



## Experimental investigation of flexible pile behavior under lateral cyclic and post cyclic loading in sandy soil

R. Owji, Gh. Habibagahi, M. Veiskarami \*

School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

**ABSTRACT:** Lateral behavior of piles is one of the most challenging design issues. While previous studies have mainly focused on rigid piles, a little attention has been paid to flexible ones. In this study, the behavior of flexible piles under lateral cyclic loading is investigated by experimental tests. For this purpose, a device was designed and commissioned for cyclic loading tests which can generate different types of sinusoidal loads. Measurement was made on the load and displacements during the cyclic loading with a loadcell and Linear Variable Differential Transducer (LVDT). The role of key parameters in cyclic loading including such as the frequency, loading interval, number of cycles, cyclic loading direction and also soil density were investigated. Moreover, post-cyclic loading tests were performed to evaluate piles lateral bearing capacity. Experimental observations showed that under one-way and two-way loadings, the stiffness gradually increases during 100 cycles of loading while under one-way without a complete unloading process, the stiffness starts to decrease and then remains constant. Increasing the frequency from 0.1Hz to 0.2Hz has shown a significant effect in increasing the lateral cyclic resistance. Under one-way loading, the residual force at the pile head increases with increasing the cyclic loading interval.

### Review History:

Received: Apr. 19, 2022

Revised: Jul. 06, 2022

Accepted: Jul. 26, 2022

Available Online: Aug. 09, 2022

### Keywords:

Pile

Cyclic loading

Lateral bearing capacity

Post cyclic

Frequency

### 1- Introduction.

Piles supporting tall buildings, bridges, and wind turbines are often subjected to lateral cyclic loads including wind, wave, and earthquake [1]. Lateral cyclic loads cause to increase of pile head displacements, stiffness reduction of soil, and increase of pore water pressure [2]. The design methods for piles are valid and reliable when they are investigated in the field or in a laboratory. Considering the limitations of test facilities and high costs for large-scale tests, conducting tests on small-scale piles are necessary. API p-y curves are conventional method for designing piles under lateral loading in which cyclic behavior of pile predicts by multiplying the static p-y curve by a correction factor of 0.9 [3]. Arshad and O'Kelly [4] examined the effects of amplitude, frequency, and shape of loading on the response of rigid pile. Comparisons between the symmetric and asymmetric two-way loading showed that asymmetric two-way loading leads to higher pile head rotation. Imam et al., [5] found that the behavior of piles under lateral cyclic loading is significantly influenced by the elastic modulus and section geometry of the pile. The most variations in soil stiffness were observed during the first 30 cycles and after 100 cycles of loading, no increases occurred in lateral force. Review of previous studies shows that the effects of cyclic loading direction on pile response are not fully understood. Therefore, this study aims to evaluate the

lateral behavior of flexible pile under cyclic and post-cyclic loading with different loading direction and frequencies.

### 2- Materials and methods

The soil used in this study was dry silica sand which is classified as a poorly graded sand (SP). The uniformity coefficient ( $C_u$ ) and coefficient of gradation ( $C_g$ ) are 1.67 and 1.2, respectively. Shear strength parameters were determined using the direct shear test, where an inter-particle friction angle and cohesion were 35 degrees and zero, respectively.

In this research, circular steel pile with an outer diameter of 25mm and thickness of 0.6mm were used for loading tests. Moreover, the embedded length of pile was considered 550 mm. Soil box with the size of 900×600×300 mm<sup>3</sup> (height×length×width) was sufficiently large to decrease any boundary effects. The distance between the model pile and wall box should be larger than 10D to avoid side effects [6]. Moreover, a thickness of 5mm was considered as a wall thickness to minimize lateral deflection of soil box during lateral loading tests on the model pile. In order to perform cyclic loading tests with different amplitudes and frequencies, a new displacement-controlled loading device was designed and constructed. This loading system is capable of applying cyclic, post-cyclic, and monotonic loading. A hinged connection was inserted between loading shaft

\*Corresponding author's email: mveiskarami@shirazu.ac.ir





**Fig. 1. Experimental set-up for lateral cyclic loading test**

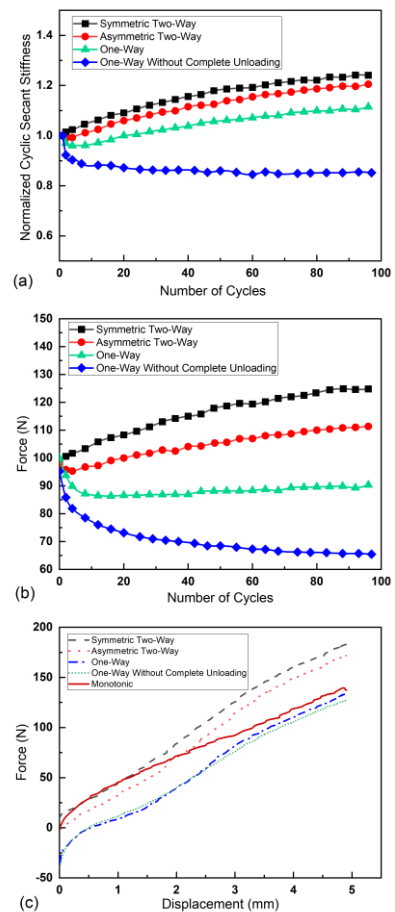
and pile head, allow the pile head to rotate freely. Lateral displacement at pile head was measured using linear variable differential transformer (LVDT) and loadcell with capacity of 1.5 kN was employed to measure lateral force (Figure 1). Dry sand was compacted at layers with thickness of 50mm until the required density was achieved. Properties of cyclic loading including loading direction, frequency, amplitude, and number of cycles were considered in the test program.

### 3- Results and discussion

In this study, the lateral stiffness of the pile-soil system was described by a cyclic secant stiffness. Figure 2 shows influence of cyclic loading directions on lateral response of pile embedded in sand with relative density of 40%. For two-way cyclic loading, stiffness decreased during 10 first cycles and then gradually increased. One-way loading has a considerable effect on lateral capacity and after 10 cycles of loading, lateral force reaches to 90 N. Under two-way loading, the densification of sand particles around the pile leads to an increase of about 25% in the lateral capacity. Residual force induced by cyclic loading can be observed in post-cyclic loading results. These results confirm that the ultimate lateral capacity of the pile under two-way loading is higher compared to one-way loading.

### 4- Conclusions

In this study, lateral behavior of pile under cyclic and post-cyclic loading was investigated by constructing a new loading device. Factors affecting the cyclic loading including frequency, amplitude, and loading direction were comprehensively examined. The results show that under two-way loading, cyclic secant stiffness increases during 100 cycles of loading while under one-way without complete unloading, stiffness remains constant with an increase of cycles. Increase in frequency from 0.1 to 0.2 Hz has a considerable effect on lateral bearing capacity. Moreover, under frequency of 0.05 Hz, residual force induced by cyclic



**Fig. 2. Influence of cyclic loading on lateral response of pile: a) variation of stiffness, b) variation of pile head force, c) post-cyclic loading**

loading leads to reduce of lateral capacity. Under one-way loading, an increase in loading amplitude causes to increase in ultimate lateral capacity and residual force.

### References

- [1] S. Basack, Design recommendations for pile subjected to cyclic load, *Marine Georesources & Geotechnology*, 33(4) (2015) 356-360.
- [2] A. Puech, J. Garnier, Design of piles under cyclic loading: SOLCYP recommendations, John Wiley & Sons, 2017.
- [3] R. Api, Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design, API RP A, 2 (2000).
- [4] M. Arshad, B.C. O’Kelly, Development of a rig to study model pile behaviour under repeating lateral loads, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 14(3) (2014) 54-66.
- [5] A. Faresghoshooni, S. Imam, A. Mahmoodi, Model Testing on the Effects of Section Geometry and Stiffness on the Cyclic Lateral Behavior of Piles in Loose Sand, *International Journal of Civil Engineering*, 19(5) (2021) 563-581.
- [6] M. Khari, K.A. Kassim, A. Adnan, An experimental study on pile spacing effects under lateral loading in sand, *The Scientific World Journal*, 2013 (2013).

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Owji, Gh. Habibagahi, M. Veiskarami, *Experimental investigation of flexible pile behavior under lateral cyclic and post cyclic loading in sandy soil*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(11) (2023) 895-898.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21312.7685](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21312.7685)







## مطالعه آزمایشگاهی عملکرد شمع انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری جانبی سیکلی و پسا‌سیکلی در خاک ماسه‌ای

روزبه اوجی، قاسم حبیب‌آگهی، مهدی ویس‌کرمی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸

### کلمات کلیدی:

شمع

بارگذاری سیکلی

ظرفیت باربری جانبی

پسا‌سیکلی

فرکانس

**خلاصه:** رفتار جانبی شمع‌ها تحت بار سیکلی یکی از چالش برانگیزترین موضوعات در طراحی شمع است. تمرکز عمده تحقیقات انجام شده شمع صلب است و توجه کمی به رفتار شمع‌های انعطاف‌پذیر شده است. همچنین برخی پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد شمع تحت بارگذاری جانبی سیکلی کمتر بررسی شده است. در این پژوهش رفتار شمع انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری جانبی سیکلی در خاک ماسه‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دستگاهی جهت بارگذاری سیکلی شمع طراحی و ساخته شده است که قابلیت اعمال انواع بارگذاری‌های مختلف سینوسی را دارد و با مجهز شدن به حسگرهای جابه‌جایی سنج و نیروسنج، مقادیر نیرو و جابه‌جایی در طی حرکت سیکلی قابل اندازه‌گیری است. پارامترهای موثر در بارگذاری سیکلی شامل فرکانس، دامنه بارگذاری، تعداد سیکل‌ها، جهت بارگذاری سیکلی و همچنین تراکم خاک مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی اثر بارگذاری سیکلی بر ظرفیت باربری جانبی نهایی شمع، تعدادی آزمایش نیز در شرایط بارگذاری پسا‌سیکلی انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه و دو طرفه در طی ۱۰۰ سیکل بارگذاری، سختی به صورت تدریجی افزایش می‌یابد در حالی که در شرایط بارگذاری یک طرفه بدون باربرداری کامل سختی ابتدا کاهش و سپس ثابت می‌ماند. افزایش فرکانس از ۰/۱ Hz به ۰/۲ Hz تاثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت باربری جانبی سیکلی دارد. تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه، با افزایش دامنه بارگذاری، نیروی پسماند ایجاد شده در سر شمع افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

خاک اطراف آن است. به گونه‌ای که برای شمع‌های صلب، مقاومت برشی خاک معیار طراحی قرار می‌گیرد و خاک قبل از شمع دچار گسیختگی می‌شود در حالی که شمع‌های بلند رفتار انعطاف‌پذیر به همراه خمش نشان می‌دهند و معمولاً با تشکیل مفصل پلاستیک به حالت گسیختگی می‌رسند [۴]. با توجه به جهت بارهای اعمال شده به شمع، بارگذاری جانبی سیکلی به صورت یک طرفه یا دو طرفه تقسیم‌بندی می‌شود که بستگی دارد حداکثر و حداقل بار در یک جهت یا هر دو جهت باشند. بارگذاری سیکلی دو طرفه نیز به دو دسته متقارن و نامتقارن تقسیم‌بندی می‌شود. در صورتی که میزان نوسان شمع در هر دو جهت برابر باشد به عنوان بارگذاری سیکلی دو طرفه متقارن شناخته می‌شود در غیر این صورت نامتقارن خواهد بود [۵]. اگر چه الگوی غالب بارگذاری‌های سیکلی در طبیعت به صورت اتفاقی می‌باشند اما جهت طراحی‌های مهندسی به صورت بار سینوسی ایده‌آل‌سازی می‌شوند و به هر دو روش نیرو-کنترل یا جابه‌جایی-کنترل قابل اعمال است.

