

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Investigation of the Effect of Pile Characteristics on Its Response in Sandy Soils

Sajad Tavakoli^{a,*}, Hosein Nesari^b, Mohamad Hosein Aminfar^c

^a Faculty of Civil Engineering, Ilam Azad University, Ilam, 6931133145, Iran

^b Department of Civil Engineering, Eyvan Gharb Azad University, Ilam, Iran

^c Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, 5166616471, Iran

Received: 15 February 2023; **Reviewed:** 27 October 2023; **Accepted:** 21 January 2024

Keywords:

Vertical and lateral loading, Single pile, Sandy soil, Numerical analysis, Sensitivity analysis, Plaxis 3D.

1. Introduction

When the bearing capacity of the near-surface soil is inadequate to support the loads transmitted from the superstructure, piles are employed to transfer these loads to the natural ground or to deeper bearing strata. These structural elements can effectively prevent excessive settlements and lateral displacements in the structure. Piles can contribute to resisting and transferring various types of loads, including lateral, axial, and bending moments. When a pile is subjected to lateral loading, the surrounding soil acts as a supporting medium and carries part of the applied load. Most of the research conducted in this area has been based on full-scale laboratory studies equipped with precise instrumentation such as stress and strain gauges, where parameters such as load-carrying capacity, rotation, lateral and vertical displacements, as well as internal forces, have consistently been monitored.

In general, soil-pile interaction is one of the key issues in the design of soil-pile systems. This interaction inherently exhibits a three-dimensional nature, and due to the complex behavior of soils, the soil medium is usually considered as a heterogeneous and anisotropic material. Various approaches exist for predicting the response of the soil-pile system, all of which require appropriate soil parameters for reliable assessment. One of these methods is the subgrade reaction method, in which the pile is modeled as an elastic beam subjected to lateral loading. In this approach, the soil is idealized by a series of independent springs with varying stiffness, each representing the soil reaction per unit length of the pile.

In this study, the behavior of the combined pile-soil system under various geometric and loading conditions was investigated numerically using the finite element program PLAXIS. To achieve this objective, a sensitivity analysis was performed to evaluate the effects of changes in different parameters such as the elastic modulus, pile diameter, the amount of surrounding soil, and the applied loads on pile displacement, internal forces, and bearing capacity. Furthermore, numerical modeling was employed to examine the deformation pattern of the soil around the pile and the extent of its influence under axial and lateral loading conditions.

2. Methodology

2.1. FE modeling

In this study, a three-dimensional geometric model was developed using the finite element software PLAXIS 3D to simulate the behavior of the combined soil-pile system.

For the numerical modeling, circular piles with diameters of 80, 100, and 120cm and a length of 10m were considered in sandy soils with a thickness of 1.7 times the pile length. In the case of piles subjected to lateral loading, a 15-m-long pile was modeled within a soil domain extending to a depth of 1.7 times the pile length. To minimize the influence of boundary conditions, the model was constructed with overall dimensions of 30×30m (23D), and its height extended to 0.7L below the pile toe elevation. In the simulation, a cast-in-place pile with a free head was modeled.

In these simulations, the Mohr-Coulomb constitutive model was adopted. The parameters of this model include the internal friction angle (ϕ), cohesion (C), elastic modulus (E), Poisson's ratio (ν), and dilation angle (ψ). The soils were classified based on their relative density (Dr), wherein a higher relative density corresponds to a greater internal friction angle.

3. Results and discussion

To evaluate the behavior of the pile and the surrounding soil, sensitivity analysis diagrams were generated to investigate the effects of variations in different parameters on the deformation of the soil around the pile and on the extent of its influence zone under axial and lateral loading conditions.

Under lateral loading, the horizontal displacement along the pile, as well as the variations of internal forces including shear force and bending moment along the pile were examined. In axial loading, the internal forces induced in the pile due to changes in various parameters, such as the magnitude of the applied load, pile diameter, and soil type, were also analyzed.

4. Conclusions

For a pile with a circular cross-section, considering the axisymmetric condition under vertical loading applied at the pile center, the displacement and stress states are uniform in all directions around the pile's central axis. Consequently, the stress bulb, or the transmitted stress zone, generated in the surrounding soil is symmetric with respect to the pile's central axis.

With an increase in the applied vertical load, the displacement of the pile rises, and this displacement is transmitted to the soil beneath and around the pile. As the applied load continues to increase, the pile displacement further grows, causing an increase in the deformation of the surrounding and underlying soil. Consequently, the stress bulb not only expands laterally but also extends vertically downward beneath the pile.

The horizontal displacement along the pile length is greatest for piles embedded in loose sand, followed by medium-dense sand, and smallest in dense sand. This behavior is attributed to the higher stiffness of dense sand and its lower deformability compared to loose sand. Accordingly, it is evident that the horizontal displacement of the pile decreases with an increase in the internal friction angle of the soil, which corresponds to higher soil density. Moreover, the maximum bending moment developed in the pile decreases in the same order loose, medium-dense, and dense sand. With an increase in the applied lateral load, the magnitude of the bending moment induced along the pile length also increases.

With an increase in the magnitude of the applied lateral load, the location of the maximum bending moment along the pile tends to shift downward. This phenomenon occurs because, as the lateral load increases, the effective fixity length of the pile decreases, or equivalently, the depth of pile fixity moves downward, causing the curvature zone of the pile to extend deeper. Consequently, the point at which the maximum bending moment and thus the potential location of bending failure develops appears at lower depths along the pile.

