{N_e} \right)^n \right] \right\} \quad (2)$$

Models were developed for both sand types (loose and dense), enabling estimation of subsidence at any cycle count using average values: $N_e \approx 95$ and $S_e \approx 6-18$ mm.

Post-cyclic static lateral loading tests showed that in loose sand, subsidence densifies the surrounding soil, increasing the lateral resistance. In dense sand, rearrangement of particles may reduce or restore the pile's initial load-bearing capacity.

4- Conclusion

- Increasing the pile's embedment depth leads to more subsidence, with the subsidence depth averaging about 3.5% of the embedment length. This is due to soil particle redistribution and convective flow.

- Higher loading frequencies cause more subsidence, with a 10% increase in subsidence depth for each frequency doubling (from 0.07 Hz to 0.14 Hz, and 0.14 Hz to 0.28 Hz).

- The radius of subsidence is directly related to its depth, being 1.8 times the depth in loose sand and 2 times in dense sand, due to compaction and particle redistribution around the pile.

- Loading frequency does not significantly affect the static lateral bearing capacity after cyclic loading. Forces at given displacements were almost identical across frequencies.

- In loose soil, bearing capacity increases by 10% to 50% after cyclic loading due to soil compaction, while in dense soil, it decreases by 5% to 20% due to particle redistribution.

References

- [1] M. Dolores Esteban, J.-S. López-Gutiérrez, V. Negro, C. Matutano, F.M. García-Flores, M.Á. Millán, Offshore wind foundation design: some key issues, *Journal of Energy Resources Technology*, 137(5) (2015).
- [2] W. Liao, J. Zhang, J. Wu, K. Yan, Response of flexible monopile in marine clay under cyclic lateral load, *Ocean Engineering*, 147 (2018) 89-106.
- [3] Z. Liu, Y. Zhang, Effect of drainage conditions on monopile soil-pile interaction in sandy seabed, *Ocean Engineering*, 315 (2025) 119826.
- [4] R. Owji, G. Habibagahi, M. Veiskarami, An experimental

- study on the lateral behavior of piles in unsaturated sand under monotonic, cyclic and post cyclic loading, *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(5) (2024) 3171-3191.
- [5] G. Yin, F. Niu, J. Luo, J. Wang, M. Liu, T. Dong, Y. Cao, A. Li, High potential for pile-bearing capacity loss and ground subsidence over permafrost regions across the Northern Hemisphere, *Global and Planetary Change*, 226 (2023) 104156.
- [6] Y. Wang, M. Zhu, W. Gong, G. Dai, H. Lu, B. Wang, Lateral behavior of monopiles considering the effects of sand subsidence and densification under lateral cyclic loading, *Marine Georesources & Geotechnology*, (2021) 1-11.
- [7] S.-H. Chong, J.C. Santamarina, Sands subjected to repetitive vertical loading under zero lateral strain: accumulation models, terminal densities, and settlement, *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12) (2016) 2039-2046.
- [8] P. Cuéllar, *Pile Foundations for Offshore Wind Turbines: Numerical and Experimental Investigations on the Behaviour under Short Term and Long-Term Cyclic Loading*, Berlin, Berlin, Germany, 2011.
- [9] P. Cuéllar, M. Baeßler, W. Rücker, Ratcheting convective cells of sand grains around offshore piles under cyclic lateral loads, *Granular Matter*, 11(6) (2009) 379-390.
- [10] L. Li, H. Liu, W. Wu, M. Wen, M.H. El Naggat, Y. Yang, Investigation on the behavior of hybrid pile foundation and its surrounding soil during cyclic lateral loading, *Ocean Engineering*, 240 (2021) 110006.
- [11] K. Lesny, J. Wiemann, Design aspects of monopiles in German offshore wind farms, in: *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, AA Balkema Publishing, 2005, pp. 383-389.
- [12] P. Tasiopoulou, Y. Chaloulos, N. Gerolymos, A. Giannakou, J. Chacko, Cyclic lateral response of OWT bucket foundations in sand: 3D coupled effective stress analysis with Ta-Ger model, *Soils and Foundations*, 61(2) (2021) 371-385.
- [13] D. Kallehave, C.L. Thilsted, M. Liingaard, Modification of the API py formulation of initial stiffness of sand, in: *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Present and Future*, Society of Underwater Technology, 2012.
- [14] J. Li, D. Guan, Y.-M. Chiew, J. Zhang, J. Zhao, Temporal evolution of soil deformations around monopile foundations subjected to cyclic lateral loading, *Ocean Engineering*, 217 (2020) 107893.
- [15] M. Wei, Y.-M. Chiew, D. Guan, Temporal development of propeller scour around a sloping bank, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(5) (2018) 06018005.



فرونشست خاک اطراف شمع تحت اثر بارگذاری سیکلی جانبی در خاک دانه ای

جواد کشاورز، جعفر بلوری بزاز*

گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

کلمات کلیدی:

شمع
بارگذاری سیکلی
فرکانس
خاک ماسه ای
ظرفیت باربری استاتیکی

خلاصه: در برخی از سازه ها همانند توربین های بادی از تک شمع ها در پی استفاده می شود. این سازه ها تحت اثر بارهای سیکلی همچون باد و امواج قرار می گیرند. بار سیکلی اعمال شده به پی باعث ایجاد جریان همرفتی در خاک اطراف شمع گشته و موجب پدیدار شدن فرونشست در اطراف شمع می گردد. هندسه فرونشست خاک تحت تاثیر فرکانس بارگذاری، طول مدفون شمع و تراکم خاک می باشد. مقدار فرونشست بر اساس تعداد سیکل در اطراف شمع و تاثیر بارهای سیکلی در ظرفیت باربری شمع و همچنین تغییرات فرکانس بارگذاری بر فرونشست اطراف شمع همواره از موضوعات مورد پرسش توسط پژوهشگران می باشد. در این راستا برنامه آزمایشاتی طراحی شد که بتوان به پاسخ این سوالات پرداخت. در این پژوهش شمع با طول های مدفون متفاوت تحت اثر بارگذاری سیکلی یک جهته قرار گرفته اند. آزمایشات در سه فرکانس مختلف در خاک ماسه ای سست و متراکم انجام شده است. نتایج آزمایشات نشان می دهد عمق و شعاع فرونشست خاک اطراف شمع با توجه به طول مدفون شمع، فرکانس بارگذاری و تراکم خاک متغیر است. بر اساس تحقیقات گذشته و نیز داده های آزمایشگاهی رابطه ای که بتوان فرونشست را تخمین زد ارائه و پارامترهای آن تعیین و کالیبره گردید. در نتیجه می توان با استفاده از این رابطه میزان فرونشست خاک اطراف شمع را در هر سیکل پیش بینی نمود. همچنین نتایج بارگذاری استاتیکی شمع قبل و بعد از بارگذاری سیکلی نشان می دهد ظرفیت باربری شمع می تواند افزایش یا کاهش یابد که به تراکم خاک در حالت اولیه و بازتوزیع ذرات خاک پس از بارگذاری سیکلی بستگی دارد. فرکانس بارگذاری نیز تاثیر چندانی در ظرفیت باربری استاتیکی پس از بارگذاری سیکلی ندارد.

۱- مقدمه

ساخت توربین های بادی در سرتاسر جهان در دهه های گذشته به جهت تولید انرژی های تجدید پذیر افزایش یافته که می توان گفت اکثر پی های این سازه ها از نوع تک شمع (مونو پایل) می باشند. در صنعت توربین های بادی اروپا ۷۹ درصد از پی کل این سازه ها دارای شمع واحد (مونو پایل) اعلام شده است [۱]. اندر کنش خاک و شمع تحت اثر بار سیکلی بوسیله مدل های فیزیکی [۲-۷] و مدل های عددی [۸-۱۱] مورد مطالعه گسترده ای قرار گرفته است. تمرکز مطالعات صورت گرفته روی پاسخ شمع تحت اثر بار سیکلی بوده و توجه کمتری به جابجایی های ایجاد شده در اطراف شمع در اثر تغییر شکل های خاک شده است.

فرونشست خاک اطراف پی های شمع تحت اثر بار جانبی سیکلی در پروژه های میدانی [۱۲] و در مدل های فیزیکی آزمایشگاهی [۱۳]

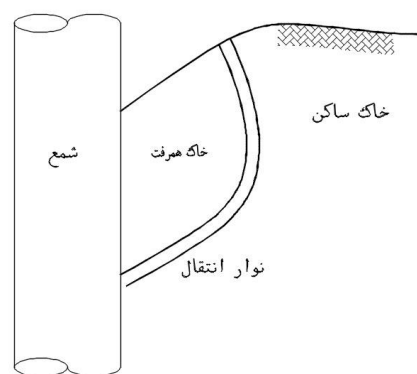
[۱۴] مشاهده و گزارش شده است. نتایج این مطالعات نشان می دهد ذرات خاک در اطراف شمع به شکل همرفتی در یک محدوده جابجا شده و باعث ایجاد فرونشست می شوند. فرآیند فرونشست و همرفتی ذرات خاک در اطراف شمع مرتعش وابسته به زمان می باشد. این فرآیند می تواند باعث کاهش ظرفیت باربری [۱۵، ۱۶]، بدون تغییر و یا افزایش آن [۱۷، ۱۸] بسته به مشخصات بارگذاری شود [۱۹]. همچنین فرونشست می تواند منجر به افزایش تغییر شکل در شمع شود [۲۰] که در واقع باید گفت تغییر شکل های سیکلی خاک اطراف شمع بستگی به حالت اولیه خاک، تعداد سیکل و سطح کرنش سیکلی دارد [۲۱-۲۳].

