



## Evaluation of Compressive Bearing Capacity of Long Offshore Steel Piles Driven in the Persian Gulf

A. H. Shamshirgaran, B. Ebrahimian\*

Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Long-driven steel piles are widely used in the foundation of fixed offshore oil and gas extraction platforms due to the existence of physical limitations, heavy loads and weak shallow seabed soil layers. There are different methods to determine the pile bearing capacity, including static analysis, using the results of in-situ tests, as well as static and dynamic pile loading tests. In recent years, the in-situ cone penetration test has considerably been developed in the design of offshore piles owing to its high accuracy, continuous recording across the depth, and similarity to pile. Additionally, the application of in-situ tests for pile design is of great interest due to difficulties in obtaining undisturbed soil samples at sea. The dynamic pile load test is also considered as an alternative and economical way to the static pile load test, particularly in offshore environments. In this paper, for the first time, a comprehensive data bank, including soil engineering parameters derived from laboratory and in-situ tests as well as field measurements obtained from dynamic pile tests in short, medium, and long-term conditions, is developed for the Persian Gulf - South Pars field. Afterward, fourteen methods, including four offshore static analysis methods and ten direct methods based on cone penetration test results, are selected and applied to estimate the axial compressive bearing capacity of steel pipe piles driven in the studied area. The results obtained from different methods are compared with the results of dynamic pile tests at three mentioned times and evaluated using the statistical criteria. According to the findings of the conducted statistical analyses, the lowest precision and prediction quality are provided in the four static analysis methods compared to the CPT-based methods for the developed data bank. The values of pile total ultimate bearing capacity obtained from the static analysis methods are on average 70%, 63%, and 35% higher than the corresponding values measured by the dynamic pile tests in short, medium, and long-term conditions, respectively.

### Review History:

Received: Mar. 31, 2020  
Revised: May, 25, 2020  
Accepted: May, 31, 2020  
Available Online: Jul. 13, 2020

### Keywords:

Offshore pile  
Axial compressive bearing capacity  
Cone penetration test (CPT)  
Dynamic pile test, Persian Gulf

### 1- Introduction

Over the past years, the pile foundation of offshore platforms installed in the Persian Gulf has usually been designed based on the American Petroleum Institute (API) method as an available and common standard procedure. According to the data recorded from the piling process of the offshore projects in the Persian Gulf region and the experiences gained from the installation of these platforms, it is generally found that the results of the API method do not match the field measurements resulted from the pile dynamic tests conducted in this area. In some cases, significant differences are observed between the predicted and measured values [1]. This mismatch can cause numerous difficulties during the piling process and installation of offshore platforms. It can even pose risks to these structures against applied loads in the long term condition and during operation.

By reviewing the literature, it is revealed that so far, no comprehensive research works have been carried out to

determine the bearing capacity of offshore piles in Iran. Hence, the authors have decided to take a step towards evaluating the different offshore static analyses as well as CPT-based methods for predicting the bearing capacity of offshore piles in the Persian Gulf region. For this purpose, the results obtained from the different methods are compared to those of pile dynamic tests and subsequently, the methods with better predictive quality and higher reliability are selected.

### 2- Methodology

In this research, for the first time, a comprehensive data bank including soil engineering parameters, CPTu results at the vicinity of piles, and the results of pile dynamic loading tests at different time intervals is developed for the Persian Gulf region - South Pars field [2, 3]. This data bank contains more than 5000 geotechnical data derived from laboratory and in-situ tests, the information of 8 CPTu performed adjacent to 22 piles, along with the measurements of 28 dynamic pile tests at short, medium and long term conditions. In this study, two

\*Corresponding author's email: b\_ebrahimian@sbu.ac.ir



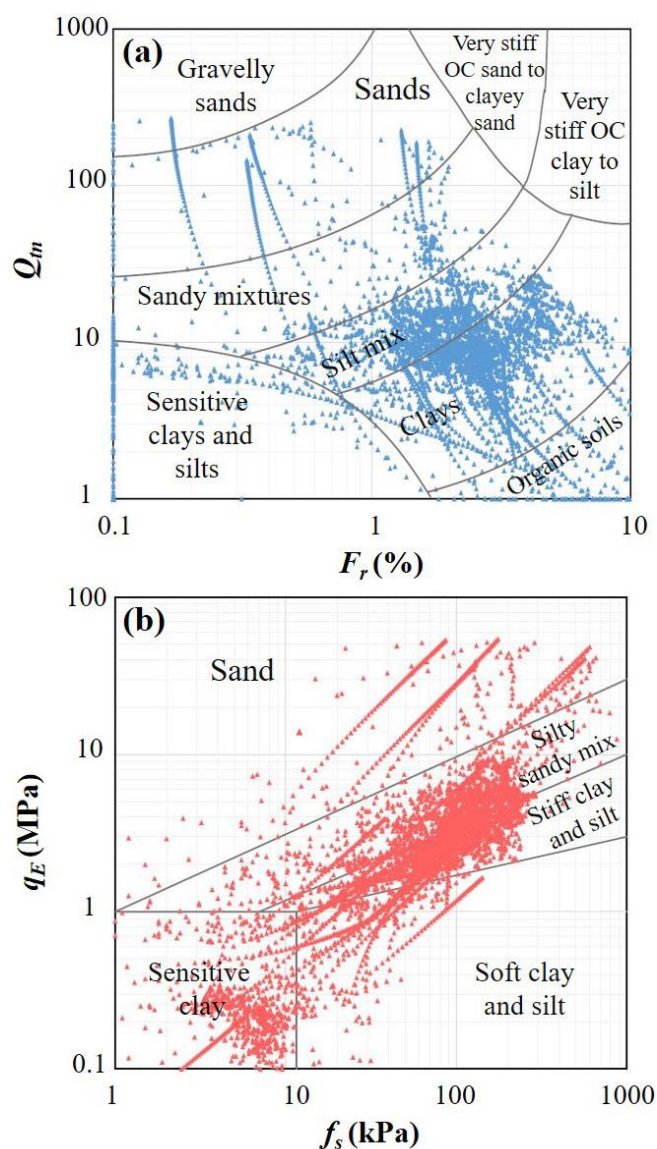


Fig. 1. Soil classification using (a) Robertson (1990), and (b) Eslami & Fellenius (2004) charts.

methods, Robertson (1990) and Eslami & Fellenius (2004), have been used for soil classification using CPTu results [4, 5]. As shown in Figure 1, more than 94% of the marine sediments in the studied area are fine-grained soils. According to the consolidation curves obtained from the oedometer tests, reaching on average 50 and 90% consolidation degrees takes about 3.5 and 83.5 days, respectively. It is worth noting that the short-term bearing capacity of a pile is the value measured immediately after the pile driving. At the same time, the medium-term bearing capacity corresponds to the consolidation degree of 40 to 50%. Finally, the long-term bearing capacity of a pile is realized when 90% of the consolidation process is completed. Accordingly, out of 28 dynamic tests performed on the piles, the bearing capacity of 22 cases has been measured immediately after driving (short

term), 5 cases from a few hours to 10 days (medium-term), and one case after 263 days (long term).

In the present study, 4 offshore static analysis methods, including American Petroleum Institute (1993), Kolk and Velde (1996), Jardine et al. (2005) and Karlsrud et al. (2005), 8 direct methods based on CPT results comprising Aoki & Velloso (1975), Clisby et al. (1978), Schmertmann (1978), de Ruiter & Beringen (1979), Philliponat (1980), Tumay & Fakhroo (1982), Bustamante & Gianceselli (1982), and Price & Wardle (1982), as well as 2 direct methods using CPTu results, consisting of Eslami & Fellenius (1997) and Niazi & Mayne (2016) are employed [6].

Seven statistical criteria are used to evaluate the bearing capacity of piles based on the model parameter ( $Q_p/Q_m$ ) in short, medium and long term conditions. Statistical criteria include arithmetic mean ( $\mu$ ), Square Root of Sum of Squares (SRSS), Coefficient of Variation (CV), coefficient of determination ( $R^2$ ), 50% and 90% cumulative probabilities, and 20% accuracy level obtained from normal logarithmic and histogram distribution diagrams for corresponding ratio. Finally, the radar charts are utilized to score the methods and select the superior one. The better performance of the method leads to a higher Area Ratio (AR) which is closer to 100.

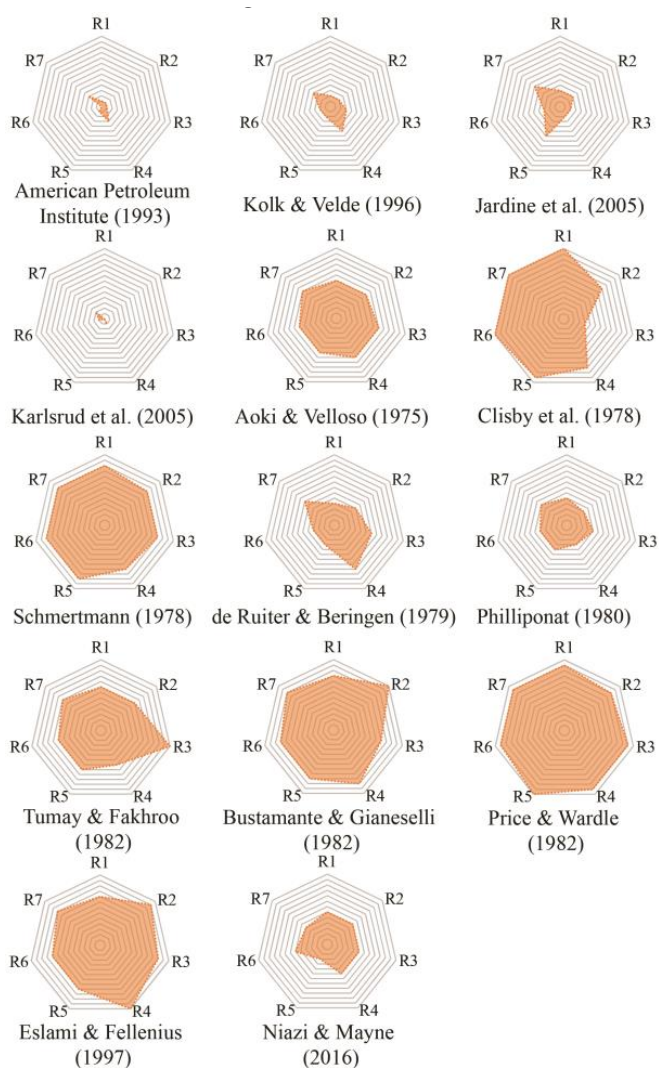
### 3- Results and Discussion

According to the statistical criteria, the best prediction of the shaft, base, and total ultimate resistances in long-term conditions are obtained in Eslami & Fellenius (1997), Price & Wardle (1982) and again Eslami & Fellenius (1997) methods, respectively. Additionally, the lowest scattering and, therefore the best performance is observed in Schmertmann (1978) and Tumay & Fakhroo (1982) methods for shaft resistance prediction, Price & Wardle (1982) and Clisby et al. (1978) methods for base resistance prediction, and Bustamante & Gianceselli (1982) method for total ultimate resistance prediction in short and medium-term conditions, respectively. In this respect, the radar charts related to each method for estimating the short and medium-term total ultimate bearing capacities are presented in Figures 2 and 3, respectively.

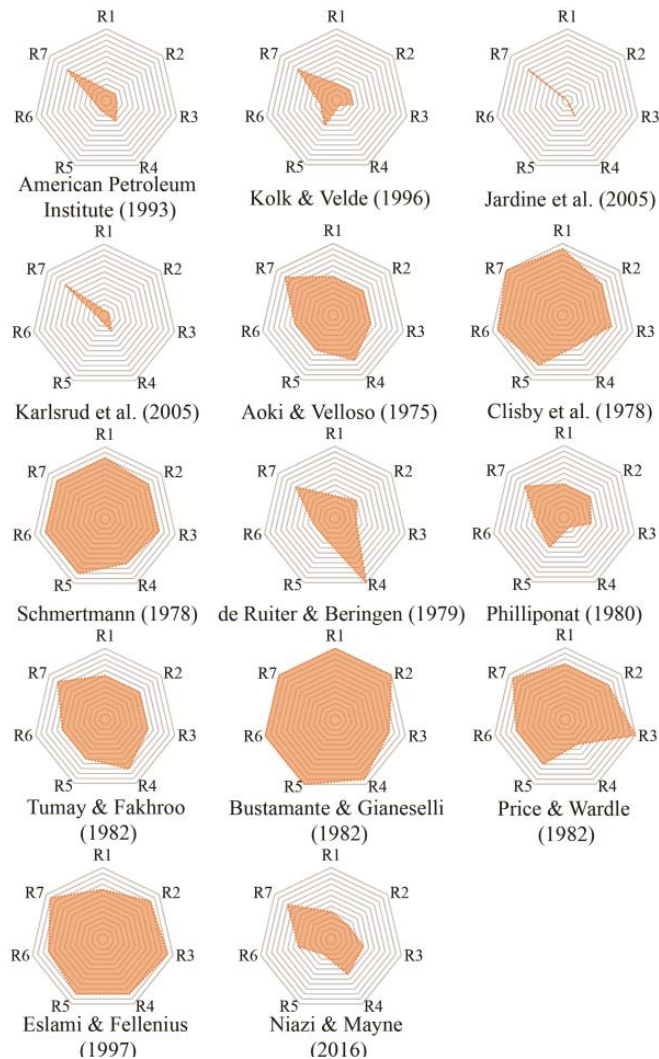
### 4- Conclusion

According to the performed statistical analyses, the following conclusions can be drawn:

- Comparing to the results of the dynamic pile tests, the shaft resistance values obtained from the offshore static analysis methods are largely over-predicted in short, medium and long-term conditions. In this respect, the magnitudes of shaft resistance derived from these methods are on average 87%, 71%, and 38% higher than the corresponding values measured by the dynamic pile tests in short, medium, and long-term conditions, respectively. Therefore, assuming the “conservative performance” of the static analysis methods, which is common in the technical literature, is not correct at least for clayey soils. Consequently, it is recommended to apply the term “uncertainty” for the performance of these methods. However, the values of base resistance are accurately estimated by the offshore static analysis methods, particularly in the long-term condition.



**Fig. 2. Radar chart related to each method for estimating the short term total ultimate bearing capacity of piles.**



**Fig. 3. Radar chart related to each method for estimating the medium term total ultimate bearing capacity of piles.**

- The CPT- and CPTu-based methods predict the shaft resistance with less scattering and higher accuracy than the static analysis methods. The precision level as well as the prediction quality of the direct methods based on the mechanical CPT equipment in estimating the long-term bearing capacity of piles are lower than those of direct methods based on the electrical CPTu device. The main reason is attributed to the fact that, unlike the electrical CPTu device, the mechanical CPT equipment is not able to measure the pore water pressure during cone penetration and applies the total stresses to determine the pile bearing capacity.

- So far, no comprehensive study has been conducted on determining the bearing capacity of offshore piles in Iran. The results of the current investigation can be used by researchers

and specialists involved in the field of geotechnical engineering to minimize the potential risks of Iran's offshore projects, especially in the Persian Gulf region.

**References**

- [1] B. Ebrahimian, A.H. Shamshirgaran, Axial Compression Bearing Capacity of Driven Offshore Piles in the Persian Gulf – A Case Study, 13th International Conference on Coasts, Ports and marine structures, (2018) 249-250.
- [2] B. Ebrahimian, V. Movahed, A. Nazari, Soil characterisation of South Pars field, Persian Gulf, *Environmental Geotechnics*, 1(2) (2014) 96-107.
- [3] B. Ebrahimian, V. Movahed, A.Y. Pasha, Evaluation of undrained shear strength of marine clay using cone penetration resistance at South Pars field in Iran, *Ocean engineering*, 54 (2012) 182-195.

- [4] A. Eslami, B.H. Fellenius, CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and a proposed new approach, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 28(1) (2004) 69-86.
- [5] P.K. Robertson, Soil classification using the cone penetration test, *Canadian geotechnical journal*, 27(1) (1990) 151-158.
- [6] F.S. Niazi, P.W. Mayne, Cone Penetration Test Based Direct Methods for Evaluating Static Axial Capacity of Single Piles, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(4) (2013) 979-1009.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

A. H. Shamshirgaran, B. Ebrahimian , *Evaluation of Compressive Bearing Capacity of Long Offshore Steel Piles Driven in the Persian Gulf*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 889-892.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18158.6795](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18158.6795)





## ارزیابی ظرفیت باربری فشاری شمع‌های طولی فولادی کوبشی فراساحلی در منطقه خلیج فارس

امیرحسین شمشیرگران، بابک ابراهیمیان\*

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۵  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

شمع فراساحلی  
ظرفیت باربری محوری فشاری  
آزمون نفوذ مخروط  
آزمایش دینامیکی شمع  
خلیج فارس

**خلاصه:** استفاده از شمع‌های طولی فولادی کوبشی به عنوان شالوده سکوه‌های دریایی استخراج نفت و گاز، به دلیل محدودیت‌های فیزیکی، وجود بارهای سنگین و کم بودن ظرفیت باربری لایه‌های سطحی بستر دریا، از پرکاربردترین گزینه‌هاست. روش‌های مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها شامل تحلیل استاتیکی، استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا، و آزمون‌های میدانی بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شمع وجود دارند. در سال‌های اخیر، استفاده از آزمون‌های برجا نظیر نفوذ مخروط در طراحی شمع‌های فراساحلی، به دلایلی همچون دقت قابل توجه، نتایج پیوسته در عمق، شباهت آن به شمع و مشکلات اخذ نمونه دست نخورده در دریا، گسترش قابل توجهی یافته است. آزمایش‌های دینامیکی نیز به عنوان یک روش جایگزین، اقتصادی و سریع، نسبت به آزمون‌های استاتیکی بارگذاری شمع به ویژه در محیط‌های فراساحلی مورد توجه‌اند. در مطالعه حاضر، برای نخستین بار، یک بانک داده جامع شامل پارامترهای مهندسی خاک حاصل از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و بر جای ژئوتکنیکی همراه با اندازه‌گیری‌های میدانی به دست آمده از آزمون‌های دینامیکی شمع در سه زمان کوتاه، میان و بلند مدت در منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی توسعه می‌یابد. سپس، نسبت به انتخاب و کاربرد چهارده روش شامل چهار روش فراساحلی تحلیل استاتیکی و ده روش مستقیم مبتنی بر نتایج آزمایش نفوذ مخروط برای تخمین ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های لوله‌ای فولادی کوبیده شده در منطقه مذکور اقدام می‌شود. نتایج حاصل از روش‌های مختلف با نتایج آزمایش‌های دینامیکی شمع در سه زمان مورد اشاره مقایسه و توسط معیارهای آماری ارزیابی می‌شوند. بر اساس یافته‌های حاصل از تحلیل‌های آماری، کمترین دقت و کیفیت پیش‌بینی برای بانک اطلاعاتی توسعه یافته در روش‌های تحلیل استاتیکی در مقایسه با روش‌های مبتنی بر آزمون نفوذ مخروط ارائه می‌شوند. مقادیر ظرفیت باربری کل به دست آمده از روش‌های تحلیل استاتیکی به طور میانگین ۷۰٪، ۶۳٪ و ۳۵٪ بیشتر از مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های دینامیکی شمع به ترتیب در سه زمان کوتاه، میان و بلند مدت می‌باشند.