Based on the combined results of total and horizontal displacements at various pile sections under lateral loading, it can be inferred that a portion of the soil in front of laterally loaded piles resists the pile movement. In three-dimensional conditions, this resistance zone can be idealized as a conical region in front of the pile.

As the lateral load increases, the displacement at the pile head also increases. This head displacement is transmitted to the soil located in front of the pile, meaning that the induced movement transfers lateral forces to the soil mass ahead of the pile, forming a conical-shaped deformation zone. The generated cone not only expands laterally at the pile head but also extends vertically downward with depth, following the pile's embedded length.

مطالعه عددی تأثیر خصوصیات شمع بر رفتار آن در خاک‌های ماسه‌ای

سجاد توکلی^{1*}، حسین نساری²، محمدحسین امین‌فر³

¹ استادیار دانشکده فنی، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی

² استادیار گروه عمران، واحد ایوان غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، ایوان غرب

³ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1401/11/26، بازنگری: 1402/8/5، پذیرش: 1402/11/1، نشر آنلاین: 1402/11/1

چکیده

خصوصیات رفتاری خاک اطراف شمع، یکی از پارامترهای مهم در تحلیل اندرکنش خاک-شمع می‌باشد. در این تحقیق، رفتار شمع و خاک اطراف آن برای بررسی اندرکنش خاک-شمع در خاک ماسه‌ای و تحت اثر بارهای محوری و جانبی بررسی شده است. در این تحلیل که با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Plaxis 3D انجام شده است، یک سیستم ترکیبی از خاک و شمع ایجاد شده است. در ادامه برای ارزیابی رفتار شمع و خاک اطراف آن، آنالیز حساسیت که شامل تغییر نوع خاک، تغییر قطر شمع، تغییر مقدار بارگذاری وارد بر شمع انجام شده و اثر تغییر هر کدام از این پارامترها بر نیروهای داخلی (لنگر خمشی، نیروی محوری)، تحت اثر بار قائم و جانبی بر روی شمع بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش شعاع شمع باعث کاهش لنگر خمشی و تغییر مکان جانبی در شمع شده و در نتیجه می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع شود. علاوه بر آن، هرچه خاک اطراف شمع متراکم‌تر باشد، لنگر خمشی حاصل از نیروهای جانبی و تغییر مکان جانبی (تحت اثر نیروهای جانبی) ایجاد شده در شمع نیز کمتر است. همچنین افزایش قطر شمع باعث می‌شود که لنگر خمشی حداکثر در فاصله بیشتری نسبت به بالای شمع ایجاد شود.

کلیدواژه‌ها: بارگذاری قائم و جانبی، شمع منفرد، خاک ماسه‌ای، تحلیل عددی، تحلیل حساسیت، Plaxis 3D.

1- مقدمه

به‌طور کلی اندرکنش خاک-شمع یکی از موضوعات مهم در طراحی سیستم خاک-شمع بوده که دارای ماهیت سه‌بعدی بوده که با توجه به ماهیت پیچیده خاک، آن‌را به‌عنوان یک محیط ناهمسان در نظر می‌گیرند (Abdel-Mohti و Khodair, 2014). روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی پاسخ این سیستم (خاک-شمع) وجود دارد که در این روش‌ها بایستی از مقادیر مناسبی برای تعیین پارامترهای خاک استفاده کرد. یکی از این روش‌ها، روش عکس‌العمل بستر است. در این روش، شمع به‌عنوان یک تیر ارتجاعی تحت بارگذاری جانبی بررسی می‌گردد. در این روش، به‌جای خاک از فنرهایی با سختی مختلف که عملکرد آن‌ها نیز مستقل از همدیگر است، تعریف می‌گردد. سختی هر فنر نیز به‌صورت نسبت عکس‌العمل خاک به واحد طول شمع تعریف می‌شود (Abdel-Mohti و Pekcan, 2013; Khodair و Hassiotis, 2013).

در صورتی که ظرفیت باربری خاک نزدیک سطح زمین برای تحمل بارهای ناشی از روسازه مناسب نباشد و همچنین برای انتقال بار از روسازه به خاک طبیعی و لایه باربر، از شمع استفاده می‌شود. این اعضا می‌توانند از جابه‌جایی‌های جانبی و نشست‌های اضافی در سازه جلوگیری کنند. شمع‌ها می‌توانند در تحمل و انتقال انواع بارها از جمله بارهای جانبی، محوری و لنگر خمشی نقش داشته باشند. در صورتی که یک شمع تحت بار جانبی قرار می‌گیرد خاک اطراف آن به‌عنوان تکیه‌گاه عمل کرده و بخشی از بار را تحمل می‌کند. بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه به‌صورت مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس واقعی و با نصب ابزار دقیق مانند تنش‌سنج و کرنش‌سنج‌هایی همراه بوده و پارامترهایی مانند ظرفیت باربری، دوران، تغییر مکان جانبی و قائم و همچنین نیروهای داخلی همواره کنترل شده‌اند.



و ظرفیت باربری بررسی شده‌اند. همچنین با استفاده از مدل - سازی عددی، الگوی تغییر شکل خاک اطراف شمع و محدوده تأثیر آن در اثر بارهای محوری و جانبی بررسی شده است.

