



Nonlinear Three-Dimensional Numerical Study of Pile Seismic Behavior: Effect of Pile Geometrical Parameters

S. Hadei¹, M. M. Ahmadi²

¹Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: The behavior of soil-pile systems subjected to earthquake loading depends on many parameters. These parameters can be categorized into three main groups: geometrical parameters of the pile, soil mechanical properties, and loading characteristics. The purpose of this study is to investigate the effect of pile geometrical parameters on the seismic response of soil-pile systems considering soil nonlinear behavior. To this aim, a set of fully nonlinear three-dimensional analyses in the time domain was conducted using the finite difference computer program FLAC^{3D}. The focus of the paper is on the seismic response of the floating single pile embedded in clayey soil, and the parametric study was performed to investigate the effect of pile geometrical parameters on its seismic response. To consider soil nonlinear behavior during seismic events, an elastoplastic constitutive law was applied to the soil medium. Also, soil shear modulus reduction with the increase in soil shear strain level was simulated. The results of this study showed that an increase in pile diameter causes an increase in the maximum kinematic bending moment. This increase is proportional to the pile diameter powered by a value. Also, the results showed that effect of pile length on the magnitude of maximum bending moment in pile was not significant. However, the shape of the bending moment distribution diagram and location of the maximum bending moment are strongly affected by pile length.

Review History:

Received: May. 23, 2022

Revised: Apr. 30, 2023

Accepted: Aug. 12, 2023

Available Online: Aug. 30, 2023

Keywords:

Clayey soil-pile interaction

3D Numerical modeling

Soil nonlinear behavior

Analyses in the time domain

Pile geometrical parameters

1- Introduction

Several researchers found that kinematic interaction is the main factor in the induced damages to piles during severe earthquakes, e.g., Mexico City 1985, Kobe 1995, and Chi Chi 1999 [1,2].

The main purpose of the current study is to investigate the pile geometrical properties affecting kinematic soil-pile interaction considering more realistic assumptions. To this end, based on the continuum mechanics approach, fully nonlinear three-dimensional analyses were conducted in the time domain. The explicit scheme finite difference program, FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D), was employed. A parametric study has been performed to investigate the effects of the diameter and length of the pile on the seismic behavior of a single pile in a clayey stratum.

2- Numerical Modeling

The schematic section view of the single pile embedded in the clayey layer and the three-dimensional model developed in FLAC^{3D} is shown in Fig. 1. A single pile with a length of L and a diameter of D embedded in a clayey stratum was modeled. The soil medium was simulated using eight-noded cubical elements, with each node having three translational

degrees of freedom (in X, Y, and Z coordinates). Two-noded flexural elements were selected for modeling the piles in the parametric study carried out in this research. The assumed properties for the soil layer and the pile are listed in Table 1 and Table 2, respectively. Horizontal input motion, consisting of 9 sinusoidal cycles with an amplitude of 0.2g and a frequency of 5 Hz was applied to the model base.

3- Results and Discussion

The distribution of the bending moment envelope along the pile is presented in Fig. 2. The graphs present the results for pile lengths of 10.0 m, 15.0 m, and 20.0 m. Fig. 6 illustrates that the bending moment increases along the pile length as the pile diameter increases; however, in most cases, this increase in bending moment is more significant along the upper two-thirds of the pile length.

The distribution of the bending moment envelope for the single piles having different lengths is shown in Fig. 3. It is observed that diagrams of the distribution of the bending moment envelope along the piles can be characterized by two completely different shapes: "S-shaped" diagrams and "monotonic" diagrams.

*Corresponding author's email: mmahmadi@sharif.edu



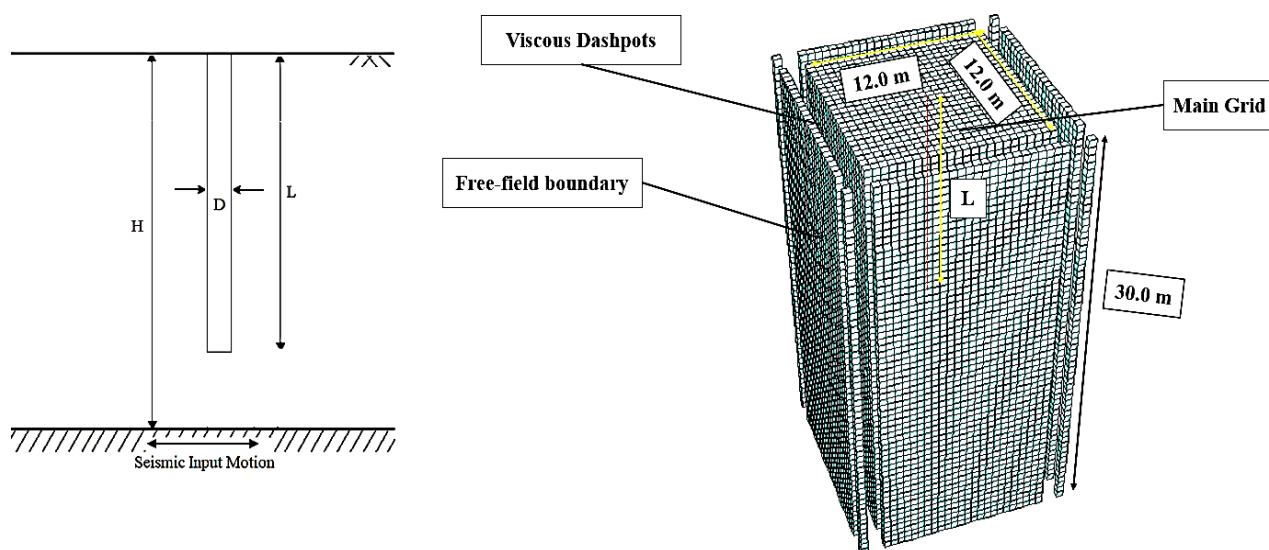


Fig. 1. Schematic view and the three-dimensional model developed in this study

Table 1. Adopted properties for soil in analyses performed in this study

Property	Values
Layer height (m)	30
Unit weight (kN/m ³)	18
Poisson's ratio	0.45
Strength ratio ($\alpha = \frac{c_u}{\sigma_v}$)	0.3
Initial stiffness ratio ($\beta = \frac{E}{c_u}$)	150

Table 2. Geometrical and mechanical properties of piles adopted in this study

Property	Values
Diameter (m)	0.5, 0.8, 1.0, 1.2
Length (m)	10, 15, 20
Unit Weight (kN/m ³)	24
Elastic Modulus (GPa)	20
Poisson's ratio	0.15

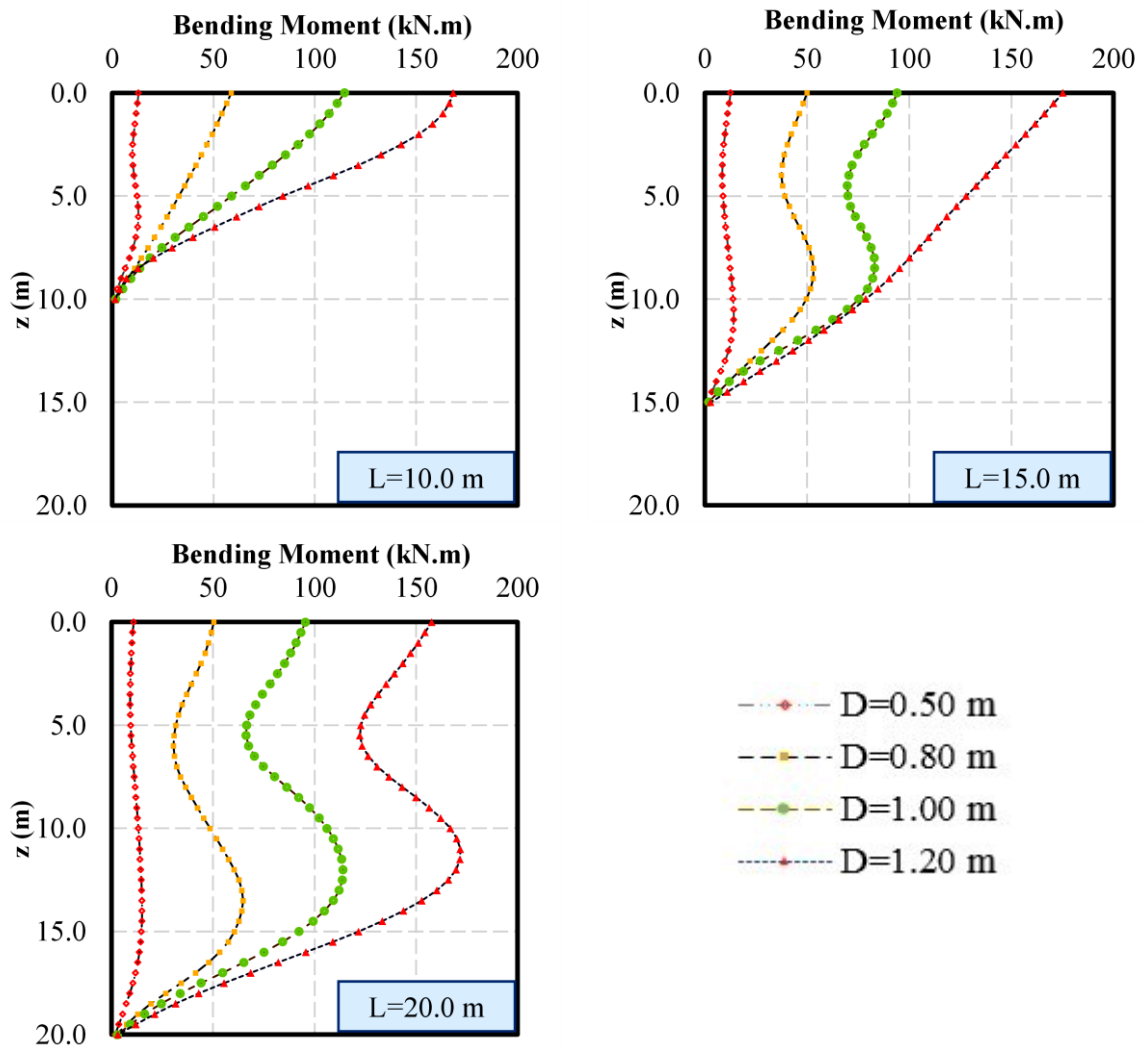


Fig. 2. Effect of pile diameter on the diagram of pile bending moment

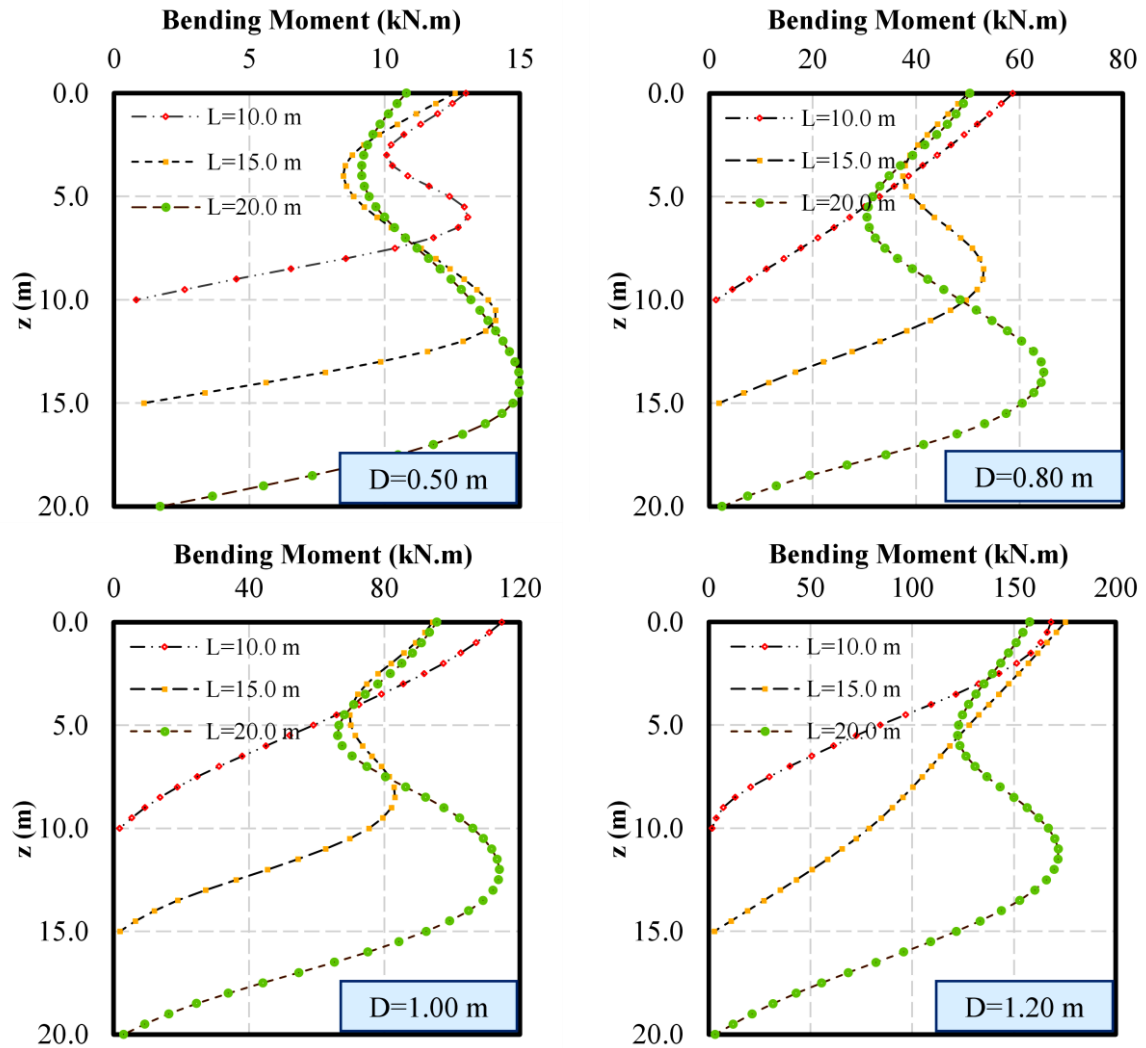


Fig. 3. Effect of pile length on the diagram of pile bending moment

4- Conclusions

In this research, the seismic behavior of floating single piles embedded in a clayey stratum was studied. The main conclusions obtained from this research are as below:

- The bending moment increases along the pile length as the pile diameter increases, especially along the upper two-thirds of the pile length.
- The shape of the diagram of bending moment distribution can be categorized into two groups: “S-shaped” diagrams and “monotonic” diagrams.