رفتار شمع‌ها تحت بارهای جانبی معمولاً توسط منحنی‌های  $p-y$

شمع‌هایی که اغلب جهت تقویت فونداسیون سازه‌های بلند مرتبه، پایه‌های پل و توربین‌های بادی استفاده می‌شوند، تحت اثر زلزله، باد و امواج دریا در معرض بارهای سیکلی جانبی قرار می‌گیرند [۱]. بارهای جانبی سیکلی باعث افزایش تجمع جابه‌جایی‌های سر شمع، کاهش سختی خاک و افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شوند و بایستی اثر آن‌ها در طراحی جانبی شمع لحاظ گردد [۲]. روش‌های طراحی شمع تحت بار سیکلی در صورتی معتبر و قابل اعتماد هستند که به صورت میدانی یا آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته باشند. با توجه به اینکه آزمایش‌های میدانی پرهزینه و زمان‌بر هستند، انجام آزمایش بر مدل‌های با مقیاس کوچک ضرورت دارد. اگرچه به صورت متداول طراحی بر اساس هر دو ظرفیت جانبی و قائم شمع‌ها انجام می‌شود اما ظرفیت جانبی عامل اصلی تاثیرگذار در طراحی ابعاد شمع است [۳]. ظرفیت باربری شمع‌ها تحت بار جانبی وابسته به سختی خمشی شمع و

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mveiskarami@shirazu.ac.ir



ارزیابی می‌شود. در این روش شمع به صورت تیر الاستیک در نظر گرفته می‌شود و اثر خاک اطراف آن به صورت فنرهایی با ویژگی نیرو-جابه‌جایی غیرخطی لحاظ می‌گردد. منحنی  $p-y$  ارائه شده توسط آیین‌نامه API [۶] متداول‌ترین روش جهت طراحی شمع‌ها تحت بار جانبی است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های روش API برای خاک‌های دانه‌ای آن است که با اعمال ضریب کاهش ۰/۹ در منحنی  $p-y$  استاتیکی سعی در پیش‌بینی رفتار سیکلی شمع دارد. در حالی که رفتار شمع‌ها تحت بارگذاری جانبی سیکلی به پارامترهای بار سیکلی شامل تعداد سیکل‌ها، فرکانس و دامنه بارگذاری وابسته است [۸ و ۷]. لانگ و ونست در سال ۱۹۹۴ با انجام ۳۴ آزمایش میدانی بر روی شمع‌های انعطاف‌پذیر با اندازه‌های مختلف نشان دادند که کاهش سختی تحت بارگذاری سیکلی تابعی از دانسیته خاک، روش نصب شمع و نسبت دامنه بارگذاری می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه بیشتر از بارگذاری دو طرفه است [۹]. لبلانس و همکاران با انجام تعدادی تست آزمایشگاهی بر روی شمع صلب در خاک ماسه‌ای نشان دادند که سختی خاک - شمع تحت بارگذاری سیکلی جانبی افزایش می‌یابد و این افزایش به تراکم نسبی خاک وابسته است [۱۰]. این افزایش سختی در تناقض با مدل  $p-y$  سیکلی ارائه شده در API است. فرک و آکس تاثیر دامنه بارگذاری سیکلی را بر رفتار جانبی شمع صلب مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در ۱۰۰ سیکل اول بارگذاری بیشترین تجمع جابه‌جایی رخ می‌دهد و مربوط به حالت بارگذاری دو طرفه نامتقارن است. کمترین میزان تراکم خاک اطراف شمع در این حالت ایجاد می‌شود و منجر به افزایش جابه‌جایی سر شمع می‌گردد [۱۱]. درویشی و همکاران به بررسی تاثیر بارگذاری سیکلی و استاتیکی شمع صلب در شرایط سانتریفیوژ پرداختند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که بیشترین تغییرات سختی مربوط به ۱۰ سیکل اول است و در حالت بارگذاری سیکلی دو طرفه هر دو روند کاهش و افزایشی در سختی مشاهده شده است، در حالی که در بارگذاری یک طرفه هیچ گونه افزایشی در سختی ایجاد نشده است. همچنین سختی سیستم خاک-شمع به شدت تحت تاثیر دامنه بارگذاری سیکلی است [۱۲]. ارشاد و اکلای تاثیر دامنه بارگذاری، فرکانس و شکل موج را بر رفتار جانبی سیکلی شمع صلب مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش بارگذاری به کمک وزنه‌هایی که در هر دو طرف شمع متصل شده، از طریق فنر و سامانه کنترل کننده موتور بارهای تناوبی به کمک کابل کششی به شمع منتقل می‌شود. آن‌ها دریافتند که میزان دوران شمع در حالت بارگذاری دو طرفه نامتقارن نسبت به دو طرفه متقارن بیشتر است

و فرکانس بارگذاری تاثیر در میزان دوران ایجاد شده ندارد [۷]. هانگ و همکاران به بررسی تاثیر بارگذاری سیکلی جانبی یک طرفه بر رفتار شمع نیمه صلب در خاک رس نرم به کمک مدل سانتریفیوژ پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که در پایان بارگذاری سیکلی، جابه‌جایی پلاستیک سرشمع حدوداً ۹۰٪ کل جابه‌جایی بوده است و همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و کاهش سختی خاک رفتار شمع از حالت انعطاف‌پذیر به صلب تغییر یافته است [۱۳]. امام و همکاران به بررسی تاثیر شکل مقطع و مدول الاستیسته شمع بر رفتار جانبی شمع انعطاف‌پذیر در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری سیکلی دو طرفه متقارن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بار جانبی سیکلی به طور قابل توجهی تحت تاثیر شکل و مدول الاستیسته شمع است و پس از ۱۴۵ سیکل بارگذاری، میزان سختی نسبت به سیکل اول ۱/۴ تا ۱/۸۵ برابر افزایش یافته است. همچنین بیشترین میزان تغییرات سختی سیستم شمع-خاک در طی ۳۰ سیکل اول ایجاد می‌شود در حالی که پس از ۱۰۰ سیکل، تغییرات نیرو و سختی ناچیز می‌باشد [۱۴]. ونگ و همکاران با انجام آزمایش‌هایی با مقیاس واقعی رفتار شمع نیمه صلب را تحت بارگذاری سیکلی در خاک رس سست بررسی نمودند. دو نوع بارگذاری سیکلی به صورت یک طرفه و دو طرفه متقارن بر روی شمع‌ها انجام شد. آن‌ها دریافتند که بارگذاری سیکلی دو طرفه نسبت به یک طرفه باعث می‌شود سختی با سرعت بیشتری کاهش یابد و میزان کاهش مقاومت تحت بارگذاری دو طرفه بیشتر است. در حالی که تجمع تغییر شکل‌های سر شمع در حالت یک طرفه بیشتر است [۱۵]. ژانگ و همکاران با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی رفتار جانبی شمع انعطاف‌پذیر در خاک رس نرم پرداختند. کلیه آزمایش‌ها در شرایط اشباع و به صورت بارگذاری سیکلی یک طرفه انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که بیشترین تجمع جابه‌جایی سرشمع در ۱۰۰۰ سیکل اول بارگذاری ایجاد می‌گردد، در حالی که افزایش دامنه بارگذاری موجب می‌شود که تعداد سیکل‌های مورد نیاز جهت رسیدن به حالت پایدار افزایش یابد. همچنین بارگذاری سیکلی باعث کاهش سختی سیستم شمع-خاک می‌شود [۱۶]. ژو و همکاران رفتار جانبی شمع نیمه صلب را در خاک ماسه‌ای اشباع تحت بارگذاری سیکلی و مونوتونیک توسط سانتریفیوژ بررسی نمودند. نتایج بیانگر آن است که مقاومت جانبی خاک رابطه خطی با تغییر شکل شمع دارد و شیب منحنی‌ها با افزایش عمق به صورت خطی افزایش می‌یابد. تاثیر نرخ بارگذاری و دانسیته خاک بر اندرکنش شمع-خاک فقط در طول سیکل‌های اولیه بارگذاری قابل توجه است [۱۷]. رفتار جانبی شمع مایل تحت بارگذاری سیکلی دو طرفه



( $D_{50}$  mm ۰/۱۸، ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنای ( $C_c$ ) به ترتیب برابر ۱/۶۷ و ۱/۲ است. این خاک، بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) است. چگالی ویژه خاک مطابق استاندارد ASTM D854-14 برابر ۲/۶۵ به دست آمده است. پارامترهای مقاومت برشی خاک با استفاده از آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D3080-98 اندازه‌گیری شده است. آزمایش در تراکم نسبی ۴۰٪ و تحت تنش‌های نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال صورت گرفته است. جهت اطمینان از نتایج به دست آمده، آزمایش‌ها سه سری تکرار شدند. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که این نوع خاک دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و چسبندگی صفر است. جهت تعیین دانسیته حداقل و حداکثر، آزمایش تراکم نسبی مطابق ASTM D4254 و ASTM D4253 انجام گردیده است. وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل به ترتیب برابر  $15/5 \text{ kN/m}^3$  و  $13/5$  به دست آمدند.