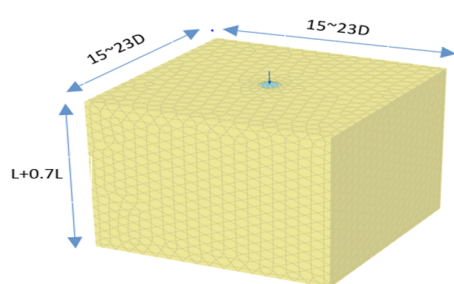
2- مدل سازی عددی و تحلیل اجزاء محدود

2-1- مشخصات هندسه مدل و پارامترهای خاک و شمع

در این تحقیق یک مدل هندسی سه بعدی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Plaxis 3D برای مدل سازی رفتار سیستم ترکیبی خاک- شمع ایجاد شده است.

برای مدل سازی از شمع دایره‌ای به قطرهای 80، 100 و 120 سانتی متر و طول 10 متر در خاک‌های ماسه‌ای به ضخامت 1/7 برابر طول شمع و در شمع تحت اثر نیروهای جانبی از مدل شمع با طول 15 متر در مدل به عمق 1/7 برابر طول شمع، استفاده شده است (شکل 1). مشخصات خاک و شمع در جداول (1) و (2) ارائه شده است. برای جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی، مدل سازی انجام شده دارای ابعاد 30 در 30 متر بوده (23D) و ارتفاع آن نیز تا 0/7L پایین تر از تراز نوک شمع ادامه یافته است. در مدل سازی از شمع درجاریز و سرشمع آزاد استفاده شده است.

برای مدل سازی لایه‌های خاک از سه نوع خاک ماسه‌ای که مشخصات آن‌ها در جدول (1) ارائه شده است، استفاده شده است. در این مدل سازی‌ها از مدل رفتاری موهرکلمب استفاده شده است. پارامترهای این مدل رفتاری شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، چسبندگی (c)، مدول ارتجاعی (E)، ضریب پواسن (ν) و زاویه اتساع (ψ) می‌باشد. برای دسته‌بندی این خاک‌ها از پارامتر تراکم نسبی (DR) استفاده شده است.



شکل 1- مدل المان محدود سه بعدی شمع بارگذاری شده خاک

ازجمله مشکلات روش مدول عکس‌العمل بستر، عدم در نظر گرفتن پیوستگی خاک است. علاوه بر آن، در این روش مدول عکس‌العمل بستر برای المان‌های خاک در امتداد عمق شمع به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود که این حالت مغایر رفتار غیرخطی خاک است.

یکی دیگر از روش‌هایی که برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک- شمع به کار می‌رود، روش $p-y$ است. تفاوت این روش با روش عکس‌العمل بستر در این است که در روش $p-y$ از یک رابطه غیر خطی بین عکس‌العمل خاک و تغییر مکان جانبی در هر نقطه در امتداد طول شمع استفاده شده و برای هر نقطه مشخص در امتداد طول شمع می‌توان یک رابطه $p-y$ تعریف نمود. با استفاده از این روش می‌توان پارامترهایی مانند لنگر خمشی، برش و عکس‌العمل خاک، دوران و خیز شمع را محاسبه کرد.

Georg Real و Butter (1982) روش‌های مختلفی برای ترسیم منحنی‌های $p-y$ را ارائه کردند. محققان دیگری مانند Ruesta و Townsent منحنی‌های $p-y$ را با انجام آزمایش‌های برجا مانند فشار سنجی، اتساع سنجی و نفوذ مخروط به دست آوردند.

Robertson و همکاران (1988) نیز با انجام آزمایش فشار سنجی، منحنی $p-y$ را برای شمع‌های کوبشی ترسیم کردند. یکی دیگر از روش‌های ترسیم منحنی $p-y$ استفاده از معادلات تفاضل محدود و مدل سازی اجزاء محدود است که توسط محققانی مانند Dan, Shei و Broun (1991) انجام شده‌اند. معادلات تفاضل محدود برای دستیابی به سازگاری بین جابه‌جایی شمع و انتقال بار در طول یک شمع و بین جابه‌جایی و مقاومت در نوک شمع به کار می‌روند.

در این تحقیق، رفتار سیستم ترکیبی شمع و خاک اطراف آن در شرایط مختلف هندسی و بارگذاری به روش عددی و با استفاده از برنامه اجزاء محدود Plaxis بررسی شده است. برای رسیدن به هدف، از آنالیز حساسیت استفاده شده و اثر تغییر در پارامترهای مختلف مانند مدول ارتجاعی، قطر شمع، مقدار خاک اطراف آن و نیروهای وارده بر روی تغییر مکان، نیروهای داخلی

جدول 1- مشخصات مکانیکی خاک‌های استفاده شده در مدل سازی

نوع خاک	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E_{ref} (kN/m ²)	ν	C_{ref} (kN/m ²)	Φ (deg)	ψ (deg)
ماسه سست	18	20	10000	0/3	5	30	0
ماسه با تراکم متوسط	19	20	20000	0/3	5	33	3
ماسه متراکم	20	20	40000	0/3	5	36	6

که در آن: γ وزن مخصوص نرمال خاک، γ_{sat} وزن مخصوص اشباع خاک، E_{ref} سختی تماسی در آزمایش سه محوری استاندارد در تنش محصورکننده مرجع $\sigma_3 = p^{ref}$