References

- [1] K. Tokimatsu, H. Suzuki, M. Sato, Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (2005) 753–762.
- [2] L. De Sanctis, R. M. S. Maiorano, S. Aversa, A method for assessing kinematic bending moments at the pile head, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(10) (2010) 1133–1154.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Hadei, M. M. Ahmadi, *Nonlinear Three-Dimensional Numerical Study of Pile Seismic Behavior: Effect of Pile Geometrical Parameters*, Amirkabir J. Civil. Eng., 55(9) (2023) 395-398.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21398.7715





تأثیر مشخصات هندسی شمع بر پاسخ لرزه‌ای آن با استفاده از مدل‌سازی عددی غیرخطی سه‌بعدی

سید سجاد هادئی، محمد مهدی احمدی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:

اندرکنش شمع-خاک رسی
مدل‌سازی عددی سه‌بعدی
رفتار غیرخطی خاک
تحلیل در حوزه زمان
مشخصات هندسی شمع

خلاصه: رفتار سیستم خاک - شمع تحت بار لرزه‌ای، وابسته به عوامل متعددی است. این عوامل را می‌توان به سه دسته اصلی شامل مشخصات هندسی شمع، مشخصات مکانیکی خاک اطراف شمع و نیز ویژگی‌های بارگذاری لرزه‌ای طبقه‌بندی نمود. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر مشخصات هندسی شمع بر پاسخ سیستم خاک-شمع با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی محیط خاک تحت بار لرزه‌ای است. بدین منظور، مطالعه عددی سه‌بعدی کاملاً غیرخطی در حوزه زمان با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ صورت گرفت. تمرکز مقاله حاضر بر روی پاسخ دینامیکی شمع شناور منفرد مدفون در خاک رسی بوده و مطالعه پارامتریک برای بررسی تأثیر مشخصات هندسی شمع در پاسخ آن صورت گرفته است. به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک تحت بار لرزه‌ای، مدل رفتاری الاستوپلاستیک برای محیط خاک اعمال شد و همچنین با اعمال تابع کاهش مدول برشی خاک با افزایش کرنش برشی، کاهش سختی خاک تحت بار لرزه‌ای شبیه‌سازی شد. نتایج این تحقیق نشان دادند که با افزایش قطر شمع، مقدار لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در شمع تحت بار لرزه‌ای به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد و این افزایش متناسب با توانی از قطر شمع است. همچنین بررسی نتایج آنالیزهای عددی صورت گرفته نشان داد که تأثیر طول شمع بر بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع چندان قابل توجه نیست؛ اما پارامتر طول شمع تأثیر قابل توجهی بر شکل دیاگرام توزیع لنگر خمشی در شمع و نیز مکان رخداد لنگر خمشی بیشینه دارد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر اندرکنش سینماتیکی بین شمع و خاک با تحقیقات آزمایشگاهی، بررسی‌های تحلیلی^۱ و مطالعات عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطالعات عددی به دلیل امکان انجام تعداد زیاد شبیه‌سازی‌ها برای بررسی تأثیر عوامل مختلف در رفتار دینامیکی شمع‌ها یک ابزار کارآمد در مطالعه این موضوع می‌باشد.

پاسخ دینامیکی فونداسیون‌های عمیق به علت ماهیت پیچیده و عوامل متعدد تأثیرگذار بر آن، موضوعی پیچیده و بحث‌برانگیز در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای محسوب می‌گردد. در حین زلزله، اندرکنش سینماتیکی^۱ ناشی از جابجایی‌های خاک در اطراف شمع (بدون توجه به حضور روسازه) و اندرکنش اینرسیال^۲ بر اثر ارتعاش روسازه، منجر به اعمال بار دینامیکی به شمع‌ها می‌گردد. برخی از تحقیقات نشان داده که تحت زلزله‌های شدید مانند زلزله کوبه^۳ ۱۹۹۵ و چی‌چی^۴ ۱۹۹۹، برخلاف باور رایج، اندرکنش سینماتیکی رخ داده بین شمع و خاک اطراف، نقش اساسی در خرابی شمع‌ها داشت [۲، ۱]. بنابراین، درک اندرکنش سینماتیکی بین شمع و خاک و عوامل موثر بر آن، در طراحی شمع‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای اهمیت فراوان دارد.

بخش بزرگی از مطالعات عددی صورت گرفته در موضوع اندرکنش خاک و شمع، رفتار شمع را در زمین‌های روانگراشونده^۵ بررسی نموده‌اند [۳-۱]. بخش عمده‌ای از مطالعات عددی صورت گرفته در موضوع پاسخ دینامیکی سیستم خاک-شمع در خاک‌های غیر روانگرا، در حوزه فرکانس^۶ صورت گرفته و یا از مدل‌های ساده مبتنی بر روش تیر روی فونداسیون دینامیکی وینکلر^۷ (BDWF) و یا سایر فرضیات ساده‌کننده استفاده نموده‌اند [۱۱-۱۷]. رویکردهای نسبتاً ساده استفاده شده در این دسته از مطالعات علی‌رغم این که می‌تواند به عنوان یک مزیت برای آن‌ها به

- 1 kinematic interaction
- 2 Inertial interaction
- 3 Kobe
- 4 Chi Chi

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu



در این مطالعه برای محیط خاک مدل رفتاری سطح منفرد سلسله مراتبی^{۱۱} (HiSS) در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد رفتار پلاستیک محیط خاک، تاثیر قابل توجهی بر اختلاف تحریک ورودی از سنگ بستر و تحریک محاسبه شده در تراز سرشمع دارد. ماهشواری^{۱۲} و همکاران [۲۳،۲۲] نیز با استفاده از روش المان محدود سه بعدی و در نظر گرفتن مدل رفتاری HiSS برای محیط خاک، تاثیر رفتار پلاستیک خاک را بر تابع امپدانس^{۱۳} سیستم خاک-شمع، پاسخ میدان آزاد^{۱۴} و پاسخ سرشمع برای شمع‌های منفرد و گروه شمع‌ها بررسی نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که رفتار پلاستیک خاک به ویژه در پاسخ سیستم‌های خاک-شمع با فرکانس بدون بعد^{۱۵} ($a_0 = \omega d / V_s$) پایین قابل توجه است. احمدی و همکاران [۲۴] با استفاده از روش تفاضل محدود^{۱۶} سه بعدی و اعمال مدل رفتاری نرم‌شونده برای خاک رفتار سیستم خاک-شمع و برخی عوامل موثر بر پاسخ آن را بررسی نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نیز تصریح نمود که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک، تاثیر قابل توجهی بر پاسخ محاسبه شده برای سیستم خاک-شمع دارد. بررسی نتایج تحقیقات اندکی که پاسخ دینامیکی سیستم خاک-شمع را با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک مطالعه نموده‌اند نشان می‌دهد که مطالعه دقیق‌تر اندرکنش سینماتیکی رخ داده بین شمع و خاک اطراف مستلزم در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک تحت بارهای دینامیکی است.

مرور مطالعات صورت گرفته در موضوع اندرکنش خاک-شمع نشان می‌دهد که تعداد تحقیقاتی که این موضوع را با روش‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته به صورت سه بعدی و کاملاً غیرخطی در حوزه زمان بررسی کرده‌اند، اندک هستند. این مطالعات اندک نیز به لنگر خمشی ایجاد شده در شمع تحت بار لرزه‌ای، به عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترهای طراحی شمع در مناطق لرزه‌خیز، توجه کافی نشان نداده‌اند و تاثیر عوامل مختلف بر آن را در قالب یک مطالعه پارامتریک^{۱۷} بررسی ننموده‌اند.

هدف مقاله حاضر بررسی تاثیر مشخصات هندسی شمع بر پاسخ سیستم خاک-شمع با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی محیط خاک است. بدین منظور، مطالعه عددی سه بعدی کاملاً غیرخطی در حوزه زمان با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود^{۱۸} FLAC^{3D} صورت گرفت. تمرکز مقاله حاضر بر روی توزیع

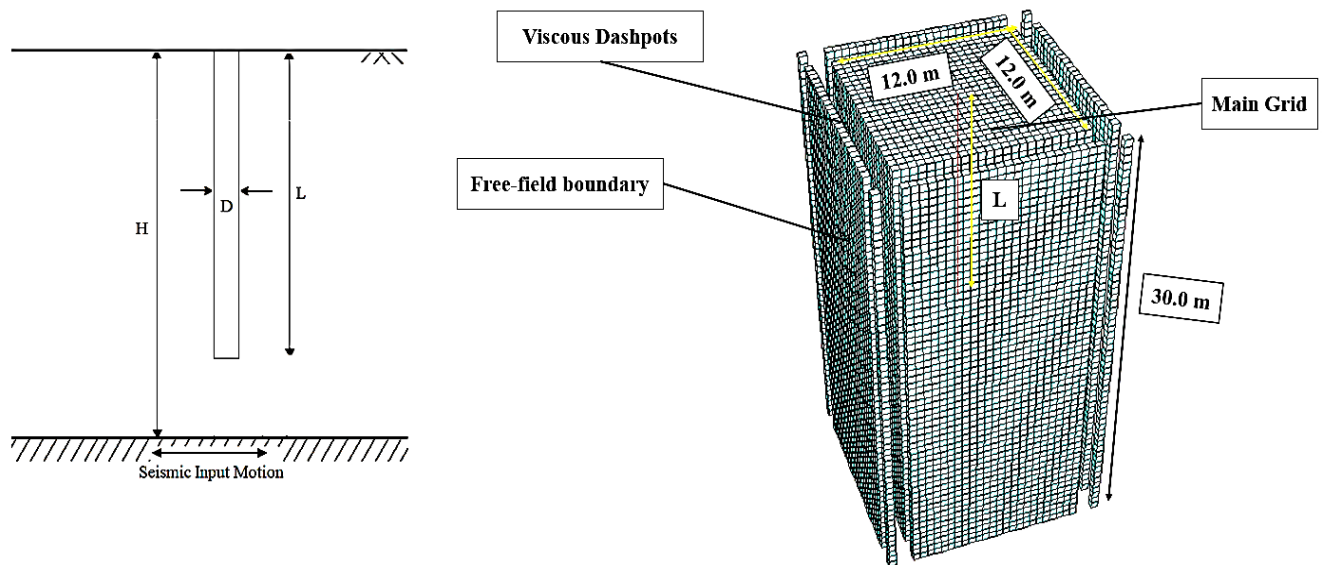
شمار آید، اما همراه با محدودیت‌هایی هستند. رفتار خاک تحت کرنش‌های متوسط و بزرگ به صورت غیرخطی است، در حالی که در مطالعات صورت گرفته در حوزه فرکانس به دلیل استفاده از اصل برهم‌نهی^۱، رفتار خاک به صورت الاستیک و یا ویسکوالاستیک^۲ در نظر گرفته می‌شود. در رویکرد BDWF شمع به صورت تیر و خاک اطراف آن به صورت آرایه‌ای از فنرها و میراگرهای مجزا شبیه‌سازی شده و مدل رفتاری الاستیک خطی و یا منحنی‌های غیرخطی تجربی p-y برای رفتار بار-تغییرشکل این فنرها می‌تواند در نظر گرفته شود. به دلیل شبیه‌سازی خاک با فنرها و میراگرهای مجزا، توزیع پیوسته تنش و تغییرشکل در محیط خاک در رویکرد BDWF نمی‌تواند مدل شود و این موضوع می‌تواند منجر به نتایج غیردقیق گردد. بنابراین به منظور درک بهتر رفتار سیستم خاک-شمع تحت بار لرزه‌ای، شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر با استفاده از روش‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته^۳ و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک مورد نیاز است.