دانه های خاک تحت اثر ارتعاش ایجاد شده توسط شمع، جریان همرفتی^۱ (فرو رفتن دانه های خاک به عمق و بازگشت آنها به سطح) ایجاد می کنند که در اصطلاح این رفتار را Ratcheting می نامند [۲۴-۲۶]. مکانیزم این

* نویسنده عهده دار مکاتبات: bolouri@um.ac.ir

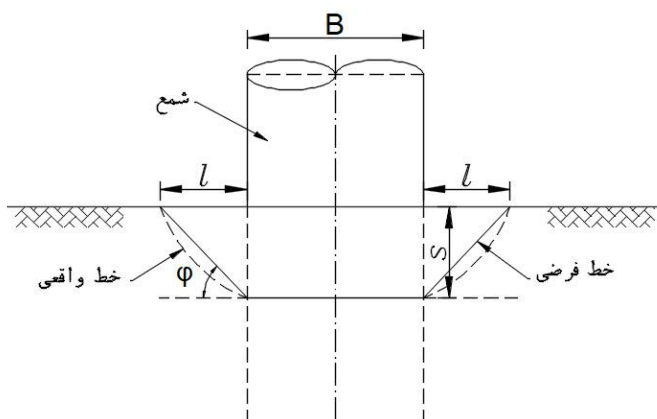
1. Convective





شکل ۱. حرکت همرفتی دانه های ماسه اطراف شمع [۱۳]

Fig. 1. Convective movement of sand grains around the pile



شکل ۲. فرونشست اطراف شمع

Fig. 2. Subsidence around the pile

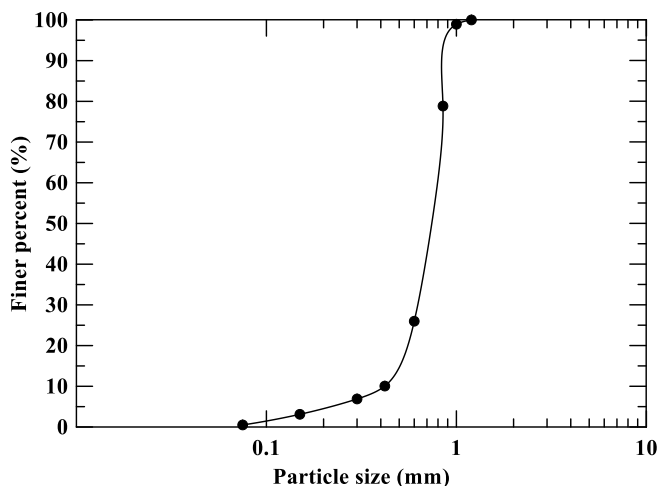
باشد. به تدریج که خاک اطراف شمع به بیشینه چگالی خود می رسد جریان همرفتی غالب گشته که شروع مرحله دوم می باشد. در این مرحله فرونشست خاک اطراف شمع و افزایش سختی خاک کاهش می یابد [۱۵، ۲۸]. حرکت ذرات توسط تغییرات تنش برشی به سمت نواحی با مقاومت کمتر رانده می شود [۱۵].

یکی از روابط ارائه شده جهت تخمین عمق فرونشست خاک اطراف شمع تحت اثر بار سیکلی جانبی، ایده آل سازی پروفیل فرونشست است. مخروط ناقص که هندسه آن در شکل ۲ نمایش داده شده با شعاع فرونشست (I) برابر با قطر شمع (B) در نظر گرفته شده و با محاسبه حجم فرونشست (خط فرضی) میزان عمق آن با استفاده از رابطه (۱) قابل تخمین است [۲۷].

رفتار به این شکل است که در بارگذاری سیکلی جانبی، میزان نیرو پشت شمع به حداکثر رسیده و سپس میزان نیرو کاهش می یابد و شمع به عقب بر می گردد. فضای خالی در ناحیه اتصال شمع و خاک ایجاد می گردد. این فضای خالی باعث می شود که دانه های ماسه در مجاورت شمع به عمق فرو رفته به گونه ای که دانه های ماسه به عمقی می رسند که فضای ایجاد شده در ناحیه اتصال شمع و خاک به اندازه ای که ذرات بتوانند به سمت پایین حرکت کنند بزرگ نیست و در نتیجه دانه های ماسه به داخل خاک فشار داده می شوند [۲۷].

مهاجرت ذرات خاک به سمت شمع در اثر بارگذاری سیکلی جانبی شروع می شود و در طول این بارگذاری این فرآیند ادامه می یابد. سرعت مهاجرت ذرات خاک در پشت شمع (جداره مقابل اعمال بار) بیش از سرعت آنها در جلوی شمع (جداره در جهت اعمال بار) می باشد [۱۳]. آزمون آزمایشگاهی نشان می دهد در بارگذاری یک طرفه، ماسه های قرار گرفته در پشت شمع در حدود قطر شمع و در جلوی شمع در حدود $0/6$ برابر قطر شمع در ناحیه جریان همرفتی ماسه ها قرار می گیرند. در عمق نیز به ترتیب در پشت و جلوی شمع در حدود $1/5$ و $1/25$ برابر قطر شمع جریان همرفتی ماسه ها به شکل گوش (عرض زیاد در سطح و در عمق کاهش می یابد) ایجاد می شود که در شکل ۱ قابل مشاهده است [۲۸].

دو مرحله اصلی الگوی حرکت دانه های خاک شامل مرحله مترام شدن اولیه و ادامه جریان همرفتی می شود. مرحله اول بوسیله فرونشست، که خاک اطراف شمع باز آرایش و متراکم می شوند مشخص می گردد. پدیده دیگر در این مرحله تجمع جابجایی های شمع و افزایش مقاومت جانبی می



شکل ۳. دانه بندی ماسه فیروز کوه مورد استفاده در آزمایش

Fig. 3. Grading of Firoozkuh sand used in the experiment

جدول ۱. مشخصات ماسه فیروز کوه

Table 1. Specifications of Firoozkuh sand

ضریب انحنای	ضریب یکنواختی	میانگین اندازه ذرات	چگالی ویژه، Gs
C _c	C _u	d ₅₀ : mm	
۱/۳	۱/۸	۰/۷۰	۲/۷۱

۲-۲- مشخصات شمع

لوله پی وی سی با قطر ۶۳ mm و طول مدفون ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ mm به عنوان شمع در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. نسبت های مختلف طول به قطر شمع به گونه ای انتخاب شده که برخی شمع ها به عنوان شمع صلب و برخی به عنوان انعطاف پذیر شناخته شده است. نسبت طول به قطر شمع در این پژوهش بین ۶ تا ۱۳ و نسبت مقیاس ۱:۶۰ انتخاب شده است. در سایر پژوهش ها نسبت های طول به قطر ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۸، ۲۰، ۲۸، ۳۰ و ۳۸ با نسبت مقیاس های ۱:۱۴، ۱:۲۶، ۱:۳۰، ۱:۴۰، ۱:۵۰، ۱:۸۰ و ۱:۱۰۰ مشاهده شده است [۳۶، ۳۷، ۳۲-۳۷]. مشخصات مکانیکی لوله های پی وی سی مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

$$S = \frac{6}{5} \frac{\Delta V_c}{\pi B^2} \quad (۱)$$

در این رابطه S عمق فرونشست، ΔV_c حجم فرونشست و B قطر شمع می باشد. رابطه ارائه شده هر چند بصورت تئوری صحیح است اما بدلیل آنکه شعاع فرونشست اطراف شمع تحت اثر بارگذاری جانبی به ندرت به قطر شمع می رسد در عمل کاربرد زیادی ندارد. همچنین باید توجه داشت که در بارگذاری های یک طرفه شعاع فرونشست ایجاد شده در جلو و پشت شمع یکسان نیست.

تاثیر تغییرات فرکانس بارگذاری و طول مدفون شمع در خاک ماسه ای متراکم و سست بر فرونشست اطراف شمع تحت اثر بارگذاری سیکلی به همراه تغییر ظرفیت باربری استاتیکی شمع قبل و بعد از تجربه بارگذاری سیکلی به طور جامع مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش با اعمال بار سیکلی یک طرفه در سه فرکانس بارگذاری مختلف روی سه نمونه شمع با طول های مدفون متفاوت در ماسه متراکم و سست، هندسه فرونشست اطراف شمع و ظرفیت باربری استاتیکی در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رابطه ارائه شده توسط سایر پژوهشگران جهت برازش داده های فرونشست بر زمان می باشد و امکان تخمین فرونشست بر اساس تعداد سیکل رخ داده وجود ندارد. در این پژوهش با تغییر پارامتر زمان به پارامتر تعداد سیکل و کالیبره نمودن ضرایب، امکان تخمین مقدار فرونشست بر اساس تعداد سیکل فراهم شده است.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- خاک مورد استفاده

پی سازه های توربین های بادی در محدوده وسیعی از ماسه های متراکم تا رس های سخت و سنگ ها نصب می شوند. به عنوان نمونه، لایه های خاک زیر دریای شمال از نوع ماسه است [۲۹]. در این پژوهش اندرکنش خاک از نوع ماسه با شمع مانند بسیاری از محققان در نظر گرفته شده است [۳۰-۳۲].

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر ماسه فیروز کوه می باشد که دانه بندی آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. مشخصات ماسه در جدول ۱ ارائه شده که در طبقه بندی سیستم متحد به عنوان ماسه بد دانه بندی شده (SP) شناخته می شود.