جدول 2- مشخصات مکانیکی شمع‌های مدل‌سازی شده

شماره شمع	L (m)	D (cm)	γ_c (kN/m ³)	E_c (kN/m ²)	ν
1	10	80	24	20000000	0/15
2	10	100	24	20000000	0/15
3	10	120	24	20000000	0/15

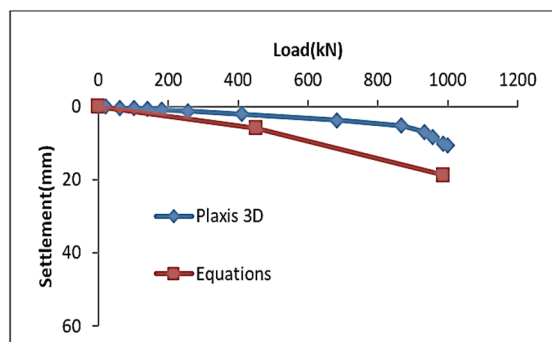
که در آن: L طول شمع، D قطر شمع، γ_c وزن مخصوص بتن، E_c مدول ارتجاعی بتن و ν ضریب پواسن

3-2- صحت‌سنجی مدل

برای اطمینان از صحت روند مدل‌سازی، شمع به قطر 1/085 متر واقع در خاک ماسه سست تحت اثر بار محوری در نظر گرفته شده است. نمودار بار-نشست به‌دست آمده از تحلیل شمع تحت اثر بارگذاری محوری با استفاده از برنامه Plaxis و معادلات ریاضی در شکل (2) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Plaxis نسبت به نتایج به‌دست آمده از معادلات ریاضی مقداری کمتر می‌باشند ولی اختلاف نتایج قابل قبول است.

در حالت شمع تحت بار افقی، سه نوع مقطع شمع دایره‌ای به قطرهای 80، 90 و 100 سانتی‌متر با درصد فولاد 2 درصد و طول 15 متر و 3 نوع خاک ماسه‌ای برای تحلیل در نظر گرفته شد. مشخصات خاک‌های ماسه‌ای در جدول (1) ارائه شده و مشخصات شمع‌ها نیز در جدول (4) ذکر شده است.

شمع به‌صورت مصالح الاستیک خطی و غیرمتخلخل در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، شمع به‌صورت درجاریز و با سرشمع آزاد بررسی شده‌اند، با توجه به این‌که جابه‌جایی در محدوده اطراف شمع و همچنین در نزدیکی سطح زمین زیاد است مش‌بندی المان به‌گونه‌ای انتخاب شده است که در اطراف شمع المان‌ها ریزتر می‌باشند تا دقت محاسبات در قسمت اطراف شمع افزایش یابد. جهت صحت‌سنجی مدل تحت اثر بار جانبی و حصول اطمینان از روند مدل‌سازی انجام شده از مدل مقایسه‌ای که شامل داده‌های میدانی می‌باشد استفاده شده است.



شکل 2- نمودار بار-نشست سر شمع برای انجام صحت‌سنجی نتایج

به این صورت که هرچه تراکم نسبی خاک بیشتر باشد، زاویه اصطکاک داخلی آن خاک نیز بیشتر است. در مدل‌سازی شمع‌ها از مدل مربوط به مصالح الاستیک خطی با رفتار غیرمتخلخل استفاده شده است و همان‌طور که قبلاً گفته شد، در مدل‌سازی‌ها شمع به‌صورت درجاریز و با سرشمع آزاد در نظر گرفته شده است. در جدول (2) مشخصات شمع‌های مدل‌سازی شده ارائه شده است.

2-2- استفاده از مقطع معادل برای مدل‌سازی فولاد در شمع‌ها

از آنجایی که کرنش فولاد و بتن در مقاطع بتن مسلح شمع برابر می‌باشند ($\epsilon_s = \epsilon_c$) بنابراین طبق قانون هوک داریم:

$$\epsilon_s = \epsilon_c \rightarrow \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_c}{E_c} \rightarrow \sigma_s = \frac{E_s}{E_c} \sigma_c \quad (1)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (2)$$

که در آن ϵ_s کرنش ایجاد شده در فولاد، ϵ_c کرنش ایجاد شده در بتن، σ_s تنش ایجاد شده در فولاد، σ_c تنش ایجاد شده در بتن، E_c مدول ارتجاعی خاک و E_s مدول ارتجاعی بتن می‌باشد. بنابراین در کرنش‌های مساوی تنش ایجاد شده در فولاد n برابر تنش ایجاد شده در بتن خواهد بود. با توجه به تغییرات مدول ارتجاعی بتن، مقدار n بین 6 تا 10 می‌باشد (باتوجه به مدول الاستیسیته فولاد و مدول الاستیسیته ذکر شده برای بتن $n=10$ می‌باشد). تا زمانی که حداکثر تنش کششی در یک مقطع تحت خمش از مقاومت کششی بتن تجاوز نکند، مقطع در حالت الاستیک به‌سر می‌برد. در این حالت، مقطع به‌صورت ترک‌نخورده باقی‌مانده و توزیع تنش در آن خطی است، از این‌رو می‌توان برای تعیین تنش‌ها از روش‌های کلاسیک مقاومت مصالح استفاده نمود و با توجه به این‌که مقطع شمع بتن مسلح می‌باشد، ابتدا باید مقطع معادل شود. برای معادل‌سازی باید یا فولاد به بتن و یا بتن به فولاد تبدیل گردد. که در اینجا فولاد به بتن تبدیل شده است. با انجام معادل‌سازی، هندسه مدل به‌صورت شمع با قطر 1/085 متر در نظر گرفته شده است (جدول (3)). این مقدار فقط بر روی قطر شمع (جدول (3) قطر معادل شمع‌ها) مؤثر بوده و تأثیری بر روی طول شمع نخواهد داشت.