دقیق‌ترین روش برای مطالعه پاسخ شمع و سازه‌های متکی به فونداسیون‌های شمعی به بارهای لرزه‌ای، استفاده از رویکرد کاملاً غیرخطی^۴ در حوزه زمان^۵ است که بار دینامیکی به صورت تاریخچه زمانی به مدل مورد بررسی اعمال شده و رفتار غیرخطی خاک در مدل رفتاری تخصیص یافته به محیط خاک در نظر گرفته شود. با اینحال به دلیل پیچیدگی فراوان و هزینه محاسباتی بسیار بالا، تنها تعداد اندکی از مطالعات عددی با این رویکرد انجام شده‌اند. از میان این مطالعات اندک نیز، تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته بر روی پاسخ روسازه تمرکز کرده و رفتار لرزه‌ای شمع در سیستم خاک-شمع-سازه مورد توجه قرار نگرفته است [۱۹،۱۸].

بنتلی و ال نگار^۶ [۲۰] با استفاده از روش المان محدود^۷ سه بعدی و در نظر گرفتن مدل رفتاری دراکر-پراگر^۸ برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی خاک، تاثیر اندرکنش سینماتیکی را بر تحریک اعمال شده بر سازه در تراز کف فونداسیون^۹ بررسی کردند. کای^{۱۰} و همکاران [۲۱]، با استفاده از روش المان محدود سه بعدی اندرکنش سیستم خاک - شمع را مورد مطالعه قرار دادند.

- 1 Superposition
- 2 Viscoelastic
- 3 Continuum Mechanics
- 4 Fully Nonlinear Approach
- 5 Time Domain
- 6 Bentley and Al Naggar
- 7 Finite Element Method
- 8 Drucker-Pruger
- 9 Foundation Input Motion
- 10 Cai

- 11 Hierarchical Single Surface
- 12 Maheshwari
- 13 Impedance
- 14 Free-Field
- 15 Dimensionless Frequency
- 16 Finite Difference Method
- 17 Parametric Study



شکل ۱. مقطع شماتیک و مدل سه‌بعدی مطالعه حاضر

Fig. 1. Schematic view and the three-dimensional model developed in this study

می‌باشد. ابعاد افقی مدل بر اساس نتایج آنالیزهای حساسیت‌سنجی انتخاب شد. نتایج آنالیزهای حساسیت‌سنجی نشان دادند که اگر طول و عرض مدل برابر با ۱۲ متر انتخاب شود، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (مانند لنگر خمشی شمع، جابجایی شمع و ...) تحت تاثیر مرزهای مدل نخواهد بود. عمده بزرگنمایی‌های^۳ رخ داده در تحریک ورودی از سنگ بستر^۴، در محدوده ۳۰ متر بالایی پروفیل زیرسطحی زمین اتفاق می‌افتد و در اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، اثرات ساختگاه^۵، بر اساس مشخصات خاک در این محدوده تعیین می‌گردد. با توجه به این موضوع و همچنین اجتناب از آنالیزهای با هزینه محاسباتی بسیار بالاتر، عمق مدل در این پژوهش برابر با ۳۰ متر انتخاب شد. کولمیر و لایسمر^۶ توصیه نمودند که برای مدل‌سازی صحیح انتشار امواج لرزه‌ای، ابعاد المان‌ها باید حداکثر یک‌دهم الی یک‌هشتم طول موج تحریک اعمال شده به مدل باشد [۲۵]. با توجه به مشخصات انتخاب شده برای خاک در مطالعه حاضر (که در سطرهای بعدی تشریح خواهد شد)، کوتاه‌ترین طول موج ایجاد شده در دامنه مساله تقریباً برابر با ۷٫۰ متر خواهد بود. لذا، بر اساس توصیه کولمیر و لایسمر باید اندازه المان‌ها حتماً از ۰٫۹ متر کوچک‌تر باشد. البته در پژوهش حاضر، کاهش سختی خاک با کرنش برشی نیز در نظر

لنگر خمشی در طول شمع شناور^۱ منفرد مدفون در خاک رسی بوده و مطالعه پارامتریک برای بررسی تاثیر قطر شمع و طول شمع در پاسخ آن صورت گرفته است. بدین ترتیب نوآوری‌هایی به شرح زیر را برای تحقیق حاضر می‌توان برشمرد: ۱. بررسی موضوع اندرکنش خاک و شمع با انجام آنالیزهای عددی سه‌بعدی کاملاً غیرخطی در حوزه زمان ۲. تمرکز بر روی بررسی توزیع لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع (و نه صرفاً لنگر خمشی بیشینه) تحت بار لرزه‌ای به عنوان یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای طراحی شمع ۳. مطالعه پارامتریک برای بررسی تاثیر مشخصات هندسی شمع بر توزیع لنگر خمشی ایجاد شده در شمع ۴. در نظر گرفتن مشخصات سختی و مقاومتی خاک به صورت متغیر با عمق

۲- مدل‌سازی عددی

شکل شماتیک مدل مورد بررسی و نیز مدل سه‌بعدی ایجاد شده با نرم‌افزار FLAC^{3D} در شکل ۱ نشان داده شده است. یک شمع منفرد با طول L و قطر D که در یک لایه رسی مدفون است، مدل‌سازی شده است. محیط خاک با استفاده از المان‌های مکعبی هشت‌گره‌ای شبیه‌سازی شده که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی^۲ (در راستای X ، Y و Z)

- 3 Amplifications
- 4 Bedrock Motion
- 5 Site Effects
- 6 Kuhlemeyer and Lysmer

- 1 Floating
- 2 Translational Degree of Freedom

جدول ۱. مشخصات در نظر گرفته شده برای خاک در مطالعه حاضر

Table 1. Adopted properties for soil in analyses performed in this study

۳۰	عمق لایه خاک (متر)
۱۸	وزن مخصوص (کیلونیوتن بر مترمکعب)
۰/۴۵	ضریب پواسون خاک
نسبت مقاومت خاک	
۰/۳	$\left(\alpha = \frac{c_u}{\sigma_v} \right)$
نسبت سختی اولیه خاک	
۱۵۰	$\left(\beta = \frac{E}{c_u} \right)$

می‌کند، مورد مطالعه قرار نگرفته است. از طرف دیگر در خاک‌های رسی، مشخصات مقاومت و سختی خاک رسی با عمق تغییر می‌کنند [۲۶]. بنابراین، در مطالعه حاضر، به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط خاک رسی، مشخصات خاک رسی به صورت متغیر با عمق در نظر گرفته شد. در آنالیزهای عددی صورت گرفته در مطالعه حاضر، چسبندگی خاک رسی به صورت خطی با عمق (سطح تنش) افزایش می‌یابد و همچنین مدول الاستیسیته خاک به صورت خطی با چسبندگی خاک افزایش می‌یابد. مشخصات در نظر گرفته شده برای خاک رسی در آنالیزهای عددی صورت گرفته در این مطالعه، در جدول ۱ آمده است.

رفتار خاک تنها در محدوده کرنش‌های برشی کوچک (کمتر از ۰/۰۰۱٪)

گرفته شده است (که در سطرهای بعدی تشریح خواهد شد)؛ بنابراین، ممکن است مش‌های با اندازه ۰/۹ متر برای بررسی رفتار دینامیکی سیستم در حین اعمال بار لرزه‌ای مناسب نباشند. لذا، به منظور تعیین ابعاد مناسب المان‌ها که بتواند انتشار موج را به درستی در دامنه مدل شبیه‌سازی کند، آنالیزهای حساسیت‌سنجی انجام شد. بر اساس نتایج آنالیزهای حساسیت‌سنجی، ابعاد المان‌ها برابر با ۰/۵×۰/۵×۰/۵ متر انتخاب شد. بدین ترتیب بلوک خاک مدل شده، شامل حدود ۳۴۵۰۰ المان و ۳۸۰۰۰ گره می‌باشد.

تقریباً در تمام مطالعات صورت گرفته در حوزه اندرکنش دینامیکی شمع و خاک، پروفیل خاک به صورت یکنواخت و یا دولایه در نظر گرفته شده و رفتار لرزه‌ای شمع در پروفیل‌های خاکی که مشخصات آن‌ها در عمق تغییر

نمودن میرایی به مدل عددی، مفهوم میرایی هیسترتیک (و نه میرایی رایلی) به کار رفته است. به عبارت دیگر، در این پژوهش، کاهش مدول خاک و افزایش در اثر افزایش میرایی کرنش برشی در نظر گرفته شده است.

کاهش مدول برشی المان‌های خاک با افزایش کرنش برشی در مطالعه حاضر، بر اساس تابع نشان داده شده در شکل ۲ (الف) مورد نظر قرار گرفته است. این تابع توسط سان^۴ و همکاران [۲۸] براساس نتایج تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته برای کاهش مدول برشی خاک‌های رسی تحت بار تناوبی، پیشنهاد شده است. با اضافه نمودن یک برنامه به نرم‌افزار FLAC، یک رابطه نموی بر اساس تابع رسم شده در شکل ۲ (الف) استخراج شد که در هر گام زمانی، برای هر المان، دامنه کرنش برشی را محاسبه نموده و مقدار مدول برشی متناظر با آن دامنه کرنش برشی را بر اساس تابع معرفی شده در شکل ۲ (الف) به آن المان تخصیص می‌دهد. منحنی تغییرات نسبت میرایی با کرنش که بر اساس روند تشریح شده در بالا به دست می‌آید، در شکل ۲ (ب) رسم شده است. در واقع، بر اساس این منحنی، میرایی هیسترتیک در هر گام زمانی به هر المان خاک بر اساس دامنه کرنش برشی آن اعمال می‌شود.

بدین ترتیب در آنالیزهای عددی صورت گرفته در این پژوهش، هم رفتار پلاستیک خاک و هم استهلاک انرژی رخ داده در محیط خاک در اثر بارگذاری دینامیکی شبیه‌سازی شده است.

شمع قائم منفرد در مرکز مدل قرار داشته و تمام طول شمع در لایه خاک مدفون شده است. سر شمع به صورت گیردار^۵ مدل شده‌اند؛ به عبارت دیگر سرشمع امکان چرخش^۶ در راستای Y, X و Z را ندارد، اما در برابر جابجایی انتقالی در هیچ کدام از سه راستای Y, X و Z محدود نشده است. همچنین با توجه به این که در این مطالعه، نوک شمع به درون یک لایه سخت نفوذ نمی‌کند، شمع اصطکاکی فرض می‌شود. لذا، نوک شمع (انتهای شمع) به صورت آزاد مدل می‌شود.

شمع‌ها با استفاده از المان‌های خمشی دو گرهی مدل‌سازی شدند. المان خمشی یک قطعه مستقیم با دو گرّه ابتدایی و انتهایی و خصوصیات یکنواخت در طول قطعه می‌باشد. هر گرّه المان خمشی، سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی چرخشی^۷ دارد. المان خمشی دارای سختی خمشی، برشی و محوری بوده و لذا قابلیت باربری خمشی، برشی و محوری را دارد. در

می‌تواند به صورت الاستیک در نظر گرفته شود. تحت اثر زلزله‌های با شدت متوسط و بزرگ، کرنش برشی ایجاد شده در خاک از محدوده کرنش‌های کوچک فراتر می‌رود و لذا رفتار خاک تحت این زلزله‌ها، غیرخطی می‌باشد. همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، نتایج تحقیقات پیشین نظیر تحقیق صورت گرفته توسط ماهشوار و همکاران [۲۳، ۲۲]، احمدی و همکاران [۲۴]، موسیاسیاری و سیکا^۱ [۲۷] نشان داده که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، در مطالعه دقیق‌تر پاسخ دینامیکی شمع در سیستم خاک-شمع حائز اهمیت است. بنابراین در مطالعه حاضر رفتار غیرخطی خاک در نظر گرفته شد.