### ۱- مقدمه

ویژه‌ای برخوردار است. در این رابطه، سطوح بالای ایمنی و دقت بایستی در طراحی شالوده سازه‌های فراساحلی لحاظ شوند. به علت محدودیت‌های موجود در فراساحل، پی‌های دریایی از منظر فنی، اقتصادی و زیست محیطی تفاوت‌های آشکاری با پی‌های واقع در خشکی دارند. به طوری که هرگونه گسیختگی پی‌های فراساحلی به دلایلی نظیر شناخت یا دانش ناکافی نسبت به ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک بستر می‌تواند خسارات قابل ملاحظه زیست محیطی و اقتصادی به بار آورد. لذا انجام مطالعات شناسایی ژئوتکنیکی دقیق و گسترده در فراساحل بسیار ضروری و حیاتی است و به عنوان پیش نیاز اجباری طراحی پی‌های فراساحلی مطرح می‌باشد [۲].

بر این اساس، تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فراساحلی به عنوان پی سازه‌های جکت و عامل پایداری و استحکام سکوه‌های دریایی بسیار مهم

خلیج فارس یکی از نواحی غنی جهان از منظر ذخایر زیر زمینی مواد هیدروکربوری است. با توجه به عمق آب در این منطقه که کمتر از ۱۰۰ متر است، عمده سازه‌های فراساحلی استخراج نفت و گاز از نوع سازه‌های فولادی جکت<sup>۱</sup> می‌باشند [۱]. پی این سازه‌ها معمولاً شمع‌های طولی فولادی هستند که از داخل پایه‌های جکت در بستر دریا کوبیده می‌شوند. طراحی اقتصادی و ایمن پی جکت‌ها با توجه به اهمیت بسیار بالای سازه جکت و سکوی فوقانی آن، وجود انواع بارهای استاتیکی و دینامیکی بزرگ و از طرفی امکان بروز مشکلات زیست محیطی فاجعه بار در صورت واژگونی سازه، از اهمیت

1 Jacket

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b\_brahimian@sbu.ac.ir



به عنوان مهمترین و معتبرترین آزمایش برجا برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در خشکی و فراساحل و به عنوان یک روش مکمل و جایگزین برای روش تحلیل استاتیکی، مورد توجه قرار گرفته است [۵]. هر چند با توسعه فراوان این آزمایش در دنیا، استفاده از آن جهت عملیات ژئوتکنیکی و شناسایی‌های زیر سطحی در ایران در سطح قابل قبولی انجام نمی‌پذیرد [۲].

انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع در محل همواره کامل‌ترین و مطمئن‌ترین روش برای تعیین ظرفیت باربری می‌باشد که می‌تواند ظرفیت باربری یک شمع را مستقیماً و بر اساس شرایط واقعی و در محل تعیین نماید. آزمایش بارگذاری استاتیکی محوری فشاری معمولاً مطابق با استاندارد ASTM D-1143 انجام می‌شود. اما انجام آن همواره زمان‌بر و با صعوبت بسیار همراه است. مهم‌تر آن که امکان اجرای آن برای هر پروژه‌ای، به ویژه پروژه‌های فراساحلی، میسر نیست [۶].

ظرفیت باربری شمع‌ها را می‌توان با استفاده از آزمایش تحلیل دینامیکی همراه با اندازه‌گیری پارامترهای لازم در حین فرو رفت شمع در زمین نیز محاسبه نمود. در این روش، نمودارهای سرعت و نیروی اندازه‌گیری شده در محل به وسیله دستگاه PDA با مقادیر سرعت و نیروی محاسباتی از روش CAPWAP منطبق می‌شوند تا بدین ترتیب اطلاعات کامل‌تری از شمع نظیر تفکیک مقاومت‌های نوک و اصطکاک جدار، اندازه و توزیع مقاومت اصطکاکی روی جدار و توزیع نیروی محوری در شمع به دست آیند. امروزه آزمایش‌های تحلیل دینامیکی نیز به عنوان یک روش اقتصادی و سریع و جایگزین آزمایش بارگذاری شمع به ویژه در محیط‌های فراساحلی مورد توجه‌اند [۷]. آزمایش بارگذاری شمع و تحلیل دینامیکی به عنوان آزمایش‌های کنترل و محک شناخته می‌شوند. این بدین معناست که این آزمایش‌ها به عنوان یک مبنا برای تعیین و افزایش سطح دقت روش‌های تحلیل استاتیکی و آزمایش‌های برجا در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌شوند [۸].

در طول نیم قرن گذشته تا به امروز روش‌های متعددی برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی و نتایج مبتنی بر آزمایش نفوذ مخروط ارائه شده‌اند. مجموعه‌ای کامل از این روش‌ها توسط نیازی<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) گردآوری شده است [۹]. اساس کار این روش‌ها عمدتاً بر پایه روابط تجربی و تحلیلی استوار است و عوامل مختلفی نظیر نوع خاک، روش اجرا، جنس و ابعاد شمع را در طراحی‌ها مورد ملاحظه قرار می‌دهند [۱۰].

است. محققان در طول ۶۰ سال گذشته، روابط متعددی برای محاسبه ظرفیت باربری جدار و نوک شمع‌ها پیشنهاد داده‌اند. هر چند به دلایلی همچون پیچیدگی‌های ذاتی رفتار خاک و وجود لایه‌های متعدد خاک با ویژگی‌های گوناگون، تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها همواره با مشکلات و ابهاماتی همراه بوده است. امروزه روش‌های مختلفی شامل تحلیل استاتیکی<sup>۲</sup>، به کارگیری نتایج آزمون‌های برجا<sup>۳</sup>، آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی<sup>۴</sup> و دینامیکی<sup>۵</sup> برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌شوند [۳].

ظرفیت باربری شمع‌ها در روش‌های تحلیل استاتیکی با استفاده از مشخصات مکانیکی خاک محل پروژه و تحلیل‌های تئوریک رایج در مکانیک خاک کلاسیک تخمین زده می‌شوند. هر چند تحلیل استاتیکی به عنوان رایج‌ترین روش و نیز جزء گام‌های اولیه تحلیل و طراحی شمع‌ها شناخته می‌شود اما به دلیل ساده‌سازی‌های صورت گرفته، انتخاب ضریب اطمینان‌های بزرگ‌تر در آن امری اجتناب‌ناپذیر است. این مسئله موجب دقت پایین‌تر و اتلاف بیشتر در منابع در این دسته از روش‌ها می‌شود [۴].

در سالیان اخیر، استفاده از تکنیک‌های آزمون‌های برجا در طراحی شمع‌ها گسترش چشمگیری یافته است. دلایل اصلی آن را می‌توان در عدم توانایی محققان در شبیه‌سازی دقیق و واقعی شرایط جانبی و مرزی برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مقایسه با حالت برجا، مشکلات نمونه‌گیری صحیح به خصوص اخذ نمونه‌های دست نخورده در خاک‌های دانه‌ای و نیز توسعه و پیشرفت امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی که توأم با ایده حمل دستگاه آزمایش به محل به جای آوردن نمونه‌های کوچک خاک به آزمایشگاه است، برشمرد. آزمایش‌های برجایی که برای تعیین مقاومت نهایی یک شمع به کار می‌روند عمدتاً شامل آزمایش‌های نفوذ استاندارد<sup>۵</sup> (SPT)، نفوذ مخروط<sup>۶</sup> (CPT) و فشارسنج<sup>۷</sup> (PMT) می‌باشند. دو آزمایش اول برای تعیین ظرفیت باربری محوری و آزمایش سوم برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها استفاده می‌شوند. در بخش آزمون‌های برجا، امروزه استفاده از آزمون نفوذ مخروط (CPT یا CPTu) به دلایلی همچون دقت قابل توجه، قدرت تکرارپذیری و سرعت بالای این آزمایش، شباهت آن به یک شمع تحت بار محوری، تولید اطلاعات پیوسته‌ای از لایه‌بندی خاک، زمینه خوب جهت تفسیر نتایج آزمایش، و گسترش آزمایش در سالیان اخیر

- 1 Static analysis methods
- 2 In-situ tests
- 3 Static pile load tests
- 4 Dynamic analysis tests
- 5 Standard Penetration Test (SPT)
- 6 Cone Penetration Test (CPT)
- 7 Pressure Meter Test (PMT)

حال آن که در خاک های چسبنده مانند رس و سیلت اضافه فشار آب حفره‌های به سرعت مستهلک نمی‌شود و بایستی حتماً در محاسبه ظرفیت باربری بلند مدت در نظر گرفته شود [۲۱].

در اوایل دهه ۱۹۸۰، دستگاه نفوذسنج الکتریکی (CPTu) که می‌توانست فشار آب حفره‌های را در خلال نفوذ مخروط دستگاه اندازه‌گیری نماید، ارائه شد. پیشبینی می‌شد که این انقلاب در آزمایش نفوذ مخروط می‌تواند چاره‌گشا ایراد اساسی وارد بر این آزمایش برجا در تخمین رفتار بلند مدت شمع‌ها باشد. در پژوهش اسلامی و فلنیوس<sup>۹</sup> (۱۹۹۷) با استفاده از نتایج ۱۰۲ مطالعه موردی حاوی نتایج آزمایشات CPT و CPTu و بارگذاری شمع در ۱۳ کشور و ۴۰ سایت، روابطی برای تعیین ظرفیت باربری شمع بر اساس نتایج آزمایش نفوذ مخروط ارائه شد. در تحقیق ایشان علاوه بر تعیین ظرفیت باربری مبتنی بر نتایج آزمایش نفوذ مخروط، برای اولین بار یک رابطه جدید برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها بر اساس نتایج آزمایش CPTu پیشنهاد شد [۲۲]. سپس در مطالعه اسلامی و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۱)، با استفاده از داده‌های مربوط به شمع‌های اجرا شده در رس‌های دریاچه ارومیه، روش‌های مستقیم تخمین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها با استفاده از داده‌های آزمایش‌های CPT و CPTu ارزیابی شد. در مطالعه ایشان، از چهار روش تخمین ظرفیت باربری شمع بر پایه آزمایش CPT و یک روش مبتنی بر نتایج آزمایش CPTu استفاده شد. نتایج تحقیق ایشان در رس‌های دریایی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مبتنی بر آزمایش CPTu در مقایسه با روش‌های سنتی بر پایه آزمایش CPT، منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود. در پژوهش ایشان همچنین بیان گردید که ترکیب استفاده از نتایج دستگاه نفوذسنج الکتریکی (CPTu) و آزمایش تحلیل دینامیکی بهترین روش برای پیش‌بینی ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در محیط‌های فراساحلی می‌باشد [۳].

در طی سالیان گذشته، طراحی شمع‌های سکوه‌های دریایی نصب شده در خلیج فارس معمولاً بر اساس روش مؤسسه نفت آمریکا<sup>۱۱</sup> (API) به عنوان یک شیوه در دسترس و رایج آئین‌نامه‌ای انجام شده است. با بررسی داده‌های ثبت شده از فرآیند شمع‌کوبی پروژه‌های فراساحلی در خلیج فارس و تجربیات به دست آمده از عملیات نصب این سکوها مشخص می‌شود که به طور کلی نتایج حاصل از این روش تطابق مناسبی با اندازه‌گیری‌های میدانی به دست آمده از آزمون‌های دینامیکی شمع در این منطقه ندارند و در برخی

در تحقیقات انجام شده توسط وانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷)، ابوفرسخ و تی تی<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) و تاند و فونگراد<sup>۳</sup> (۱۹۸۹) در سه دهه اخیر به خوبی نشان داده شده است که استفاده از روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها مبتنی بر روش‌های تحلیل استاتیکی منجر به پاسخ‌های بسیار متفاوتی می‌شوند [۱۱-۱۳]. پژوهش ابراهیمیان و شمشیرگران<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) بر روی یک مورد مطالعاتی در رس‌های دریایی خلیج فارس بیانگر این نکته است که روش‌های مبتنی بر تحلیل استاتیکی، تخمین‌های دست بالا و دور از واقعیتی را نسبت به روش‌های مبتنی بر آزمایش نفوذ مخروط برای ظرفیت باربری جدار ارائه می‌کنند [۱۴]. بنابراین، ارائه یک روش جایگزین و مکمل برای محاسبه ظرفیت باربری اقتصادیتر شمع‌ها ضرورت می‌یابد. بریاد و تاکر<sup>۵</sup> (۱۹۸۸) با مطالعه بر روی ۸ شمع بارگذاری شده به این نتیجه رسیدند که مقادیر ظرفیت باربری حاصل از روش‌های بوستامانته و جیانسلی<sup>۶</sup> (۱۹۸۲)، دیرویترو و برینگن<sup>۷</sup> (۱۹۷۹) و اشمرتمن<sup>۸</sup> (۱۹۷۸) در مقایسه با سایر روش‌ها، مطابقت بیشتری با نتایج آزمایش‌های شمع دارند [۱۵]. همچنین تحقیقات انجام شده بر روی ۸ روش تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPT در سال ۱۹۹۹ نشان می‌دهند که روش‌های بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)، دیرویترو و برینگن (۱۹۷۹) در میان روش‌های مورد مطالعه از دقت و کیفیت بالاتری در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها برخوردارند [۱۶]. سایر تحقیقات انجام شده در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ در این حوزه حاکی از آن است که استفاده از آزمایش برجا CPT می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب و منطقی در تحلیل ظرفیت باربری محوری شمع‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۱۷-۱۹]. اما آنچه عمدتاً در تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها مد نظر قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری بهره‌بردارانی آن‌هاست که متضمن رفتار بلند مدت شمع‌هاست [۲۰]. در حالی که در آزمایش برجای CPT از تحلیل تنش کل در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌شود. تحلیل تنش کل مربوط به بررسی رفتار شمع‌ها در کوتاه مدت است و در مقابل تحلیل تنش مؤثر مربوط به بررسی رفتار شمع‌ها در بلند مدت می‌باشد. اثر اضافه فشار آب حفره‌های در خاک‌های غیرچسبنده مانند ماسه قابل صرف نظر کردن است چرا که هم مقدارش اندک است و هم به سرعت زائل می‌شود.

- 1 Wang et al.
- 2 Abu-Farsakh & Titi
- 3 Tand & Funegard
- 4 Ebrahimiyan & Shamsirgaran
- 5 Briaud & Tucker
- 6 Bustamante & Gianeselli
- 7 de Ruiter & Beringen
- 8 Schmertmann

9 Eslami & Fellenius

10 Eslami et al.

11 American Petroleum Institute (API)

موارد اختلاف فاحشی بین این دو مشاهده می‌شود. این عدم تطابق همان طوری که موجب بروز مشکلات اجرایی متعدد در زمان شمع کوبی و نصب سکوه‌های دریایی می‌شود، حتی می‌تواند در بلند مدت و در طی دوران بهره برداری نیز مخاطراتی را برای این سکوها در برابر بارهای وارده ایجاد نماید. در تحقیقات مرتبط تصریح شده است که در روش API، ظرفیت باربری شمع‌های واقع در محیط‌های رسی فراساحلی بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های میدانی تخمین زده می‌شود [۲۳]. در سایر پژوهش‌های مشابه در این زمینه نیز آمده است که دلیل آن که در خصوص اثرات کوبش در خاک‌های چسبنده و سطح تماس مؤثر بین خاک و شمع اطلاعات محدودی وجود دارد، محاسبه مقاومت جدار در این خاک‌ها همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است [۲۴]. استفاده از فرضیات ساده و در نظر نگرفتن عواملی همچون تنوع ترکیبات خاک، انواع شمع، روش نصب و ضریب نفوذ در روش API، موجب دقت پایین و عملکرد ضعیف این روش نسبت به سایر روش‌ها شده است [۲۵].

با جستجو در ادبیات فنی مشخص می‌شود که تا به امروز در ایران تحقیق جامعی بر روی تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فراساحلی انجام پذیرفته است. بر این اساس، نویسندگان بر آن شده‌اند تا با انجام پژوهش حاضر، گامی در راستای ارزیابی روش‌های مختلف فراساحلی تحلیل استاتیکی و نیز روش‌های مبتنی بر به کارگیری نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) در تعیین ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های فراساحلی منطقه خلیج فارس بردارند و با مقایسه نتایج حاصل از این روش‌ها با مشاهدات آزمون‌های دینامیکی شمع، اقدام به به‌گزینی و انتخاب روش‌های با کیفیت پیش‌بینی بهتر و قابلیت اطمینان بالاتر نمایند. برای این منظور، ابتدا برای نخستین بار، یک بانک داده جامع شامل خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، نتایج آزمایش‌های دینامیکی شمع در بازه‌های زمانی مختلف و اطلاعات آزمون‌های CPTu انجام شده در مجاورت شمع‌ها برای منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی ایجاد میشود. سپس، با تحلیل‌های آماری به ارزیابی عملکرد ۱۴ روش تعیین ظرفیت باربری به تفکیک ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی شمع‌های کوبشی لوله‌ای ته باز فراساحلی در سه بازه زمانی کوتاه، میان و بلند مدت پرداخته می‌شود.

## ۲- مشخصات بانک داده ژئوتکنیکی توسعه یافته

از سال ۱۹۹۹ تا به امروز بیش از ۴۰ عملیات تفصیلی شناسائی ژئوتکنیک و ژئوفیزیک در خاک‌های اغلب رسی میدان پارس جنوبی اجرا

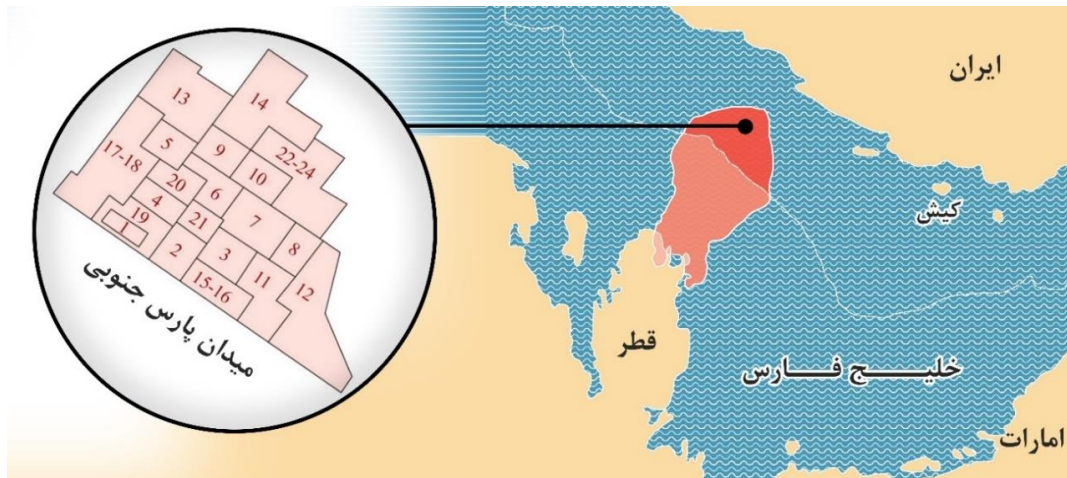
شده‌اند. با توجه به اهمیت و نوع شالوده سکوه‌های دریایی نصب شده در این منطقه، شناسائی‌های ژئوتکنیکی تا عمق حدود ۱۳۰ متر زیر بستر دریا ادامه یافته‌اند [۲۶ و ۲۷]. علاوه بر انجام مجموعه کاملی از آزمون‌های آزمایشگاهی کلاسیک مکانیک خاک اعم از شناسائی و اندکس، تغییرات حجمی، آب در خاک، شیمیائی و مقاومتی بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها، آزمون‌های در جای محلی نظیر نفوذ مخروط الکتریکی همراه با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای (CPTu) و برش پره نیز در مجاورت موقعیت شمع‌ها انجام شده‌اند. در کنار بررسی‌های بسیار دقیق آزمایشگاهی و بر جای ژئوتکنیکی، در حین عملیات شناسائی برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، آزمایش‌های نفوذسنج جیبی<sup>۱</sup> و برش پره مینیاتوری<sup>۲</sup> نیز بر روی نمونه‌های استخراج شده از گمانه‌ها در هر ۲ الی ۳ متر در آزمایشگاه مستقر بر شناور شناسائی ژئوتکنیک<sup>۳</sup> انجام شده‌اند. جزئیات بیشتر در این خصوص در مراجع [۲۶ و ۲۷] آمده‌اند. در این تحقیق، در ابتدا یک بانک جامع اطلاعاتی شامل پارامترهای مهندسی خاک، اطلاعات آزمون‌های CPTu انجام شده در مجاورت شمع‌ها و نتایج آزمایش‌های دینامیکی شمع در بازه‌های زمانی مختلف برای منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی توسعه می‌یابد. این بانک داده مشتمل بر بیش از ۵۰۰۰ داده ژئوتکنیکی حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا، اطلاعات ۸ آزمون CPTu در مجاورت ۲۲ شمع همراه با ۲۸ مورد آزمایش دینامیکی بر روی آن‌ها در زمانهای مختلف کوتاه، میان و بلند مدت می‌باشد.