## ۲-۲- شمع مورد استفاده

در این پژوهش، از یک لوله استیل با قطر خارجی ۲۵ mm و ضخامت  $0/6 \text{ mm}$  جهت مدل‌سازی شمع استفاده شده است. طول مدفون شمع برابر ۵۵۰ mm در نظر گرفته شد. این شمع دارای مدول الاستیسته  $197 \text{ GPa}$  و لنگر خمشی تسلیم  $90 \text{ N.m}$  است. در صورتی که سختی نسبی شمع طبق معیار پولس و هال کمتر از  $0/025$  باشد، شمع به صورت انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$K_r = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \quad (1)$$

که در این رابطه  $E_p I_p$  سختی خمشی شمع،  $E_s$  مدول الاستیسته خاک و  $L$  طول مدفون شمع است. در این پژوهش مدول الاستیسته ماسه حدوداً برابر  $6/5 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه مذکور  $K_r$  برابر با  $0/01$  محاسبه شده است و بنابراین رفتار شمع تحت اثر بار جانبی، با توجه به رابطه ۱ به صورت انعطاف‌پذیر خواهد بود. به طور کلی هر مدل آزمایشگاهی نیاز به در نظر گرفتن اثرات مقیاس دارد. بنابراین ابعاد شمع مدل باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که بیانگر رفتار آن مشابه شرایط واقعیت باشد. ابعاد شمع مدل با استفاده از رابطه پیشنهاد شده توسط وود و همکاران تعیین گردیده است که این رابطه برای شمع‌های صلب و

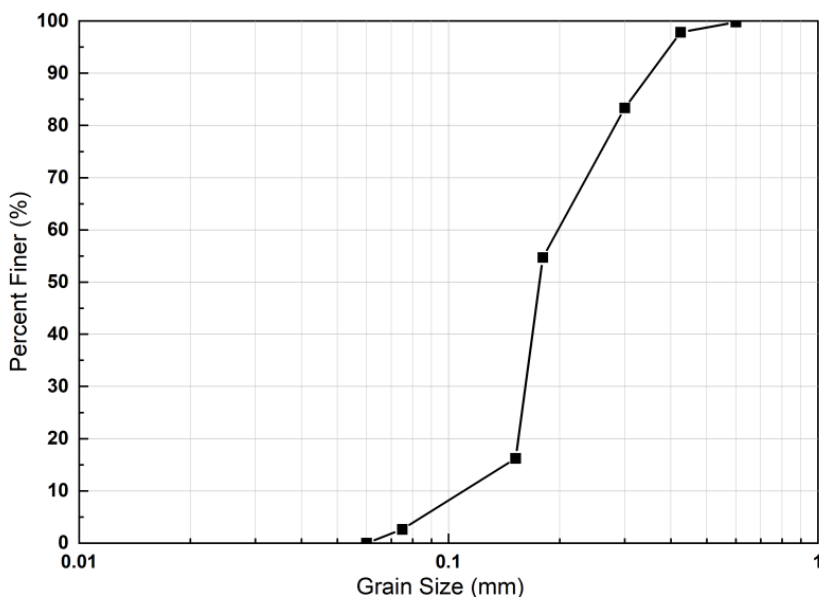
متقارن در خاک ماسه‌ای توسط موندال و دیسفانی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها بر روی شمع مایل با سه زاویه مختلف ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه انجام شد. کمترین میزان تجمع جابه‌جایی مربوط به زاویه ۲۵ درجه بوده است. رفتار جانبی شمع‌های مایل در طول حرکت سیکلی به گونه‌ای بوده است که ابتدا سختی سکانتی کاهش یافته و سپس با افزایش سیکل‌های بارگذاری، سختی سکانتی بیشتر شده است [۱۸].

مرور مطالعات گذشته بیانگر آن است که جهت بارگذاری سیکلی تاثیرهای مختلفی بر رفتار شمع-خاک دارد به گونه‌ای که برخی پژوهش‌ها افزایش سختی و برخی دیگر کاهش سختی را گزارش دادند. اگرچه این تغییرات تحت تاثیر مشخصات بارگذاری، دانسیته خاک، جنس خاک و سختی خمشی شمع است اما اثر جهت‌های مختلف بارگذاری سیکلی بر روی تغییر سختی سیستم شمع-خاک به صورت کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین رفتار جانبی سیکلی شمع‌های انعطاف‌پذیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است و اثر پارامترهای بارگذاری سیکلی بر روی رفتار این نوع شمع‌ها همچنان نامشخص است. لذا در این پژوهش به صورت آزمایشگاهی عملکرد شمع انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری جانبی سیکلی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور ارزیابی تاثیر بارگذاری سیکلی بر ظرفیت باربری نهایی شمع، علاوه بر بارگذاری سیکلی، بارگذاری پسا سیکلی نیز انجام شده است. در واقع اهداف اصلی این پژوهش شامل: ۱) بررسی تاثیر بارگذاری سیکلی یک طرفه، یک طرفه بدون باربرداری کامل، دو طرفه متقارن و نامتقارن بر رفتار شمع، ۲) ارزیابی تاثیر فرکانس بارگذاری سیکلی، ۳) بررسی عملکرد شمع تحت دامنه‌های مختلف بارگذاری سیکلی، ۴) مقایسه رفتار نیرو-جابه‌جایی شمع تحت بارگذاری پسا سیکلی و یکنواخت می‌باشد. نوآوری این مقاله عملاً در بررسی یک جای انواع مختلف بارگذاری سیکلی بر شمع انعطاف‌پذیر است که در پژوهش‌های پیشین یا به شکل مجزا به آن‌ها پرداخته شده است و یا اساساً دیده نشده‌اند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- خاک مورد آزمایش

خاک استفاده شده در این پژوهش از نوع ماسه سیلیسی خشک است. علت استفاده از این نوع ماسه، شباهت دانه‌بندی آن با ماسه‌های اتاوا و تویورا می‌باشد که ماسه‌های متداول و مرجع برای انجام تست‌های آزمایشگاهی در جهان هستند [۲۰ و ۱۹] و در مطالعات گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسه را نمایش می‌دهد که دارای اندازه‌ی میانگین



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد مطالعه

Fig. 1. Particle size distribution of sand

جدول ۱. مقادیر معادل شده برای مشخصات شمع در مدل آزمایشگاهی

Table 1. Equivalent parameters for model pile

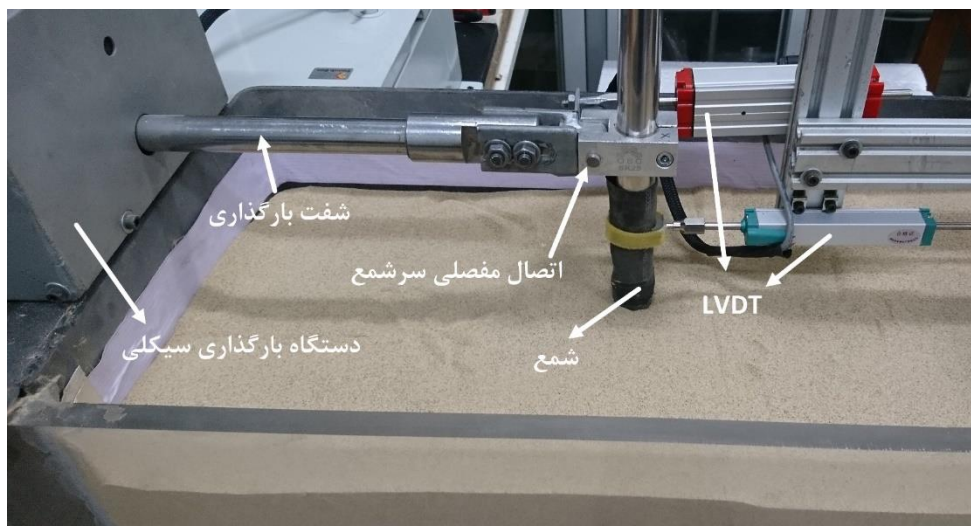
|                                   | شمع اصلی            | شمع مدل |
|-----------------------------------|---------------------|---------|
| مصالح                             | بتن                 | استیل   |
| عمق مدفون شمع (m)                 | ۱۲                  | ۰/۵۵    |
| قطر شمع (m)                       | ۰/۹                 | ۰/۰۲۵   |
| مدول الاستیسیته شمع (GPa)         | ۲۴                  | ۱۹۷     |
| سختی خمشی شمع (kNm <sup>2</sup> ) | ۷/۷×۱۰ <sup>۵</sup> | ۰/۷۲    |
| مدول الاستیسیته خاک (MPa)         | ۲۵                  | ۶/۵     |
| سختی نسبی                         | ۰/۰۰۱               | ۰/۰۰۱   |

که در این رابطه  $E_m I_m$  سختی خمشی شمع مدل،  $E_n I_n$  سختی خمشی شمع اصلی و  $F$  ضریب مقیاس طول شمع که برابر نسبت طول شمع اصلی به شمع مدل است. مشخصات شمع مدل و شمع اصلی در جدول ۱ نمایش داده شده است. برای کاهش اثرات مقیاس ذرات خاک، نسبت قطر شمع به قطر متوسط ذرات بایستی بزرگ‌تر از ۵۰ باشد [۲۳]. با توجه به اینکه قطر شمع ۱۳۹ برابر قطر متوسط ذرات است، می‌توان از اثر اندازه ذرات خاک

