



## New equation to determine the load percentage carried by raft in piled raft foundations

A. Asadinia, S. Amirafshari, A. Ghanbari\*

Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Piled raft foundations are an effective and economical system in case of high-rise buildings and are a suitable alternative to conventional deep foundations. In this type of foundations, raft is in direct contact with the soil and hence it carries a significant portion of the load. Regarding the design of piled raft foundations, one of the most important issues is to determine the proportion of load carried by the raft. In this paper, numerical analyses using the Finite Element Method (FEM) were carried out by developing 3D finite element models and with considering interaction effects for a piled raft foundation, the effective factors and their impact on load percentage carried by raft, are investigated. In addition, a new equation for determining the load percentage carried by raft in granular soil is proposed for a group less than a 9x9 pile configuration. The developed model is verified with available experimental results. The results of numerical analyses show that the load percentage carried by the raft is significantly affected by several parameters, such as the distance of the piles from each other, the diameter of the piles, the internal friction angle of the soil and the number of piles in the group. In the current study, from the numerical analyses, it has been observed that the percentage of the raft carried load in piled raft system varies from 15% to 42% of the applied load.

### Review History:

Received: May, 16, 2021  
Revised: Aug. 28, 2021  
Accepted: Jan. 10, 2022  
Available Online: Feb. 10, 2022

### Keywords:

Cap  
Granular soil  
Piled raft  
Finite Element Method  
ABAQUS

### 1- Introduction

The concept of a piled raft system was first introduced by Davis and Poulos in 1972 [1]. To determine the proportion of load sharing of the raft, several studies have been performed by many researchers. Cook et al. (1986) first stated that rafts could carry up to 30% of the total structural loads [2]. Hemsley (2000) reported that the raft could carry up to 50% of the building loads [3]. Other researchers, by conducting various studies, have estimated the bearing capacity of the raft from the total load to be more or less between 20% and 60% [4-7].

The overall objective of this study focuses on investigating the bearing behavior of a piled raft foundations on granular soils under vertical loading by using 3D analysis model in ABAQUS finite element software. The validation of the present piled raft model was done by a comparison with a Small scale model tests, which was carried out by Elwakil and Azzam (2015) [8]. Then, a series of numerical analyses was performed for various distances and diameters of the piles, the different numbers of piles in the pile group and three internal friction angles of soil, so the proportion of load taken by raft from the total load in different conditions is determined. Finally, a relation is provided to determine the load percentage carried by raft in piled raft foundations.

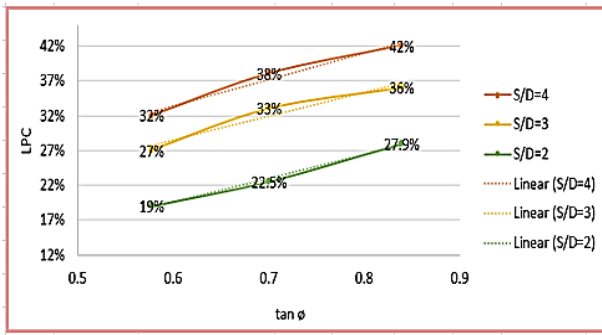
### 2- Numerical modeling

Numerical analysis of the present research has been done using ABAQUS 3D software and mesh discretization was done by using the 10 node elements. Regarding boundary conditions, since simple distant boundaries are typically used in the static analysis, are closed in the X and Y directions and the lower side in all three directions. It has also been noted that the soil-structure interaction and the constraints on the problem are well-defined. These soil structure interactions include the interaction between pile sleeve and soil, pile tip and soil and raft subsurface interaction with the soil. The geotechnical properties of soil and mechanical properties of the pile and raft used in the analysis are in accordance with the soil parameters of Elwakil and Azzam (2015) study. The constitutive modeling used in numerical simulation is the hardening soil (HS) constitutive model.

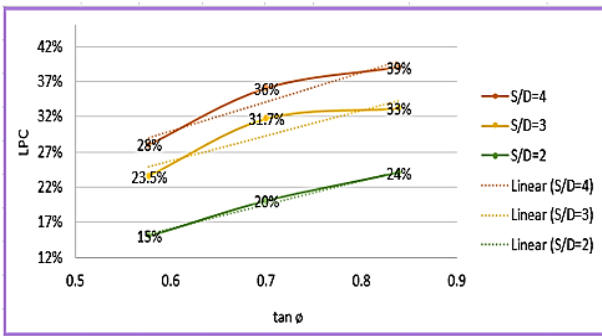
To determine the bearing capacity of the raft, several numerical analysis has been performed and 36 numerical models have been made in which the effect of four factors has been investigated. These factors are: connection situation of the raft to the soil surface, internal friction angle of soil ( $\phi$ ), number of piles in group ( $n$ ), and the ratio of the center-to-center distance of piles to pile diameter which is called pile spacing ratio ( $S/D$ ).

\*Corresponding author's email: Ghanbari@khu.ac.ir



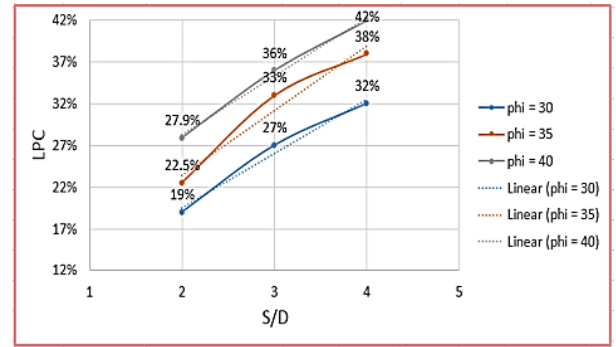


(a) 16-pile groups

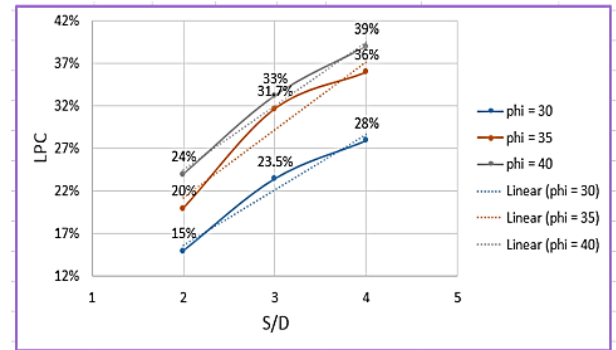


(b) 36-pile groups

Fig. 1. LPC changes with  $\tan \phi$  for 5.5 inches' settlement



(a) 16-pile groups



(b) 36-pile groups

Fig. 2. LPC changes with S/D for 5.5 inches' settlement

### 3- Results of numerical analyses

After completing the FEM analysis steps, the force of the piles and raft and the load percentage for different settlement of the system were determined. Out of a total of 36 numerical models made, 18 models are related to connected cap piles, known as piled raft foundations. Using the results, in the piled raft foundations, as the number of piles in the group increases, the proportion of load taken by raft decreases and the load sharing by piles increases. Also, the raft has a greater impact and share in participation and bearing in areas with higher internal friction angle of soil. Investigation of the pile spacing ratio also shows that the larger S/D, the higher the bearing capacity of the raft and with decreasing this ratio, the share of the raft decreases.

Based on the performed analysis, the changes in load percentage carried by cap (raft) which is briefly indicated by LPC, are plotted in terms of the internal friction angle of soil as well as the pile spacing ratio S/D for 5.5-inch settlement and the 16 and 36 pile groups by graphs. In Figure 1, LPC changes are observed in terms of  $\tan \phi$  and in Figure 2, LPC changes are observed in terms S/D ratio.

By considering the fitting curve equation of each of these diagrams, the Equation (1) for piled raft foundations with S/D < 10, group of piles for less than a 9x9 pile configuration in granular soils is obtained.

$$LPC = A \times \left( \frac{S}{D} \right) + B \times \tan \phi - C$$

$$A = 0.071$$

$$B = 0.375 - 0.004n$$

$$C = 0.126 - 0.001n$$

In this equation, LPC is load percentage carried by cap (raft) in terms of percentage,  $\phi$  is the internal friction angle of soil and n is the number of piles.

### 4- Conclusions

Based on the numerical analyses performed in the present study, the following results were observed in the piled raft foundations embedded in granular soil:

1- The percentage of the raft carried load in piled raft systems varies from 15% to 42% of the applied load

2- The larger the S/D ratio, as the other parameters are constant, the higher the bearing capacity of the raft.

3- In the group of piles with constant S/D ratio, for a certain number of piles, the larger internal friction angle of the soil, the higher bearing capacity of the raft. Also, by reducing the number of piles in the group and keeping the internal friction angle of soil constant, the bearing capacity of the raft will increase.

4- Introducing a new equation to determine the load percentage carried by cap (raft) in piled raft systems in

granular soil for a group less than a 9x9 pile configuration, with pile spacing ratio (S/D) less than 10.

