



## Experimental and Analytical Study of connected and non-connected piled raft foundations

M. J. Malekkhani, J. Bolouri Bazaz

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

**ABSTRACT:** In the piled raft foundation, in contrast to the pile group, both raft and piles transfer the imposed load to the foundation soil. The concentration of shear stresses and bending moments at the connection point of the pile and raft in the piled raft may cause a structural collapse in the pile while the geotechnical bearing capacity of the pile has not fully mobilized. This problem may be solved by disconnecting the piles from raft and inserting a soil layer between the piles and the raft. This layer in non-connected piled rafts is called cushion. In a non-connected piled raft, the cushion plays an important role to mobilize the bearing capacity of the foundation soil, adjusting the load transfer mechanism, and changing the system stiffness. The behavior of a connected and non-connected piled raft is too complicated to easily estimate the load sharing ratio and stiffness for the preliminary design. In the present research, based on the test results of the pile group and the unpiled raft, an analytical approach is introduced to calculate the load sharing ratio and the stiffness of the connected and non-connected piled rafts. To verify the proposed analytical model accuracy, 21 small scale tests on the unpiled raft, pile group, connected and non-connected piled rafts were conducted. According to the results increasing the number and length of piles, increases the bearing capacity. In a non-connected piled raft, increasing the cushion thickness decreases the load sharing ratio of piles, stiffness, and bearing capacity of the system.

### Review History:

Received: Jul. 14, 2020  
Revised: Sep. 02, 2020  
Accepted: Dec. 24, 2020  
Available Online: Jan. 22, 2021

### Keywords:

Piled raft foundation  
Pile group  
Analytical approach  
Stiffness  
Load sharing ratio

### 1- Introduction

In a piled raft foundation, both raft and piles transfer the imposed load from the structure to the subsoil. In the piled raft, for a specific imposed load, less number of piles is needed to reach the same settlement in comparison to the pile group [1-3]. At the connection points of pile and raft, high moment and shear forces are transferred to the pile head and structural collapse may occur, while the geotechnical capacity of the pile is not fully mobilized [4, 5].

By disconnecting the piles from the raft and interposing a compacted granular soil layer between the raft and pile heads, the mentioned problem can be resolved. This system is known as a non-connected piled raft foundation [6-10]. The interposed layer which is called cushion, distributes vertical stress between the subsoil and the pile heads uniformly and prevents structural damages at the pile head. The physical properties and the shear strength parameters of the cushion influence the mechanism of load carrying and load sharing of piles and subsoil in non-connected piled raft foundations. In a non-connected piled raft system, due to the increase of the subsoil stiffness, the raft settlement is reduced and the bearing capacity of the piled raft is enhanced [11, 12].

In a non-connected piled raft foundation, the stiffness difference between piles and the subsoil and also the compressibility of the subsoil cause to produce the relative

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

settlement at the piles head elevation and develops the negative skin friction at the upper part of the piles [13].

The aforementioned literature review indicates that interposing the cushion between the piles head and the raft in a non-connected piled raft foundation creates a complicated system with various interactions. Also, the cushion plays an important role in the load transfer and distribution mechanism, mobilizing negative skin friction and the bearing capacity of the subsoil. In the current study, an analytical model is developed to determine the stiffness of the non-connected piled rafts and the load sharing ratio of piles according to the stiffness of the unpiled raft and the pile group. To verify the proposed analytical model accuracy and validity, 21 small-scale tests were conducted.

### 2- Methodology

To estimate the stiffness of a non-connected piled raft, the settlement of the piled raft is needed. In a non-connected piled raft, the total applied load is shared between the piles and the subsoil. The piles and raft can be considered independent springs. In a non-connected piled raft, the settlement of the raft is equal to the sum of pile settlement and the compression of the cushion above the pile head.

In this study, to calculate the compression of the cushion, as depicted in Fig. 1, the cushion with a thickness of  $h_c$  is interposed between raft and piles and divided into



a column above the pile head and a hollow cylinder above the subsoil in section A-A. The internal friction angle and elasticity modulus of the cushion are  $\phi_c$  and  $E_c$ , respectively. The differential settlement, which occurs at the pile head elevation, mobilizes shear stress within the cushion. On the other hand, due to the high rigidity of the raft in comparison with the cushion, no differential settlement occurs in the cushion at the raft bottom [14]. In this model, to express the force equilibrium in the cushion, a unit element of the inner column with height  $dz$  is considered (Fig. 1-c). By solving the obtained equations, first, the transferred vertical stress on the pile head ( $P_i(0)$ ) and then the compression of the cushion above the pile head ( $S_i$ ) can be derived as:

$$P_i = \frac{(-D_{pile} \gamma_c \cot \phi_c) + e \frac{4k_0(h_c+z) \tan \phi_c}{D_{pile}}}{4k_0} (4k_0 q_0 + D_{pile} \gamma_c \cot \phi_c) \quad (1)$$

$$S_i = \int_{-e}^0 \frac{P_i dz}{E_c} = \frac{(D_{pile} \cot \phi_c)}{16k_0^2 E_c} \times \frac{(-4k_0 q_0 - 4h_c k_0 \gamma_c - D_{pile} \gamma_c \cot \phi_c + e \frac{4k_0 h_c \tan \phi_c}{D_{pile}})}{16k_0^2 E_c} (4k_0 q_0 + D_{pile} \gamma_c \cot \phi_c) \quad (2)$$

While the stiffness of the non-connected piled raft ( $k_{pr}$ ) is the combination of the unpiled raft and group pile stiffness, it can be expressed as:

$$k_{pr} = k_r + \frac{k_p w_p}{w_{pr}} = k_r + \frac{k_p w_p}{(w_p + S_i)} \quad (3)$$

The load sharing ratio of a non-connected piled raft as the portion of the load taken by the piles can be derived as:

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} = \frac{k_p w_p}{(k_r + \frac{k_p w_p}{w_p + S_i})(w_p + S_i)} = \frac{w_p}{k_p (w_p + S_i) + w_p} \quad (4)$$

To conduct the experimental tests, the dimensions of the square steel plate as the model raft was 200 mm×200 mm×10 mm, and to model the piles, solid steel pipes with 10 mm diameter were used. The soil container was a steel cubic tank with 1000 mm dimension. Firouzkouh No. 161 dry sand was used to model the cushion and the subsoil. The relative densities of subsoil and cushion were 50% and 96%, respectively. A new air pluviation system, developed at Ferdowsi University of Mashhad [15], was used to prepare reproducible and homogenous specimens and deposit the sand into the soil container.

### 3- Results and Discussion

According to the load-settlement curves, by increasing the length of the connected or non-connected piles, the load sharing ratio of the piles, which is defined as the portion of the carried load by the piles, is increased and the bearing capacity of the raft is enhanced. Increasing the number and the length of piles increases the resistance of the pile against the imposed vertical load and the stiffness of the piled raft as well. In the non-connected piled rafts, the thicknesses of 5, 10, and 20 mm for cushion were used. The stiffness of the cushion is much less than the rigid piles and by increasing the cushion thickness the stiffness and the load-bearing

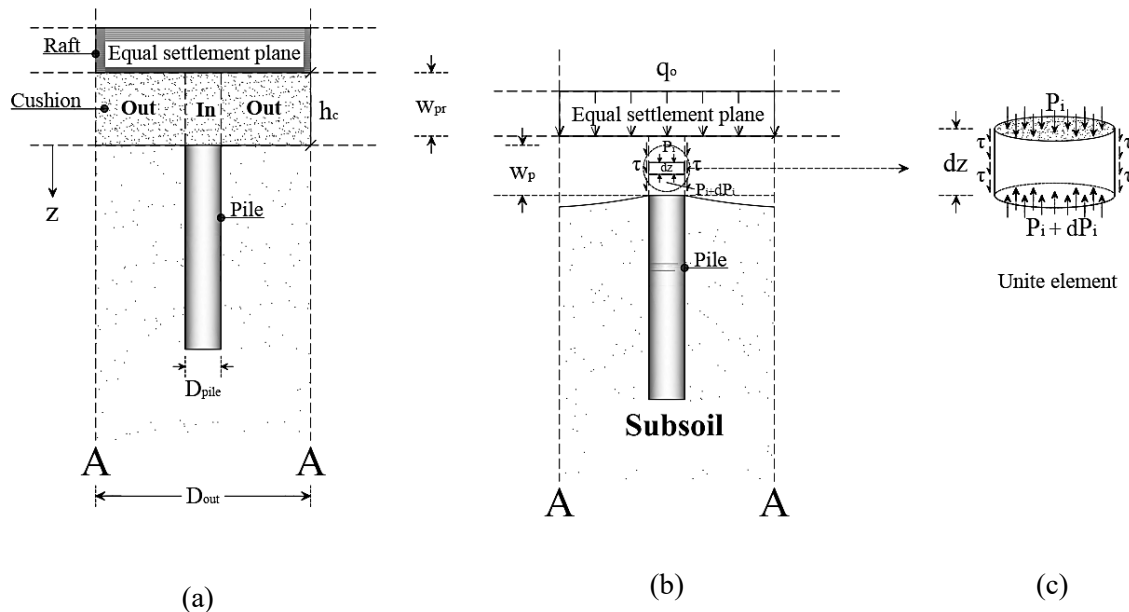


Fig. 1. Schematic view of the cylindrical unit cell for the cushion. (a) Before settlement. (b) After settlement. (c) Unit element in cushion

capacity of the non-connected piled raft were both reduced. On the other hand, the differential settlement at the pile head elevation is the result of the compressibility of the cushion and the stiffness difference between the piles and the subsoil. Any increase in the cushion thickness causes to affect more length of the piles by the down drag force of the negative skin friction and reduces the load sharing ratio of the piles and increases the settlement of the raft.

The stiffness of the connected and non-connected piled rafts was also measured according to the load-settlement results. At the initial loading stages, the stiffness of the piled raft foundations increases and after reaching the maximum amount, by increasing the interaction effects among pile-raft-soil, the stiffness of the piled rafts reduced. The magnitudes of the connected and non-connected piled raft stiffness predicted by the analytical model are in good agreement with those measured experimentally and the maximum differences are within an acceptable range.

#### 4- Conclusions

In the present research, an analytical model is developed to calculate the stiffness and the load sharing ratio of piles in non-connected piled rafts. Also, experimental tests were carried out to study the behavior of non-connected piled rafts and to provide a verification tool for the analytical model. According to the test and model results, the following conclusions can be drawn briefly:

(1) The bearing capacity of the non-connected piled raft is considerably more than the pile group. Increasing the number or length of the piles reduces the settlement of the piled raft.

(2) In non-connected piled rafts, by disconnecting the piles from the raft the geotechnical bearing capacity of the piles can be fully mobilized.

(3) In non-connected piled rafts, the role of the cushion is to distribute the vertical stress beneath the raft almost uniformly. Increasing the cushion thickness decreases the load sharing ratio of piles and the stiffness and the bearing capacity of the non-connected piled rafts.

(4) The compressibility of the cushion and the stiffness difference of pile and subsoil mobilize negative skin friction at the upper part of the non-connected piles.

#### References

- [1] K. Horikoshi, M. Randolph, A contribution to optimum design of piled rafts, *Geotechnique*, 48(3) (1998) 301-317.
- [2] A. Mandolini, C. Viggiani, Settlement of piled foundations, *Géotechnique*, 47(4) (1997) 791-816.
- [3] W.A. Prakoso, F.H. Kulhawy, Contribution to piled raft foundation design, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1) (2001) 17-24.
- [4] V. Fioravante, D. Giretti, Contact versus noncontact piled raft foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(11) (2010) 1271-1287.
- [5] D. Park, J. Lee, Comparative analysis of various interaction effects for piled rafts in sands using centrifuge tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1) (2015) 04014082.
- [6] M. El Sawwaf, Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(10) (2010) 1394-1402.
- [7] H. Rasouli, B. Fatahi, A novel cushioned piled raft foundation to protect buildings subjected to normal fault rupture, *Computers and Geotechnics*, 106 (2019) 228-248.
- [8] I. Wong, M. Chang, X. Cao, settlement-reducing piles, *Design applications of raft foundations*, (2000) 469.
- [9] X.D. Cao, I.H. Wong, M.-F. Chang, Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(2) (2004) 129-138.
- [10] A.T. Ghalesari, H. Rasouli, Effect of Gravel Layer on the Behavior of Piled Raft Foundations, in: *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, 2014, pp. 373-382.
- [11] M. Jamiolkowski, G. Ricceri, P. Simonini, Safeguarding Venice from high tides: site characterization and geotechnical problems, in: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, Citeseer, 2009, pp. 5-9.
- [12] U. Okyay, D. Dias, L. Thorel, G. Rault, Centrifuge modeling of a pile-supported granular earth-platform, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2) (2014) 04013015.
- [13] V. Fioravante, Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer, *Géotechnique*, 61(2) (2011) 121-132.
- [14] R. Rui, J. Han, Y.-q. Ye, C. Chen, Y.-x. Zhai, Load Transfer Mechanisms of Granular Cushion between Column Foundation and Rigid Raft, *International Journal of Geomechanics*, 20(1) (2020) 04019139.
- [15] M. Abdollahi, J. Bolouri Bazaz, Reconstitution of Sand Specimens Using a Rainer System, *International Journal of Engineering*, 30(10) (2017) 1451-1463.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. J. Malekhhani, J. Bolouri Bazaz, *Experimental and Analytical Study of connected and non-connected piled raft foundations*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) (2022) 1119-1122.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18726.6942







## بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل

محمد جمال ملک‌خانی، جعفر بلوری بزاز\*

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳

### کلمات کلیدی:

پی رادیه شمع  
گروه شمع  
روش تحلیلی  
سختی  
نسبت تقسیم بار

**خلاصه:** در پی رادیه شمع برخلاف گروه شمع، پی و شمع‌ها هم‌زمان در انتقال بار به خاک نقش بازی می‌کنند. تمرکز تنش برشی و لنگر خمشی در محل اتصال شمع به پی در پی رادیه شمع می‌تواند موجب گسیختگی سازه‌ای گردد حال آن‌که هنوز ظرفیت باربری ژئوتکنیکی شمع‌ها کاملاً بسیج نشده است. این مشکل می‌تواند با جداسازی شمع‌ها از پی و قرار دادن یک لایه خاک بین سر شمع‌ها و کف پی و استفاده از پی رادیه شمع غیرمتصل مرتفع شود. این لایه خاک در پی‌های رادیه شمع غیرمتصل لایه میانی نامیده می‌شود. در پی رادیه شمع غیرمتصل لایه میانی نقش مهمی در بسیج کردن ظرفیت باربری خاک بستر، تنظیم مکانیزم انتقال بار و تغییر سختی کل سیستم بازی می‌کند. به دلیل رفتار بسیار پیچیده پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل، تخمین سختی و نسبت تقسیم بار در این سیستم‌ها برای طراحی اولیه مشکل می‌باشد. در پژوهش حاضر، روشی تحلیلی جهت محاسبه سهم باربری شمع‌ها از کل بار وارده و سختی در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل بر اساس نتایج آزمایش بر روی پی سطحی و گروه شمع ارائه شده است. این مدل با انجام ۲۱ آزمایش بر روی پی بدون شمع، گروه شمع، پی رادیه شمع غیرمتصل و متصل مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش تعداد و طول شمع‌ها موجب بهبود ظرفیت باربری می‌گردد؛ در پی رادیه شمع غیرمتصل با افزایش ضخامت لایه میانی سهم باربری شمع‌ها، سختی و ظرفیت باربری سیستم کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

از وقوع گسیختگی و یا آسیب سازه‌های در سر شمع و پی ظرفیت باربری سازه‌های شمع‌ها عامل تعیین‌کننده در طراحی خواهد بود [۹ و ۸]. در صورت جداسازی شمع‌ها از پی و قرارگیری لایه‌های خاک بین سر شمع‌ها و کف پی، امکان بسیج شدن کامل ظرفیت باربری ژئوتکنیکی شمع‌ها به وجود می‌آید و این سیستم پی رادیه شمع غیرمتصل نامیده می‌شود [۱۲-۱۰]. معمولاً فاصله بین سر شمع‌ها و پی توسط لایه‌های از خاک متراکم (لایه میانی) که وظیفه انتقال و توزیع بار به سر شمع‌ها و خاک بستر را بر عهده دارد پر می‌گردد [۱۴ و ۱۳]. لایه میانی با ایجاد فاصله میان شمع‌ها و پی، بار را به صورت یکنواخت به سر شمع‌ها منتقل می‌کند و در نتیجه مشکل ایجاد تمرکز تنش و یا لنگرهای واژگونی در سر شمع از بین می‌رود. در این سیستم، شمع‌ها نقش مسلح‌کننده خاک زیر پی را بازی می‌کنند و مشخصات فیزیکی و پارامترهای مقاومت برشی خاک لایه میانی در تعیین رفتار پی رادیه شمع غیرمتصل کاملاً مؤثر می‌باشند [۱۶ و ۱۵].

در پی رادیه شمع غیرمتصل برخلاف حالت متصل، به دلیل عدم اتصال شمع‌ها به پی، سختی بیشتر شمع نسبت به خاک بستر و نیز قابلیت فشرده‌گی

استفاده از شمع در زیر پی باعث کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی می‌گردد. مجموعه پی و شمع بر اساس امکان قرارگیری پی بر روی خاک و شرایط ژئوتکنیکی محل، به صورت گروه شمع و یا پی رادیه شمع عمل می‌کند. در گروه شمع تنها شمع‌ها تمام بار وارد بر پی را تحمل نموده و به خاک منتقل می‌کنند و از ظرفیت باربری پی صرف نظر می‌شود. در پی رادیه شمع، پی و گروه شمع هر دو در انتقال بار وارده به خاک نقش داشته و راهکاری به مراتب اقتصادی‌تر نسبت به گروه شمع می‌باشد [۳-۱]. شناخت رفتار و نحوه عملکرد پی رادیه شمع به دلیل انتقال هم‌زمان بار توسط پی و شمع‌ها و ایجاد اندرکنش‌های مختلف بین تنش‌های ایجاد شده در پی، شمع‌ها و خاک بستر، بسیار پیچیده می‌باشد [۷-۴]. گرچه پی رادیه شمع گزینه‌های بسیار مناسب جهت کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی می‌باشد، اما تحت بارهای وارده از سازه به پی، در محل اتصال سازه‌های سر شمع و پی تمرکز تنش محوری و لنگر به وجود می‌آید. در این وضعیت جهت جلوگیری

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bolouri@um.ac.ir



[۲۰]. چن<sup>۵</sup> با در نظرگیری تأثیر اندرکنش بین شمع و خاک و اصطکاک منفی در طول شمع، رفتار خاکریزهای دارای شمع تحت را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرارداد و راه حلی ریاضی برای بررسی مکانیزم انتقال بار از خاکریز به شمع و خاک بستر در این سیستمها ارائه نمود [۲۲].

با توجه به پژوهشهای انجام شده بر روی پی رادیه شمع غیرمتصل مشاهده میشود وجود لایه میانی بین پی و شمعها نقش مهمی در بسیج کردن ظرفیت باربری خاک بستر، تنظیم مکانیزم انتقال و تقسیم بار و تغییر سختی<sup>۶</sup> کل سیستم بازی میکند. از سوی دیگر شناخت رفتار و مکانیزم انتقال بار پی رادیه شمع غیرمتصل به دلیل عدم اتصال شمع به پی و وجود لایه میانی نسبت به حالت متصل دارای پیچیدگیهای بیشتری میباشد. در پژوهش حاضر بر اساس راه حل ارائه شده در خاکریزهای دارای شمع [۲۲] و روش طراحی پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل [۸]، مدلی تحلیلی برای بررسی رفتار، تخمین سختی و سهم باربری شمعها در این سیستم ارائه شده است. به منظور صحت سنجی و دقت مدل ارائه شده، در این پژوهش با انجام ۲۱ آزمایش بر روی پی بدون شمع، گروه شمع، پی رادیه شمع غیرمتصل و متصل تحت بار قائم استاتیکی با تغییر ضخامت لایه میانی، تعداد و طول شمعها مدل تحلیلی مورد صحت سنجی قرار گرفته است.

## ۲- مدل تحلیلی

ظرفیت باربری پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل ( $Q_{pr}$ )، ترکیبی از ظرفیت باربری پی بدون شمع ( $Q_r$ ) و گروه شمع ( $Q_p$ ) است. همچنین در پی رادیه شمع تعداد شمعها تأثیری بر سختی پی ندارد و میتوان پی و شمعها را به صورت فلهایی مستقل از یکدیگر فرض نمود که بر اساس سختی محوری خود، سختی کل سیستم را در برابر بار قائم ایجاد میکنند [۸]. بنابراین ظرفیت باربری پی رادیه شمع را میتوان به صورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$Q_{pr} = Q_r + Q_p \quad (1)$$

به دلیل اینکه عملکرد شمعها و پی در انتقال بار به صورت فلهایی با سختی مشخص فرض شده، نشست کل پی رادیه شمع ( $w_{pr}$ )، با توجه به سختی کل سیستم ( $k_{pr}$ ) از رابطه (۲) به دست می آید:

لایه میانی، نشست شمع، خاک بستر و پی با یکدیگر برابر نبوده و نشست غیریکنواخت بین شمع و خاک بستر در تراز نوک شمع به وجود میآید. همچنین به دلیل اینکه نشست خاک بستر بیشتر از شمع میباشد، اصطکاک پوستهای منفی در قسمت بالایی شمع بسیج میگردد [۱۷]. تاکنون مطالعات مختلفی به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی سیستم پی رادیه شمع غیرمتصل انجام شدند که بیانگر کارایی این سیستم جهت افزایش سختی خاک بستر، کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی میباشند.

کائو<sup>۱</sup> و همکاران با تغییر طول، تعداد و آرایش شمعها رفتار پی رادیه شمع غیرمتصل، توزیع لنگر خمشی بر سطح پی و مکانیزم انتقال نیرو در شمعها را بررسی نمودند. افزایش طول و تعداد شمعها منجر به کاهش نشست و نیز حداکثر لنگر خمشی پی میگردد. همچنین به دلیل جدا بودن شمعها از پی و برخلاف حالت متصل حداکثر تنش محوری در بالای شمع به وجود نمیآید [۱۳]. سعیدی<sup>۲</sup> و همکاران با انجام آزمایشهای سانتریفیوژ بر روی پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل و با تغییر تعداد و فاصله بین شمعها، دانهبندی و ضخامت لایه میانی به بررسی رفتار بار- نشست این سیستم پرداخته‌اند. نتایج آزمایشها بر روی پی رادیه شمع غیرمتصل بیان میکند که میزان نشست برای لایه میانی با ضخامت بهینه، حداقل بوده و با تغییر ضخامت این لایه، میزان نشست نیز افزایش مییابد [۱۸]. ترادیگو<sup>۳</sup> اندرکنشها در پی رادیه شمع غیرمتصل را به کمک روش تحلیل اجزا محدود سه بعدی و با تغییر تعداد و چینش شمعها و ضخامت لایه میانی بررسی نمود. نتایج نشان میدهند که حداکثر نیروی محوری در طول شمع، در نقطه‌های پایتتر از سر شمع و محل صفحه خنثی<sup>۴</sup> به وجود میآید. این نقطه با افزایش ضخامت لایه میانی به سمت عمق خاک حرکت میکند [۱۹].

در پی رادیه شمع غیرمتصل به دلیل وجود نشست نامتقارن خاک بستر- شمع در تراز سر شمع، حرکت نسبی و تنش برشی در خاک لایه میانی بین قسمت قرار گرفته بر روی شمع و خاک بستر مجاور شمع به وجود میآید [۱۷]. از سوی دیگر به دلیل سختی خمشی بسیار بالای پی نسبت به خاک، پی به صورت یکنواخت نشست میکند و در تراز کف پی نشست تمامی نقاط خاک لایه میانی برابر می باشد. به همین دلیل تراز کف پی مشابه حالتی که ضخامت خاکریز دارای شمع به قدری است که در آن تراز گسیختگی برشی در خاک به وجود نمی آید، صفحه نشست یکنواخت نامیده می شود [۲۱] و

- 1 Cao X.D.
- 2 Saedi A.
- 3 Tradigo F.
- 4 Neutral Plane

5 Chen  
6 Stiffness

خاک بستر در لایه میانی می گردد. اما در تراز کف پی به دلیل سختی بسیار زیاد پی نسبت به خاک لایه میانی، تمامی نقاط کف پی به یک مقدار نشست کرده و هیچ گونه تنش برشی در لایه میانی و در این تراز اتفاق نمی افتد. از این رو تراز کف پی در پی رادیه شمع غیرمتصل، معادل با صفحه نشست یکنواخت<sup>۱</sup> در خاکریزهای دارای شمع می باشد [۲۳].

جهت محاسبه نشست خاک روی شمع در لایه میانی در پی رادیه شمع غیرمتصل، بر اساس روش ارائه شده توسط چن<sup>۲</sup> در خاکریزهای دارای شمع، روشی تحلیلی در پیه‌های رادیه شمع غیرمتصل ارائه شده است. بدین منظور، مطابق شکل ۱ و با در نظرگیری یک سلول واحد متقارن در مقطع A-A، شامل شمع به همراه خاک بستر اطراف شمع، خاک لایه میانی و پی، مکانیزم انتقال بار و نشست در لایه میانی بررسی شده است.

مرکز هر سلول در مرکز شمع قرار دارد و به دلیل اینکه شمعها به صورت متقارن در زیر لایه میانی قرار گرفته فاصله مرکز به مرکز شمعها برابر با قطر سلول ( $Do$ ) و قطر سر شمع برابر با ( $Di$ ) می باشد. خاک لایه میانی از مصالح دانه‌های فاقد چسبندگی، همگن و همسانگرد<sup>۳</sup> با ضخامت  $hc$ ، مدول الاستیک  $Ec$ ، وزن مخصوص  $\gamma_c$  و زاویه اصطکاک داخلی  $\varphi_c$  در نظر گرفته شده است. پی، شمع، خاک لایه میانی و بستر تنها در راستای قائم امکان نشست دارند و مبدأ محور مختصات در تراز سر شمع و جهت مثبت آن رو به پایین فرض شده است. در شکل ۲ با تقسیم خاک لایه میانی در سلول واحد به دو قسمت داخل ستون روی شمع (in) و اطراف شمع (out)، جزئیات سلول واحد و فرضیات روش تحلیلی نشان داده شده‌اند.