انعطاف‌پذیر قابل استفاده است [۲۲]. قابل ذکر است که برای خاک با تراکم مشخص، تفاوت مدل‌سازی شمع انعطاف‌پذیر و صلب در سختی خمشی شمع مدل است:

$$\frac{E_m I_m}{E_n I_n} = \frac{1}{F^{4.5}} \quad (2)$$





شکل ۲. نحوه اتصال دستگاه بارگذاری سیکلی به مدل فیزیکی شمع

Fig. 2. Test arrangement for lateral cyclic loading test

خاک و مشخصات بارگذاری متناسب با شمع مدل در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش سیستم جدیدی به منظور اعمال بارگذاری سیکلی شمع طراحی و ساخته شده است. این دستگاه قابلیت بارگذاری سیکلی، پاساسیکلی و یکنواخت<sup>۱</sup> را به صورت جابه‌جایی کنترل دارد (شکل ۲). بدنه دستگاه شامل قاب فولادی صلب با ضخامت ورق ۱۵ mm می‌باشد که از طریق ۴ عدد پیچ به جعبه آزمایش متصل می‌گردد. عملگر الکترومکانیکی دستگاه به گونه‌ای برنامه‌نویسی شده است که قابلیت ایجاد انواع حرکت‌های سیکلی با فرکانس و دامنه مختلف را داشته باشد. جابه‌جایی سیکلی ایجاد شده از طریق شفت بارگذاری به سر شمع منتقل می‌گردد. اتصال بین شفت بارگذاری و سرشمع به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است تا امکان دوران آزاد شمع وجود داشته باشد و از صفر بودن لنگر خمشی در سر شمع اطمینان حاصل شود. میزان جابه‌جایی سر شمع از طریق دو جابه‌جایی‌سنج<sup>۲</sup> (LVDT) که در بالای شمع نصب شده است، قرائت می‌گردد. یک جابه‌جایی‌سنج به صورت مستقیم در سر شمع و دیگری در فاصله ۳۰ mm بالای سطح خاک نصب گردیده است. به منظور اندازه‌گیری نیروی ایجاد شده در سرشمع، نیروسنج<sup>۳</sup> با ظرفیت ۱/۵ kN در محل اتصال شفت بارگذاری به عملگر مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. اعمال و کنترل جابه‌جایی‌های وارده و همچنین نمایش اطلاعات خروجی حسگرها از طریق نرم‌افزار گرافیکی

بر رفتار جانبی شمع صرف نظر نمود. در صورت نیاز به بهره‌بری از نتایج این پژوهش برای شمع‌های بزرگ مقیاس می‌توان از مشخصات شمع اصلی مربوط به جدول ۱ استفاده نمود.

### ۲-۳- جعبه آزمایش و سیستم بارگذاری

جعبه فلزی به ابعاد  $900 \times 300 \times 600$  mm<sup>۳</sup> (طول، عرض و ارتفاع) به عنوان جعبه خاک جهت آزمایش بارگذاری شمع مورد استفاده قرار گرفت. وجه روبرویی جعبه آزمایش از پلکسی گلاس شفاف با ضخامت ۱۵ mm ساخته شده است. این ابعاد با توجه به قطر شمع به گونه‌ای انتخاب شده است تا شرایط مرزی جعبه آزمایش تاثیری در نتایج بارگذاری جانبی شمع نداشته باشد. به همین منظور، فاصله بین مرکز شمع تا دیوار جعبه بایستی ۷-۱۰ برابر قطر شمع در راستای بارگذاری جانبی و ۵/۲ برابر قطر شمع در راستای عمود بر بارگذاری لحاظ شود. همچنین فاصله بین نوک شمع تا کف جعبه بایستی بیشتر از ۶ برابر قطر شمع در نظر گرفته شود [۲۴ و ۲۵]. بنابراین ابعاد جعبه آزمایش به اندازه کافی بزرگ است تا اثر شرایط مرزی از بین برود. همچنین جهت اطمینان از ابعاد انتخاب شده، با استفاده از آنالیز اجزا محدود در نرم‌افزار Plaxis 3D حباب‌های تنش ایجاد شده ناشی از بارگذاری جانبی شمع مدل مورد بررسی قرار گرفتند. ضخامت ورق جعبه برابر ۵ mm انتخاب شد تا از ایجاد تغییر شکل بدنه جعبه به هنگام بارگذاری جانبی شمع جلوگیری شود. به طور کلی، ابعاد جعبه آزمایش، تراکم نسبی

- 1 Monotonic
- 2 Linear Variable Differential Transformer
- 3 Loadcell

دو تراکم نسبی مختلف شامل ۴۰٪ و ۶۵٪ جهت تراکم ماسه مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش روش نصب شمع مشابه مطالعات گذشته به صورت بدون جابه‌جایی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. در این روش ابتدا تا رسیدن تراز نوک شمع، تراکم خاک انجام می‌شود سپس شمع در مرکز جعبه آزمایش به صورت قائم به سر شمع و شفت بارگذاری متصل می‌گردد. در مرحله بعد، ماسه در لایه‌های مشخص متراکم می‌گردد تا عمق مدفون مورد نیاز شمع ایجاد شود.

در این مطالعه سه نوع بارگذاری جانبی شامل یکنواخت، سیکی و پساسیکی صورت گرفته است. منظور از بارگذاری پساسیکی، اعمال بارگذاری یکنواخت پس از اتمام بارگذاری سیکی می‌باشد. بارگذاری یکنواخت به منظور تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع مطابق معیار پیشنهاد شده توسط برنز [۲۶] تا جابه‌جایی معادل ۲۰٪ قطر شمع ( $D_p$ ) انجام شد. چهار نوع بارگذاری سیکی شامل دو طرفه متقارن، دو طرفه نامتقارن، یک طرفه و یک طرفه بدون باربرداری کامل طی ۱۰۰ سیکل در برنامه آزمایش قرار داده شد. بارگذاری سیکی بر اساس کارهای متعارف در پژوهش‌های گذشته، در محدوده‌ی ۴۰ تا ۶۰ درصد بار حدی نهایی انجام می‌شود. این سطح از بارگذاری معقول به نظر می‌رسد چون بالاتر از آن عملاً به گسیختگی شمع می‌انجامد و بنابراین بارگذاری سیکی موضوعیت نمی‌یابد. در عین حال، بارگذاری در محدوده‌ی پایین‌تر نیز عمدتاً در محدوده‌ی الاستیک قرار می‌گیرد و نتیجه‌ی خاصی از آن حاصل نمی‌شود. به منظور بررسی اثر بارگذاری سیکی بر ظرفیت باربری جانبی شمع، بارگذاری پساسیکی پس از اتمام بارگذاری سیکی انجام گردید. به منظور بررسی اثر فرکانس بر رفتار شمع، آزمایش سیکی در فرکانس‌های ۰/۰۵ Hz، ۰/۱ Hz و ۰/۲ Hz مورد بررسی قرار گرفت. علت انتخاب این محدوده از فرکانس بارگذاری از آن جهت بوده است که فرکانس غالب توربین‌های بادی حدوداً ۰/۱ Hz می‌باشد. همچنین تاثیر سه دامنه مختلف  $0/08 D_p$ ،  $0/12 D_p$  و  $0/16 D_p$  بر پاسخ سیکی شمع مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات آزمایش‌های انجام شده تحت بارگذاری‌های مختلف در جدول ۲ نمایش داده شده است. در زمان انجام آزمایش‌ها، هر آزمایش چندین بار تکرار گردیده است تا از نزدیک بودن نتایج به یکدیگر اطمینان حاصل شود. برخی آزمایش‌های دارای خطای قابل توجه نیز کنار گذاشته شده‌اند.

ایجاد شده در کامپیوتر انجام می‌پذیرد. توسط این نرم‌افزار میزان فرکانس، جهت بارگذاری، دامنه، تعداد سیکل‌های بارگذاری و نوع بارگذاری (سیکی، پساسیکی و یکنواخت) قابل تنظیم است. با توجه به اینکه جابه‌جایی سنج به بدنه جعبه متصل شده است و از طرفی بارگذاری دستگاه به صورت جابه‌جایی کنترل است. حال، در صورتی که جابه‌جایی اعمال شده توسط دستگاه با جابه‌جایی قرائت شده توسط جابه‌جایی سنج یکسان نباشد بیانگر تغییر شکل بدنه دستگاه خواهد بود. خوشبختانه، در تمامی آزمایش‌ها جابه‌جایی اندازه گرفته شده با جابه‌جایی دستگاه برابر بوده است.

## ۲-۴- آماده‌سازی آزمایش

ماسه خشک در لایه‌هایی به ضخامت ۵۰ mm با وزن مشخص متناسب با تراکم نسبی مورد نظر به صورت دستی متراکم گردید. قابل ذکر است که برای آماده‌سازی هر لایه، خاک به صورت دقیق توسط ترازو موجود در آزمایشگاه وزن شده است. به منظور کنترل ضخامت خاک در حین تراکم، بخش داخلی دیواره جعبه به لایه‌هایی به فواصل ۵۰ mm تقسیم‌بندی شده است که به صورت لایه‌های سیاه و سفید در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳. نحوه قرارگیری شمع در خاک

Fig. 3. Pile installation method

جدول ۲. برنامه آزمایش‌های بارگذاری جانبی شمع

Table 2. Test schedules for lateral loading

| شماره آزمایش | نوع بارگذاری     | $D_r$ (%) | $y_{max}$ (mm) | $y_{min}$ (mm) | فرکانس (Hz) |
|--------------|------------------|-----------|----------------|----------------|-------------|
| ۱            | یکنواخت          | ۴۰        | -              | -              | -           |
| ۲            | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۳              | -۳             | ۰/۱         |
| ۳            | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۳              | -۲             | ۰/۱         |
| ۴            | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۳              | ۰              | ۰/۱         |
| ۵            | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۳              | ۲              | ۰/۱         |
| ۶            | یکنواخت          | ۶۵        | -              | -              | -           |
| ۷            | سیکلی            | ۶۵        | ۳              | -۳             | ۰/۱         |
| ۸            | سیکلی            | ۶۵        | ۳              | -۲             | ۰/۱         |
| ۹            | سیکلی            | ۶۵        | ۳              | ۰              | ۰/۱         |
| ۱۰           | سیکلی            | ۶۵        | ۳              | ۲              | ۰/۱         |
| ۱۱           | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۳              | -۳             | ۰/۲         |
| ۱۲           | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۳              | -۳             | ۰/۰.۵       |
| ۱۳           | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۴              | ۰              | ۰/۱         |
| ۱۴           | سیکلی و پساسیکلی | ۴۰        | ۲              | ۰              | ۰/۱         |

