



Investigation of Effective Parameters on the Settlement and Lateral Spreading of Shallow Foundations on the Sloping Liquefiable Soil

S. Pourabbasi, A. Asgari*

Department of Engineering and Technology University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ABSTRACT: The settlement and lateral spreading of the building due to the occurrence of the liquefaction phenomenon in previous earthquakes have caused significant damage to structures and their infrastructure. Numerous studies have been performed to evaluate the settlement of shallow foundations located on the liquefiable soils as a horizontal model. In fact, in most cases, there is a mild slope in the layers that can be affected by the settlement and lateral spreading of the foundation. In this research, the displacements of the structure and shallow foundation/ground surface on the sloping liquefiable three-layers soil with different relative densities have been investigated parametrically, applying three-dimensional finite element (FE) simulations using OpenseesSP. The layers are subjected to the realistic destructive event with scaled peak ground acceleration of 0.35g. A multi-yield-surface plasticity model was selected for the analysis conducted in this research based on constitutive laws applicable to all types of soils. The purpose of this study is to investigate the effect of parameters including the slope of soil layers, the density of liquefiable layer, groundwater level, foundation contact pressure, and length to width ratio of the foundation on the settlement and lateral spreading of the liquefiable sloping model. The results are shown that increasing the slope of the ground increases the difference between the settlement of the two sides of the foundation and increases the lateral displacements. Decreasing the relative density of the liquefiable layer increases the excess pore water pressure and the settlement of shallow foundation. The results also are shown that lower the groundwater level is increased the effective stress and reduces the vertical and horizontal displacements. Besides, increasing the contact pressure is amplified the foundation of static and dynamic volumetric strains and increases the settlements. Shallow foundations with larger length-to-width ratios experience lower settlements due to smaller shear strains.

Review History:

Received: Dec.20, 2020

Revised: Apr. 06, 2021

Accepted: Apr. 07, 2021

Available Online: Apr. 18, 2021

Keywords:

Lateral spreading

Settlement

Sloping model

Three-dimensional simulation

Finite element method.

1- Introduction

Lateral spreading of mildly sloping ground and liquefaction induced by earthquakes can cause major destruction to foundations and buildings, mainly as a result of excess pore water pressure generation and softening of the subsoil. Recently, most of researches has been done on the lateral spreading of soils with mildly slopes, but a comprehensive investigation has not yet been performed to evaluate the effects of lateral spreading of structures on shallow foundations with considering the soil-foundation-structure interaction effect. Of course, there are many studies related to the effect of mild angle on the seismic responses with soil-pile interaction [1-3]. Although recent advances in computational modeling of liquefaction-induced ground deformation are quite promising, challenges remain in this critical yet unresolved problem. On the other hand, some recent advances in computational modeling of liquefaction-induced ground deformation were focused on the structure located on the soil layers without any slope ground [4, 5]. In this study, the structure and foundation are modeled in three dimensions using the finite element method on sloping liquefiable soil layers and the effects of

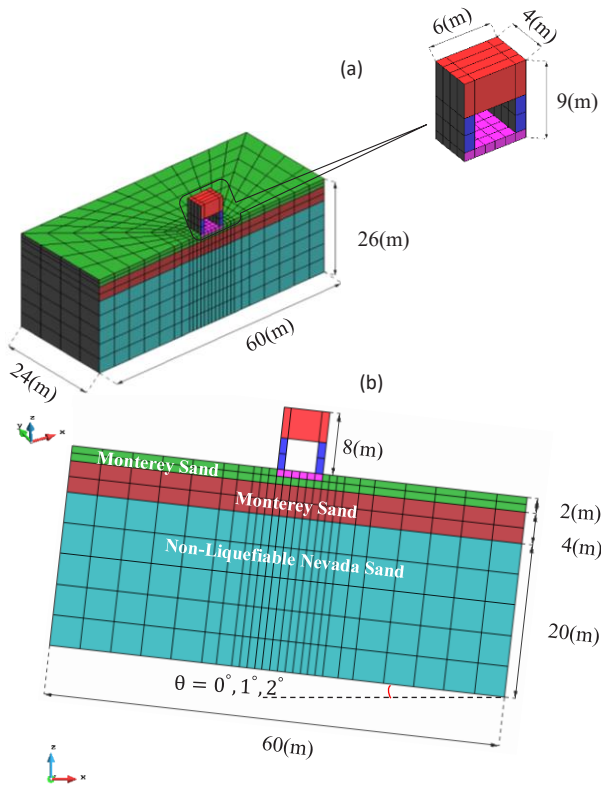
parameters such as slope ground angle, liquefiable layer density, groundwater-surface position, contact pressure on the foundation and the ratio of length to width of the foundation on the settlement and lateral spreading has been investigated quantitatively and qualitatively by considering the effects of structure-foundation-soil interaction.

2- Numerical modeling

To model the structure and the soil under shallow foundation, we used the finite element parallel Opensees [6] software. As shown in Figure 1, the soil model has a length and width of 60 and 48 meters, respectively and a height of 26 m, which consists of 1720 elements and 2230 nodes. The top layer is Monterey sand with high permeability and density of 85% with 2 meters thickness and the middle and bottom layers of Nevada sand with a density of 50% and 90% and a thickness of 4 and 20 meters, respectively. The groundwater level is considered at a depth of one meter from the ground surface. Besides, the models are simulated with a mildly sloping ground from 0 to 2° relative to the horizon and also are subjected to the scaled Port Island (1995 Kobe) event with PGA=0.35g along the base in the longitudinal direction (shown in Figure 2). In 3D, the soil domain is represented by

*Corresponding author's email: a.asgari@umz.ac.ir





**Fig. 1. (a) Meshing soil-structure 3D view
(b) Meshing soil-structure side view**

20-8 node, effective-stress, fully coupled (solid-fluid) brick elements and the soil foundation, as well as structures, were modeled using 8-node brick elements with three degrees of freedom and materials with elastic properties of steel and aluminum. The height of the structure is 8 m and also the length and width of the foundation are 8 and 6 meters and its thickness is 1 m, respectively. The contact pressure of the foundation are varied from 80 to 180 kPa and the frequency of the structure with a fixed base is equal to 2.5 Hz.

3- Results and Discussion

The parameters studied in this research are shown in Table 1. To examine slope ground angle effects on the seismic response, vertical and horizontal displacements time history at the left, and right edge of the foundation for depth 1 m are depicted in Figure 3(a-c). According to this figure, it is observed that with increasing the slope angle, the settlement on the right side of the foundation is remarkably increased, but in contrast to the left side of the foundation is reduced. The reason can be attributed to the movement of soil mass in sloping lands due to the direction of the slope. The excess pore pressure-time histories of the middle of the liquefiable soil layer are depicted in Figure 3(d), where the ground slope angle was varied from 0 to 2°; there is an evident tendency for the excess pore pressure to decrease and lateral displacement to increase as the ground slope angle increases. Lateral displacement would be expected to decrease with an increase in pore pressure dip in ground angle that expect; however, the

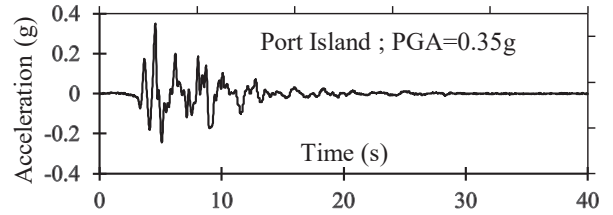


Fig. 2. Horizontal acceleration history for the Kobe (1995) with scaled PGA of 0.35 g, of the input events

Table 1. Input parameters in this research

Input parameters	value
first layer density (%)	85
second layer density (%)	30, 50*, 68
Third layer density (%)	90
Slope (Degree)	0, 1*, 2
Groundwater level(m)	-1*, -2, -4
Foundation contact pressure (kPa)	80, 130*, 180
Ratio of length to width foundation	1, 1.33*, 2

*Parameters related to the base model

presence of a driving static shear stress component induced by ground slope increases lateral displacement, resulting in a greater lateral displacement than the horizontal model($\alpha_f = 0^\circ$). For more detail of the results, refer to Ref. [7].

4- Conclusions

The results of this study show the following:
Increasing the slope intensifies the static shear stresses due to the weight of the soil mass in the direction of the slope and increases the lateral displacements of the foundation. Also, increasing the slope of the ground increases the difference in vertical displacements between the two sides of the foundation and increases the rotation of the foundation. As the density of the liquefied layer decreases, the amount of settling increases, which is due to the contractile tendencies of soft sand, which increases the excess pore pressure and cyclic shear strains, and strengthens the volumetric and shear strains and increases the settling. The decrease in groundwater level has reduced the vertical and horizontal displacements of the foundation, which is due to the increase of effective stress. Due to the increase of contact pressure, the foundation settlement increases, which can be attributed to the increase in static and dynamic shear stresses transferred from the foundation to the soil, which strengthens the static and dynamic volumetric strains and increases the settlement. Foundations with larger length-to-width ratios experience smaller settlement due to smaller shear strains and reduced off-plate drainage potential due to the increased length-to-width ratio of the foundation.

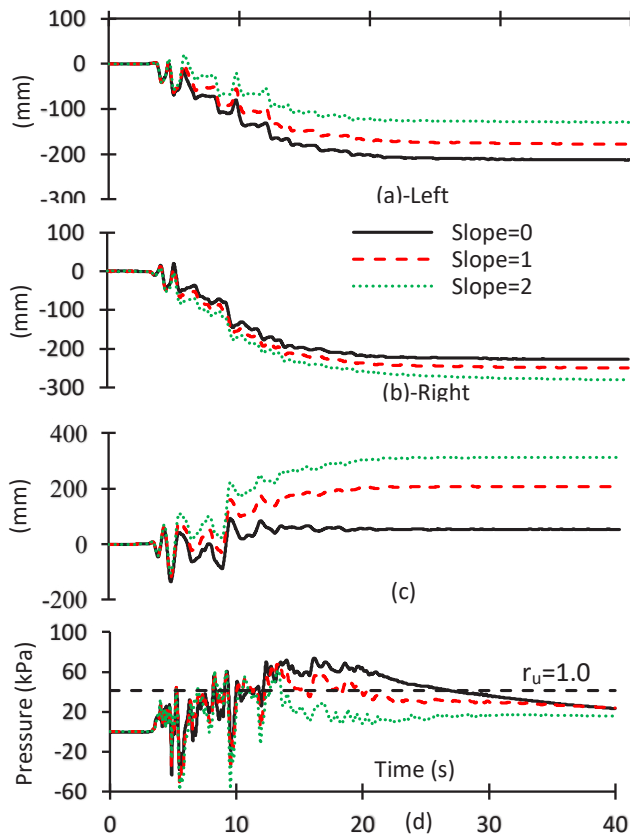


Fig. 3. (a, b) Vertical displacement time history at the left, and right edge of foundation (c) Time history of lateral displacement for depth 1 m (d) Excess pore pressure at the middle of liquifiable layer for various ground inclination angle $\theta=1-2^\circ$.

