Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Determining separate resistance factors for base and shaft in driven pile foundations

Seyed Ali Asghari Pari[1]✉

1. Assistant Professor , Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: asgharipari@bkatu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 March 2024
Received in revised form 2 May 2024
Accepted 30 May 2024

Keywords:
Reliability, Pile foundation, Base resistance, Shaft resistance, load and resistance factor Design method.

ABSTRACT

Pile design is subject to a number of uncertainties that must be addressed to ensure the reliability and safety of the foundation. A common approach to reduce uncertainties in pile design is to calibrate the resistance factor in the Load and Resistance Factor Design (LRFD) method through reliability analysis. However, it is important to recognize that the LRFD method may not fully account for uncertainties associated with soil and pile resistances. The results of this study show that the separate consideration of base and wave resistance can lead to a more accurate and reliable design of piles. The proposed method can help engineers make more informed decisions and reduce uncertainties in pile design. In addition, the study highlights the importance of considering different factors such as the ratio of dead to live load and the ratio of base to shaft resistance when calculating the resistance factor.

Introduction

In general, Load and Resistance Factor Design (LRFD) is a more valuable and complete design method than Working Stress Design (WSD). Various studies have been carried out worldwide to calibrate resistance factors using methods such as Bayesian optimization and statistical analysis. The method proposed in the text focuses on the calculation of separate base and shaft resistance factors for driven piles in cohesive soils using Monte Carlo Simulation (MCS) and data analysis. The research aims to improve the accuracy and reliability of foundation designs by accounting for uncertainties in design parameters.

Materials and Methods

Subtitle

The calibration process shows all the uncertainties in the resistance section with only one factor. In contrast, the base and shaft resistances have different degrees of uncertainty. Depending on the method used to calculate the resistance, the final resistance may be affected. A database of DLT-BOR on driven piles is used to calibrate the shaft and base resistance factors. λ_R has been calculated based on the ratio of DLT-BOR to the theoretical prediction method. For the case of separate wave and soil resistances, the LRFD formula is expressed as:

$$\phi_S R_S + \phi_B R_B \geq \sum \gamma_i Q_{ni} \quad (1)$$

Here ϕ_S and ϕ_B are the shaft and base resistance factors, respectively; R_S and R_B are the nominal shaft and base resistances. If only the dead and live load are considered, the limit state function can be written:

$$g = R_{MS} + R_{MB} - Q_{MD} - Q_{ML} \quad (2)$$

RMS and RMB are the measured nominal shaft and base resistances, respectively; Q_{MD} and Q_{ML} are the measured dead and live loads, respectively. By converting all measured terms

Cite this article: Asghari Pari, A. (2024). Determining separate resistance factors for base and shaft in driven pile foundations. Journal of Engineering Geology, 18 (1), 143-161. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1018841

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1018841

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

in Eq. 2 to predicted terms using the bias factors of the shaft and base resistance (λ_{RS} and λ_{RB}) and the dead and live load bias factors (λ_{QD}, λ_{QL}); Eq. 2 can be rewritten as:

$$g = \lambda_{RS}R_S + \lambda_{RB}R_B - \lambda_{QD}Q_D - \lambda_{QL}Q_L \quad (3)$$

Combine Eq. 3 with Eq. 1, and after transformation, the limit state function is now obtained:

$$g = Q_L\left[\frac{(\gamma_D\frac{Q_D}{Q_L}+\gamma_L)(\lambda_{RS}+\lambda_{RB}\frac{R_B}{R_S})}{\phi_S+\phi_B\frac{R_B}{R_S}} - \lambda_{QD}\frac{Q_D}{Q_L} - \lambda_{QL}\right] \quad (8)$$

In this case, our random variables are λ_{RB}, λ_{RS}, λ_{QD} and λ_{QL}.

For calculating shaft and base resistance bias factors, DLT-BOR is divided to predicted resistances at the shaft and the base of piles from static analysis methods (the α-API method (2000) and β-method (Burland,1973)), Four CPT-based methods including the LCPC method (1982), Eslami and Fellenius method (1996), Schmertmann method (1975) and Dutch method (1979) and SPT-Decourt method (1995) as direct predicting methods. Anderson Darling (AD) test is used to check the governing distributions of λ_{RB} and λ_{RS}, and the result is shown in Figs. 2 and 3.

If the "test statistic" (A2) is greater than the critical value at the selected significance level (α) (2.5 for α=0.05) the distribution form hypothesis is rejected. The AD test results show that all the bias factors of the shaft and base resistance follow the log-normal distribution (Table 4).

Results and Discussion

The results of the study indicate that for the CPT method, except for the CPT-Eslami method, the shaft resistance factor tends to be more significant than the soil resistance factor. This suggests that for most CPT methods, the shaft resistance plays a crucial role in determining the overall bearing capacity of pile foundations. In contrast, for the SPT method, the base and shaft resistance factors are of almost equal importance.

Furthermore, in static analysis methods such as the α-API and β-Method, the base resistance factor is found to be higher than the shaft resistance factor. This highlights the different importance of the base and wave resistance factors depending on the design method used.

The study also reveals that the base and shaft resistance factors decrease as the reliability index increases. This implies that a higher level of reliability leads to lower resistance factors, underscoring the need for precision in selecting the reliability index during the design of pile foundations. Proper consideration of the reliability index is crucial in ensuring the safety and stability of pile foundations in construction projects.

SRFD and LRFD, on the factored resistance of pile foundations. In the case of the β-Method, there is a slight difference of about 6% between the factored resistances obtained from SRFD and LRFD methods. However, for the α-API, the SRFD method results in a significantly higher factored resistance, showing an increase of 35% compared to the LRFD method.

The study also shows that the choice of design method can lead to different results in terms of factored resistance. For example, the SRFD method increases the factored resistance in the SPT method by approximately 26%. Conversely, for the CPT method, the results differ between the different design methods. In particular, the SRFD factored resistance decreases by about 10 to 13% for the Eslami and LCPC methods compared to LRFD. On the other hand, there is a significant increase in the factored resistance with the SRFD method, showing an increase of approximately 52% for the Schmertmann method and approximately 130% for the Dutch method compared to LRFD.

These results highlight the importance of selecting an appropriate design method when calculating factored resistance for pile foundations, as it can have a significant impact

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

on the overall reliability and safety of the foundation design.

Conclusions

The proposed method provides a more accurate and reliable way of calculating the bearing capacity of pile foundations by taking into account the uncertainties in the soil and shaft resistances. By analyzing these factors separately, designers can better understand the overall reliability of the foundation and make more informed decisions during the design process. The results of this study also highlight the importance of considering different design methods when calculating resistance factors for pile foundations. Depending on the design method used, the calculated resistance can vary significantly, highlighting the need for a comprehensive analysis approach. Overall, this research contributes to the field of geotechnical engineering by providing a method for calculating separate resistance factors for pile foundations based on reliability analysis. By incorporating uncertainties into the design process, engineers can improve the overall safety and performance of pile foundations in various construction projects..

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]

[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

تعیین ضرایب مقاومت جداگانه برای نوک و جدار در پی‌های شمعی کوبیده شده

سید علی اصغری پری[۱]✉

۱. استادیار، مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء ، بهبهان، ایران. رایانامه:asgharipari@bkatu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰

کلیدواژه‌ها:
قابلیت اطمینان، پی شمعی، مقاومت نوک، مقاومت جدار، روش طراحی ضریب بار و مقاومت.

چکیده

طراحی شمع‌ها شامل عدم قطعیت‌های مختلفی است و رسیدگی به آنها برای اطمینان از ایمنی فونداسیون ضروری است. یکی از رویکردهای رایج برای کاهش عدم قطعیت در طراحی شمع، کالیبراسیون ضریب مقاومت در روش طراحی ضریب بار و مقاومت (LRFD) از طریق تحلیل قابلیت اطمینان است. بااین‌حال، تشخیص این نکته ضروری است که روش LRFD ممکن است به طور کامل عدم قطعیت‌های مربوط به مقاومت نوک و جدار را در نظر نگیرد. این مطالعه نشان می‌دهد که درنظرگرفتن مقاومت نوک و جدار به‌صورت جداگانه می‌تواند منجر به طراحی دقیق و مطمئن شمع‌ها شود. روش پیشنهادی می‌تواند به مهندسان در تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر و کاهش عدم قطعیت در طراحی شمع کمک کند. علاوه بر این، این مطالعه اهمیت درنظرگرفتن عوامل مختلف مانند نسبت بار مرده به بار زنده و نسبت مقاومت نوک به جدار در محاسبه ضریب مقاومت را برجسته می‌کند.