### ۳- نتایج و بحث

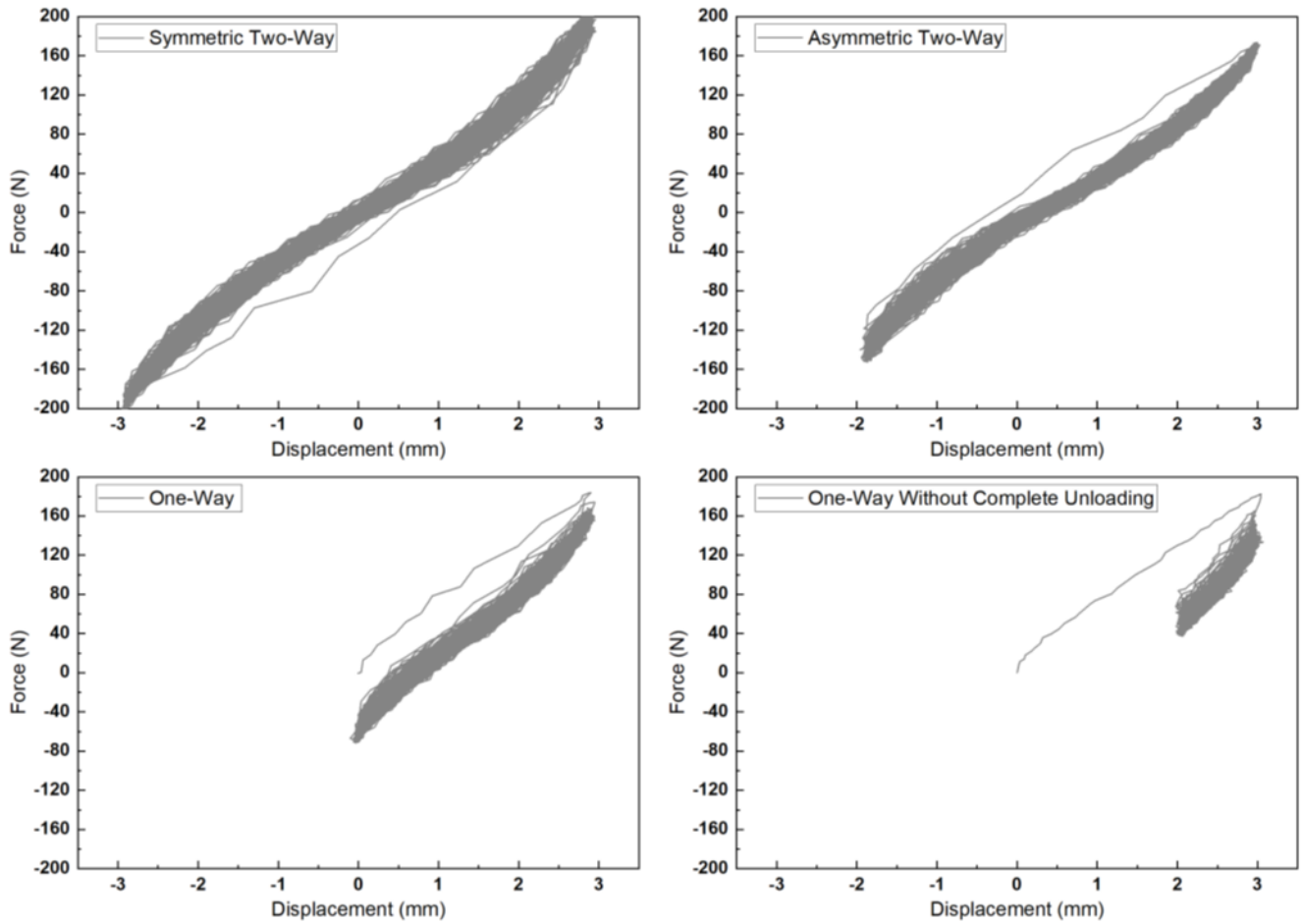
شکل ۶ تاثیر جهت بارگذاری سیکلی شمع در خاک با تراکم نسبی ۴۰٪

نمایش می‌دهد (آزمایش‌های شماره ۱-۵). همانطور که مشخص است، در حالت بارگذاری سیکلی دو طرفه سختی به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و تفاوت محسوسی بین حالت متقارن و نامتقارن مشاهده نمی‌شود. در حالت بارگذاری سیکلی یک طرفه، ابتدا در طی ۱۰ سیکل اول کاهش سختی ایجاد می‌شود سپس به صورت تدریجی سختی افزایش می‌یابد. تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه بدون باربرداری کامل برخلاف سایر حالت‌های بارگذاری، افزایش سختی سیستم شمع-خاک مشاهده نمی‌شود و پس از ۱۰ سیکل اولیه بارگذاری، سختی ثابت می‌ماند.

شکل ۶-ب تغییرات حداکثر نیروی سر شمع را در طول ۱۰۰ سیکل بارگذاری برای تراکم نسبی ۴۰٪ نمایش می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود میزان ظرفیت باربری جانبی شمع تحت بارگذاری سیکلی دو طرفه افزایش می‌یابد به گونه‌ای که ۱۰۰ سیکل بارگذاری در حالت سیکلی دو طرفه متقارن باعث افزایش ۲۵٪ در ظرفیت باربری جانبی شمع می‌گردد. این افزایش نیرو ناشی از افزایش دانسیته خاک اطراف شمع طی بارگذاری سیکلی است که در سطح خاک نیز به صورت نشست خاک پیرامون شمع

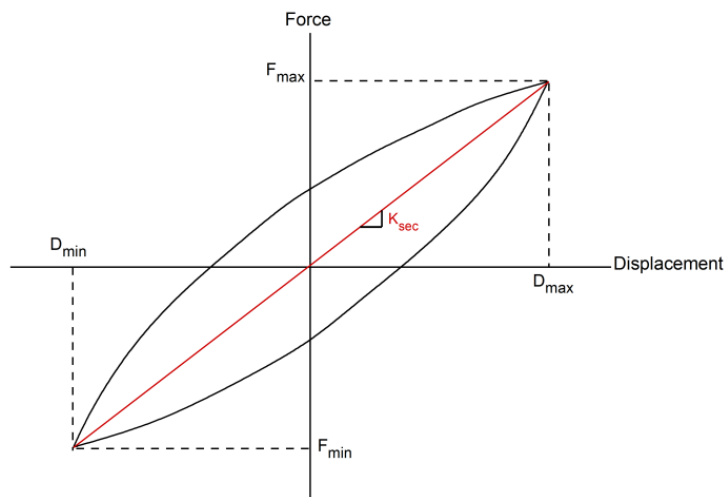
شکل ۴ رفتار نیرو-جابجایی شمع را در حالت‌های بارگذاری سیکلی دو طرفه متقارن، دو طرفه نامتقارن، یک طرفه و یک طرفه بدون باربرداری کامل در طی ۱۰۰ سیکل برای خاک با تراکم نسبی ۶۵٪ نمایش می‌دهد. جابه‌جایی مربوط به محل اعمال بار می‌باشد که توسط LVDT اندازه‌گیری شده است. تمامی آزمایش‌ها رفتار هیسترتیک غیرخطی برای سیستم شمع-خاک نمایش می‌دهند که بیانگر اتلاف انرژی در سیستم شمع-خاک است. به منظور تفسیر بهتر نتایج، سختی سکانتی سیکلی و حداکثر نیرو در هر سیکل برای تمامی آزمایش‌ها استخراج شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در این مطالعه جهت ارزیابی سختی جانبی سیستم شمع-خاک در هر سیکل بارگذاری از سختی سکانتی سیکلی [۲۷] استفاده شده است که به صورت شکل ۵ تعریف می‌گردد. همچنین به منظور بررسی تغییرات سختی سیکلی با افزایش تعداد سیکل‌ها، میزان سختی در هر سیکل به سختی در سیکل اول نرمال شده است.



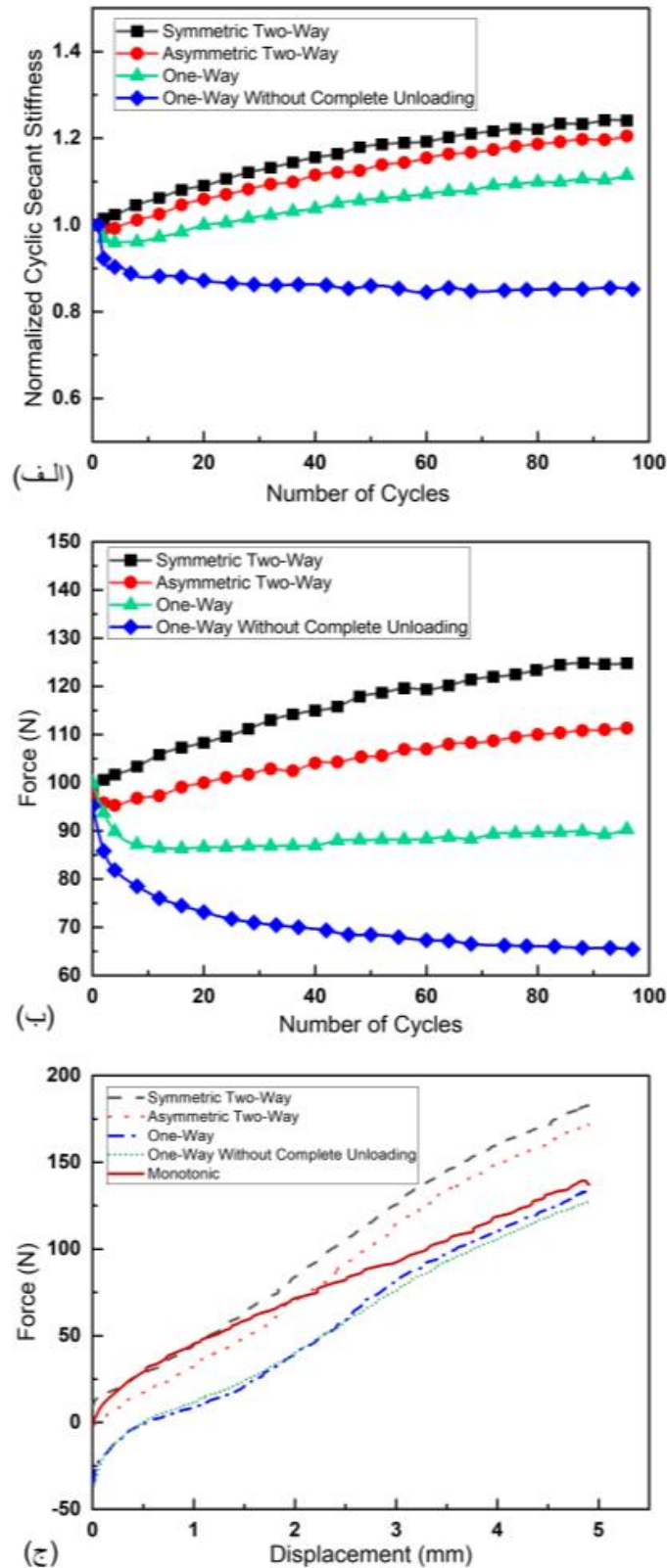
شکل ۴. نمودار نیرو-جاب‌جایی شمع تحت بارگذاری سیکلی جانبی برای خاک با تراکم نسبی ۶۰٪