References

- [1] D. Huang, G. Wang, F. Jin, Effectiveness of pile reinforcement in liquefied ground, *Journal of Earthquake Engineering*, 24(8) (2020) 1222-1244.
- [2] A. Asgari, M. Oliaei, M. Bagheri, Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51 (2013) 77-96.
- [3] S.M. Haeri, A. Kavand, I. Rahmani, H. Torabi, Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 38 (2012) 25-45.
- [4] Z. Karimi, S. Dashti, Z. Bullock, K. Porter, A. Liel, Key predictors of structure settlement on liquefiable ground: a numerical parametric study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113 (2018) 286-308.
- [5] Z. Karimi, S. Dashti, Seismic performance of shallow founded structures on liquefiable ground: validation of numerical simulations using centrifuge experiments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(6) (2016) 04016011.
- [6] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006).
- [7] S. pourabbasi, A. asgari, Investigation of Effective Parameters on the Settlement and Lateral Spreading of Shallow Foundations on the Sloping Liquefiable Soil, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2020).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Pourabbasi, A. Asgari, *Investigation of Effective Parameters on the Settlement and Lateral Spreading of Shallow Foundations on the Sloping Liquefiable Soil*, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 243-246.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19292.7159





بررسی پارامترهای مؤثر بر نشست و گسترش جانبی شالوده‌های سطحی واقع بر لایه‌های خاکی شیب‌دار قابل روانگرا

سینا پورعباسی، علی عسگری*

دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

کلمات کلیدی:

گسترش جانبی
نشست
لایه‌های خاکی شیب‌دار
شبیه‌سازی سه‌بعدی
روش المان محدود

خلاصه: جابجایی‌های ساختمان در اثر وقوع پدیده‌ی روانگرایی در زلزله‌های گذشته باعث بروز خسارات قابل توجه‌ای به سازه‌ها و زیرساخت‌های آن‌ها شده است. با وجود انجام مطالعات مختلف توسط پژوهشگران، همچنان رویکرد جامعی برای ارزیابی هم‌زمان اثر گسترش جانبی و نشست سازه بر روی شالوده‌های سطحی وجود ندارد. در این پژوهش سعی شده است جابجایی‌های شالوده‌ی سطحی بر روی لایه‌های خاکی شیب‌دار با درصد تراکم‌های مختلف به صورت پارامتریک با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، ابتدا مدل عددی با نتایج آزمایش سائتریفیوژ صحت-سنجی شده و سپس پارامترهایی نظیر: شیب زمین، تراکم لایه‌ی روانگرا، سطح آب زیرزمینی، فشار تماسی و نسبت طول به عرض شالوده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندک در شیب زمین از ۰ به ۲ درجه میزان جابجایی‌های افقی به دلیل گسترش جانبی به شدت افزایش می‌یابد. افزایش تراکم لایه‌ی روانگرا در لایه‌های خاکی شیب‌دار متوسط نشست شالوده را کاهش داده و در مقابل میزان دوران شالوده را افزایش می‌دهد. کاهش سطح آب زیرزمینی نیز باعث کاهش نشست می‌شود، اما در برخی از موارد به خصوص در مدل‌های بدون سازه میزان نشست را افزایش می‌دهد. دلیل آن این است که افزایش وزن مؤثر مانند یک اضافه تنش روی خاک عمل کرده و تنش‌های برشی منتقل شده به لایه‌ی روانگرا را افزایش می‌دهد، که در نتیجه کرنش‌های حجمی خاک تقویت شده و نشست در نواحی دور از سازه افزایش جزئی پیدا می‌کند. همچنین شالوده‌ها با نسبت طول به عرض بزرگ‌تر، به علت ایجاد کرنش‌های برشی کوچک‌تر نشست‌های کمتری دارند.

۱- مقدمه

مهندسی شود. با این وجود هنوز رویکرد جامعی برای ارزیابی اثرات گسترش جانبی سازه‌ها بر روی شالوده‌های سطحی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-شالوده-سازه ارائه نشده است، و بیشتر پژوهش‌هایی که در این حوزه صورت گرفته مربوط به اندرکنش خاک و شمع می‌باشند [۳-۸].

مشاهداتی که به صورت صحرائی بر روی ساختمان‌ها طی زلزله‌های ۱۹۶۴ نیگیتای ژاپن و ۱۹۹۰ لوزان^۲ فیلیپین صورت گرفت نشان داد که فشارهای متمرکز و تنش‌های برشی وارده توسط سازه به خاک بر میزان نشست تأثیر می‌گذارند [۹]. بررسی ساختمان‌ها در طی زمین‌لرزه‌ی ۱۹۹۹ کوچالی^۳ [۱۰] بیانگر این است که نشست سازه متناسب با فشار تماسی و نسبت ارتفاع به پهناى ساختمان می‌باشد. شواهدی که در طول زلزله‌ی

روانگرایی و گسترش جانبی زمین ناشی از آن باعث بروز خسارت‌های زیادی در ساختمان‌ها می‌شوند، حتی ساختمان‌هایی که بر اساس آیین‌نامه‌های پیشرفته طراحی شده‌اند. به عنوان مثال می‌توان به نشست‌ها و جابجایی‌های زیاد در ساختمان‌های قرار گرفته بر روی شالوده‌های سطحی در اثر روانگرایی خاک، طی زلزله‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۰ کریست چرچ^۱ اشاره کرد، که این خسارت‌ها در زمین‌های شیب‌دار به دلیل گسترش جانبی روانگرایی شدیدتر بوده است [۲ و ۱]. در بسیاری از موارد تعمیر ساختمان‌های آسیب دیده مقرون به صرفه نبوده و باید ساختمان تخریب شود. انتظار می‌رود در آینده در اثر زلزله‌هایی که در شهرهای بزرگ اتفاق می‌افتند، گسترش جانبی ناشی از روانگرایی باعث ایجاد خسارت‌های زیادی به ساختمان‌ها و تأسیسات

2 Niigata
3 Luzon
4 Kocaeli

1 Christchurch

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.asgari@umz.ac.ir



که بیشتر نشست شالوده مربوط به زمانی است که خاک دچار بازتحکیم نشده است (در طول مرحله‌ی ۱ و ۲). همچنین نشست شالوده لزوماً متناسب با عمق لایه روانگرا نیست بلکه مربوط به میزان روانگرایی در آن لایه است. به طور کلی، با وجود محدودیت‌هایی که مدل‌های فیزیکی دارند اما بینش‌های ارزشمندی را در بررسی مکانیزم‌های حاکم بر نشست و روانگرایی خاک زیر شالوده ارائه می‌دهند. همچنین می‌توان از این نتایج به منظور اعتبارسنجی مدل‌های پیشرفته‌ی عددی قبل از شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده‌تر به منظور بررسی تعداد متغیرهای بیشتر استفاده کرد.

مدل‌سازی‌های عددی و تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی می‌توانند بینش ارزشمندی را در بررسی رفتار غیرخطی خاک، اندرکنش خاک و سازه و عملکرد سازه‌ها بر روی خاک‌های روانگرا ارائه دهند. شروع روانگرایی، اثرات بعد از روانگرایی و حرکات زمین و سازه می‌توانند به صورت یک تجزیه و تحلیل عددی در حوزه‌ی زمان مدل‌سازی شوند. با این وجود، این مدل‌های عددی بسیار پیچیده هستند و پارامترهای زیادی دارند، بنابراین باید قبل از استفاده، اعتبارسنجی شوند. اخیراً مطالعات عددی که به دنبال توصیف رفتار شالوده‌ها در زمین‌های روانگرا هستند، به طور قابل توجه‌ای پیچیده‌تر و دامنه‌ی وسیع‌تری دارند. لویز^۶ و همکاران [۱۷] برای نشان دادن اهمیت اثر اندرکنش خاک و سازه از یک شبیه‌سازی دو بعدی المان محدود الاستوپلاستیک استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در سازه‌ها با پای ثابت بیشتر تغییر شکل‌ها جانبی ناشی از تغییر شکل‌های خمشی اجزای سازه می‌باشند، در حالی که در سازه‌های قرار گرفته بر روی خاک تغییر شکل‌هایی که در سازه رخ می‌دهند ناشی از جابجایی‌های شالوده‌ی سطحی قرار گرفته بر روی خاک می‌باشند. کارامیتروس^۷ و همکاران [۱۸] با انجام شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نشست شالوده‌های سطحی قرار گرفته بر روی یک پروفیل خاک روانگرا را مورد ارزیابی قرار دادند. اگر چه نتایج و رویکرد این مطالعه کاملاً ارزشمند است، اما سازه در این مطالعه شبیه‌سازی نشده بود و اثر آن به صورت یک بار ثابت در نظر گرفته شد که به درستی نشان دهنده‌ی اثرات متقابل سازه و خاک نیست.

ماسدو^۸ و همکاران [۱۹] به منظور بررسی نشست ساختمان‌های دارای شالوده‌ی سطحی بر روی خاک روانگرا از یک شبیه‌سازی دو بعدی استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تراکم نسبی لایه‌ی روانگرا یک

توکوکانتو^۱ ژاپن [۱۱] به دست آمد نشان داد که خساراتی که اتفاق افتاد بیشتر ناشی از پدیده‌ی روانگرایی بود و حرکت زمین نقش کمتری در این خسارت‌ها داشته است. به طور کلی نتایج به دست آمده بر اهمیت حضور سازه و خصوصیات دینامیکی خاک زیرین آن اشاره دارد. با وجود اینکه می‌توان بینش ارزشمندی از مطالعات صحرایی به دست آورد، اما نمی‌توان تأثیر بسیاری از پارامترهای مؤثر بر نشست، گسترش جانبی و روانگرایی را تنها با مشاهدات موردی و تاریخچه‌ای تعیین کرد. بنابراین پژوهشگران برای بررسی دقیق‌تر و متنوع‌تر، رویکرد آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی را به موازات مشاهدات صحرایی در پیش گرفتند.

در مطالعات گذشته از آزمایش میز لرزان در مقیاس کوچک و آزمایش سانتریفیوژ برای بررسی تأثیر روانگرایی و گسترش جانبی استفاده شده است (به عنوان مثال مهرزاد [۱۲]، اورنگ [۱۳]، دشتی [۱۴ و ۱۵]، تسوکاموتو [۱۶]). یک سری آزمایش سانتریفیوژ توسط دشتی و همکاران [۱۵ و ۱۴] برای شناسایی مکانیسم‌های حاکم بر نشست بر روی خاک‌های روانگرا انجام شد. در این آزمایش از سه مدل سازه‌ی چند درجه آزاد با خصوصیات مختلف قرار گرفته بر روی خاک سه لایه با تراکم‌های مختلف استفاده شد و اهمیت نسبی پارامترهای مختلف (به عنوان مثال فشار تماسی شالوده، نسبت ارتفاع به پهنای سازه، تراکم و ضخامت لایه‌ی روانگرا و خصوصیات حرکت پایه) بر عملکرد سازه‌های قرار گرفته بر روی شالوده‌های سطحی ارزیابی شد. نتایج آزمایش نشان داد که نشست سازه متناسب با ضخامت لایه‌ی روانگرا نیست و بیشتر ناشی از شدت لرزش می‌باشد. همچنین هنگامی که اثر سازه تنها به صورت یک بار ثابت بر روی شالوده‌ی صلب در نظر گرفته می‌شود تأثیر خصوصیات دینامیکی سازه که بر روی نشست تأثیر می‌گذارند نادیده گرفته می‌شود. خصوصیات دینامیکی سازه مانند جرم، سختی به طور قابل توجه‌ای بر تولید فشار منفذی و میزان نشست تأثیر می‌گذارند. بنابراین در نظر گرفتن سازه بر روی خاک‌های روانگرا برای ارزیابی نشست و پارامترهای مؤثر بر آن ضروری می‌باشد. مهرزاد و همکاران [۱۲] با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ به بررسی تأثیر میزان روانگرایی بر نشست شالوده‌های سطحی بر روی ماسه‌ی روانگرا پرداختند. آن‌ها نشست شالوده را در سه فاز (۱) در طول تکان دادن (۲) در طول دوره زمانی پس از تکان دادن و قبل از بازتحکیم خاک (۳) در طول دوره‌ی بازتحکیمی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مشاهدات آن‌ها نشان داد