با توجه به سلول متقارن و امان واحد نشان داده شده در شکل ۲ معادله تعادل نیروها در المانی به ضخامت  $dz$  در خاک لایه میانی قرار گرفته بر روی سر شمع به صورت رابطه (۷) به دست می آید:

$$AidPi = (\gamma_c Ai + \pi Dpile \tau) dz \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $Ai$  سطح مقطع سر شمع،  $dPi$  تغییرات تنش قائم در امتداد المان،  $Dpile$  قطر سر شمع و  $\tau$  تنش برشی ناشی از اختلاف نشست بین قسمت قرار گرفته بر روی شمع و خاک بستر در ناحیه خاک لایه میانی است. با توجه به اینکه بین خاک روی شمع و خاک بستر در لایه میانی هیچ گونه تغییر مکان افقی وجود ندارد و نشست تنها در راستای قائم

$$wpr = \frac{Qpr}{kpr} = \frac{(krwr + kpwp)}{kpr} \quad (2)$$

در این رابطه  $kr$  و  $wr$  به ترتیب سختی و نشست پی بدون شمع و  $kpr$  و  $wpr$  سختی و نشست گروه شمع می باشد [۸]. با توجه به رابطه (۲)، سختی کل پی رادیه شمع برابر است با:

$$kpr = \frac{krwr}{wpr} + \frac{kpwp}{wpr} \quad (3)$$

با توجه به اینکه در پی رادیه شمع متصل، نشست کل با نشست شمعها و پی برابر است ( $wpr = wr = wp$ )، بنابراین سختی کل سیستم به صورت رابطه (۴) قابل بیان است:

$$kpr = kr + kp \quad (4)$$

اما در حالت غیرمتصل به دلیل وجود فاصله بین شمعها و پی و نیز نشست لایه میانی تحت بار وارده، نشست شمعها با نشست پی و نشست کل برابر نمیباشد ( $wpr = wr \neq wp$ ) [۸]. از سوی دیگر در حالت غیرمتصل، نشست پی برابر با مجموع نشست گروه شمع و خاک لایه میانی قرار گرفته روی سر شمع میباشد. بنابراین مطابق رابطه (۵)، برای تعیین نشست پی و بر اساس مقدار نشست گروه شمع تنها نشست خاک روی شمع در لایه میانی ( $Si$ ) باید محاسبه شود [۲۲].

$$wpr = wp + Si \quad (5)$$

با توجه به اینکه سختی گروه شمع و پی بدون شمع بر اساس نتایج آزمایش بار-نشست بر روی گروه شمع و پی بدون شمع به دست می آید، بنابراین سختی کل پی رادیه شمع غیرمتصل برابر است با:

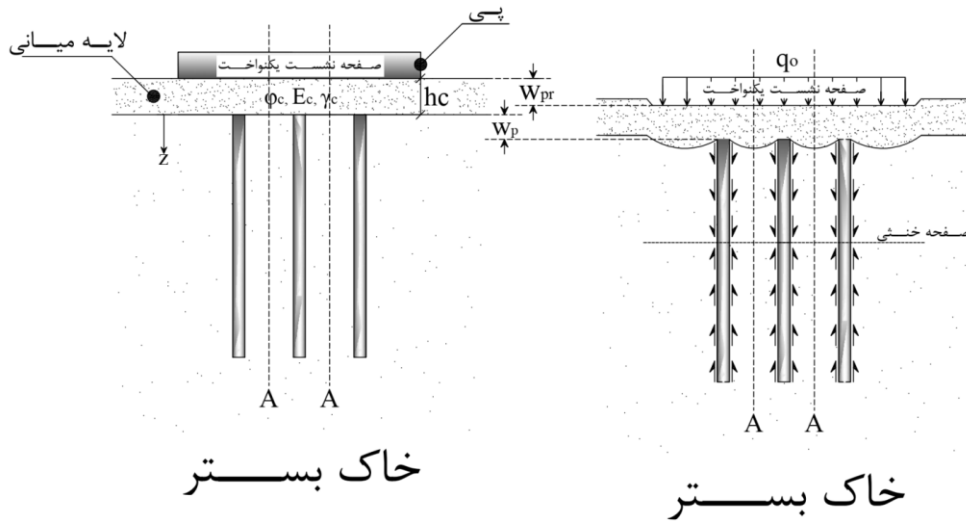
$$kpr = kr + \frac{kpwp}{wpr} = kr + \frac{kpwp}{(wp + si)} \quad (6)$$

نشست بیشتر خاک بستر نسبت به شمع در قسمت فوقانی شمع منجر به ایجاد نشست نسبی و تنش برشی بین قسمت قرار گرفته بر روی شمع و

1 Equal settlement plane

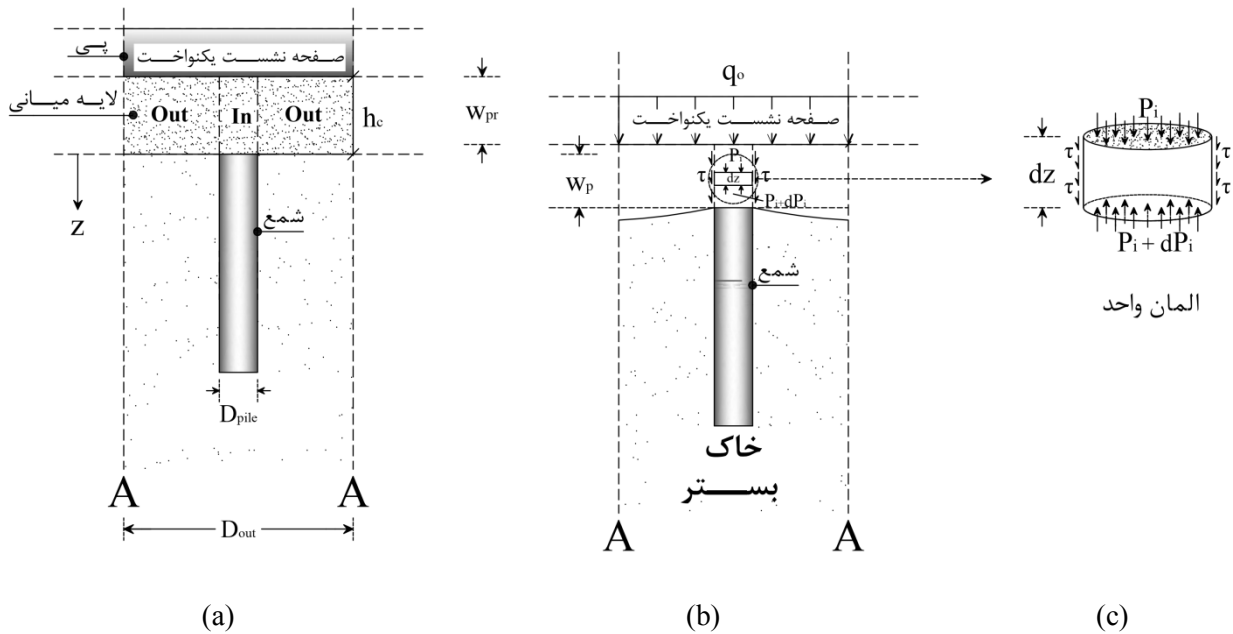
2 Chen

3 Isotropic



شکل ۱. نمای شماتیک از پی رادیه شمع غیرمتصل و سلول متقارن در مقطع A-A قبل و بعد از بارگذاری

Fig. 1. Schematic view of a non-connected piled raft and the symmetrical cell before and after settlement in section A-A



شکل ۲. نمای شماتیک از جزئیات سلول واحد (a) قبل بارگذاری (b) بعد بارگذاری (c) المان واحد در لایه میانی بالای شمع

Fig. 2. Schematic view of the unit cell properties. (a) Before settlement. (b) After settlement. (c) Unit element in cushion above piles



### ۳- جزئیات مطالعات آزمایشگاهی

با توجه به هدف انجام این پژوهش، ۲۱ آزمایش تحت بار قائم الاستاتیکی بر روی پی بدون شمع، گروه شمع، پی رادیه شمع غیرمتصل و متصل و با یک مرتبه تکرار انجام شده‌اند. در جدول ۱ جزئیات و در شکل ۳ حالت‌های مختلف آزمایشها بیان گردیده‌اند. نامگذاری آزمایشها به این صورت است که از چپ به راست عبارت اول بیانگر حالت (گروه شمع)، پی بدون شمع، پی رادیه شمع متصل<sup>۲</sup> و پی رادیه شمع غیرمتصل<sup>۳</sup>، عدد اول تعداد شمع، عدد دوم نسبت طول به قطر شمع (L/D) و عدد سوم ضخامت لایه میانی به میلیمتر (در حالت غیرمتصل) را بیان می‌کند. برای مثال کد آزمایش NC5-10-05 بیان میکند که پی رادیه شمع جدا دارای پنج شمع با نسبت طول به قطر ۱۰ و بر روی لایه میانی به ضخامت ۵ میلیمتر قرار گرفته است. عبارت‌های UR، C، PG و NC به ترتیب بیانگر پی بدون شمع، گروه شمع، پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل بوده و قطر شمع در تمامی آزمایشها برابر با ۱۰ میلیمتر می‌باشد.

#### ۳-۱- مصالح مصرفی

##### ۳-۱-۱- ماسه

در این پژوهش از ماسه خشک ۱۶۱ فیروزکوه به عنوان خاک لایه میانی و خاک بستر استفاده شده است. خاک لایه میانی که نقش انتقال و توزیع بار از پی به شمع و خاک بستر را دارد باید دارای تراکم نسبی بالا باشد تا ظرفیت باربری شمعها کاملاً بسیج شود [۸]. بنابراین با استفاده از دستگاه بارش خشک خاک ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد [۲۴]، ماسه به ترتیب با تراکم نسبی ۹۶٪ و ۵۰٪ به عنوان خاک لایه میانی و خاک بستر در نمونه‌ها استفاده شده است. جهت تعیین مشخصات فنی و پارامترهای مقاومت برشی، آزمایش دانه‌بندی بر اساس آیین‌نامه ASTM D422-87 و نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس آیین‌نامه ASTM D3080-90 انجام شده و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده است.

برای تعیین نشست خاک روی شمع، مدول الاستیک خاک لایه میانی نقش اساسی بازی می‌کند. با توجه به اینکه مدول الاستیک خاک لایه میانی (EC) بر اساس مقدار تنش وارده متغیر و نشست به صورت یک

رخ می‌دهد، بنابراین شرایط حالت سکون برقرار بوده و مقدار تنش برشی برابر با رابطه (۸) می‌باشد:

$$\tau = P_i k_0 \tan \varphi \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $P_i$  تنش قائم وارد بر روی شمع توسط لایه میانی و  $k_0 = 1 - \sin \varphi$  ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون خاک لایه میانی می‌باشد.

با قرارگیری رابطه تنش برشی در رابطه (۷)، تقسیم طرفین رابطه به دست آمده بر  $A_i$  و انتگرال‌گیری از معادله دیفرانسیل به دست آمده در بازه‌های به ضخامت لایه میانی  $[-hc, 0]$  و اینکه در تراز کف پی ( $z = 0$ ) تنش در تمامی نقاط لایه میانی برابر با  $q_0$  است، پاسخ که برابر با تنش وارده بر روی سر شمع از طرف خاک لایه میانی می‌باشد، به صورت رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$P_i = \frac{(-D_{pile} \gamma c \cot \varphi)}{4k_0} + \frac{4k_0(hc+z)\tan\varphi}{e^{\frac{D_{pile}}{D_{pile}}}} \frac{(4k_0 q_0 + D_{pile} \gamma c \cot \varphi)}{4k_0} \quad (9)$$

با تقسیم تنش وارده بر روی سر شمع بر مدول الاستیک خاک لایه میانی و انتگرال‌گیری از رابطه به دست آمده در طول ضخامت این لایه، نشست خاک لایه میانی واقع بر سر شمع به دست می‌آید:

$$S_i = \int_{-hc}^0 \frac{P_i}{Ec} dz = \frac{(D_{pile} \cot \varphi)}{16k_0^2 Ec} \times \left( -4k_0 q_0 - 4hc k_0 \gamma c - D_{pile} \gamma c \cot \varphi + \frac{4k_0 hc \tan \varphi}{e^{\frac{D_{pile}}{D_{pile}}}} (4k_0 q_0 + D_{pile} \gamma c \cot \varphi) \right) \quad (10)$$

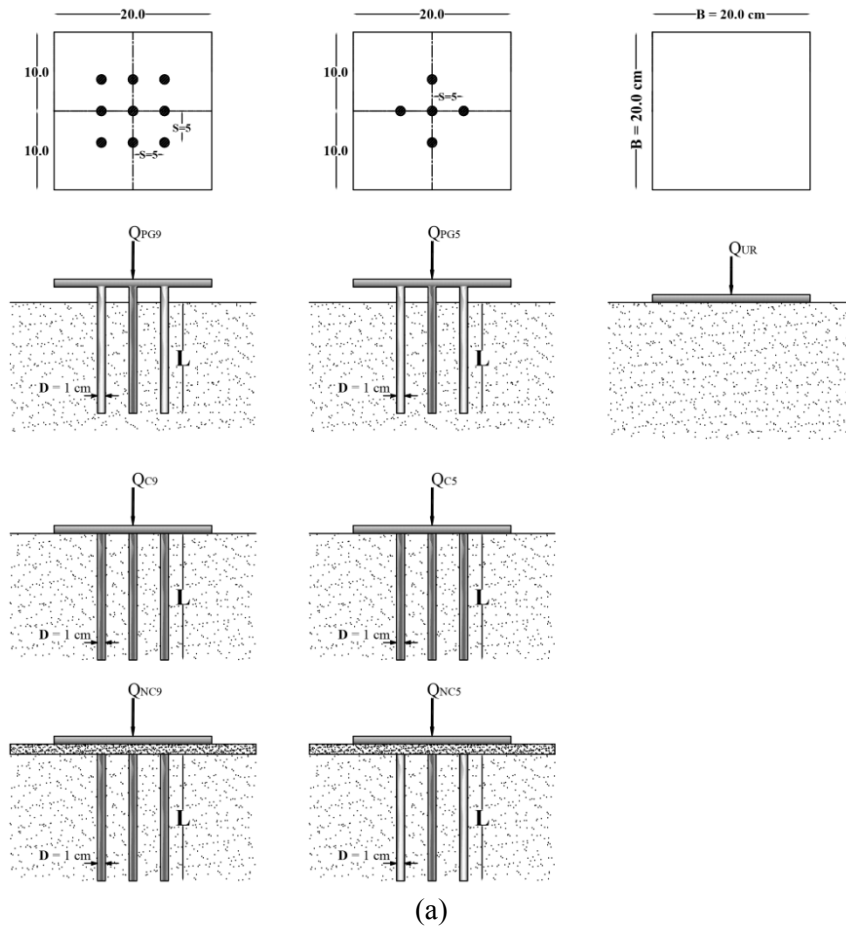
بنابراین با ترکیب رابطه (۱۰) با روابط (۵) و (۶) به ترتیب نشست و سختی پی رادیه شمع غیرمتصل محاسبه می‌گردد. صحت و کاربرد روش تحلیلی ارائه شده توسط نتایج آزمایشها بر روی پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