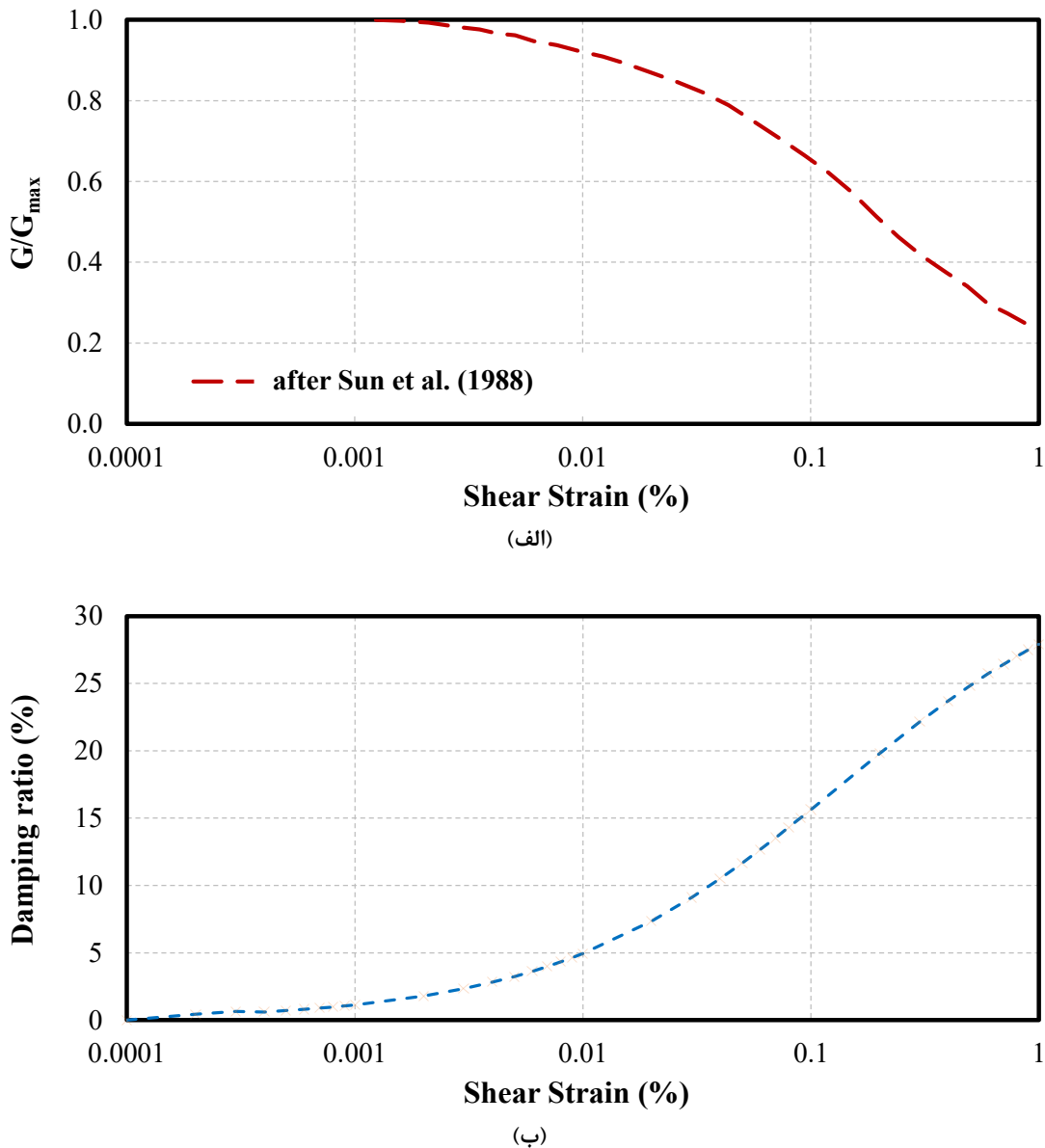
در مطالعه حاضر، به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک برای خاک در نظر گرفته شد. همچنین میرایی هیسترتیک خاک با شبیه‌سازی تغییرات وابسته به کرنش مدول و میرایی، به صورت مستقیم به مدل عددی اضافه شد. بنابراین مدل عددی توسعه‌یافته در مطالعه حاضر می‌تواند پاسخ هیسترتیک و پلاستیک خاک تحت بار تناوبی را شبیه‌سازی نماید.

خاک رسی مورد بررسی در مطالعه حاضر، با اعمال مدل رفتاری الاستوپلاستیک^۲ موهر-کولمب^۳ (M-C) به آن، به صورت یک ماده الاستوپلاستیک در نظر گرفته شد. مدل الاستوپلاستیک موهر-کولمب، که در آن تنش تسلیم به تنش‌های اصلی بزرگ‌تر (σ_1) و کوچک‌تر (σ_3) وابسته است، یک مدل رفتاری مناسب برای مصالح خاکی که تحت بارهای برشی تسلیم می‌شوند، می‌باشد. این مدل رفتاری از نظر محاسباتی کارآمد بوده و نیازمند پارامترهای زیاد برای توصیف رفتار خاک نمی‌باشد؛ به همین دلیل از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری در مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته در حوزه مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد.

خاک‌های طبیعی تحت بارهای دینامیکی همواره درجاتی از میرایی از خود نشان می‌دهند. عمده دلیل وجود میرایی در مصالح خاکی، لغزش دانه‌ها بر روی همدیگر می‌باشد؛ به همین دلیل ماهیت میرایی مصالح خاکی هیسترتیک و مستقل از فرکانس می‌باشد. بسیاری از مدل‌های رفتاری، از جمله مدل رفتاری موهر-کولمب، نمی‌توانند میرایی هیسترتیک ایجاد شده در مصالح خاکی را به درستی شبیه‌سازی نمایند. بنابراین در صورت شبیه‌سازی رفتار خاک تحت بارهای لرزه‌ای با چنین مدل‌های رفتاری، افزودن یک میرایی مکمل به مدل عددی ضروری است. در مطالعه حاضر، در اضافه

4 Sun
5 Fixed Head
6 Rotation
7 Rotational Degree of Freedom

1 Mucciacciaro and Sica
2 Elastoplastic
3 Mohr-Coulomb



شکل ۲. منحنی‌های کاهش در نظر گرفته شده برای خاک رسی با افزایش کرنش برشی (بر اساس نتایج تحقیقات سان و همکاران [۲۸]) (الف) تغییرات مدول برشی با دامنه کرنش برشی، و (ب) تغییرات میرایی با دامنه کرنش برشی

Fig. 2. Adopted degradation curves for the clayey soil (after Sun et al. [28]) (a) Shear modulus reduction with shear strain (b) Damping ratio variation shear strain

تحت زلزله، رفتار شمع‌های زیر روسازه بدون توجه به درجه خرابی خود روسازه باید در محدوده الاستیک باقی بمانند. دلیل این امر آن است که تشخیص موضع خرابی شمع و نیز تعمیر آن و بازگرداندن شمع آسیب دیده به حالت بهره‌برداری بسیار دشوار است. به همین دلیل در تحقیق حاضر، رفتار شمع به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است.

در مطالعه پارامتریک انجام شده در پژوهش حاضر، سه مقدار متفاوت

پژوهش حاضر طول هر المان خمشی ۰/۵ متر (برابر با ابعاد المان‌های حجمی) در نظر گرفته شده است. دلیل این که برای مدل‌سازی شمع از المان‌های خمشی استفاده شد، این است که آنالیزهای عددی صورت گرفته در قالب این پژوهش، نشان دادند که المان‌های خمشی بهتر از المان‌های حجمی، رفتار خمشی شمع تحت بار لرزه‌ای را می‌توانند شبیه‌سازی نمایند.

بسیاری از آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مانند Eurocode اذعان می‌دارند که

جدول ۲. مشخصات هندسی و مکانیکی در نظر گرفته شده برای شمع‌ها در مطالعه حاضر

Table 2. Geometrical and mechanical properties of piles adopted in this study

۰/۵	
۰/۸	
۱/۰	قطر شمع (متر)
۱/۲	
۱۰	
۱۵	طول شمع (متر)
۲۰	
۲۴	وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۲۰	مدول الاستیک (گیگاپاسکال)
۰/۱۵	ضریب پواسون

احتمالی بین شمع و خاک اطراف در اثر اعمال بار لرزه‌ای نیز در نظر گرفته شده است.

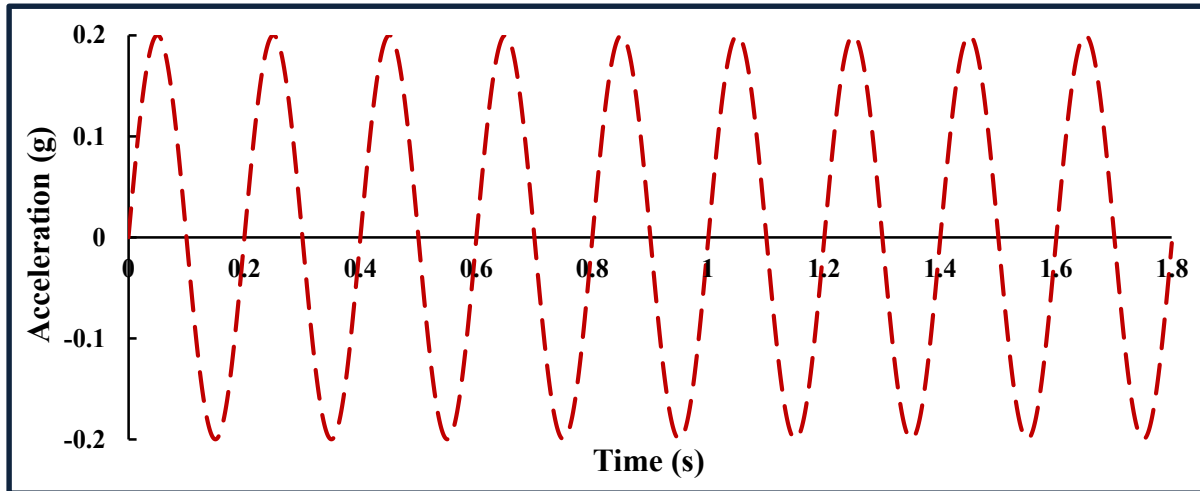
در آنالیزهای دینامیکی انجام شده، به منظور شبیه‌سازی میرایی هندسی^۲ موجود در محیط نیمه‌بینهایت خاک، از مرزهای میدان آزاد^۳ برای سطوح جانبی مدل استفاده شد. در این شرایط مرزی، سطوح جانبی ناحیه اصلی مدل^۴ (که در شکل ۱ نشان داده است) به وسیله میراگرهای ویسکوز^۵ به گره‌های میدان آزاد متصل شده و بدین ترتیب نیروهای نامتعادل^۶ ایجاد شده در گره‌های میدان آزاد به سطوح جانبی ناحیه اصلی مدل اعمال می‌شود. اعمال این شرایط مرزی منجر به کاهش قابل توجه انعکاس امواج لرزه‌ای^۷ از مرزهای مدل می‌گردد.

برای طول شمع و چهار مقدار متفاوت برای قطر شمع در نظر گرفته شده است تا تاثیر مشخصات هندسی شمع بر پاسخ آن مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات هندسی و مکانیکی شمع‌ها در جدول ۲ آمده است.

اتصال شمع به محیط، از طریق المان‌های حدفاصل^۱ نرمال (عمود بر محور شمع) و برشی (موازی با محور شمع) صورت می‌گیرد. المان‌های حدفاصل فنرهای غیرخطی هستند که اتصال بین گره‌های شمع و گره‌های خاک اطراف را برقرار می‌کنند. این فنرهای اتصالی باید به گونه‌ای عمل کنند که در اثر اعمال بار و ایجاد نیرو در داخل شمع، جاری نشوند. در غیر این صورت روند بارگذاری و افزایش بار در همان مقدار نیروی ایجاد شده متوقف شده و نیروی مقاومی از سوی خاک در برابر شمع احساس نمی‌شود. میزان سختی فنر اتصالی طبق پیشنهاد نرم‌افزار، ضریبی از $\left\{ \frac{K+4G}{3} \right\}$ می‌باشد که K مدول بالک (حجمی) المان خاک مجاور المان حدفاصل، G مدول برشی خاک مجاور المان حدفاصل و ΔZ_{\min} اندازه کوچکترین بعد المان خاک اطراف المان حدفاصل است. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، جدایش

- 2 Radiational Damping
- 3 Free-Field Boundary
- 4 Main Grid
- 5 Viscous Dashpots
- 6 Unbalanced Force
- 7 Seismic Wave Reflection

1 Interface



شکل ۳. تحریک اعمال شده به کف مدل در مطالعه حاضر

Fig. 3. Input motion applied to the model base in this study

آزاد زمین و پاسخ سرشمع تحت بار لرزه‌ای هارمونیک با فرکانس‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنان برای خاک مدل رفتاری الاستوپلاستیک HiSS (سطح منفرد سلسله‌مراتبی) در نظر گرفته شد. به منظور انجام آنالیزهای حساسیت‌سنجی، تاریخچه‌های زمانی شتاب هارمونیک با فرکانس‌های مختلف به عنوان تحریک ورودی به کف مدل اعمال شد.

در آنالیزهای صحت‌سنجی، مقادیر در نظر گرفته شده برای مشخصات فیزیکی و مکانیکی محیط خاک و شمع، منطبق با مقادیر در نظر گرفته شده توسط ماهشواری و همکاران بوده که در جدول ۳ آمده است. تاریخچه‌های زمانی شتاب هارمونیک اعمال شده به کف مدل دارای دامنه یک متر بر مجذور ثانیه بود.

در شکل ۴ و شکل ۵ نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر و نتایج به دست آمده توسط ماهشواری و همکاران در قالب نمودارهای تغییرات U_p/U_0 و U_g/U_0 با فرکانس بدون بعد $(a_0 = \omega d/V_s)$ مقایسه شده‌اند. در این دو شکل، U_p و U_g به ترتیب، دامنه جابجایی سنگ بستر، جابجایی میدان آزاد زمین و جابجایی سرشمع بوده و همچنین ω فرکانس زاویه‌ای^۶ بارگذاری، d قطر شمع و V_s سرعت موج برشی را در محیط خاکی نشان می‌دهد.

تاریخچه زمانی^۱ شتاب هارمونیک سینوسی شامل ۹ سیکل با فرکانس ۵ هرتز و دامنه $0.2g$ ، که در شکل ۳ نشان داده شده است، به عنوان تحریک ورودی^۲ افقی به کف مدل اعمال شد. بر اساس نمودار ارائه شده توسط سید و ادریس^۳ (۱۹۷۵)، این تعداد سیکل معادل با زلزله‌ای با بزرگای ممان^۴ $M_w = 7.0$ است [۲۹].

لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، از شتاب قائم صرف نظر شده است. دلیل این امر آن است که ضرایب اطمینان به کار رفته در طراحی استاتیکی المان‌های سازه‌ای، معمولاً مقاومت مناسبی را در برابر نیروهای دینامیکی ناشی از مولفه قائم زلزله فراهم می‌نماید.

۳- صحت‌سنجی^۵ مدل عددی

به منظور اطمینان از کارایی مدل عددی ایجاد شده در مطالعه حاضر برای مطالعه اندرکنش سینماتیکی بین خاک و شمع، سیستم خاک - شمع بررسی شده توسط ماهشواری و همکاران [۲۲]، با استفاده از مدل عددی ایجاد شده در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی حاضر با نتایج حاصل از تحقیق آنان، مقایسه شدند.

ماهشواری و همکاران با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی، پاسخ میدان

- 1 Time History
- 2 Input Motion
- 3 Seed and Idriss
- 4 Moment Magnitude
- 5 Verification

جدول ۳. مشخصات در نظر گرفته شده برای خاک و شمع در آنالیزهای حساسیت‌سنجی

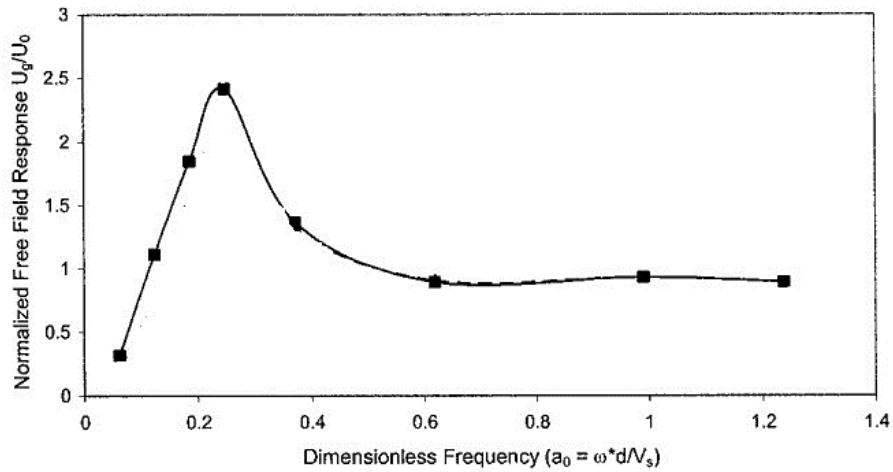
Table 3. Adopted properties for soil and pile for verification analyses

۱۶/۱	وزن مخصوص خاک (کیلو نیوتن بر مترمکعب)
۱۱/۷۸	مدول الاستیسیته خاک (مگاپاسکال)
۰/۴۲	ضریب پواسون خاک
۵٪	میرایی خاک
۲۴	چسبندگی خاک (کیلو پاسکال)
۲۴	وزن مخصوص شمع (کیلو نیوتن بر مترمکعب)
۲۵	مدول الاستیسیته شمع (گیگاپاسکال)
۱۰	طول شمع (متر)
۰/۵	قطر شمع (متر)

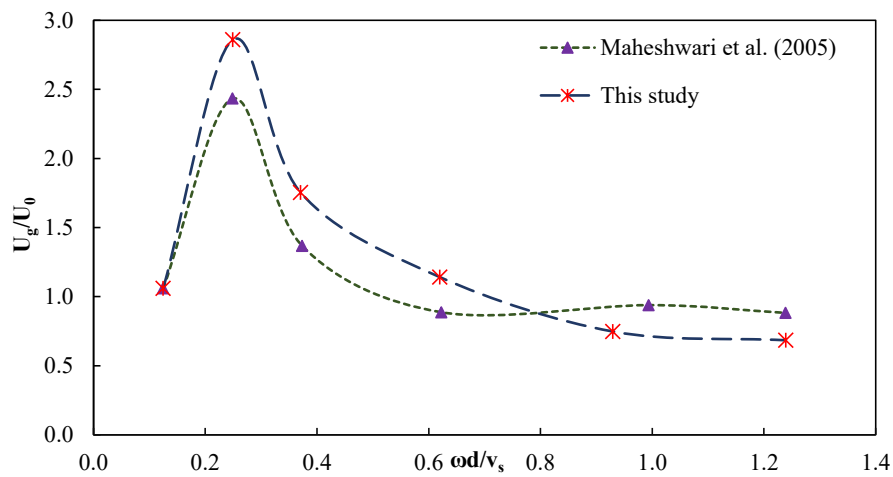
این افزایش ناگهانی ناشی از وقوع پدیده تشدید^۱ در خاک است. هم‌چنین ملاحظه می‌گردد به جز محدوده $0.25 < \omega d/V_s < 0.6$ پاسخ سرشمع مشابه پاسخ میدان آزاد است. در این محدوده، که محدوده وقوع پاسخ بیشینه سرشمع و میدان آزاد می‌باشد، مشاهده می‌شود که پاسخ بیشینه سرشمع در فرکانس بدون بعد بزرگ تری رخ می‌دهد. به علاوه ملاحظه می‌گردد که سرشمع در بازه فرکانسی بزرگ‌تری، پاسخ بیشینه را تجربه می‌کند.

در هر دو نمودار U_p/U_0 و U_g/U_0 ، هم در مقادیر و هم در روند تغییرات، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی صورت گرفته در پژوهش حاضر و نتایج پژوهش ماهشواری و همکاران مشاهده می‌گردد و میانگین اختلاف مشاهده شده در هر دو نمودار U_p/U_0 و U_g/U_0 ، کمتر از ۱۵٪ است.

توجه به روند تغییرات در هر دو نمودار، نشان می‌دهد که در فرکانس‌های بدون بعد نسبتاً پایین، یک افزایش ناگهانی در نسبت دامنه جابجایی میدان آزاد و جابجایی سرشمع به دامنه حرکت سنگ بستر مشاهده می‌شود که



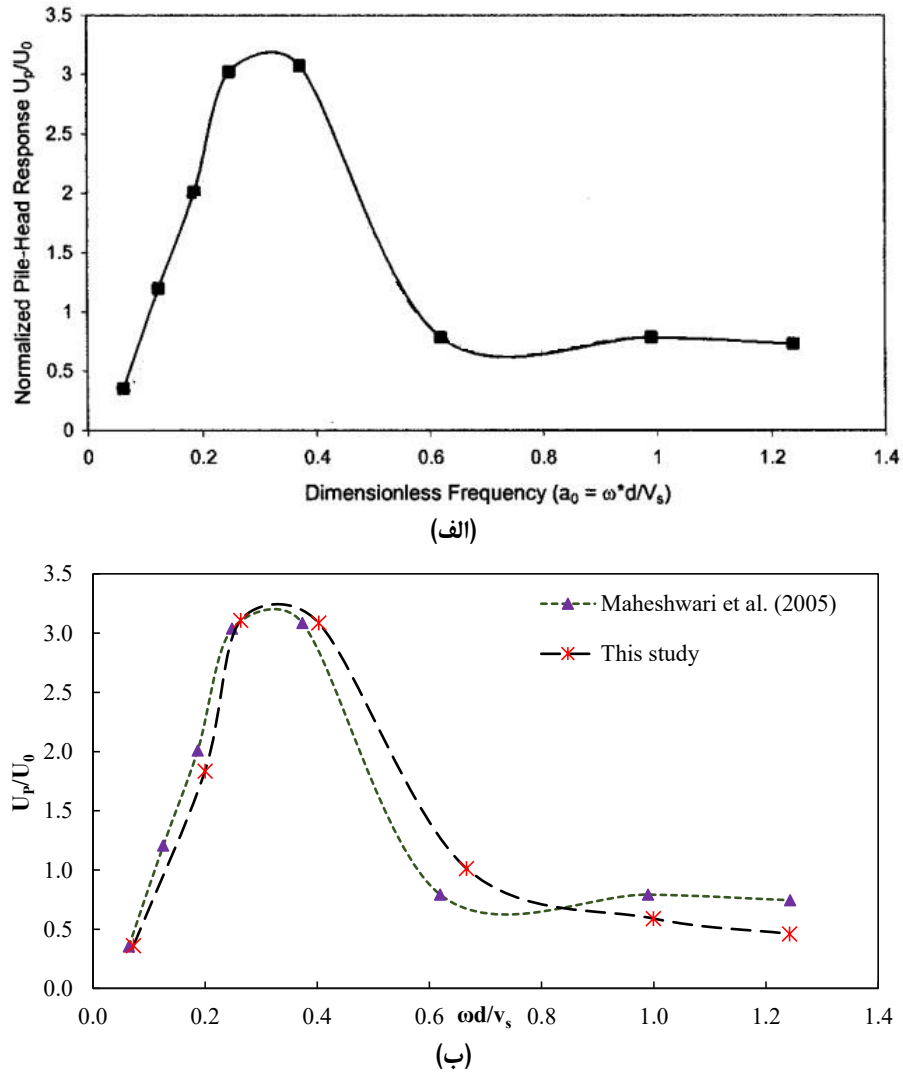
(الف)



(ب)

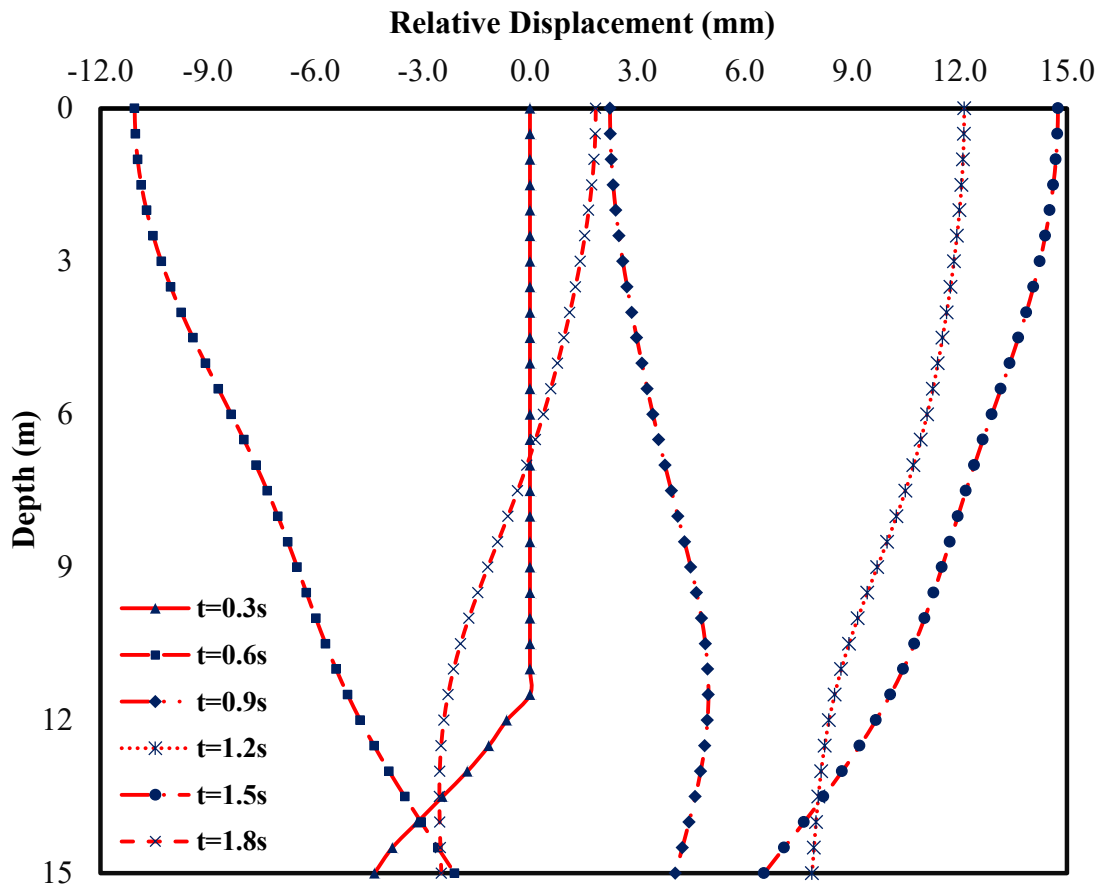
شکل ۴. نسبت پاسخ میدان آزاد به حرکت سنگ‌بستر (الف) نمودار ارائه شده در مقاله مرجع (ماهشوارى و همکاران [۲۲])، و (ب) مقایسه نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج ارائه شده در مقاله مرجع

Fig. 4. Normalized free-field response (a) the graph presented by Maheshwari et al. [22], and (b) comparison of the results obtained in the present study and those presented by Maheshwari et al. [22]



شکل ۵. نسبت جابجایی سرشمع به حرکت سنگبستر (الف) نمودار ارائه شده در مقاله مرجع (ماهشواری و همکاران [۲۲])، و (ب) مقایسه نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج ارائه شده در مقاله مرجع

Fig. 5. Normalized pile head response (a) the graph presented by Maheshwari et al. [22], and (b) comparison of the results obtained in the present study and those presented by Maheshwari et al. [22]