جدول ۲. مشخصات لوله پی وی سی مورد استفاده

Table 2. Specifications of the PVC pipe used

قطر خارجی B (mm)	ضخامت (mm)	سختی EI (kN.m ²)	وزن (N/m)
۶۳	۲/۶۳	۰/۶۸	۸/۶

جدول ۳. پارامترهای برشی ماسه فیروزکوه مورد استفاده

Table 3. Shear parameters of the Firoozkuh sand used

مدول یانگ E _s (MPa)	زاویه اصطکاک φ داخلی (°)	چگالی نسبی D _r (%)	وزن مخصوص γ _s (kN/m ³)
۱۶/۴	۳۳	۱±۲۴	۱۳/۸
۴۰	۴۱/۵	۱±۹۷	۱۵

۲-۳- دستگاه و بارگذاری شمع

دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه جهت شبیه سازی شمع تحت اثر بار جانبی سیکلی شامل سیستم بارگذاری، مخزن خاک، دستگاه بارش، سیستم قرائت داده و ترمینال خروجی است که در شکل ۴ نمایش داده شده است. دستگاه بارگذاری تشکیل شده از موتور کنترل^۱، پیچ ساچمه ای^۲، ریل، واگن، میز به همراه پیچ های نگهدارنده و نیرو سنج از نوع S شکل و با دقت ۲/۵ N است. بار توسط موتور کنترلی به همراه نیروسنج در ارتفاع ثابت ۳۵۰ mm (e = 5.5 B) از سطح خاک به صورت سیکلی و جانبی به شمع اعمال شده است. محققان مختلفی فاصله بین بارگذاری جانبی تا سطح خاک را در حدود ۲ تا ۲۵ برابر قطر شمع که در سازه های توربین های بادی در دریا ها تحت اثر بار جانبی باد و موج قرار گرفته اند، پیشنهاد کرده اند [۳۸]. در این پژوهش مخزن خاک به طول ۱۲۰۰ mm در عرض ۶۰۰ و ارتفاع ۱۰۰۰ mm با توجه به قطر شمع و حذف تاثیرات شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. جهت حذف تاثیرات شرایط مرزی در مدل های آزمایشگاهی در جهت بارگذاری فاصله بین شمع و دیواره مخزن بین ۸ تا ۱۲ برابر قطر شمع و در جهت عمود بر بارگذاری فاصله بین شمع و دیواره ۳ تا ۴ برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است [۳۹]. برای رسیدن به تراکم مورد نظر در خاک مورد استفاده از دستگاه بارش استفاده شده که شرح کامل آن در پژوهش دیگری ارائه شده است [۴۰، ۴۱]. با استفاده از دستگاه بارش، ماسه با دو دانسیته نسبی ۲۴٪ و ۹۷٪ در مخزن تهیه شد که معادل وزن مخصوص ۱۳/۸ و ۱۵ kN/m³ می باشد. سایر پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشگاه در جدول ۳ آورده شده است. جهت اندازه گیری تغییر نشست اطراف شمع و جابجایی های شمع از حسگرهای الکتریکی LVDTs^۳ (با دقت ۰/۲ mm) استفاده شده است.

1. Servo Motor
2. Ball Screw
3. Linear Variable Displacement Transducers

۲-۴- نحوه انجام آزمایش

با استفاده از دستگاه بارش، مخزن به صورت لایه به لایه تا تراز کف شمع پر از ماسه می شود. پس از استقرار شمع پر کردن مخزن با کنترل قائم بودن شمع ادامه می یابد. بعد از پر شدن مخزن، صفحه و پیچ های نگهدارنده دستگاه بارگذاری نصب و کنترل موتور روی آن مستقر می گردد. بعد از آن نیرو سنج، سنسورهای اندازه گیری تغییر مکان جانبی و نشست خاک اطراف شمع نصب می شود و بارگذاری سیکلی به شمع اعمال می شود. مشخصات بارگذاری سیکلی یک طرفه با نسبت های بدون بعد ξ_b و ξ_e تعریف می شود، به عبارت دیگر [۳۳، ۳۸].

$$\xi_b = (\text{ظرفیت باربری استاتیکی}) / (\text{حداکثر نیرو})$$

$$\xi_e = (\text{حداکثر نیرو}) / (\text{حداقل نیرو})$$

در این پژوهش نسبت های بارگذاری ۰/۴ و صفر ($\xi_b = ۰$ و $\xi_e = ۰$) با تعداد ۵۰۰۰ سیکل در سه فرکانس بارگذاری ۰/۷، ۰/۱۴ و ۰/۲۸ Hz استفاده شده است. فرکانس بارگذاری سیکلی در خاک ها بین صفر تا ۱ Hz طبقه بندی شده است [۴۲، ۴۳]. فرکانس بارگذاری که در طول عمر سازه های توربین بادی رخ می دهد معمولاً بین ۰/۵ تا ۰/۲ Hz [۴۴] و حداکثر صفر تا ۰/۵ Hz [۴۵] گزارش شده است. به عنوان نمونه فرکانس بارگذاری سازه های توربین بادی تحت اثر امواج دریا، برابر ۰/۱۰۶ Hz در آزمون های آزمایشگاهی شمع تحت اثر بارگذاری سیکلی جانبی انتخاب شده است [۴۶]. در پژوهش حاضر ۲۴ آزمایش استاتیکی و سیکلی انجام شده و هر آزمایش با یک کد بصورت L*F*H و یا L*F*L نامگذاری شده است. عدد بعد از L و f به ترتیب نشان دهنده طول مدفون شمع به سانتی متر (cm) و فرکانس بارگذاری بر حسب هرتز (Hz) می باشد. در انتها حرف L و H نشان دهنده تراکم خاک کم و یا زیاد مطابق جدول شماره ۳ می باشد. به عنوان مثال آزمایش با کد L40F0.14L نشان دهنده انجام آزمایش با شمع به طول مدفون ۴۰ cm، فرکانس بارگذاری ۰/۱۴ Hz در خاک ماسه ای

جدول ۴. لیست آزمایش ها

Table 4. List of tests

ردیف	کد آزمایش	طول شمع مدفون L (m)	چگالی نسبی D _r (%)	فرکانس f (Hz)	نسبت بارگذاری β _g
۱	L40F0.28H	۰/۴	۹۷	۰/۲۸	۰/۴
۲	L40F0.14H	۰/۴	۹۷	۰/۱۴	۰/۴
۳	L40F0.07H	۰/۴	۹۷	۰/۰۷	۰/۴
۴	L600F0.28H	۰/۶	۹۷	۰/۲۸	۰/۴
۵	L60F0.14H	۰/۶	۹۷	۰/۱۴	۰/۴
۶	L60F0.07H	۰/۶	۹۷	۰/۰۷	۰/۴
۷	L80F0.28H	۰/۸	۹۷	۰/۲۸	۰/۴
۸	L80F0.14H	۰/۸	۹۷	۰/۱۴	۰/۴
۹	L80F0.07H	۰/۸	۹۷	۰/۰۷	۰/۴
۱۰	L40F0.28L	۰/۴	۲۴	۰/۲۸	۰/۴
۱۱	L40F0.14L	۰/۴	۲۴	۰/۱۴	۰/۴
۱۲	L40F0.07L	۰/۴	۲۴	۰/۰۷	۰/۴
۱۳	L60F0.28L	۰/۶	۲۴	۰/۲۸	۰/۴
۱۴	L60F0.14L	۰/۶	۲۴	۰/۱۴	۰/۴
۱۵	L60F0.07L	۰/۶	۲۴	۰/۰۷	۰/۴
۱۶	L80F0.28L	۰/۸	۲۴	۰/۲۸	۰/۴
۱۷	L80F0.14L	۰/۸	۲۴	۰/۱۴	۰/۴
۱۸	L80F0.07L	۰/۸	۲۴	۰/۰۷	۰/۴
۱۹	L40H	۰/۴	۹۷	استاتیکی	استاتیکی
۲۰	L60H	۰/۶	۹۷	استاتیکی	استاتیکی
۲۱	L80H	۰/۸	۹۷	استاتیکی	استاتیکی
۲۲	L40L	۰/۴	۲۴	استاتیکی	استاتیکی
۲۳	L60L	۰/۶	۲۴	استاتیکی	استاتیکی
۲۴	L80L	۰/۸	۲۴	استاتیکی	استاتیکی

با چگالی نسبی ۲۴٪ است. لیست آزمایشات انجام شده در جدول شماره ۴ ارائه شده است. قبل از انجام آزمایش های سیکلی، آزمایش استاتیکی جهت تعیین ظرفیت باربری استاتیکی شمع ها انجام شده است. ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی بر اساس نمودار نیرو-جابجایی زمانی که تغییر مکان شمع به یک دهم قطر می رسد تعیین شده است [۲۷]. پس از بارگذاری سیکلی، بارگذاری استاتیکی تا گسیختگی انجام شده است.

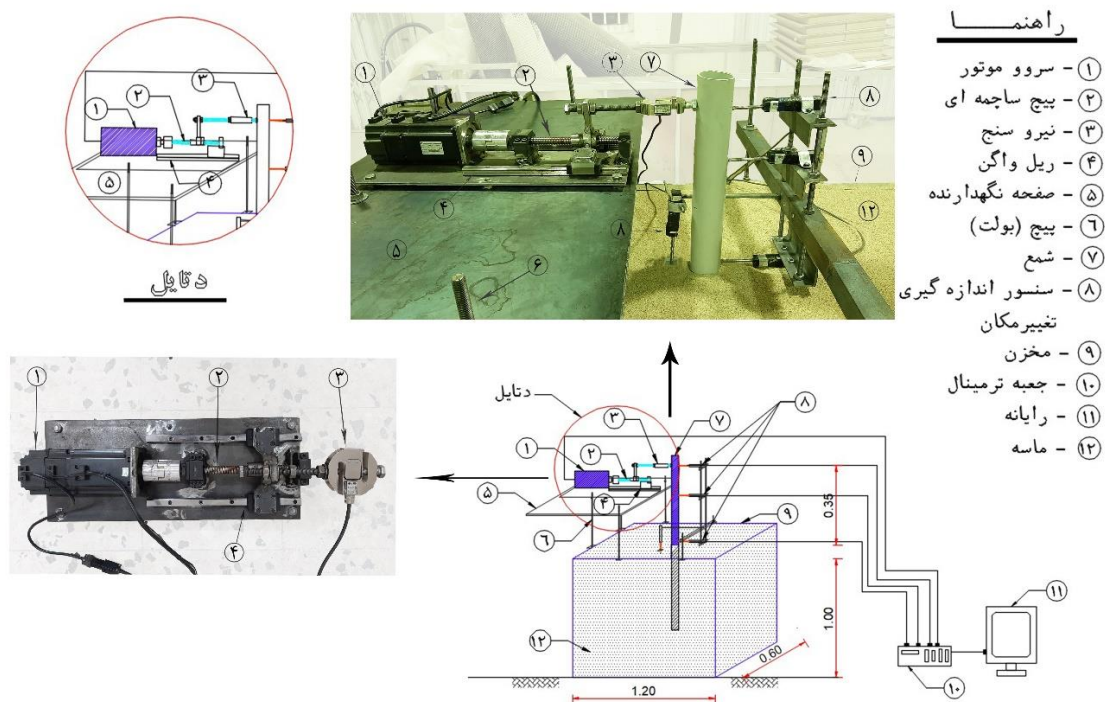
جهت به حداقل رساندن اثر مقیاس در آزمایش های کوچک مقیاس و اطمینان از رفتار مدل آزمایشگاهی که نمایانگر مدل واقعی باشد، لازم است پارامترهای بکار رفته از تحلیل ابعادی تبعیت کنند. پارامترهای مورد استفاده در مقیاس آزمایشگاهی و واقعی مطابق جدول ۵، در جدول ۶ ارائه شده است. نسبت مقیاس مورد استفاده در این پژوهش ۶۰ در نظر گرفته شده است.