- 1 Pile group
- 2 Unpiled raft
- 3 Connected piled raft foundation
- 4 Non-connected piled raft foundation

جدول ۱. جزئیات آزمایش های انجام شده

Table 1. Experimental program details

ردیف	نماد	تعداد شمع	ضخامت لایه میانی (mm)	نسبت طول به قطر شمع ها (L/D)	نسبت فاصله به قطر شمع ها (S/D)
۱	UR	---	---	---	---
۲	PG5-10	۵	---	۱۰	۵
۳	PG5-20	۵	---	۲۰	۵
۴	PG9-10	۹	---	۱۰	۵
۵	PG9-20	۹	---	۲۰	۵
۶	C5-10	۵	---	۱۰	۵
۷	C5-20	۵	---	۲۰	۵
۸	C9-10	۹	---	۱۰	۵
۹	C9-20	۹	---	۲۰	۵
۱۰	NC5-10-05	۵	۵	۱۰	۵
۱۱	NC5-20-05	۵	۵	۲۰	۵
۱۲	NC5-10-10	۵	۱۰	۱۰	۵
۱۳	NC5-20-10	۵	۱۰	۲۰	۵
۱۴	NC5-10-20	۵	۲۰	۱۰	۵
۱۵	NC5-20-20	۵	۲۰	۲۰	۵
۱۶	NC9-10-05	۹	۵	۱۰	۵
۱۷	NC9-20-05	۹	۵	۲۰	۵
۱۸	NC9-10-10	۹	۱۰	۱۰	۵
۱۹	NC9-20-10	۹	۱۰	۲۰	۵
۲۰	NC9-10-20	۹	۲۰	۱۰	۵
۲۱	NC9-20-20	۹	۲۰	۲۰	۵



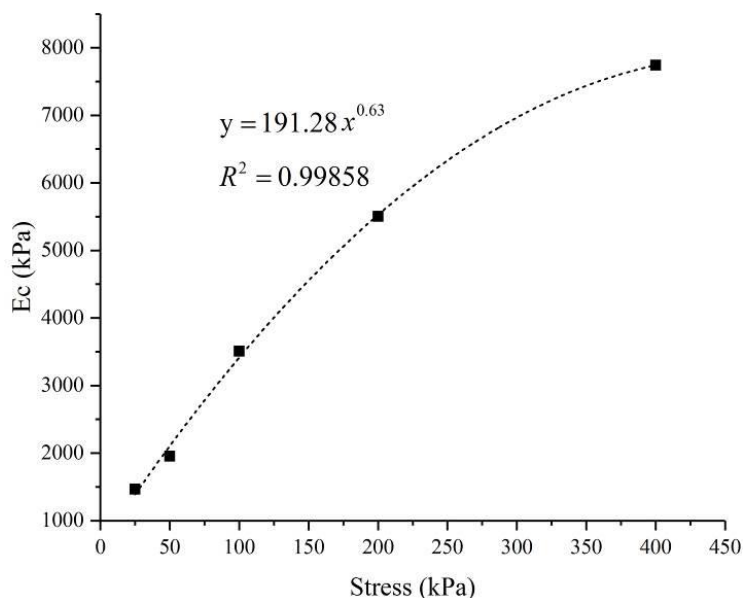
شکل ۳. نمایش شماتیک (a)، تصویر مدل پی رادیه شمع متصل (b)، تصویر نحوه قرارگیری شمع ها در خاک در حالت غیرمتصل (c)

Fig. 3. (a) Model schematic view. (b) picture of connected piled raft foundation model, (c) picture of pile arrangement in the non-connected piled raft in the subsoil

جدول ۲. مشخصات ماسه استفاده شده

Table 2. Physical properties of the tested sands

شاخص	خاک بستر	خاک لایه میانی
چگالی دانه‌ها ( $G_s$ )	۲/۶۵۸	۲/۶۵۸
قطر متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) (mm)	۰/۳۵	۰/۳۵
نسبت تخلخل بیشینه ( $e_{max}$ )	۰/۹۴۳	۰/۹۴۳
نسبت تخلخل کمینه ( $e_{min}$ )	۰/۶۰۳	۰/۶۰۳
نسبت تخلخل اولیه نمونه ( $e$ )	۰/۷۷۳	۰/۶۱۷
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi^\circ$ )	۳۳	۳۶
ضریب یکنواختی ( $C_u$ )	۲/۵۸	۲/۵۸
ضریب انحنای ( $C_c$ )	۰/۶۳	۰/۶۳



شکل ۴. منحنی تغییرات مدول الاستیک خاک لایه میانی با تنش قائم وارده

Fig. 4. Variation of elastic modulus with vertical stress of cushion

تعیین نشست تحکیمی خاک ندارد. در آزمایشهای بارگذاری یک بعدی انجام شده بر روی ماسه با تراکم ۰/۹۶، تنشهای قائم ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه اعمال و نشست اندازهگیری شده است. با در نظرگیری نسبت پواسون ( $\nu = 0.3$ ) برابر با ۰/۳ و اینکه کرنش حجمی ( $\epsilon_v$ ) برابر با کرنش محوری نمونه می باشد، مطابق رابطه (۱۱)

بعدی و در راستای قائم است، بنابراین با انجام آزمایش بارگذاری یک بعدی توسط دستگاه ادنومتر و مطابق نتایج به دست آمده در شکل ۴ رابطه مدول الاستیک با تنش در خاک تعیین شده است. آزمایش ادنومتری تنها به عنوان روشی جهت مطالعه رفتار بار-نشست آبی ماسه خشک در محدوده مشخصی از تنشهای قائم استفاده شد و ارتباطی به کاربرد این آزمایش برای

مدول الاستیک خاک لایه میانی در هر تنش تعیین می گردد.

$$\sigma_v = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} E_c \epsilon_v \quad (11)$$

در شکل ۴ نتایج آزمایش ادنومتر که بیانگر تغییرات تنش قائم با مدول الاستیک خاک لایه میانی است نشان داده شده و رابطه (۱۲) که از برازش نقاط به دست آمده، نشان دهنده تغییرات غیرخطی مدول الاستیک خاک در هر تنش دلخواه می باشد.

$$E_c = 191.28 \sigma_v^{0.63} \quad (12)$$

رابطه توانی بین مدول الاستیک خاک و تنش وارده مشابه روابط به دست آمده در پژوهشهای دیگران می باشد [۲۵].

### ۳-۱-۲- پی، شمع و مخزن خاک

در این پژوهش از صفحه مربعی تهیه شده از فولاد ST-37 با ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ و ضخامت ۱۰ میلیمتر به عنوان پی صلب در آزمایشها استفاده شده است. بر اساس پژوهشهای پیشین و جهت جلوگیری از تأثیر اندازه ذرات ماسه بر روی نتایج، قطر شمع باید حداقل ۲۰ برابر اندازه متوسط ذرات ماسه ( $D_{50}$ ) باشد [۲۶]. بنابراین شمعهای فولادی توپر با سطح مقطع دایروی به قطر ۱۰ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر ( $L/D$ ) برابر با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ استفاده شدند. مدول الاستیسیت و نسبت پواسون فولاد به کار رفته به ترتیب  $21 \times 10^5$  مگاپاسکال و ۰/۲ میباشد. همچنین بر اساس نتایج پژوهشهای پیشین و جهت جلوگیری از تداخل تنش بین شمعها با یکدیگر، فاصله مرکز به مرکز شمعها از یکدیگر ( $S/D$ ) برابر با پنج برابر قطر شمع در نظر گرفته شد [۲۷].

برای جلوگیری از تداخل تنشهای به وجود آمده در پی و شمعها با جداره و کف مخزن، سطح مقطع مخزن خاک باید حداقل دارای طولی معادل با ۵ برابر عرض پی و عمق آن نیز حداقل دو برابر طول بلندترین شمع باشد [۲۹] و [۲۸]. بر این اساس مخزن خاک فولادی با سطح مقطع مربع و ابعاد  $1 \times 1 \times 1$  مترمکعب و ضخامت ۵ میلیمتر که هیچ تأثیری بر روی توزیع تنش خاک زیر پی و شمعها نمی‌گذارد در آزمایشها استفاده شده است.

### ۳-۱-۳- فرآیند مدلسازی فیزیکی آزمایشها

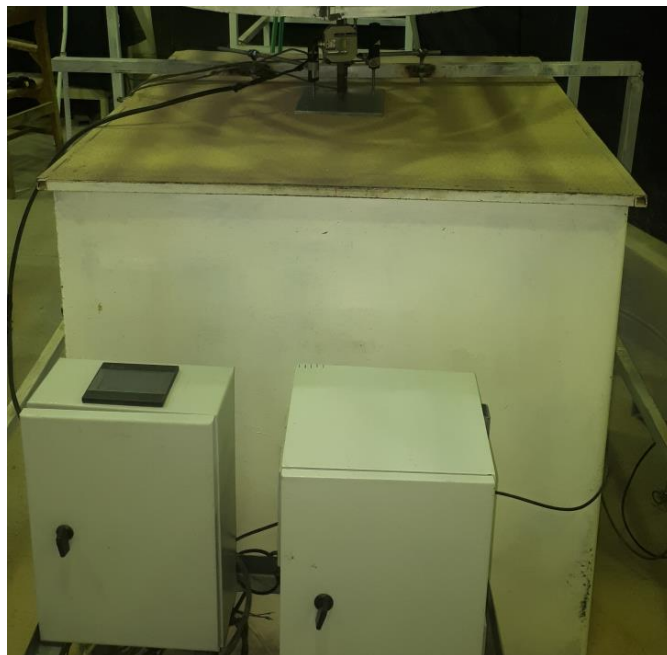
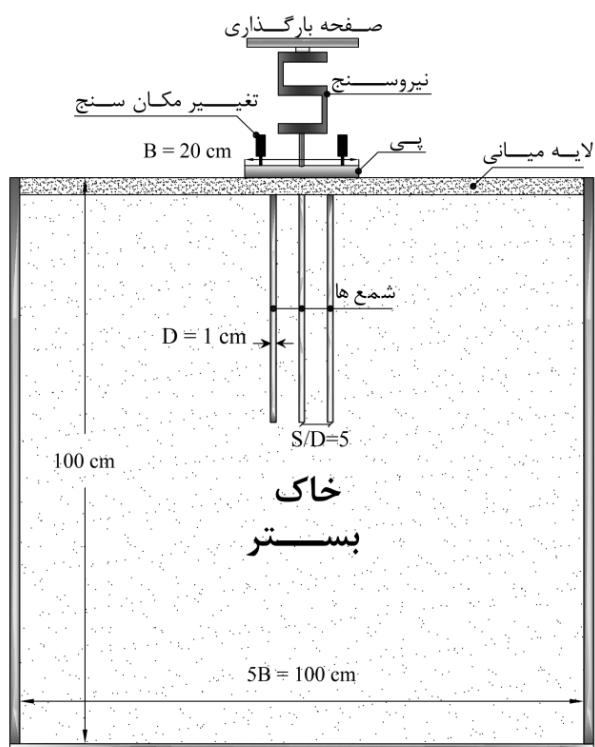
برای ساخت مدل پی رادیه شمع متصل، ابتدا محل استقرار هر شمع توسط شابلون چوبی که بر روی آن محل هر شمع توسط حفرهای مشخص شده، بر روی کف پی علامتگذاری میگردد. سپس شابلون برداشته شده و هر شمع پس از قرارگیری و کنترل قائم بودن (شاغولی)، توسط چسب فولاد به کف پی متصل می شود. چسب استفاده شده موجب ایجاد پیوستگی کامل بین شمع و کف پی بدون نیاز به استفاده از روشهای دیگر مانند جوشکاری که میتواند باعث ایجاد خطا در شاغولی و ساخت مدلهای فیزیکی یکسان شود گردید. سپس نوک شمعها بر روی سطح خاک قرار گرفته و با اعمال نیرو بر سطح پی شمعها به داخل خاک به آرامی رانده می‌شوند تا کف پی تماس بر سطح خاک بستر و در مرکز مخزن خاک مستقر شود.