میدان پارس جنوبی با مساحت تقریبی ۳۷۰۰ کیلومتر مربع، یکی از بزرگ‌ترین میدانی گازی جهان می‌باشد که حدود ۶ درصد از کل ذخایر گازی جهان در آن جای گرفته است. عمق آب در این میدان بین ۷۰ تا ۸۰ متر متغیر است [۱]. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ساختگاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

برای هر یک از شمع‌ها و گمانه‌های مورد مطالعه به ترتیب یک شناسه تحت عنوان TP و BH در نظر گرفته شده است که مخفف کلمات "Test Pile" و "Borehole" هستند. هر شناسه از دو بخش تشکیل شده است که با استفاده از یک خط تیره (-) از یکدیگر جدا شده‌اند. بخش اول شامل کلمه دو حرفی TP یا BH است. بخش دوم هر شناسه شامل یک عدد دو رقمی بین ۰۱ تا ۲۲ برای شمع‌ها و بین ۰۱ تا ۰۸ برای گمانه‌ها میباشد. ترتیب اعداد در شمع‌ها بر اساس تاریخ و ساعت کوبش، طبقه بندی شده‌اند.

- 1 Pocket penetrometer
- 2 Miniature vane
- 3 Onboard laboratory





شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ساختگاه مورد مطالعه

Fig. 1 . Geographical location of the studied area.

جدول ۱. مشخصات گمانه های مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of the studied boreholes

عمق نهایی گمانه (m)	عمق آب (m)	مختصات		نام گمانه
		طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	
۱۱۰/۴۰	۵۹/۰۰	۵۲° ۱۲' ۰۷/۴۷۸"	۲۶° ۵۳' ۳۷/۱۱۴"	<b>BH-01</b>
۱۱۰/۷۰	۶۱/۰۴	۵۲° ۱۱' ۴۱/۰۴۸"	۲۶° ۵۱' ۰۱/۴۸۴"	<b>BH-02</b>
۱۱۰/۰۵	۶۱/۵۹	۵۲° ۱۴' ۱۵/۴۸۷"	۲۶° ۵۳' ۵۰/۱۶۱"	<b>BH-03</b>
۸۰/۸۶	۶۳/۴۳	۵۲° ۱۶' ۵۲/۹۲۷"	۲۶° ۴۷' ۰۴/۸۰۷"	<b>BH-04</b>
۱۱۰/۳۴	۷۰/۴۹	۵۲° ۱۲' ۱۵/۸۷۷"	۲۶° ۵۲' ۵۲/۴۷۸"	<b>BH-05</b>
۸۰/۴۰	۶۶/۹۷	۵۲° ۰۹' ۵۶/۱۸۱"	۲۶° ۵۳' ۴۹/۵۶۷"	<b>BH-06</b>
۱۱۰/۸۰	۷۳/۸۹	۵۲° ۱۳' ۴۹/۴۴۷"	۲۶° ۵۱' ۰۷/۵۴۵"	<b>BH-07</b>
۱۱۰/۹۰	۶۵/۷۶	۵۲° ۰۱' ۱۰/۷۵۶"	۲۶° ۳۹' ۱۹/۲۷۵"	<b>BH-08</b>

#### ۲-۱- اطلاعات مربوط به گمانه ها

در این بخش، اطلاعات ۸ گمانه شامل جنس لایه های خاک و نتایج آزمون نفوذ مخروط در مجاورت محل کوبش شمع ها (BH-01 تا BH-08) آورده شده اند. در جدول ۱ خلاصه ای از مشخصات گمانه های مورد مطالعه نمایش داده شده است.

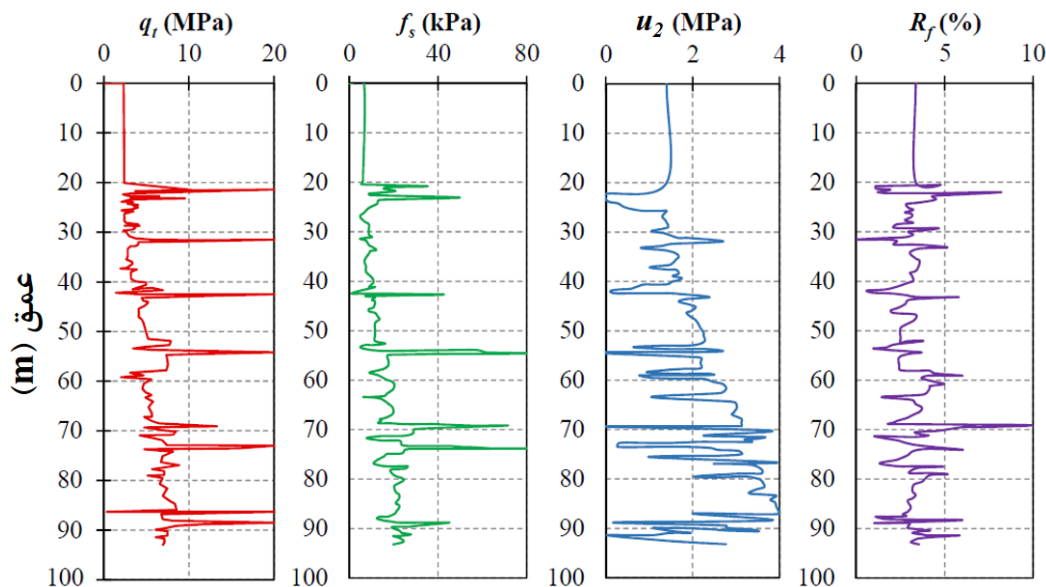
#### ۲-۲- اطلاعات مربوط به شمع ها

در این تحقیق، اطلاعات ۲۲ شمع فلزی کوبیده شده در منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی مورد بررسی قرار گرفته اند. تمامی شمع ها از نوع لوله ای فولادی با انتهای باز هستند و نحوه نصب و اجرای آن ها از نوع کوبشی است. خلاصه ای از مشخصات هندسی شمع های کوبشی در منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ گردآوری شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی شمع های کوبشی مورد مطالعه

Table 2. Geometrical characteristics of the studied driven piles.

نام گمانه	نام شمع	طول (m)	قطر (m)	ضخامت جداره (mm)	نام گمانه	نام شمع	طول (m)	قطر (m)	ضخامت جداره (mm)
BH-01	TP-01	۹۷/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰	BH-05	TP-12	۱۰۱/۳۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-02	۱۰۱/۱۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-13	۹۴/۳۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-03	۱۰۱/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-14	۱۰۲/۳۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-02	TP-04	۹۶/۴۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰	BH-06	TP-15	۶۳/۷۰	۱/۲۲۰	۳۸/۱۰
	TP-05	۹۷/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-16	۶۴/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-06	۱۰۶/۵۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-17	۸۷/۲۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-03	TP-07	۱۰۷/۷۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰	BH-07	TP-18	۶۷/۵۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-08	۱۰۶/۵۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-19	۹۴/۸۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-09	۱۰۷/۷۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-20	۹۲/۸۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-04	TP-10	۶۵/۵۰	۱/۲۲۰	۳۸/۱۰	BH-08	TP-21	۸۵/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-11	۹۴/۷۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰		TP-22	۹۳/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰



شکل ۲. نتایج آزمایش نفوذ مخروط مربوط به گمانه BH-07 در مجاورت شمع های TP-16 تا TP-20.

Fig. 2. Results of cone penetration test related to borehole BH-07 in the vicinity of piles TP-16 to TP-20.

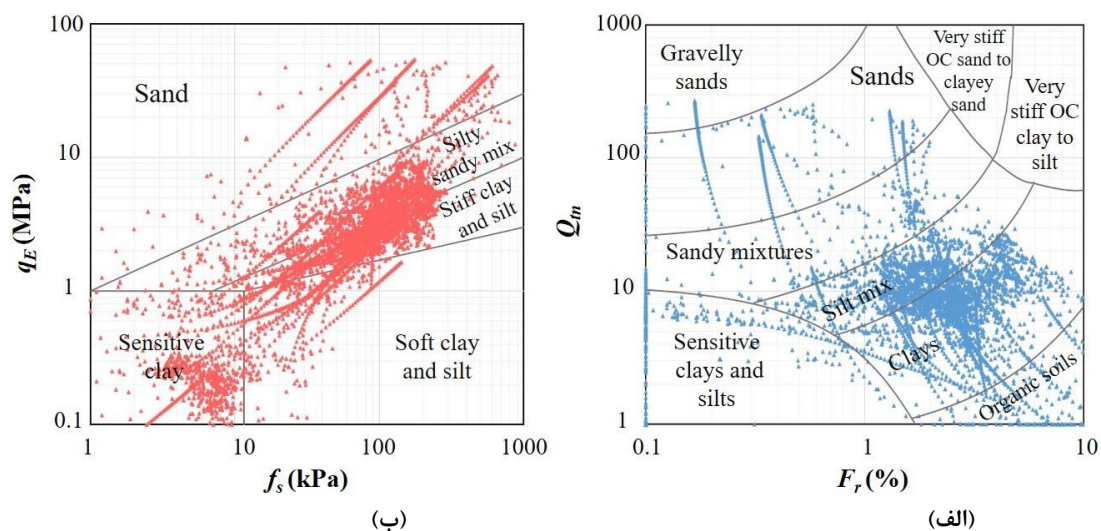
ضریب اصطکاک ( $R_f$ ) در برابر عمق آمده است. این نتایج مربوط به گمانه

BH-07 در مجاورت شمع های TP-16 تا TP-20 می باشند.

۲-۳ نتایج آزمایش های نفوذ مخروط

در شکل ۲ یک نمونه نتایج مربوط به آزمایش نفوذ مخروط شامل تنش

اصلاح شده نوک مخروط ( $q_t$ )، تنش جداره ( $f_s$ )، فشار آب حفره های ( $u_p$ ) و



شکل ۳. طبقه بندی خاک بر اساس نمودارهای: (الف) رابرتسون (۱۹۹۰)، و (ب) اسلامی و فلنیوس (۲۰۰۴).

Fig. 3. Soil classification based on: (a) Robertson (1990), and (b) Eslami & Fellenius (2004) charts..

مشاهدات و تجربیات اخذ شده از فرآیند کوبش شمع‌های فراساحلی و نصب سکوهای دریایی در میدان پارس جنوبی، با توجه به شرایط تراکم نسبی و مقاومت بسیار کم لایه‌های سطحی بستر دریا [۲۶]، عموماً نفوذ شمع‌ها در بستر، بسته به موقعیت‌های مختلف در این میدان، حدود ۱۵ الی ۲۵ متر تحت اثر وزنشان<sup>۲</sup> و با سقوط آزاد<sup>۳</sup> اتفاق افتاده است. سپس در ادامه معمولاً حدود ۱۰ الی ۱۵ متر، شمع‌ها با چکش هیدرولیکی MHU ۲۷۰T با حداکثر انرژی معادل ۳۰۰ کیلو ژول تا عمق حدود ۴۰ متری از تراز کف دریا در بستر کوبیده شده‌اند. از این به بعد تا عمق نفوذ نهایی<sup>۴</sup>، بسته به تجهیزات سخت‌افزاری پیمانکاران نصب، شمع‌ها با چکش‌های هیدرولیکی MHU ۵۰۰T با حداکثر انرژی معادل ۵۵۰ کیلو ژول یا IHC S۶۰۰ با حداکثر انرژی معادل ۶۰۰ کیلو ژول در بستر دریا کوبیده شده‌اند. به علاوه، پدیده وا پس زدگی<sup>۵</sup> در طی کوبش شمع‌های مطالعه شده در این پژوهش مشاهده نشده است. ذکر این نکته ضروری است که اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش‌های دینامیکی شمع‌های فراساحلی در ایران، بسیار کمیاب هستند و معمولاً به راحتی در دسترس نیستند. از این منظر اطلاعات جمع‌آوری شده

- 2 Self-penetration
- 3 Free fall
- 4 Target penetration
- 5 Refusal

#### ۲-۴- اطلاعات مربوط به شمع‌ها

در سه دهه اخیر، محققان روش‌های مختلفی برای طبقه بندی لایه‌های خاک بر اساس نتایج آزمایش نفوذ مخروط الکتریکی با قابلیت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای (CPTu) ارائه کرده‌اند. در این تحقیق از دو روش رابرتسون<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) و اسلامی و فلنیوس (۲۰۰۴) برای طبقه بندی خاک با استفاده از نتایج آزمایش CPTu استفاده شده است [۲۸ و ۲۹]. در شکل ۳، جنس لایه‌های خاک به کمک دو روش مذکور طبقه بندی و بر روی گراف‌های مورد نظر ترسیم شده‌اند. بر اساس این دو روش، بیش از ۹۴٪ خاک‌های مورد مطالعه در مجاورت گمانه‌های BH-۰۱ تا BH-۰۸ از جنس ریزدانه می‌باشند.

#### ۲-۵- آزمایش‌های دینامیکی شمع

نتایج تحلیل‌های CAPWAP انجام شده بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده از ۲۸ آزمایش دینامیکی شمع‌های کوبشی TP-۰۱ تا TP-۲۲ در زمان‌های مختلف توسط نویسندگان جمع‌آوری شده است. خلاصه‌ای از اطلاعات مرتبط در این خصوص در جدول ۳ آورده شده‌اند. بر اساس

1 Robertson

جدول ۳. مشخصات آزمایش های دینامیکی شمع انجام شده در منطقه مورد مطالعه

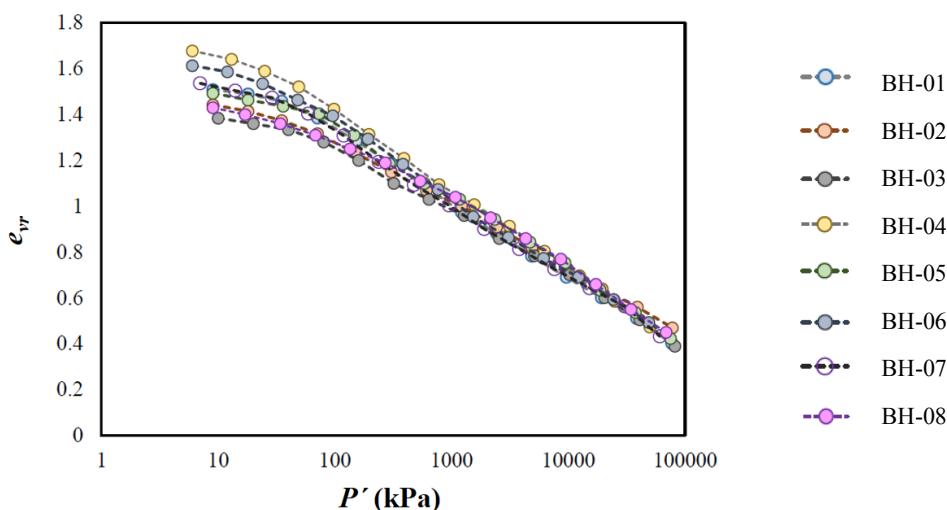
Table 3. Specifications of dynamic pile tests performed in the studied area

نام گمانه	نام شمع	زمان انجام آزمایش بارگذاری دینامیکی شمع	چکش	نام گمانه	نام شمع	زمان انجام آزمایش بارگذاری دینامیکی شمع	چکش
BH-01	TP-01	بلافاصله بعد از کوبش شمع	MHU 270T & IHC S600	BH-05	TP-13	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
	TP-02	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-14	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
	TP-03	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-15	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
	TP-04	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-16	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
BH-02	TP-05	بلافاصله بعد از کوبش شمع	MHU 270T & IHC S600	BH-06	TP-17	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
	TP-06	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-18	۹ ساعت بعد از کوبش شمع	
BH-03	TP-07	بلافاصله بعد از کوبش شمع	MHU 270T & IHC S600	BH-07	TP-19	۱۰ روز بعد از کوبش شمع	
	TP-08	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-20	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
	TP-09	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-21	۱۶ ساعت بعد از کوبش شمع	
BH-04	TP-10	بلافاصله بعد از کوبش شمع	MHU 270T & IHC S600	BH-08	TP-22	۲۶۳ روز بعد از کوبش شمع	
	TP-11	بلافاصله بعد از کوبش شمع			TP-21	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
BH-05	TP-12	۱۰ روز بعد از کوبش شمع	MHU 270T & IHC S600	BH-08	TP-21	بلافاصله بعد از کوبش شمع	
	TP-12	۲ روز بعد از کوبش شمع			TP-22	بلافاصله بعد از کوبش شمع	

که با ایجاد اضافه فشار آب حفرهای، پدیده تحکیم آغاز (رفتار کوتاه مدت) و تا زمانی که این اضافه فشار در اثر زهکشی زائل می شود، تحکیم ادامه خواهد داشت (رفتار بلند مدت). در این رابطه مطابق با استاندارد ASTM D-4186 [۳۳]، منحنی های تحکیم حاصل از آزمون های ادومتری (تحکیم یک بعدی) انجام شده بر روی نمونه های به دست آمده از گمانه های BH-01 تا BH-08 در عمق های ۶۵ تا ۱۰۰ متر (عمق نهایی استقرار شمع ها) در شکل ۴ رسم شده اند. زمان های متناظر با تحکیم ۵۰٪ و ۹۰٪ ( $t_{50}$  و  $t_{90}$ ) نیز در جدول ۴ ارائه شده اند. بر اساس مقادیر نمایش داده شده در

برای طراحان منحصر به فرد و بسیار ارزشمند می باشند. معمولاً کوبش شمع در خاک های ریزدانه رسی اشباع باعث دست خوردگی و متعاقباً ایجاد فشار آب حفرهای اضافی در حین کوبش می شود. با گذشت زمان و محو فشار آب حفرهای اضافی، خاک مجدداً شرایط اولیه خود را بازیابی میکند. این پدیده، که آن را گیرش خاک<sup>۱</sup> می نامند، منجر به تغییر ظرفیت باربری شمع در طی زمان می شود [۳۲-۳۰]. این فرآیند با زمان، زهکشی و مقوله تحکیم خاک های رسی ارتباط مستقیم دارد [۳۳]. به طوری

1 Soil set-up



شکل ۴. منحنی نیمه لگاریتمی تحکیم برای نمونه های خاک در گمانه های BH-01 تا BH-08.