- 1 Tohoku-Kanto
- 2 Mehrzad
- 3 Orang
- 4 Dashti
- 5 Tsukamoto

- 6 Lopez
- 7 Karamitros
- 8 Macedo

بدون شیب بوده و اثرات گسترش جانبی دیده نشده است. اما در این پژوهش بر خلاف پژوهش‌های گذشته، سازه و شالوده به صورت سه بعدی به روش المان محدود بر روی لایه‌های خاکی قابل روانگرایی شیب‌دار مدل‌سازی شده است و اثرات پارامترهایی نظیر شیب زمین، تراکم لایه‌ی روانگرا، موقعیت سطح آب زیرزمینی، فشار تماسی بر روی شالوده و نسبت طول به عرض شالوده بر روی نشست و گسترش جانبی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-شالوده-خاک به طور کمی و کیفی بررسی شده است که به طور خاص، از نوآوری این پژوهش است. در این مطالعه، ابتدا مدل‌ها با کدنویسی در نرم افزار المان محدود اپنسیس اس‌پی^۵ شبیه‌سازی و سپس با نتایج آزمایش سانتریفیوژ صحت سنجی شده است. پس از صحت سنجی مدل رفتاری و شرایط مرزی در نظر گرفته شده، مدل‌ها تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی کوبه ۱۹۹۵ (پورت ایسلند) قرار گرفته و اثرات پارامترهای مورد نظر در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۲- صحت سنجی

به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی سیستم خاک-شالوده-سازه به صورت سه بعدی و برای حصول اطمینان از درستی مدل‌سازی، نتایج عددی با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی سانتریفیوژ دشتی و همکاران که در سال ۲۰۱۰ [۱۵ و ۱۴] انجام شده مورد مقایسه قرار گرفته است. در این آزمایش از سه نوع سازه A، B و C با ابعاد مختلف استفاده شده است. سازه‌ی A دارای طول و عرض ۹ و ۶ متر بوده و دارای ارتفاع ۵ متر می‌باشد. سازه‌ی B هم ارتفاع سازه‌ی A بوده و دارای طول و عرض ۱۸ و ۱۲ متر می‌باشد. سازه‌ی C از نظر ابعاد شالوده مشابه سازه‌ی A بوده و دارای ارتفاع ۹/۲ متر می‌باشد. در شکل ۱ هندسه‌ی کلی آزمایش و محل ابزار اندازه‌گذاری در آزمایش سانتریفیوژ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پروفیل خاک دارای سه لایه بوده که لایه‌ی اول از نوع ماسه موتتری با نفوذپذیری بالا و ضخامت ۲ متر و تراکم ۸۵ درصد، لایه‌ی دوم و سوم از نوع ماسه‌ی نوادا با ضخامت‌های ۳ و ۲۱ متر و به ترتیب با تراکم‌های ۳۰ (یا ۵۰) و ۸۵ درصد می‌باشند. لایه‌ی دوم و سوم کاملاً اشباع بوده و لایه‌ی اول تنها ۱ متر آن اشباع می‌باشد. عمق مدفون شالوده یک متر در نظر گرفته شد. مدل‌های آزمایش تحت شتاب گریز از مرکز g ۵۵ چرخانده شدند و زلزله‌ی پورت ایسلند (۱۹۹۵ کوبه)^۶ با بیشینه شتاب‌های g ۰/۱۷، g ۰/۳۸ و g ۰/۵۸ به پای مدل اعمال شده است. در این پژوهش برای اعتبارسنجی، سازه‌های

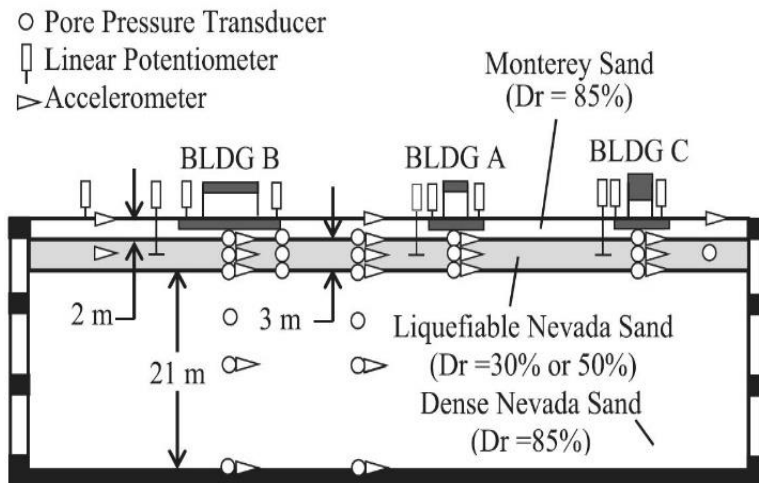
پارامتر بسیار مؤثر در افزایش و یا کاهش نشست می‌باشد، به خصوص هنگامی که تراکم لایه‌ی روانگرا از حالت متوسط به متراکم تغییر می‌کند، نشست ساختمان به طور قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد. عسگری^۱ و همکاران [۲۰] از مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های عددی برای ماسه‌ی سیلتی و سیلت با تراکم نسبی ۳۰ تا ۴۰ درصد زیر سربارهای مختلف که بر روی شالوده‌های سطحی اعمال می‌شود با مدل‌سازی در نرم افزار فلک^۲ استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که علاوه بر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای، تغییر شکل‌ها نیز نقش مهمی در پیش‌بینی پتانسیل روانگرایی لرزه‌ای بازی می‌کنند. این نشان می‌دهد که طرح‌های اصلاحی لرزه‌ای باید بر اساس معیارهای نسبت جابجایی‌های بحرانی باشد تا عامل ایمنی در برابر روانگرایی فراهم آید. ژنگ^۳ و همکاران [۲۱] از یک مطالعه‌ی المان محدود برای بررسی نشست سازه‌های قرار گرفته بر روی شالوده‌های سطحی استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ساختمان‌ها با پهنای بیشتر و سبک‌تر تمایل به نشست کمتری دارند همچنین کاهش نشست ناشی از روانگرایی، بیشتر در اثر افزایش تراکم نسبی و کاهش ضخامت لایه‌ی روانگرا می‌باشد.

کریمی^۴ و دشتی [۲۳ و ۲۲] با استفاده از یک مطالعه‌ی عددی سه بعدی به بررسی پارامترهای مختلف خاک و سازه تأثیر آن‌ها بر نشست شالوده پرداختند. آن‌ها در این مطالعه طیف وسیعی از پارامترهای مختلف که بر روی نشست تأثیر می‌گذارند (از جمله چند لایه بودن خاک و خصوصیات مختلف خاک زیر شالوده، خصوصیات شالوده و عمق قرارگیری شالوده، خصوصیات سازه، دوره‌ی تناوب، ارتفاع مؤثر سازه و نسبت ارتفاع به پهنای جرم اینرسی، شدت‌های مختلف حرکت زمین، محتوای فرکانسی مختلف و مدت زمان لرزش) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که شدت حرکت زمین و تراکم نسبی خاک بیشترین تأثیر را بر نشست شالوده می‌گذارند و در مقابل به ترتیب تأثیر دوره‌ی تناوب، جرم مؤثر سازه، ارتفاع سازه و فشار تماسی کمتر می‌باشد. تمامی پژوهش‌های بیان شده با آن که نتایج ارزشمندی را ارائه داده‌اند اما در هیچ‌کدام از آن‌ها اثرات شیب زمین و گسترش جانبی بررسی نشده است.

در پژوهش‌های گذشته جهت ارزیابی گسترش جانبی خاک قابل روانگرا، اثرات اندرکنش سازه-شالوده-خاک بررسی نشده است. از طرفی دیگر، در اکثر پژوهش‌هایی که سازه بر روی خاک واقع شده است، لایه‌های خاک

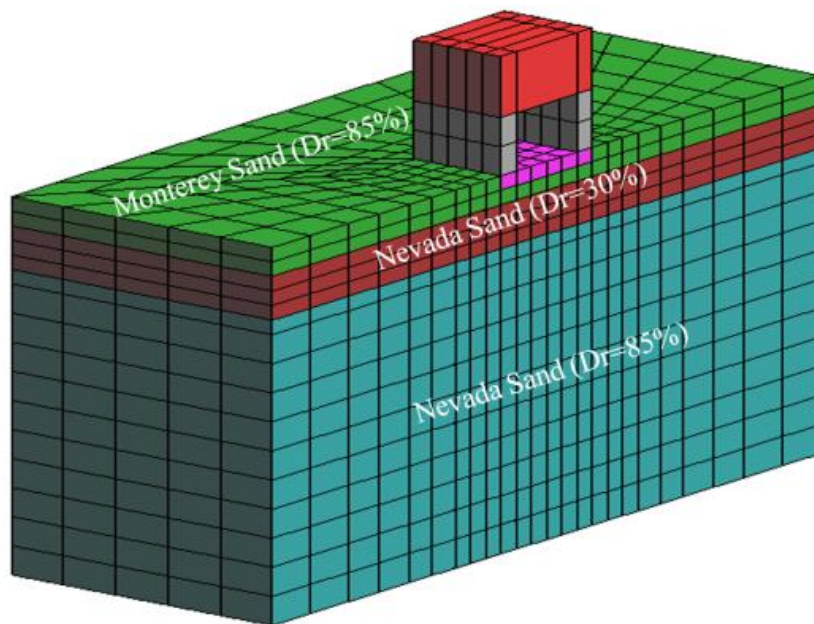
- 1 Asgari
- 2 FLAC2D
- 3 Zheng
- 4 Karimi

5 OpenSeesSP
6 Port Island(1995Kobe)



شکل ۱. هندسه کلی و موقعیت ابزار اندازه‌گیری آزمایش سانتریفیوژ دشتی و همکاران [۱۵]

Fig.1. Centrifuge model layout with instrumentation location (Dashti & et al) [15]

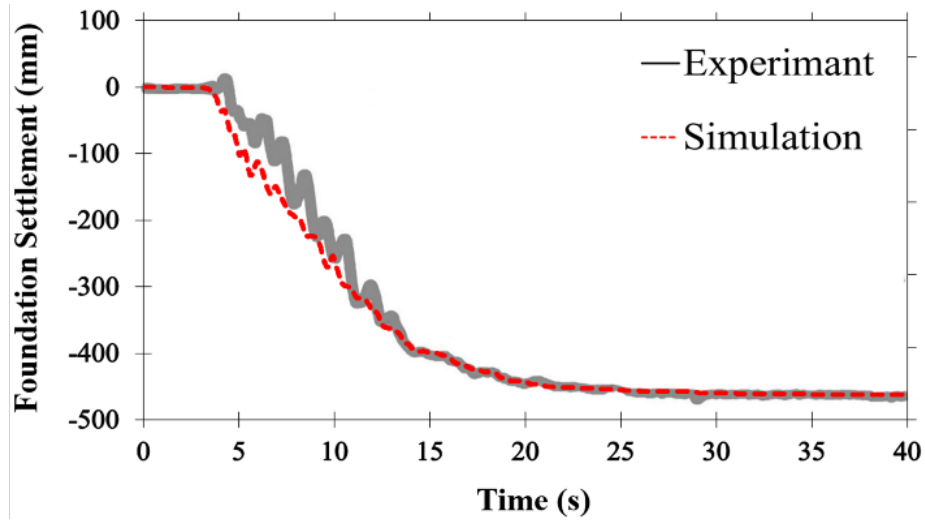


شکل ۲. مدل عددی ساخته شده برای اعتبار سنجی آزمایش سانتریفیوژ دشتی و همکاران

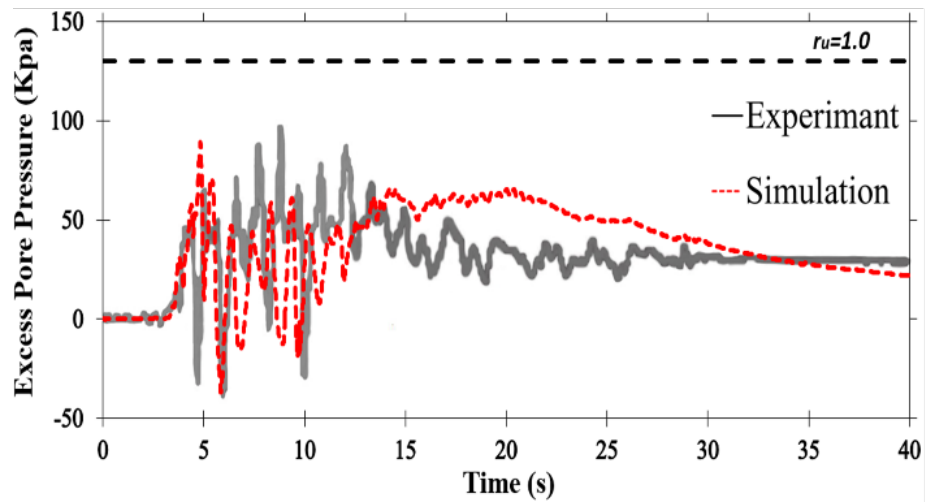
Fig. 2. Numerical model of the soil–foundation–structure system for validation of centrifuge test (Dashti & et al.) [15]

این امر نشان می‌دهد تمامی عوامل مؤثر در نظر گرفته شده بر روی پاسخ لرزه‌ای خاک از جمله مدل رفتاری و پارامترهای آن و همچنین المان‌های مدل و شرایط مرزی آن در حد قابل قبولی مناسب می‌باشند.