در حالت غیرمتصل ابتدا شابلون چوبی بر روی سطح خاک بستر و دقیقاً در وسط مخزن خاک قرار گرفته و هر شمع به ترتیب به صورت قائم در حفرهای که بر روی سطح شابلون تعبیه شده مستقر و سپس با اعمال نیرو به آرامی به داخل خاک رانده می شود. پس از قرارگیری تمامی شمعها در محل خود خاک لایه میانی توسط دستگاه بارش خشک خاک بر روی شمعها ریخته میشود. در انتها پی بر روی لایه میانی و دقیقاً در وسط مخزن خاک قرار گرفته و مدل پی رادیه شمع غیرمتصل آماده آزمایش میشود. تصویر نحوه قرارگیری پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل بر روی خاک بستر در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در حالت گروه شمع سطح پی بر روی خاک قرار نمیگیرد. بنابراین از شمعهایی که هر کدام ۵ سانتیمتر بلندتر از شمعهای قرار گرفته در زیر پی بودند استفاده شد. در این حالت مشابه پی رادیه شمع غیرمتصل ابتدا شابلون چوبی بر روی سطح خاک بستر و دقیقاً در وسط مخزن خاک مستقر شده و هر شمع پس از قرارگیری در محل خود به آرامی تا زمانی که ۵ سانتیمتر از طول آن بیرون از خاک بماند به داخل خاک رانده میشود. در انتها صفحه پی با دقت فراوان بر روی سر شمعها مستقر و بار بر روی صفحه پی وارد می شود. به دلیل جدا بودن صفحه پی از سطح خاک تنها ظرفیت باربری گروه شمع در این وضعیت توسط نیروسنج اندازه گیری می شود.

### ۳-۱-۴- تجهیزات ثبت داده ها

مطابق شکل ۵ در دستگاه بارگذاری، بار قائم هیدرولیکی با نرخ ثابت بر روی صفحه بارگذاری وارد و از آنجا پس از عبور از نیروسنج و میله قائم



شکل ۵. تصویر و نمایی شماتیک از دستگاه بارگذاری، مخزن خاک، پی، شمع ها و تجهیزات ثبت داده ها

Fig. 5. Picture and a schematic view of the loading system, soil tank, raft, piles, and measuring devices

ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱ رفتار بار-نشست

در شکل‌های ۹-۶ نمودارهای بار-نشست با تغییر پارامترهای مختلف نشان داده شده است. به دلیل اینکه در نمودارهای بار-نشست پی بدون شمع و پی رادیه شمع هیچ‌گونه نقطه اوجی مشاهده نگردید، بر اساس پیشنهاد محققین و با استفاده از روش متداول  $B/10$  [۳۰]، معیار پایان تمام آزمایشها در بار متناظر با نشست ۲۰ میلی‌متر ( $0/1$  عرض پی) در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل اینکه ظرفیت باربری پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل، ترکیبی از ظرفیت باربری پی بدون شمع و گروه شمع در همان نشست است و هدف در این پژوهش یافتن سختی گروه شمع در نشستی برابر با نشست پی رادیه شمع بوده، بارگذاری بر روی گروه شمع (PG) نیز تا رسیدن به نشست  $0/1$  عرض پی ادامه داشته است.

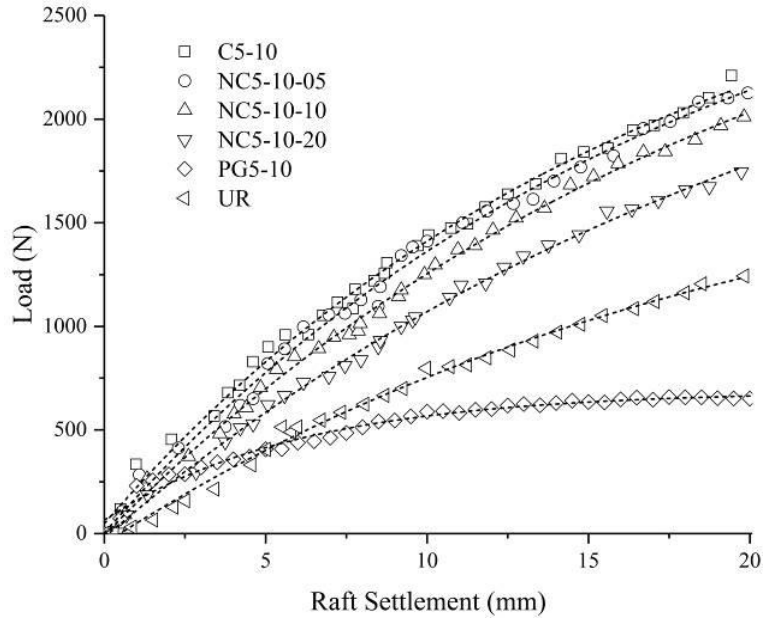
مطابق شکل‌های ۹-۶ با قرارگیری و افزایش طول شمعها در زیر پی

متصل به آن به صورت بار نقطه ای و تدریجی بر روی مرکز سطح پی وارد می شود. یک عدد نیروسنج S شکل که از بالا به صفحه بارگذاری و از پایین به میله قائم صلب متصل است بار قائم وارد بر سطح پی را با دقت  $0/1$  نیوتن اندازه گیری می نماید. با توجه به اینکه بر روی پی بار قائم خالص وارد میشود و نشست آن یکنواخت است بنابراین دو عدد تغییر مکان سنج (LVDT<sup>۱</sup>) با دقت  $0/01$  میلی‌متر که در دو گوشه پی قرار دارند و نشست پی را تحت بار وارده قرائت می کنند. تمامی مقادیر اندازه گیری شده توسط حسگرها در طول آزمایش به وسیله یک عدد دیتالاگر<sup>۲</sup> ثبت می گردند.

#### ۴- نتایج و بحث

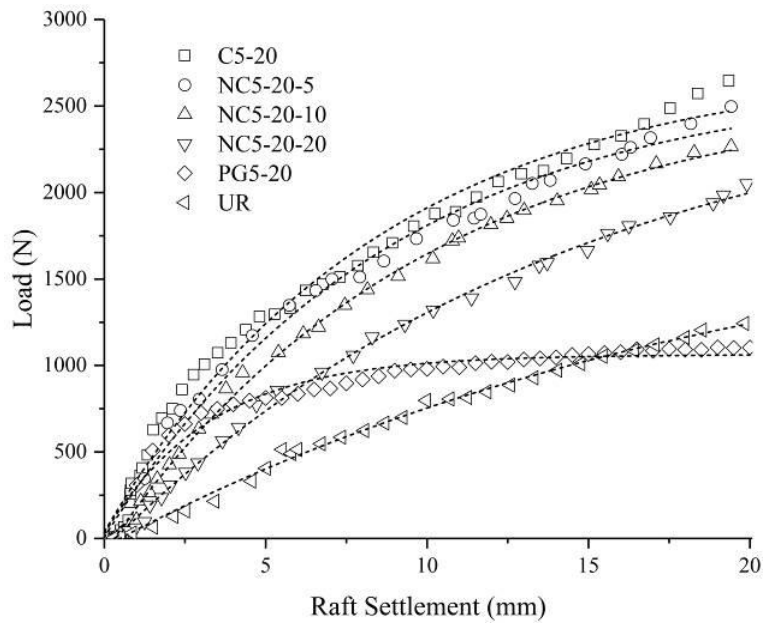
در این بخش نتایج آزمایشها بر روی پی بدون شمع، گروه شمع، پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل ارائه شده و سپس با مقایسه مقادیر سختی (k) تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی با مقادیر آزمایشگاهی صحت روش

- 1 Linear Variable Differential Transformer
- 2 Data logger



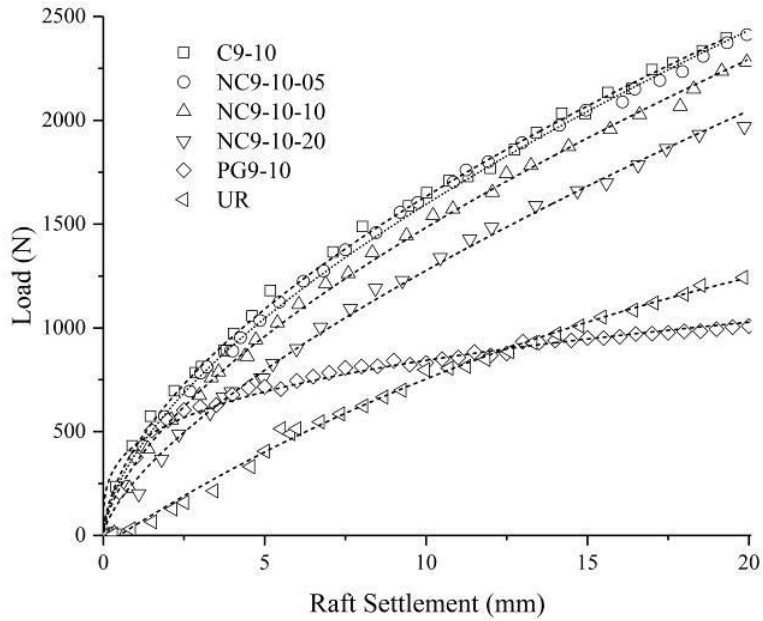
شکل ۶. نمودار بار-نشست پی بدون شمع، پی رادیه شمع متصل، غیرمتصل و گروه شمع ( $N=5, L/D=10$ )

Fig. 6. Load-settlement curve of the unpiled raft, connected and non-connected piled raft and pile group ( $N=5, L/D=10$ )



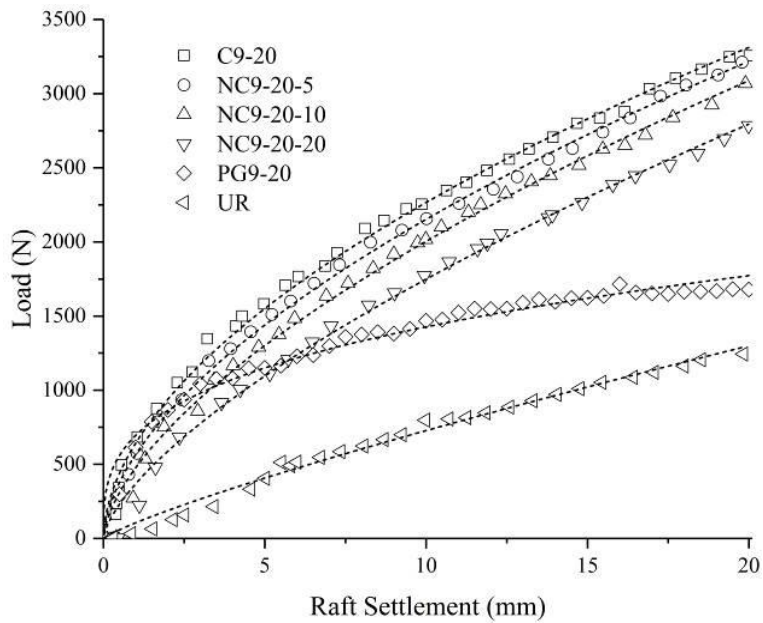
شکل ۷. نمودار بار-نشست پی بدون شمع، پی رادیه شمع متصل، غیرمتصل و گروه شمع ( $N=5, L/D=20$ )

Fig. 7. Load-settlement curve of the unpiled raft, connected and non-connected piled raft and pile group ( $N=5, L/D=20$ )



شکل ۸. نمودار بار-نشست پی بدون شمع، پی رادیه شمع متصل، غیرمتصل و گروه شمع ( $N=9, L/D=10$ )

Fig. 8. Load-settlement curve of the unpiled raft, connected and non-connected piled raft and pile group ( $N=9, L/D=10$ )



شکل ۹. نمودار بار-نشست پی بدون شمع، پی رادیه شمع متصل، غیرمتصل و گروه شمع ( $N=9, L/D=20$ )

Fig. 9. Load-settlement curve of the unpiled raft, connected and non-connected piled raft and pile group ( $N=9, L/D=20$ )



و بر اساس پژوهشهای پیشین [۳۱]، در محدوده قابل قبول می باشد. همچنین مقادیر آزمایشگاهی سختی پی رادیه شمع متصل با مقادیر به دست آمده از روش پولوس [۵] که در کتب مرجع جهت تخمین سختی پی رادیه شمع معرفی شده مقایسه شده اند. سختی پی رادیه شمع در این روش برابر است با:

$$kpr = \frac{kp + kr(1 - \alpha rp)}{1 - \alpha rp^2 krkp} \quad (۱۳)$$

در رابطه ۱۳،  $kpr$  سختی پی رادیه شمع،  $kp$  سختی گروه شمع،  $kr$  سختی پی بدون شمع می باشند؛  $\alpha rp$  که ضریب اندرکنش پی-شمع نامیده می شود توسط رابطه ۱۴ به دست می آید.

$$\alpha rp = 1 - \frac{\ln\left(\frac{rc}{r0}\right)}{\ln\left(\frac{rm}{r0}\right)} \quad (۱۴)$$

$r0$  شعاع شمع،  $rc$  شعاع سر شمع (حاصل تقسیم مساحت پی بر تعداد شمعها) و  $rm$  برابر است با:

$$rm = [0.25 + \xi(2.5\rho(1 - \nu) - 0.25)] \times L \quad (۱۵)$$

در رابطه ۱۵،  $\nu$  نسبت پواسون خاک بستر و  $L$  طول شمع میباشد. همچنین به دلیل یکنواخت بودن شرایط در خاک بستر مقادیر  $\xi$  و  $\rho$  برابر با ۱ در نظر گرفته شده اند. با مقایسه نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می شود که در روش پولوس تا ۴۰٪ و در مدل ارائه شده حدود ۲۰٪ اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده شده وجود دارد. بنابراین مدل ارائه شده در این پژوهش با دقت به مراتب بالاتری نسبت به روش پولوس می تواند سختی پی رادیه شمع را تخمین بزند.