### References

- [1] E. Davis, H. Poulos, The analysis of piled raft systems, Australian Geomech. Jour-nal G, 2 (1972).
- [2] R. Cooke, Piled raft foundations on stiff clays—a contribution to design philosophy, Geotechnique, 36(2) (1986) 169-203.
- [3] J.A. Hemsley, Design applications of raft foundations, (2000).
- [4] A. Mandolini, G. Russo, C. Viggiani, Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16(1) (2005) 177.
- [5] A. Davids, J. Wongso, D. Popovic, A. McFarlane, A Postcard from Dubai design and construction of some of the tallest buildings in the world, Proc. of the CTBUH 8th World Congress, (2008) 3-5.
- [6] Y.F. Leung, K. Soga, B. Lehane, A. Klar, Role of linear elasticity in pile group analysis and load test interpretation, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 136(12) (2010) 1686-1694.
- [7] T. Abdel-Fattah, A. Hemada, Use of creep piles to control settlement of raft foundation on soft clay—case study, Proceedings of 8th Alexandria international conference on structural and geotechnical engineering, Alexandria, (2014) 89-109.
- [8] A. Elwakil, W. Azzam, Experimental and numerical study of piled raft system, Alexandria Engineering Journal, 55(1) (2016) 547-560.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Asadina, S. Amirafshari, A. Ghanbari, New equation to determine the load percentage carried by raft in piled raft foundations, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 641-644.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20051.7329](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20051.7329)







## معرفی رابطه ای جدید برای تعیین سهم باربری کلاhek در سیستم های رادیه شمع

علی اسدی نیا، ساسان امیرافشاری، علی قنبری\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱

### کلمات کلیدی:

گروه شمع، باربری کلاhek

خاک دان‌های

رادیه شمع

المان محدود

آباکوس

**خلاصه:** پی رادیه شمع، یک سیستم فونداسیون موثر و اقتصادی برای ساختمان‌های بلند است و به عنوان جایگزینی مناسب برای پی‌های عمیق سنتی شناخته می‌شود. در این نوع از پی‌ها، سرشمع (کلاhek) نظیر یک پی گسترده بر روی خاک قرار دارد و درصدی از بار کل وارد بر سیستم را تحمل می‌کند. در طراحی پی‌های رادیه شمع، تعیین سهم باربری کلاhek از بار کل حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی که توسط نرم افزار المان محدود آباکوس انجام می‌شود، با در نظر گرفتن اثرات متقابل شمع‌ها و کلاhek، به بررسی عوامل موثر و میزان تاثیر آن‌ها بر سهم باربری کلاhek پرداخته شده است. علاوه بر این، یک رابطه جدید برای تعیین سهم باربری کلاhek مستقر بر خاک دان‌های، برای گروه شمع‌های با تعداد کمتر از ۹ در ۹ ارائه شده است. جهت صحت‌سنجی نرم افزار، مطالعات آزمایشگاهی بارگذاری گروه شمع مورد استفاده قرار گرفت که تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی وجود دارد. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که فاصله شمع‌ها از یکدیگر، قطر شمع‌ها، زاویه اصطکاک داخلی خاک و تعداد شمع‌ها در گروه، از جمله مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها در تعیین سهم کلاhek از باربری هستند. نتایج به دست نشان داد که سهم باربری کلاhek از بار کل وارد بر پی، بین ۱۵ تا ۴۲ درصد است. این تحقیق نشان می‌دهد که هر چه نسبت فاصله شمع‌ها از یکدیگر بیشتر یا قطر شمع‌ها کوچک‌تر شود، با ثابت بودن سایر پارامترها، سهم باربری کلاhek افزایش می‌یابد، اما با ثابت بودن نسبت فاصله به قطر برای یک تعداد شمع مشخص، هر چه زاویه اصطکاک داخلی خاک بزرگ‌تر باشد، سهم باربری کلاhek بیشتر می‌شود. همچنین با کاهش تعداد شمع‌ها در گروه و ثابت بودن زاویه اصطکاک داخلی خاک، سهم باربری کلاhek افزایش خواهد یافت.

### ۱- مقدمه

ایده پی رادیه شمع که سیستمی متشکل از هر دو المان پی گسترده متکی بر خاک (رادیه) و شمع (گروه شمع) است، نخستین بار توسط دیویس و پولوس<sup>۱</sup> (۱۹۷۲) مطرح گردید [۱ و ۲]. اولین بار این سیستم در اروپا برای پی ساختمان‌های بلند استفاده شده است. مهندسان عقیده داشتند که به کارگیری یک رادیه متکی بر خاک که به وسیله شمع‌ها مهار شود، می‌تواند با یک ضریب اطمینان مناسب، مقاومت کافی در برابر بارهای وارده ایجاد کند. علاوه بر آن، سیستم رادیه شمع می‌تواند نشست قابل قبولی تحت بارهای موجود را هم داشته باشد [۳].

در روش‌های سنتی فرض بر این است که تمامی بار وارده توسط شمع‌ها تحمل می‌شود و کلاhek نقشی در باربری ندارد. امروزه این فرض برای

1 Davis & Poulos

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ghanbari@khu.ac.ir

سازه‌هایی مثل سکوهایی دریایی<sup>۲</sup> و اسکله‌های شمع و عرشه<sup>۳</sup> که عرشه (کلاhek) آن‌ها با فاصله از زمین قرار دارد، یک فرض واقعی است، اما در صورت تماس موثر کلاhek با خاک، مقداری از بار از طریق کلاhek به زمین وارد می‌شود. بنابراین برای تعیین دقیق نیروی وارد بر هر شمع، باید علاوه بر ظرفیت باربری شمع‌ها، ظرفیت باربری کلاhek نیز به عنوان یک عضو باربر در نظر گرفته شود.

اگر چه مفهوم رادیه شمع معمولاً برای گروه‌های شمع بزرگ با کلاhek منعطف به کار برده می‌شود، ولی می‌توان این ایده را برای گروه‌های شمع کوچک و یا بزرگ با کلاhek صلب هم استفاده کرد [۴]. سیستم رادیه شمع می‌تواند در حالت منفصل نیز به کار برده شود. در این حالت پی گسترده به صورت مستقیم با شمع اتصال ندارد و یک لایه خاک که دارای پارامترهای

2 Marine platform

3 Pile and deck wharf

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



مطالعات، محققین به بررسی ظرفیت باربری کلاهک و سهم آن در حالت حدی و بار نهایی پرداخته‌اند [۱۷ و ۱۶]. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت تحقیقات انجام شده در خصوص پی‌های رادیه شمع، روش‌های جدیدی نیز در تحلیل این سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، ربیعی و چوببستی<sup>۷</sup> (۲۰۲۰) با تکنیک شبکه عصبی مصنوعی<sup>۸</sup>، به تحلیل رفتار پی‌های رادیه شمع پرداختند [۱۸]. همچنین صحرااییان<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۰) با انجام یک سری آزمایش سانتریفیوژ، رفتار مکانیکی مخازن نفتی با پی رادیه شمع را مورد مطالعه قرار داده و موارد موثر در طراحی پی‌های رادیه شمع مخازن نفتی را با احتمال روانگرایی و بدون روانگرایی بررسی کردند [۱۹].

در مقاله حاضر، رفتار سیستم رادیه شمع بر روی خاک‌های دان‌های، با انجام مدل‌سازی سه بعدی در نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۱۰</sup>، مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا ابتدا جهت صحت‌سنجی نرم افزار، یک مدل آزمایشگاهی در نرم افزار شبیه‌سازی می‌شود و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی الوکیل و اعظم<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۵) [۲۰] مقایسه می‌گردد. سپس با ساخت مدل‌های مختلف، سهم کلاهک از باربری کل در حالت‌های مختلفی تعیین شده و تاثیر عواملی از قبیل فواصل و قطر شمع‌ها، تعداد شمع‌ها در گروه شمع و نقش زاویه اصطکاک داخلی خاک در تغییر سهم کلاهک بررسی می‌شود. در پایان یک رابطه جدید برای تعیین سهم باربری کلاهک از بار کل بر مبنای نتایج این تحقیق پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که در تحقیقات پیشین هیچ رابطه تحلیلی و یا عددی مشخصی برای تعیین سهم باربری کلاهک از بار کل ارائه نشده است.

## ۲- صحت‌سنجی

در مطالعات آزمایشگاهی الوکیل و اعظم (۲۰۱۵)، تعداد ۲۳ آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) انجام شده است که در سه پارامتر با هم تفاوت دارند. اولین پارامتر تعداد شمع‌ها است که به ترتیب ۴، ۸ و ۱۶ شمع گزارش شده است. دومین پارامتر طول شمع‌ها با سه مقدار ۲۰۰، ۱۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر است و در نهایت پارامتر سوم، اتصال و یا عدم اتصال کلاهک با خاک است. شکل ۱ تصویر شماتیک مدل فیزیکی استفاده شده در این مطالعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که جهت صحت‌سنجی تحقیق، مطابق با شکل ۲ در نرم افزار مدل‌سازی شده است.

مقاومتی قوی‌تر از خاک زیر پی است، بین شمع و پی قرار می‌گیرد. در خصوص پی‌های رادیه شمع غیر متصل<sup>۱</sup>، مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی توسط محققین انجام شده است که تمرکز این مطالعات بر محاسبه کاهش نشست ناشی از مکانیزم رادیه شمع است [۷-۵].