مقدمه

روش طراحی فاکتور بار و مقاومت (LRFD) نسبت به روش طراحی تنش مجاز ((Working Stress Design (WSD) به‌عنوان یک روش طراحی ارزشمندتر و کامل‌تر شناخته می‌شود. یکی از مزایای اساسی LRFD نسبت به WSD، قابلیت ارائه سطوح اطمینان و محاسبه عدم قطعیت برای بار و مقاومت به‌صورت جداگانه است. پیاده‌سازی کامل روش LRFD در مهندسی ژئوتکنیک باعث طراحی ارزان‌تر، ایمن‌تر و کارآمدتر پی‌ها می‌شود. بسیاری از پژوهشگران، مهندسان و طراحان، ویژگی‌های ارزشمند روش LRFD را موردمطالعه قرار داده و آن را در عمل به کار برده‌اند. علاوه بر این، تحقیقات بیشتری بر پی‌های شمعی بر اساس شرایط ساخت و نوع خاک انجام شده است.

اصل قابلیت اعتماد در طراحی‌های مهندسی در دستورالعمل‌های طراحی کشورهای مختلف از جمله آمریکا، کانادا، چین، ژاپن، کره، آفریقای جنوبی، سنگاپور و هنگ‌کنگ گنجانده شده است. علاوه بر این، روش سنتی WSD در طراحی پی‌های شمعی به روش LRFD تبدیل شده است. بااین‌حال، از روش LRFD در مهندسی ژئوتکنیک هنوز به طور کامل استفاده نشده است و نیاز به تحقیقات و مطالعات بیشتر در این زمینه احساس می شود (Kim et al., 2011).

با وجود پیشرفت‌های زیاد در این زمینه، باید یک چارچوب منطقی برای گسترش روش LRFD به‌منظور جایگزینی ضرایب مقاومت محاسبه شده بر اساس ضرایب ایمنی با یک روش مبتنی بر تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان وجود داشته باشد. تحقیقات بیشتری در سراسر جهان برای تنظیم ضرایب

استناد: اصغری پری، ع. (۱۴۰۳). تعیین ضرایب مقاومت جداگانه برای نوک و جدار در پی‌های شمعی کوبیده شده. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۱)، ۱۶۱-۱۴۳.
https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1018841

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

مقاومت در مسائل ژئوتکنیکی انجام شده است. ژنگ و همکاران(Zheng et al., 2012) از یک روش بهینه‌سازی بیژین برای تعیین ضریب مقاومت برای پی‌ها استفاده کردند و مقادیری برای شمع‌های کوبشی ارائه کردند. فون و کولهاوی (Phoon and Kulhawy, 2002) و فون و همکاران (Phoon et al., 2003) ضرایب چندگانه را برای مقاومت به‌جای یک ضریب تنها پیشنهاد دادند. هانجو و همکاران (Honjo et al., 2002) ضرایب جزئی برای بار مرده، بار لرزه‌ای و مقاومت نوک و جدار یک پی شمعی تحت بارمحوری ارائه کردند. آشتو (AASHTO, 2007) ضرایب مقاومت جداگانه‌ای را برای نوک و جدار برای روش‌های طراحی مختلف معرفی کرد. بااین‌حال، مقدار این ضرایب بر اساس قضاوت مهندسی و یا ضرایب ایمنی روش WSD محاسبه شده است.

در مطالعه انجام شده توسط کیم و همکاران (Kim et al., 2011)، روش LRFD برای شمع‌های کوبیده شده تحت بارمحوری در شن توسعه یافت و ضرایب مقاومت برای نوک و جدار به طور جداگانه بر اساس درجه عدم قطعیت محاسبه شد. پارک و همکاران (Park et al., 2013) یک روش برای کالیبره کردن ضریب مقاومت بر اساس نتایج آزمایش بار استاتیکی برای شمع‌های فولادی کوبیده شده بر اساس نظریه قابلیت اطمینان پیشنهاد دادند. بیان و همکاران (Bian et al., 2018,2022) از اثرات گیرش برای محاسبه ضرایب مقاومت نوک و جدار شمع‌های کوبیده شده استفاده کردند. بااین‌حال، روش‌های تعیین ضرایب مقاومت جداگانه کاملاً توسعه‌یافته نیستند. همچنین، هیچ تحقیقی در این زمینه در خاک‌های چسبنده برای روش‌های مختلف طراحی پی‌های شمعی انجام نشده است. هدف اصلی این تحقیق، کالیبراسیون بومی ضرایب جداگانه مقاومت نوک و جدار برای پی های شمعی در خاک چسبنده است. یکی از مسائل مهم در زمینه ضرایب کاهنده مقاومت ارائه شده در مراجع مختلف، غیرکاربردی بودن این ضرایب برای کشور ایران بوده است. با بررسی مراجع مختلف این ادعا صحت پیدا می کند تا جاییکه بسیاری از کشورها و سازمانها در حال کالیبراسیون ضرایب مقاومت LRFD برای کشور یا سازمان خود هستند (مانند آشتو، اتحادیه اروپا، سازمان طراحی پلهای آمریکا، کشورهای ژاپن و آفریقای جنوبی و ...). از طرفی روشهای متنوع اندازه گیری مقاومت خود یکی از چالشهای مهم در طراحی پی های شمعی است که در این تحقیق سعی شده روشهای متنوع مورد بررسی و ضرایب مقاومت جداگانه برای نوک و جدار برای آنها ارائه شود. ابتدا، فرایند کالیبراسیون ضریب مقاومت بر اساس روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS) بیان شده و پارامترهای مختلف آن بر اساس مطالعات قبلی تخمین زده می‌شود. سپس، با استفاده از پایگاه داده‌ای که از نتایج آزمایش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده شده در مناطق مختلف ایران جمع‌آوری شده است، ضریب مقاومت روش LRFD محاسبه شده است. سپس، یک روش برای محاسبه ضرایب مقاومت جداگانه پیشنهاد شده است. سپس آزمون‌های آماری بر روی پایگاه‌داده انجام شده تا توزیع داده‌ها تعیین شود. در پایان، ضرایب مقاومت نوک و جدار بر اساس پایگاه‌داده‌های جمع‌آوری شده محاسبه شده‌اند. همچنین تحلیل حساسیت برای اثر بارهای مرده به زنده ($\frac{Q_D}{Q_L}$) و نسبت بار پیش‌بینی شده نوک به جدار($\frac{R_B}{R_S}$) انجام شده است. در نهایت، با استفاده از مجموعه داده واقعی، اثر ضرایب مقاومت محاسبه شده بر مقدار مقاومت کاهش یافته بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

کالیبراسیون ضریب مقاومت با استفاده از روش مونت کارلو

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

برای انجام کالیبراسیون ضریب مقاومت، فرمول عمومی روش LRFD لازم است. LRFD به‌صورت زیر بیان می‌شود (TRB, 2005):

$$\phi R_p = \gamma_L Q_L + \gamma_D Q_D \qquad (۱)$$

که در آن ϕ، ضریب مقاومت، Rp، مقاومت اسمی شمع که بر اساس روش پیش‌بینی مقاومت مورداستفاده تعیین می‌شود، γ_D و γ_L ضریب بار زنده و بار مرده هستند. آلن و همکاران (Allen et al., 2005) یک روش برای کالیبراسیون ضریب مقاومت با استفاده از روش MCS پیشنهاد دادند، که در آن تابع حالت حدی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$g = R_M - Q_{MD} - Q_{ML} \qquad (۲)$$

که در آن R_M، Q_{MD} و Q_{ML} به ترتیب مقاومت اسمی، بار مرده و بار زنده اندازه‌گیری شده هستند. اگر بخش اندازه‌گیری شده را با استفاده از ضرایب جهت‌گیری (اصلاح) مقاومت (λ_R)، بار مرده (λ_{QD}) و بار زنده (λ_{QL}) به‌صورت پیش‌بینی شده تبدیل کنیم، معادله ۲ می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$g = \lambda_R R_P - \lambda_{QD} Q_D - \lambda_{QL} Q_L \qquad (۳)$$

با ترکیب معادلات ۱ و ۳، به معادله زیر می‌رسیم:

$$g = Q_L \left[\frac{\left(\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L\right)\lambda_R}{\phi} - \lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} - \lambda_{QL} \right] \qquad (٤)$$

برای تولید اعداد تصادفی برای هر یک از متغیرهای رابطه فوق از روش MCS استفاده می‌شود، بر اساس نوع تابع توزیع، سه متغیر تصادفی در معادله حالت حدی، ضرایب جهت‌گیری (اصلاح) مقاومت (λ_R)، بار مرده (λ_{QD}) و بار زنده (λ_{QL}) هستند.

ضرایب بار وارده و عدم قطعیت‌های آن

بارهای مرده و زنده به‌عنوان بارمحوری بر روی شمع موردنظر قرار می‌گیرند. مقررات ملی ساختمان مبحث ۷ در ایران مقادیر 1.2 و 1.5 را به ترتیب برای ضرایب بار مرده و بار زنده پیشنهاد کرده است. الینگوود (Ellingwood,1999) عدم قطعیت‌های بار مرده(Q_D) و بار زنده (Q_L) را برای سازه‌ها بصورت اعداد جدول ۱ پیشنهاد داد. در این مطالعه، از مقادیر ضرایب جهت‌گیری و ضریب تغییرات در جدول ۱ برای عدم قطعیت‌های Q_D و Q_L استفاده می‌شود.