Fig. 4. Semi-logarithmic consolidation curves of soil samples in boreholes BH-01 to BH-08.

جدول ۴. مقادیر زمان تحکیم ( $t_{50}$  و  $t_{90}$ ) متناظر با تحکیم ۵۰٪ و ۹۰٪

Table 4. Specifications of dynamic pile tests performed in the studied area

$t_{90}$ (day)	$c_v(t_{90})$ (m <sup>2</sup> /day)	$t_{50}$ (day)	$c_v(t_{50})$ (m <sup>2</sup> /day)	$e_{vr}$	$p'$ (kPa)	عمق برداشت نمونه (m)	نام گمانه
۷۰/۶۵	۳۰	۲/۰۳	۲۴۳	۰/۴۰۲۳	۷۷۰۰۰	۱۰۰	BH-01
۷۸/۰۵	۲۸	۳/۰۶	۱۶۷	۰/۴۷۰۳	۷۸۰۰۰	۱۰۲	BH-02
۸۳/۲۶	۲۹	۳/۶۴	۱۵۵	۰/۳۹۰۶	۸۲۰۰۰	۱۰۷	BH-03
۹۰/۶۵	۱۰	۴/۳۴	۴۸	۰/۴۷۳۶	۵۰۰۰۰	۶۵	BH-04
۹۹/۸۰	۲۰	۵/۱۸	۹۱	۰/۴۲۳۵	۷۵۰۰۰	۹۸	BH-05
۸۴/۶۰	۱۰	۳/۶۸	۵۵	۰/۴۹۳۰	۴۹۰۰۰	۶۴	BH-06
۷۳/۶۴	۱۸	۲/۳۵	۱۳۴	۰/۴۳۲۶	۶۱۰۰۰	۸۰	BH-07
۸۶/۸۰	۲۰	۳/۵۲	۱۱۳	۰/۴۵۱۰	۶۹۰۰۰	۹۰	BH-08

باربری بلند مدت شمع پس از درجه تحکیم ۹۰ درصد ایجاد می شود که مطابق با مجموع مراحل تحکیم اولیه و ثانویه در آزمایش ادومتر است [۳۳]. بر این اساس، از تعداد ۲۸ مورد آزمون دینامیکی انجام شده بر روی شمع های TP-۰۱ تا TP-۲۲، ۲۲ مورد از آنها بلافاصله پس از کوبش اولیه (کوتاه مدت)، ۵ مورد در فاصله زمانی چند ساعت تا ۱۰ روز (میان مدت) و یک مورد بعد از ۲۶۳ روز (بلند مدت) اندازه گیری شده اند.

این جدول، رسیدن به درجه تحکیم ۵۰ و ۹۰ درصدی به صورت میانگین به ترتیب ۳/۵ و ۸۳/۵ روز به طول می انجامد. شایان ذکر است که تعریف ظرفیت باربری کوتاه مدت شمع به معنی ظرفیت باربری اندازه گیری شده بلافاصله بعد از کوبش شمع<sup>۱</sup> می باشد. این در حالی است که ظرفیت باربری میان مدت شمع، متناظر با درجه تحکیم ۴۰ الی ۵۰ درصدی است و متناسباً در آزمایش تحکیم، مرحله فشردگی اولیه نامیده می شود. در نهایت ظرفیت

1 End-Of-Driving (EOD)

### ۳- ظرفیت باربری فشاری محوری شمع

به طور کلی ظرفیت باربری فشاری محوری شمع‌ها را می‌توان توسط معادله زیر محاسبه نمود:

$$Q_U = Q_s + Q_b = P_{out} \int q_s dz + q_b A_b \quad (1)$$

که در آن  $Q_s$  مقاومت جدار خارجی شمع،  $Q_b$  مقاومت نوک شمع،  $q_s$  مقاومت واحد جدار شمع،  $q_b$  مقاومت واحد نوک شمع،  $P_{out}$  محیط خارجی شمع و  $A_b$  سطح مقطع شمع هستند.

نکته مهمی که برای شمع‌های لوله‌ای ته‌باز بایستی مد نظر قرار گیرد، این است که ظرفیت باربری نهایی این شمع‌ها، کمترین مقدار دو بند (الف) و (ب) در قسمت زیر میباشد [۳۴]:

الف) مقاومت اصطکاکی جدار خارجی شمع + مقاومت نوک با فرض ته‌بسته بودن نوک شمع، (حالات انسداد کاملاً بسته<sup>۱</sup> و تقریباً بسته<sup>۲</sup>)

ب) مقاومت اصطکاکی جدار خارجی شمع + مقاومت اصطکاکی جدار داخلی شمع + مقاومت نوک شمع با سطح مقطع لوله‌ای، (حالت انسداد باز<sup>۳</sup>) در نهایت، بندهای (الف) و (ب) برای شمع‌های لوله‌ای ته‌باز به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$Q_U = Q_s + Q_b = Q_s + Q_{b,ann} + Q_{b,plug} \quad (2)$$

$$Q_{b,plug} = \text{Min} [Q_{s,in}, Q_{b,soil}] \quad (3)$$

که در آن  $Q_{b,ann}$  مقاومت نوک شمع با سطح مقطع لوله‌ای،  $Q_{b,plug}$  مقاومت نوک شمع در حالت تشکیل درپوش خاکی،  $Q_{s,in}$  مقاومت جدار داخلی شمع و  $Q_{b,soil}$  مقاومت نوک شمع در تماس با خاک قفل شده درون شمع هستند [۳۴].

در این پژوهش، ۴ روش فراساحلی تحلیل استاتیکی شامل روش‌های

- 1 Fully plugged
- 2 Partially plugged
- 3 Unplugged

مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۳)، کلک و ولد<sup>۴</sup> (۱۹۹۶)، یاردین و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۵) و کارلسرود و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۵)، ۸ روش تعیین ظرفیت باربری با استفاده مستقیم از نتایج آزمایش CPT شامل آتوکی و ولسو<sup>۷</sup> (۱۹۷۵)، کلیسبی و همکاران<sup>۸</sup> (۱۹۷۸)، اشمرتمن (۱۹۷۸)، دیرویتز و برینگن (۱۹۷۹)، فیلیپونات<sup>۹</sup> (۱۹۸۰)، تومای و فخر<sup>۱۰</sup> (۱۹۸۲)، بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) و پرایس و واردل<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۲) و ۲ روش نیز بر پایه به کارگیری مستقیم نتایج آزمایش CPTu شامل اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) و نیازی و ماین<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۶) انتخاب شده‌اند [۳۵-۴۶ و ۲۴ و ۲۲]. خلاصه‌ای از معادلات حاکم بر روش‌های اشاره شده برای محیط‌های رسی در جدول ۵ ارائه شده است. برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها، مقادیر مقاومت واحد جدار و نوک شمع ( $q_b$  و  $q_s$ ) مطابق با هر یک از این ۱۴ روش به دست می‌آیند و همراه با مشخصات فیزیکی شمع‌ها در روابط (۲) تا (۴) جای‌گذاری می‌شوند. روابط میانگین‌گیری مورد نیاز برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع مربوط به روش‌های مورد استفاده در این پژوهش، در نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده‌اند. روابط مربوط به محاسبه ظرفیت باربری شمع برای هر یک از روش‌ها نیز در نرم‌افزار صفحه گسترده اکسل به زبان ماکرو نوشته شده‌اند. به کارگیری آزمون نفوذ مخروط (CPT یا CPTu) در تعیین توان باربری شمع‌ها به دو شیوه مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌شود. در روش غیرمستقیم، ابتدا پارامترهای مقاومت برشی خاک مانند زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و چسبندگی ( $S_u$ ) از آزمایش نفوذ مخروط به دست می‌آیند و سپس به کمک تحلیل‌های استاتیکی، این مقادیر در تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش مستقیم، نتایج آزمایش نفوذ مخروط با استفاده از روابطی که عمدتاً جنبه تجربی دارند، به طور مستقیم در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌شوند. در این تحقیق، روش‌های مستقیم مبتنی بر نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu به کار گرفته شده‌اند [۳].

- 4 Kolk & Velde
- 5 Jardine et al.
- 6 Karlsrud et al.
- 7 Aoki & Velloso
- 8 Clisby et al.
- 9 Philliponat
- 10 Tumay & Fakhroo
- 11 Price & Wardle
- 12 Niazi & Mayne

جدول ۵. خلاصه معادلات برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها در خاک‌های رسی

Table 5. Summary of equations for determining the pile bearing Capacity in clayey soil.

معادلات طراحی		روش [مرجع]
مقاومت واحد نوک، $q_b$	مقاومت واحد جدار، $q_s$	
$q_b = N_c S_u$ $N_c = 9$	$q_s = \alpha S_u$ ، $\psi = \frac{S_u}{\sigma'_{v0}}$ $\alpha = 0.5\psi^{-0.5} \leq 1.0$ : $\psi \leq I$ برای خاک‌های رسی با $\psi \leq I$ $\alpha = 0.5\psi^{-0.25} \leq 1.0$ : $\psi > I$ برای خاک‌های رسی با $\psi > I$	مؤسسه نفت آمریکا [۳۹] (۱۹۹۳)  (روش API)
$q_b = 9S_u$	$q_s = \alpha S_u$ $\alpha = 0.9 \left( \frac{L-z}{D} \right)^{-0.2} \left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)^{-0.3} \leq 1.0$	کلک و ولد (۱۹۹۶) [۴۱]  (روش فوگرو یا FBV)
$q_b = 9S_u$	$q_s = \sigma'_{jf} \tan \delta'_{jf}$ ، $\sigma'_{jf} = K_c \sigma'_{v0}$ $K_c = [2.2 + 0.016 OCR - 0.87 \log_{10}(S_r)]$ $OCR^{0.42} \text{Max} \left[ \left( \frac{L-z}{R^*} \right), 8 \right]$ $R^* = (R_{out}^2 - R_{in}^2)$	یاردین و همکاران [۲۴] (۲۰۰۵)  (روش ICP)
$q_b = 9S_u$	برای خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته با $\psi \leq 0.25$ : $q_s = \alpha^{NC} S_u$ $0.20 \leq \alpha^{NC} = 0.32 (I_p - 10)^{0.3} \leq 1.00$ برای خاک‌های رسی پیش تحکیم یافته با $\psi \geq I$ : $q_s = \alpha S_u F_{tip}$ ، $\alpha = 0.5\psi^{-0.3} \leq 1.0$ $F_{tip(open)} = 1.0$ $1.00 \leq F_{tip(closed)} = 0.8 + 0.2\psi^{0.5} \leq 1.25$ برای خاک‌های رسی با $0.25 < \psi < I$ با درون‌یابی خطی بین مقادیر بالا به دست می‌آیند. $q_s \geq \beta_{Min} \sigma'_{v0}$ $0.05 \leq \beta_{Min} = 0.06 (I_p - 12)^{0.33} \leq 0.20$	کارلسرود و همکاران [۴۰] (۲۰۰۵)  (روش NGI)
$q_b = \frac{q_{c,avg(tip)}}{F_b} \leq 15 MPa$	$q_s = \frac{q_{c,avg(side)} C_s}{F_s} \leq 120 kPa$	آتوکی و ولسو [۳۵] (۱۹۷۵)
فاکتور $F_b$ به روش اجرای شمع بستگی دارد.	فاکتورهای $C_s$ و $F_s$ به ترتیب به جنس خاک و روش اجرای شمع بستگی دارند.	

جدول ۵. (ادامه).

معادلات طراحی	روش [مرجع]	
<p>مقاومت واحد نوک، <math>q_b</math></p> $q_b = C_b q_{c,avg(tip)}$ <p>فاکتور <math>C_b</math> به جنس خاک بستگی دارد.</p>	<p>مقاومت واحد جدار، <math>q_s</math></p> $q_s = \frac{f_s}{(1.5 + 14.47 f_s)}$ <p>مقادیر <math>f_s</math> و <math>q_s</math> برحسب مگاپاسکال محاسبه می-شوند.</p>	<p>کلیسبی و همکاران (۱۹۷۸) [۳۷] (روش Penpile)</p>
$q_b = C_b q_{c,avg(tip)} \leq 15 MPa$ <p>فاکتور <math>C_b</math> به مقادیر <math>OCR</math> خاک بستگی دارد.</p>	$q_s = C_s f_s \leq 120 kPa$ <p>فاکتور <math>C_s</math> بر اساس تابعی از <math>f_s</math> تعریف می-شود.</p>	<p>اشمرتمن (۱۹۷۸) [۴۵]</p>
$q_b = N_c S_{u(tip)} \leq 15 MPa$ $N_c = 9$ $S_u = \frac{q_{c(tip)}}{N_k}, \quad 15 \leq N_k \leq 25$	$q_s = C_s S_u \leq 120 kPa$ $S_u = \frac{q_{c(side)}}{N_k}, \quad 15 \leq N_k \leq 25$ <p>برای خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته: <math>C_s = 1</math> برای خاک‌های رسی پیش تحکیم یافته: <math>C_s = 0.5</math></p>	<p>دیرویترو و برینگن (۱۹۷۹) [۳۸] (روش اروپایی یا هلندی)</p>
$q_b = C_b \cdot q_{c,avg(tip)}$	$q_s = \frac{q_{c,avg(side)} \cdot C_s}{F_s} \leq q_{s,max}$ <p>فاکتورهای <math>C_s</math> و <math>F_s</math> به ترتیب به روش اجرای شمع و جنس خاک بستگی دارند.</p>	<p>فیلیپونات (۱۹۸۰) [۴۳]</p>
$q_b = C_b q_{c,avg(tip)} \leq 15 MPa$ <p>فاکتور <math>C_b</math> به مقادیر <math>OCR</math> خاک بستگی دارد.</p>	$q_s = C_s f_s \leq 72 kPa$ $C_s = 0.5 + 9.5 e^{(-90 \cdot f_s)}$ <p>مقادیر <math>f_s</math> برحسب مگاپاسکال محاسبه می-شوند.</p>	<p>تومای و فخری (۱۹۸۲) [۴۶] (روش Cone-m)</p>
$q_b = C_b q_{c,avg(tip)}$ <p>فاکتور <math>C_b</math> به جنس خاک و روش اجرای شمع بستگی دارد.</p>	$q_s = \frac{q_c}{C_s} \leq q_{s,max}$ <p>فاکتور <math>C_s</math> به جنس خاک، جنس و روش اجرای شمع بستگی دارد.</p>	<p>بوستامانته و جیانسللی (۱۹۸۲) [۳۶] (روش فرانسوی یا LCPC)</p>
$q_b = C_b q_c \leq 15 MPa$ <p>فاکتور <math>C_b</math> تنها به روش اجرای شمع بستگی دارد.</p>	$q_s = C_s f_s \leq 120 kPa$ <p>فاکتور <math>C_s</math> تنها به روش اجرای شمع بستگی دارد.</p>	<p>پرایس و واردل (۱۹۸۲) [۴۴]</p>
$q_b = C_b q_{E,avg(tip)}$	$q_s = C_s q_E$ <p>فاکتورهای <math>C_s</math> و <math>F_s</math> به ترتیب به روش اجرای شمع و جنس خاک بستگی دارند.</p>	<p>اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) [۲۲] (روش Unicone یا EF)</p>
$q_b = C_{be} q_{E,avg(tip)}$	$q_s = C_{se} q_E, \quad C_{se} = \theta_1 \theta_2 \theta_3 C_{se(mean)}$	<p>نیازی و ماین (۲۰۱۶) [۴۲]</p>



#### ۴- ارزیابی نتایج حاصل از روش های مختلف تعیین ظرفیت باربری شمع

پس از تعیین ظرفیت باربری شمع با هر یک از روش های ارائه شده در بخش سوم، لازم است تا مقادیر محاسبه شده با ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های دینامیکی شمع مقایسه شوند. از این رو، پارامتر جدیدی تحت عنوان پارامتر مدل معرفی می‌شود که عبارت است از نسبت ظرفیت باربری پیشبینی شده حاصل از روش‌های مختلف ( $Q_p$ ) به ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده به دست آمده از آزمون‌های دینامیکی شمع ( $Q_m$ ). برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها بر اساس پارامتر مدل ( $Q_p/Q_m$ ) در سه مرحله کوتاه، میان و بلند مدت، از هفت معیار آماری استفاده می‌شود. برای این منظور، به ترتیب نسبت نتایج ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی پیشبینی شده حاصل از هر یک از روش های نام برده شده (به ترتیب  $Q_{sp}$ ،  $Q_{Up}$  و  $Q_{bp}$ )، با نتایج ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های دینامیکی شمع (به ترتیب  $Q_{sm}$ ،  $Q_{bm}$  و  $Q_{Um}$ ) در ۲۲ شمع کوبیده شده مقایسه و به شیوه آماری ارزیابی می‌شوند. معیارهای آماری شامل میانگین حسابی ( $\mu$ )، تابع جذر مجموع مربعات (SRSS)، ضریب تغییرات ( $C_v$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ )، میزان احتمالات تجمعی در  $P_{\alpha}$  و  $P_{\beta}$ ، سطح دقت  $\pm 20\%$  در نمودار توزیع نرمال لگاریتمی و نمودار هیستوگرام برای نسبت مورد نظر می‌باشند. هر یک از معیارهای آماری به کار گرفته شده، بر روی یک وجه خاص از توصیف داده‌های خام تمرکز دارند. در این پژوهش، مجموعه‌ای از شاخص‌های گرایش به مرکز (میانگین حسابی)، پراکنندگی (تابع جذر مجموع مربعات، ضریب تغییرات و ضریب تعیین) و توصیف توزیع فراوانی (احتمالات تجمعی، توزیع نرمال لگاریتمی و توزیع هیستوگرام) استفاده شده‌اند.