در خصوص تحلیل گروه شمع تاکنون مطالعات متعددی با موضوع تعیین سهم کلاهک از بار کل، در پی رادیه شمع انجام شده است. نخستین بار کوک<sup>۲</sup> و همکارانش (۱۹۸۶) اعلام کردند که کلاهک شمع‌ها قابلیت باربری تا ۳۰ درصد کل بارهای سازه را دارد [۸]. همسلی<sup>۳</sup> (۲۰۰۰) بیان کرد که کلاهک می‌تواند تا ۵۰ درصد از بارگذاری را تحمل کند [۹]. سایر محققین با انجام مطالعات مختلف، سهم باربری کلاهک از بار کل را کم و بیش بین ۲۰ تا ۶۰ درصد تخمین زده‌اند [۱۳-۱۰]. لانگ و ویتنام<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) جزئیات پی رادیه شمع مربوط به ۱۰ سازه بلند دنیا را در یک مقاله ارائه کرده‌اند. در جدول ۱، سهم باربری کلاهک و شمع‌ها در سیستم رادیه شمع این برج‌ها، به تفکیک نشان داده شده است [۱۴]. اخیراً نیز حسین<sup>۵</sup> (۲۰۲۱) با مطالعه عددی به مقایسه پی گسترده و پی رادیه شمع پرداخته است. این مطالعه مجموعه‌ای از تجزیه و تحلیل‌های غیرخطی سه بعدی برای پی گسترده در حالت بدون شمع<sup>۶</sup> و همینطور حالت رادیه شمع است. طبق نتایج به دست آمده از تحقیقات این محقق، با افزایش ضخامت پی گسترده (در حالت بدون شمع)، لنگر خمشی حداکثر افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش ضخامت پی در سیستم متشکل از پی گسترده و شمع (سیستم رادیه شمع)، لنگر خمشی حداکثر کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شده است که با کاهش فاصله شمع‌ها یا افزایش قطر آن‌ها، سهم بار کلاهک از بار کل کاهش خواهد یافت. به علاوه این محقق متوجه شد که با افزایش تعداد شمع‌ها از ۹ به ۲۵، به ازای ضخامت‌های مختلف پی و قطرهای مختلف شمع، میزان سهم باربری شمع‌های مرکزی و کناری تغییر می‌کند. در حالت ۹ شمع در گروه، شمع‌های مرکزی بیشترین مقدار بار اعمال شده را به خود جذب می‌کنند، در حالی که در گروه با تعداد ۲۵ شمع، یک رفتار معکوس مشاهده می‌شود که طی آن سهم شمع‌های گوشه‌ای از بار کل بیشتر است [۱۵].

گروه دیگری از مطالعات انجام شده در ارتباط با پی‌های رادیه شمع، به برآورد ظرفیت باربری نهایی این سیستم‌ها اختصاص یافته است. در این

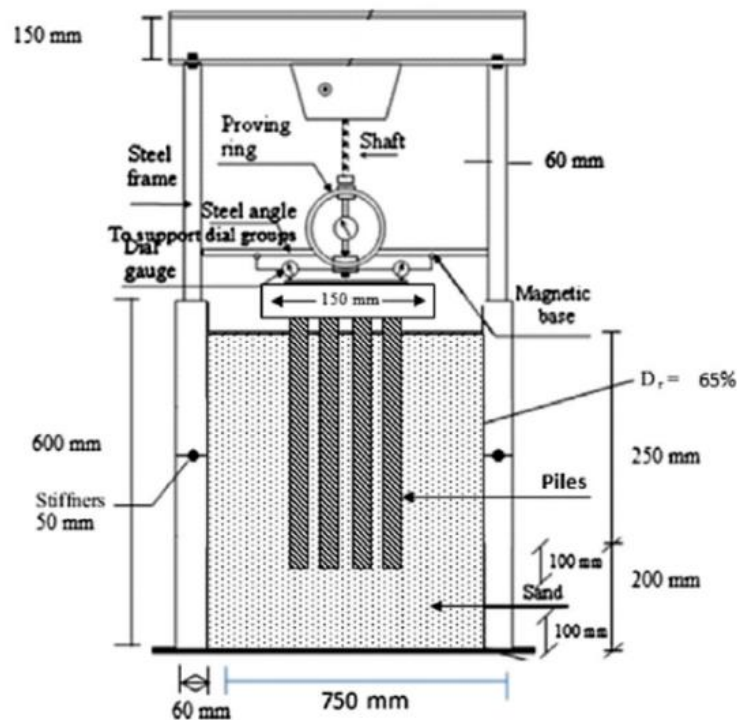
- 1 Disconnected Piled raft foundation
- 2 Cooke
- 3 Hemsley
- 4 Long & Vietnam
- 5 Hussain
- 6 Un-Piled raft

- 7 Rabiei & Choobbašti
- 8 Artificial neural network
- 9 Sahraeian
- 10 ABAQUS
- 11 Elwakil & Azzam

جدول ۱. خصوصیات پی رادیه شمع مربوط به ۱۰ سازه بلند در دنیا [۱۴]

Table 1. Properties of piled raft foundation related to ten high-rise buildings in the world

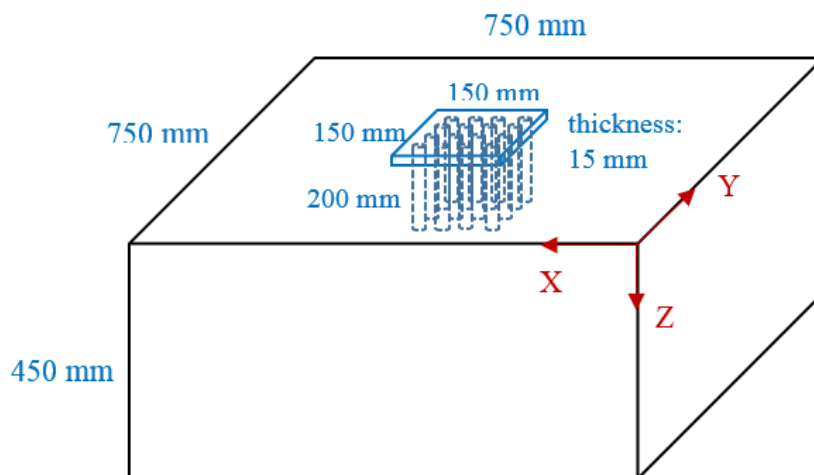
شماره	نام ساختمان	ارتفاع / تعداد طبقات	درصد باربری		ابزار دقیق	نشست حداکثر (میلی متر)
			شمع‌ها	کلاهک		
۱	Messe-Torhaus, Frankfurt	۱۳۰ متر / ۳۰ طبقه	۷۵	۲۵	بله	نامشخص
۲	Messturn, Frankfurt	۲۵۶ متر / ۶۰ طبقه	۵۷	۴۳	بله	۱۴۴
۳	Westend 1, Frankfurt	۲۰۸ متر	۴۹	۵۱	بله	۱۲۰
۴	Petronas, Kuala Lumpur	۴۵۰ متر / ۸۸ طبقه	۸۵	۱۵	بله	۴۰
۵	QVI, Perth, West Australia	۴۲ طبقه	۷۰	۳۰	نامشخص	۴۰
۶	Treptower, Berlin	۱۲۱ متر	۵۵	۴۵	بله	۷۳
۷	Sony Center, Berlin	۱۰۳ متر	نامشخص	نامشخص	بله	۳۰
۸	ICC, Hong Kong	۴۹۰ متر / ۱۱۸ طبقه	۷۰	۳۰	نامشخص	نامشخص
۹	Commerzbank, Frankfurt	۳۰۰ متر	۹۶	۴	بله	۱۹
۱۰	Skyper, Frankfurt	۱۵۳ متر	۶۳	۲۷	بله	۵۵



شکل ۱. تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی الوکیل و اعظم [۲۰]

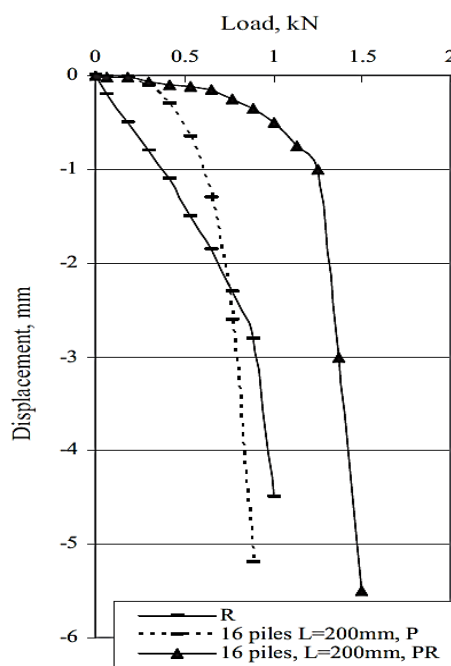
Fig. 1. Schematic figure of testing model used by Elwakil & Azzam [20]