۲-۵- تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی برای کمیت های فیزیکی در جدول ۵ ارائه شده است [۲۷، ۴۷]. در جدول ۵ فاکتور n ، پارامتر مقیاس^۱ است.

1. Scaling factor

۲-۶- محدودیت آزمایش
یکی از محدودیت های اصلی مطالعه ارائه شده در این مقاله، مربوط به شرایط خاک است. این پژوهش به ارزیابی رفتار شمع ها در خاک ماسه ای پرداخته است که تعداد زیادی از آنها در عمل در این نوع خاک قرار می گیرند،



شکل ۴. طرح و تصویر دستگاه آزمایش

Fig. 4. Scheme and image of the testing device

جدول ۵. تحلیل ابعادی برای مدل‌های آزمایشگاهی در شرایط ۱g [۲۷، ۴۷]

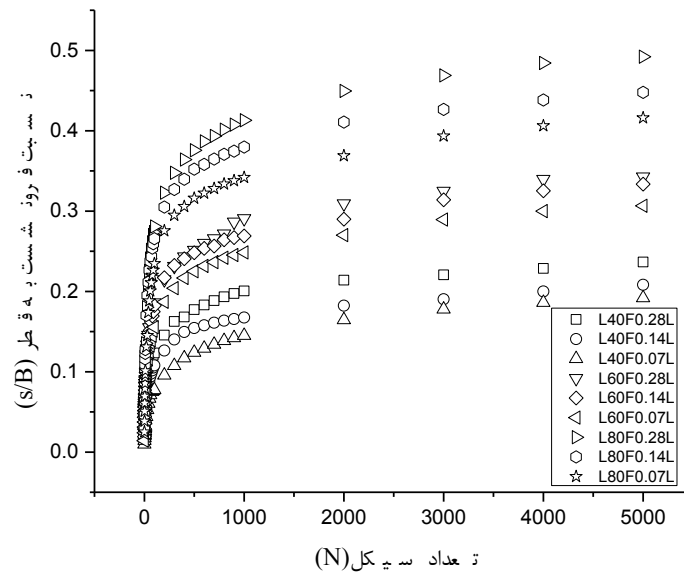
Table 5. Dimensional analysis for laboratory models under 1g conditions

پارامتر	تحلیل ابعاد	ابعاد
طول (L)	$1/n$	$L [m]$
بار (H)	$1/n^3$	$F [N]$
وزن مخصوص (γ)	1	$F/L^3 [N / m^3]$
سختی خمشی (EI)	$1/n^5$	$F * L^2 [N.m^2]$
فرکانس بارگذاری (f)	$n^{1/2}$	$1/T [Hz]$

جدول ۶. اندازه پارامترها در مدل آزمایشگاهی و واقعی

Table 6. Size of parameters in laboratory and real models

پارامتر	مقیاس آزمایشگاهی	مقیاس واقعی
قطر شمع	۰/۰۶۳	۳/۸
طول شمع	۰/۸ ، ۰/۶ ، ۰/۴	۴۸ ، ۳۶ ، ۲۴
سختی شمع	$۶/۸ \times ۱۰^۲$	$۵/۰ \times ۱۰^{۱۱}$
میانگین اندازه ماسه	۰/۷	۰/۷
وزن مخصوص ماسه	۱۳/۸ ، ۱۵	۱۳/۸ ، ۱۵
نیروی افقی	۰~۹۰	$۰ \sim ۱/۹ \times ۱۰^۷$
فاصله نیرو از سطح خاک	۰/۳۵	۲۱
فرکانس بارگذاری	۰/۰۵~۰/۳	$۰/۰۱ \sim ۰/۰۴$



شکل ۵. نسبت فرونشست ماسه اطراف شمع در برابر تعداد سیکل در خاک دانه‌ای سست

Fig. 5. Ratio of sand subsidence around the pile versus the number of cycles in loose granular soil

نسبت فرونشست به قطر (S/B) در برابر تعداد سیکل نمایش داده شده است.

با توجه به نتایج ملاحظه می‌گردد با افزایش طول مدفون شمع میزان فرونشست افزایش یافته که دلیل آن افزایش میزان بار وارده به شمع می‌باشد. در هر مرحله افزایش فرکانس بارگذاری در هر شمع از ۰/۰۷ به ۰/۱۴ Hz و همچنین از ۰/۱۴ به ۰/۲۸ Hz، افزایش مقدار عمق فرونشست را به طور میانگین در حدود ۱۰٪ نشان داده است. مقدار افزایش عمق فرونشست در شمع با عمق مدفون ۸۰۰ mm، کمتر از ۱۰٪ و در شمع با عمق مدفون ۴۰۰ mm، بیشتر از ۱۰٪ اندازه‌گیری شده است. لذا تغییر در فرکانس بارگذاری، تغییراتی در میزان فرونشست ایجاد کرده به گونه‌ای که فرکانس کوچکتر، فرونشست کمتری ایجاد کرده است اما این میزان تغییرات در شمع‌های کوتاه بیشتر از شمع‌های بلند می‌باشد. به بیان واضح‌تر تغییر در فرکانس بارگذاری، تأثیر بیشتری در شمع‌های کوتاه نسبت به شمع‌های بلند دارد. بیشینه میزان فرونشست در سیکل‌های ابتدایی رخ داده به گونه‌ای که بیش از ۶۰٪ میزان فرونشست در ۲۰۰ سیکل ابتدایی و ادامه میزان فرونشست در ۴۸۰۰ سیکل بعد از آن رخ می‌دهد. همچنین میزان فرونشست در ۱۰ سیکل ابتدایی بیش از ۲۰٪ فرونشست نهایی اندازه‌گیری شده است.

۳-۲- توسعه فرونشست در بستر زمان

محققین زیادی تلاش نمودند میزان عمق فرونشست در اثر آبستگي

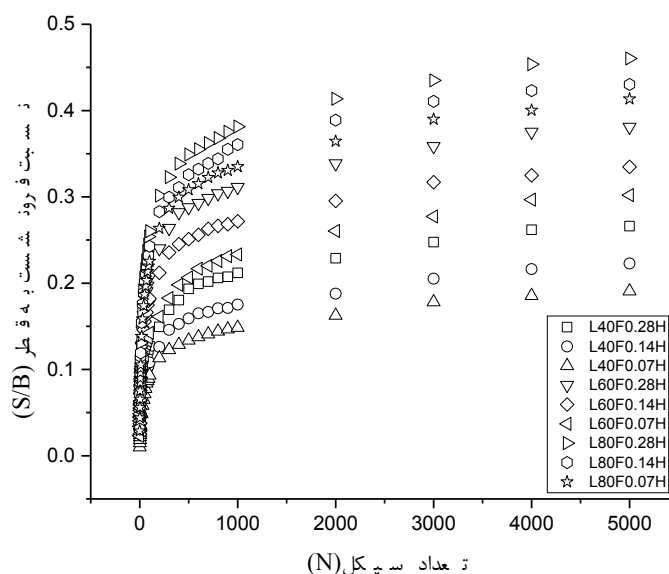
در حالی که برخی از تک‌شمع‌ها در خاک رسی اجرا می‌شوند [۶].

برای ساده‌تر شدن آزمایش، آب به‌طور کامل از آزمایش حذف شد. اگر آب حضور داشت، تخلیه از طریق منافذ بین دانه‌ها نقشی مهم در چگونگی تأثیر نرخ بارگذاری بر حرکات ماسه ایفا می‌کرد [۴۸]. این تأثیر عمدتاً به دلیل افزایش فشار منفذی با هر سیکل بارگذاری است. در ماسه‌های ریز که تحت ارتعاشات با شدت قابل توجه قرار می‌گیرند، افزایش موقتی فشار منفذی باعث کاهش قابل توجه تنش‌های مؤثر خواهد شد. این موضوع ممکن است باعث افزایش تحرک ذرات ماسه شود و به نرخ‌های توسعه بالاتر و همچنین ابعاد نهایی بزرگ‌تر برای فرونشست ماسه و جریان‌های همرفتی منجر شود، در مقایسه با آنچه در این مقاله ارائه شده است. علاوه بر این، ذرات ماسه احتمالاً تحت تأثیر اثر شستشوی آب قرار گیرند که حرکات آن‌ها را بسیار پیچیده‌تر خواهد کرد [۴۹]. برخی پژوهشگران معتقد هستند که آزمایش‌هایی که بر روی ماسه خشک انجام شده‌اند نتایج مشابهی با ماسه اشباع دارند، زیرا فشار آب در ماسه اشباع به سرعت کاهش می‌یابد [۵۰].