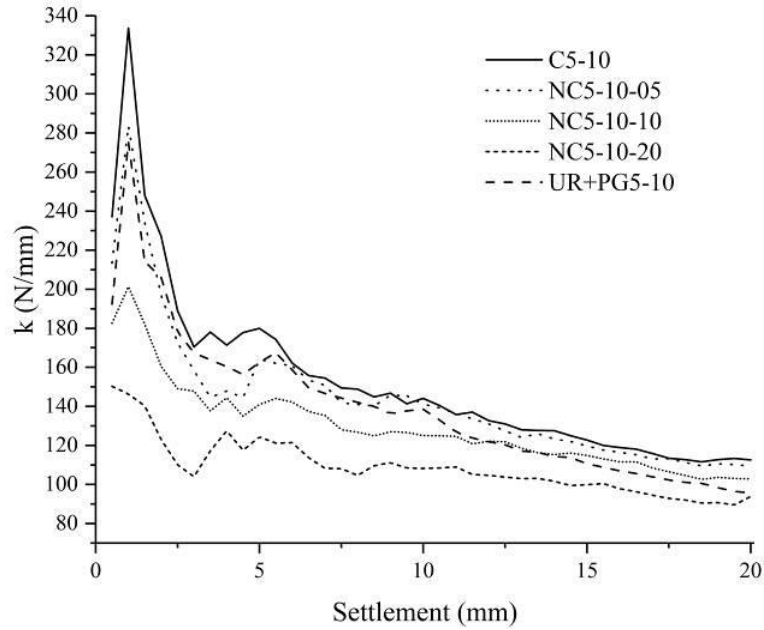
همچنین در شکل‌های ۱۹-۱۶ تغییرات سختی پی رادیه شمع غیرمتصل در نشستهای ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر توسط مدل محاسبه و نتایج نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می شود روند تغییرات سختی مشابه نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل‌های ۱۰-۱۳ بوده و نیز با افزایش ضخامت لایه میانی، سختی پی رادیه شمع غیرمتصل کاهش یافته است. بنابراین مدل ارائه شده می تواند با لحاظ نمودن تأثیر ضخامت لایه میانی و

چه به صورت متصل و یا غیرمتصل و انتقال بخشی از نیروی کل وارده به شمعها و ایجاد اصطکاک جانبی بین جداره شمع با خاک پیرامون، ظرفیت باربری افزایش می یابد. از سوی دیگر در پی رادیه شمع با جدا شدن شمعها از پی و افزایش ضخامت لایه میانی که وظیفه انتقال و توزیع یکنواخت بار از پی به شمعها را دارد و به دلیل وجود اختلاف نشست بین شمع و خاک لایه میانی در تراز سر شمع، در قسمت فوقانی شمع اصطکاک منفی به وجود می‌آید (شکل ۱). اصطکاک منفی به وجود آمده و قابلیت فشردگی لایه میانی موجب کاهش سختی و ظرفیت باربری پی رادیه شمع غیرمتصل نسبت به حالت متصل می گردد. برای بررسی دقیقتر نمودارهای تغییرات سختی با نشست پی رادیه شمع متصل، غیرمتصل و مجموع پی بدون شمع و گروه شمع در هر حالت مشخص بر اساس نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۱۳-۱۰ نشان داده شده‌اند. سختی به دست آمده بر اساس رابطه ۲، حاصل تقسیم بار وارده به جابجایی متناظر می باشد.

به دلیل اینکه با افزایش نشست تنش بیشتری نسبت به مراحل ابتدایی بارگذاری توسط پی سطحی به شمعها و خاک منتقل می‌گردد و به مرور بین تنشهای به وجود آمده در کف پی و جداره شمعها تداخل به وجود می آید، این تداخل تنش منجر به کاهش تأثیر مثبت شمعها در زیر پی میگردد. مطابق نتایج به دست آمده نیز ابتدا سختی افزایش یافته و پس از رسیدن به بیشینه مقدار خود به دلیل اندرکنشهای مختلف بین شمع- خاک- پی کاهش مییابد. افزایش تعداد و طول شمع هر دو باعث انتقال سهم بیشتری از بار به شمعها، افزایش سختی و ظرفیت باربری پی رادیه شمع می گردد. در هر حالت مشخص، سختی پی رادیه شمع متصل بیشتر از پی رادیه شمع غیرمتصل بوده و در پی رادیه شمع غیرمتصل با افزایش ضخامت لایه میانی سختی کاهش مییابد. علت این پدیده ارتباط مستقیم ضخامت لایه میانی با طول ناحیه اصطکاک منفی در قسمت فوقانی شمع و نیز قابلیت فشردگی لایه میانی می باشد.

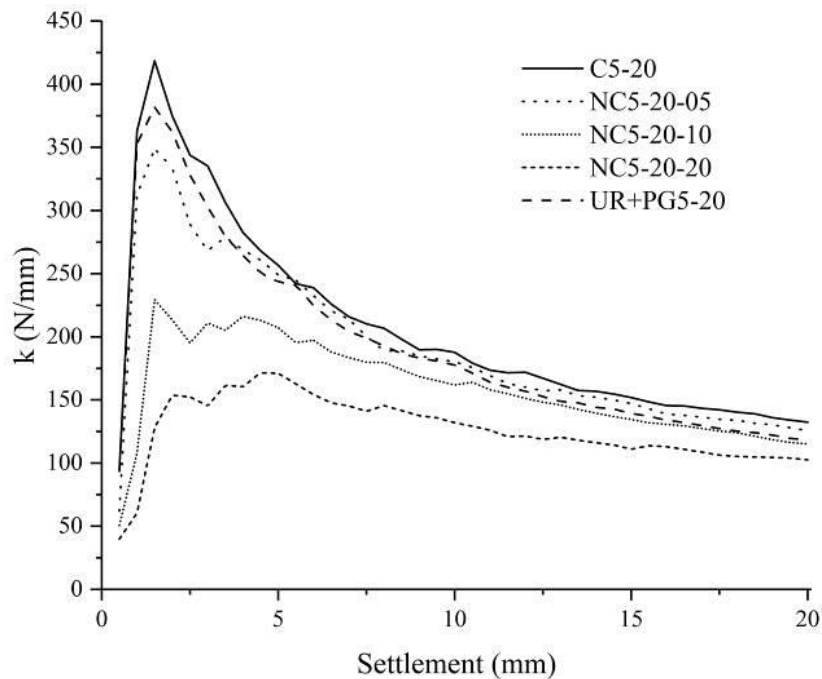
#### ۴-۲- صحت سنجی مدل تحلیلی

در مدل ارائه شده و بر اساس نتایج آزمایش بر روی گروه شمع و پی بدون شمع و روابط به دست آمده، سختی پی رادیه شمع جدا و متصل را میتوان تخمین زد. جهت صحت سنجی مدل تحلیلی مقادیر سختی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی با مقادیر تخمین زده شده تحلیلی مقایسه و نتایج در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج اختلاف سختی در حالت متصل کمتر از ۱۸٪ و در حالت غیرمتصل بین (۲۰- تا ۲۵+) درصد



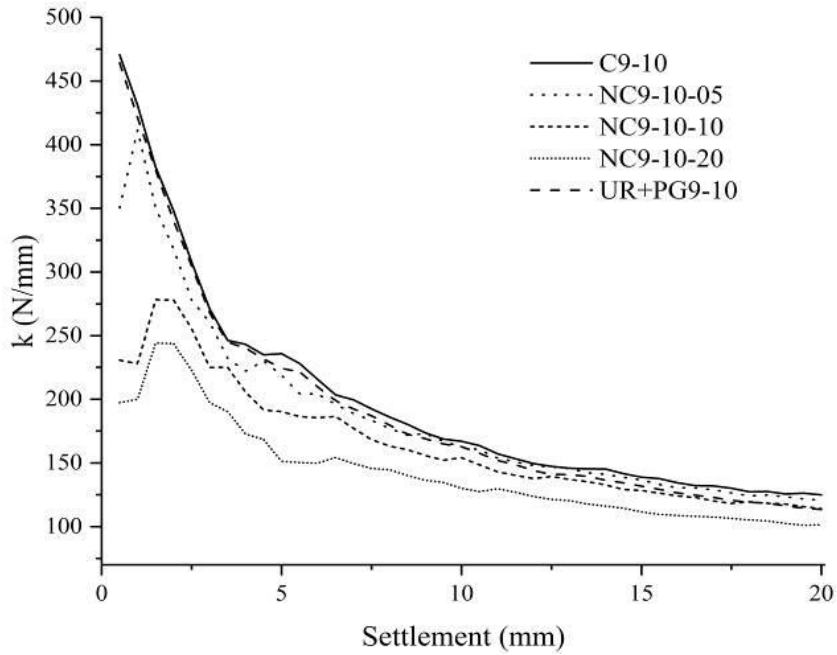
شکل ۱۰. تغییرات سختی-نشست مجموع پی بدون شمع و گروه شمع، پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل ( $N=5, L/D=10$ )

Fig. 10. Variation of stiffness with the settlement for the combination of the unpiled raft and pile group, connected and non-connected piled raft ( $N=5, L/D=10$ )



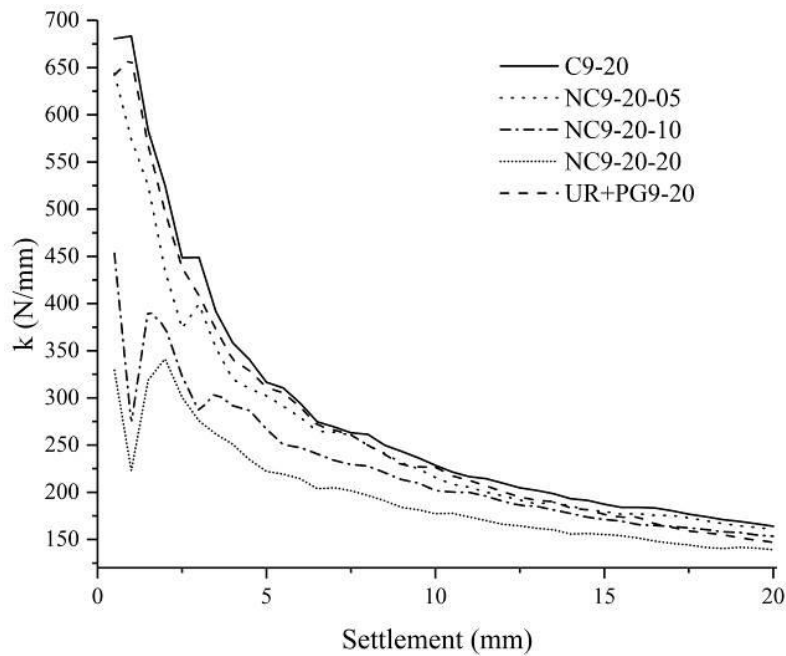
شکل ۱۱. تغییرات سختی-نشست مجموع پی بدون شمع و گروه شمع، پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل ( $N=5, L/D=20$ )

Fig. 11. Variation of stiffness with the settlement for the combination of the unpiled raft and pile group, connected and non-connected piled raft ( $N=5, L/D=20$ )



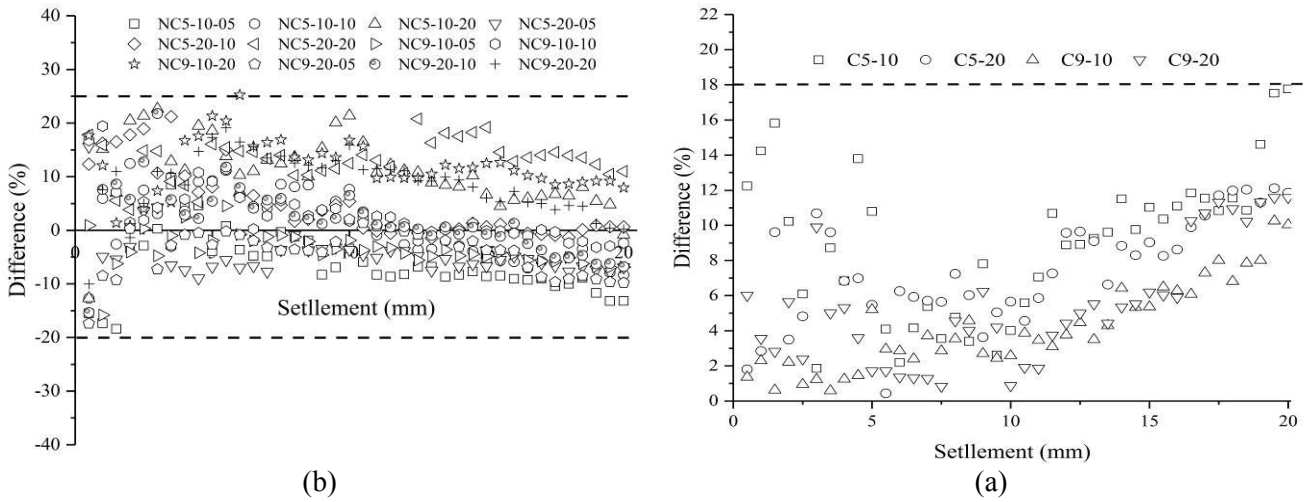
شکل ۱۲. تغییرات سختی-نشست مجموع پیل بدون شمع و گروه شمع، پیل رادیه شمع متصل و غیرمتصل ( $N=9, L/D=10$ )