شکل ۲. ابعاد اصلی مدل ساخته شده در تحقیق حاضر جهت صحت‌سنجی

Fig. 2. The main dimensions of the model made in present research for validation



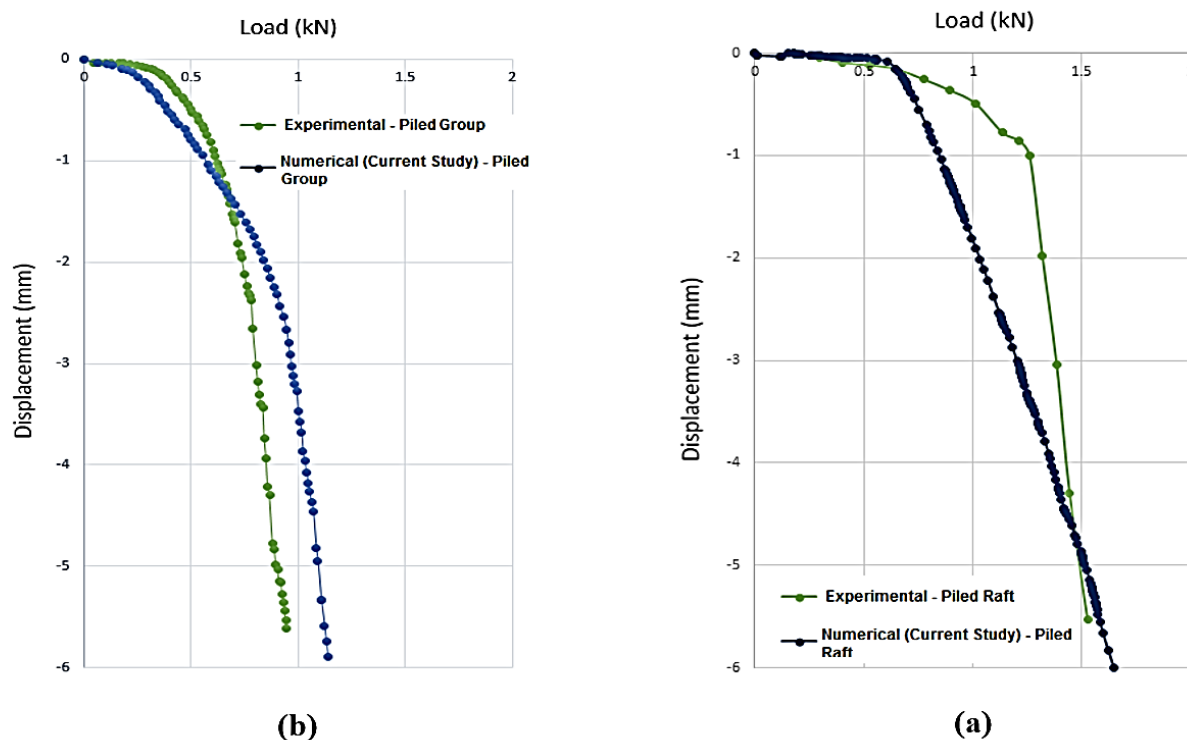
شکل ۳. نمونه نتایج آزمون‌های بارگذاری گروه شمع انجام شده توسط الوکیل و اعظم [۲۰]

Fig.3. Results of pile group loading tests performed by Elwakil & Azzam [20]

افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات این محققان به صورت تغییرات جابجایی برحسب نیرو ارائه شده است که در شکل ۳ نمودار مربوط به تست انتخاب شده (طول شمع ۲۰۰ میلی‌متر) نشان داده شده است.

طبق نتایج استخراج شده از مطالعات الوکیل و اعظم، درصد باری که توسط کلاهک در سیستم رادیه شمع تحمل می‌شود، در خاک ماسه‌ای نزدیک به ۳۹ درصد است که با کاهش تعداد و طول شمع‌ها این درصد





شکل ۴. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعه الوکیل و اعظم برای حالت (a) کلاهیک متصل به خاک و (b) کلاهیک جدا از خاک [۲۰]

Fig. 4. Comparison of the results of this study with the results of Elwakil & Azzam study for two cases (a) connected piled raft and (b) non-connected piled raft [20]

است، می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از تحلیل عددی مقاله حاضر، تطابق نسبتاً قابل قبولی با نتایج اندازه‌گیری شده دارد.

### ۳- مدل‌سازی عددی

تحلیل‌های عددی این پژوهش با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شده است و نوع المان به کار رفته در این مدل‌سازی از نوع C3D8R است. المان‌های یاد شده از نوع پیوسته، سه بعدی و هشت گره‌ای هستند. در خصوص شرایط مرزی از مرزهای ساده دور استفاده شده است. بدین ترتیب مرزهای کناری مدل در دو جهت افقی و مرزهای زیرین نیز در سه جهت بسته هستند.

در این تحقیق توجه شده است که نوع فصل مشترک‌ها، فیزیک حاکم بر آن‌ها و قیدهای موجود در مسئله، به نحو مطلوبی تعیین گردند. فصل مشترک بین دو جسم (مثل دیواره شمع و خاک) نمونه ساده یک اندرکنش است. در مدل‌سازی عددی حاضر سطح‌های اساسی که باید تعریف فصل مشترک در بین آن‌ها صورت بگیرد، شامل فصل مشترک سطح جدار شمع‌ها

نتایج به دست آمده از مطالعه الوکیل و اعظم با نتایج مدل‌سازی مقاله حاضر، در دو حالت کلاهیک متصل به خاک و کلاهیک جدا از خاک، در شکل ۴ مقایسه شده است. در حالت رادیه شمع، مقادیر نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی از مقادیر مربوط به نتایج آزمایشگاهی کمتر است، ولی در حالت گروه شمع، مقادیر نتایج عددی بیشتر از مقادیر مربوط به نتایج آزمایشگاهی نظیر آن است. به نظر می‌رسد که رفتار واقعی گروه شمع است که توسط الوکیل و اعظم مورد مطالعه قرار گرفته است، نه به طور کامل رادیه شمع و نه به طور کامل گروه شمع است و رفتاری بین این دو حالت را دارد. بنابراین نتایج مطالعات عددی که با ایده‌آل‌سازی همراه هستند، در یک مورد اندکی بیشتر و در مورد دیگر اندکی کمتر از مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. به هر حال برخی موارد از قبیل ناهمگنی خاک و اتصالات در نمونه آزمایشگاهی ممکن است باعث کاهش دقت نتایج آن گردد. همچنین دقت اندازه‌گیری ابزارهای آزمایشگاهی و صحرایی، بر نتایج حاصله موثر هستند. در مجموع با توجه به این که اختلاف موجود در نتایج تحلیل‌های این تحقیق با مطالعه آزمایشگاهی الوکیل و اعظم در بیشترین حالت حدود ۲۰ درصد

جدول ۲. مشخصات مدل‌های عددی ۱ الی ۳۶

Table 2. Details of numerical models 1 to 36

شماره مدل	گروه شمع	نوع فونداسیون	$S/D$	$\phi$	شماره مدل	گروه شمع	نوع فونداسیون	$S/D$	$\phi$
۱	۴×۴	رادیه شمع	۴	۳۰	۱۹	۶×۶	رادیه شمع	۴	۳۰
۲	۴×۴	رادیه شمع	۳	۳۰	۲۰	۶×۶	رادیه شمع	۳	۳۰
۳	۴×۴	رادیه شمع	۲	۳۰	۲۱	۶×۶	رادیه شمع	۲	۳۰
۴	۴×۴	رادیه شمع	۴	۳۵	۲۲	۶×۶	رادیه شمع	۴	۳۵
۵	۴×۴	رادیه شمع	۳	۳۵	۲۳	۶×۶	رادیه شمع	۳	۳۵
۶	۴×۴	رادیه شمع	۲	۳۵	۲۴	۶×۶	رادیه شمع	۲	۳۵
۷	۴×۴	رادیه شمع	۴	۴۰	۲۵	۶×۶	رادیه شمع	۴	۴۰
۸	۴×۴	رادیه شمع	۳	۴۰	۲۶	۶×۶	رادیه شمع	۳	۴۰
۹	۴×۴	رادیه شمع	۲	۴۰	۲۷	۶×۶	رادیه شمع	۲	۴۰
۱۰	۴×۴	گروه شمع	۴	۳۰	۲۸	۶×۶	گروه شمع	۴	۳۰
۱۱	۴×۴	گروه شمع	۳	۳۰	۲۹	۶×۶	گروه شمع	۳	۳۰
۱۲	۴×۴	گروه شمع	۲	۳۰	۳۰	۶×۶	گروه شمع	۲	۳۰
۱۳	۴×۴	گروه شمع	۴	۳۵	۳۱	۶×۶	گروه شمع	۴	۳۵
۱۴	۴×۴	گروه شمع	۳	۳۵	۳۲	۶×۶	گروه شمع	۳	۳۵
۱۵	۴×۴	گروه شمع	۲	۳۵	۳۳	۶×۶	گروه شمع	۲	۳۵
۱۶	۴×۴	گروه شمع	۴	۴۰	۳۴	۶×۶	گروه شمع	۴	۴۰
۱۷	۴×۴	گروه شمع	۳	۴۰	۳۵	۶×۶	گروه شمع	۳	۴۰
۱۸	۴×۴	گروه شمع	۲	۴۰	۳۶	۶×۶	گروه شمع	۲	۴۰

مدل عددی ساخته شده است که در آن‌ها چهار عامل متغیر است. عامل اول زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ ) است که برای آن سه مقدار ۳۰ درجه، ۳۵ درجه و ۴۰ درجه لحاظ شده است. عامل دوم تعداد شمع‌ها در گروه است که دو گروه ۱۶ شمعی و ۳۶ شمعی منظور شده است. عامل سوم نیز مربوط به اتصال و یا عدم اتصال کلاهک به سطح خاک است. در نهایت عامل چهارم پارامتر بی بعد نسبت فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها به قطر شمع‌ها ( $S/D$ ) است. جدول ۲ مشخصات هندسی مدل‌های عددی ۱ تا ۳۶ را نشان می‌دهد. در جدول ۳ مشخصات مربوط به ابعاد هندسی مدل‌ها در مقیاس واقعی ارائه شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در تحلیل‌ها نیز که مطابق با مشخصات مصالح مطالعه ال‌وکیل و اعظم است، در جدول ۴ ارائه شده است.