A و C به صورت عددی شبیه‌سازی شدند (شکل ۲) و نتایج آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق مطلوبی دارند، که



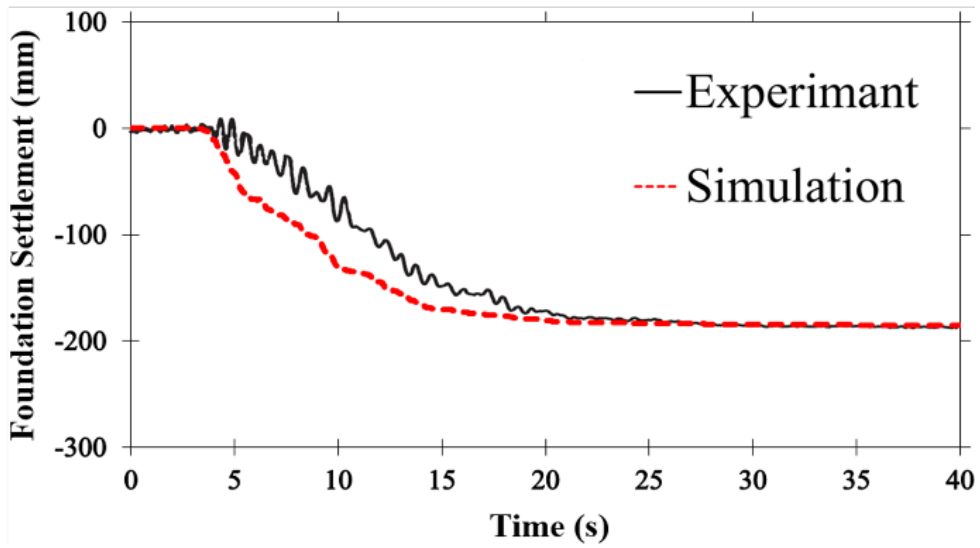
(الف)



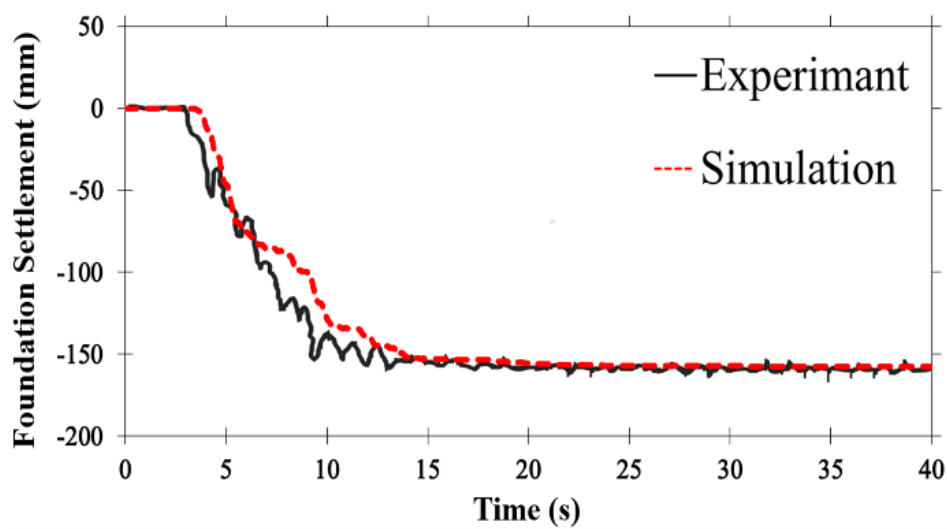
(ب)

شکل ۳. مقایسه نتیجه عددی و آزمایشگاهی: الف) تغییرات نشست سازه‌ی C (PGA=۰.۵۸g) ، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای سازه‌ی C (PGA=۰.۵۸g)

Fig. 3. Comparison of numerical and experimental results. a) time history of foundation settlement and b) excess pore pressure changes under the structure C (PGA=0.58g)



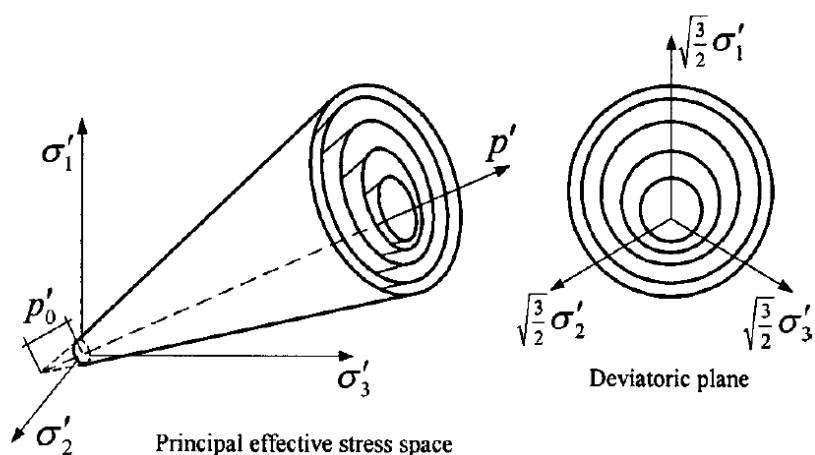
(الف)



(ب)

شکل ۴. مقایسه نتیجه عددی و آزمایشگاهی: الف) تغییرات نشست سازه‌ی A ($PGA = 0.17g$) ، ب) تغییرات نشست سازه‌ی A ($PGA = 0.38g$)

Fig.4. Comparison of numerical and experimental results. a) Structural settlement changes of A ($PGA = 0.38g$), b) Structural settlement changes of C ($PGA = 0.17g$)



شکل ۵. سطح تسلیم مخروطی در فضای تنش اصلی و انحرافی [۳۵]

Fig. 5. Multi-yield surfaces in principal stress space and deviatoric plane [35]

که در آن از یک رویکرد چند صفحه‌ای برای شبیه‌سازی رفتار سیکلی و رفت و برگشتی خاک استفاده شده است. مؤلفه‌های اصلی این مدل رفتاری شامل: تابع تسلیم، قانون سخت شونده‌گی و قانون جریان می‌باشد. تابع تسلیم این مدل رفتاری مبتنی بر پلاستیسیته‌ی کلاسیک می‌باشد، که در حالت الاستیک رفتار خاک را به صورت خطی و ایزوتروپ و در حالت غیرخطی به صورت غیرخطی و غیر ایزوتروپ در نظر می‌گیرد. در شکل ۵ سطح تسلیم در فضای تنش‌های مؤثر اصلی و تنش‌های انحرافی نشان داده شده است که هر صفحه مرتبط با یک مدول الاستیسیته‌ی ثابت است و بیرونی‌ترین سطح به عنوان سطح تسلیم شناخته می‌شود. در تاریخچه‌ی پلاستیسیته‌ی چند سطحی، تعدادی از سطوح تسلیم مشابه به همراه رأس مشترک و اندازه‌های متفاوت، منطقه‌ی سخت شونده‌گی را تشکیل می‌دهند که پوش گسیختگی را در بر می‌گیرد. همچنین قانون سخت شونده‌گی جنبشی به منظور ایجاد پاسخ هیستریزس تحت بارگذاری برشی تناوبی در این مدل لحاظ شده است. این قانون اصلاح شده قانون اولیه‌ی مروز [۲۷] بوده که به منظور بهبود توانمندی عددی در مدل یاد شده اعمال شده است. در این مدل رفتاری، رفتار انقباضی و اتساعی خاک با یک قانون جریان غیر همراه که توسط الجمال^۴ و یانگ^۵ معرفی شده است کنترل می‌شود، این قانون خصوصیات پاسخ مدل را تغییر می‌دهد تا مکانیزم تحریک سیکلی را بازسازی

۳- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش جهت بررسی جابجایی‌ها و پارامترهای مؤثر بر آن از برنامه‌ی المان محدود اپنسیس استفاده شده است. برنامه‌ی المان محدود اپنسیس نرم افزاری جامع برای مدل‌سازی سیستم سازه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد، که توسط اعضای مؤسسه‌ی پیر^۱ توسعه داده شده است. این برنامه دارای المان‌های متعدد دو بعدی و سه بعدی برای آنالیزهای دینامیکی همبسته محیط متخلخل اشباع و انواع مدل رفتاری برای المان‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد. در این تحقیق با توجه به حجم بودن و زمان‌بر بودن تحلیل از برنامه‌ی اجزای محدود اپنسیس اس‌پی استفاده شده است. برنامه‌ی اپنسیس اس‌پی به دلیل قابلیت محاسبات موازی و استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته برای برنامه نویسی و همچنین وجود روش‌های تحلیل متعدد باعث همگرایی بهتر و کاهش چشمگیر زمان تحلیل می‌شود [۲۵ و ۲۴].

در روش‌های عددی، رفتار مصالح با استفاده از مدل‌های رفتاری بر حسب تنش-کرنش مشخص می‌شوند. به طوری که مدل‌های رفتاری هسته‌ی اصلی روش‌های عددی را تشکیل می‌دهند. انتخاب مدل رفتاری مناسب برای ماسه از اهمیت زیادی برخوردار است و مدل‌هایی که مشخصه‌های بیشتری از ماسه را در بر دارند معمولاً قادر به پیش‌بینی نتایج دقیق‌تر در مدل‌سازی عددی هستند. مدل رفتاری در نظر گرفته شده در این پژوهش برای خاک بر پایه‌ی کارهای انجام شده توسط پروست^۲ [۲۶] می‌باشد

3 Mroz
4 Elgamal
5 Yang

1 PEER
2 Prevost

جدول ۱. ضرایب نفوذپذیری ماسه‌ی مونتری و نوادا [۲۳]

Table 1. Values of the soil hydraulic conductivity (k) used in the numerical simulations [23]

نوع خاک	چگالی نسبی (D_r)	ضریب نفوذپذیری $k(m/s)$
ماسه‌ی نوادا	۵۰-۵۵	6×10^{-5}
	۸۵-۹۰	$2/25 \times 10^{-5}$
ماسه‌ی مونتری	۸۵	$5/29 \times 10^{-4}$

$$Q^T \dot{U} + HP + SP - f^{(p)} = 0 \quad (2)$$

در این روابط M ماتریس جرم، u بردار جابجایی و B ماتریس کرنش جابه‌جایی می‌باشند. به همین ترتیب، σ' نماینده‌ی بردار تنش مؤثر بوده که با استفاده از مدل مشخصه ارائه شده در رابطه‌ی ۲ قابل محاسبه می‌باشند. Q عملگر گرادبان مجزا جهت همبستگی فازهای جامد و سیال، P بردار فشار آب حفره‌ای، H ماتریس نفوذپذیری و S ماتریس تراکم‌پذیری می‌باشند. در این راستا پارامترهای $f^{(s)}$ و $f^{(p)}$ جهت معرفی اثرات نیروهای حجمی و شرایط مرزی اعمالی برای فازهای جامد-سیال و سیال تعیین شده‌اند.