۳- نتایج آزمایشات و بحث

۳-۱- فرونشست اطراف شمع

شمع در طول‌های مختلف در ماسه متراکم و سست تحت اثر بارگذاری با سه فرکانس مختلف قرار داده شده که نتایج فرونشست ماسه اطراف شمع در حالت ماسه سست و ماسه متراکم به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ برحسب



شکل ۶. نسبت فرونشست ماسه اطراف شمع در برابر تعداد سیکل در خاک دانه‌ای متراکم

Fig. 6. Ratio of sand subsidence around the pile versus the number of cycles in dense granular soil

$$\frac{S}{S_e} = 1.07 \left\{ 1 - \exp \left[-2.84 \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.41} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\frac{S}{S_e} = 1.04 \left\{ 1 - \exp \left[-2.92 \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.40} \right] \right\} \quad (4)$$

در پایه پل‌های واقع در رودخانه‌ها را در گذر زمان تعیین نمایند و در این خصوص روابطی را ارائه نموده‌اند. به عنوان نمونه از رابطه (۲) که ابتدا برای آبستگي اطراف شمع ارائه شده [۵۱-۵۳]، به منظور ارزیابی عمق فرونشست می‌توان استفاده نمود [۴۹]. به عبارتی بر اساس مطالعات انجام شده از این تابع می‌توان برای برازش داده‌های فرونشست به صورت توسعه زمانی استفاده نمود.

مقادیر T_e تعیین شده به همراه میزان فرونشست (S_e) در جدول ۷ ارائه شده است.

در شکل ۷ و ۸ معادلات شماره (۳) و (۴) که تابع زمانی فرونشست در ماسه شل و متراکم هستند بر اساس داده‌های شمع تحت اثر بارجانبی با طول‌ها و فرکانس بارگذاری مختلف ترسیم شده و ضریب R^2 نیز برای هر دو معادله محاسبه گردیده ($R^2=0.99$) که بیانگر تطابق قابل قبول داده‌های آزمایشگاهی با رابطه ارائه شده است.

در پژوهش پیشین ضرایب a ، C و n به ترتیب ۱/۰۸، ۲/۵۱ و ۰/۲۴ گزارش شده است [۴۹]. نزدیکی این اعداد به ضرایب بدست آمده توسط این پژوهش نشان دهنده مدل‌سازی صحیح و تاکید بر عدم تاثیر فرکانس بارگذاری در این رابطه می‌باشد و اختلاف آن مربوط به نوع دانه بندی

$$\frac{Y}{Y_e} = a \left\{ 1 - \exp \left[-C \left(\frac{t}{T_e} \right)^n \right] \right\} \quad (2)$$

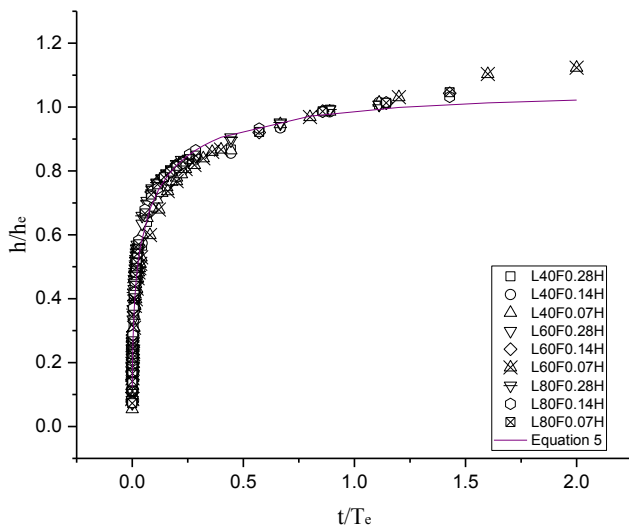
در این رابطه Y پارامتر مورد اندازه‌گیری، t زمان، T_e زمان مشخصه، Y_e پارامتر مورد اندازه‌گیری در زمان مشخصه می‌باشد. همچنین پارامترهای a ، C و n ضرایبی هستند که بر پایه برازش داده‌ها تعیین می‌گردند. دو پارامتر T_e و Y_e بر اساس روش ارائه شده در پژوهش‌های پیشین [۴۹] و داده آزمایشگاهی قابل تعیین است.

رابطه (۲) را می‌توان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به صورت یک رابطه زمانی عمق فرونشست اطراف شمع در ماسه شل و متراکم به صورت رابطه شماره (۳) و (۴) ارائه نمود:

جدول ۷. مقادیر T_e و S_e با استفاده از رابطه (۳)

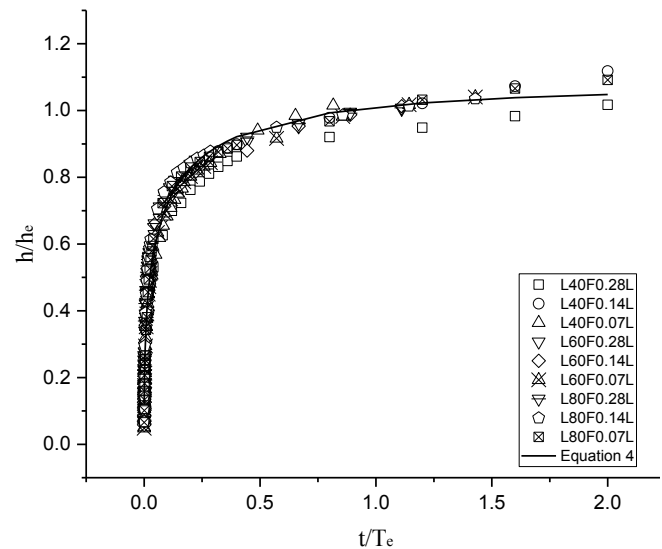
Table 7. Values of T_e and S_e using relation (3)

S_e (mm)	T_e (h)	آزمایش	S_e (mm)	T_e (h)	آزمایش
۱۶/۶۳	۴/۳۸	L40F0.28H	۱۴/۶۵	۲/۴۳	L40F0.28L
۱۳/۸۳	۸/۷۵	L40F0.14H	۱۱/۹۱	۸/۷۵	L40F0.14L
۱۱/۸۵	۱۷/۵	L40F0.07H	۱۱/۷۳	۹/۷۲	L40F0.07L
۲۳/۸۲	۴/۳۸	L60F0.28H	۲۳/۹	۴/۳۸	L60F0.28L
۲۰/۲۲	۶/۸۱	L60F0.14H	۲۰/۷۵	۸/۷۵	L60F0.14L
۱۶/۹۴	۹/۷۲	L60F0.07H	۱۸/۵۶	۱۳/۶۱	L60F0.07L
۲۸/۷۹	۴/۳۸	L80F0.28H	۳۰/۷۵	۴/۳۸	L80F0.28L
۲۶/۲۷	۶/۸۱	L80F0.14H	۲۷/۲۴	۶/۸۱	L80F0.14L
۲۴/۹۰	۱۳/۶۱	L80F0.07H	۲۴/۰۱	۹/۷۲	L80F0.07L



شکل ۸. تابع زمانی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه متراکم

Fig. 8. Dimensionless time function of subsidence depth in dense sand



شکل ۷. تابع زمانی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه سست

Fig. 7. Dimensionless time function of subsidence depth in loose sand

کاربرد فراوان دارد. اما در بحث فرونشست اطراف شمع با توجه به اینکه فرکانس بارگذاری سیکلی متغیر است تعداد سیکل بارگذاری پارامتر اصلی به شمار می‌رود. به عبارتی می‌توان در رابطه (۲) به جای پارامتر زمان از تعداد سیکل بارگذاری که در رابطه (۵) ارائه شده استفاده نمود.

$$\frac{S}{S_e} = a \left\{ 1 - \exp \left[-C \left(\frac{N}{N_e} \right)^n \right] \right\} \quad (5)$$

خاک (اختلاف در اندازه ذرات میانگین) و تراکم خاک می‌باشد. البته نیاز به پژوهش‌های بیشتری می‌باشد که دقیقاً علت تغییر در ضرایب و محدوده صحیح ضرایب مشخص گردد.

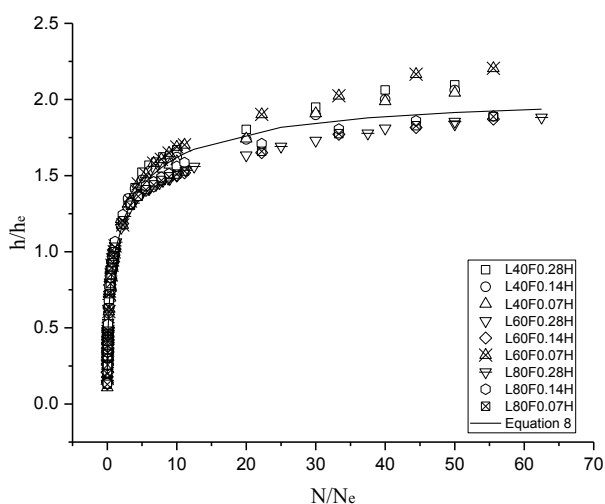
۳-۳- محاسبه فرونشست بر اساس تعداد سیکل

همانگونه که در بخش ۲-۳ بیان شد، رابطه (۲) جهت تعیین عمق آب شستگی اطراف پایه پل و پدیده‌های مشابه آن که زمان متغیر اصلی می‌باشد

جدول ۸. مقادیر N_e و S_e با استفاده از رابطه شماره ۳

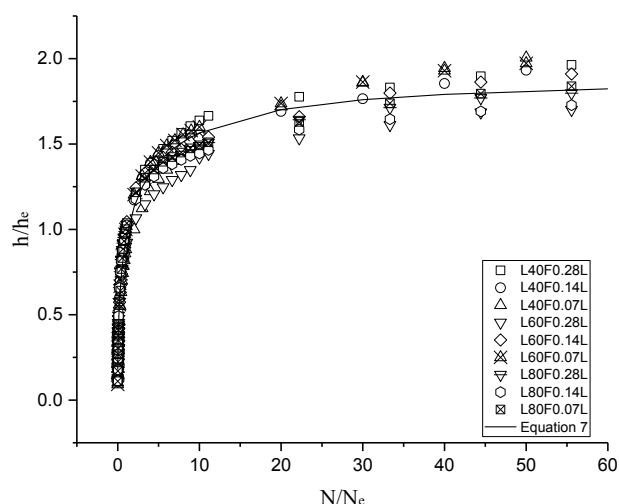
Table 8. Values of N_e and S_e using relation (3)