با خاک، فصل مشترک نوک شمع‌ها با خاک و فصل مشترک زیرسطح کلاهک با خاک است. در همین راستا تعیین سطوح پیشرو<sup>۱</sup> و تابع آن نیز مورد توجه قرار گرفته و برای تعیین آن‌ها به سختی دو جسمی که با هم تماس دارند، توجه شده است. به عنوان مثال در تماس بین خاک و فونداسیون چون فونداسیون از سختی بالاتری برخوردار است، فونداسیون به عنوان سطح پیشرو و خاک به عنوان سطح تابع به نرم افزار معرفی می‌گردد.

برای تعیین سهم باربری کلاهک و همچنین بررسی اثرات وجود کلاهک بر روی نشست، آنالیزهای عددی متعددی صورت پذیرفته و ۳۶

- 1 Master
- 2 Slaves

جدول ۳. ابعاد هندسی مدل‌ها در گروه شمع ۱۶ تایی و ۳۶ تایی

Table 3. Geometric properties of the models in the 16-pile groups and 36-pile groups

مشخصه	گروه شمع ۱۶ تایی	گروه شمع ۳۶ تایی
طول شمع (m)	۸۰	۱۰
قطر شمع (m)	۱	۱
ابعاد کلاهک (m×m)	۱۶×۱۶	۲۰×۲۰
ضخامت پی (m)	۱	۱
ارتفاع خاک (m)	۳۰	۳۰
ابعاد خاک (m×m)	۸۰×۸۰	۸۰×۸۰

جدول ۴. مشخصات مصالح به کار رفته شده در مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر

Table 4. The material parameters used in the numerical models used in the present research

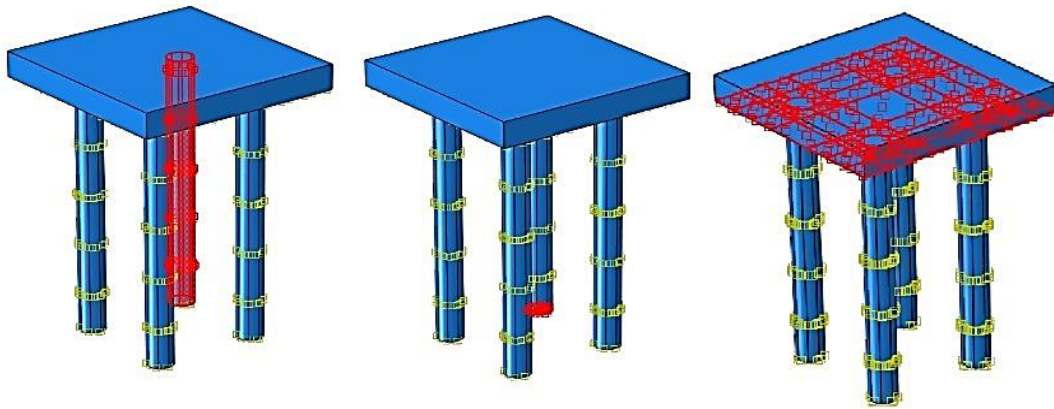
مصالح	پارامتر	واحد	مقدار
خاک	چگالی	kN/m <sup>3</sup>	۱۸
	مدول یانگ	kN/m <sup>2</sup>	۵۰۰۰
	نسبت پواسون	-	۰/۳
	چسبندگی	Pa	۱
	زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۰-۳۵-۴۰
بتن	چگالی	kN/m <sup>3</sup>	۲۴
	مدول یانگ	kN/m <sup>2</sup>	۲۰×۱۰ <sup>۶</sup>
	نسبت پواسون	-	۰/۲

طی آنالیزهای انجام شده به ازای نشست‌های مختلف سیستم، نیروی شمع و کلاهک و درصد باربری تعیین شده است. بر اساس نتایج حاصل چهار عامل باعث تغییر سهم باربری کلاهک و شمع‌ها از کل نیروی وارده می‌شوند. این چهار عامل عبارتند از تعداد شمع‌های گروه، زاویه اصطکاک داخلی خاک، نسبت فاصله به قطر شمع‌ها و اتصال یا عدم اتصال کلاهک به خاک. در حالت عدم اتصال کلاهک به خاک، هیچگونه باری به کلاهک منتقل نمی‌شود، اما وجود کلاهک در کاهش نشست کلی پی تاثیر چشمگیری دارد. در شکل ۶ برای سیستم رادیه شمع با گروه شمع ۱۶ عددی، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و  $S/D=4$ ، تغییرات نیرو بر حسب جابجایی نمایش داده شده است. قابل ذکر است که مقدار نهایی نیروی قائم اعمالی در این حالت برابر ۲۴ مگانیوتن است. در مدل‌سازی عددی با توجه به تقارن موجود در شکل کلی مسئله، یک چهارم فونداسیون و خاک مدل‌سازی شده

طبق جدول ۴، مدول یانگ خاک برابر ۵۰۰۰ کیلوپاسکال بوده و ثابت در نظر گرفته شده است. علت ثابت ماندن مدول یانگ آن است که در این تحقیق صرفاً مطالعه و بررسی تاثیر زاویه اصطکاک خاک مد نظر است. همچنین مدل رفتاری استفاده شده در شبیه‌سازی عددی دارای مشخصات زیر است: ۱- رفتار مدل الاستیک پلاستیک است، ۲- سطح تسلیم موهر کلمب انتخاب شده است، ۳- قانون جریان غیر همراه برقرار است و ۴- از مدل رفتاری خاک سخت شونده (HS) استفاده شده است.

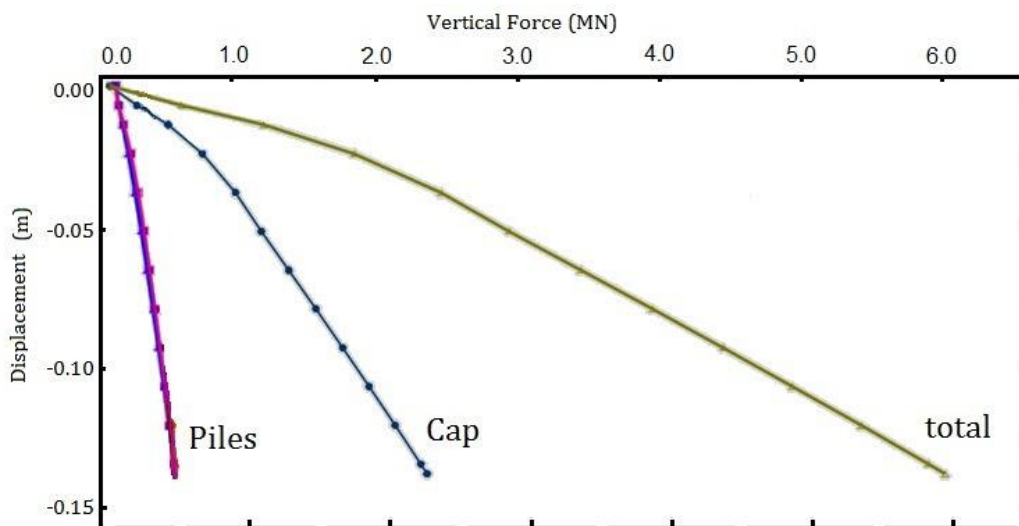
#### ۴- نتایج تحلیل‌های عددی

پس از انجام تحلیل‌های عددی، مطابق شکل ۵ با انتخاب سطح تماسی مورد نظر که می‌تواند سطح جدار، سطح نوک شمع، یا سطح زیر فونداسیون باشد، نیروی مربوط به این سطوح استخراج می‌شود.



شکل ۵. انتخاب سطح تماسی مورد نظر جهت استخراج نیروی سطوح مختلف

Fig. 5. Select the desired contact surface to extract the force of different elements



شکل ۶. نمودار نیرو بر حسب نشست در گروه شمع ۱۶ عددی، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و  $S/D=4$

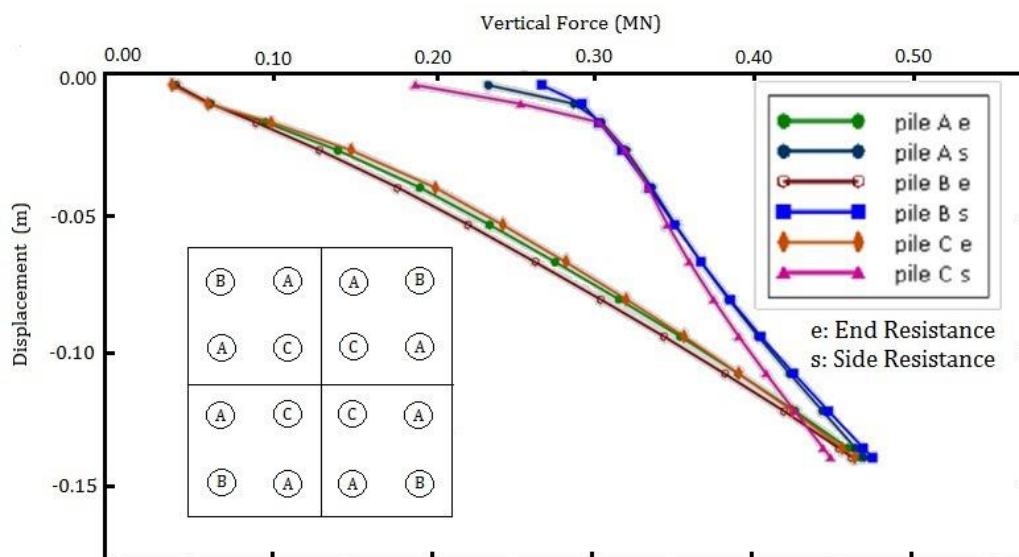
Fig. 6. Force-settlement diagram in a 16-pile groups,  $\phi=35^\circ$  and  $S/D=4$

مقاومت جداره شمع است. نام‌گذاری شمع‌ها نیز مطابق با شکل ۷ شامل سه تیپ A، B و C است.