Fig. 4. Force-displacement curve of pile under lateral cyclic loading for relative density of 60%



شکل ۵. نمایش سختی سکانتی سیکلی

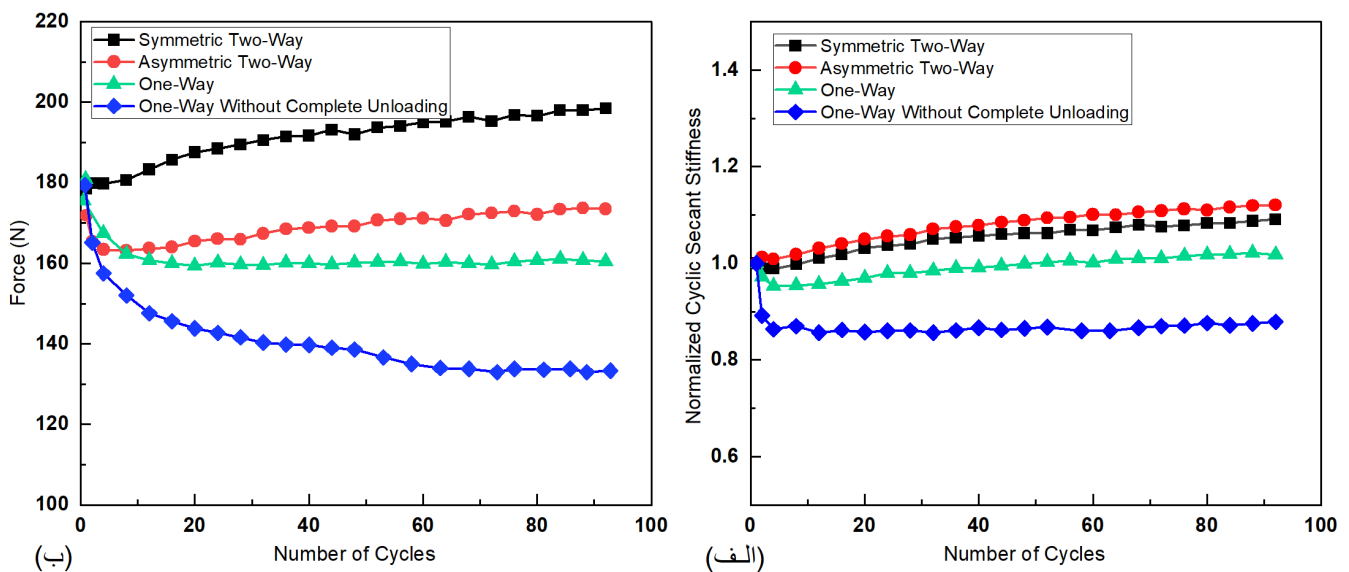
Fig. 5. Cyclic secant stiffness



شکل ۶. تاثیر جهت بارگذاری سبکی بر رفتار جانبی شمع برای خاک با تراکم نسبی ۴۰٪: الف) تغییرات سختی سکانتی سبکی، ب) تغییرات حداکثر نیرو سر شمع، ج) مقایسه رفتار شمع تحت بارگذاری پس‌سبکی و یکنواخت

6. Influence of cyclic loading on lateral response of pile for relative density of 40%: a) variation of stiffness, b) variation of pile head force, c) comparison between monotonic and post-cyclic loading





شکل ۷. تاثیر جهت بارگذاری سیکلی بر رفتار جانبی شمع برای خاک با تراکم نسبی ۶۵٪ (الف: تغییرات سختی سکانتی سیکلی، ب) تغییرات حداکثر نیرو سر شمع

Fig. 7. Influence of cyclic loading on lateral response of pile for relative density of 60%: a) variation of stiffness, b) variation of pile head force

بارگذاری یکنواخت (مونوتونیک) افزایش می‌یابد به گونه‌ای که منجر به افزایش ظرفیت باربری نهایی شمع می‌شود. این موضوع بیانگر تاثیر مثبت بارگذاری سیکلی دو طرفه در بهبود ظرفیت باربری جانبی شمع است. نمودار نیرو-جابجایی مربوط به بارگذاری یک طرفه و یک طرفه بدون باربرداری کامل روند مشابهی را نشان می‌دهند و با افزایش جابه‌جایی به نمودار بارگذاری یکنواخت همگرا می‌شوند. بنابراین اگر چه بارگذاری سیکلی یک طرفه بدون باربرداری کامل منجر به کاهش نیرو و سختی در طی حرکت سیکلی می‌شود و رفتار نیرو-جابجایی شمع را تحت بارگذاری پسا سیکلی تغییر می‌دهد اما تاثیر چندانی در ظرفیت باربری نهایی شمع نخواهد داشت. نتایج مربوط به بارگذاری سیکلی در حالت تراکم نسبی ۶۵٪ در شکل ۷ نمایش داده شده است (آزمایش‌های شماره ۶-۱۰). تغییرات نیرو و سختی با افزایش تعداد سیکل‌ها روند مشابهی با شرایط تراکم نسبی ۴۰٪ نمایش می‌دهد. نرخ افزایش سختی و میزان افزایش نیرو برای شرایط بارگذاری دو طرفه در حالت تراکم نسبی ۴۰٪ بیشتر از حالت ۶۵٪ می‌باشد. به طور مثال افزایش تراکم نسبی در حالت بارگذاری سیکلی دو طرفه متقارن، نیرو جانبی سرشمع را تا ۷۶٪ افزایش می‌دهد. همچنین افزایش سختی ناشی از افزایش دانسیته خاک پیرامون شمع در طی بارگذاری سیکلی با افزایش تراکم نسبی خاک، کاهش می‌یابد.

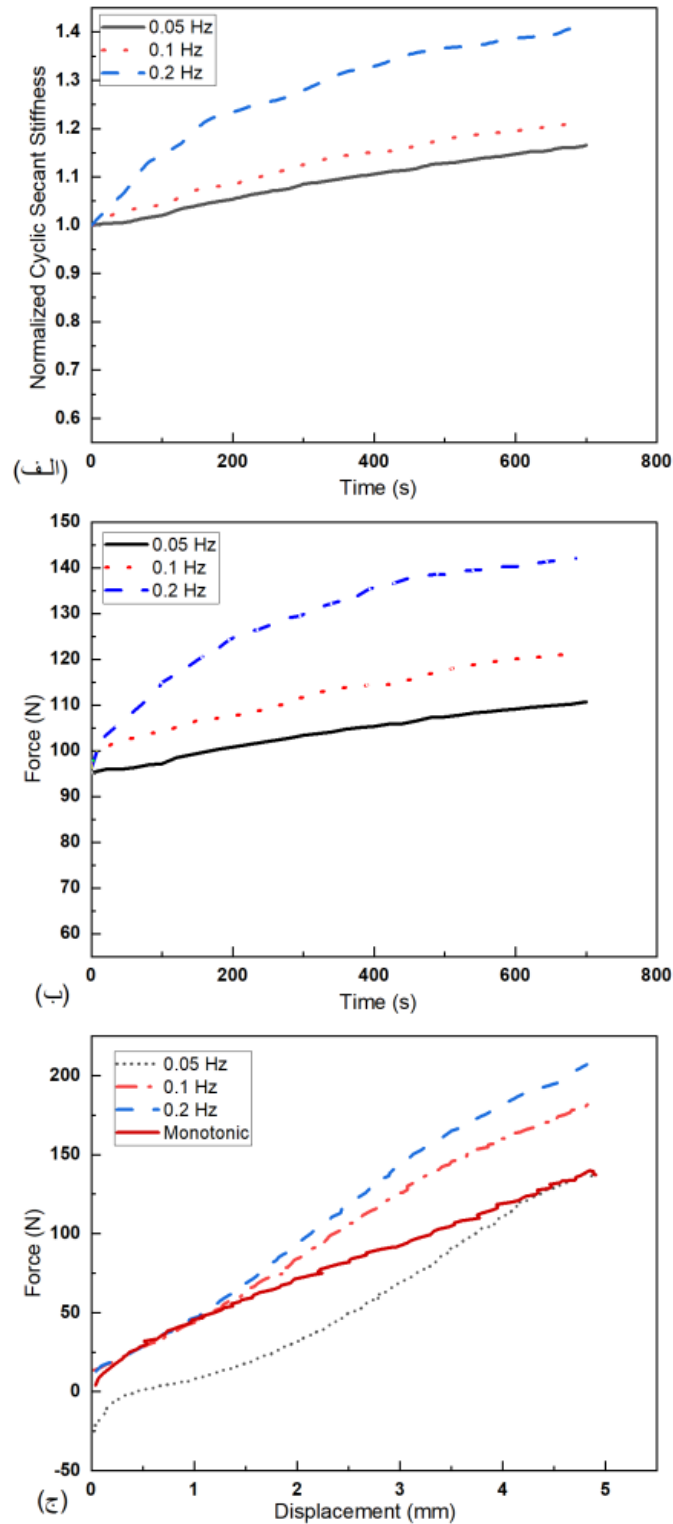
نمایان می‌شود. همچنین افزایش ظرفیت باربری جانبی ناشی از تراکم خاک اطراف شمع در طول بارگذاری سیکلی در مطالعات گذشته گزارش شده است و روند مشابهی را برای تغییرات سختی شمع ارائه نمودند [۲۸ و ۱۴]. برای بارگذاری سیکلی یک طرفه، نیرو سرشمع در طول ۱۰ سیکل روند کاهشی داشته و سپس به مقدار ثابت ۹۰ N رسیده است. بارگذاری سیکلی یک طرفه بدون باربرداری کامل تاثیر قابل توجهی در کاهش ظرفیت باربری شمع دارد و حدوداً ۳۵٪ ظرفیت باربری را کاهش می‌دهد. یکی از عوامل اثرگذار در افزایش ظرفیت باربری در حالت سیکلی دو طرفه نسبت به یک طرفه آن است که بارگذاری در دو جهت منجر به افزایش سختی خاک در هر دو جهت می‌گردد در حالی که در بارگذاری یک طرفه افزایش سختی سکانتی ناشی از تجمع نیروهای پسماند ایجاد شده در نیم سیکل‌های باربرداری است. همچنین نتایج این نمودار بیانگر آن است که ۱۰۰ سیکل بارگذاری جهت بررسی رفتار جانبی این شمع کافی بوده است.