جدول ۱- ضرایب جهت‌گیری و ضریب تغییرات و نوع توزیع Q_D و Q_L برای سازه های ساختمانی (Ellingwood,1999)

Table 1- Bias factors, COVS, and distribution types of Q_D and Q_L for building structures (Ellingwood, 1999)

نوع بار	ضریب جهت گیری (λ)	ضریب تغییرات(COV)	نوع توزیع
Q_D	1.05	0.10	Normal
Q_L	1.0	0.25	Type I Based on Largest Extreme

نواک (Nowak, 1999) نشان داد که بارهای مرده و زنده توزیع نرمال دارند. فویه و سالگادو (Foye and Salgado, 2004) نشان دادند که توزیع بارهای گذرا نزدیک به توزیع لوگ نرمال است و می‌تواند با دو ممان اول آن مدل‌سازی شود. آنها همچنین نشان دادند که ازآنجاکه بارهای گذرا و مقاومت در زمینه مسائل ژئوتکنیکی همواره مقادیری مثبت هستند، توزیع لوگ نرمال بهتر می‌تواند این متغیرها را مدل کند. علاوه بر این، لازم به ذکر است که ازآنجائی‌که ضریب تغییرات (COV)، معمولاً برای بارهای وارده به سازه، مقداری کوچک و برای مقاومت اندازه‌گیری شده، مقداری زیاد است،

نوع توزیع برای مقاومت و بارها تاثیر زیادی بر نتایج کالیبراسیون نهایی ندارد (Nowak, 1999). در نتیجه، برای هر دو بارهای مرده و زنده، توزیع لوگ نرمال در این مطالعه فرض شده است.

در NCHRP 507، پایکووسکی و همکاران (Paikowsky et al., 2004) نسبت بار مرده به بار زنده ($\frac{Q_D}{Q_L}$) را بین 2 تا 2.5 برای پی های شمع پیشنهاد کردند. آلن (Allen, 2005) مقدار محافظه کارانه تر 3 را برای این نسبت استفاده کرد. نواک (Nowak, 1999) و پایکووسکی و همکاران (Paikowsky et al., 2004) با تجزیه و تحلیل نسبت های $\frac{Q_D}{Q_L}$ مختلف، نشان دادند که مقدار این نسبت تاثیر زیادی در نتایج کالیبراسیون ضرایب مقاومت ندارد. در نتیجه، نسبت $\frac{Q_D}{Q_L}$ برابر 3 در این مطالعه فرض شده است. بر اساس تحقیق بارکر و دانکن (Barker and Duncan, 1992)، محدوده شاخص قابلیت اطمینان هدف (β_T) برای طراحی پی های شمعی بین 2.5 تا 3 است. برای پی های شمعی بارگذاری شده محوری، پایکووسکی و همکاران (Paikowsky et al., 2004) شاخص های قابلیت اطمینان هدف ، 2.33 (مرتبط با احتمال شکست 1%) برای گروه های شمع با بیش از ۵ شمع، و مقدار 3 (مرتبط با احتمال شکست 0.1%) برای گروه های شمعی با تعداد شمع کمتر از ۵ شمع را ارائه کردند. در این تحقیق، ضرایب مقاومت برای هر دو شاخص اطمینان هدف ۲٫۳۳ و ۳ محاسبه شده است.

پارامترهای آماری ضریب جهت‌گیری مقاومت

برای انجام تحلیل‌های آماری و محاسبه پارامترهای آماری متغیرهای معادله حالت حدی به یک پایگاه‌داده جامع نیاز است. اصغری پری و همکاران (Asghari Pari et al., 2019,2020) پایگاه‌داده‌ای از شمع‌های کوبیده شده تحت بارمحوری در خاک چسبنده در ایران را موردمطالعه قرار دادند که در این مطالعه از این پایگاه‌داده استفاده شده و در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- پایگاه داده جمع آوری شده برای کالیبراسیون ضرایب مقاومت،(Asghari Pari et al., 2019, 2020)

Table 2- Summary of the collected database for calibration of resistance factor (Asghari Pari et al., 2019, 2020)

نام محل پروژه	نوع شمع	تعداد کل	DLT	ظرفیت باربری استاتیکی محاسبه شده			
			BOR	CPT	SPT	α-API	β-Method
بوعلی سینا	شمع بتنی	10	10	-	-	10	10
بندر امام	شمع بتنی	3	3	-	3	3	-
فولاد جهان آرا	شمع بتنی	61	59	29	60	60	60
فجر۲	شمع بتنی	12	10	-	8	-	-
میدان نفتی آزادگان شمالی	شمع بتنی	14	14	3	12	14	14
فولاد شادگان	شمع بتنی	12	9	-	12	9	9
شکرنوین	شمع بتنی	13	13	2	8	7	-
بیدبلند۲	شمع بتنی	28	28	-	27	28	28
جمع کل		153	144	34	130	131	121

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

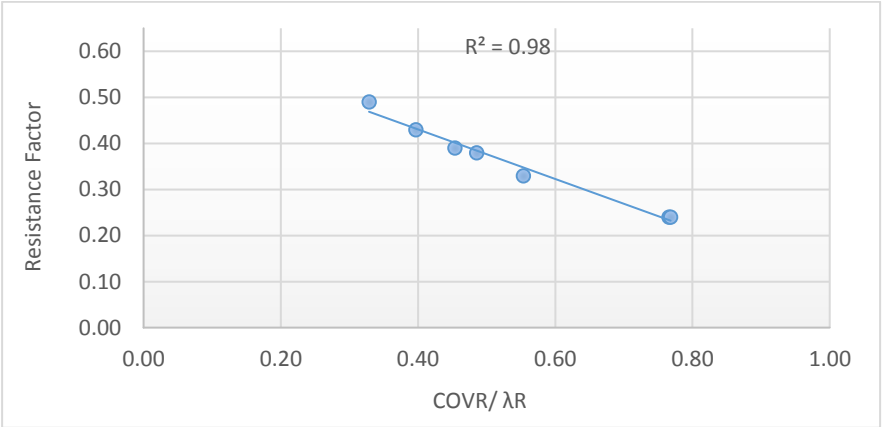
اصغری پری و همکاران (Asghari Pari et al., 2019) نشان دادند که نتایج آزمایش بار دینامیکی (DLT[1]) در شرایط شروع ضربه (BOR[2]) را می‌توان به‌عنوان بار اندازه‌گیری نهایی شمع‌ها در نظر گرفت. آنها همچنین نشان دادند که ضریب جهت‌گیری مقاومت از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند. بر اساس پایگاه‌داده ایران، ضریب مقاومت برای روش MCS محاسبه شد و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

تجزیه‌وتحلیل همبستگی بین ضریب مقاومت محاسبه شده و نسبت $\frac{COV_R}{\lambda_R}$ در شکل ۱ آورده شده است. نتایج نشان می دهد که ϕ و نسبت $\frac{COV_R}{\lambda_R}$ یک رابطه خطی واضح و همبستگی خوبی با ضریب همبستگی $R^2=0.98$ دارند. همچنین می توانیم ببینیم که ضریب مقاومت با نسبت $\frac{COV_R}{\lambda_R}$ کاهش می یابد.

جدول ۳- محاسبه ضریب مقاومت بر اساس روش MCS برای پایگاه داده ایران(Asghari Pari et al., 2019)

Table 3- Calculated resistance factor based on MCS method for the database of Iran (Asghari Pari et al., 2019)

روش اندازه گیری شده	روش پیش بینی شده	λ_R (ضریب جهت گیری مقاومت)	COV_R (ضریب تغییرات مقاومت)	N	β = 3.00		β = 2.33		$\frac{COV_R}{\lambda_R}$
					ϕ	ϕ/ λ_R	ϕ	ϕ/ λ_R	
DLT-BOR	α-API	1.30	0.59	130	0.26	0.20	0.39	0.30	0.45
	β-Method	0.56	0.31	120	0.26	0.46	0.33	0.59	0.55
	SPT-Decourt	0.68	0.33	123	0.30	0.44	0.38	0.56	0.49
	CPT-LCPC	0.63	0.25	34	0.35	0.56	0.43	0.68	0.47
	CPT-Dutch	0.64	0.49	34	0.17	0.27	0.24	0.38	0.40
	CPT-Eslami-Fellenius	0.70	0.23	34	0.41	0.59	0.49	0.70	0.77
	CPT-Schmertmann	0.69	0.53	34	0.17	0.25	0.24	0.35	0.33



شکل ۱. تجزیه و تحلیل همبستگی بین عوامل مقاومت محاسبه شده و نسبت COV_R/λ_R

Fig. 1. Correlation Analyses between the Calculated Resistance Factors, and the ratio of COV_R/λ_R

[1] Dynamic Load Test

[2] Beginning of restrike

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

کالیبراسیون ضرایب مقاومت نوک و جدار شمع

فرایند کالیبراسیون ارائه شده در بخش ۲، تمام عدم قطعیت ها در بخش مقاومت را تنها با یک ضریب نشان می دهد. در حالیکه، مقاومت نوک و جدار درجات مختلفی از عدم قطعیت دارند و بسته به روش محاسبه مقاومت، مقاومت نهایی را می توانند تحت تأثیر قرار دهند. با استفاده از پایگاه اطلاعاتی آزمایش DLT-BOR بر روی شمع های کوبیده شده فرایند کالیبراسیون ضرایب مقاومت نوک و جدار انجام شد. λ_R ، بصورت نسبت DLT-BOR به عنوان روش اندازه‌گیری شده مقاومت، به روش‌های پیش‌بینی‌شده مقاومت در جدول ۳ تعریف شده است.