در جدول ۵، مقادیر نیروی اجزای مختلف رادیه شمع برای گروه شمع ۱۶ عددی، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه برای خاک و نسبت فاصله به قطر  $S/D=4$  برای شمع‌ها ارائه شده است. مقادیر نیرو در این جدول برای حد

است. در این صورت نیروی وارد بر مدل، یک چهارم نیروی کل بوده و برابر ۶ مگانیوتن است که این نیرو در شکل ۶ نشان داده شده است.

همچنین در شکل ۷ با ترسیم نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی، سهم نیروی تحمل شده توسط هر شمع، به تفکیک مشخص شده است. در این شکل حرف e نشان دهنده مقاومت نوک شمع و حرف S نشان دهنده



شکل ۷. نمودار نیرو بر حسب نشست در اجزای مختلف رادیه شمع، برای گروه شمع ۱۶ عددی، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و  $S/D=4$

Fig. 7. Force–settlement diagram for different components of piled raft in a 16-pile groups,  $\phi=35^\circ$  and  $S/D=4$

در باربری کلاهک تقریباً ثابت بوده و دچار تغییرات زیادی نمی‌شود. بر اساس نتایج حاصله هر چه تعداد شمع‌ها در گروه افزایش می‌یابد، سهم باربری کلاهک کاهش یافته و شمع‌ها سهم بیشتری از ظرفیت باربری را به خود اختصاص می‌دهند. به طوری که افزایش تعداد شمع گروه از ۱۶ به ۳۶ بین ۲ تا ۵ درصد سهم مشارکت کلاهک در باربری را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش ۵ درجه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی خاک، باعث افزایش قابل توجهی در سهم باربری کلاهک می‌شود. به عبارت دیگر کلاهک گروه شمع در زمین‌هایی که خاک آن‌ها دارای زاویه اصطکاک داخلی بیشتری هستند، تاثیر و سهم بیشتری در مشارکت و باربری دارد. بررسی نسبت فاصله به قطر شمع‌ها  $S/D$  نیز نشان می‌دهد که این پارامتر بدون بعد، تاثیر مستقیم و غیرقابل انکاری در سهم باربری کلاهک دارد. هر چه این نسبت بزرگ‌تر می‌شود (با قطر ثابت شمع‌ها، فاصله آن‌ها از یکدیگر بیشتر می‌شود)، سهم باربری کلاهک افزایش قابل توجهی می‌یابد. برعکس با نزدیک‌تر شدن شمع‌ها به یکدیگر و کاهش نسبت مذکور، سهم کلاهک از باربری کاهش می‌یابد.

نهایی نشست یعنی نشست ۵/۵ اینچ، آورده شده است. سهم هر یک از اجزاء سیستم به تفکیک و بر حسب درصد محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیروی تحمل شده توسط جدار و نوک در شمع‌های مختلف اختلاف چندانی ندارد و تقریباً یکسان است. از سوی دیگر کلاهک توانسته است ۳۶ درصد بار وارد به فونداسیون رادیه شمع را تحمل کرده و این بار را بدون واسطه شمع‌ها به زمین منتقل کند. این عدد سهمی است که در تحلیل‌های سنتی گروه شمع نادیده گرفته می‌شود.

از مجموع ۳۶ مدل عددی ساخته شده، ۱۸ مدل مربوط به حالتی است که کلاهک گروه شمع در تماس با خاک است و سیستم رادیه شمع ایجاد شده است. نتایج حاصل از تحلیل این ۱۸ مدل، در جداول ۶ تا ۸ نشان داده شده است. در این جداول سهم باربری کلاهک از بار کل در نشست‌های مختلف در گروه شمع‌های ۱۶ و ۳۶ تایی مشخص شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که با افزایش نشست مجاز از ۱ به ۵/۵ اینچ تغییر سهم باربری کلاهک ناچیز است. در اغلب موارد، حداکثر افزایش سهم باربری کلاهک برای نشست‌های مختلف پی فقط حدود یک درصد است. این مسئله بیانگر آن است که در طول بارگذاری و با افزایش نشست کلی پی، سهم مشارکت

جدول ۵. نیروی اجزای مختلف رادیه شمع برای گروه شمع ۱۶ عددی، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و  $S/D=4$

Table 5. Different components forces of piled raft in a 16-pile groups,  $\phi=35^\circ$  and  $S/D=4$

اجزای مختلف سیستم	باربری جدار (کیلو نیوتن)	باربری نوک (کیلو نیوتن)	کل باربری هر شمع (کیلو نیوتن)	تعداد	مجموع باربری شمع های تیپ (کیلو نیوتن)	سهم باربری (%)
شمع A	۴۷۰	۴۶۴	۹۳۴	۴	۳۷۳۶	۱۵/۶
شمع B	۴۷۵	۴۶۷	۹۴۲	۴	۳۷۶۸	۱۵/۷
شمع C	۴۵۰	۴۶۰	۹۱۰	۴	۳۶۴۰	۱۵/۲
شمع D	۴۷۰	۴۶۴	۹۳۴	۴	۳۷۳۶	۱۵/۶
کلاهک	-	-	۲۲۸۰	۴	۹۱۲۰	۳۸
فونداسیون	-	-	۶۰۰۰	-	۲۴۰۰۰	۱۰۰
		مجموع باربری ( کیلو نیوتن)		۲۴۰۰۰		

جدول ۶. روند تغییرات سهم باربری کلاهک با افزایش نشست پی، برای زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه در گروه شمع ۱۶ و ۳۲ تایی

Table 6. Changes in load percentage carried by cap with the increase of the foundation settlement in a 16 and 32-pile groups and  $\phi=30^\circ$

درصد باری که توسط کلاهک تحمل می شود	میزان نشست (inch)	گروه شمع ۱۶ تایی			گروه شمع ۳۲ تایی		
		<i>S/D</i>			<i>S/D</i>		
		۴	۳	۲	۴	۳	۲
کلاهک تحمل می شود	۵/۵	%۳۲	%۲۷	%۱۹	%۲۸	%۲۳/۵	%۱۵
	۴	%۳۲	%۲۷	%۱۹	%۲۸	%۲۳/۵	%۱۵
	۳	%۳۲	%۲۷	%۱۹	%۲۷	%۲۲/۸	%۱۴/۲
	۲	%۳۱/۹	%۲۶/۹	%۱۸/۸	%۲۷	%۲۲/۷	%۱۴/۲
	۱	%۳۱/۷	%۲۶/۸	%۱۸/۶	%۲۶/۸	%۲۲/۵	%۱۴

جدول ۷. روند تغییرات سهم باربری کلاهک با افزایش نشست پی، برای زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه در گروه شمع ۱۶ و ۳۲ تایی

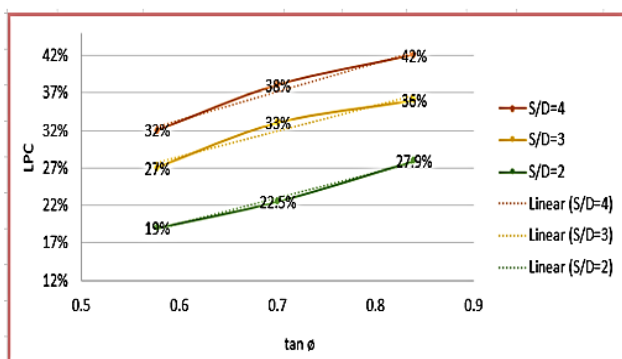
Table 7. Changes in load percentage carried by cap with the increase of the foundation settlement in a 16 and 32-pile groups and  $\phi=35^\circ$

درصد باری که توسط کلاهک تحمل می شود	میزان نشست (inch)	گروه شمع ۱۶ تایی			گروه شمع ۳۲ تایی		
		<i>S/D</i>			<i>S/D</i>		
		۴	۳	۲	۴	۳	۲
کلاهک تحمل می شود	۵/۵	%۳۸	%۳۳	%۲۲/۵	%۳۶	%۳۱/۷	%۲۰
	۴	%۳۸	%۳۳	%۲۲/۵	%۳۶	%۳۱/۷	%۲۰
	۳	%۳۸	%۳۳	%۲۲/۵	%۳۵	%۳۰/۹	%۱۹
	۲	%۳۷/۹	%۳۲/۹	%۲۲/۳	%۳۵	%۳۰/۹	%۱۹
	۱	%۳۷/۵	%۳۲/۴	%۲۱/۹	%۳۴/۹	%۳۰/۸	%۱۸/۹