Fig. 12. Variation of stiffness with the settlement for the combination of the unpiled raft and pile group, connected and non-connected piled raft ( $N=9, L/D=10$ )



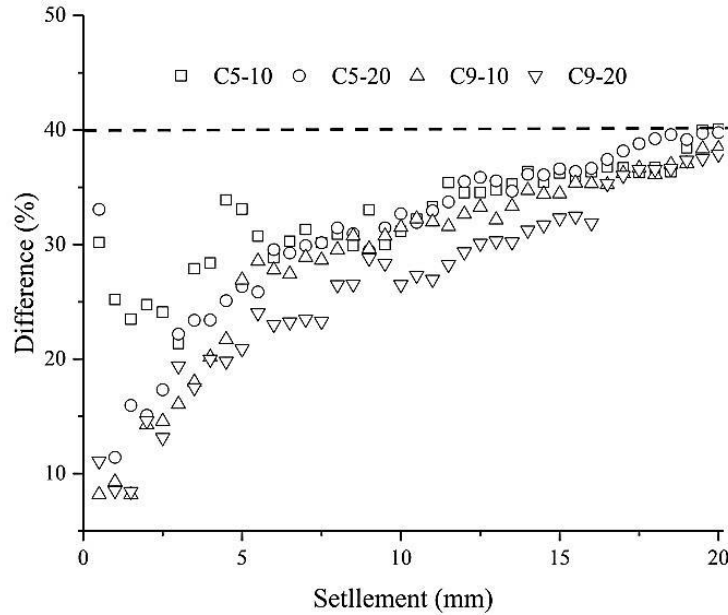
شکل ۱۳. تغییرات سختی-نشست مجموع پیل بدون شمع و گروه شمع، پیل رادیه شمع متصل و غیرمتصل ( $N=9, L/D=20$ )

Fig. 13. Variation of stiffness with the settlement for the combination of the unpiled raft and pile group, connected and non-connected piled raft ( $N=9, L/D=20$ )



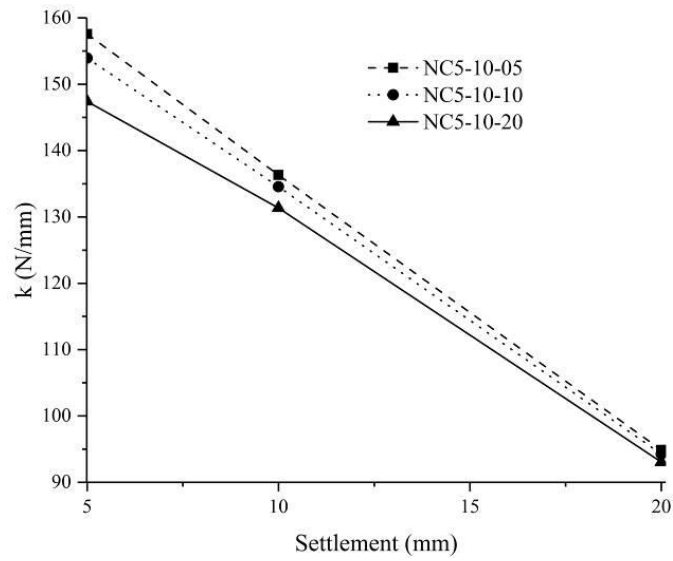
شکل ۱۴. تغییرات اختلاف سختی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط مدل (a) در پی رادیه شمع های متصل، (b) در پی رادیه شمع های غیرمتصل

Fig. 14. The difference between experimental and analytical results of stiffness for (a) Connected piled rafts. (b) Non-connected piled rafts



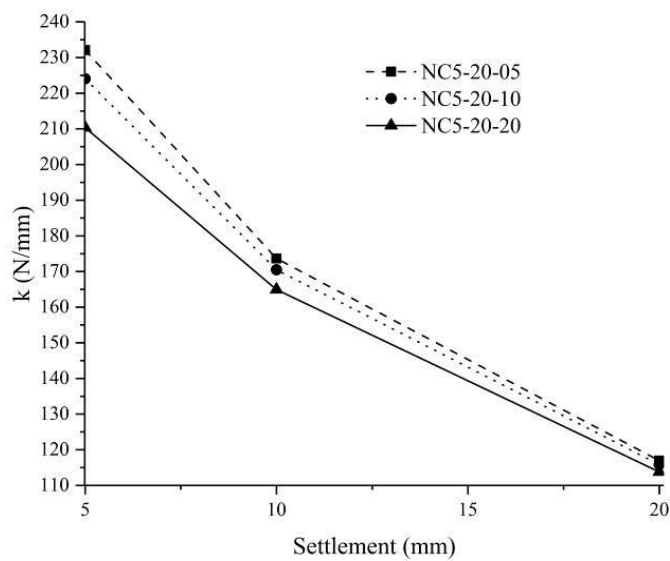
شکل ۱۵. تغییرات اختلاف سختی پی رادیه شمع به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط روش پولوس

Fig. 15. Variation of stiffness difference between the experimental results and estimated by Polous method



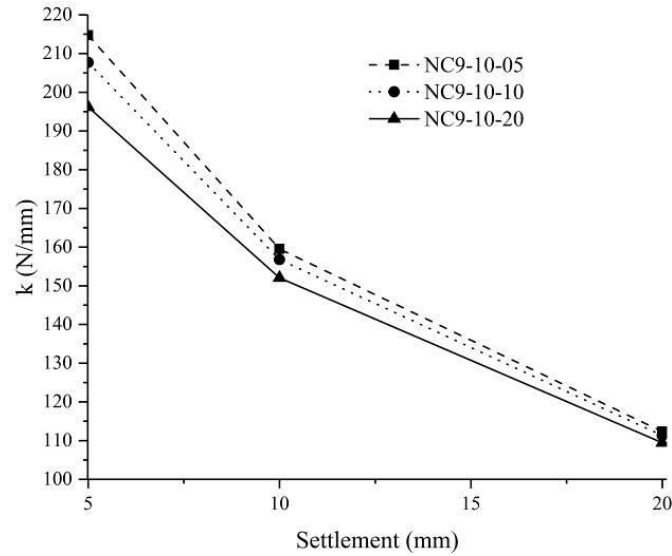
شکل ۱۶. تغییرات سختی-نشست پی رادیه شمع غیرمتصل محاسبه شده توسط مدل (N=5, L/D=10)

Fig. 16. Variation of analytical stiffness-settlement results for non-connected piled raft (N=5, L/D=10)



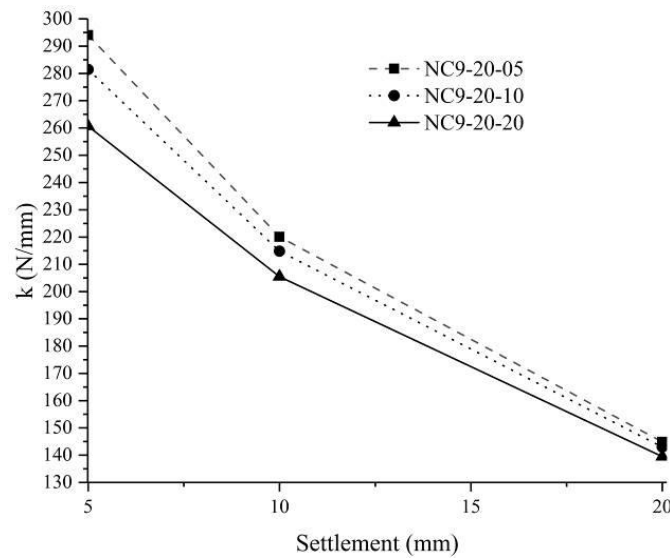
شکل ۱۷. تغییرات سختی-نشست پی رادیه شمع غیرمتصل محاسبه شده توسط مدل (N=5, L/D=20)

Fig. 17. Variation of analytical stiffness-settlement results for non-connected piled raft (N=5, L/D=20)



شکل ۱۸. تغییرات سختی-نشست پی رادیه شمع غیرمتصل محاسبه شده توسط مدل ( $N=9, L/D=10$ )

Fig. 18. Variation of analytical stiffness-settlement results for non-connected piled raft ( $N=9, L/D=10$ )



شکل ۱۹. تغییرات سختی-نشست پی رادیه شمع غیرمتصل محاسبه شده توسط مدل ( $N=9, L/D=20$ )

Fig. 19. Variation of analytical stiffness-settlement results for non-connected piled raft ( $N=9, L/D=20$ )

با دقت مناسب سختی پی رادیه شمع غیرمتصل و متصل را محاسبه نماید.

#### ۳-۴- تعیین سهم باربری شمعها

نسبت سهم باربری شمعها ( $\alpha_{pr}$ ) در پی رادیه شمع برابرست با:

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} \quad (16)$$

که در آن  $Q_p$  و  $Q_{pr}$  به ترتیب بیانگر بار تحمل شده توسط شمعها و پی رادیه شمع می باشد.

در پی رادیه شمع متصل نشست شمعها با پی برابر می باشد ( $w_{pr} = w_p$ ) و بر اساس رابطه ۴ نسبت سهم باربری شمعها برابر است با:

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} = \frac{k_p w_p}{(k_r + k_p) w_r} = \frac{1}{\frac{k_r}{k_p} + 1} \quad (17)$$

در حالت غیرمتصل و بر اساس رابطه های ۵ و ۶ نسبت سهم باربری شمعها برابر است با:

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} = \frac{k_p w_p}{\left(k_r + \frac{k_p w_p}{w_p + s_i}\right)(w_p + s_i)} = \frac{w_p}{\frac{k_r}{k_p}(w_p + s_i) + w_p} \quad (18)$$

بر اساس آزمایشهای انجام شده در این پژوهش بر روی پی بدون شمع، گروه شمع و بر اساس روابط به دست آمده در مدل تحلیلی ارائه شده، روند تغییرات سهم باربری شمعها در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل با تغییر تعداد و طول شمعها و ضخامت لایه میانی در شکلهای ۲۳-۲۰ نشان داده شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل، افزایش طول و تعداد شمعها به دلیل اینکه سطح باربر و قابلیت تحمل بار شمع را افزایش می دهد، منجر به افزایش سهم باربری شمعها می گردند.

در پی رادیه شمع غیرمتصل و بر اساس رابطه ۱۰ افزایش ضخامت لایه میانی منجر به افزایش فشردگی این لایه میگردد. به دلیل وجود اختلاف سختی بین شمع و خاک بستر و نشست کمتر سر شمع نسبت به خاک اطراف، با افزایش ضخامت لایه میانی اختلاف نشست بین شمع و خاک اطراف در ناحیه فوقانی شمع افزایش می یابد. نشست بیشتر خاک بستر منجر به ایجاد ناحیه اصطکاک منفی در قسمت فوقانی شمع می گردد [۱۷]. افزایش ضخامت لایه میانی با افزایش طول ناحیه اصطکاک منفی شمع منجر به کاهش سهم باربری شمعها از کل بار وارده می گردد. از سوی دیگر با شروع بارگذاری شمعها بیشترین سهم بار خود را از کل بار وارده دریافت کرده و با افزایش نشست و ایجاد اندرکنش بین شمع و پی و افزایش تراکم دانه های خاک در سطح تماس پی با خاک بستر در مقایسه با ابتدای بارگذاری، از سهم باربری شمعها کاسته و به سهم باربری پی افزوده می شود.

#### ۵- نتیجه گیری

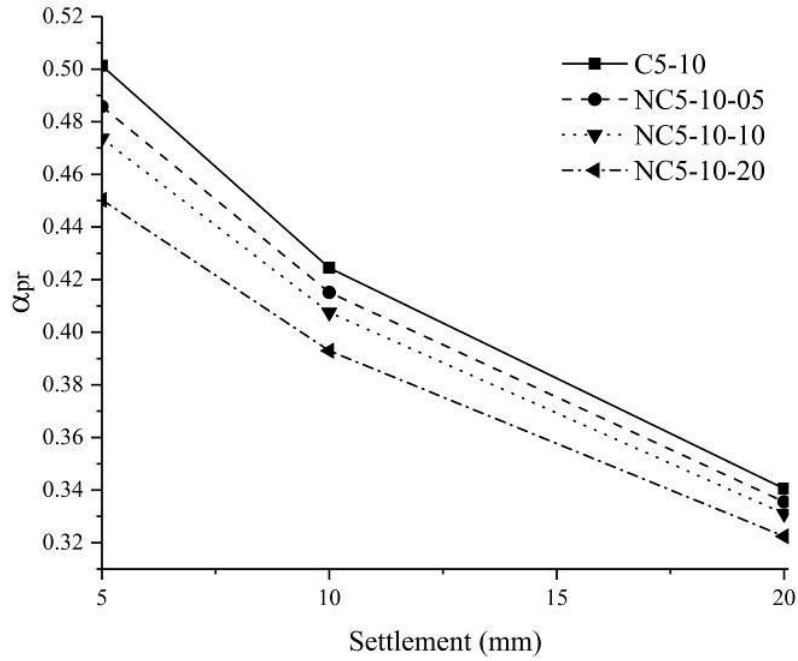
در این پژوهش مدلی تحلیلی جهت تعیین سهم باربری شمعها و سختی پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل ارائه شده است. صحت و دقت مدل با انجام ۲۱ آزمایش با تغییر تعداد و طول شمعها و ضخامت لایه میانی بر روی پی رادیه شمع غیرمتصل و متصل، گروه شمع و پی بدون شمع مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده میتوان به طور خلاصه به نکات زیر اشاره نمود.