S_e (mm)	N_e	آزمایش	S_e (mm)	N_e	آزمایش
۸/۰۰	۱۰۰	L40F0.28H	۷/۵۹	۹۰	L40F0.28L
۶/۸۱	۱۰۰	L40F0.14H	۶/۷۹	۱۰۰	L40F0.14L
۵/۸۸	۱۰۰	L40F0.07H	۶/۰۳	۱۰۰	L40F0.07L
۱۳/۰۶	۱۰۰	L60F0.28H	۱۲/۷	۹۰	L60F0.28L
۱۱/۲۷	۹۰	L60F0.14H	۶/۷۹	۱۰۰	L60F0.14L
۸/۶۳	۹۰	L60F0.07H	۹/۷۹	۱۰۰	L60F0.07L
۱۵/۴۱	۸۰	L80F0.28H	۱۷/۳۵	۹۰	L80F0.28L
۱۴/۳۳	۹۰	L80F0.14H	۱۶/۳۳	۹۰	L80F0.14L
۱۳/۸۲	۹۰	L80F0.07H	۱۴/۲۶	۹۰	L80F0.07L



شکل ۱۰. تابع سیکلی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه متراکم

Fig. 10. Dimensionless cyclic function of subsidence depth in dense sand



شکل ۹. تابع سیکلی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه شل

Fig. 9. Dimensionless cyclic function of subsidence depth in loose sand

مقادیر N_e و S_e محاسبه و در جدول ۸ ارائه شده است. در شکل های ۹ و ۱۰ تابع روابط (۶) و (۷) که نشان دهنده تابع سیکلی میزان فرونشست در ماسه سست و متراکم تحت اثر بار جانبی با سه فرکانس بارگذاری مختلف و سه طول مدفون شمع می باشد، ارائه شده است.

جهت تخمین میزان فرونشست در سیکل های مختلف می توان از روابط (۶) و (۷) استفاده نمود. به این منظور نیاز به تعیین N_e و S_e می باشد که با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۸، تعداد سیکل مشخصه، N_e ، که اکثراً معادل ۹۰ و ۱۰۰ بدست آمده را می توان به طور متوسط برابر ۹۵ در نظر گرفت. همچنین برای نشست مشخصه میزان کمینه و بیشینه را باید در نظر گرفت که

بر اساس رابطه (۵) و نتایج آزمایش انجام شده، رابطه بین تعداد سیکل و میزان فرونشست به صورت معادله (۶) و (۷) به ترتیب برای ماسه سست و متراکم خواهد بود.

$$\frac{S}{S_e} = 1.86 \left\{ 1 - \exp \left[-0.70 \left(\frac{N}{N_e} \right)^{0.42} \right] \right\} \quad (۶)$$

$$\frac{S}{S_e} = 2.00 \left\{ 1 - \exp \left[-0.66 \left(\frac{N}{N_e} \right)^{0.40} \right] \right\} \quad (۷)$$

جدول ۹. عمق و شعاع فرونشست در شمع های مختلف به همراه نسبت های آن

Table 9. Depth and radius of subsidence in different piles along with their ratios

I/S	$I=S/\tan(\phi)$	S/L	S/D	I (mm)	S (mm)	آزمایش
۱/۸۶۷	۲۳/۰۹۸	۰/۰۳۸	۰/۵۳۶	۲۸	۱۵	L40F0.28L
۲/۰۰۰	۲۰/۰۱۸	۰/۰۳۳	۰/۵۰۰	۲۶	۱۳	L40F0.14L
۲/۰۸۳	۱۸/۴۷۸	۰/۰۳۰	۰/۴۸۰	۲۵	۱۲	L40F0.07L
۱/۷۰۸	۳۶/۹۵۷	۰/۰۴۰	۰/۵۸۵	۴۱	۲۴	L60F0.28L
۱/۶۱۹	۳۲/۳۳۷	۰/۰۳۵	۰/۶۱۸	۳۴	۲۱	L60F0.14L
۱/۶۳۲	۲۹/۲۵۷	۰/۰۳۲	۰/۶۱۳	۳۱	۱۹	L60F0.07L
۱/۸۷۱	۴۷/۷۳۶	۰/۰۳۹	۰/۵۳۴	۵۸	۳۱	L80F0.28L
۱/۸۵۷	۴۳/۱۱۶	۰/۰۳۵	۰/۵۳۸	۵۲	۲۸	L80F0.14L
۱/۸۰۸	۴۰/۰۳۶	۰/۰۳۳	۰/۵۵۳	۴۷	۲۶	L80F0.07L
۲/۰۵۹	۱۹/۲۱۵	۰/۰۴۳	۰/۴۸۶	۳۵	۱۷	L40F0.28H
۲/۲۱۴	۱۵/۸۲۴	۰/۰۳۵	۰/۴۵۲	۳۱	۱۴	L40F0.14H
۲/۳۳۳	۱۳/۵۶۴	۰/۰۳۰	۰/۴۲۹	۲۸	۱۲	L40F0.07H
۱/۷۰۸	۲۷/۱۲۷	۰/۰۴۰	۰/۵۸۵	۴۱	۲۴	L60F0.28H
۱/۸۵۷	۲۳/۷۳۶	۰/۰۳۵	۰/۵۳۸	۳۹	۲۱	L60F0.14H
۱/۸۹۵	۲۱/۴۷۶	۰/۰۳۲	۰/۵۲۸	۳۶	۱۹	L60F0.07H
۱/۷۹۳	۳۲/۷۷۹	۰/۰۳۶	۰/۵۵۸	۵۲	۲۹	L80F0.28H
۱/۸۵۲	۳۰/۵۱۸	۰/۰۳۴	۰/۵۴۰	۵۰	۲۷	L80F0.14H
۱/۸۴۶	۲۹/۳۸۸	۰/۰۳۳	۰/۵۴۲	۴۸	۲۶	L80F0.07H

بر اساس جدول ۸ مقادیر آنها حدود ۶ و ۱۸ mm به ترتیب می باشد. در نتیجه می توان میزان فرونشست را در سیکل های مختلف تعیین نمود.

۳-۴- عمق و شعاع فرونشست

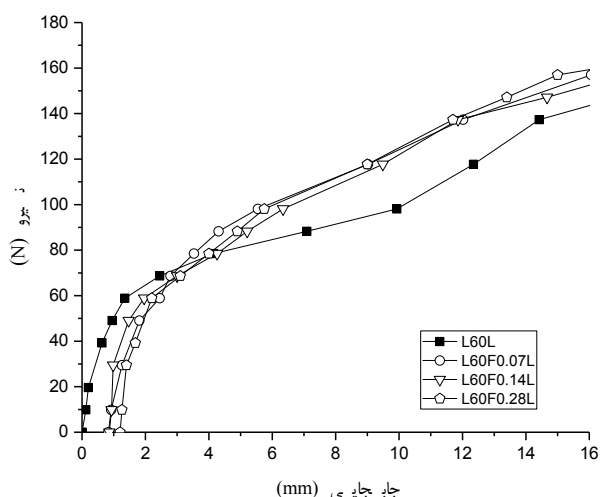
میزان عمق و شعاع فرونشست نهایی اطراف لوله پس از اعمال ۵۰۰۰ سیکل در جدول ۹ ارائه شده است. نسبت میزان عمق فرونشست به قطر، متغیر بوده که به طول مدفون شمع، تراکم خاک و به فرکانس بارگذاری بستگی دارد. نسبت میزان عمق فرونشست به طول مدفون شمع بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ بوده که میانگین آن ۰/۰۳۵ می باشد. به عبارت دیگر میزان عمق فرونشست اطراف شمع حدود ۰/۰۳۵ طول مدفون شمع تخمین زده می شود. نسبت شعاع فرونشست به عمق فرونشست که در ستون آخر جدول ۹ محاسبه شده است، به طور میانگین در خاک های سست ۱/۸۳ و در خاک های متراکم ۱/۹۵ می باشد. به صورت تئوری میزان شعاع فرونشست برابر با میزان عمق فرونشست بخش بر تانژانت زاویه اصطکاک داخلی خاک اطراف شمع می باشد که در جدول ۹ محاسبه و نشان داده شده است [۱۹]. ملاحظه می شود مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر تحلیلی ($I=S/\tan\phi$) اختلاف

قابل توجهی مخصوصا در خاک متراکم دارد. با استفاده از روابط (۶) و (۷) میزان عمق فرونشست تخمین زده می شود و با دانستن نسبت شعاع به عمق فرونشست میزان شعاع قابل تخمین است.

۴- ظرفیت باربری

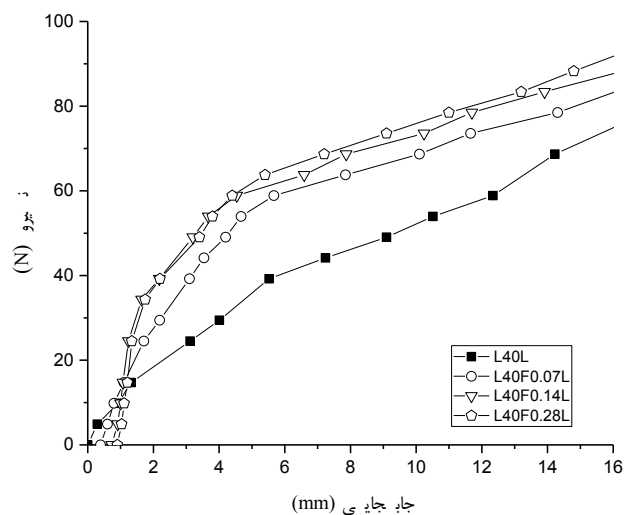
ظرفیت باربری شمع پس از قرار گرفتن تحت اثر ۵۰۰۰ بارگذاری سیکلی، مورد ارزیابی قرار گرفته و با رفتار شمع تحت اثر بار استاتیکی جانبی مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری جانبی، شمع تحت اثر بار جانبی استاتیکی قرار گرفته و میزان مقاومت آن در برابر نیروی جانبی مجدد اندازه گیری شده است. جابجایی افقی شمع تحت اثر بارگذاری جانبی استاتیکی اولیه و ثانویه پس از تجربه ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری و با سه فرکانس مختلف در خاک سست (چگالی نسبی ۰/۲۴) و در خاک متراکم (چگالی نسبی ۰/۹۷) به ترتیب در شکل های ۱۱ تا ۱۳ و ۱۴ تا ۱۶ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ملاحظه می گردد ظرفیت باربری استاتیکی جانبی شمع پس از طی بارگذاری سیکلی با توجه به تراکم خاک، افزایش و یا کاهش می