جدول 3- جزئیات و قطرهای معادل شمع‌ها در مدل‌سازی انجام شده (واحد قطرها سانتی‌متر و سطح مقطع سانتی‌متر مربع)

قطر شمع	مساحت شمع	سطح مقطع فولاد متناظر	سطح معادل	n	قطر معادل
0/8	0/5024	0/010048	0/592832	10	0/86
1	0/785	0/0157	0/9263	10	1/085
1/2	1/1304	0/022608	0/333872	10	1/3

جدول 4- مشخصات مکانیکی شمع مورد استفاده در صحت‌سنجی

شماره شمع	L (m)	D (cm)	γ_c (kN/m ³)	E_c (kN/m ²)	ν
1	15	80	24	21000000	0/15
2	15	90	24	21000000	0/15
3	15	100	24	21000000	0/15

جدول 5- مشخصات مکانیکی خاک‌های استفاده شده در مدل‌سازی

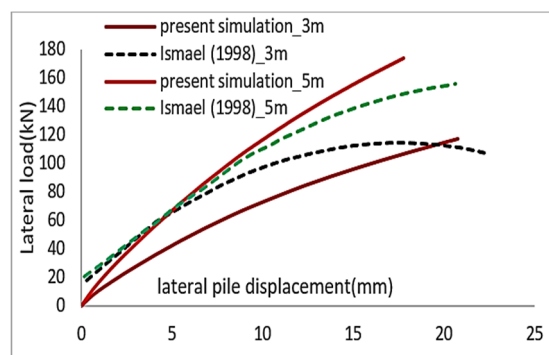
نوع خاک	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E_{ref} (kN/m ²)	ν	C_{ref} (kN/m ²)	Φ (deg)
ماسه سیلتی متراکم متوسط و سیمانی شده	18	18	$1/3 \times 10^4$	0/3	20	35
ماسه سیلتی با تراکم متوسط تا بسیار زیاد دارای ذرات سیمانی شده	19	19	$1/3 \times 10^4$	0/3	1	45
شمع	25	-	2×10^9	0/15	-	-

تغییر شکل خاک اطراف شمع و محدوده تأثیر خاک اطراف شمع تحت بارهای محوری و جانبی تهیه شده‌اند. در بارگذاری جانبی، جابجایی افقی در طول شمع و تغییرات نیروهای داخلی شامل نیروی برشی و لنگر خمشی در طول شمع نیز بررسی شده‌اند. همچنین در بارگذاری محوری، نیروی‌های داخلی ایجاد شده در شمع ناشی از تغییر پارامترهای مختلف (میزان بار وارده، قطر شمع و نوع خاک) نیز بررسی شده‌اند.

3-1- شمع تحت بار محوری

در شکل (4-الف) تا (4-ج)، مقادیر نیروی محوری در طول شمع برحسب عمق و مقدار بار وارده، به‌ترتیب واقع در خاک ماسه‌ای سست تحت بارهای قائم 200، 300، 400 و 500 کیلونیوتن و در ماسه با تراکم متوسط تحت بارهای قائم 200، 300، 400، 500 و 600 کیلونیوتن و در ماسه متراکم تحت بارهای قائم 200، 300، 500 و 700 و 1000 کیلونیوتن ارائه شده‌اند. از این شکل‌ها مشاهده می‌شود که مقدار نیروی محوری سرشمع برابر با نیروی قائم اعمال شده می‌باشد. همچنین از مقایسه این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش بار محوری، شیب منحنی توزیع بار محوری در امتداد طول شمع افزایش می‌یابد. شکل (4-د) و (4-ه) مقادیر نیروی محوری در طول شمع برحسب عمق در ماسه سست، با زوایای اصطکاک و چسبندگی مختلف تحت بار قائم 500 کیلونیوتن را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در تمام خاک‌ها در سطح زمین، نیروی محوری برابر با نیروی قائم وارده 500 کیلونیوتن می‌باشد.

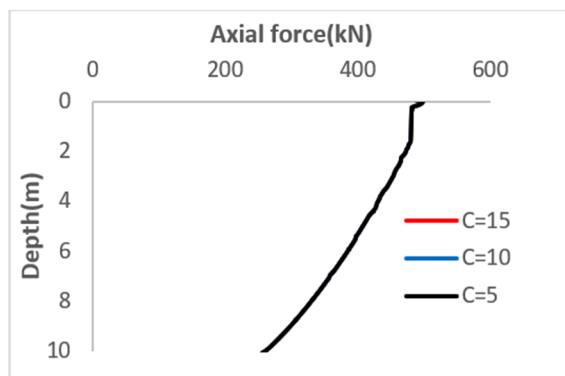
مطالعه موردی انجام شده به پاسخ شمع تحت اثر بار جانبی در ماسه پرداخته است. تمام شمع‌ها به قطر 0/3 متر و طول 3 و 5 متر بوده و در سائیتی در کشور کویت بررسی انجام گرفته است. پروفیل خاک شامل ماسه سیلتی با تراکم متوسط تا زیاد است. مشخصات خاک در جدول (5) ذکر شده است. مقایسه مدل‌سازی انجام شده و داده‌های میدانی در شکل (3) تحت اثر بار جانبی نشان از دقت بالای مدل‌سازی در محدوده وسیعی از تغییر شکل‌ها برای شمع 3 و 5 متری دارد ولی در شمع 5 متری مقاومت جانبی بیشتری را نشان می‌دهد که می‌تواند به‌دلیل گیرداری و طول بیشتر شمع باشد.