تاثیر جهت بارگذاری سیکلی بر رفتار نیرو-جابجایی شمع تحت بارگذاری پسا سیکلی در شکل ۶-ج نمایش داده شده است. نیروی پسماند ایجاد شده ناشی از حرکت سیکلی در حالت بارگذاری یک طرفه و یک طرفه بدون باربرداری کامل در این نمودار به وضوح مشخص است. در حالت بارگذاری دو طرفه، با افزایش جابه‌جایی سر شمع میزان نیرو نسبت به حالت



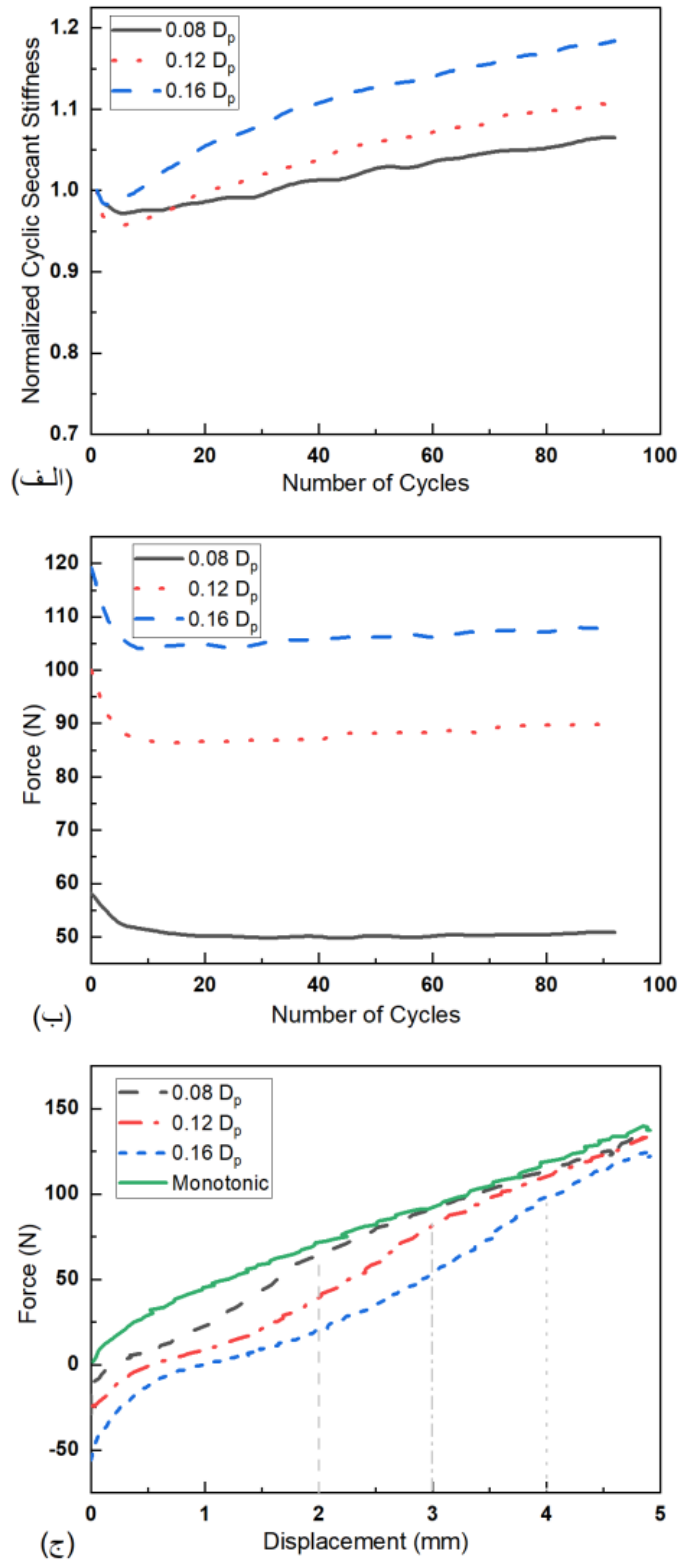
تاثیر دامنه بارگذاری سیکلی بر سختی و نیرو شمع تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه با تراکم نسبی ۰/۴۰ در شکل ۹ نمایش داده شده است (آزمایش‌های ۱۳، ۱۴ و ۴). تحت هر نوع دامنه بارگذاری با افزایش تعداد سیکل‌ها، سختی ابتدا کاهش سپس به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و این میزان افزایش با افزایش دامنه بارگذاری بیشتر می‌شود. همانطور که در شکل ۹-ب مشخص است، در طی ۱۰ سیکل اول بارگذاری نیروی جانبی سر شمع ابتدا کاهش می‌یابد سپس با افزایش تعداد سیکل‌ها تغییر در میزان نیروی جانبی مشاهده نمی‌شود. این نتیجه بیانگر آن است که افزایش سختی سکانتی ایجاد شده در شکل ۹-الف ناشی از تجمع نیروهای پسماند در طی بارگذاری سیکلی است. افزایش دامنه بارگذاری سیکلی باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع می‌شود. به طور مثال افزایش دامنه از  $0/08 D_p$  به  $0/12 D_p$  باعث ۸۰٪ افزایش در حالی که افزایش دامنه از  $0/12 D_p$  به  $0/16 D_p$  منجر به ۲۰٪ افزایش در ظرفیت باربری شده است. این نتیجه حاکی از آن است که نیروی جانبی سیکلی متناسب با دامنه بارگذاری افزایش نمی‌یابد. شکل ۹-ج تاثیر دامنه بارگذاری سیکلی را بر رفتار پساسیکلی شمع نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، نیروی پسماند ایجاد شده در سر شمع تحت تاثیر دامنه بارگذاری سیکلی است به گونه‌ای که با افزایش دامنه میزان نیروی پسماند نیز افزایش می‌یابد و ظرفیت باربری آن نسبت به منحنی بارگذاری یکنواخت کمتر می‌شود. کاهش ظرفیت باربری شمع تحت بارگذاری سیکلی نسبت به بارگذاری یکنواخت محدود به ناحیه متناظر با دامنه بارگذاری سیکلی می‌شود و پس از این محدوده به منحنی بارگذاری یکنواخت همگرا می‌گردد. به طور مثال برای دامنه بارگذاری  $0/12 D_p$  (۳ میلی‌متر)، رفتار نیرو-جابجایی پساسیکلی پس از جابه‌جایی متناظر با ۳ میلی‌متر به رفتار بارگذاری یکنواخت نزدیک شده است. این موضوع نشان دهنده آن است که دامنه بارگذاری سیکلی تاثیر قابل توجهی بر رفتار پساسیکلی شمع دارد و این کاهش ظرفیت باربری متناسب با دامنه بارگذاری شمع است.

شکل ۸ تاثیر فرکانس بارگذاری را بر سختی و نیرو سر شمع طی حرکت سیکلی دو طرفه با دامنه ۳ میلی‌متر و تراکم نسبی ۰/۴۰ نمایش می‌دهد (آزمایش‌های شماره ۱۱، ۱۲ و ۲). همانطور که مشخص است تحت فرکانس  $0/2 \text{ Hz}$  نرخ افزایش سختی به طور قابل توجهی بیشتر از فرکانس‌های  $0/1 \text{ Hz}$  و  $0/05 \text{ Hz}$  است به طوری که در پایان حرکت سیکلی، سختی سیستم شمع-خاک ۴۰٪ افزایش می‌یابد. احتمالاً علت تاثیر فرکانس را بتوان در سایه‌ی اثر فرکانس بارگذاری بر تراکم خاک‌های دانه‌ای دانست و به نظر می‌رسد که این موضوع به جنس خاک و تراکم نسبی آن بستگی داشته باشد. تغییرات حداکثر نیروی سر شمع با زمان حرکت سیکلی در شکل ۸-ب نمایش داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود افزایش فرکانس از  $0/1 \text{ Hz}$  به  $0/2 \text{ Hz}$  تاثیر به سزایی در افزایش باربری جانبی داشته است به گونه‌ای که نیروی سر شمع در پایان حرکت سیکلی  $40 \text{ N}$  افزایش یافته است. همچنین افزایش فرکانس از  $0/05 \text{ Hz}$  به  $0/1 \text{ Hz}$  تاثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع نداشته است. تاثیر فرکانس بارگذاری سیکلی بر رفتار نیرو-جابجایی سر شمع تحت بارگذاری پساسیکلی در شکل ۸-ج نمایش داده شده است. بارگذاری سیکلی دو طرفه تحت فرکانس  $0/05 \text{ Hz}$  منجر به ایجاد نیروی پسماند به میزان  $25 \text{ N}$  در جهت مخالف می‌گردد و ظرفیت باربری را در محدوده ۰ تا  $4 \text{ mm}$  (معادل  $0/16 D_p$ ) کاهش می‌دهد. سپس با افزایش جابه‌جایی به ظرفیت باربری نهایی متناظر با بارگذاری یکنواخت می‌رسد. این نتیجه حاکی از آن است که اگر چه نیروی پسماند ناشی از حرکت سیکلی تاثیر به سزایی در تغییر رفتار نیرو-جابجایی شمع دارد، اما باعث کاهش ظرفیت باربری جانبی نهایی آن نمی‌شود. تحت فرکانس‌های  $0/1 \text{ Hz}$  و  $0/2 \text{ Hz}$  با افزایش جابه‌جایی پساسیکلی، مقادیر نیرو نسبت به بارگذاری یکنواخت افزایش قابل توجهی می‌یابد به گونه‌ای که در ظرفیت باربری نهایی تا ۷۷٪ افزایش مشاهده می‌شود. این افزایش نیرو می‌تواند ناشی از افزایش سختی و تراکم خاک اطراف شمع در طول بارگذاری سیکلی باشد. بنابراین ظرفیت باربری جانبی شمع انعطاف‌پذیر تحت تاثیر فرکانس بارگذاری خواهد بود و بایستی اثر آن در طراحی لحاظ شود.