بر این اساس، در هر مقایسه کم‌ترین تراز ( $R_1 = 1$ ) به بهترین پیش‌بینی اختصاص داده می‌شود. سپس بر مبنای میزان دقت پیش‌بینی روش های باقی‌مانده، ترازهای  $R_1 = 2$  تا  $R_1 = 14$  اختصاص می‌یابند. اندیس (i) یک تا هفت ( $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$ ) نشانگر معیارهای آماری به ترتیب ذکر شده در بالا می‌باشند. به منظور امتیازدهی نهایی به روش ها و انتخاب روش برتر، از نمودارهای راداری استفاده می‌شود. به این صورت که درصد مساحت اشغال شده توسط یک روش نسبت به مساحت کل نمودار، به عنوان نسبت مساحت<sup>۱</sup> (AR) معرفی می‌شود. به منظور تسهیل در امر مقایسه، روش‌هایی که عملکرد بهتری دارند، مقدار نسبت مساحت (AR) برای

آن‌ها بیشتر و به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر است

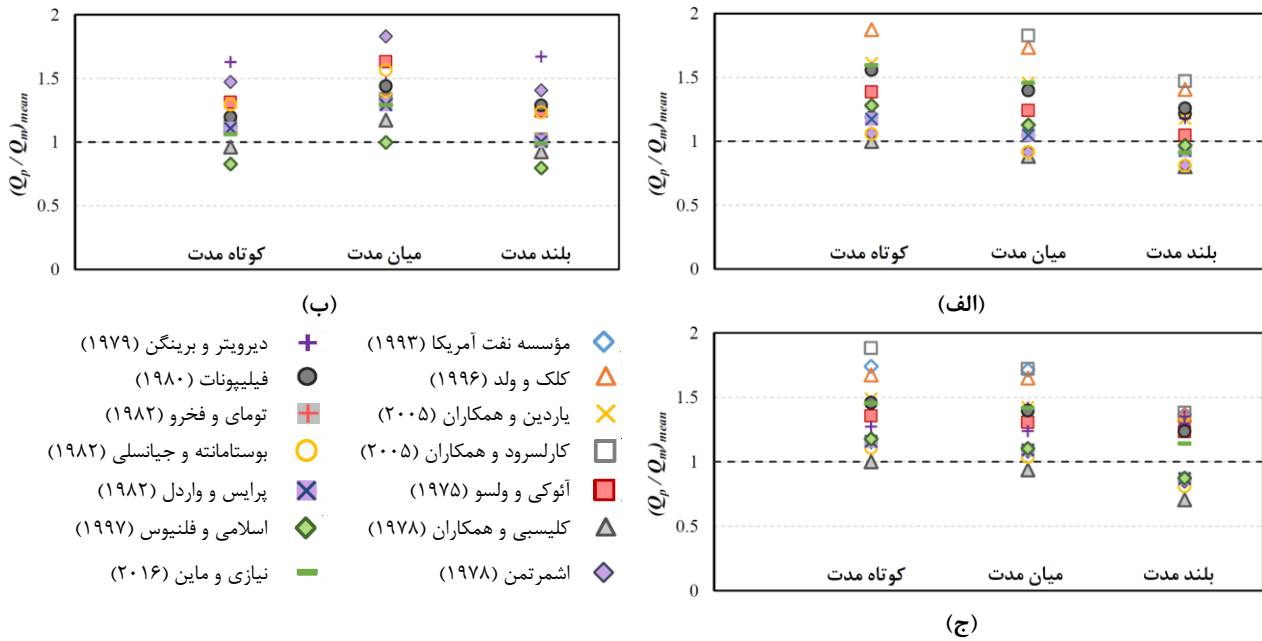
#### ۴-۱- میانگین حسابی، $R_1$

در این معیار آماری، ابتدا ۲۲ پارامتر مدل ( $Q_p/Q_m$ ) برای هر یک از روش‌ها به تفکیک ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی به دست می‌آیند و سپس میانگین حسابی ( $\mu$ ) پارامترهای فوق در بازه‌های زمانی کوتاه، میان و بلند مدت برای هر یک از روش ها به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. به عنوان مثال، در شکل ۵ میانگین حسابی پارامترهای مدل برای ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی هر یک از روش ها در سه حالت کوتاه، میان و بلند مدت نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، آن دسته از روش‌هایی که مقدار ( $Q_p/Q_m$ )<sub>mean</sub> برای آنها بالاتر از خط معیار (تراز ۱) است، دارای تخمین دست بالا و در نقطه مقابل روش هایی که مقدار ( $Q_p/Q_m$ )<sub>mean</sub> برای آنها پائین تر از خط معیار است، دارای تخمین دست پایین هستند. مطابق این معیار آماری، در روش های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)، تومای و فخر و (۱۹۸۲) و اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) بیشترین تطبیق در ظرفیت باربری جدار، در روش های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)، اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) و پرایس و واردل (۱۹۸۲) بیشترین تطبیق در ظرفیت باربری نوک و در روش‌های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)، بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) و اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) بیشترین تطبیق در ظرفیت باربری نهایی به ترتیب در کوتاه، میان و بلند مدت حاصل می‌شوند.

#### ۴-۲- تابع جذر مجموع مربعات، $R_2$

تابع جذر مجموع مربعات (SRSS) مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود. بر اساس این تابع، هر قدر جواب به صفر نزدیکتر باشد، روش مورد نظر عملکرد بهتری دارد. مطابق با این معیار، بهترین عملکرد در تخمین ظرفیت باربری جدار به روش‌های اشمرتمن (۱۹۷۸)، تومای و فخر و (۱۹۸۲) و اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷)، در تخمین ظرفیت باربری نوک به روش‌های پرایس و واردل (۱۹۸۲)، کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) و مجدداً پرایس و واردل (۱۹۸۲) و در تخمین ظرفیت باربری نهایی به روش‌های پرایس و واردل (۱۹۸۲)، بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) و اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) به ترتیب در کوتاه، میان و بلند مدت مربوط می‌شود.

1 Area Ratio (AR)



شکل ۵. میانگین حسابی پارامتر مدل  $(Q_p/Q_m)_{mean}$  برای ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (ج) نهایی در سه بازه زمانی کوتاه، میان و بلند مدت

Fig. 5. Arithmetic mean of model parameter  $(Q_p/Q_m)_{mean}$  for: (a) shaft, (b) base, and (c) total ultimate bearing capacities in short, medium and long term conditions.

روشهای اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) و پرایس و واردل (۱۹۸۲) در تعیین ظرفیت باربری جدار، روش های بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) و نیازی و ماین (۲۰۱۶) در تعیین ظرفیت باربری نوک و روش های تومای و فخر و (۱۹۸۲) و پرایس و واردل (۱۹۸۲) در تعیین ظرفیت باربری نهایی به ترتیب در کوتاه و میان مدت است.

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5)$$

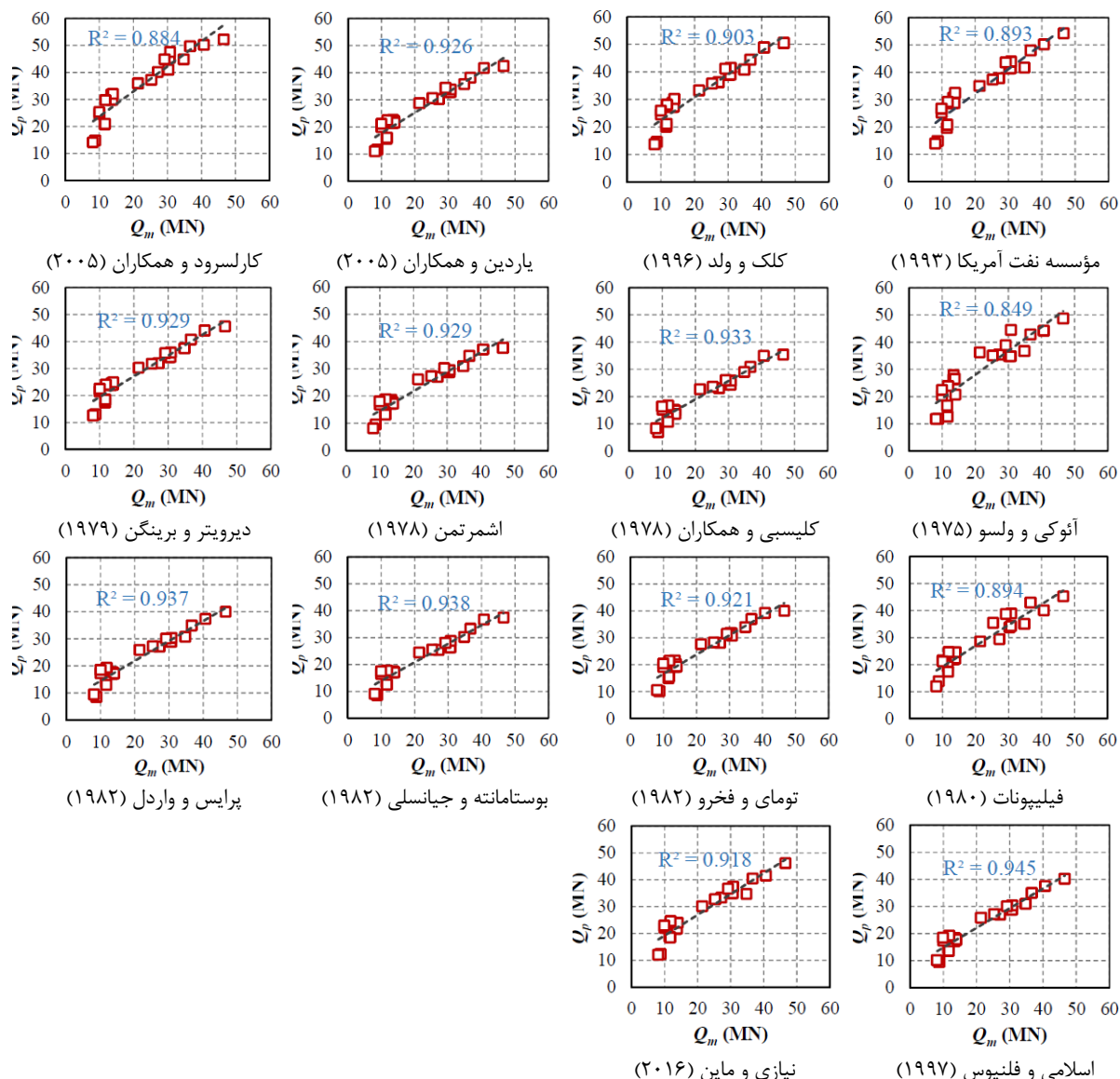
#### ۴-۴-۴ ضریب تعیین، $R_p$

ضریب تعیین یا ضریب تشخیص ( $R^2$ ) بیانگر بهترین خط برازش شده برای نمودار ظرفیت باربری پیشبینی شده ( $Q_p$ ) نسبت به ظرفیت باربری اندازهگیری شده ( $Q_m$ ) است که مطابق رابطه (۶) تعریف میشود. ضریب تعیین همواره بین ۰ و ۱ واقع است. عدد صفر نشان دهنده آن است که هیچ یک از مقادیر پارامتر مدل  $(Q_p/Q_m)$  بر روی خط برازش شده قرار ندارند و عدد ۱ بیانگر این موضوع است که تمامی مقادیر پارامتر مدل بر روی خط

$$SRSS = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{pi})^2} \quad (4)$$

#### ۴-۳ ضریب تغییرات، $R_p$

در شاخص های آماری گرایش به مرکز (مانند میانگین و تابع جذر مجموع مربعات) اطلاعاتی از نحوه پراکندگی داده ها و توزیع شان ارائه نمی شود. برای اطلاع از نحوه پراکندگی داده ها، باید از شاخص های پراکندگی استفاده شود. در آمار و احتمالات یکی از مهم ترین شاخص های پراکندگی ضریب تغییرات ( $C_v$ ) است. ضریب تغییرات ( $C_v$ ) مطابق رابطه (۵) از تقسیم انحراف معیار ( $\sigma$ ) بر میانگین حسابی ( $\mu$ ) حاصل می شود که میزان پراکندگی (تغییرات) در آن به ازای یک واحد از میانگین بیان می شود. به عبارت دیگر، هر چه میزان پراکندگی مقادیر یک متغیر کم باشد، انحراف معیار به سمت صفر میل کند و آن متغیر از دامنه تغییرات کمتری برخوردار است. بنابراین، هر چه مقادیر ضریب تغییرات ( $C_v$ ) برای یک روش مشخص به سمت صفر میل کند، یعنی نتایج آن روش ایده آلتر و پراکندگی داده ها کمتر است. با توجه به این معیار آماری، بیشترین مطابقت و کمترین پراکندگی مختص



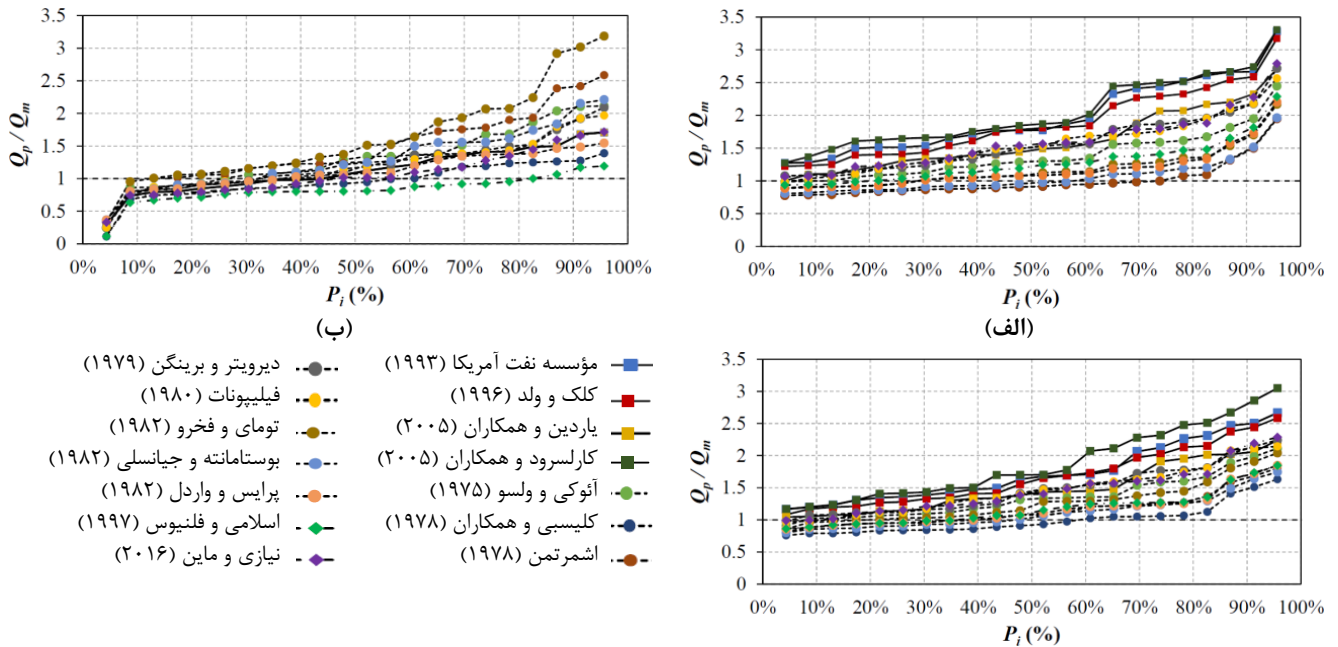
شکل ۶. بهترین خط برازش شده از پارامتر مدل (Qp/Qm) برای ظرفیت باربری نهایی در کوتاه مدت

Fig. 6. Best fit line of model parameter (Qp/Qm) for total ultimate bearing capacity in short term condition.

و هم‌قواره‌گی با خط برازش داده شده از پارامتر مدل به ترتیب در کوتاه و میان مدت حاصل شده‌اند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - \bar{Q}_{mi})^2} \quad (۶)$$

برازش شده قرار گرفته‌اند. بنابراین، یک مدل رگرسیونی خوب دارای ضریب تعیین ( $R^2$ ) بالا و نزدیک به یک است. به منظور درک بهتر، بهترین خط برازش شده از پارامترهای مدل برای هر روش در ظرفیت باربری نهایی در کوتاه مدت در شکل ۶ آورده شده است. مطابق این شاخص آماری، در روش‌های اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) و کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) برای ظرفیت باربری جدار، روش‌های پرایس و واردل (۱۹۸۲) و اشمرتمن (۱۹۷۸) برای ظرفیت باربری نوک و روش‌های اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) و دیرویتز و برینگن (۱۹۷۹) برای ظرفیت باربری نهایی، بیشترین هم‌بستگی



شکل ۷. نمودار تابع توزیع احتمال تجمعی برای ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (ج) نهایی در کوتاه مدت

Fig. 7. Distribution function of cumulative probability for: (a) shaft, (b) base, and (c) total ultimate bearing capacities in short term conditionm

میان مدت ارائه شده‌اند.

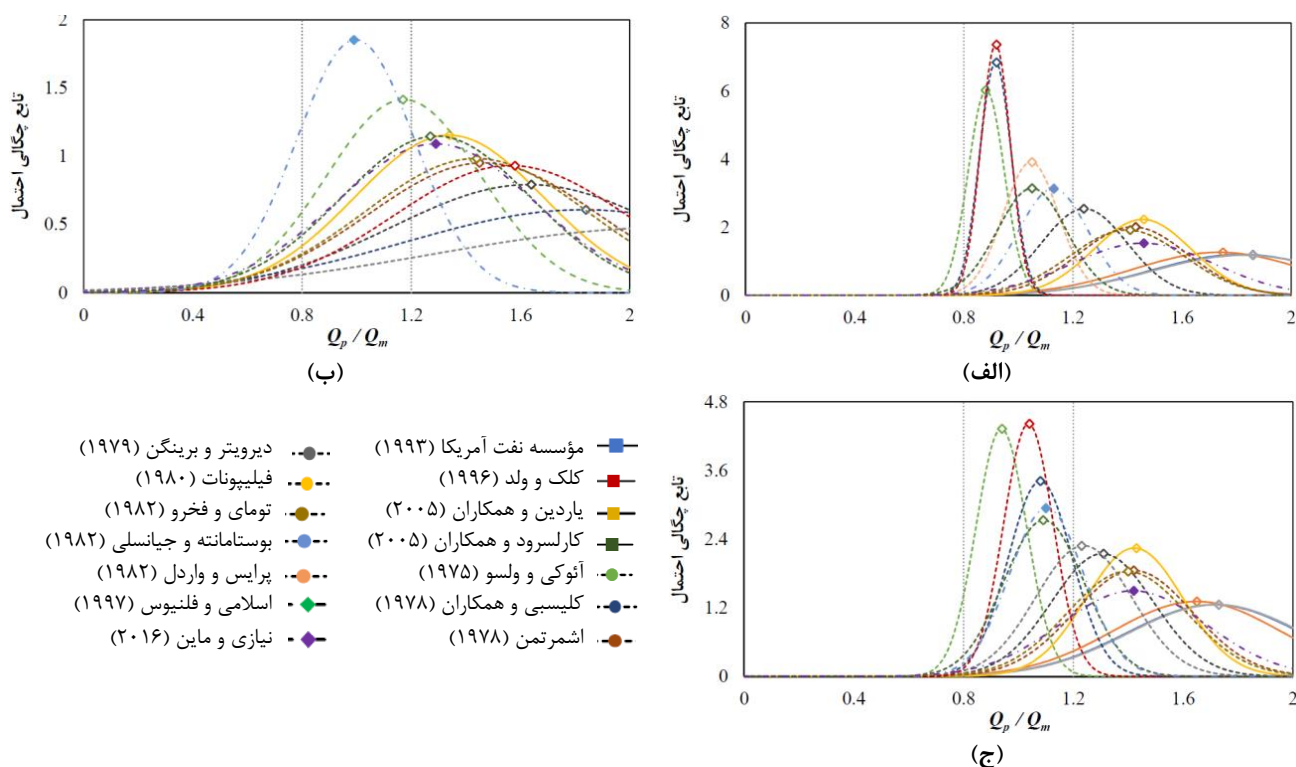
طبق این معیار، پارامترهای مدل محاسبه شده برای هر یک از روش‌ها به ترتیب صعودی مرتب و از ۱ تا  $n$  شماره‌گذاری می‌شوند. برای هر یک از این نسبت‌ها، فاکتور احتمال تجمعی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$P(\%) = \frac{i}{(n+1)} \times 100 \quad (7)$$

که در آن،  $P$  فاکتور احتمال تجمعی،  $i$  شماره مورد محاسبه فاکتور احتمال تجمعی و  $n$  تعداد کل موارد میباشند.