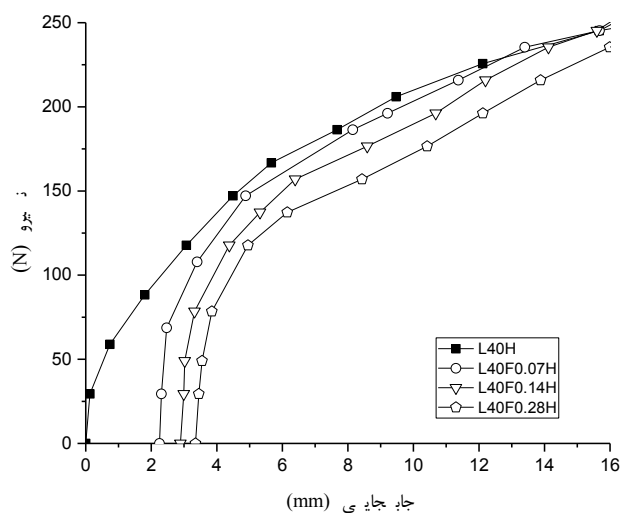
شکل ۱۲. نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۶۰۰ mm در خاک سست

Fig. 12. Force-displacement graph of a pile with 600 mm embedded length in loose soil



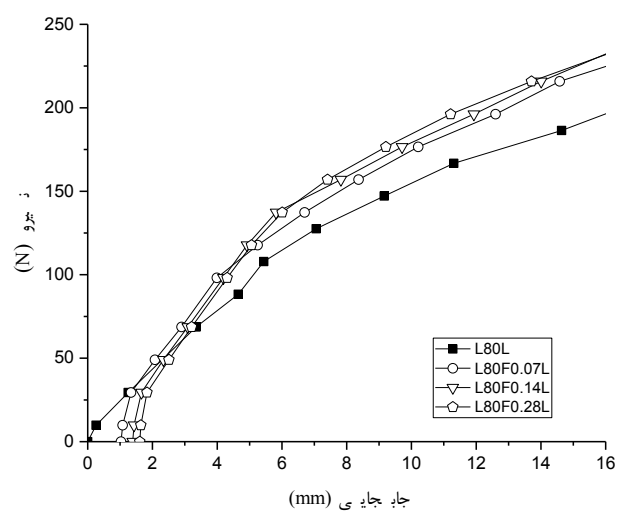
شکل ۱۱. نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۴۰۰ mm در خاک سست

Fig. 11. Force-displacement graph of a pile with 400 mm embedded length in loose soil



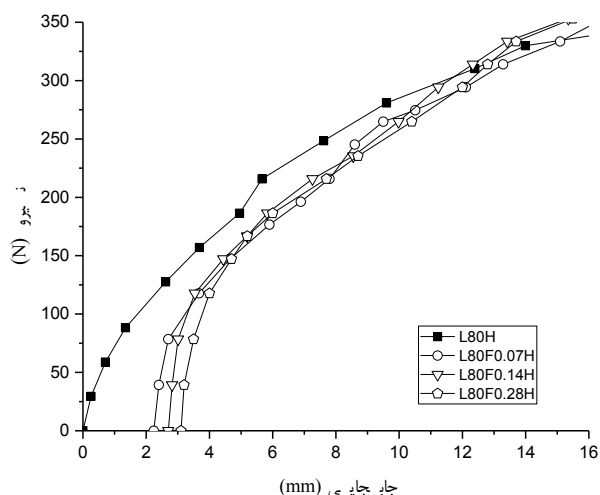
شکل ۱۴. نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۴۰۰ mm در خاک متراکم

Fig. 14. Force-displacement graph of a pile with 400 mm embedded length in dense soil



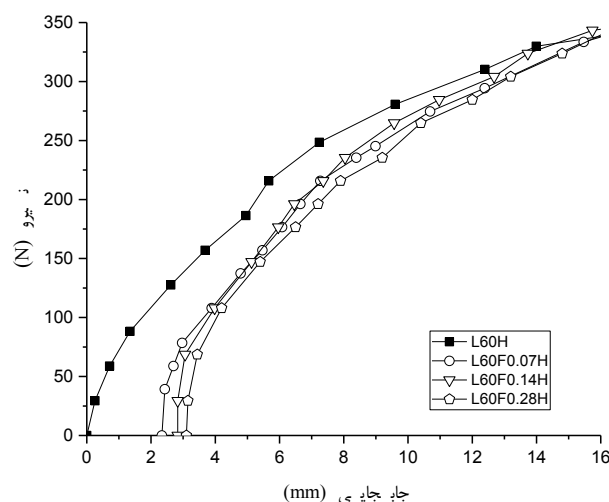
شکل ۱۳. نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۸۰۰ mm در خاک سست

Fig. 13. Force-displacement graph of a pile with 800 mm embedded length in loose soil



شکل ۱۶. نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۸۰۰ mm در خاک متراکم

Fig. 16. Force-displacement graph of a pile with 800 mm embedded length in dense soil



شکل ۱۵. نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۶۰۰ mm در خاک متراکم

Fig. 15. Force-displacement graph of a pile with 600 mm embedded length in dense soil

و در خاک متراکم حدود ۲ برابر عمق فرونشست می باشد. دلیل اصلی این موضوع این است که جریان همرفتی در خاک سست تحت بارگذاری سیکلی باعث متراکم شدن خاک اطراف شمع می گردد و بالازدگی ایجاد نمی شود حال آنکه در خاک های متراکم باز توزیع ذرات خاک رخ می دهد، به نحوی که تراکم خاک اطراف شمع تحت تاثیر قرار گرفته و منجر به بالازدگی خاک در لبه های فرونشست می شود که عمق فرونشست بیشتری را ایجاد می کند.

- بر اساس روابط ارائه شده (۶) و (۷) میزان فرونشست اطراف شمع در سیکل های مختلف را می توان تخمین زد. در این رابطه دو پارامتر سیکل مشخصه و نشست مشخصه به ترتیب ۹۵ و حدود ۶ تا ۱۸ mm بدست آمده است.

- در کلیه آزمایشات پس از اعمال ۵۰۰۰ سیکل، بارگذاری منوتونیک تا رسیدن به گسیختگی ادامه یافت. نتایج نشان می دهد که تغییر در فرکانس بارگذاری، تاثیری بر ظرفیت باربری استاتیکی پس از اعمال بار سیکلی ندارد. در نمودار نیرو - جابجایی پس از اعمال بارهای سیکلی، مقدار نیرو در یک جابجایی معین در فرکانس های بارگذاری مختلف نزدیک به هم (کمتر از ۵٪) و در برخی مواقع هر سه عدد نیرو یکسان ثبت شده است.

- ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی در خاک های سست پس از بارگذاری سیکلی با توجه به متراکم شدن خاک اطراف شمع بین ۱۰٪ تا ۵۰٪ افزایش داشته است که بستگی به ویژگی های بارگذاری و طول مدفون

یابد و در مواردی به ظرفیت باربری حالت اولیه می رسد. در صورتی که خاک سست باشد تحت اثر بارگذاری جانبی سیکلی و حرکت ماسه های اطراف شمع (جریان همرفتی) خاک متراکم تر شده و در نتیجه ظرفیت باربری جانبی افزایش می یابد. در صورتی که خاک متراکم باشد، تراکم ماسه اطراف شمع تغییر یافته و باعث می شود ظرفیت باربری کاهش یافته و یا به ظرفیت باربری قبل از بارگذاری سیکلی برسد.

۵- نتیجه گیری

- با افزایش عمق مدفون شمع میزان فرونشست تحت اثر بار سیکلی در اطراف شمع افزایش می یابد. در حقیقت عمق فرونشست خاک اطراف شمع با طول مدفون آن رابطه مستقیم داشته و به طور میانگین در حدود ۳/۵٪ طول مدفون شمع می باشد. دلیل این پدیده باز توزیع ذرات خاک و جریان همرفتی خاک در اثر ضربات شمع به خاک می باشد.

- افزایش فرکانس بارگذاری باعث افزایش میزان فرونشست اطراف شمع گشته که دلیل آن را می توان افزایش سرعت حرکت دانه های ماسه دانست. با دو برابر کردن فرکانس بارگذاری از ۰/۰۷ به ۰/۱۴ Hz و از ۰/۱۴ به ۰/۲۸ Hz به طور میانگین عمق فرونشست در هر افزایش نسبت به حالت قبل حدود ۱۰٪ افزایش مشاهده شده است.

- شعاع فرونشست با عمق آن رابطه مستقیم دارد بگونه ای که مقدار شعاع فرونشست از لبه شمع به طور میانگین در خاک سست حدود ۱/۸ برابر

of cyclically loaded monopile foundations for offshore wind turbines in heterogeneous sands, *Computers and Geotechnics*, 65 (2015) 266-277.