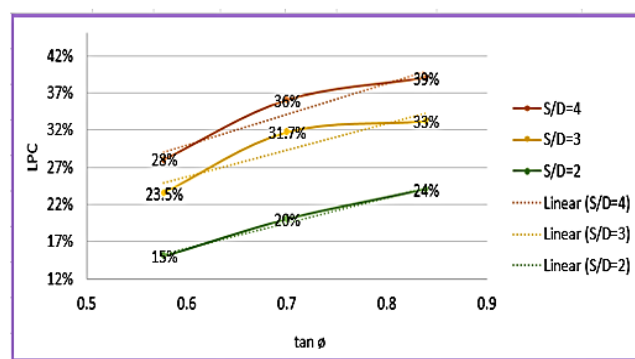
جدول ۸. روند تغییرات سهم باربری کلاهک با افزایش نشست پی، برای زاویه اصطکاک داخلی ۴۰ درجه در گروه شمع ۱۶ و ۳۲ تایی

Table 8. Changes in load percentage carried by cap with the increase of the foundation settlement in a 16 and 32-pile groups and  $\phi=40^\circ$

میزان نشست (inch)	گروه شمع ۱۶ تایی			گروه شمع ۳۲ تایی		
	S/D			S/D		
	۴	۳	۲	۴	۳	۲
۵/۵	٪۴۲	٪۳۶	٪۲۷/۹	٪۳۹	٪۳۳	٪۲۴
۴	٪۴۲	٪۳۶	٪۲۷/۹	٪۳۹	٪۳۳	٪۲۴
۳	٪۴۲	٪۳۶	٪۲۷/۸	٪۳۸	٪۳۲	٪۲۳
۲	٪۴۱/۸	٪۳۵/۸	٪۲۷/۶	٪۳۸	٪۳۲	٪۲۲/۱
۱	٪۴۱/۴	٪۳۵/۳	٪۲۷/۳	٪۳۸	٪۳۲	٪۲۲



(a)



(b)

شکل ۸. تغییرات LPC با تغییرات تانژانت زاویه اصطکاک داخلی خاک برای نشست ۵/۵ اینچ، (a) گروه شمع ۱۶ تایی و (b) ۳۲ تایی

Fig. 8. LPC changes with  $\tan \phi$  for 5.5 inches' settlement, (a) 16-pile groups and (b) 36-pile groups

از  $9 \times 9$  و متکی بر خاک‌های دانه‌های به دست می‌آید.

$$LPC = A \times \left(\frac{S}{D}\right) + B \times \tan \phi - C \quad (1)$$

$$A = 0.071, B = 0.375 - 0.004n, C = 0.126 - 0.001n$$

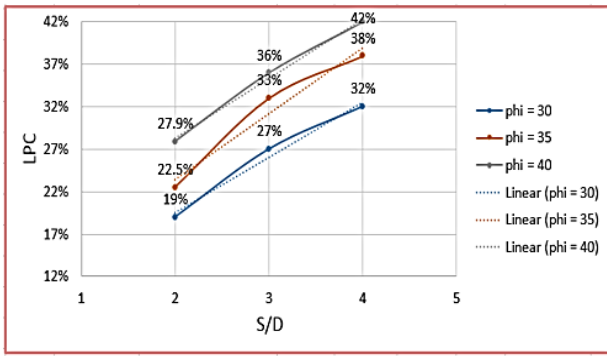
که در این رابطه LPC درصد بار تحمل شده توسط کلاهک، S/D، نسبت فاصله به قطر شمع‌ها،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک، n تعداد شمع در گروه و A، B و C مقادیر ثابت هستند.

#### ۵- ارائه رابطه‌ای جدید برای تعیین سهم باربری کلاهک

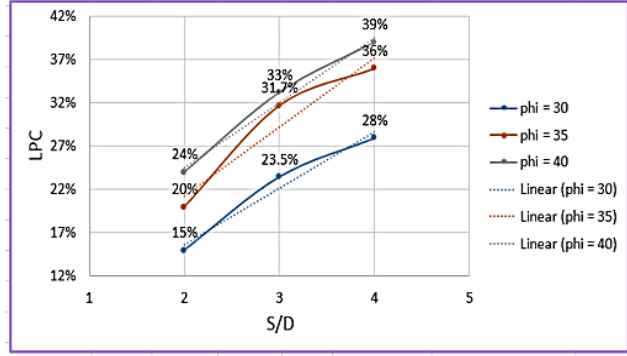
در جداول ۶ تا ۸، درصد بار تحمل شده توسط کلاهک (Load Percentage Carried by Cap) که از این پس با نماد LPC نمایش داده می‌شود، در حالت‌های مختلف ارائه شد. در ادامه در شکل ۸، تغییرات LPC برحسب زاویه اصطکاک داخلی خاک و در شکل ۹ نیز تغییرات LPC بر حسب نسبت S/D را برای نشست ۵/۵ اینچ و گروه شمع ۱۶ عددی و ۳۲ عددی نشان داده شده است.

تحلیل نتایج، روند خطی برای اغلب منحنی‌ها را پیشنهاد می‌کند. بررسی معادله خط برازش هر یک از نمودارها در شکل‌های ۸ و ۹، رابطه (۱) برای رادیه شمع‌هایی با نسبت فاصله به قطر کمتر از ۱۰ و تعداد شمع کمتر





(a)



(b)

شکل ۹. تغییرات LPC با تغییرات S/D برای نشست ۵/۵ اینچ، (a) گروه شمع ۱۶ تایی و (b) ۳۶ تایی

Fig. 9. LPC changes with S/D for 5.5 inches' settlement, (a) 16-pile groups and (b) 36-pile groups

جدول ۹. مقایسه سهم باربری کلاهک به دست آمده از رابطه (۱) و مدل‌سازی عددی برای گروه شمع ۱۶ تایی

Table 9. Comparison of the load percentage carried by cap obtained from Equation (1) and numerical modeling in a 16-pile groups

شماره تست	سهم باربری کلاهک بر اساس رابطه (۱)	سهم باربری کلاهک بر اساس مدل‌سازی عددی	میزان اختلاف مدل‌سازی و رابطه (۱)	درصد اختلاف
۱	٪۳۵/۴	٪۲۲	٪۳/۴	٪۹/۵
۲	٪۲۸/۳	٪۲۷	٪۱/۳	٪۴/۴
۳	٪۲۱/۲	٪۱۹	٪۲/۲	٪۱۰/۲
۴	٪۳۹/۲	٪۲۸	٪۱/۲	٪۳
۵	٪۳۲/۱	٪۳۳	٪۰/۹	٪۲/۹
۶	٪۲۵	٪۲۲/۵	٪۲/۵	٪۹/۹
۷	٪۴۳/۵	٪۴۲	٪۱/۵	٪۳/۴
۸	٪۳۶/۴	٪۳۶	٪۰/۴	٪۱/۱
۹	٪۲۹/۳	٪۲۷/۹	٪۱/۴	٪۴/۸

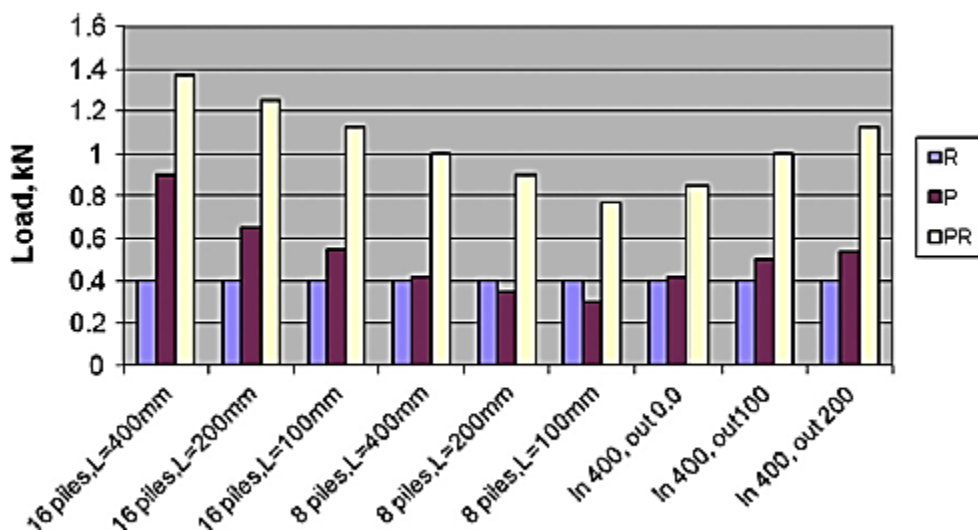
با توجه به جداول ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که در حالت گروه شمع ۱۶ تایی، سهم کلاهک بر حسب رابطه (۱) در اکثر مواقع بیشتر از سهم کلاهک بر اساس مدل‌سازی عددی است و بیشترین و کمترین درصد خطا در این حالت به ترتیب برابر ۱۰/۲ و ۱/۱ درصد است. این در حالی است که در حالت شمع ۳۶ تایی سهم کلاهک بر حسب رابطه (۱) در برخی موارد بیشتر از سهم کلاهک بر اساس مدل‌سازی عددی بوده و موارد دیگر کمتر است. در این حالت بیشترین و کمترین درصد خطا به ترتیب برابر ۱۹/۱ و ۰/۶ درصد

در این رابطه برای برازش نمودار خطی بین داده‌ها از روش‌های جبر خطی و روابط ریاضی استفاده شده است. روابط خطی حاصل به صورت چند متغیره بوده و تلاش شده است که بهترین مقادیر برای ثابت‌ها تعیین شود تا کمترین اختلاف بین نتایج عددی و روابط پیشنهادی ایجاد گردد. به منظور بررسی درستی رابطه (۱)، درصد مشارکت کلاهک از بار کل مطابق با این رابطه و مدل‌سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس در جداول ۹ و ۱۰ مقایسه شده‌اند.