شکل ۶. پروفیل جابجایی نسبی شمع با قطر ۰/۵ متر و طول ۱۰ متر نسبت به خاک در زمان‌های متفاوت

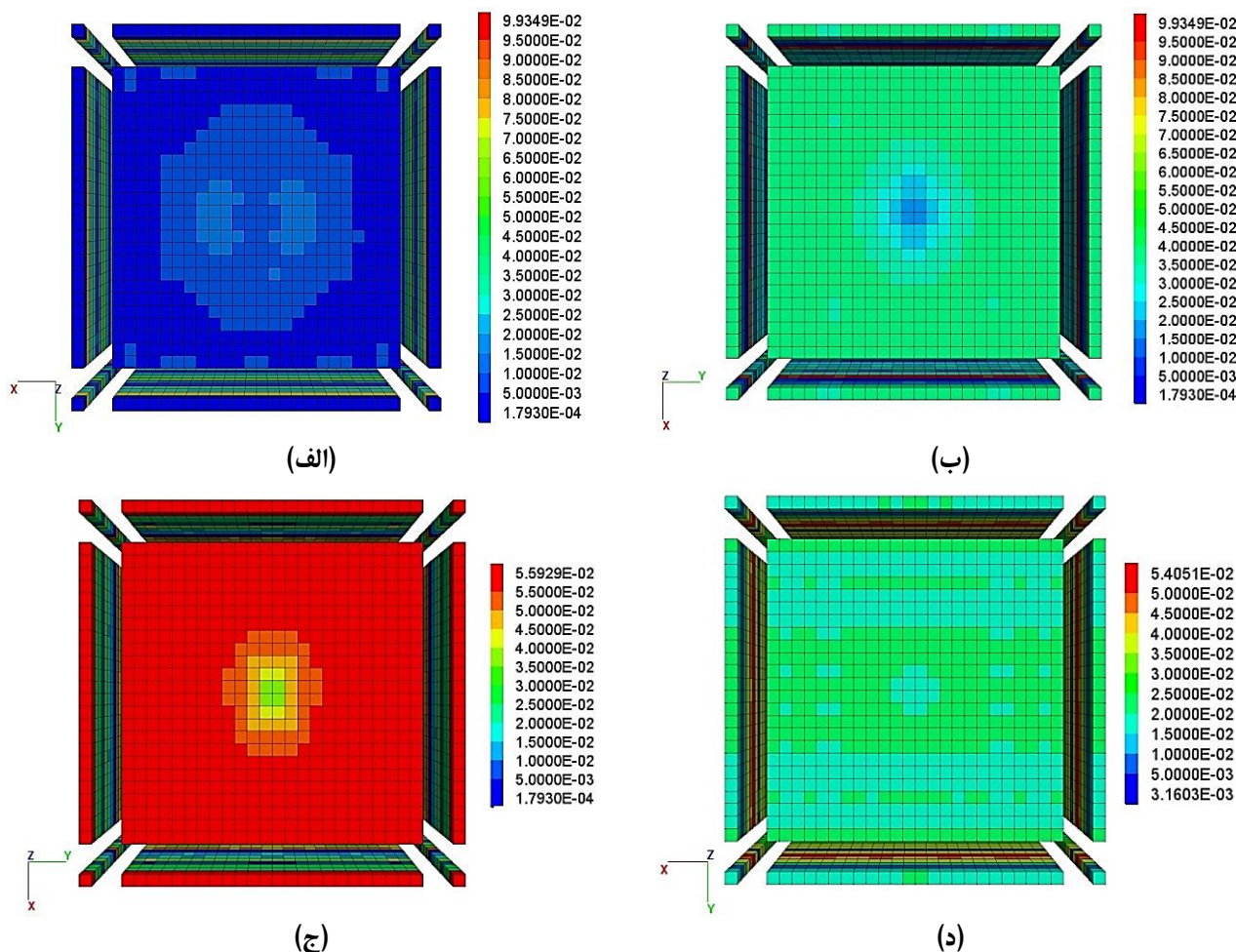
Fig. 6. Profiles of the relative displacement for the pile having $D=0.5$ m and $L=10$ m in different times

۴- نتایج

از ۱۱،۰ - میلی‌متر تا ۱۵،۰ میلی‌متر می‌باشد. به عبارت دیگر دامنه جابجایی سرشمع در حدود دو برابر جابجایی نسبی نوک شمع می‌باشد. دلیل این امر این است که شتاب در حین عبور از لایه خاک تشدید شده و دامنه آن افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، دامنه شتاب لایه خاک در تراز سرشمع، بزرگ‌تر از دامنه شتاب خاک در تراز نوک شمع است. لذا، دامنه جابجایی افقی خاک و در نتیجه جابجایی نسبی خاک و شمع نیز در تراز سرشمع نسبت به تراز نوک شمع بزرگ‌تر خواهد بود. شکل ۶ نشان می‌دهد که از لحظه شروع بارگذاری تا زمان $t=0.6$ s جابجایی نسبی سرشمع از صفر تا ۱۲،۰ - میلی‌متر رسیده است، از زمان $t=0.6$ s تا زمان $t=1.5$ s جابجایی نسبی سرشمع از ۱۲،۰ - میلی‌متر تا ۱۵،۰ میلی‌متر رسیده و از زمان $t=1.5$

در تحقیق حاضر، با انجام آنالیزهای دینامیکی سه‌بعدی کاملاً غیرخطی در حوزه زمان، مطالعه پارامتریک به منظور بررسی تاثیر قطر و طول شمع بر پاسخ شمع مدفون در خاک رسی به بار لرزه‌ای انجام شد. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، برای قطر شمع‌ها چهار مقدار متفاوت ۰/۵، ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ متر و برای طول شمع‌ها سه مقدار متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر در نظر گرفته شد.

در شکل ۶، پروفیل جابجایی نسبی شمع با قطر ۰/۵ متر و طول ۱۵ متر نسبت به خاک در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. روند تغییرات جابجایی نسبی شمع با کمک این شکل قابل بررسی است. همانطور که مشاهده می‌شود، محدوده جابجایی نسبی نوک شمع از ۴،۰ - میلی‌متر تا ۸،۰ میلی‌متر و محدوده جابجایی نسبی سرشمع



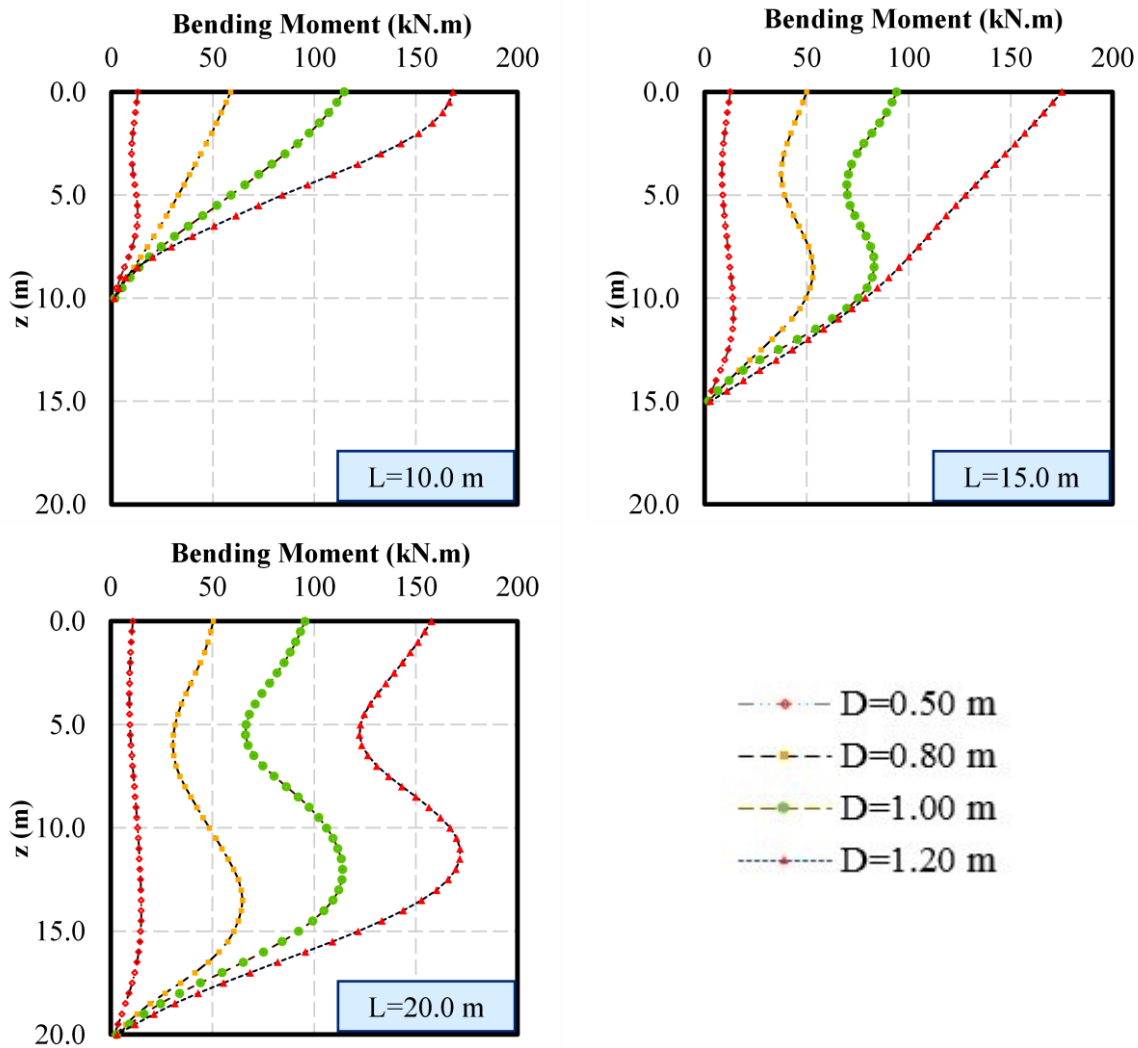
شکل ۷. توزیع کرنش برشی در دامنه مدل برای سیستم خاک-شمع با قطر ۰/۵ متر و طول ۱۵ متر در انتهای بارگذاری، (الف) تراز سطح زمین، (ب) عمق ۵ متری از سطح زمین، (ج) عمق ۱۰ متری از سطح زمین، و (د) عمق ۱۵ متری از سطح زمین (تراز نوک شمع)

Fig. 7. Shear strain contours in model domain at the end of loading for the case of $D=0.5$ m and $L=15$ m, (a) at the ground surface, (b) at $z=-5.0$ m, (c) at $z=-10.0$ m, and (d) at $z=-15.0$ m (the level of pile toe)

در محدوده وسط مدل، محل قرارگیری شمع، با کرنش برشی سایر نواحی متفاوت است. در واقع، شمع در توزیع کرنش برشی و در نتیجه تنش برشی ناشی از بار لرزه‌ای تاثیر گذاشته و به عبارت دیگر، حضور شمع منجر به بازتوزیع کرنش برشی در ناحیه اطراف خود شده است. از آنجا که پارامتر کلیدی در طراحی لرزه‌ای شمع‌ها، لنگر خمشی ایجاد شده در آن‌هاست، در ادامه، تمرکز اصلی نتایج ارائه شده بر توزیع لنگر خمشی در طول شمع خواهد بود.

s تا انتهای بارگذاری در زمان $t=1.8$ s جابجایی نسبی سرشمع از ۱۵،۰ میلی‌متر به حدود ۲،۰ میلی‌متر رسیده است. این مقادیر نشان می‌دهند که نرخ جابجایی نسبی بین شمع و خاک با پیشرفت زمان، افزایش یافته است. همچنین از این شکل قابل ملاحظه است که پروفیل جابجایی نسبی شمع در زمان‌های مختلف شکل غیرخطی دارد.