#### ۴-۵- تابع توزیع احتمال تجمعی، $R_0$

در این حالت، نمودار میزان احتمال تجمعی پارامترهای مدل برای هر یک از روش‌ها در سه حالت کوتاه، میان و بلند مدت رسم و میزان احتمال وقوع ۵۰ و ۹۰ درصد ( $P_{0.5}$  و  $P_{0.9}$ ) ارائه شده‌اند. هر روشی که در آن میزان احتمال تجمعی ۵۰ درصد، به عدد یک نزدیک‌تر و میزان تفاضل احتمال تجمعی ۵۰ درصد و ۹۰ درصد کمتر باشد، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. به عنوان مثال، شکل ۷ نمودار تابع توزیع تجمعی هر یک از روش‌ها را در کوتاه مدت نمایش می‌دهد. بر مبنای این معیار آماری، در روش‌های اشمرتمن (۱۹۷۸) و بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) برای ظرفیت باربری جدار، در روش‌های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) و اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) برای ظرفیت باربری نوک و در روش بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) برای ظرفیت باربری نهایی بهترین عملکرد به ترتیب در کوتاه و



شکل ۸. تابع چگالی احتمال برای ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (ج) نهایی در میان مدت

Fig.8 . Probability density function for: (a) shaft, (b) base, and (c) total ultimate bearing capacities in medium term condition.

در آن روش نیز بیشتر خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده از این ضابطه آماری، روش های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) و بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) برای ظرفیت باربری جدار، روش های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) و اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) برای ظرفیت باربری نوک و در آخر روش های کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) و بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) برای ظرفیت باربری نهایی با بیشترین میزان احتمال در اولویت اول برای زمانهای کوتاه و میان مدت قرار داده می شوند. نمودار چگالی احتمال برای روش های مختلف در ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی در میان مدت در شکل ۸ آورده شده است.

تابع چگالی احتمال (دانسیته احتمال) مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$f(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (۸)$$

#### ۴-۶- تابع چگالی احتمال، $R_p$

حالت ایده آل زمانی اتفاق می افتد که نسبت ظرفیت باربری پیشبینی شده ( $Q_p$ ) به ظرفیت باربری اندازه گیری شده ( $Q_m$ ) از آزمایش دینامیکی شمع یا به عبارتی مقدار پارامتر مدل برابر ۱ شود. ولی عملاً، به ویژه به دلیل عدم قطعیت های حوزه ژئوتکنیک، احتمال وقوع حالت ایده آل کم است. در نتیجه، با توجه به پراکندگی نتایج، حدود بالا و پایین برای نسبت فوق در نظر گرفته می شوند. به این صورت که هر چه میزان تجمع داده ها در این محدوده مشخص بیشتر باشد، آن روش دارای پراکندگی کمتر و ایده آل تر است. برای این منظور، در این تحقیق مبانی میزان دقت  $\pm 20\%$  در نظر گرفته شده است. ابتدا تابع چگالی احتمال پارامترهای مدل ( $Q_p/Q_m$ ) از رابطه (۸) برای روش مورد مطالعه تعیین می شود و سپس نمودار تابع چگالی احتمال برای روش ها رسم و مساحت زیر نمودار در محدوده  $0.8 < Q_p/Q_m < 1.2$  محاسبه می شود. هر چه مساحت نمودارهای یاد شده در محدوده فوق به عدد ۱ نزدیک تر باشد، روش انتخابی دارای دقت بیشتر است و احتمال تطابق ظرفیت باربری پیشبینی شده ( $Q_p$ ) با ظرفیت باربری اندازه گیری شده

که در آن،  $X$  مقدار پارامتر مدل  $(Q_p/Q_m)$ ،  $\mu$  میانگین حسابی و  $\sigma$  انحراف از معیار است.

#### ۴-۷- توزیع هیستوگرام، $R_p$

نمودار هیستوگرام نمایش مناسبی از ارائه گرافیکی توزیع داده‌هاست که در آن فراوانی یا درصد فراوانی هر کدام از طبقات به صورت ستونی نشان داده می‌شود. در این روش آماری همانند تابع چگالی احتمال، سطح دقت  $\pm 20\%$  انتخاب شده است. این بدین معناست، روش‌هایی که مقادیر پارامتر مدل  $(Q_p/Q_m)$  بیشتری در بازه  $0/80$  تا  $1/20$  دارند، دارای عملکرد و کیفیت پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر روش‌ها هستند. نمودار هیستوگرام برای روش‌های مختلف در تعیین ظرفیت باربری نهایی کوتاه مدت شمع در شکل ۹ رسم شده است. بر اساس دقت  $\pm 20\%$  اخذ شده از نمودار توزیع هیستوگرام، در روش اشمرتمن (۱۹۷۸) برای ظرفیت باربری جدار، روش‌های اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) و نیازی و ماین (۲۰۱۶) برای ظرفیت باربری نوک و روش کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) برای ظرفیت باربری نهایی، بهترین سطح دقت در محدوده مورد نظر به ترتیب در کوتاه و میان مدت حاصل شده است.

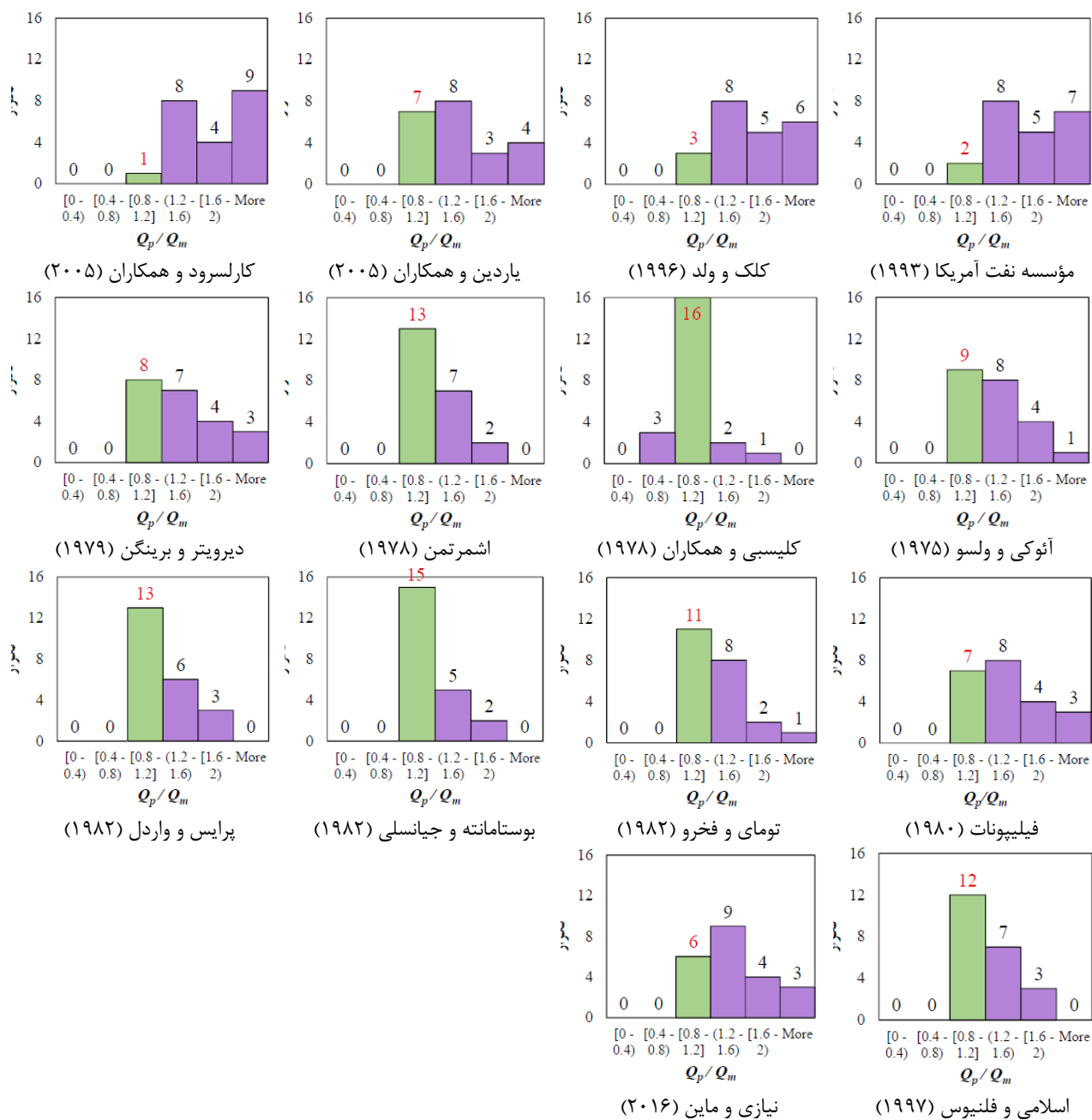
#### ۴-۸- بررسی عملکرد روشها در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، به منظور امتیازدهی نهایی به روش‌ها، از نمودارهای راداری برای تخمین مناسب‌ترین روش تعیین ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی استفاده می‌شود. بدین صورت که درصد مساحت اشغال شده توسط یک روش نسبت به مساحت کل نمودار، به عنوان نسبت سطح (AR) معرفی می‌شود. روش‌هایی که عملکرد بهتری دارند، این مقدار برایشان بزرگ‌تر و به ۱۰۰ نزدیک‌تر است. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵، نمودارهای راداری برای هر یک از روش‌ها در زمان‌های مورد بررسی آورده شده‌اند.

نکته قابل توجه در خصوص ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی در بلند مدت این است که به دلیل داشتن فقط یک داده در زمان یاد شده (بلند مدت)، نمیتوان معیارهای آماری سوم تا هفتم را جهت ارزیابی روش‌ها استفاده نمود. بنابراین، برای قضاوت در خصوص تعیین بهترین روش تعیین ظرفیت

باربری جدار، نوک و نهایی در بلند مدت تنها میتوان به معیار آماری اول (میانگین حسابی) و دوم (تابع جذر مجموع مربعات) بسنده کرد. مطابق جدول ۶ در روش‌های اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷)، پرایس و واردل (۱۹۸۲) و مجدداً اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) بیشترین تطبیق و بهترین عملکرد به ترتیب در تخمین ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی در بلند مدت حاصل می‌شوند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ظرفیت باربری بلند مدت شمع‌های کوبشی در خاک‌های ریزدانه عمدتاً متأثر از پدیده گیرش خاک و افزایش مقاومت در طی زمان است. از طرفی اثر این پدیده در مقاومت جدار بسیار قابل ملاحظه و برعکس در مقاومت نوک قابل صرف‌نظر می‌باشد [۴۷]. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود از آنجا که به طور کلی مقاومت جدار سهم بسیار بیشتری از ظرفیت باربری شمع را شامل می‌شود، لذا تعیین ظرفیت باربری بلند مدت شمع‌ها با استفاده از CPTuهای الکتریکی، که در آن‌ها امکان اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای ( $u_p$ ) به طور پیوسته در عمق وجود دارد، بسیار دقیق‌تر است و نتایج حاصل با نتایج آزمون‌های میدانی دینامیکی شمع تطابق بسیار بیشتری دارند. این مسئله یکی از ویژگی‌های بارز روش‌های مستقیم مبتنی بر CPTuهای الکتریکی در تخمین ظرفیت باربری بلند مدت شمع‌هاست. برعکس، CPTهای مکانیکی چون توانایی اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای را ندارند و از مقادیر مقاومت کل نوک مخروط ( $q_c$ ) برای تخمین‌ها استفاده می‌کنند، کیفیت پیش‌بینی پایین‌تری را برای ظرفیت باربری بلند مدت شمع‌ها ارائه می‌نمایند.

بر اساس شکل‌های ۱۰ تا ۱۵، در روش‌های اشمرتمن (۱۹۷۸) و تومای و فخر (۱۹۸۲) برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جدار، روش‌های پرایس و واردل (۱۹۸۲) و کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نوک و روش بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی، کمترین پراکندگی و در نتیجه بهترین عملکرد به ترتیب در کوتاه و میان مدت ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین پاسخ در زمان‌های کوتاه و میان مدت عمدتاً در روش‌های مستقیم مبتنی بر CPTهای سنتی (مکانیکی) حاصل شده‌اند. دلیل این موضوع می‌تواند به استفاده از مقادیر مقاومت کل نوک مخروط ( $q_c$ ) مبتنی بر تحلیل تنش کل و عدم حذف تأثیر فشار آب حفره‌ای در این روش‌ها مربوط شود.



شکل ۹. نمودار هیستوگرام فراوانی مقادیر پارامتر مدل برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری نهایی شمع در کوتاه مدت

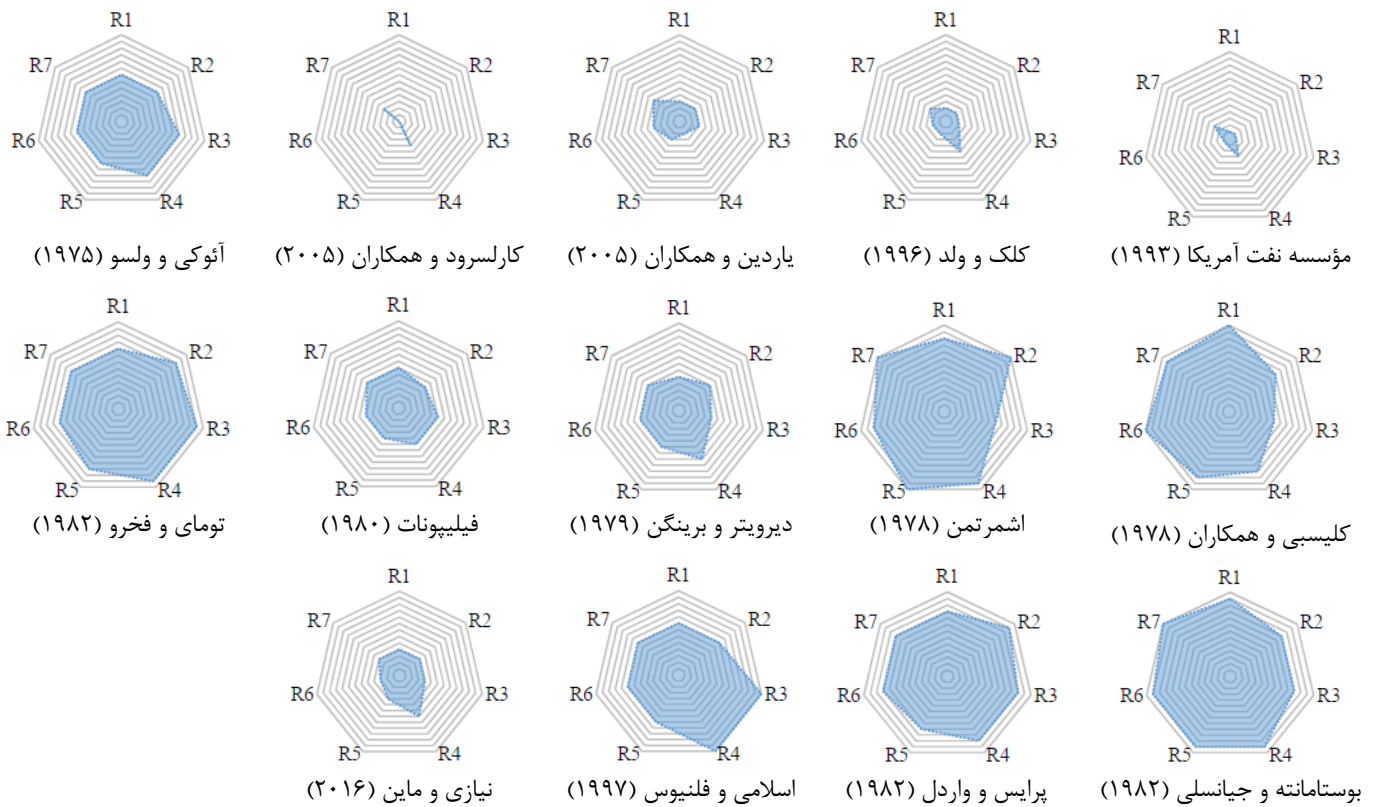
Fig. 9. Histogram frequency graph of model parameter values for each method in estimating total ultimate bearing capacity of piles in short term condition

جدول ۶. امتیازدهی نهایی ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی بر اساس معیارهای آماری در بلند مدت

Table 6. Final scoring of shaft, base and total ultimate bearing capacity values in long term condition based on statistical criteria.