وقتی مقاومت نوک و جدار به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شود، فرمول LRFD بر اساس معادله ۱ به‌صورت رابطه زیر درمی‌آید:

$$\phi_S R_S + \phi_B R_B \geq \sum \gamma_i Q_{ni} \qquad (۵)$$

که در آن ϕ_S و ϕ_B به ترتیب ضرایب مقاومت نوک و جدار و، R_S و R_B مقاومت اسمی نوک و جدار هستند.

اگر فقط بارهای مرده و زنده به‌عنوان بارهای وارده بر شمع در نظر گرفته شوند، تابع حالت حدی (معادله ۲) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$g = R_{MS} + R_{MB} - Q_{MD} - Q_{ML} \qquad (۶)$$

که R_{MS} و R_{MB} به ترتیب مقاومت‌های اسمی نوک و جدار اندازه‌گیری شده و Q_{MD} و Q_{ML} به ترتیب بارهای مرده و زنده اندازه‌گیری شده هستند. با تبدیل تمام عبارات اندازه‌گیری شده در معادله ۶ به صورت پیش‌بینی‌شده با استفاده از ضرایب جهت‌گیری مقاومت نوک و جدار (λ_{RS} و λ_{RB}) و ضرایب جهت‌گیری بار مرده و زنده (λ_{QD}، λ_{QL}). معادله ۶ را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$g = \lambda_{RS} R_S + \lambda_{RB} R_B - \lambda_{QD} Q_D - \lambda_{QL} Q_L \qquad (۷)$$

با ترکیب معادله ۷ با معادله ۵، اکنون تابع حالت حد به صورت زیر به دست می آید:

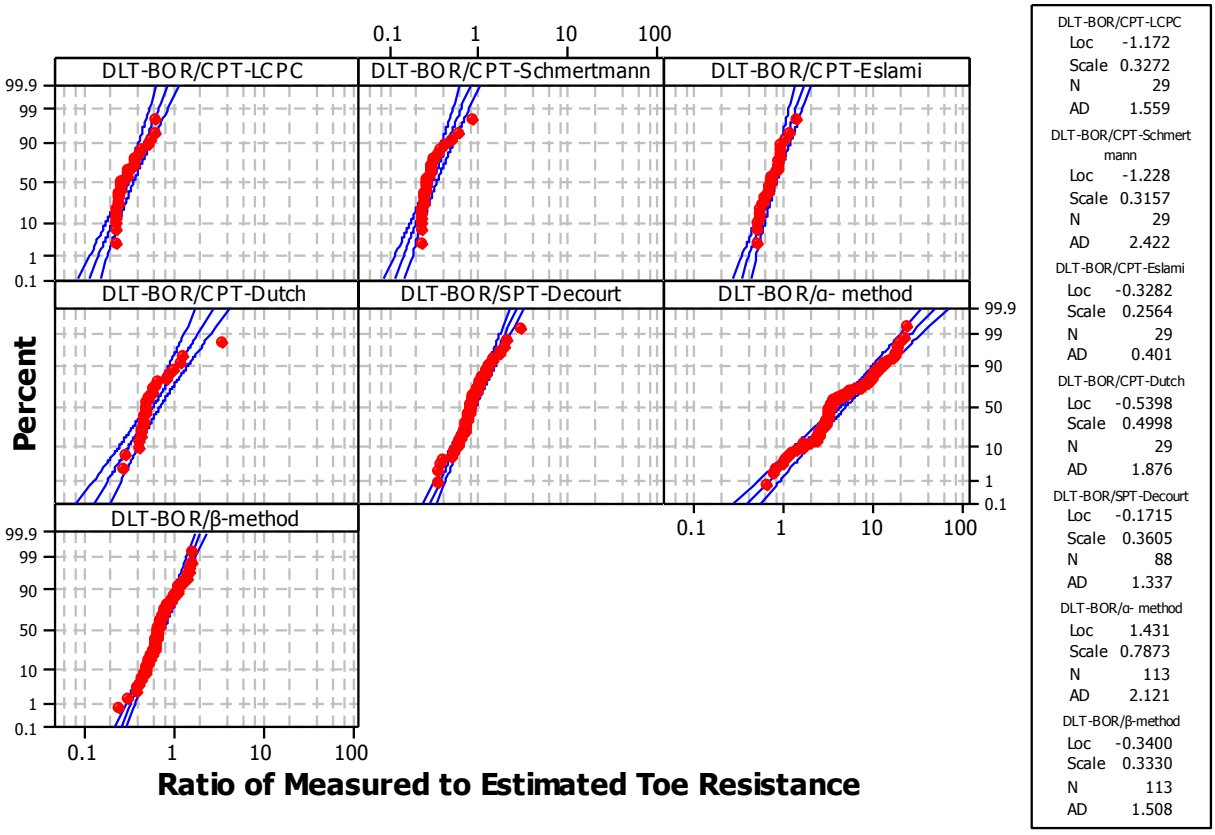
$$g = Q_L \left[\frac{(\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L)(\lambda_{RS} + \lambda_{RB} \frac{R_B}{R_S})}{\phi_S + \phi_B \frac{R_B}{R_S}} - \lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} - \lambda_{QL} \right] \qquad (۸)$$

در این حالت، متغیرهای تصادفی ما λ_{QL} و λ_{QD}، λ_{RS}، λ_{RB} هستند.

عدم قطعیت ضرایب جهت‌گیری مقاومت نوک و جدار

برای محاسبه ضرایب جهت‌گیری مقاومت نوک و جدار، نسبت مقدار DLT-BOR به‌عنوان روش اندازه‌گیری شده به مقاومت‌های پیش‌بینی‌شده در نوک و جدار شمع‌ها محاسبه شد. مقاومت‌های پیش‌بینی‌شده از روش‌های آنالیز استاتیکی شامل روش α-API (API, 2000)، و روش بتا (Burland, 1973) ، چهار روش CPT شامل روش‌های LCPC (Bustamante and Gianeselli, 1982) ، روش اسلامی و فلنیوس (Eslami and Fellenius, 1996)، روش اشمرتمن (Nottingham and Schmertmann, 1975) و روش هلندی (De Kuiter and Beringen, 1979) و یک روش SPT-Decourt (Decourt, 1995) هستند. تست اندرسون دارلینگ (AD) برای بررسی توزیع‌های حاکم بر λ_{RS} و λ_{RB} استفاده می شود و نتیجه در شکل های۲ و ۳ نشان داده شده است. اگر "آماره آزمون" (A^2) بزرگتر از مقدار بحرانی در سطح معنادار انتخاب شده (α) باشد (2.5 برای α=0.05) فرضیه نوع توزیع مورد بررسی برای داده مورد نظر رد می شود. نتایج آزمون AD نشان می دهد که تمام ضرایب جهت‌گیری مقاومت نوک و جدار از توزیع لوگ نرمال پیروی می کنند (جدول ۴).