- [11] M.M. Ahmadi, S. Hadei, S.A. Borzeshi, A. Hokmabadi, Effects of Loading Frequency on Soil–Pile Interaction Using Numerical Nonlinear Three-Dimensional Analyses, *International Journal of Geomechanics*, 25(1) (2025) 04024301.
- [12] D.A. Brown, C. Morrison, L.C. Reese, Lateral load behavior of pile group in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11) (1988) 1261-1276.
- [13] P. Cuéllar, M. Baeßler, W. Rücker, Ratcheting convective cells of sand grains around offshore piles under cyclic lateral loads, *Granular Matter*, 11(6) (2009) 379-390.
- [14] R. Owji, G. Habibagahi, M. Veiskarami, An experimental study on the lateral behavior of piles in unsaturated sand under monotonic, cyclic and post cyclic loading, *Geotechnical and Geological Engineering*, (2024) 1-21.
- [15] P. Cuéllar, S. Georgi, M. Baeßler, W. Rücker, On the quasi-static granular convective flow and sand densification around pile foundations under cyclic lateral loading, *Granular Matter*, 14(1) (2012) 11-25.
- [16] G. Yin, F. Niu, J. Luo, J. Wang, M. Liu, T. Dong, Y. Cao, A. Li, High potential for pile-bearing capacity loss and ground subsidence over permafrost regions across the Northern Hemisphere, *Global and Planetary Change*, 226 (2023) 104156.
- [17] G. Nicolai, L.B. Ibsen, C. O’Loughlin, D. White, Quantifying the increase in lateral capacity of monopiles in sand due to cyclic loading, *Géotechnique Letters*, 7(3) (2017) 245-252.
- [18] P. Truong, B. Lehane, V. Zania, R.T. Klinkvort, Empirical approach based on centrifuge testing for cyclic deformations of laterally loaded piles in sand, *Géotechnique*, 69(2) (2019) 133-145.
- [19] Y. Wang, M. Zhu, W. Gong, G. Dai, H. Lu, B. Wang, Lateral behavior of monopiles considering the effects of sand subsidence and densification under lateral cyclic loading, *Marine Georesources & Geotechnology*, (2021) 1-11.

شمع دارد. حال آنکه در خاک های متراکم با توجه به باز توزیع دانه های خاک اطراف شمع و جریان همرفتی خاک، ظرفیت باربری بین ۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است.

منابع

- [1] M. Dolores Esteban, J.-S. López-Gutiérrez, V. Negro, C. Matutano, F.M. García-Flores, M.Á. Millán, Offshore wind foundation design: some key issues, *Journal of Energy Resources Technology*, 137(5) (2015).
- [2] L.C. Reese, W.R. Cox, F.D. Koop, Analysis of laterally loaded piles in sand, *Offshore Technology in Civil Engineering Hall of Fame Papers from the Early Years*, (1974) 95-105.
- [3] R.E.S. Moss, J.A. Caliendo, L.R. Anderson, Investigation of a cyclic laterally loaded model pile group, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7-8) (1998) 519-523.
- [4] F. Rosquoet, L. Thorel, J. Garnier, Y. Canepa, Lateral cyclic loading of sand-installed piles, *Soils and foundations*, 47(5) (2007) 821-832.
- [5] W. Liao, J. Zhang, J. Wu, K. Yan, Response of flexible monopile in marine clay under cyclic lateral load, *Ocean Engineering*, 147 (2018) 89-106.
- [6] C.N. Abadie, Cyclic lateral loading of monopile foundations in cohesionless soils, University of Oxford, 2015.
- [7] Z. Liu, Y. Zhang, Effect of drainage conditions on monopile soil-pile interaction in sandy seabed, *Ocean Engineering*, 315 (2025) 119826.
- [8] M. Achmus, K. Abdel-Rahman, Y.-S. Kuo, Numerical modelling of large diameter steel piles under monotonic and cyclic horizontal loading, in: *10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, GREECE Rhodes, 2007, pp. 453-459.
- [9] Y.-S. Kuo, M. Achmus, K. Abdel-Rahman, Minimum embedded length of cyclic horizontally loaded monopiles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3) (2012) 357-363.
- [10] I. Depina, T.M.H. Le, G. Eiksund, T. Benz, Behavior

- in German offshore wind farms, in: Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, AA Balkema Publishing, 2005, pp. 383-389.
- [30] P. Tasiopoulou, Y. Chaloulos, N. Gerolymos, A. Giannakou, J. Chacko, Cyclic lateral response of OWT bucket foundations in sand: 3D coupled effective stress analysis with Ta-Ger model, *Soils and Foundations*, 61(2) (2021) 371-385.
- [31] A. Hokmabadi, A. Fakher, B. Fatahi, Full scale lateral behaviour of monopiles in granular marine soils, *Marine Structures*, 29(1) (2012) 198-210.
- [32] M.F. Awad-Allah, N. Yasufuku, A.H. Abdel-Rahman, Cyclic response of wind turbine on piles in unsaturated sand, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 17(3) (2016) 161-176.
- [33] C. LeBlanc, G. Houlsby, B. Byrne, Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading, *Géotechnique*, 60(2) (2010) 79-90.
- [34] R.-p. Chen, Y.-x. Sun, B. Zhu, W.D. Guo, Lateral cyclic pile-soil interaction studies on a rigid model monopile, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 168(2) (2015) 120-130.
- [35] G. Yu, W. Gong, M. Chen, G. Dai, Y. Liu, Prediction and analysis of behaviour of laterally loaded single piles in improved gravel soil, *International Journal of Civil Engineering*, 17(6) (2019) 809-822.
- [36] S. Basack, S. Dey, Influence of relative pile-soil stiffness and load eccentricity on single pile response in sand under lateral cyclic loading, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(4) (2012) 737-751.
- [37] K. Madhusudan Reddy, R. Ayothiraman, Experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(7) (2015) 04015030.
- [38] R.T. Klinkvort, O. Hededal, Lateral response of monopile supporting an offshore wind turbine, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(2) (2013) 147-158.
- [20] H. Ma, J. Yang, L. Chen, Numerical analysis of the long-term performance of offshore wind turbines supported by monopiles, *Ocean Engineering*, 136 (2017) 94-105.
- [21] T. Wichtmann, A. Niemunis, T. Triantafyllidis, Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained cyclic tests with triaxial extension, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(1) (2007) 42-48.
- [22] T. Wichtmann, A. Niemunis, T. Triantafyllidis, On the determination of a set of material constants for a high-cycle accumulation model for non-cohesive soils, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 34(4) (2010) 409-440.
- [23] S.-H. Chong, J.C. Santamarina, Sands subjected to repetitive vertical loading under zero lateral strain: accumulation models, terminal densities, and settlement, *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12) (2016) 2039-2046.
- [24] J.B. Knight, E.E. Ehrichs, V.Y. Kuperman, J.K. Flint, H.M. Jaeger, S.R. Nagel, Experimental study of granular convection, *Physical Review E*, 54(5) (1996) 5726.
- [25] E. Ehrichs, J.K. Flint, H.M. Jaeger, J.B. Knight, S.R. Nagel, G.S. Karczmar, V.Y. Kuperman, Convection in vertically vibrated granular materials, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1747) (1998) 2561-2567.
- [26] M. Hassan, D. Liyanapathirana, W. Fuentes, C. Leo, P. Hu, A review of soil deformation and lateral pressure ratcheting phenomena in integral abutment bridges, *Transportation Geotechnics*, (2024) 101388.
- [27] P. Cuéllar, *Pile Foundations for Offshore Wind Turbines: Numerical and Experimental Investigations on the Behaviour under Short Term and Long-Term Cyclic Loading*, Berlin, Berlin, Germany, 2011.
- [28] L. Li, H. Liu, W. Wu, M. Wen, M.H. El Naggar, Y. Yang, Investigation on the behavior of hybrid pile foundation and its surrounding soil during cyclic lateral loading, *Ocean Engineering*, 240 (2021) 110006.
- [29] K. Lesny, J. Wiemann, Design aspects of monopiles

- response to cyclic lateral loading: laboratory tests, *Géotechnique*, 69(10) (2019) 863-876.
- [47] B. Walz, Der 1g-Modellversuch in der Bodenmechanik-Verfahren und Anwendung, Vortrag zum, 2 (2006) 13-26.
- [48] A. Barari, M. Bagheri, M. Rouainia, L.B. Ibsen, Deformation mechanisms for offshore monopile foundations accounting for cyclic mobility effects, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97 (2017) 439-453.
- [49] J. Li, D. Guan, Y.-M. Chiew, J. Zhang, J. Zhao, Temporal evolution of soil deformations around monopile foundations subjected to cyclic lateral loading, *Ocean Engineering*, 217 (2020) 107893.
- [50] K.O. Abongo, Model Study of the Static and Cyclic Lateral Capacity of Finned Piles, Lehigh University, 2019.
- [51] N.S. Cheng, Y.M. Chiew, X. Chen, Scaling analysis of pier-scouring processes, *Journal of Engineering Mechanics*, 142(8) (2016) 06016005.
- [52] M. Wei, Y.-M. Chiew, D. Guan, Temporal development of propeller scour around a sloping bank, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(5) (2018) 06018005.
- [53] D. Guan, J. Liu, Y.-M. Chiew, Y. Zhou, Scour evolution downstream of submerged weirs in clear water scour conditions, *Water*, 11(9) (2019) 1746.
- [39] S.N. Rao, V. Ramakrishna, M.B. Rao, Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6) (1998) 542-549.
- [40] M. Abdollahi, J. Bolouri Bazaz, Reconstitution of Sand Specimens Using a Rainer System, *International Journal of Engineering*, 30(10) (2017) 1451-1463.
- [41] M. Kazemi, J.B. Bolouri, A curtain traveling pluviator to reconstitute large scale sand specimens, *Geomechanics & engineering*, 14(2) (2018) 131-139.
- [42] P.a.A. Peralta, M., An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads in: *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG)*, 2010, pp. 985-990.
- [43] A. Gotschol, Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung, Universität Kassel, Hessen, Germany, 2002.
- [44] K. Lesny, P. Hinz, Design of monopile foundations for offshore wind energy converters, in: *Contemporary topics in deep foundations*, 2009, pp. 512-519.
- [45] D. Kallehave, C.L. Thilsted, M. Liingaard, Modification of the API py formulation of initial stiffness of sand, in: *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Present and Future*, Society of Underwater Technology, 2012.
- [46] C.N. Abadie, B.W. Byrne, G.T. Houlsby, Rigid pile

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Keshavarz, J. Bolouri Bazaz, Soil subsidence around the pile under lateral cyclic loading in granular soil, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(4) (2025) 551-570.

DOI: [10.22060/ceej.2025.21804.7829](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.21804.7829)