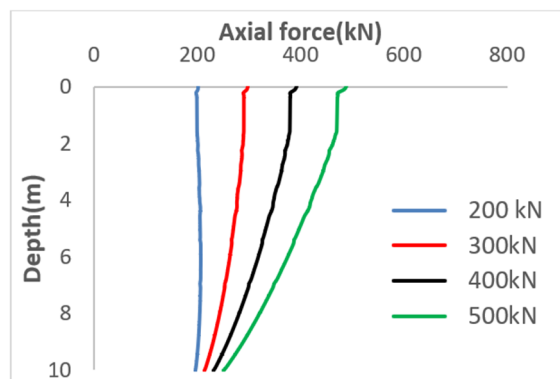
شکل 3- نمودار بار - تغییر مکان افقی شمع و صحت‌سنجی نتایج

3- بحث و نتایج

برای ارزیابی رفتار شمع و خاک اطراف آن، نمودارهای حاصل از آنالیز حساسیت برای بررسی تأثیر تغییر پارامترهای مختلف و



(ه)



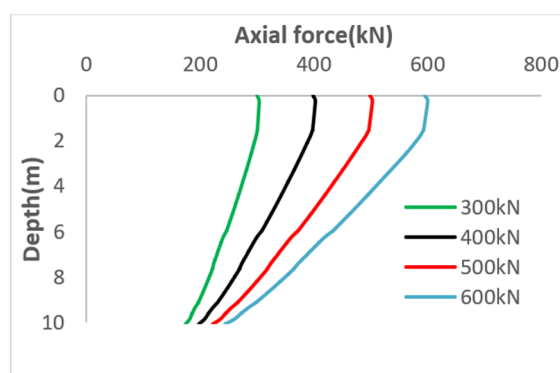
(الف)

شکل 4- منحنی نیروی محوری در امتداد طول شمع:
 (الف) ماسه سست، (ب) ماسه با تراکم متوسط، (ج) ماسه متراکم،
 (د) نیروی محوری به‌ازاء بار قائم 500 کیلو نیوتن، (ه) نیروی
 محوری به‌ازاء چسبندگی مختلف

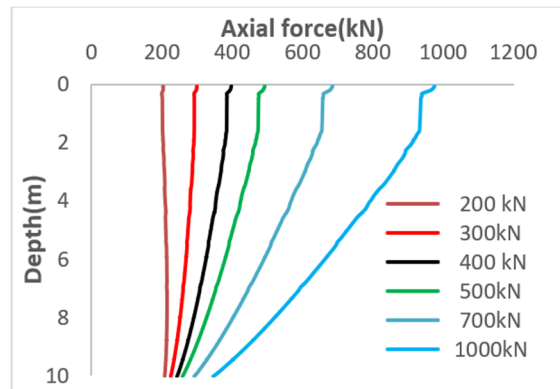
از آنجاکه در این شکل نیروهای محوری خیلی به هم نزدیک هستند، می‌توان مشاهده کرد که نیروی محوری توزیع شده در طول شمع در هر سه حالت برابر است و تابع مشخصات خاک نمی‌باشد.

3-2- شمع تحت بار افقی

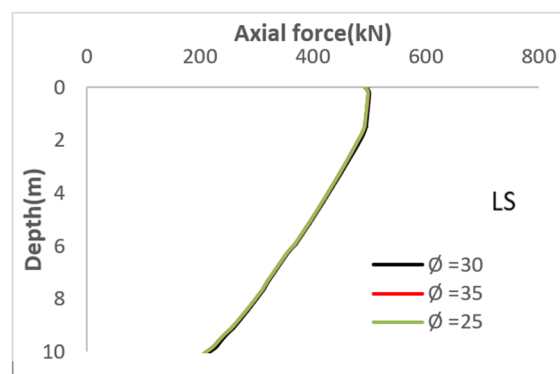
برای این هدف، شمع تحت بارهای افقی استاتیکی 50، 100، 150، 200 و 250 کیلو نیوتن قرار گرفته است. شکل (5-الف) تا (5-ج) مقادیر لنگر خمشی در طول شمع برحسب عمق و مقدار بار وارده، به ترتیب واقع در خاک ماسه سست، خاک ماسه با تراکم متوسط و ماسه متراکم را نشان می‌دهد. از مقایسه این نمودارها مشاهده می‌شود که مقدار حداکثر لنگر خمشی به وجود آمده در شمع به ترتیب واقع در خاک ماسه سست، ماسه با تراکم متوسط و ماسه متراکم می‌باشد. با افزایش مقدار نیروی افقی وارد بر شمع، مقدار لنگر خمشی به وجود آمده در طول شمع نیز افزایش می‌یابد. همچنین محل وقوع لنگر خمشی حداکثر در امتداد شمع، با افزایش مقدار نیروی وارده در سر شمع، به سمت پایین میل می‌کند به طوری که برای شمع در داخل خاک ماسه با تراکم متوسط و برای بار افقی 50 کیلو نیوتن، محل وقوع لنگر خمشی حداکثر در عمق حدود دو متری از سر شمع اتفاق می‌افتد. همچنین برای بار افقی 250 کیلو نیوتن در عمق کمی بیشتر از سه متری از سر شمع قرار دارد (شکل 5-ب)). به دلیل این که با افزایش بار افقی، طول گیرداری شمع کاهش پیدا می‌کند یا عمق گیرداری شمع به سمت پایین میل می‌کند و عمق انحنای شمع به سمت پایین میل می‌کند که در نتیجه نقطه حداکثر لنگر خمشی که احتمال شکست تحت خمش در آن وجود دارد به سمت پایین میل می‌کند.