شکل ۷، توزیع کرنش برشی در دامنه مدل را برای سیستم خاک-شمع (شمع با قطر ۰/۵ متر و طول ۱۵ متر)، در انتهای بارگذاری در ترازهای مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام ترازها، کرنش برشی



شکل ۸. تاثیر قطر شمع بر توزیع لنگر خمشی ناشی از بار لرزه‌ای

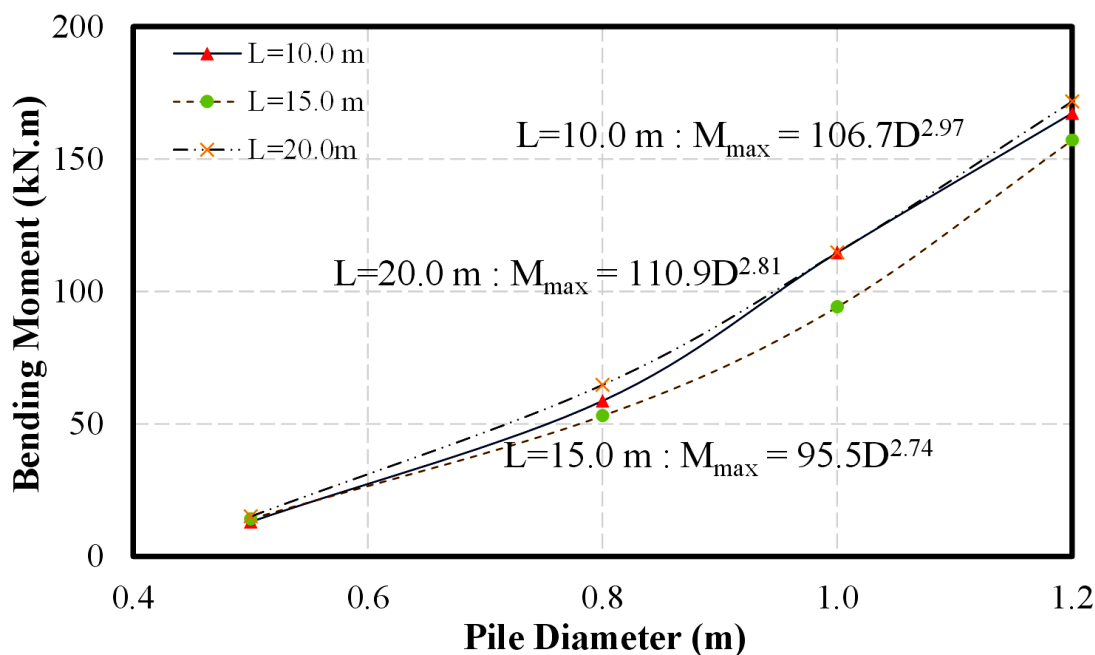
Fig. 8. Effect of pile diameter on the diagram of pile bending moment

۴-۱- تاثیر قطر شمع

توزیع پوس لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در اثر تحریک اعمال شده با دامنه $0.2g$ ، در شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش قطر شمع، منجر به افزایش لنگر خمشی ایجاد شده در شمع ناشی از بارگذاری لرزه‌ای می‌گردد. دلیل این موضوع را می‌توان در افزایش سختی شمع در اثر افزایش قطر آن دانست. با افزایش سختی شمع، شمع در برابر حرکت خاک مجاور مقاومت بیشتری از خود نشان داده و در نتیجه لنگر خمشی بزرگ‌تری را تجربه می‌کند. شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که اگرچه با افزایش قطر شمع، لنگر خمشی ایجاد شده در تمام طول شمع افزایش می‌یابد، اما برای بیشتر موارد، این افزایش لنگر خمشی ایجاد شده با

افزایش قطر، در دو سوم بالایی طول شمع، قابل توجه تر است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع می‌تواند در سر شمع و یا در اعماق میانی شمع رخ دهد که در مورد محل رخداد لنگر خمشی بیشینه در طول شمع، در بخش بعد صحبت خواهد شد. در اینجا تمرکز بر روی مقدار لنگر خمشی بیشینه بدون توجه به محل رخداد آن است. در این رابطه، احمدی و همکاران [۲۴] با بررسی رفتار شمع منفرد در پروفیل خاک یکنواخت و سنایی‌راد و غلامی‌نژاد [۳۰] با بررسی رفتار شمع در پروفیل خاک دولایه افزایش قابل توجه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع تحت بار لرزه‌ای در اثر افزایش قطر شمع را گزارش نمودند.



شکل ۹. تغییرات لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در شمع با قطر شمع

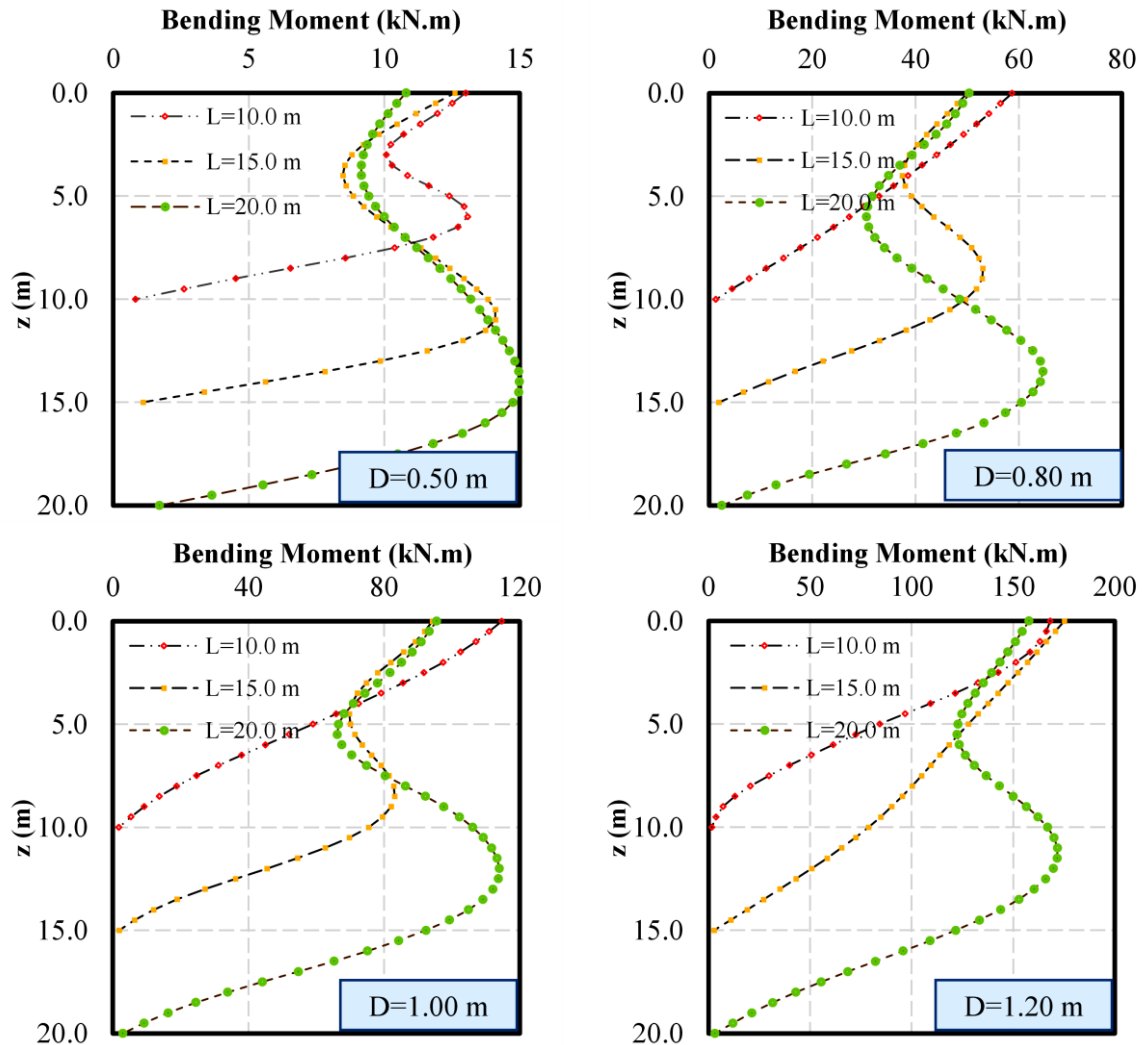
Fig. 9. Variation of the maximum bending moment vs. pile diameter

$$M_{\max} \propto D_{\text{pile}}^{\kappa} \quad (1)$$

به منظور تعیین K در رابطه (۱)، نمودار لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در شمع برحسب قطر شمع برای هر سه طول متفاوت شمع رسم شده است. همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، مقدار K ثابت نیست و وابسته به طول شمع، دارای مقادیر متفاوتی در بازه $2/75$ تا $3/00$ می‌باشد. بیشترین مقدار K مربوط به شمع با طول ۱۰ متر و کمترین مقدار K مربوط به شمع با طول ۱۵ متر می‌باشد. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که مقادیر پیشنهاد شده برای K توسط محققان پیشین که در بند قبلی به آن‌ها اشاره شد، در حد بالایی بازه به دست آمده برای K در تحقیق حاضر قرار دارند؛ اما به طور کلی می‌توان گفت که تطابق مقدار به دست آمده برای K در این تحقیق با K حاصل از کار پژوهشگران پیشین قابل قبول است.

نیکولا^۱ و همکاران [۳۱] و مایورانو^۲ و همکاران [۳۲] اندرکنش سینماتیکی بین خاک و شمع را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع تحت بار لرزه‌ای با توان سه قطر شمع افزایش می‌یابد (به عبارت دیگر: $M_{\max} \propto D_{\text{pile}}^3$). دی لورا و ماندولینی^۳ نیز با بررسی پاسخ لرزه‌ای شمع در لایه خاک با سختی متغیر، دریافتند که بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع‌های مدفون در این لایه‌ها با توان $3,2$ قطر شمع افزایش می‌یابد [۳۳]. بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته در پژوهش حاضر نیز، وجود رابطه‌ای قوی بین بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع و قطر شمع را تایید می‌نماید. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که افزایش قطر شمع منجر به افزایش بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع می‌گردد و این افزایش با توانی از قطر شمع متناسب است؛ به عبارت دیگر:

- 1 Nikolaou
- 2 Maiorano
- 3 Di Laora and Mandolini



شکل ۱۰. تاثیر طول شمع بر توزیع لنگر خمشی ناشی از بار لرزه‌ای

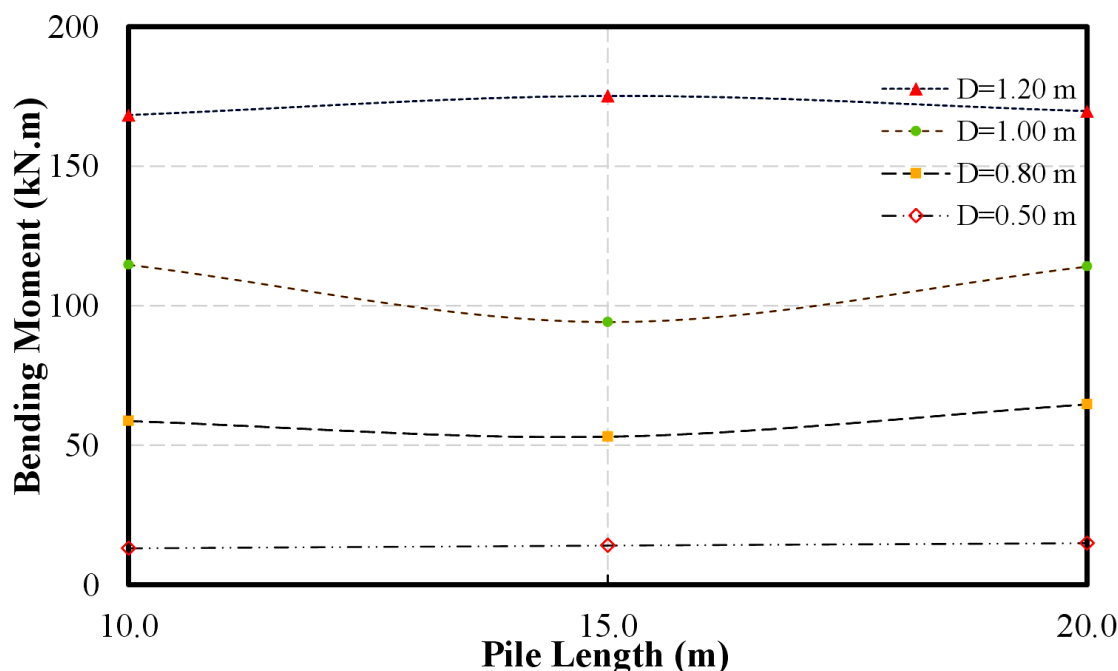
Fig. 10. Effect of pile length on the diagram of pile bending moment

در منحنی S شکل، یک ماکزیمم موضعی^۱ در سرشمع رخ می‌دهد، سپس میزان لنگر خمشی کاهش می‌یابد تا به یک مینیمم موضعی^۲ در عمق حدود یک سوم طول شمع برسد؛ بعد از این نقطه لنگر خمشی مجدداً افزایش می‌یابد تا به یک ماکزیمم موضعی در عمق حدود دو سوم طول شمع برسد. در اعماق پایین‌تر از این نقطه، لنگر خمشی شمع روند کاهشی دارد تا به کمترین میزان خود در نوک شمع برسد. در منحنی یکنواخت، بیشینه لنگر خمشی در سرشمع رخ می‌دهد و لنگر خمشی تدریجاً کاهش می‌یابد تا به کمترین میزان خود در نوک شمع برسد.

۴-۲- تاثیر طول شمع

توزیع پوش لنگر خمشی ایجاد شده در شمع برای شمع‌های با طول متفاوت در شکل ۱۰ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی توزیع لنگر خمشی در طول شمع می‌تواند به دو شکل متفاوت طبقه‌بندی گردد. منحنی‌های "S شکل" و منحنی‌های "یکنواخت". برای مثال در شکل ۱۰ در نمودار توزیع لنگر خمشی برای شمع‌های با قطر ۱/۲ متر ($D=1.20\text{ m}$)، دیاگرام‌های توزیع لنگر مربوط به شمع‌های با طول ۱۰ متر و ۱۵ متر، یکنواخت و دیاگرام توزیع لنگر مربوط به شمع با طول ۲۰ متر، S شکل است.