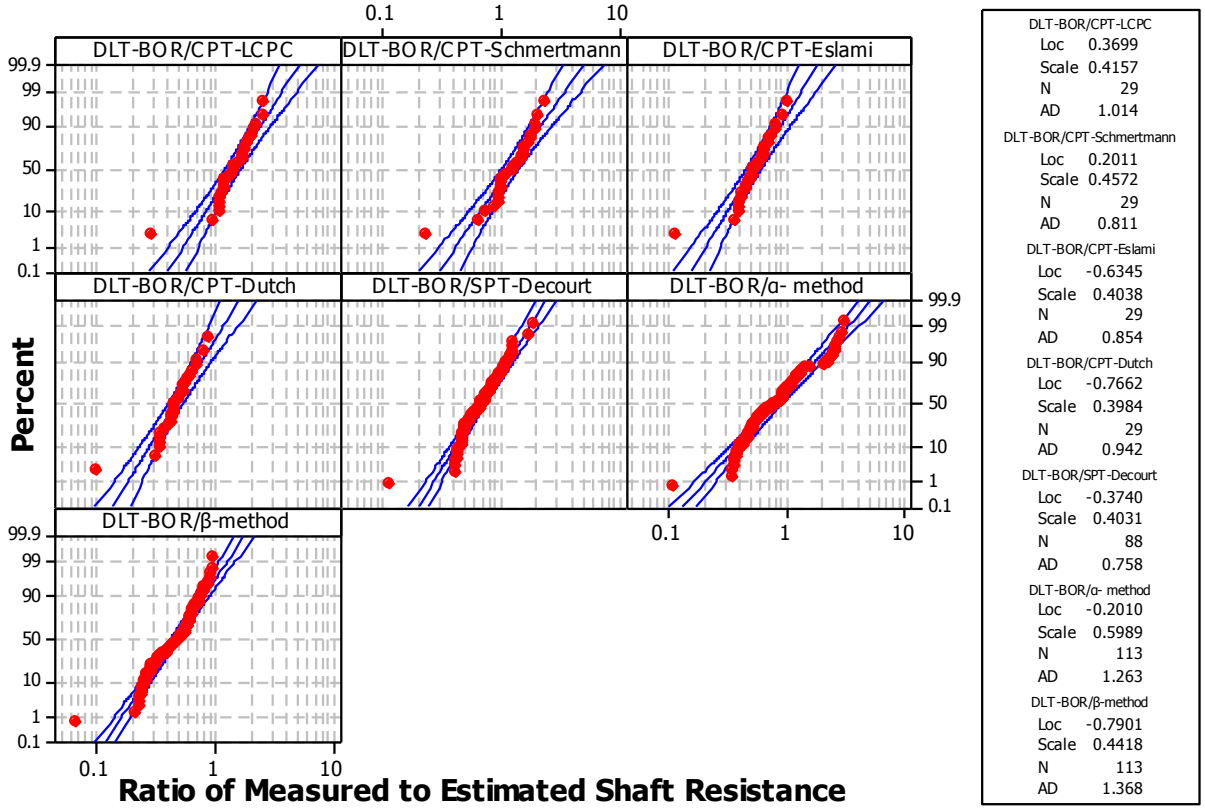
به جز روش‌های CPT-LCPC و CPT اشمرتمن، همه روش‌ها مقدار مقاومت جدار را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده در DLT-BOR پیش‌بینی کردند از سوی دیگر، همه روش‌ها، به جز روش α-API، مقاومت نوک شمع را بیش از حد اندازه‌گیری شده برآورد کردند.



شکل ۲. نتایج آزمون AD برای ضرایب جهت‌گیری مقاومت نوک

Fig. 2. The results of the AD test for the bias factors of the base resistance

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]



شکل ۳. نتایج آزمون AD برای ضرایب جهت‌گیری مقاومت جدار

Fig. 3. The results of the AD test for the bias factors of the shaft resistance

جدول ۴- نتایج آزمون AD برای ضرایب جهت‌گیری مقاومت نوک و جدار

Table 4- The Results of the AD Test for the Bias Factors of the Shaft and Tip Resistance

روش اندازه گیری شده	روش پیش بینی شده	N	$\frac{R_B}{R_S}$	λ_{RS}	COV_{RS}	آماره (A^2) آزمون	λ_{RB}	COV_{RB}	(A^2) آماره آزمون
DLT-BOR	CPT-LCPC	29	3.42	1.55	0.33	1.01	0.33	0.38	1.56
	CPT-Schmertmann	29	3.00	1.33	0.36	0.81	0.31	0.43	2.42
	CPT-Eslami	29	0.55	0.57	0.33	0.85	0.74	0.27	1.88
	CPT-Dutch	29	0.59	0.50	0.33	0.94	0.69	0.89	0.40
	SPT-Decourt	88	0.49	0.74	0.40	0.76	0.90	0.42	2.02
	α-API	113	0.1	0.98	0.68	1.26	5.72	0.87	1.33
	β-Method	113	0.37	0.50	0.40	1.37	0.75	0.36	2.12

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

نتایج و بحث

کالیبراسیون با استفاده از روش MCS

بر اساس معادله ۸، یکی از پارامترهای تابع حالت حدی، $\frac{R_B}{R_S}$ است. با توجه به پایگاه داده ها، این نسبت محاسبه شده است و مقدار میانگین در جدول ۴ نشان داده شده است. برای کالیبراسیون ضرایب مقاومت جداگانه، مراحل زیر مورد نیاز است:

مرحله ۱: یک شاخص قابلیت اطمینان هدف را در نظر بگیرید (β_T)

مرحله ۲: یک ضریب مقاومت نوک و جدار فرضی (ϕ_B ،ϕ_S) را در نظر بگیرید.

مرحله ۳: اعداد تصادفی برای هر یک از متغیرهای λ_{RS}، λ_{RB}، λ_{QD} و λ_{QL} تولید کنید

مرحله ۴: با توجه به معادله ۸، تعداد مواردی را که در آنها $g \leq 0$ است، پیدا کنید. سپس احتمال شکست به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_f = \frac{count(g \leq 0)}{n_s} \qquad (۹)$$

ns تعداد کل شبیه‌سازی‌ها است که برابر با ۲۰۰۰۰۰ تعیین شده است. بر اساس احتمال شکست محاسبه شده، شاخص قابلیت اطمینان (β) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta = -\Phi^{-1}\left(P_f\right) \qquad (۱۰)$$

در اینجا Φ^{-1} معکوس توزیع نرمال استاندارد است. اگر شاخص قابلیت اطمینان محاسبه شده (β) با شاخص اطمینان هدف(β_T) برابر نباشد، ϕ_B انتخاب شده در مرحله ۲ باید تغییر داده شود و یک تکرار جدید تا زمانی که $|\beta - \beta_T| \leq 0.001$ شود انجام شود. مراحل ۲ تا ۴ باید برای ϕ_S تکرار شوند.

مرحله ۵: از مرحله ۲ تا مرحله ۴، مجموعه ای از مقادیر ϕ_S و ϕ_B به دست آید که β_T مشخص شده را برآورده می کنند. شکل ۴ همبستگی بین ϕ_S و ϕ_B کالیبره شده را برای β_T برابر با 2.33 و 3.0 نشان می دهد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مجموعه های متعددی از مقادیر ϕ_S و ϕ_B، شاخص های قابلیت اطمینان هدف را برآورده می کنند. رابطه بین ϕ_S و ϕ_B خطی است. سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که کدام مقادیر ϕ_S و ϕ_B باید انتخاب شوند تا سازگارترین نتیجه را برای فرایند کالیبراسیون ارائه کنند.