جدول ۱۰. مقایسه سهم باربری کلاهک به دست آمده از رابطه (۱) و مدل‌سازی عددی برای گروه شمع ۳۶ تایی

Table 10. Comparison of the load percentage carried by cap obtained from Equation (1) and numerical modeling in a 36-pile groups

شماره تست	سهم باربری کلاهک بر اساس رابطه (۱)	سهم باربری کلاهک بر اساس مدل‌سازی عددی	میزان اختلاف مدل‌سازی و رابطه (۱)	درصد اختلاف
۲۸	٪۳۲/۷	٪۲۸	٪۴/۷	٪۱۴/۵
۲۹	٪۲۵/۶	٪۲۳/۵	٪۲/۱	٪۸/۳
۳۰	٪۱۸/۵	٪۱۵	٪۳/۵	٪۱۹/۱
۳۱	٪۳۵/۶	٪۳۶	٪۰/۴	٪۱/۲
۳۲	٪۲۸/۵	٪۳۱/۸	٪۳/۳	٪۱۱/۷
۳۳	٪۲۱/۴	٪۲۰	٪۱/۴	٪۶/۴
۳۴	٪۳۸/۸	٪۳۹	٪۰/۲	٪۰/۶
۳۵	٪۳۱/۷	٪۳۳/۲	٪۱/۵	٪۴/۸
۳۶	٪۲۴/۶	٪۲۴	٪۰/۶	٪۲/۴



شکل ۱۰. نیروی تحمل شده توسط کلاهک، شمع‌ها و سیستم رادیه شمع برای تست‌های آزمایشگاهی الوکیل و اعظم [۲۰]

Fig. 10. load carried by cap, piles and piled raft system in tests performed by Elwakil & Azzam [20]

رابطه (۲)، میانگین سهم مشارکت کلاهک در نتایج آزمایش این محققین برابر ۳۲ درصد است.

$$LPC = \frac{0.4}{1.39} + \frac{0.4}{1.22} + \frac{0.4}{1.15} = 0.32 \quad (2)$$

است. لازم به ذکر است که در اکثر موارد، درصد خطا زیر ۱۰ درصد است. بر این اساس انطباق خوبی بین نتایج رابطه (۱) و مدل‌سازی عددی برقرار است. همچنین نتایج مطالعه آزمایشگاهی الوکیل و اعظم (۲۰۱۵) در تعیین سهم باربری کلاهک، مطابق شکل ۱۰ است [۲۰] که از بین تست‌های آزمایشگاهی این مطالعه، گروه با ۱۶ شمع به قطر ۱۲ میلی‌متر و فاصله ۳۷/۵ میلی‌متر و خاک با زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه مد نظر است. طبق

## منابع

- [1] M. Budhu, SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS, (2008).
- [2] E. Davis, H. Poulos, The analysis of piled raft systems, Australian Geomech, Jour-nal G, 2 (1972).
- [3] L.J. Novak, L.C. Reese, S.-T. Wang, Analysis of pile-raft foundations with 3D finite-element method, Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond, (2005) 1-12.
- [4] F. Basile, Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts, Computers and Geotechnics, 63 (2015) 73-82.
- [5] A. Eslami, M. Veiskarami, M. Eslami, Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles-three case histories, International Journal of Civil Engineering, 10(2) (2012) 100-111.
- [6] A. Saeedi Azizkandi, H. Rasouli, M.H. Baziar, Load sharing and carrying mechanism of piles in non-connected pile rafts using a numerical approach, International Journal of Civil Engineering, 17(6) (2019) 793-808.
- [7] 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.
- [8] R. Cooke, Piled raft foundations on stiff clays—a contribution to design philosophy, Geotechnique, 36(2) (1986) 169-203.
- [9] J.A. Hemsley, Design applications of raft foundations, (2000).
- [10] A. Mandolini, G. Russo, C. Viggiani, Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16(1) (2005) 177.
- [11] A. Davids, J. Wongso, D. Popovic, A. McFarlane, A Postcard from Dubai design and construction of some of the tallest buildings in the world, Proc. of the CTBUH 8th World Congress, (2008) 3-5.
- [12] Y.F. Leung, K. Soga, B. Lehane, A. Klar, Role of linear

این مقدار بر اساس رابطه (۱) و به ازای  $S/D=0.3125$ ،  $\phi=35^\circ$ ،  $A=0.071$ ،  $B=0.311$  و  $C=0.11$  حدوداً ۳۳ درصد به دست می‌آید که تطابق خوبی با نتایج اندازه‌گیری شده در تست آزمایشگاهی دارد.

$$LPC = A \times \left( \frac{S}{D} \right) + B \times \tan \phi - C$$

## ۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر توزیع بار بین اجزاء مختلف پی‌های رادیه شمع بر روی خاک دان‌های، به صورت مدل‌سازی سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. این پی‌ها در مشخصات هندسی، آرایش و تعداد شمع‌ها با هم متفاوت بودند و علاوه بر این، زاویه اصطکاک داخلی خاک و شرایط کلاهدک شمع‌ها به لحاظ متصل و یا جدا بودن آن‌ها از خاک، با یکدیگر فرق داشت. طی مدل‌سازی‌های انجام شده، میزان تاثیرگذاری پارامترهای موثر بر روی توزیع بار پی بین کلاهدک و شمع‌ها مشخص گردید. همچنین به استخراج نمودارها و روابطی برای تعیین سهم باربری کلاهدک از بار کل، بر اساس پارامترهای قطر شمع، تعداد شمع، نسبت قطر به فاصله شمع‌ها و زاویه اصطکاک داخلی خاک پرداخته شد.

در ادامه مهم‌ترین نتایج به دست آمده در رادیه شمع‌های اجرا شده در خاک دان‌های ذکر شده است:

۱- درصد باربری کلاهدک در سیستم پی‌های رادیه شمع متکی بر خاک دان‌های، بسته به پارامترهای تاثیرگذار بین ۱۵ تا ۴۲ درصد از ظرفیت باربری کلی سیستم است.

۲- هر چه نسبت  $S/D$  بزرگ‌تر شود (فاصله شمع‌ها از یکدیگر بیشتر یا قطر شمع‌ها کوچک‌تر شود)، با ثابت بودن سایر پارامترها، سهم باربری کلاهدک افزایش می‌یابد.

۳- در گروه شمع با نسبت  $S/D$  ثابت، برای یک تعداد شمع مشخص، هر چه زاویه اصطکاک داخلی خاک بزرگ‌تر باشد، سهم باربری کلاهدک افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش تعداد شمع‌ها در گروه و ثابت بودن زاویه اصطکاک داخلی خاک، سهم باربری کلاهدک افزایش خواهد یافت.

۴- رابطه زیر برای هر نسبت فاصله به قطر شمع کمتر از ۱۰ و برای رادیه شمع‌های متکی بر خاک دان‌های و تعداد شمع‌های کمتر از  $9 \times 9$ ، سهم باربری کلاهدک از بار کل را مشخص می‌کند.

$$LPC = A \times \left( \frac{S}{D} \right) + B \times \tan \phi - C$$

$$A = 0.071, B = 0.375 - 0.004n, C = 0.126 - 0.001n$$

- Engineering, 45(1) (2021) 359-371.
- [17] A. Kumar, D. Choudhury, Development of new prediction model for capacity of combined pile-raft foundations, *Computers and Geotechnics*, 97 (2018) 62-68.
- [18] M. Rabiei, A.J. Choobbasti, Innovative piled raft foundations design using artificial neural network, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(1) (2020) 138-146.
- [19] S. Sahraeian, J. Takemura, M. Yamada, S. Seki, A Few Critical Aspects to Rational Design of Piled Raft Foundation for Oil Storage Tanks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2) (2020) 2117-2137.
- [20] A. Elwakil, W. Azzam, Experimental and numerical study of piled raft system, *Alexandria Engineering Journal*, 55(1) (2016) 547-560.
- elasticity in pile group analysis and load test interpretation, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(12) (2010) 1686-1694.
- [13] T. Abdel-Fattah, A. Hemada, Use of creep piles to control settlement of raft foundation on soft clay—case study, *Proceedings of 8th Alexandria international conference on structural and geotechnical engineering*, Alexandria, (2014) 89-109.
- [14] P.D. Long, V. Vietnam, Piled raft—a cost-effective foundation method for high-rises, *Geotechnical Engineering*, 41(1) (2010) 149.
- [15] S. Al-Ne'aimi, M.S. Hussain, Numerical modeling and parametric study of piled rafts foundations, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(6) (2021) 1-13.
- [16] H. Singh, P. Garg, J. Jha, Modeling the Response of a Piled-Raft Footing: Ultimate Bearing Capacity, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Civil

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Asadina, S. Amirafshari, A. Ghanbari, New equation to determine the load percentage carried by raft in piled raft foundations, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 3139-3154.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20051.7329