در این پژوهش برای بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نشست در لایه‌های خاکی شیب‌دار از سه لایه ماسه با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۲۱ متر در بالای سنگ‌بستر استفاده شده است. خاک‌های استفاده شده در این پژوهش از نوع ماسه‌ی مونتری^۷ و نوادا^۸ می‌باشند. این ماسه‌ها در آزمایش سانتریفیوژ دشتی و همکاران [۱۵ و ۱۴] و همچنین مدل‌سازی‌های عددی کریمی و همکاران [۳۶ و ۲۳ و ۲۲] نیز به استفاده شده‌اند. مشخصات پارامترهای ضرایب نفوذپذیری و مدل رفتاری خاک جهت استفاده در نرم افزار اپنسیس در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه گردیده است. جهت مدل‌سازی لایه‌های خاک، از المان‌های آجری هشت گره‌ای، که هر گره دارای چهار درجه آزادی (سه درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و یک درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره‌ای) می‌باشد، استفاده شده است، بنابراین این نوع المان‌ها قابلیت ثبت تغییرات فشار آب حفره‌ای و تغییر شکل گره‌ها را در سه جهت دارند. برای

کند و کنترل بیشتری بر روی انباشتگی کرنش برشی داشته باشد. در مدل حاضر مؤلفه‌ی حجمی قانون جریان غیرهمراه بوده و مؤلفه‌ی برشی آن همراه است. همچنین مرز رفتار انقباضی و اتساعی خاک توسط صفحه‌ی پی‌تی^۱ (ارائه شده توسط ایش‌هارا [۲۹]) معین شده است. مدل رفتاری به کار رفته در حالت رفتار انقباضی خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای را بر اساس کاهش نرخ تنش مؤثر محاسبه می‌کند و مصالح برای خاک‌های اشباع، به صورت مصالح دو فازی مبتنی بر تئوری بیوت^۳ برای محیط‌های متخلخل مدل می‌شوند. فرمولاسیون عددی این تئوری که در نرم افزار اپنسیس به کار بسته شده است، با نام فرمولاسیون جابجایی-فشار آب حفره‌ای^۴ توسط چان^۵ [۳۱] و زینکوویچ^۶ [۳۲] ارائه شده است. در این فرمولاسیون از تفاوت شتاب بین فاز سیال و جامد و همچنین از تراکم‌پذیری فاز سیال صرف‌نظر می‌شود. در این فرمولاسیون هر گره در فضای سه بعدی چهار درجه آزادی دارد که سه درجه آزادی مربوط به جابجایی و یک درجه آزادی مربوط به فشار سیال می‌باشد. آنالیزهای متعددی برای بررسی این فرمولاسیون انجام شده است [۳۱-۳۳، ۲۸ و ۶]، که نشانگر دقت بسیار خوب این فرمولاسیون در مسائل لرزه‌ای و روانگرایی می‌باشد. این فرمولاسیون در روش المان محدود به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$M\ddot{U} + \int B^T \sigma' dV - QP - f^{(s)} = 0 \quad (1)$$

- 1 PT
- 2 Ishehara
- 3 Biot
- 4 U-P
- 5 Chan
- 6 Zienkiewicz

7 Monterey
8 Nevada

جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری ارائه شده برای ماسه‌ی مونتری و نوادا [۲۳]

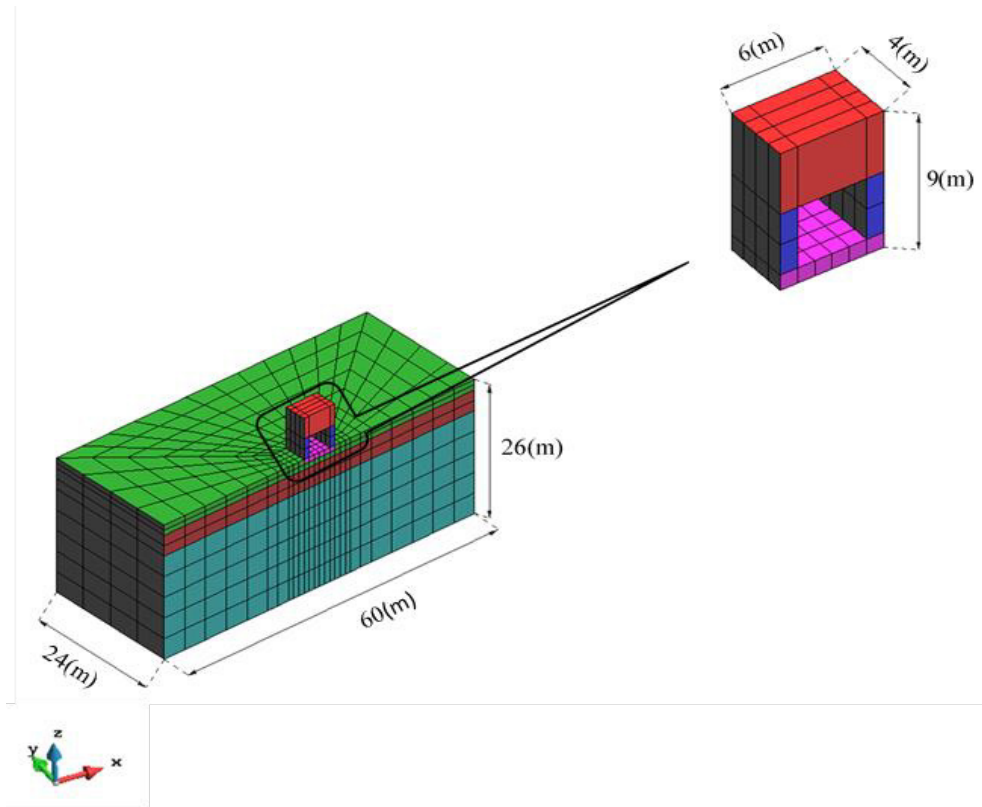
Table 2. PDMY02 Calibrated Parameters for Nevada and Monterey Sand Models at different relative densities

پارامتر	نماد	واحد	ماسه‌ی نوادا	ماسه‌ی مونتری
چگالی نسبی	D_r	درصد	۹۰	۸۵
نسبت تخلخل	e	-	۰/۵۸	۰/۵۶
جرم مخصوص اشباع	ρ	ton/m^3	۲/۰۶	۲/۰۱
فشار مرجع	p'_r	kPa	۱۰۱	۱۰۱
مدول برشی مرجع	G_{max}	MPa	۱۰۱/۹	۱۳۳/۳
ماکزیمم کرنش برشی	$\gamma_{max,r}$	kPa	۰/۱	۰/۱
مدول بالک	B_r	MPa	۱۵۲/۴	۲۶۴
ضریب وابستگی فشار	d	-	۰/۵	۰/۵
زاویه‌ی اصطکاک خاک	ϕ_{TXC}	درجه	۳۳/۵	۴۲
زاویه‌ی PT	ϕ_{PT}	درجه	۲۵/۵	۳۲
پارامتر انقباضی اول	C_1	-	۰/۰۵	۰/۰۱۴
پارامتر انقباضی دوم	C_2	-	۴	۲
پارامتر انقباضی سوم	C_3	-	۰/۲۵	۰/۱۵
پارامتر اتساعی اول	d_1	-	۰/۰۶	۰/۳۶
پارامتر اتساعی دوم	d_2	-	۳	۳
پارامتر اتساعی سوم	d_3	-	۰	۰/۰۰۵
تعداد سطوح تسلیم	NYS	-	۲۰	۲۰
پارامتر روانگرایی اول	liq_1	kPa	۱	۱
پارامتر روانگرایی دوم	liq_2	kPa	۰	۰

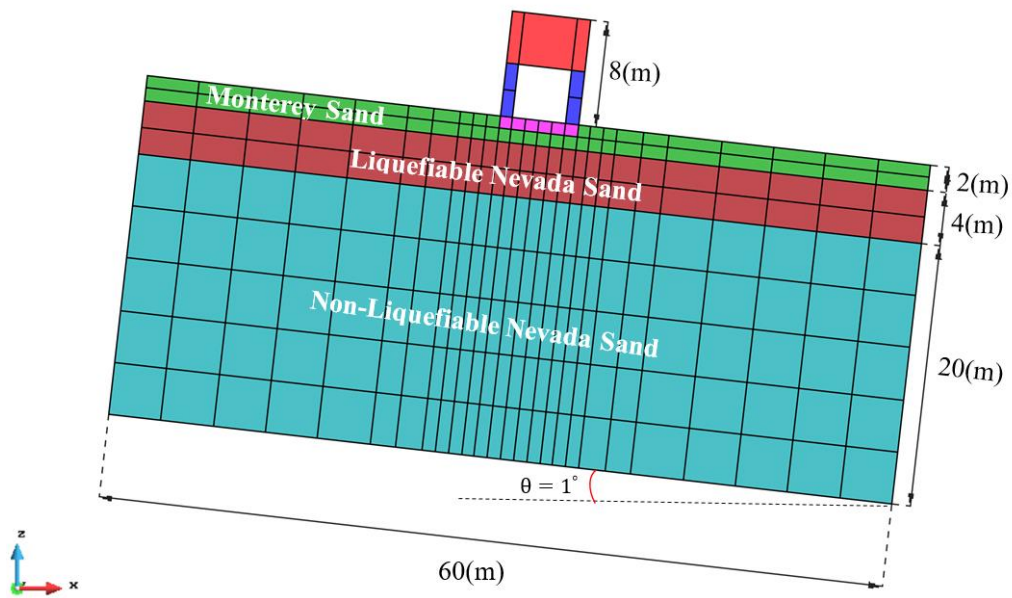
افزار اپنسیس غیرگرافیکی بوده و قابلیت مش‌بندی محیط خاک را ندارد، لذا در این پژوهش از نرم افزار جی آی دی [۳۸] که یک نرم افزار گرافیکی می‌باشد جهت مش‌بندی محیط خاک و سازه استفاده شده است.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای خاک از نوع شرایط مرزی تکرار شونده می‌باشد. برای در نظر گرفتن این شرایط مرزی در مدل‌سازی، تغییر مکان تمامی گره‌های دو طرف مدل در جهت‌های افقی و قائم در ارتفاع‌های یکسان به هم بسته شده‌اند. همچنین مرز پایین خاک کاملاً ثابت و بدون تغییر مکان می‌باشد. زهکشی آب فقط از مرز بالایی خاک در تراز منفی یک صورت می‌گیرد و بقیه مرزها کاملاً نفوذ ناپذیر می‌باشند. گره‌های کناری شالوده در تراز پایین آن در تمامی جهت‌ها به خاک بسته شده‌اند و در تراز بالایی فقط در دو جهت افقی بسته شده و در جهت قائم باز می‌باشند.