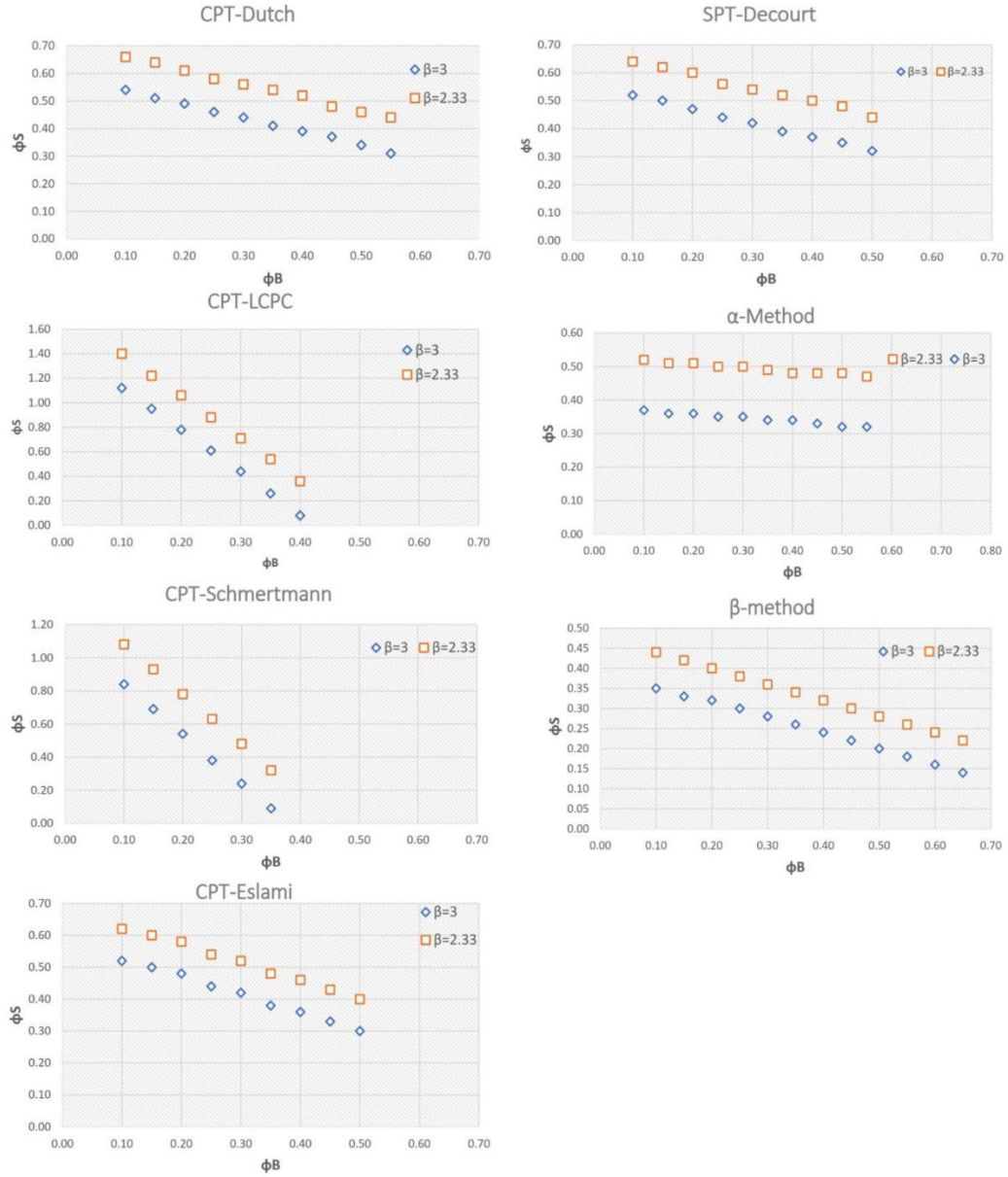
بر اساس یافته‌های همبستگی بین ϕ و $\frac{COV_R}{\lambda_R}$ همانطور که در بخش ۴ ارائه شد، این همبستگی خطی است، یعنی نسبت $\frac{COV_R}{\lambda_R}$ با کاهش ضریب مقاومت افزایش می‌یابد و بالعکس. باچ و همکاران (Bach et al., 2014) پیشنهاد کرد که مقادیری از ϕ_S و ϕ_B باید انتخاب شوند که نسبت ϕ_S به ϕ_B تقریبا برابر با نسبتی باشد که موقتا "نسبت همبستگی[۳]" (CR) نامیده می شود، به شرح زیر:

$$\frac{\phi_S}{\phi_B} \approx \mathrm{CR} = \frac{\frac{\mathrm{COV_{RB}}}{\lambda_{RB}}}{\frac{\mathrm{COV_{RS}}}{\lambda_{RS}}} = \frac{\mathrm{COV_{RB}}\lambda_{RS}}{\mathrm{COV_{RS}}\lambda_{RB}} \qquad (۱۱)$$

[۳] Correlation Ratio

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

مقدار این نسبت برای همه روش‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس این مقادیر، ضریب مقاومت برای روش‌های مختلف در β_T برابر با 2.33 و 3، در جدول ۵ محاسبه شد.



شکل ۴. همبستگی بین ضریب مقاومت جدار کالیبره شده (ϕ_S) و ضریب مقاومت نوک کالیبره شده(ϕ_B)

Fig. 4. The correlation between the calibrated shaft resistance factor(ϕ_S) and the calibrated base resistance factor(ϕ_B)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

جدول ۵- ضریب مقاومت نوک و جدار محاسبه شده برای روشهای مختلف طراحی
Table 5. Calculated shaft and base resistance factors

روش اندازه گیری شده	روش پیش بینی شده	R_B/R_S	CR	β=3		β=2.33	
				ϕ_B	ϕ_S	ϕ_B	ϕ_S
DLT-BOR	CPT-LCPC	3.42	5.40	0.17	0.90	0.20	1.06
	CPT-Schmertmann	3.00	5.08	0.14	0.72	0.17	0.86
	CPT-Eslami	0.55	0.61	0.49	0.30	0.58	0.36
	CPT-Dutch	0.59	1.95	0.24	0.47	0.29	0.56
	SPT-Decourt	0.49	0.86	0.42	0.36	0.51	0.44
	α-API	0.10	0.22	1.15	0.25	1.60	0.35
	β-Method	0.37	0.59	0.40	0.24	0.48	0.29

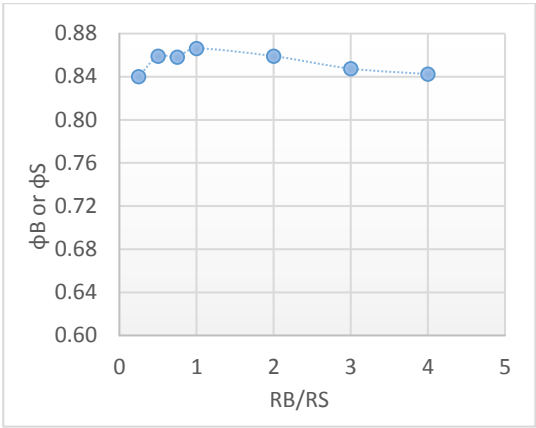
نتایج نشان می‌دهد که در روش CPT به جز روش اسلامی، ضریب مقاومت جدار نسبت به ضریب مقاومت نوک بیشتر است، درحالی‌که در روش SPT این دو ضریب تقریباً برابر هستند. از طرفی در روش‌های تحلیل استاتیکی (روش‌های α-API و روش بتا)، ضریب مقاومت نوک بزرگ‌تر از ضریب مقاومت جدار است. طبق جدول ۵ مقدار ضرایب مقاومت نوک و جدار با افزایش شاخص قابلیت اطمینان(β_T) کاهش می یابد. بنابراین، باید دقت کافی در انتخاب مقدار شاخص قابلیت اطمینان در طراحی پی های شمعی وجود داشته باشد.

آنالیز حساسیت

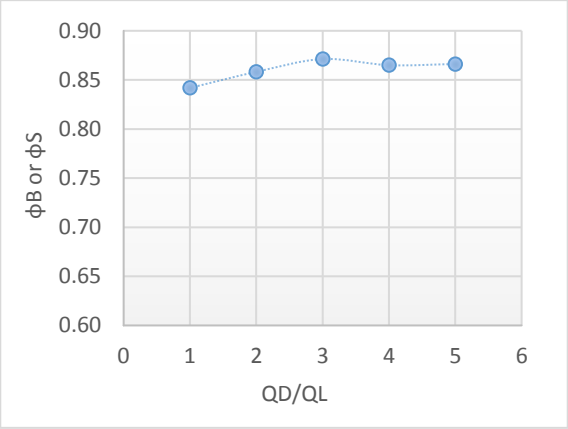
برای مطالعه تأثیر نسبت‌های$\frac{Q_D}{Q_L}$ و $\frac{R_B}{R_S}$ بر مقدار ϕ_S و ϕ_B ، لازم است آنالیز حساسیت انجام شود. مقدارλ_{RS} ، λ_{RB} برابر 1.0 و COV_{RS} و COV_{RB} برابر با 0.1 فرض کرده‌ایم . اگر نسبت $\frac{R_B}{R_S}$ را مقدار 1.0 درنظر بگیریم و نسبت$\frac{Q_D}{Q_L}$ با مقادیر 1.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0 تغییر کند، تغییر ϕ_S و ϕ_B با نسبت $\frac{Q_D}{Q_L}$مشاهده می شود. در شکل ۵(a)، هنگامی که نسبت$\frac{R_B}{R_S}$ به صورت 1.0 ثابت می شود، ضرایب مقاومت، ϕ_Sیا ϕ_B ، با نسبت $\frac{Q_D}{Q_L}$ اندکی افزایش می یابد و زمانی که این نسبت به 3.0 می رسد، به یک مقدار پایدار می رسد .

همچنین برای بررسی اثر نسبت $\frac{R_B}{R_S}$، این مقدار به صورت 3.0, 2.0, 1.0, 0.75, 0.50, 0.25 و 4.0 در نظر گرفته می شود، در حالی که نسبت $\frac{Q_D}{Q_L}$ مقدار ثبت 5.0 درنظر گرفته شده است. در شکل ۵(b)،مشاهده می شود که ϕ_S و ϕ_B با نسبت $\frac{R_B}{R_S}$ اندکی افزایش می یابد. پس از آن، هنگامی که نسبت $\frac{R_B}{R_S}$بزرگتر از 1.0 باشد، ضرایب مقاومت اندکی کاهش می یابد. بطور کلی نتایج نشان می دهد که ضرایب مقاومت جداگانه وابستگی جزئی به $\frac{Q_D}{Q_L}$ و $\frac{R_B}{R_S}$دارند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]



(b) ϕ_S or ϕ_B versus R_B/R_S



(a) ϕ_S or ϕ_B versus Q_D/Q_L

شکل ۵. آنالیز حساسیت مرتبط با ضرایب مقاومت نوک و جدار الف) φ_S یا φ_B در مقابل Q_D/Q_L ب) φ_S یا φ_B در مقابل R_B/R_S

Fig. 5. Sensitivity analyses associated with shaft and base resistance factors (a) ϕ_S or ϕ_B versus Q_D/Q_L. (b) ϕ_S or ϕ_B versus R_B/R_S

تجزیه‌وتحلیل ضرایب مقاومت دوگانه با داده‌های واقعی

برای درک بهتر نتیجه کالیبراسیون ضریب مقاومت نوک و جدار به‌صورت جداگانه و مقایسه با ضریب مقاومت تنها، چند نمونه کاربردی از نتایج آزمایش‌های درجا و آنالیز استاتیکی در یک پروژه طراحی شمع در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر مقاومت فاکتور شده برای هر دو روش ضریب مقاومت جداگانه[۴] (SRFD) و LRFD در جدول ۶ و شکل ۶ برای روش‌های طراحی مختلف آورده شده است.