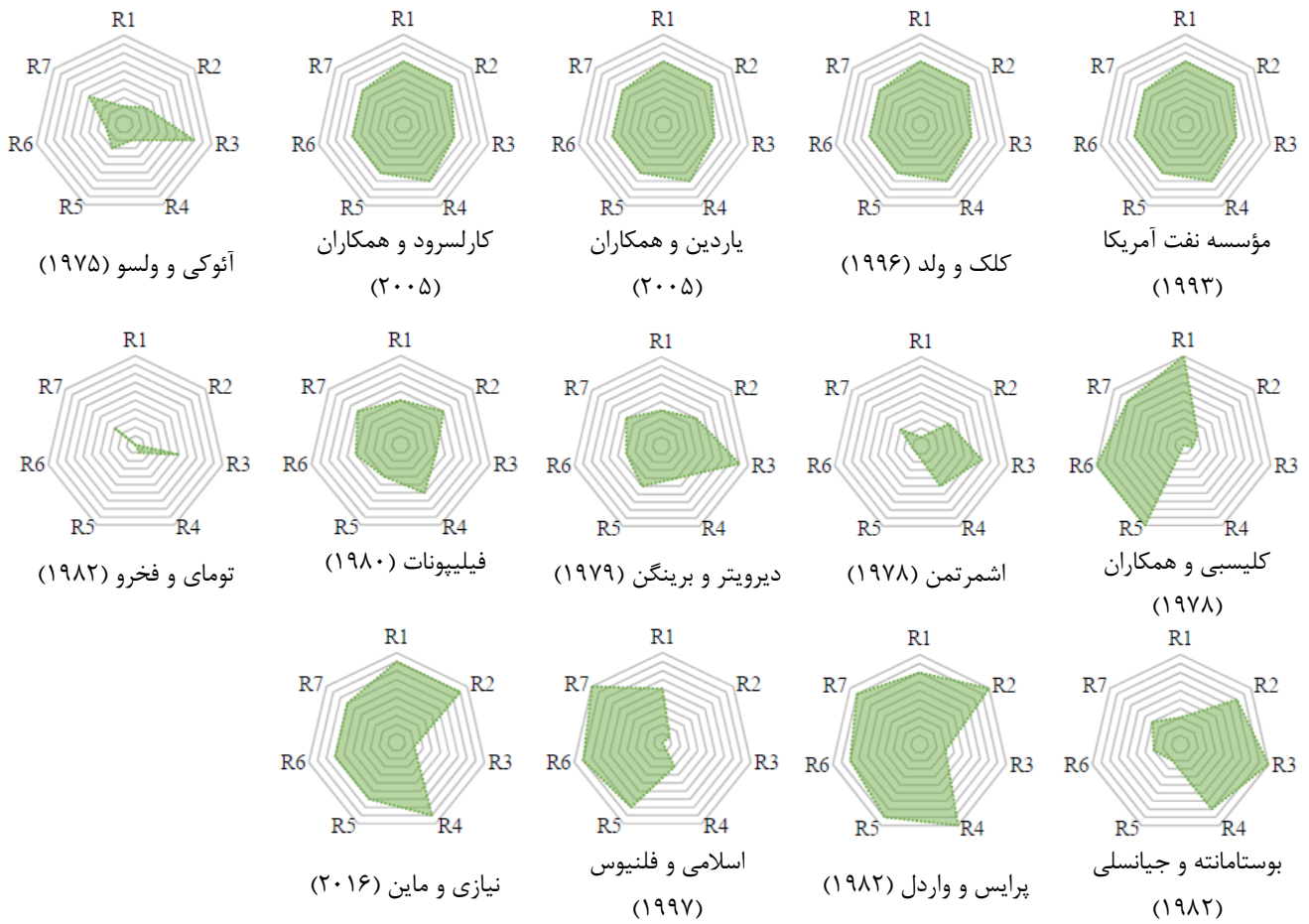
رتبه	ظرفیت باربری نهایی			ظرفیت باربری نوک			ظرفیت باربری جدار			روش
	$R_2$	$R_1$	رتبه	$R_2$	$R_1$	رتبه	$R_2$	$R_1$		
۱۳	۱۳	۱۳	۳	۳	۳	۱۳	۱۳	۱۳	مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۳)	
۱۲	۱۲	۱۲	۳	۳	۳	۱۲	۱۲	۱۲	کلک و ولد (۱۹۹۶)	
۱۰	۱۰	۱۰	۳	۳	۳	۵	۵	۵	یاردین و همکاران (۲۰۰۵)	
۱۴	۱۴	۱۴	۳	۳	۳	۱۴	۱۴	۱۴	کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)	
۶	۶	۶	۷	۷	۷	۲	۲	۲	آتوکی و ولسو (۱۹۷۵)	
۹	۹	۹	۴	۴	۴	۹	۹	۹	کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)	
۴	۴	۴	۹	۹	۹	۷	۷	۷	اشمرتمن (۱۹۷۸)	
۸	۸	۸	۳	۳	۳	۶	۶	۶	دیرویتز و برینگن (۱۹۷۹)	
۷	۷	۷	۸	۸	۸	۱۱	۱۱	۱۱	فیلیپونات (۱۹۸۰)	
۱۱	۱۱	۱۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تومای و فخرو (۱۹۸۲)	
۵	۵	۵	۶	۶	۶	۸	۸	۸	بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)	
۲	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۳	۳	پرایس و واردل (۱۹۸۲)	
۱	۱	۱	۵	۵	۵	۱	۱	۱	اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷)	
۳	۳	۳	۲	۲	۲	۴	۴	۴	نیازی و ماین (۲۰۱۶)	





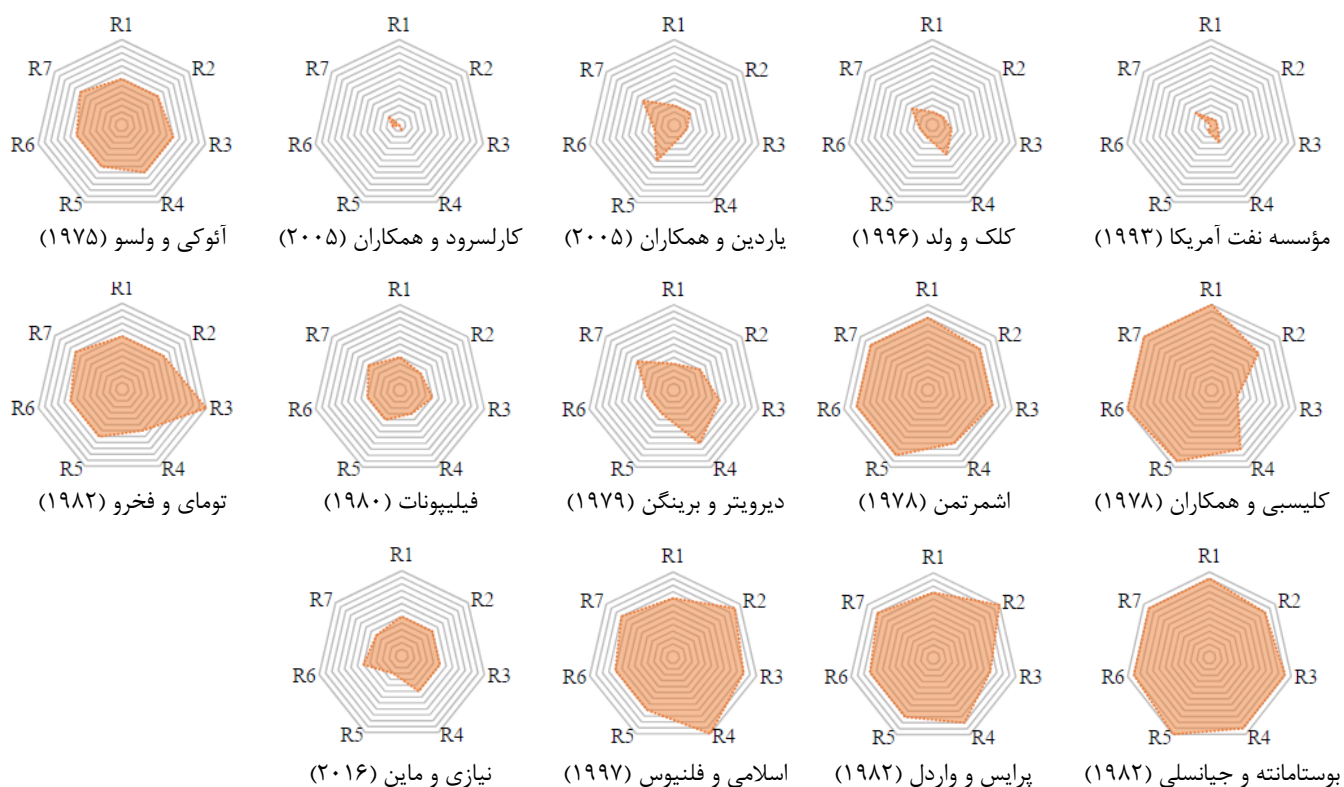
شکل ۱۰. نمودارهای راداری برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری جدار شمع بر مبنای معیارهای آماری در کوتاه مدتر

Fig. 10. Radar chart for each method in estimating pile shaft bearing capacity in short term condition based on statistical criteria.m



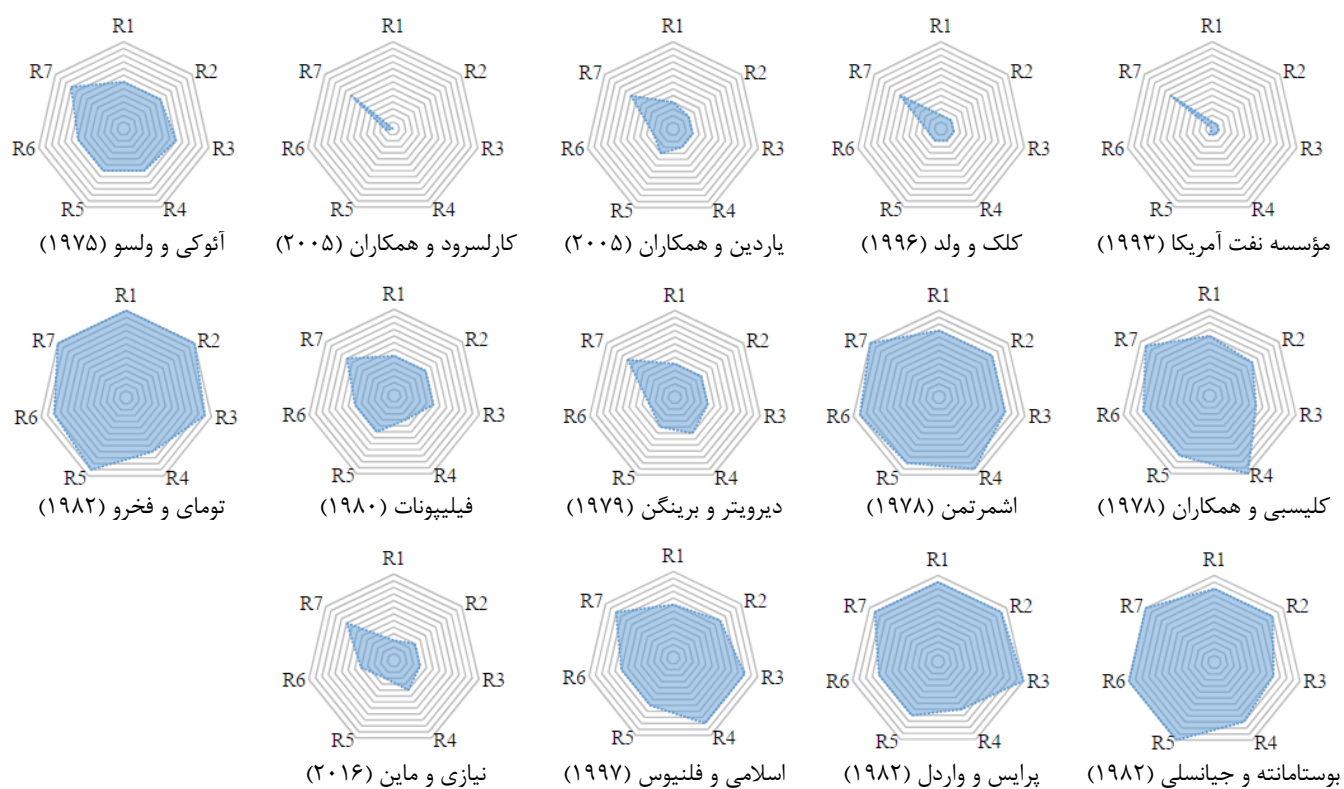
شکل ۱۱. نمودارهای راداری برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری نوک شمع بر مبنای معیارهای آماری در کوتاه مدت

Fig. 11. Radar chart for each method in estimating pile base bearing capacity in short term condition based on statistical criteria.



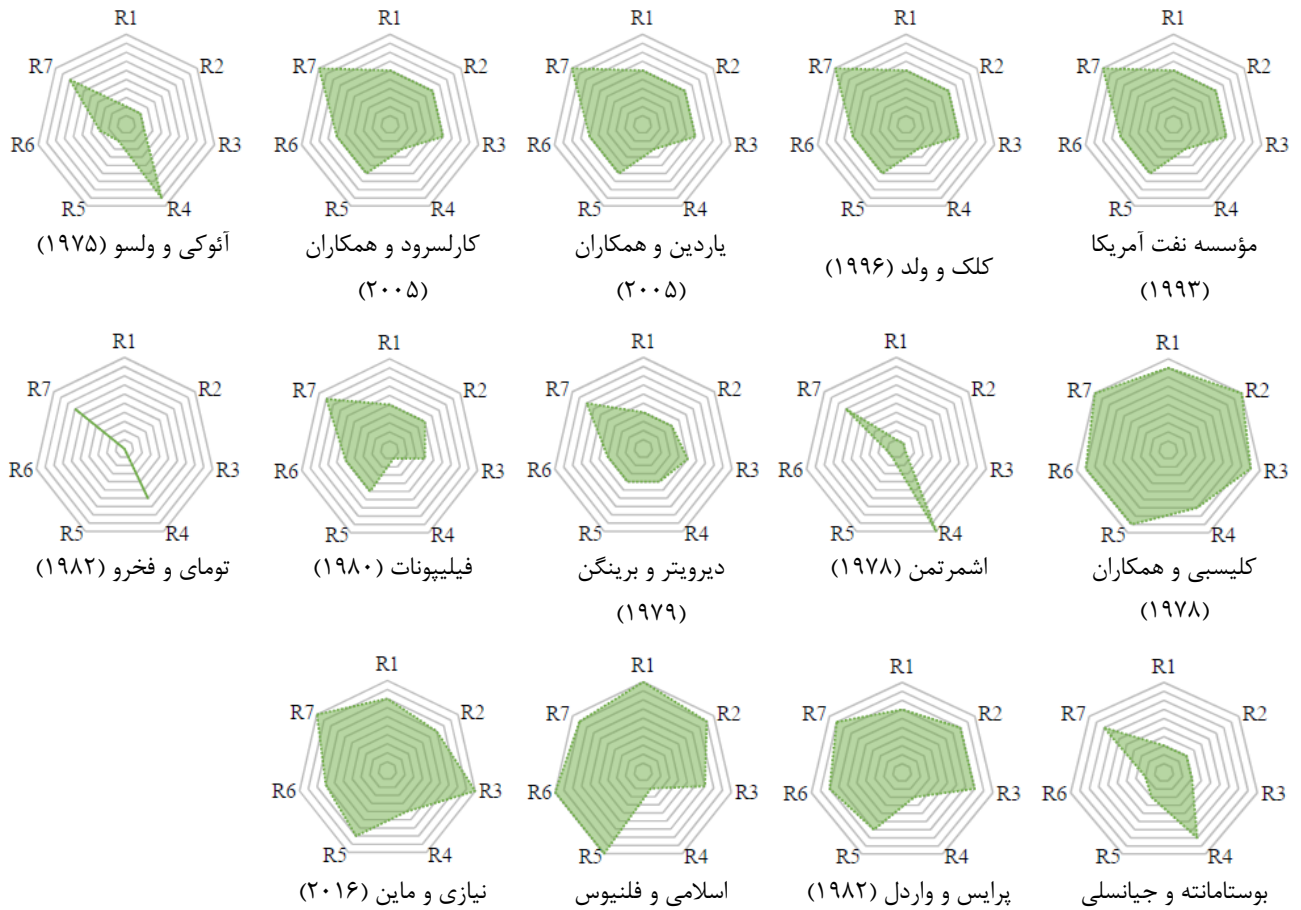
شکل ۱۲. نمودارهای راداری برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری نهایی شمع بر مبنای معیارهای آماری در کوتاه مدت

Fig. 12. Radar chart for each method in estimating pile total ultimate bearing capacity in short term condition based on statistical criteria.



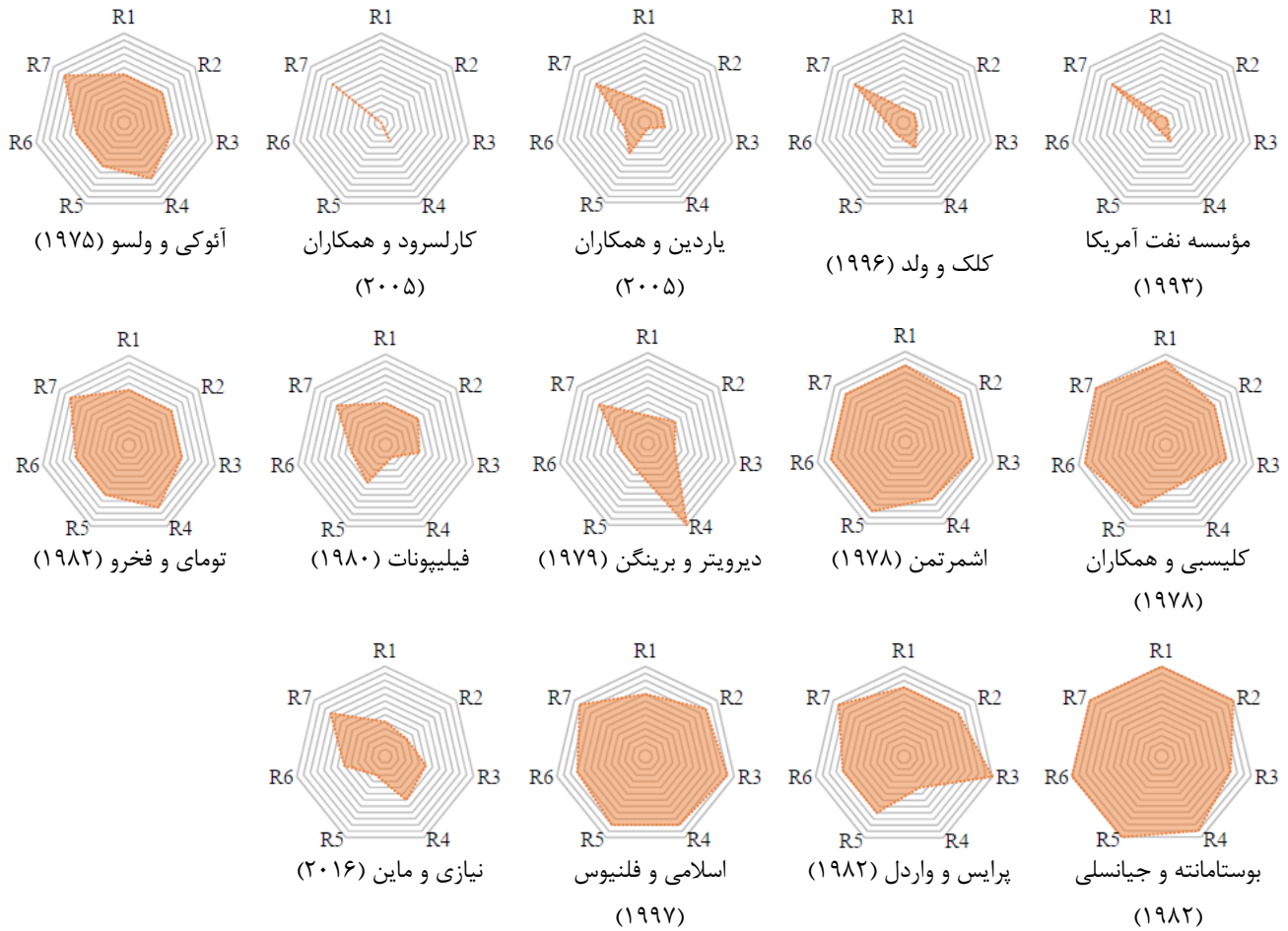
شکل ۱۳. نمودارهای راداری برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری جدار شمع بر مبنای معیارهای آماری در میان مدت

Fig. 13. Radar chart for each method in estimating pile shaft bearing capacity in medium term condition based on statistical criteria..



شکل ۱۴. نمودارهای راداری برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری نوک شمع بر مبنای معیارهای آماری در میان مدت

Fig. 14. Radar chart for each method in estimating pile base bearing capacity in medium term condition based on statistical criteria.