کاهش اثر مرزها بر روی پاسخ‌ها، طول مدل ۶۰ متر و عرض آن ۴۸ متر در نظر گرفته شده و در نزدیکی مرزها از المان‌های با ابعاد بزرگ‌تر استفاده شده است. همچنین به دلیل متقارن بودن مدل برای کاهش زمان تحلیل فقط نصف مدل شبیه‌سازی شده است [۳۷ و ۶]. در این شبیه‌سازی سازه دارای ارتفاع ۸ متر و شالوده دارای طول ۸ متر و عرض ۴ تا ۸ متر و ضخامت ۱ متر می‌باشد. عمق مدفون شالوده برای تمام مدل‌ها ثابت و برابر یک متر در نظر گرفته شد. سازه و شالوده از جنس فولاد و آلومینیم بوده و برای مدل‌سازی آن‌ها از المان‌هایی با سه درجه آزادی استفاده شده است. سایر مشخصات خاک و سازه در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۶ نحوه‌ی مش‌بندی خاک و سازه را از نمای سه بعدی و جانبی نشان می‌دهد. با توجه به دقت پاسخ‌ها، زمان تحلیل و امکانات محاسباتی موجود، مدل پایه خاک و سازه از ۲۲۳۰ گره و ۱۷۲۰ المان تشکیل شده‌اند. همچنین قابل ذکر است که نرم



(الف)



(ب)

شکل ۶. الف) مش بندی خاک و سازه نمای سه بعدی ب) مش بندی خاک و سازه نمای جانبی

Fig.6. (a) Meshing soil-structure 3D view (b) Meshing soil-structure side view

جدول ۳. پارامترهای ورودی مدل‌های استفاده شده در پژوهش

Table 3. Input parameters in this research

پارامترهای ورودی	مقدار پارامتر
تراکم لایه‌ی اول (درصد)	۸۵
تراکم لایه‌ی دوم (درصد)	۳۰ و ۵۰* و ۶۸
تراکم لایه‌ی سوم (درصد)	۹۰
شیب مدل (درجه)	۰ و ۱* و ۲
سطح آب زیرزمینی (متر)	۱* و ۲- و ۴-
فشار تماسی شالوده (کیلوپاسگال)	۸۰ و ۱۳۰* و ۱۸۰
نسب طول به عرض شالوده	۱ و ۱/۳۳* و ۲

* پارامترهای مربوط به مدل پایه

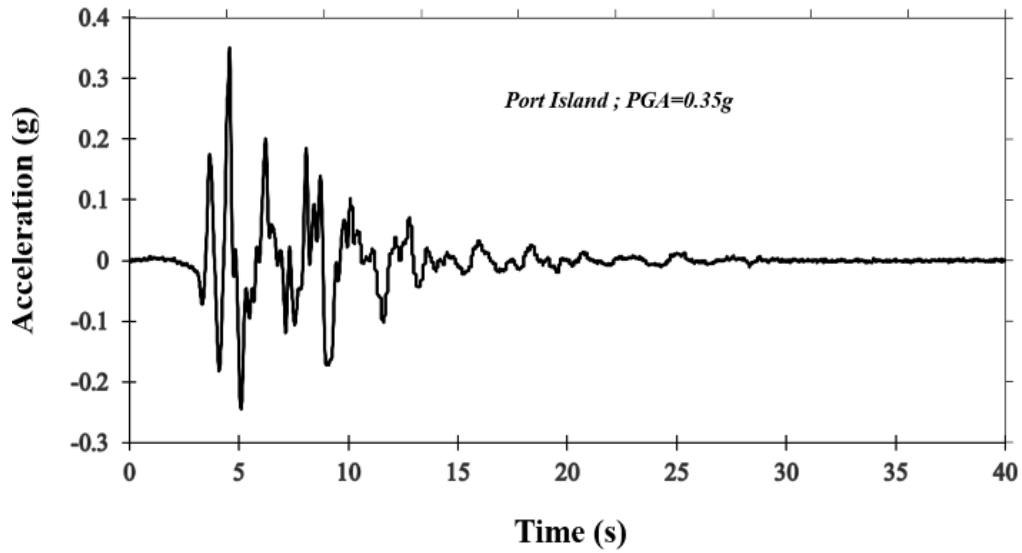
در رابطه‌ی (۳)، $[C]$ ماتریس میرایی، $[M]$ ماتریس جرم، $[K]$ ماتریس سختی، α_m و α_k به ترتیب ضرایب ماتریس جرم و سختی می‌باشند. همچنین ضریب میرایی (ζ) سیستم ۵ درصد در نظر گرفته شده است. α_m و α_k در مطالعه‌ی حاضر برای هر مدل متفاوت بوده و بر اساس آنالیز مودال و فرکانس‌های مود اول (ω_1) و دوم (ω_2) مدل به دست می‌آیند.

جهت تحلیل دینامیکی مدل چهار مرحله در نظر گرفته شده است، در مرحله‌ی اول المان‌های خاک با رفتار الاستیک تحت تحلیل وزنی قرار می‌گیرند تا شرایط طبیعی زمین به وجود آید. در مرحله‌ی دوم به منظور بررسی اثر گسترش جانبی، شیب مدل تعریف می‌شود، برای این کار توزیع بار یکنواخت در جهت محور X به مدل اعمال می‌شود، همچنین در انتهای این مرحله رفتار مصالح خاکی از حالت الاستیک به حالت الاستوپلاستیک تبدیل می‌شود تا امکان بررسی شرایط پلاستیک در روانگرایی به وجود آید. در مرحله‌ی سوم شالوده و سازه بر روی خاک تعریف می‌شوند و با اعمال بار استاتیکی، آنالیز استاتیکی انجام می‌شود تا توزیع تنش و تغییر مکان در خاک در حالت وجود سازه و شالوده تعیین شود. در مرحله‌ی آخر کل مجموعه‌ی خاک و سازه تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرند. جهت تحلیل معادلات حرکت

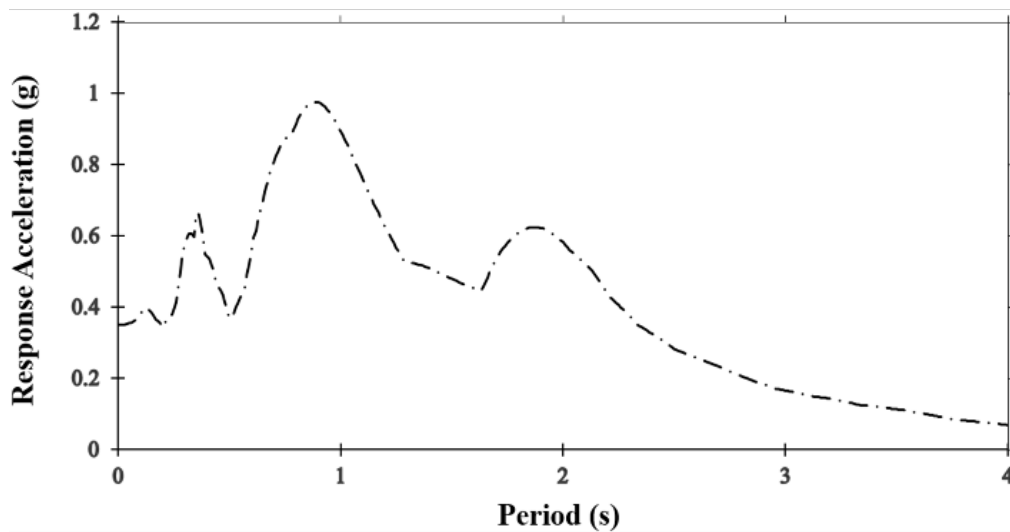
در این پژوهش در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی از شتاب‌نگاشت مقیاس شده‌ی زلزله‌ی کوبه واقع در ایستگاه پورت ایسلند با مدت زمان ۴۰ ثانیه و حداکثر دامنه‌ی $g/35$ به عنوان تحریک ورودی استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت در انتهای مدل و در جهت طولی اعمال گردیده است. علت انتخاب این شتاب‌نگاشت، وقوع پدیده‌ی روانگرایی به صورت گسترده و جابجایی‌های جانبی بزرگ در اثر وقوع این زلزله می‌باشد. در شکل ۷ تاریخچه‌ی زمانی و طیف پاسخ این شتاب‌نگاشت نمایش داده شده است. در این مطالعه از دو میرایی هیستریزیس و رایلی استفاده شده است. میرایی هیستریزیس با توجه به پاسخ سیکلی سیستم در مدل رفتاری در اگر-پراگر چند صفحه‌ای به طور خودکار توسط کد متن باز اپنسیس اسپی محاسبه و اعمال می‌گردد. علاوه بر میرایی هیستریزیس یک میرایی رایلی با توجه به رابطه‌ی (۳) به منظور کاهش نویزهای بالقوه اضافی برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است [۳۷]:

$$[C] = \alpha_m [M] + \alpha_k [K], \quad (3)$$

$$\alpha_m = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \zeta, \quad \alpha_k = \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \zeta$$



(الف)



(ب)

شکل ۷. الف) تاریخچه شتاب افقی زلزله ی پورت ایسلند (ب) طیف پاسخ زلزله ی ورودی (میرایی ۵ درصد)

Fig. 7. a) Horizontal acceleration history for the Port Island as a input event b) Input earthquake response spectra (5% damping)

شکل ۱۰ تغییرات جابجایی جانبی شالوده را به ازای شیب‌های مختلف زمین نشان می‌دهد. با توجه به شکل در ثانیه‌های ابتدایی زلزله به دلیل عدم روانگرایی خاک، شیب زمین تأثیر کمی بر روی جابجایی جانبی شالوده دارد، اما با وقوع روانگرایی و کاهش مقاومت برشی خاک جابجایی جانبی شالوده به شدت افزایش یافته است (میزان افزایش جابجایی‌ها برای شیب‌های ۱ و ۲ درجه به ترتیب ۴ و ۶ برابر مقدار جابجایی‌های شیب صفر بوده است). همچنین مشاهده می‌شود که در حالت عدم وجود شیب حداکثر جابجایی جانبی شالوده در نزدیکی ۵ ثانیه که متناظر با زمان ماکزیمم شتاب زمین می‌باشد رخ می‌دهد، در حالی که در حالت وجود شیب به علت افزایش فشار جانبی وارده از طرف خاک، حداکثر تغییر شکل در انتهای بارگذاری رخ می‌دهد و باعث ایجاد جابجایی‌های ماندگار در خاک زیر شالوده می‌شود. با مشاهده نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین‌های شیب‌دار (شکل ۹) می‌توان نتیجه گرفت که در زمین‌های شیب‌دار به علت کاهش و زودتر زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای، انتظار می‌رود که جابجایی خاک و شالوده کاهش یابد در حالی که در شکل ۱۰ خلاف این موضوع نشان داده شده است. علت این پدیده را می‌توان ناشی از تأثیر تنش برشی استاتیکی در راستای شیب دانست، این تنش برشی ناشی از وزن توده خاک در جهت شیب می‌باشد، که باعث افزایش جابجایی جانبی شالوده و خاک در زمین‌های شیب‌دار می‌شود.

شکل ۱۱-الف میزان دوران شالوده به ازای شیب‌های مختلف زمین را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب زمین میزان دوران شالوده افزایش یافته است (میزان افزایش برای شیب‌های ۱ و ۲ درجه به ترتیب ۲ و ۳ درصد می‌باشد). علت این افزایش دوران را می‌توان ناشی از اختلاف جابجایی قائم دو سمت شالوده دانست. در زمین‌های شیب‌دار در اثر حرکت توده‌های خاک یک سمت شالوده تمایل به بالازدگی (x_1) و سمت دیگر تمایل به نشست (x_2) دارد، مطابق شکل ۱۱-ب و رابطه‌ی ۵ افزایش شیب باعث تشدید جابجایی‌های قائم دو سمت شالوده شده و اختلاف جابجایی قائم دو سمت شالوده (ΔX) را زیاد می‌کند که در نتیجه میزان دوران شالوده (θ) افزایش می‌یابد.

$$9 = \tan^{-1}\left(\frac{x_2 - x_1}{B}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta X}{B}\right) \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵، B عرض شالوده می‌باشد.