شکل ۸. تاثیر فرکانس بارگذاری سیکلی بر رفتار جانبی شمع: الف) تغییرات سختی سکانتی سیکلی، ب) تغییرات حداکثر نیرو سر شمع، ج) مقایسه رفتار شمع تحت بارگذاری پسا سیکلی و یکنواخت

Fig. 8. Influence of frequency on lateral response of pile: a) variation of stiffness, b) variation of pile head force, c) comparison between monotonic and post-cyclic loading



شکل ۹. تاثیر دامنه بارگذاری سیکلی بر رفتار شمع: الف) تغییرات سختی سکانتی سیکلی، ب) تغییرات حداکثر نیرو سر شمع، ج) مقایسه رفتار شمع تحت بارگذاری پس‌سیکلی و یکنواخت

Fig. 9. Influence of amplitude on lateral response of pile: a) variation of stiffness, b) variation of pile head force, c) comparison between monotonic and post-cyclic loading

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با طراحی و ساخت یک دستگاه آزمایش بارگذاری کوچک مقیاس، تعدادی آزمایش بارگذاری سیکلی جانبی و پساسیکلی بر روی شمع انعطاف پذیر به صورت جابه جایی کنترل در خاک ماسه ای انجام شد. عوامل موثر بر بارگذاری سیکلی جانبی شمع شامل جهت بارگذاری، دامنه، فرکانس، تعداد سیکل ها و همچنین تراکم نسبی ماسه مورد بررسی قرار گرفتند. به طور کلی نتایج به دست آمده را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

- در حالت بارگذاری سیکلی دو طرفه و یک طرفه پس از ۱۰۰ سیکل بارگذاری سختی افزایش می یابد در حالی که تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه بدون باربرداری کامل، سختی ابتدا کاهش می یابد سپس با افزایش تعداد سیکل ها تغییری در سختی مشاهده نمی شود. در بارگذاری دو طرفه، افزایش دانسیته خاک اطراف شمع منجر به افزایش ظرفیت باربری جانبی می شود.

- افزایش سختی سکانتی در بارگذاری سیکلی یک طرفه ناشی از تجمع نیروهای پسماند در طی بارگذاری سیکلی است و تاثیر قابل توجهی در رفتار نیرو-جابه جایی سر شمع دارد.

- نتایج آزمایش های پساسیکلی نشان داد که بارگذاری سیکلی دو طرفه باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی جانبی شمع می شود اما بارگذاری سیکلی یک طرفه و یک طرفه بدون باربرداری کامل تاثیر چندانی در ظرفیت باربری نهایی شمع ندارد.

- مقایسه نتایج دو تراکم نسبی ۴۰٪ و ۶۵٪ بیانگر آن است که در طی حرکت سیکلی روند تغییرات سختی و نیرو برای هر دو حالت مشابه است اما میزان افزایش نیرو برای تراکم نسبی ۴۰٪ بیشتر است.

- افزایش فرکانس از ۰/۱ Hz به ۰/۲ Hz تاثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت باربری جانبی سیکلی دارد. همچنین تحت فرکانس ۰/۰۵ Hz نیروی های پسماند ناشی از بارگذاری سیکلی باعث کاهش ظرفیت باربری نسبت به بارگذاری یکنواخت می گردد اما تاثیری در ظرفیت باربری نهایی ندارد. اثر فرکانس بر ظرفیت باربری می تواند به اثر آن بر تراکم خاک مرتبط شود و این موضوع احتمالاً به جنس و دانسیته ی نسبی خاک وابسته است و نیازمند مطالعات بیشتر خواهد بود.

- تحت بارگذاری سیکلی یک طرفه، افزایش دامنه بارگذاری منجر به افزایش ظرفیت باربری جانبی سیکلی شمع می گردد؛ اما این افزایش متناسب با افزایش دامنه بارگذاری نیست. همچنین با افزایش دامنه بارگذاری

نیروی پسماند ایجاد شده در سر شمع افزایش می یابد.

- در طراحی شمع ها تحت بارگذاری سیکلی بایستی اثر پارامترهای مختلف بارگذاری شامل دامنه بارگذاری، فرکانس و جهت بارگذاری در طراحی لحاظ شود. پیشنهاد می شود با توجه به شرایط محیطی محل نصب شمع، فرکانس و جهت های بارگذاری محتمل شناسایی شود تا بتوان با توجه به خاک منطقه شمع را به صورت بهینه طراحی کرد.

#### ۵- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

|           |                                     |
|-----------|-------------------------------------|
| $C_u$     | ضریب یکنواختی                       |
| $C_c$     | ضریب انحنا                          |
| $K_r$     | سختی نسبی شمع                       |
| $E_p I_p$ | سختی خمشی شمع، $\text{kN.m}^2$      |
| $E_s$     | مدول الاستیسته خاک، MPa             |
| $L$       | طول شمع، m                          |
| $E_m I_m$ | سختی خمشی شمع مدل، $\text{kN.m}^2$  |
| $E_n I_n$ | سختی خمشی شمع اصلی، $\text{kN.m}^2$ |
| $F$       | ضریب مقیاس طول شمع                  |
| $D_p$     | قطر شمع، m                          |
| $D_r$     | تراکم نسبی خاک                      |
| $y_{max}$ | حداکثر دامنه جابه جایی سیکلی، mm    |
| $y_{min}$ | حداقل دامنه جابه جایی سیکلی، mm     |

#### منابع

- [1] S. Basack, Design recommendations for pile subjected to cyclic load, Marine Georesources & Geotechnology, 33(4) (2015) 356-360.
- [2] A. Puech, J. Garnier, Design of piles under cyclic loading: SOLCYP recommendations, John Wiley & Sons, 2017.
- [3] B.B. Broms, Design of laterally loaded piles, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 91(3) (1965) 79-99.
- [4] M. Som, S. Das, Theory and practice of foundation design, PHI Learning Pvt. Ltd., 2003.
- [5] S. Basack, R. Purkayastha, Behaviour of single pile under lateral cyclic load in marine clay, (2007).
- [6] R. Api, Recommended practice for planning, designing

- Engineering, 147 (2018) 89-106.
- [17] Zhu, B., et al., Centrifuge modeling of monotonic and cyclic lateral behavior of monopiles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021. 147(8): p. 04021058.
- [18] Mondal, S. and M.M. Disfani, Battered minipile response to low-frequency cyclic lateral loading in very dense sand. *ActaGeotechnica*, 2022: p. 1-18.
- [19] M. Ghayoomi, S. Ghadirianniari, A. Khosravi, M. Mirshekari, Seismic behavior of pile-supported systems in unsaturated sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 112 (2018) 162-173.
- [20] A.Y. Purnama, N. Yasufuku, A. Rifa'i, Evaluation of filler material behavior in pre-bored pile foundation system due to slow cyclic lateral loading in sandy soil, *GEOMATE Journal*, 16(58) (2019) 90-96.
- [21] H. Poulos, Single pile response to laterally cyclic load, *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, 108(3) (1982) 375-355
- [22] D.M. Wood, A. Crewe, C. Taylor, Shaking table testing of geotechnical models, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2(1) (2002) 01-13.
- [23] R.T. Klinkvort, Centrifuge modelling of drained lateral pile-soil response, Application for offshore wind turbine support structures, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark (DTU), Lyngby, Report R-271, (2012).
- [24] M. Khari, K.A. Kassim, A. Adnan, An experimental study on pile spacing effects under lateral loading in sand, *The Scientific World Journal*, 2013 (2013).
- [25] H. Matlock, Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay, in: *Offshore technology conference*, OnePetro, 1970.
- [26] B.B. Broms, Lateral resistance of piles in cohesionless soils, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 90(3) (1964) 123-156.
- [27] P. Cuéllar, P. Mira, M. Pastor, J.A.F. Merodo, M. Baeßler, W. Rücker, A numerical model for the transient analysis of offshore foundations under cyclic loading, and constructing fixed offshore platforms-working stress design, *API RP A*, 2 (2000).
- [7] M. Arshad, B.C. O'Kelly, Development of a rig to study model pile behaviour under repeating lateral loads, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 14(3) (2014) 54-66.
- [8] S. Basack, S. Nimbalkar, Measured and predicted response of pile groups in soft clay subjected to cyclic lateral loading, *International Journal of Geomechanics*, 18(7) (2018) 04018073.
- [9] J. Long, G. Vanneste, Effects of cyclic lateral loads on piles in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(1) (1994) 225-244.
- [10] C. LeBlanc, G. Houlsby, B. Byrne, Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading, *Géotechnique*, 60(2) (2010) 79-90.
- [11] D. Frick, M. Achmus, Model tests on the behaviour of monopiles under general cyclic lateral loading, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure*, accepted paper, 2019.
- [12] S. Darvishi Alamouti, M. Moradi, M.R. Bahaari, Centrifuge modelling of monopiles subjected to lateral loading, *Scientia Iranica*, 26(6) (2019) 3109-3124.
- [13] Y. Hong, B. He, L. Wang, Z. Wang, C.W.W. Ng, D. Mašin, Cyclic lateral response and failure mechanisms of semi-rigid pile in soft clay: centrifuge tests and numerical modelling, *Canadian Geotechnical Journal*, 54(6) (2017) 806-824.
- [14] A. Faresghoshooni, S. Imam, A. Mahmoodi, Model Testing on the Effects of Section Geometry and Stiffness on the Cyclic Lateral Behavior of Piles in Loose Sand, *International Journal of Civil Engineering*, 19(5) (2021) 563-581.
- [15] B. He, L. Wang, Y. Hong, Field testing of one-way and two-way cyclic lateral responses of single and jet-grouting reinforced piles in soft clay, *Acta Geotechnica*, 12(5) (2017) 1021-1034.
- [16] W. Liao, J. Zhang, J. Wu, K. Yan, Response of flexible monopile in marine clay under cyclic lateral load, *Ocean*

parameters affecting the cyclic lateral response of monopiles for offshore wind turbines in sand, *Soils and Foundations*, 60(6) (2020) 1570-1587.

*Computers and Geotechnics*, 59 (2014) 75-86.  
[28] D. Frick, M. Achmus, An experimental study on the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Owji, Gh. Habibagahi, M. Veiskarami, *Experimental investigation of flexible pile behavior under lateral cyclic and post cyclic loading in sandy soil*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(11) (2023) 4417-4432.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21312.7685