شکل ۱۵. نمودارهای راداری برای هر یک از روش های تخمین ظرفیت باربری نهایی شمع بر مبنای معیارهای آماری در میان مدت

Fig. 15. Radar chart for each method in estimating pile total ultimate bearing capacity in medium term condition based on statistical criteri.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا یک بانک جامع داده‌های ژئوتکنیکی مشتمل بر پارامترهای مهندسی خاک، نتایج آزمون‌های دینامیکی انجام شده بر روی شمع‌های فراساحلی و آزمایش‌های CPTu اجرا شده در مجاورت آن‌ها در منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی توسعه یافته است. این بانک داده شامل بیش از ۵۰۰۰ داده ژئوتکنیکی حاصل از آزمون‌های متنوع آزمایشگاهی و برجاء، اطلاعات ۸ آزمون CPTu در مجاورت ۲۲ شمع فراساحلی همراه با ۲۸ مورد آزمایش دینامیکی بر روی آن‌ها در زمان‌های مختلف می‌باشد. موارد عملی جمع‌آوری شده از آزمایش‌های دینامیکی بر اساس فاصله زمانی از کوبش اولیه و درجه تحکیم خاک به ۳ گروه کوتاه، میان و بلند مدت تقسیم‌بندی شده‌اند.

در مرحله بعد، نسبت به انتخاب و کاربرد ۱۴ روش ظرفیت باربری شامل ۴ روش فراساحلی تحلیل استاتیکی، ۸ روش مستقیم مبتنی بر آزمایش CPT و ۲ روش مستقیم مبتنی بر آزمایش CPTu اقدام شده است. سپس با استفاده از تحلیل‌های آماری به ارزیابی عملکرد ۱۴ روش در تعیین ظرفیت باربری به تفکیک جدار، نوک و نهایی در سه بازه زمانی، کوتاه مدت (EOD)، میان مدت (از چند ساعت تا ۱۰ روز) و بلند مدت (۲۶۳ روز) پرداخته شده است. این پردازش‌ها تنها بر روی شمع‌های کوبشی لول‌های با انتهای باز اجرا شده در خاکهای اغلب رسی حوزه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی، انجام شده‌اند. در این راستا، با استفاده از هفت معیار آماری، دقت و پراکندگی روش‌های ۱۴ گانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت به منظور رتبه‌دهی نهایی روش‌های پیشنهادی، از نمودارهای راداری استفاده شده است. در این صورت روش‌هایی که عملکرد بهتری دارند، نسبت سطح نمودارهای راداری برایشان بزرگ‌تر و به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر است. در مجموع، نتایج زیر از این پژوهش حاصل شده‌اند:

- در بررسی کلی داده‌ها، تخمین‌های دست بالایی برای ظرفیت باربری جدار در سه حالت کوتاه، میان و بلند مدت در روش‌های فراساحلی تحلیل استاتیکی شامل روش‌های مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۳)، کلک و ولد (۱۹۹۶)، یاردین و همکاران (۲۰۰۵) و کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)، ارائه می‌شود. لذا فرض عملکرد "محافظه کارانه" برای این روش‌ها که در ادبیات فنی مرسوم است، حداقل در خاک‌های رسی صحیح نمی‌باشد. از این رو بر اساس تحقیقات انجام شده، پیشنهاد میشود که از واژه "عدم قطعیت" در خصوص عملکرد روش‌های تحلیل استاتیکی استفاده شود.
- تا به امروز، شمع‌های فراساحلی نصب شده در منطقه خلیج فارس

عمدتاً بر اساس روش مؤسسه نفت آمریکا (API) طراحی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقادیر ظرفیت باربری حاصل از این روش با داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایش‌های دینامیکی شمع در سه زمان کوتاه، میان و بلند مدت تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. به طوری که نتایج استخراج شده از روش API در راستای عدم محافظه کاری است و می‌تواند در دراز مدت مخاطراتی را برای سازه فراساحلی به همراه داشته باشد. بنابراین استفاده از روش API برای طراحی شمع‌های منطقه مورد مطالعه مناسب نمی‌باشد و بایستی حتماً اصلاحاتی در ضرائب آن صورت گیرد و اصطلاحاً این روش برای منطقه مورد مطالعه کالیبره شود.

- مقایسه و ارزیابی روش‌های تعیین ظرفیت باربری جدار شمع‌ها، نشان می‌دهند که تمامی روش‌های مبتنی بر نتایج CPT و CPTu دارای پراکندگی کمتر و در نتیجه عملکرد بهتری نسبت به روش‌های تحلیل استاتیکی هستند.

- تحقیقات آماری نشان می‌دهند که روش‌های تحلیل استاتیکی برای تعیین ظرفیت باربری نوک شمع‌ها در خاک‌های چسبنده از دقت نسبتاً قابل قبولی به ویژه در بلند مدت برخوردارند.

- میزان دقت و کیفیت پیش‌بینی روش‌های مستقیم مبتنی بر CPT‌های مکانیکی نسبت به روش‌های مستقیم مبتنی بر CPTu‌های الکتریکی، در تعیین ظرفیت باربری بلند مدت شمع‌ها بسیار کمتر است. دلیل اصلی این است که روش‌های مبتنی بر CPT‌های مکانیکی توانایی اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای را ندارند و در آن‌ها از تحلیل تنش کل در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌شود. در حالی که تحلیل تنش مؤثر، زهکشی خاک و زائل شدن فشار آب حفره‌ای مربوط به بررسی رفتار شمع‌ها در بلند مدت به ویژه در خاک‌های چسبنده می‌باشد.

- علیرغم پیشرفت‌های اخیر در زمینه توسعه روش‌های تخمین ظرفیت باربری شمع‌های فراساحلی در دنیا، در ایران تحقیق جامعی در خصوص تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فراساحلی تا به امروز انجام پذیرفته است. در این تحقیق برای اولین بار به این مهم پرداخته شده است. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند توسط محققان و متخصصان فعال در حوزه ژئوتکنیک جهت کاهش ریسک‌های احتمالی در پروژه‌های فراساحلی ایران به خصوص در منطقه خلیج فارس مورد استفاده قرار گیرد.

- پراکندگی نتایج روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری به خوبی احساس نیاز به ارائه یک رابطه جدید و کالیبره شده برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فلزی لوله‌ای فراساحلی در منطقه خلیج فارس را بیش از

پیش نمایان می‌سازد. این موضوع می‌تواند مورد توجه محققان این حوزه قرار گیرد.

## ۶- تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری شرکت پژوهش صنعت نفت، که امکان گردآوری اطلاعات این تحقیق را برای نویسندگان فراهم نمود، قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان از نکته نظرات مفید و ارزشمند سردبیر و داوران محترم که موجب بهبود کیفیت مقاله شد، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نمایند.

## ۷- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

مقاومت نوک شمع در حالت تشکیل درپوش خاکی، MN	$Q_{b,plug}$	مقاومت نوک شمع، $m^2$	$A_b$
مقاومت نوک شمع در تماس با خاک قفل شده درون شمع، MN	$Q_{b,soil}$	نسبت سطح، %	$AR$
مقاومت اندازه‌گیری شده (مرجع) نوک شمع، MN	$Q_{bm}$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد نوک شمع	$C_b$
مقاومت تخمین زده شده نوک شمع، MN	$Q_{bp}$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد نوک شمع در روش نیازی و ماین	$C_{be}$
<b>علائم یونانی</b>		فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع	$C_s$
فاکتور چسبندگی در روش تنش کل	$\alpha$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع در روش نیازی و ماین	$C_{se}$
تنش نوک مخروط CPTu، MPa	$q_c$	ضریب تحکیم، $m^2/day$	$c_v$
میانگین مقادیر تنش نوک مخروط CPTu در محدوده جداره شمع، MPa	$q_{c,avg(sid e)}$	ضریب تغییرات	$C_V$
میانگین مقادیر تنش نوک مخروط CPTu در محدوده نوک شمع، MPa	$q_{c,avg(tip)}$	قطر خارجی شمع، m	$D$
تنش مؤثر نوک مخروط CPTu، MPa	$q_E$	تخلخل نمونه	$e_{vr}$
مقاومت اندازه‌گیری شده (مرجع) شمع توسط آزمایش دینامیکی شمع، MN	$Q_m$	عدد لگاریتم طبیعی (نیر)، معادل $2/718$	$e$
مقاومت تخمین زده شده شمع توسط روش‌های تجربی، MN	$Q_p$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد نوک شمع	$F_b$
پارامتر مدل	$Q_p/Q_m$	تنش اصطکاکی جداره مخروط CPTu، kPa	$f_s$
مقاومت واحد جدار شمع، MPa	$q_s$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع	$F_s$
مقاومت جدار خارجی شمع، MN	$Q_s$	ضریب اصلاحی نوک شمع	$F_{tip}$
بیشترین مقاومت مجاز واحد جدار شمع، MPa	$q_{s,mas}$	ضخامت کوتاه‌ترین مسیر زهکشی و خروج آب از خاک، m	$H_{dr}$
مقاومت جدار داخلی شمع، MN	$Q_{s,in}$	شماره مورد محاسبه فاکتور احتمال تجمعی	$i$
مقاومت اندازه‌گیری شده (مرجع) جدار شمع، MN	$Q_{sm}$	نشانه خمیری خاک رس، %	$I_p$
مقاومت تخمین زده شده جدار شمع، MN	$Q_{sp}$	ضریب فشار زمین، kPa	$K_c$
تنش اصلاح شده نوک مخروط CPTu، MPa	$q_t$	طول شمع، m	$L$
نسبت مقاومت نوک	$Q_m$	تعداد کل داده‌های ورودی در فاکتور احتمال تجمعی	$n$
مقاومت نهایی شمع، MN	$Q_U$	ضریب چسبندگی	$N_c$
مقاومت اندازه‌گیری شده (مرجع) نهایی شمع، MN	$Q_{Um}$	ضریب مخروط آزمایش نفوذ مخروط	$N_k$
مقاومت تخمین زده شده نهایی شمع، MN	$Q_{Up}$	نسبت پیش تحکیمی	$OCR$
شعاع اصلاح شده، m	$R^*$	فاکتور احتمال تجمعی	$P$
ضریب تعیین	$R^2$	بار مؤثر وارد بر نمونه، kPa	$P'$
نسبت اصطکاک، %	$R_f$	محیط خارجی نوک شمع، m	$P_{out}$
شعاع داخلی نوک شمع، m	$R_{in}$	مقاومت واحد نوک شمع، MPa	$q_b$
شعاع خارجی نوک شمع، m	$R_{out}$	مقاومت نوک شمع، MN	$Q_b$
تابع جذر مجموع مربعات	$SRSS$	مقاومت نوک شمع با سطح مقطع لوله‌ای، MN	$Q_{b,ann}$
حساسیت خاک رس	$S_t$		
مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس، kPa	$S_u$		
مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس در محدوده نوک شمع، kPa	$S_u(tip)$		
زمان نظیر تحکیم ۵۰٪، day	$t_{50}$		
زمان نظیر تحکیم ۹۰٪، day	$t_{90}$		
ضریب زمان	$T_v$		
درجه تحکیم	$U$		
فشار آب حفره‌ای در پشت مخروط CPTu، MPa	$u_2$		
مقدار پارامتر مدل در تابع چگالی احتمال	$x$		
میزان نفوذ شمع زیر سطح زمین، m	$z$		
فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع وابسته به جهت بارگذاری	$\theta_2$		



- Penetration Test Methods for Predicting the Ultimate Capacity of Friction Driven Piles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, 130 (2004).
- [12] K. Tand, E. Funegard, Pile capacity in stiff clays: CPT method, *Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations*. 12, (1989) 349-352.
- [13] Z. Wang, N. Zhang, G. Cai, Q. Li, J. Wang, Assessment of CPTU and static load test methods for predicting ultimate bearing capacity of pile, *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5) (2017) 738-745.
- [14] B. Ebrahimian, A.H. Shamshirgaran, Axial Compression Bearing Capacity of Driven Offshore Piles in the Persian Gulf – A Case Study, *13th International Conference on Coasts, Ports and marine structures*, (2018) 249-250.
- [15] J.-L. Briaud, L.M. Tucker, Measured and predicted axial response of 98 piles, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(9) (1988) 984-1001.
- [16] H.H. Titi, M.Y. Abu-Farsakh, Evaluation of bearing capacity of piles from cone penetration test data, (1999) 296-308.
- [17] M.S.S. Almeida, F.A.B. Danziger, T. Lunne, Use of the piezocone test to predict the axial capacity of driven and jacked piles in clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1) (1996) 23-41.
- [18] R. Salgado, J. Lee, Pile design based on cone penetration test results, (1999).
- [19] R.M. Semple, W.J. Rigden, Shaft capacity of driven pipe piles in clay, *Analysis and design of pile foundations*, (1984) 59-79.
- [20] A.H. Augustesen, The effects of time on soil behaviour and pile capacity, *Aalborg University, Department of Civil Engineering*, 2006.
- [21] G. Cai, S. Liu, A.J. Puppala, Reliability assessment of CPTU-based pile capacity predictions in soft clay deposits, *Engineering Geology*, 141-142 (2012) 84-91.
- [22] A. Eslami, B.H. Fellenius, Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories, *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6) (1997) 886-904.
- [1] B. Ebrahimian, A. Nazari, A.Y. Pasha, Evaluating  $\epsilon_{50}$  for lateral load–displacement behavior of piles in clay, *Ocean Engineering*, 96 (2015) 149-160.
- [2] B. Ebrahimian, V. Movahed, Application of an evolutionary-based approach in evaluating pile bearing capacity using CPT results, *Ships and Offshore Structures*, 12(7) (2017) 937-953.
- [3] A. Eslami, E. Aflaki, B. Hosseini, Evaluating CPT and CPTu based pile bearing capacity estimation methods using Urmiyeh Lake Causeway piling records, *Scientia Iranica*, 18(5) (2011) 1009-1019.
- [4] H. Titi, M. Abu-Farsakh, M. Tumay, Evaluation of pile load tests in soft cohesive Louisiana soils, *Analysis, Design, Construction, and Testing of Deep Foundations*, (1999) 296-308.
- [5] T. Lunne, J.J. Powell, P.K. Robertson, *Cone penetration testing in geotechnical practice*, CRC Press, 2002.
- [6] I. Haustorfer, S. Plesiotis, Instrumented dynamic and static pile load testing at two bridge sites, *Fifth Australia-New Zealand conference on geomechanics: prediction versus performance; preprints of Papers*, (1988) 514.
- [7] F. Rausche, G.G. Goble, G.E. Likins, Dynamic Determination of Pile Capacity, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(3) (1985) 367-383.
- [8] K. Fakharian, T. Bahrami, F. Esmaili, I. Hosseinzadeh Attar, Dynamic and Static Tests for Optimization of Spun Piles of a Utility Plant near Persian Gulf-Case Study, *The 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations*, (2012) 18-20.
- [9] F.S. Niazi, Static axial pile foundation response using seismic piezocone data, *Georgia Institute of Technology*, 2014.
- [10] F.S. Niazi, P.W. Mayne, Cone Penetration Test Based Direct Methods for Evaluating Static Axial Capacity of Single Piles, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(4) (2013) 979-1009.
- [11] M. Abu-Farsakh, H. Titi, Assessment of Direct Cone

- Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strained Loading, in: Standard D-4186, United States, 2012.
- [34] Cathie-Associates, OPILE Instruction Manual, 2015.
- [35] N. Aoki, D.A. Velloso, An approximate method to estimate the bearing capacity of piles, Proc., 5th Pan-American Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1 (1975) 367-376.
- [36] M. Bustamante, L. Gianceselli, Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT, Proceedings of the 2-nd European symposium on penetration testing, (1982) 493-500.
- [37] M. Clisby, R. Scholtes, M. Corey, H. Cole, P. Teng, J. Webb, An evaluation of pile bearing capacities, Volume I, Final Report, Mississippi State Highway Department, (1978).
- [38] J. de Ruiter, F.L. Beringen, Pile foundations for large North Sea structures, Marine Geotechnology, 3(3) (1979) 267-314.
- [39] API, Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms, in: API-RP2A, American Petroleum Institute, Washington, USA, 1993.
- [40] K. Karlsrud, C.J.F. Clausen, P.M. Aas, Bearing capacity of driven piles in clay, the NGI approach, (2005) 775-782.
- [41] H.J. Kolk, E. der Velde, A Reliable Method to Determine Friction Capacity of Piles Driven into Clays, Offshore Technology Conference, (1996) 10.
- [42] F.S. Niazi, P.W. Mayne, CPTu-based enhanced UniCone method for pile capacity, Engineering Geology, (2016) 21-34.
- [43] G. Philipponnat, Méthode pratique de calcul d'un pieu isolé, à l'aide du pénétromètre statique, Revue Française de Géotechnique, (10) (1980) 55-64.
- [44] G. Price, I. Wardle, A comparison between cone penetration test results and the performance of small diameter instrumented piles in stiff clay, Proceedings, the 2nd European Symposium on Penetration Testing, 2 (1982) 775-780.
- [23] S. Lacasse, F. Nadim, S. Knudsen, U.K. Eidsvig, Z. Liu, G. Yetginer, T.R. Guttormsen, Reliability of axial pile capacity calculation methods, in: Gé Montréal 67th Canadian Geotechnical Conference. Paper, 2013.
- [24] R. Jardine, F. Chow, R. Overy, J. Standing, ICP design methods for driven piles in sands and clays, Thomas Telford Publishing, 2005.
- [25] R. Aggarwal, R. Litton, C. Cornell, W. Tang, J. Chen, J. Murff, Development of pile foundation bias factors using observed behavior of platforms during hurricane Andrew, in: Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, 1996.
- [26] B. Ebrahimian, V. Movahed, A. Nazari, Soil characterisation of South Pars field, Persian Gulf, Environmental Geotechnics, 1(2) (2014) 96-107.
- [27] B. Ebrahimian, V. Movahed, A.Y. Pasha, Evaluation of undrained shear strength of marine clay using cone penetration resistance at South Pars field in Iran, Ocean engineering, 54 (2012) 182-195.
- [28] A. Eslami, B.H. Fellenius, CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and a proposed new approach, Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering, 28(1) (2004) 69-86.
- [29] P.K. Robertson, Soil classification using the cone penetration test, Canadian geotechnical journal, 27(1) (1990) 151-158.
- [30] A.H. Augustesen, L. Andersen, C.S. Sørensen, Assessment of time functions for piles driven in clay, Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2006.
- [31] K. Karlsrud, Prediction of load-displacement behaviour and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results, (2012).
- [32] M. Khanmohammadi, K. Fakharian, Numerical modelling of pile installation and set-up effects on pile shaft capacity, International Journal of Geotechnical Engineering, 13(5) (2019) 484-498.
- [33] ASTM, Standard Test Method for One-Dimensional

- tests, Interim Research Rep, 1 (1982) 44.
- [47] A.H. Shamshirgaran, B. Ebrahimian, Time Effects on the Axial Compression Bearing Capacity of Piles Driven in Offshore Clays of Persian Gulf – A Case Study, The 3rd Iranian Conference on Geotechnical Engineering, (2018).
- [45] J.H. Schmertmann, Guidelines for cone penetration test: performance and design, No. FHWA-TS-78-209, United States. Federal Highway Administration, Washington, USA, 1978.
- [46] M. Tumay, M. Fakhroo, Friction pile capacity prediction in cohesive soils using electric quasi-static penetration

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. H. Shamshirgaran, B. Ebrahimian , Evaluation of Compressive Bearing Capacity of Long Offshore Steel Piles Driven in the Persian Gulf, Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 4029-4060.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18158.6795](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18158.6795)