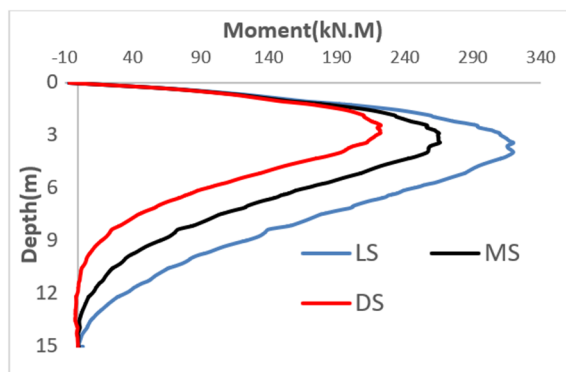
(ب)



(ج)



(د)



شکل 6- لنگر خمشی ایجاد شده در امتداد طول شمع تحت بار افقی 250 کیلو نیوتن واقع در خاک های ماسه سست، تراکم متوسط و متراکم

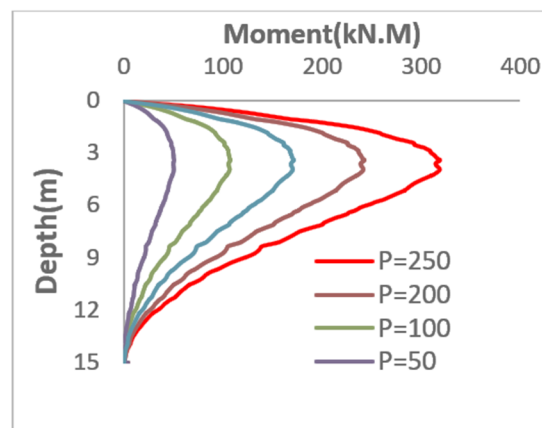
4- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار شمع و خاک اطراف شمع منفرد نسبت به افزایش بارهای محوری و افقی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی رفتار شمع و خاک اطراف آن، فرایند تحلیل حساسیت با تغییر پارامترهای مختلف شامل پارامتر بارگذاری، نوع خاک و قطر شمع انجام شده است.

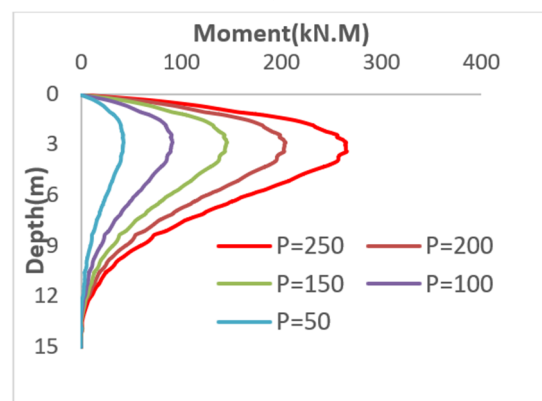
در شمع با مقطع دایره با توجه به تقارن تحت شرایط بارگذاری قائم در مرکز شمع، تغییر مکان و حالت تنش در هر جهت حول محور مرکزی شمع، یکنواخت بوده که به موجب آن حباب تنش یا تنش های انتقالی به وجود آمده نسبت به محور مرکزی شمع متقارن است.

با افزایش بار قائم، جابه جایی در شمع افزایش پیدا می کند که این جابه جایی شمع به خاک زیر و اطراف شمع منتقل می شود، با افزایش مجدد بار وارده، جابه جایی شمع افزایش پیدا کرده باعث افزایش جابه جایی خاک زیر و اطراف شمع شده و حباب تنش علاوه بر افزایش عرضی، در نواحی زیر شمع افزایش ارتفاعی را دارد.

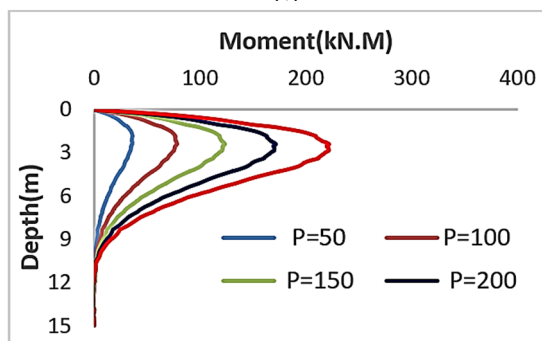
میزان جابه جایی افقی در امتداد طول شمع برای شمع در خاک ماسه سست بیشترین مقدار و سپس ماسه با تراکم متوسط و ماسه متراکم کمترین مقدار را دارند که به دلیل سختی بیشتر خاک ماسه متراکم و عدم تغییر شکل آن نسبت به خاک ماسه ای سست می باشد. بنابراین مشخص است که جابه جایی افقی شمع، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک (افزایش تراکم خاک)، کاهش می یابد. مقدار لنگر خمشی حداکثر به وجود آمده در شمع واقع در خاک ماسه ای سست، ماسه با تراکم متوسط و ماسه متراکم کاهش می یابد. با افزایش مقدار نیروی افقی وارد بر شمع، مقدار لنگر خمشی به وجود آمده در طول شمع نیز افزایش می یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 5- لنگر خمشی ایجاد شده در امتداد طول شمع:

الف) ماسه سست، ب) ماسه متوسط، ج) ماسه متراکم

شکل (6)، مقادیر لنگر خمشی در طول شمع بر حسب عمق تحت بار افقی 250 کیلو نیوتن در ماسه سست، ماسه با تراکم متوسط و ماسه متراکم را نشان می دهد. از این شکل نتیجه می شود که مقدار لنگر خمشی حداکثر به وجود آمده در شمع به ترتیب واقع در خاک ماسه سست، ماسه با تراکم متوسط و ماسه متراکم می باشد. به عبارت دیگر، افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک یا به عبارتی افزایش تراکم خاک باعث کاهش مقدار لنگر خمشی حداکثر می گردد.

- Infrastructure Engineering, Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 2013, 9 (2), 151-160.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2011.561226>
- Mortazavi Zanjani M, Soroush A, "Numerical modeling of fault rupture propagation through two-layered sands", Tehran, P.O. Box 15875-4413, Iran.
- Robertson PK, Campanella RG, Brown PT, Grof I, Hughes JMO, "Design of axially and laterally loaded piles using in-situ tests: a case history", Canadian Geotechnical Conference, 1985, 51-60.
- Ruesta PF, Townsend FC, "Evaluation of laterally loaded pile group at Roosevelt bridge", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123 (12), 1153-1161.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:12\(1153\)3](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:12(1153)3)
- Thompson G R, "Application of finite element method to the development of p-y curves for saturated clays", M.S. Thesis, University of Texas, Austin, TX, 1997, 190.
- Youngho K, Sangseom J, "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction", Computers and Geotechnics, March 2011, 248-257.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.12.00808>

با افزایش مقدار نیروی افقی محل وقوع لنگر خمشی حداکثر، در امتداد شمع به سمت پایین میل می‌کند. دلیل این حالت این است که با افزایش بارافقی، طول گیرداری شمع کاهش پیدا کرده و با عمق گیرداری شمع به سمت پایین میل می‌کند و عمق انحنای شمع به سمت پایین میل می‌کند که در نتیجه نقطه حداکثر لنگر خمشی که احتمال شکست تحت خمش در آن وجود دارد در نقاط پایین‌تر شمع ایجاد می‌شود.

از ترکیب نتایج مربوط به تغییر مکان‌های کل یا افقی در مقاطع مختلف در شمع‌های تحت بارهای افقی چنین نتیجه می‌شود که در جلوی شمع‌های تحت بار جانبی، محدوده‌ای از خاک در مقابل جابه‌جایی شمع مقاومت می‌کند که در حالت سه‌بعدی با ساده‌سازی می‌توان این محدوده را به شکل مخروط در نظر گرفت.

با افزایش بار افقی، جابه‌جایی در سر شمع افزایش پیدا می‌کند. این جابه‌جایی سر شمع به خاک قسمت جلوی شمع منتقل می‌شود، یعنی در نتیجه این جابه‌جایی، نیرو به خاک موجود در قسمت جلوی شمع منتقل می‌شود، به طوری که شکل یک مخروط تشکیل شود. مخروط تشکیل شده علاوه بر افزایش عرضی در سر شمع، در نواحی متناسب با عمق شمع نیز افزایش ارتفاع می‌دهد.

5- مراجع

- Abdel-Mohti A, Pekcan G, "Assessment of seismic performance of skew reinforced concrete box girder bridges", International Journal of Advanced Structural Engineering, 2013b, 5 (1).
<https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-1>
- Abdel-Mohti A, Pekcan G, "Effect of skew on the seismic vulnerability of RC box girder highway bridges", International Journal of Stability and Structural Dynamics, 2013-a, 13 (6).
<https://doi.org/10.1142/S0219455413500277>
- Brown Dan A, Shie CF, "Some numerical experiments with a three-dimensional finite element model of a laterally loaded pile", Computers and Geotechnics, 1991, 12 (2), 149-162.
[https://doi.org/10.1016/0266-352X\(91\)90003-H](https://doi.org/10.1016/0266-352X(91)90003-H)
- Brown Dan A, Shie C-F, "Three-dimensional finite element model of laterally loaded piles", Computers and Geotechnics, 1990, 10 (1), 59-79.
[https://doi.org/10.1016/0266-352X\(90\)90029-K](https://doi.org/10.1016/0266-352X(90)90029-K)
- Georgiadis M, Butterfield R, "Laterally loaded pile behavior", Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, 1982, 108 (GT1), 155-165.
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000548>
- Ismael NF, "Lateral loading tests on bored piles in cemented sands", Proceedings of the 3rd International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium, 1998, 137-144.
- Khodair Y, Hassiotis S, "Rigidity of abutments in integral abutment bridges", Journal of Structure and