در این گام از روش نیومارک^۱ استفاده شده است. پارامترهای نیومارک تأثیر زیادی بر روی پایداری و کاهش نوسانات نتایج دارند، در این تحقیق همواره از پارامترهای نیومارک $\alpha = 0.3025$ و $\beta = 0.06$ استفاده شده است تا پایداری تحلیل با هر گام زمانی حتی بزرگ تضمین شود.

در ادامه، جهت بررسی روانگرایی خاک در اثر افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای از ضریب r_u استفاده شده است. این ضریب از تقسیم اضافه فشار آب حفره‌ای (Δu) به تنش مؤثر (σ') به دست می‌آید (رابطه‌ی ۴). روانگرایی خاک و همچنین شدت آن با توجه به نزدیک و یا بزرگ‌تر این ضریب به عدد یک تعیین می‌شود. یعنی هر چقدر اضافه فشار آب حفره‌ای از تنش مؤثر بزرگ‌تر باشد، شدت روانگرایی بیشتر است.

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'} \quad (4)$$

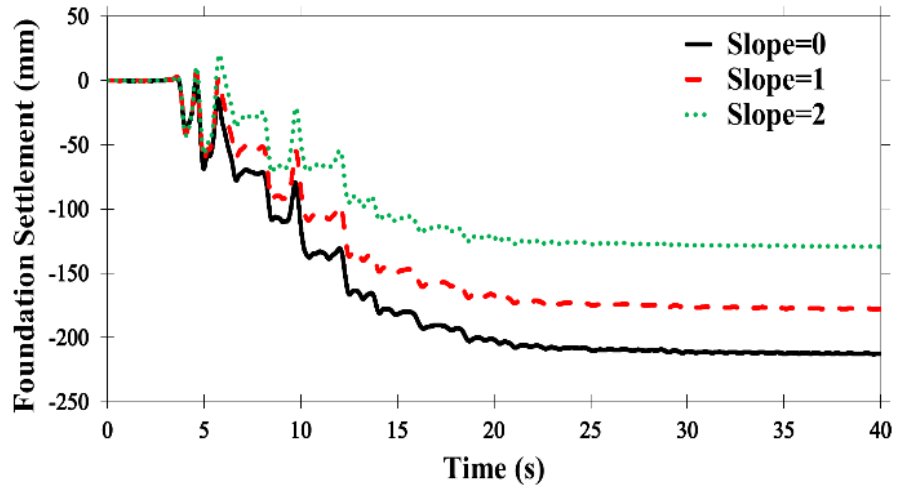
۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- تأثیر شیب لایه‌های خاک

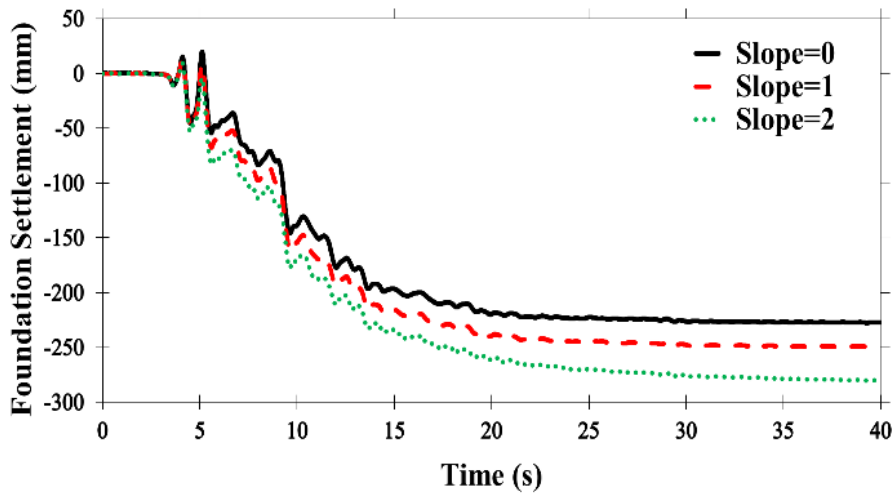
جهت بررسی اثر شیب^۲ لایه‌های خاک بر نشست شالوده‌های سطحی، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای خاک و سازه، مدل تحت سه شیب ۰، ۱ و ۲ درجه قرار گرفته است. شکل ۸ تغییرات نشست در دو سمت شالوده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش شیب خاک نشست در سمت راست شالوده روند افزایشی داشته است (نشست در شیب‌های ۱ و ۲ درجه به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش داشته است)، اما در مقابل در سمت چپ شالوده با افزایش شیب نشست روند کاهشی دارد (نشست در شیب‌های ۱ و ۲ درجه به ترتیب ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش داشته است). به عبارت دیگر در زمین‌های شیب‌دار با شروع تغییر شکل‌های جانبی خاک، سمت چپ شالوده تمایل به بالازدگی و سمت راست تمایل به نشست دارد، حال آن که در زمین‌های مسطح چنین روندی مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر را می‌توان ناشی از حرکت توده خاک در زمین‌های شیب‌دار به دلیل جهت شیب مدل دانست. این موضوع باعث به وجود آمدن تنش‌های فشاری و کششی به ترتیب در بالادست و پایین‌دست شالوده می‌شود. ایجاد تنش‌های کششی در پایین‌دست و افزایش جابجایی خاک باعث افزایش رفتار اتساعی در خاک می‌شود و همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، افزایش رفتار اتساعی موجب زائل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای می‌گردد.

1 Newmark

2 Slope



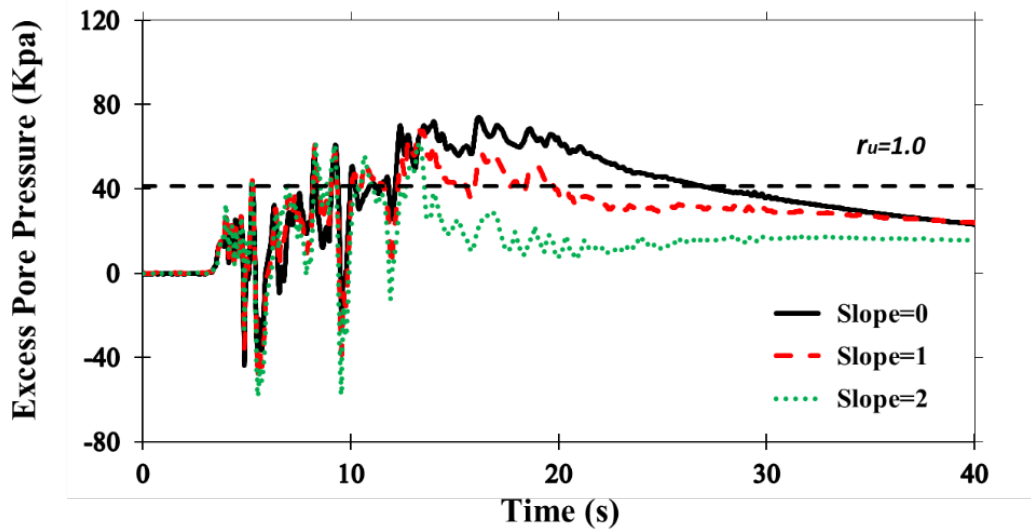
(الف)



(ب)

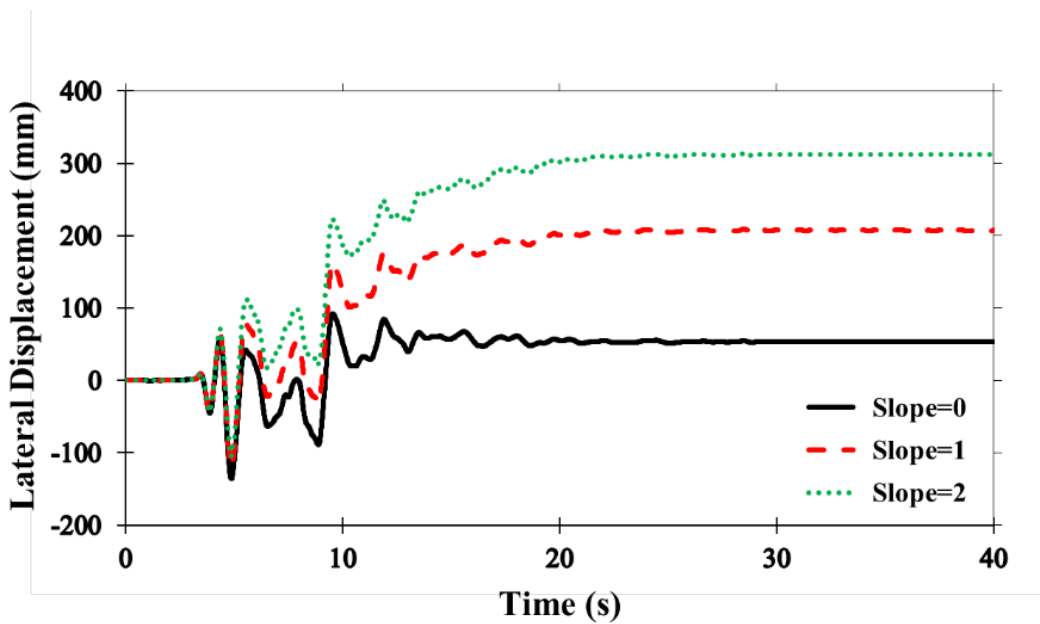
شکل ۸. الف) تغییرات نشست در سمت چپ شالوده، ب) تغییرات نشست در سمت راست شالوده بر حسب شیب های مختلف زمین

Fig.8. Variation of settlement at the a) left, and b) right foundation versus slope angles



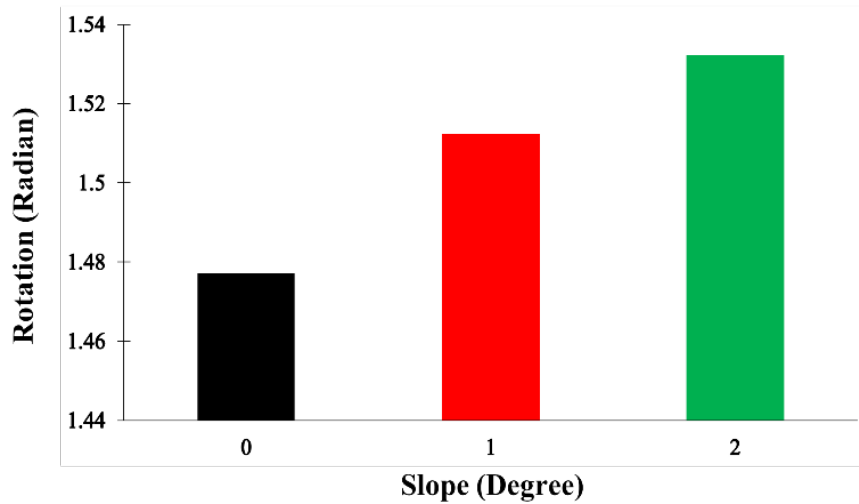
شکل ۹. تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مرکز لایه‌ی روانگرا بر حسب تغییرات شیب زمین

Fig. 9. Predicted time history of excess pore pressure at the middle of liquefiable layer versus slope angles