نتایج محاسبات نشان می‌دهد که در روش بتا، مقاومت فاکتور شده به‌دست‌آمده از هر دو روش SRFD و LRFD تفاوت معنی‌داری (حدود ۶ درصد) ندارد، در حالی که افزایش ۳۵ درصدی در روش SRFD نسبت به روش LRFD برای α-API وجود دارد. همچنین برای روش SPT، روش SRFD مقاومت فاکتورشده را حدود ۲۶ درصد افزایش داده است. با این وجود، نتایج برای روش CPT متفاوت بود. برای روش‌های اسلامی و LCPC، مقاومت فاکتور شده SRFD در مقایسه با LRFD حدود ۱۰ تا ۱۳ درصد کاهش یافته است. در حالی که مقاومت فاکتور شده SRFD در مقایسه با LRFD حدود ۵۲ درصد برای روش اشمرتمن و حدود ۱۳۰ درصد برای روش هلندی افزایش یافت. شکل ۶ نیز نشان می دهد که به جز روش CPT اسلامی و CPT-LCPC، در بقیه روش‌ها، استفاده از ضرایب مقاومت جداگانه باعث افزایش ظرفیت باربری پی شمعی در مقایسه با حالت ضریب مقاومت تنها می شود .

[۴] Separate Resistance Factor Design

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

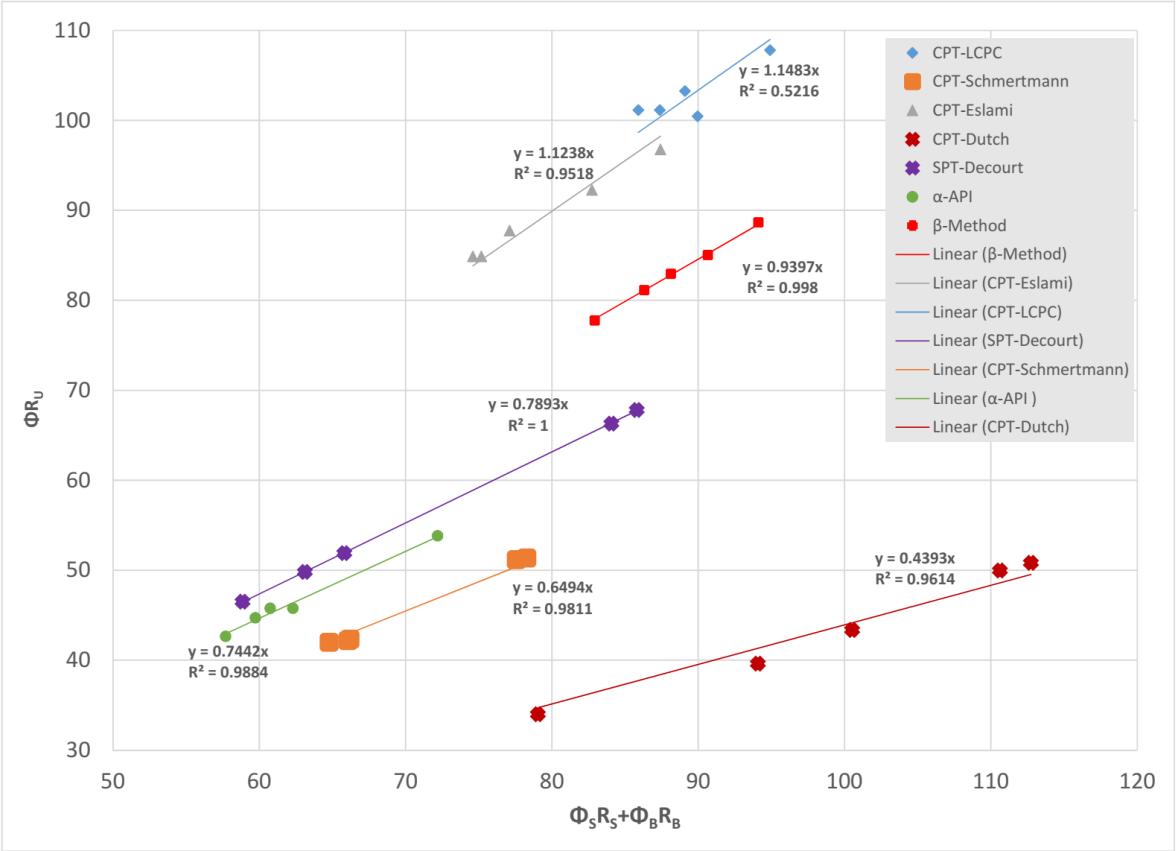
جدول ۶- مقایسه نتایج SRFD وLRFD

Table 6- Compared SRFD and LRFD Results

شماره تست	روش پیش بینی شده	SRFD		LRFD	مقاومت(تن)			مقاومت فاکتور شده (تن)		نرخ تغییرات
		ϕ_B	ϕ_S	φ	R_B	R_S	R_U	$\phi_S R_S+\phi_B R_B$	ϕR_U	
1	CPT-LCPC	0.17	0.90	0.35	248	60	308	94.91	107.80	-11.96
	CPT-Schmertmann	0.14	0.72	0.17	194	54	248	66.07	42.16	56.72
	CPT-Eslami	0.49	0.30	0.41	64	150	214	77.11	87.74	-12.12
	CPT-Dutch	0.24	0.47	0.17	84	171	255	100.53	43.35	131.90
	SPT-Decourt	0.42	0.36	0.30	74	152	226	85.80	67.80	26.55
	α-API	1.15	0.25	0.26	22	185	207	72.20	53.82	34.14
	β-Method	0.40	0.24	0.26	86	255	341	94.12	88.66	6.15
2	CPT-LCPC	0.17	0.90	0.35	229	58	287	89.96	100.45	-10.44
	CPT-Schmertmann	0.14	0.72	0.17	195	52	247	64.78	41.99	54.28
	CPT-Eslami	0.49	0.30	0.41	62	145	207	74.60	84.87	-12.10
	CPT-Dutch	0.24	0.47	0.17	65	135	200	79.05	34.00	132.49
	SPT-Decourt	0.42	0.36	0.30	75	146	221	84.06	66.30	26.78
	α-API	1.15	0.25	0.26	22	146	176	62.31	45.76	36.16
	β-Method	0.40	0.24	0.26	85	242	327	90.66	85.02	6.63
3	CPT-LCPC	0.17	0.90	0.35	235	54	289	87.37	101.15	-13.62
	CPT-Schmertmann	0.14	0.72	0.17	240	61	301	77.58	51.17	51.62
	CPT-Eslami	0.49	0.30	0.41	76	149	225	82.74	92.25	-10.31
	CPT-Dutch	0.24	0.47	0.17	120	174	294	110.62	49.98	121.32
	SPT-Decourt	0.42	0.36	0.30	56	110	166	63.12	49.80	26.74
	α-API	1.15	0.25	0.26	18	154	172	59.74	44.72	33.58
	β-Method	0.40	0.24	0.26	80	232	312	86.32	81.12	6.42
4	CPT-LCPC	0.17	0.90	0.35	237	52	289	85.91	101.15	-15.06
	CPT-Schmertmann	0.14	0.72	0.17	195	54	249	66.22	42.33	56.43
	CPT-Eslami	0.49	0.30	0.41	65	142	207	75.18	84.87	-11.42
	CPT-Dutch	0.24	0.47	0.17	67	166	233	94.08	39.61	137.52
	SPT-Decourt	0.42	0.36	0.30	51	104	155	58.86	46.50	26.58
	α-API	1.15	0.25	0.26	18	146	164	57.71	42.64	35.34
	β-Method	0.40	0.24	0.26	78	221	299	82.94	77.74	6.69
5	CPT-LCPC	0.17	0.90	0.35	240	55	295	89.10	103.25	-13.71
	CPT-Schmertmann	0.14	0.72	0.17	240	62	302	78.30	51.34	52.51
	CPT-Eslami	0.49	0.30	0.41	83	153	236	87.41	96.76	-9.66
	CPT-Dutch	0.24	0.47	0.17	121	178	299	112.73	50.83	121.79
	SPT-Decourt	0.42	0.36	0.30	59	114	173	65.82	51.90	26.82
	α-API	1.15	0.25	0.26	18	158	176	60.75	45.76	32.76
	β-Method	0.40	0.24	0.26	81	238	319	88.13	82.94	6.26

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]



شکل ۶. مقایسه نتایج SRFD و LRFD برای روش‌های طراحی مختلف

Fig. 6. Compared SRFD and LRFD results for different design methods

نتیجه‌گیری

بر اساس تجزیه و تحلیل‌ها و نتایج این مقاله موراد زیر قابل ذکر است.