1 Local Maximum
2 Local Minimum



شکل ۱۱. تغییرات لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در شمع با طول شمع

Fig. 11. Variation of the maximum bending moment vs. pile diameter

شکل ۸ و شکل ۱۰ نشان می‌دهند که شکل دیاگرام توزیع لنگر خمشی، هم به طول شمع و هم به قطر آن بستگی دارد. بنابراین به منظور پیش‌بینی شکل دیاگرام توزیع لنگر خمشی، پارامتر جدیدی که هم شامل طول شمع و هم شامل قطر شمع باشد، مورد نیاز است. این پارامتر به صورت نسبت طول به قطر شمع، L/D ، تعریف می‌گردد. مقایسه مقدار پارامتر L/D برای شمع‌های مختلفی که در این مطالعه مورد آنالیز قرار گرفتند، نشان می‌دهد که دیاگرام توزیع لنگر در شمع‌هایی که نسبت L/D آن‌ها کمتر از $12/5$ باشد، به صورت یکنواخت و در شمع‌هایی که نسبت L/D آن‌ها بیشتر از $12/5$ باشد، به صورت S شکل خواهد بود.

تاثیر طول شمع بر مقدار بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در شکل ۱۱ بررسی شده است. این شکل نشان می‌دهد که در محدوده طول‌های مورد بررسی در این پژوهش، یعنی طول‌های ۱۰ الی ۲۰ متر، طول شمع تاثیر چندان قابل توجهی بر مقدار بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده ندارد و تاثیر طول شمع بر مقدار ماکزیمم لنگر خمشی ایجاد شده در شمع، کمتر از 15% است. شکل ۱۱ هم‌چنین نشان می‌دهد که روند این تغییر اندک لنگر خمشی بیشینه با طول شمع هم، وابسته به قطر شمع، متفاوت است. برای شمع با قطر $0/5$ متر، با افزایش طول شمع، لنگر خمشی اندکی افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که برای شمع با قطر $0/5$ متر، دیاگرام توزیع لنگر برای هر سه طول مختلف شمع به صورت S شکل است. برای شمع‌های با قطر $0/8$ متر و $1/0$ متر، دیاگرام توزیع لنگر برای شمع‌های با طول ۱۵ متر و ۲۰ متر به صورت S شکل و برای شمع به طول ۱۰ متر به صورت یکنواخت است. برای شمع به قطر $1/2$ متر، دیاگرام توزیع لنگر برای شمع به طول ۲۰ متر به صورت S شکل و برای شمع‌های با طول ۱۰ متر و ۱۵ متر به صورت یکنواخت است.

برای تمام شمع‌ها لنگر خمشی مینیمم در نوک شمع^۱ رخ می‌دهد؛ زیرا شمع‌ها اتکایی^۲ نبوده و شناور هستند. شکل ۱۰ هم‌چنین نشان می‌دهد که طول شمع تاثیر قابل توجهی بر موقعیت رخداد بیشینه لنگر خمشی در شمع دارد. لنگر خمشی ماکزیمم برای شمع‌هایی که دیاگرام توزیع لنگر خمشی در آن‌ها شکل یکنواخت دارد، در سر شمع رخ می‌دهد. اما برای شمع‌هایی که نمودار توزیع لنگر خمشی در آن‌ها به صورت S شکل است، لنگر خمشی ماکزیمم در عمق حدود دو سوم طول شمع رخ می‌دهد. تنها استثنا در این مورد، شمع با قطر $1/0$ متر و طول ۱۵ متر است که علی‌رغم S شکل بودن دیاگرام توزیع لنگر خمشی، ماکزیمم لنگر خمشی در سر شمع رخ داده است.

- 1 Pile End
- 2 End Bearing

مکان رخداد لنگر خمشی بیشینه دارد.

➤ منحنی توزیع لنگر خمشی در طول شمع می‌تواند به دو شکل متفاوت طبقه‌بندی گردد. دیاگرام توزیع لنگر در شمع‌هایی که نسبت طول به قطر آن‌ها کمتر از ۱۲/۵ باشد، به صورت یکنواخت و در شمع‌هایی که نسبت طول به قطر آن‌ها بیشتر از ۱۲/۵ باشد، به صورت S شکل خواهد بود.

منابع

- [1] K. Tokimatsu, H. Suzuki, M. Sato, Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (2005) 753–762.
- [2] L. De Sanctis, R. M. S. Maiorano, S. Aversa, A method for assessing kinematic bending moments at the pile head, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(10) (2010) 1133–1154.
- [3] A. Asadi, M. Sharifipour, K. Ghorbani, Numerical Simulation of Piles Subjected to Lateral Spreading and Comparison with Shaking Table Results, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 50(2) (2017) 277–292.
- [4] G. A. L. Jiménez, D. Dias, O. Jenck, Effect of the soil–pile–structure interaction in seismic analysis: case of liquefiable soils, *Acta Geotechnica*, 14(5) (2019) 1509–1525.
- [5] K. Chatterjee, D. Choudhury, V. D. Rao, H. G. Poulos, Seismic response of single piles in liquefiable soil considering P-delta effect, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(6) (2019) 2935–2961.
- [6] D. Forcellini, Numerical simulations of liquefaction on an ordinary building during Italian (20 May 2012) earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(9) (2019) 4797–4823.
- [7] Y. Wang, R. P. Orense, Numerical analysis of seismic performance of inclined piles in liquefiable sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139 (2020): 106274.
- [8] A. Kavand, A. Sadeghi Meibodi, 3-Dimensional Numerical Modelling of Pile Group Response to Liquefaction-induced Lateral Spreading, *Amirkabir*

برای شمع با قطر ۰/۸ متر و ۱/۰ متر، لنگر خمشی بیشینه با افزایش طول شمع اندکی کاهش و سپس اندکی افزایش می‌یابد و برای شمع با قطر ۱/۲ متر، لنگر خمشی بیشینه با افزایش طول شمع اندکی افزایش و سپس اندکی کاهش می‌یابد.

تاثیر طول شمع بر مقدار بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع، تنها در تعداد اندکی از مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. نیکولا و همکاران [۳۱] و کواداس و گرتاس [۳۴] با استفاده از روش BDWF رفتار لرزه‌ای شمع مدفون در خاک دولایه را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش طول شمع منجر به افزایش لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در شمع می‌گردد. به عبارت دیگر، نتیجه به دست آمده در پژوهش حاضر، با نتیجه به دست آمده توسط آنان متفاوت است. دلیل این تفاوت می‌تواند در متفاوت بودن پروفیل در نظر گرفته شده برای خاک در این پژوهش‌ها و یا تفاوت در نحوه شبیه‌سازی محیط خاک باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با انجام مدل‌سازی‌های عددی کاملاً غیرخطی سه‌بعدی در حوزه زمان، پاسخ شمع منفرد مدفون در خاک رسی به بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و مطالعه پارامتریک برای ارزیابی تاثیر مشخصات هندسی شمع بر پاسخ لرزه‌ای آن صورت گرفت. برای انجام مدل‌سازی‌ها نرم‌افزار FLAC^{3D} مورد استفاده قرار گرفت. به منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر مساله، مقاومت و سختی لایه خاک به صورت متغیر با عمق در نظر گرفته شد. همچنین رفتار غیرخطی خاک با اعمال مدل رفتاری الاستوپلاستیک و نیز در نظر گرفتن میرایی هیسترتیک محیط خاک با کاهش مدول برشی خاک با افزایش کرنش برشی شبیه‌سازی شد. از تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته در این تحقیق، موارد زیر نتیجه‌گیری می‌گردد:

➤ افزایش قطر شمع منجر به افزایش بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در شمع می‌گردد. این افزایش بیشینه لنگر خمشی با توانی از قطر شمع متناسب است. در این رابطه، توان قطر شمع عدد ثابتی نیست و وابسته به طول شمع از ۲/۷۵ تا ۳/۰۰ متغیر است.

➤ در محدوده طول شمع مورد بررسی در این پژوهش، تاثیر طول شمع بر مقدار لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در شمع چندان قابل توجه نیست و کمتر از ۱۵٪ می‌باشد؛ اما طول شمع تاثیر بسیار قابل توجهی در

- Seismic fragility assessment of large-scale pile-supported wharf structures considering soil-pile interaction, *Engineering Structures*, 186 (2019) 270-281.
- [20]K. J. Bentley, M. H. El Naggar, Numerical analysis of kinematic response of single piles, *Canadian Geotechnical Journal*, 37 (2000) 1368–1382.
- [21]Y. Cai, P. Gould, C. Desai, Nonlinear analysis of 3D seismic interaction of soil–pile–structure systems and application, *Engineering Structures*, 22(10) (2000) 191-199.
- [22]B. K. Maheshwari, K. Z. Truman, P. L. Gould, M. H. El Naggar, Three-dimensional nonlinear seismic analysis of single piles using finite element model: effects of plasticity of soil, *International Journal of Geomechanics*, 5(1) (2005) 35-44.
- [23]B. K. Maheshwari, K. Z. Truman, M. H. El Naggar, P. L. Gould, Three-dimensional finite element nonlinear dynamic analysis of pile groups for lateral transient and seismic excitations, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1) (2004) 118-133.
- [24]M. M. Ahmadi, M. Mashinchian, S. Hadei, Parametric Study of Kinematic Interaction in Pile-Cohesive Soil under Dynamic Loads, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(7) (2021) 2765-2780.
- [25]Itasca, *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)*, Version 3.0, Itasca Consulting Group, 2002, Mineapolis, Minnesota, USA.
- [26]J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, 1996, New York, USA.
- [27]M. Mucciacciaro, S. Sica, Nonlinear soil and pile behaviour on kinematic bending response of flexible piles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107 (2018) 195-213.
- [28]J. Sun, R. Golesorkhi, H. B. Seed, *Dynamic moduli and damping ratio for cohesive soils*, 1988, University of California Berkeley-Earthquake Engineering Research Center.
- [29]S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, 1996, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Journal of Civil Engineering*, 52(5) (2020) 1061-1078.
- [9]H. R. Saba, M. Salehi, M. Baniasadi, Effect of the Pile & Cap Connection Type in Liquefiable Sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(1) (2021) 411-418.
- [10]A. Asgari, F. Ranjbar, H. Akbarzadeh Bengar, Using Pile Group to Mitigate Lateral Spreading in Uniform and Stratified Liquefiable Sand Strata: Three-Dimensional Numerical Simulation, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(7) (2021) 3067-3086.
- [11]K. B. Ladhane, V. A. Sawant, Effect of pile group configurations on nonlinear dynamic response, *International Journal of Geomechanics*, 16(1) (2016): 04015013.
- [12]F. Dezi, H. Poulos, Kinematic bending moments in square pile groups, *International Journal of Geomechanics*, 17(3) (2017): 04016066.
- [13]R. Saha, S. C. Dutta, S. Haldar, S. Kumar, Effect of soil-pile raft-structure interaction on elastic and inelastic seismic behavior, *Structures*, 26 (2020) 378-395.
- [14]J. Wu, K. Wang, M. H. El Naggar, Dynamic soil reactions around pile-fictitious soil pile coupled model and its application in parallel seismic method, *Computers and Geotechnics*, 110 (2019) 44-56.
- [15]M. Zhang, C. Zhao, C. Xu, Lateral dynamic response of pile group embedded in unsaturated soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142 (2021): 106559.
- [16]P. Wang, Y. Xu, X. Zhang, A substructure method for seismic responses of offshore wind turbine considering nonlinear pile-soil dynamic interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 144 (2021): 106684.
- [17]Y. Huang, P. Wang, M. Zhao, C. Zhang, X. Du, Dynamic responses of an end-bearing pile subjected to horizontal earthquakes considering water-pile-soil interactions, *Ocean Engineering*, 238 (2021): 109726.
- [18]A. S. Hokmabadi, B. Fatahi, B. Samali, Assessment of soil–pile–structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations, *Computers and Geotechnics*, 55 (2014) 172-186.
- [19]L. Su, H. P. Wan, Y. Dong, D. M. Frangopol, X. Z. Ling,

- seismic excitation, Canadian Geotechnical Journal, 46(5) (2009) 571-584.
- [33] G. Mylonakis, R. Di Laora, A. Mandolini, The role of pile diameter on earthquake-induced bending, Perspectives on European Earthquake Engineering, Springer, 2014, 533-556.
- [34] M. Kavvadas, G. Gazetas, Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil, Geotechnique, 43(2) (1993) 207-222.
- [30] A. Sanaeirad, A. Gholaminejad, Factors effecting the kinematic bending moment in the piles group, Sharif Journal of Civil Engineering, 32.2(3.2) (2016) 85-94 (in Persian).
- [31] S. Nikolaou, G. Mylonakis, G. Gazetas, T. Tazoh, Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements, Geotechnique, 51(5) (2001) 425-440.
- [32] R. M. S. Maiorano, L. De Sanctis, S. Aversa, A. Mandolini, Kinematic response analysis of piled foundations under

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Hadei, M. M. Ahmadi, *Nonlinear Three-Dimensional Numerical Study of Pile Seismic Behavior: Effect of Pile Geometrical Parameters*, Amirkabir J. Civil Eng., 55(9) (2023) 1863-1882.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21398.7715