- ظرفیت باربری پی رادیه شمع به دلیل ترکیب تأثیر پی و شمعها در انتقال بار به خاک، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با گروه شمع دارد. افزایش تعداد و طول شمع در تمام حالتها در زیر پی منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می گردد. بر اساس نتایج، ظرفیت باربری پی رادیه شمع با ۵ شمع در پایان بارگذاری، ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بیشتر از پی بدون شمع و ۳۰۰ تا ۴۰۰ درصد بیشتر از گروه شمع می باشد.

- در پی رادیه شمع غیرمتصل به دلیل عدم اتصال شمع به پی، تمرکز تنش و لنگر در سر شمع به وجود نمی‌آید و قابلیت بهره گیری از تمام ظرفیت باربری ژئوتکنیکی شمعها وجود دارد.

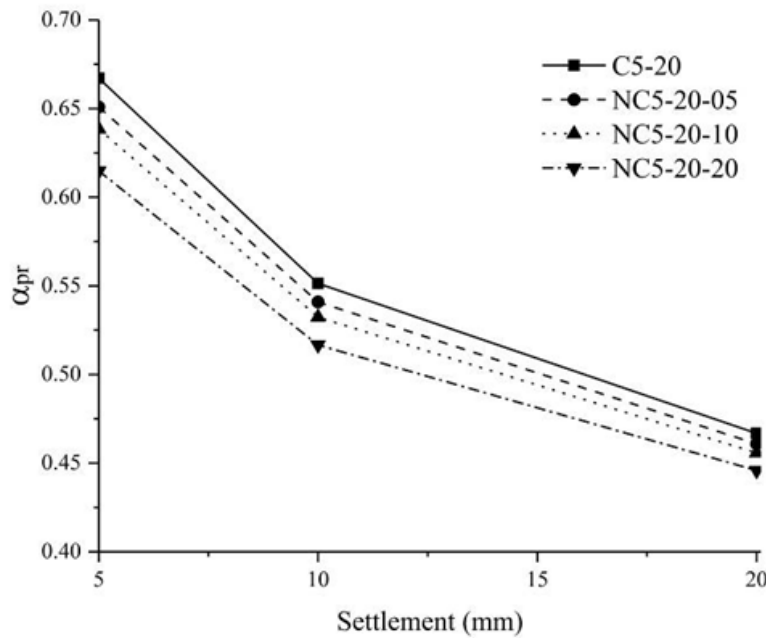
- لایه میانی در پی رادیه شمع غیرمتصل باعث توزیع یکنواخت بار بین سر شمعها می شود. اختلاف سختی بین شمعها و خاک بستر و نیز قابلیت فشردگی لایه میانی موجب نشست غیریکنواخت در سر شمعها و ایجاد اصطکاک منفی در ناحیه فوقانی شمعها می گردد.

- افزایش ضخامت لایه میانی باعث کاهش سهم باربری شمعها



شکل ۲۰. تغییرات سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل با نشست (N=5, L/D=10)

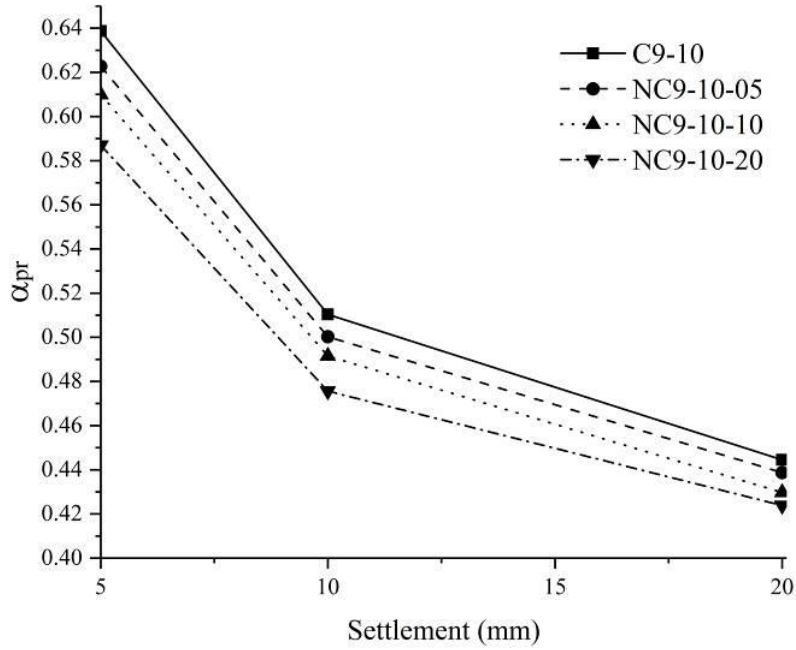
Fig. 20. Variation of piles load sharing ratio versus settlement in the connected and non-connected piled raft (N=5, L/D=10)



شکل ۲۱. تغییرات سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل با نشست (N=5, L/D=20)

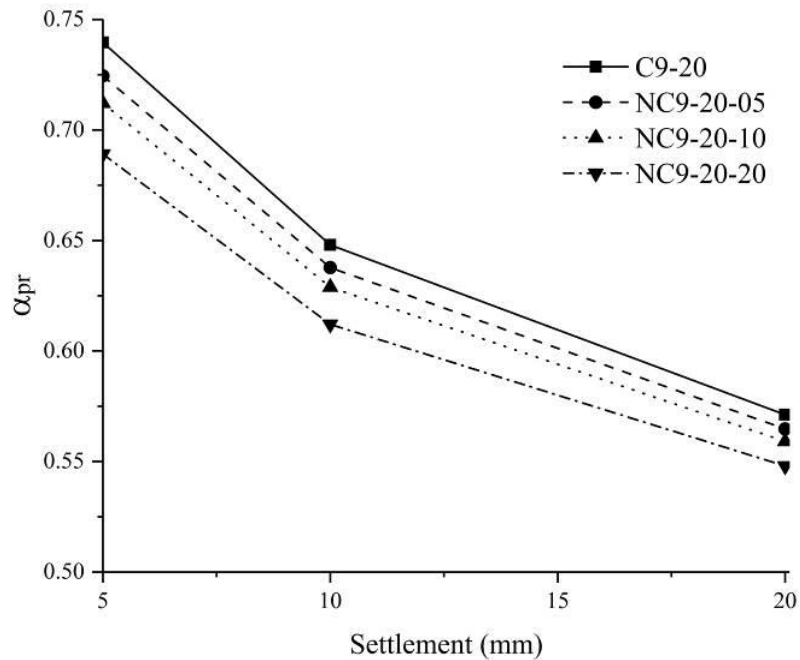
Fig. 21. Variation of piles load sharing ratio versus settlement in the connected and non-connected piled raft (N=5, L/D=20)





شکل ۲۲. تغییرات سهم باربری شمع ها در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل با نشست (N=9, L/D=10)

Fig. 22. Variation of piles load sharing ratio versus settlement in the connected and non-connected piled raft (N=9, L/D=10)



شکل ۲۳. تغییرات سهم باربری شمع ها در پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل با نشست (N=9, L/D=20)

Fig. 23. Variation of piles load sharing ratio versus settlement in the connected and non-connected piled raft (N=9, L/D=20)

- [7] M.F. Randolph, Science and empiricism in pile foundation design, *Géotechnique*, 53(10) (2003) 847-875.
- [8] V. Fioravante, D. Giretti, Contact versus noncontact piled raft foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(11) (2010) 1271-1287.
- [9] D. Park, J. Lee, Comparative analysis of various interaction effects for piled rafts in sands using centrifuge tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1) (2015) 04014082.
- [10] M. El Sawwaf, Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(10) (2010) 1394-1402.
- [11] H. Rasouli, B. Fatahi, A novel cushioned piled raft foundation to protect buildings subjected to normal fault rupture, *Computers and Geotechnics*, 106 (2019) 228-248.
- [12] I. Wong, M. Chang, X. Cao, settlement-reducing piles, *Design applications of raft foundations*, (2000) 469.
- [13] X.D. Cao, I.H. Wong, M.-F. Chang, Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(2) (2004) 129-138.
- [14] A.T. Ghalesari, H. Rasouli, Effect of Gravel Layer on the Behavior of Piled Raft Foundations, in: *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, 2014, pp. 373-382.
- [15] M. Jamiolkowski, G. Ricceri, P. Simonini, Safeguarding Venice from high tides: site characterization and geotechnical problems, in: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, Citeseer, 2009, pp. 5-9.
- [16] U. Okyay, D. Dias, L. Thorel, G. Rault, Centrifuge modeling of a pile-supported granular earth-platform, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2) (2014) 04013015.
- [17] V. Fioravante, Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer, *Géotechnique*, 61(2) (2011) 121-132.
- [18] A. Saeedi Azizkandi, M.H. Baziar, H. Rasouli, M.

و سختی پی رادیه شمع غیرمتصل نسبت به حالت مشابه متصل می گردد. شمعها در ابتدای بارگذاری بیشترین سهم باربری خود را دارند و در ادامه به دلیل ایجاد اندرکنشهای مختلف سهم باربری شمعها کاهش می یابد. در این پژوهش با افزایش ضخامت لایه میانی از ۵ به ۱۵ میلیمتر، بین ۳ تا ۱۰ درصد و با افزایش نشست ۱۵ تا ۲۰ درصد سهم باربری شمعها کاهش یافته است.

- مدل تحلیلی ارائه شده بر اساس نتایج آزمایش بر روی پی بدون شمع و گروه شمع قابلیت تخمین سهم باربری شمعها و سختی پی رادیه شمع متصل و غیرمتصل را دارد. مدل ارائه شده با اختلاف کمتر از ۲۰ درصد با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد در حالی که در روشهای تحلیلی مشابه این اختلاف به حدود ۴۰ درصد می رسد.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از جناب آقای دکتر احمد آفتابی ثانی به دلیل راهنمایی و کمکهای ایشان جهت پیشبرد این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارند. تمامی آزمایشها در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه فردوسی مشهد و با حمایت این دانشگاه انجام شدند

## منابع

- [1] K. Horikoshi, M. Randolph, A contribution to optimum design of piled rafts, *Geotechnique*, 48(3) (1998) 301-317.
- [2] A. Mandolini, C. Viggiani, Settlement of piled foundations, *Géotechnique*, 47(4) (1997) 791-816.
- [3] W.A. Prakoso, F.H. Kulhawy, Contribution to piled raft foundation design, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1) (2001) 17-24.
- [4] B. Jayalekshmi, S. Jisha, R. Shivashankar, Response in piled raft foundation of tall chimneys under along-wind load incorporating flexibility of soil, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 9(3) (2015) 307-322.
- [5] H. Poulos, Piled raft foundations: design and applications, *Geotechnique*, 51(2) (2001) 95-113.
- [6] H.G. Poulos, Pile behavior—Consequences of geological and construction imperfections, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(5) (2005) 538-563.

- of Engineering, 30(10) (2017) 1451-1463.
- [25] J.M. Duncan, C.-Y. Chang, Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, (1970).
- [26] M.D. Bolton, M.-W. Gui, J. Garnier, J.F. Corte, G. Bagge, J. Laue, R. Renzi, Centrifuge cone penetration tests in sand, *Géotechnique*, 49(4) (1999) 543-552.
- [27] S.-H. Lee, C.-K. Chung, An experimental study of the interaction of vertically loaded pile groups in sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5) (2005) 1485-1493.
- [28] B. El-Garhy, A.A. Galil, A.-F. Youssef, M.A. Raia, Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5) (2013) 389-399.
- [29] J.D. Patil, S.A. Vasanvala, C.H. Solanki, An experimental study on behaviour of piled raft foundation, *Indian Geotechnical Journal*, 46(1) (2016) 16-24.
- [30] J. Briaud, P. Jeanjean, LOAD SETTLEMENT CURVE METHOD FOR SPREAD FOOTINGS ON SAND. DISCUSSION, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(9) (1995).
- [31] A. Kumar, D.J.C. Choudhury, *Geotechnics*, Development of new prediction model for capacity of combined pile-raft foundations, 97 (2018) 62-68.
- Modarresi, H. Shahnazari, Centrifuge modeling of non-connected piled raft system, *International Journal of Civil Engineering*, 13(2) (2015) 114-123.
- [19] F. Tradigo, F. Pisanò, C. Di Prisco, A. Mussi, Non-linear soil-structure interaction in disconnected piled raft foundations, *Computers and Geotechnics*, 63 (2015) 121-134.
- [20] B. Hamidi, F. Masse, J. Racinais, S. Varaksin, The boundary between deep foundations and ground improvement, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 169(2) (2016) 201-213.
- [21] H. Rasouli, A.T. Ghalesari, M. Modarresi, A. Hasanzadeh, Numerical study of non-contact piled raft interaction under static loads, *Civil engineering and urban planning*, (2017) 750-762.
- [22] R. Chen, Y. Chen, J. Han, Z. Xu, A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one-dimensional compression, *Canadian Geotechnical Journal*, 45(5) (2008) 611-623.
- [23] R. Rui, J. Han, Y.-q. Ye, C. Chen, Y.-x. Zhai, Load Transfer Mechanisms of Granular Cushion between Column Foundation and Rigid Raft, *International Journal of Geomechanics*, 20(1) (2020) 04019139.
- [24] M. Abdollahi, J. Bolouri Bazaz, Reconstitution of Sand Specimens Using a Rainer System, *International Journal*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Malekkhani, J. Bolouri Bazaz, *Experimental and Analytical Study of connected and non-connected piled raft foundations*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) (2022) 5195-5218.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18726.6942](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18726.6942)