۱- در این تحقیق برای پی‌های شمعی ضرایب مقاومت نوک و جدار بر اساس آنالیز قابلیت اعتماد به‌صورت جداگانه محاسبه شد. این ضرایب برای روش‌های مختلف طراحی پی‌های شمعی محاسبه شدند. برای این هدف، از همبستگی بین ϕ و $\frac{COV_R}{\lambda_R}$ برای یافتن ضرایب مقاومت نوک و جدار استفاده شد.

۲- به جز روش‌های CPT-LCPC وCPT اشمرتمن ، تمام روش‌ها مقدار مقاومت جدار پی شمعی را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده در DLT-BOR پیش‌بینی کردند. از سوی دیگر، تمام روش‌ها، به جز روشα-API ، مقاومت نوک پی شمعی را بیش‌اندازه تخمین زدند.

۳- برای روش‌های پیش بینی مقاومت CPT، (به جز روش اسلامی) ضریب مقاومت جدار در همه موارد بیشتر از ضریب مقاومت نوک است.

۴- برای روش پیش بینی مقاومت SPT، بر اساس نتایج بدست آمده، ضرایب مقاومت نوک و جدار تقریباً برابر هستند.

۵- در روش‌های آنالیز استاتیکی(روش α-API و روش‌های بتا)، ضریب مقاومت نوک بیشتر از ضریب مقاومت جدار است.

۶- بر اساس تحلیل حساسیت، ضرایب جداگانه مقاومت وابستگی کمی به$\frac{Q_D}{Q_L}$ و $\frac{R_B}{R_S}$ دارند.

۷- ضرایب جداگانه مقاومت می‌توانند مقاومت فاکتورشده را بسته به روش طراحی افزایش یا کاهش دهند. روش SRFD می‌تواند مقاومت فاکتورشده را برای روش‌های α-API و بتا، روش SPT-Decourt و روش‌های CPT-Schmertmann و هلندی افزایش دهد در حالی که بقیه روش‌ها نظیر CPT-Eslami و LCPC مقاومت فاکتورشده را کاهش می‌دهند.

قدردانی

لازم می‌دانم از همه شرکت‌ها و مؤسساتی که در جمع‌آوری بانک اطلاعاتی این مطالعه مشارکت داشتند، تشکر کنم. به‌ویژه باید از شرکت ژئو محیط پارس برای همکاری صمیمانه و کمک‌های دلسوزانه در تهیه نتایج آزمون‌های بارگذاری شمع در چندین پروژه بزرگ و مهم کشور تشکر ویژه‌ای داشته باشم.

References

AASHTO. (2007). LRFD Bridge Design Specifications. Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Allen, T. (2005). FHWA-NHI-05-052, Development of Geotechnical Resistance Factors and Downdrag Load Factors for LRFD Foundation Strength Limit State Design.

Allen, TM, Nowak, A., and Bathurst, R. (2005). Calibration to Determine Load and Resistance Factors for Geotechnical and Structural Design. Transportation Research Board.

API, R. P. (2000). 2A-WSD. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, 21.

Asghari Pari, S. A., Habibagahi, G., Ghahramani, A., and Fakharian, K. (2019). Reliability-Based Calibration of Resistance Factors in LRFD Method for Driven Pile Foundations on Inshore Regions of Iran. International Journal of Civil Engineering, 17(12), 1859–1870. https://doi.org/10.1007/s40999-019-00443-0

Asghari Pari, S. A., Habibagahi, G., Ghahramani, A., and Fakharian, K. (2020). Improve the design process of pile foundations using construction control techniques. International Journal of Geotechnical Engineering, 14(6), 636–643. https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1655622

Bach, D., Gelder, P. H. A. J. M. Van, and Hudson, M. B. (2014). Calibrating shaft and base resistance factors for design of drilled shaft foundations. In Safety, Reliability and Risk Analysis (pp. 2497–2505). London: Taylor and Francis Group.

Barker, R. M., and Duncan, J. M. (1992). Manuals for the design of bridge foundations. Washington, DC.

Basu, D., and Salgado, R. (2012). Load and resistance factor design of drilled shafts in sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(12), 1455–1469. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000714

Bian, Xiao-ya, Jun-jie, Z., Rong-Jun, Z., and Zhi-jun, X. (2018). Reliability analysis for Serviceability Limit State of pile groups foundation. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(1), 54–61. http://dx.doi.org/10.1007/s12205-017-0246-1

Bian, Xiaoya, Chen, J., Chen, X., and Xu, Z. (2021). Reliability-Based Design of Driven Piles Considering Setup Effects. Applied Sciences, 11(18), 8609. https://doi.org/10.3390/app11188609

Burland, J. (1973). Shaft friction of piles in clay--a simple fundamental approach. Publication of: Ground Engineering/UK/, 6(3).

Bustamante, M., and Gianeselli, L. (1982). Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT. In Proceedings of the 2-nd European Symposium on Penetration Testing (pp. 493–500).

De Kuiter, J., and Beringen, F. L. (1979). Pile foundations for large North Sea structures. Marine Georesources and Geotechnology, 3(3), 267–314. https://doi.org/10.1080/10641197909379805

Decourt, L. (1995). Prediction of load settlement relationships for foundations on the basis of the SPT-T. Ciclo de Conferencias Inter.“Leonardo Zeevaert”, UNAM, Mexico, 85–104.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.8.4]

[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1018841]

Ellingwood, B. R. (1999). Probability-based structural design: prospects for acceptable risk bases. Proc. of Application of Statistics and Probability, Icasp, 8, 11–18.

Eslami, A., and Fellenius, B. H. (1996). Pile shaft capacity determined by piezocone (CPTu) data. In Proceedings of 49th Canadian Geotechnical Conference, September (pp. 21–25).

HONJO, Y., Suzuki, M., SHIRATO, M., and FUKUI, J. (2002). Determination of partial factors for a vertically loaded pile based on reliability analysis. Soils and Foundations, 42(5), 91–109. http://dx.doi.org/10.3208/sandf.42.5_91

Kim, D., Chung, M., and Kwak, K. (2011). Resistance factor calculations for LRFD of axially loaded driven piles in sands. KSCE Journal of Civil Engineering, 15(7), 1185. DOI:10.1007/s12205-011-1254-1

National Building Regulations of Iran (2013) Part 7(Foundation), 3rd edn.

Nottingham, L., and Schmertmann, J. (1975). An investigation of pile capacity design procedures. Final Report D629 to Florida Department of Transportation, Department of Civil Engineering, University of Florida.

Nowak, A. (1999). Calibration of LRFD bridge design code, NCHRP Report. American Association of State Highway and Transportation Officials; Load and Resistance Factor Design.

Paikowsky, S. G., Birgisson, B., McVay, M., Nguyen, T., Kuo, C., Baecher, G. B., A., and B. M., Stenersen, K., O'Malley, K., Chernauskas, L., and O'Neill, M. (2004). NCHRP REPORT 507, Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations. WASHINGTON, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Park, J. H., Huh, J., Kim, K. J., Chung, M., Lee, J. H., Kim, D., and Kwak, K. (2013). Resistance factors calibration and its application using static load test data for driven steel pipe piles. KSCE Journal of Civil Engineering, 17(5), 929-938.

Phoon. KK, Kulhawy. FH, G. M. (2003). Multiple resistance factor design for shallow transmission line structure foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(9), 807–818. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:9(807)

Phoon, K. K., Becker, D. E., Kulhawy, F. H., Honjo, Y., Ovesen, N. K., and Lo, S. R. (2003). Why Consider Reliability Analysis for Geotechnical Limit State Design? Limit State Design in Geotechnical Engineering Practice - Proceedings of the International Workshop LSD2003, 19–20. https://doi.org/10.1142/9789812704252_0010

Scott, B., Kim, B. J., and Salgado, R. (2003). Assessment of current load factors for use in geotechnical load and resistance factor design. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(4), 287–295. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(287)

Transportation Research Board (TRB) (2005), "Calibration to Determine Load and Resistance Factors for Geotechnical and Structural Design," Transportation Research Circular E-C079

Zheng, J. J., Xu, Z. J., Liu, Y., and Bian, X. Y. (2012). Bayesian optimization for resistance factor of piles. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 34(5), 1716–1721.