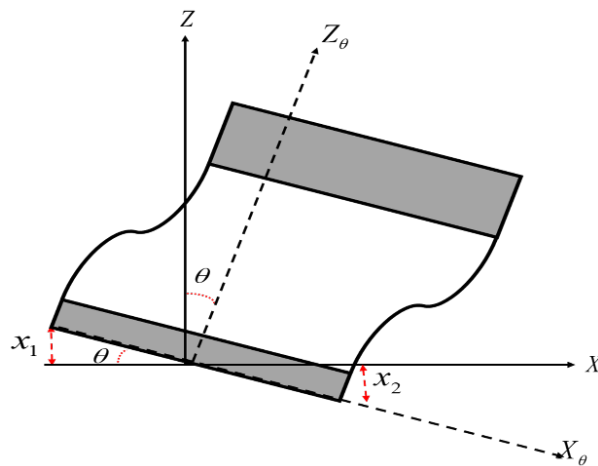


شکل ۱۰. تغییرات جابجایی جانبی شالوده به ازای شیب‌های مختلف

Fig. 10. Variation of lateral displacement versus slope angles



(الف)



(ب)

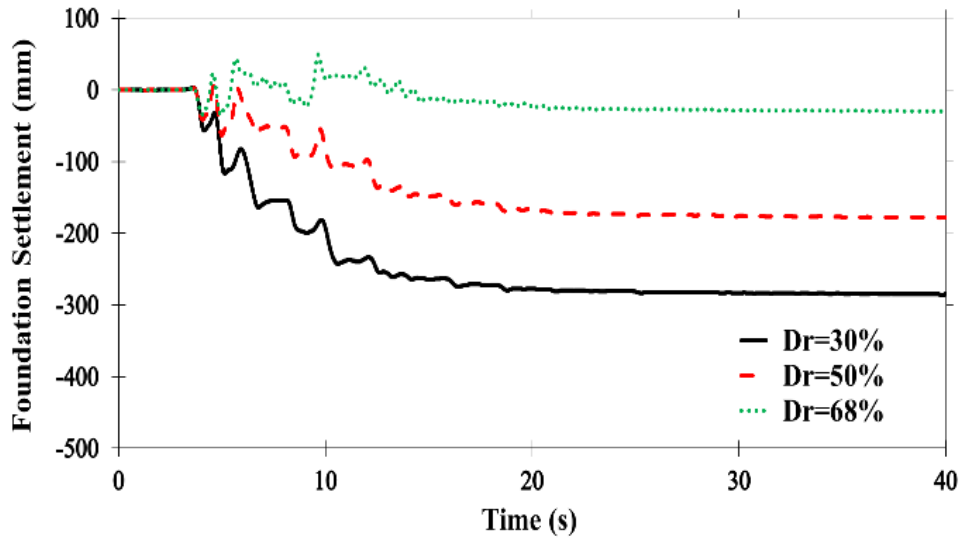
شکل ۱۱. الف) دوران شالوده به ازای شیب‌های مختلف (ب) نمای جانبی از دوران سیستم شالوده و سازه

Fig. 11. a) Foundation rotation versus slope angles b) side view from the rotation of foundation - structure

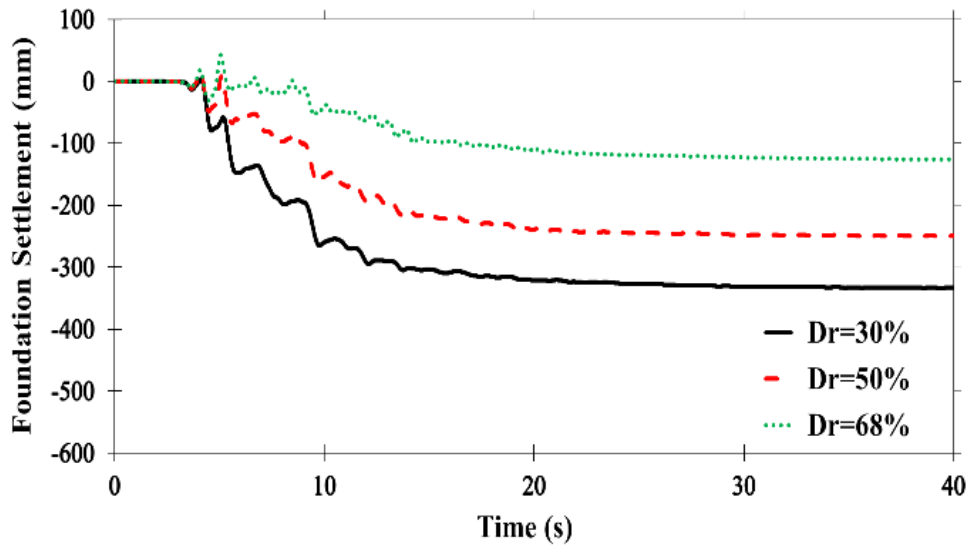
تراکم‌های ۵۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۲ و ۳ برابر تراکم ۶۸ درصد بوده است)، که علت آن را می‌توان تمایلات انقباضی بیشتر ماسه‌های سست‌تر دانست که منجر به افزایش اضافه فشار منفذی و کرنش‌های برشی سیکلی شده که در نتیجه دو مکانیسم کرنش حجمی و برشی را تقویت کرده و باعث افزایش نشست می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ افزایش تراکم لایه‌ی روانگرا باعث شده است که اختلاف نشست دو سمت شالوده افزایش یابد که در نتیجه این اتفاق میزان دوران شالوده افزایش پیدا کرده است.

۴-۲- اثر تراکم لایه‌ی روانگرا

جهت بررسی تأثیر تراکم (Dr) لایه‌ی روانگرا (لایه میانی) بر روی نشست شالوده‌ی سطحی سه مدل با تراکم‌های ۵۰، ۳۰ و ۶۸ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. در تمامی این مدل‌ها لایه‌های خاک دارای شیب ۱ درجه می‌باشند و سایر پارامترهای خاک و سازه ثابت نگه داشته شده است. شکل ۱۲ نشست شالوده را تحت تراکم‌های مختلف لایه‌ی روانگرا نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نشست به طور کلی برای تراکم‌های پایین در مقایسه با تراکم‌های بالا افزایش پیدا کرده است (میزان این افزایش برای



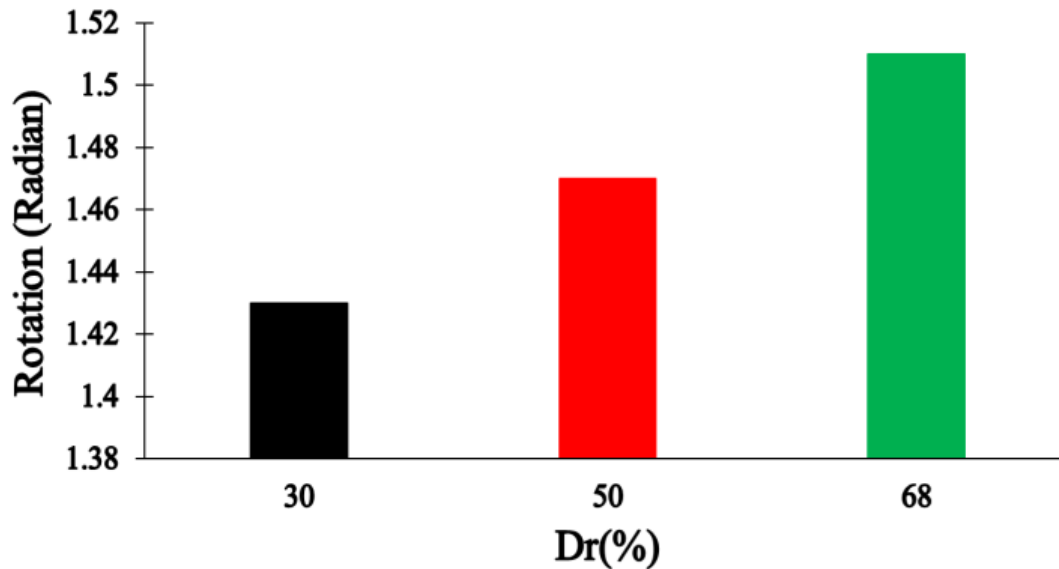
(الف)



(ب)

شکل ۱۲. الف) تغییرات نشست در سمت چپ شالوده، ب) تغییرات نشست در سمت راست شالوده برحسب تراکم های مختلف لایه روانگرا

Fig. 12. Variation of settlement at the a) left b) right foundation versus densities of liquefiable layer



شکل ۱۳. دوران شالوده به ازای تراکم‌های مختلف لایه‌ی روانگرا

Fig. 13. Foundation rotation versus densities of liquefiable layer

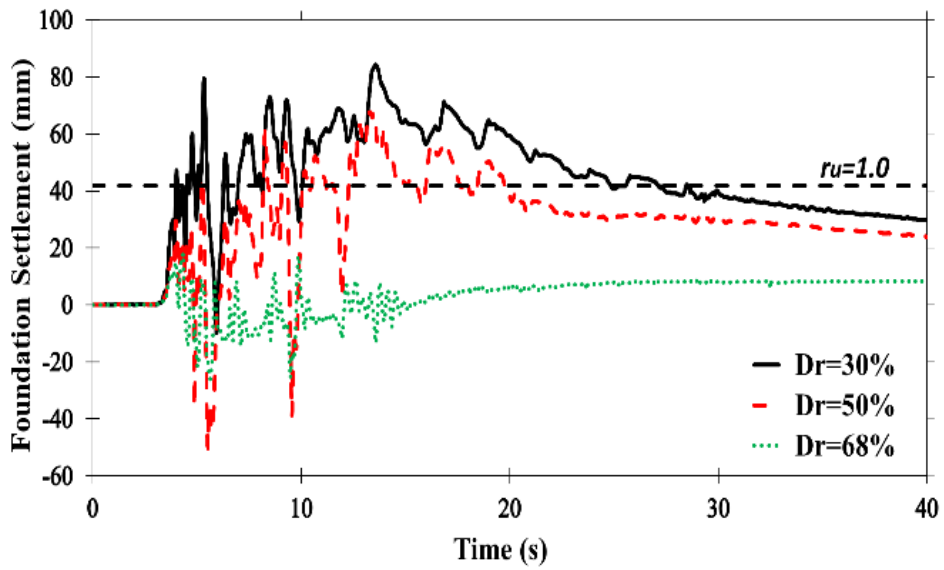
حوزه‌ی نزدیک و حوزه‌ی دور کاهش یافته است (میزان کاهش برای سطوح ۲ و ۴ متر به ترتیب ۱۷ و ۶۷ درصد می‌باشد)، که علت آن را می‌توان ناشی از افزایش تنش مؤثر در اثر کاهش سطح آب زیرزمینی دانست. در سطح آب‌های ۱ و ۲ متر لایه‌ی وسط (ماسه‌ی نوادا تراکم ۵۰ درصد) به طور کامل در آب غرق می‌باشد، که باعث شده است لایه‌ی وسط روانگرا شده در نتیجه میزان جابجایی‌های جانبی در این دو سطح آب تغییر زیادی نکرده است، اما با کاهش سطح آب به ۴ متر تنها نصف لایه‌ی وسط در آب غرق بوده که باعث شده میزان روانگرایی به شدت افت کند و باعث کاهش قابل توجه جابجایی‌های جانبی شود.

شکل ۱۶ مقدار نشست را به ازای عمق‌های مختلف سطح آب زیرزمینی در حوزه‌ی نزدیک و حوزه‌ی دور نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۶-الف نشان داده شده است، کاهش سطح آب زیرزمینی باعث افزایش تنش مؤثر خاک شده و میزان جابجایی‌ها کاهش یافته است (میزان کاهش برای سطوح ۲ و ۴ متر به ترتیب ۱۰ و ۴۰ درصد می‌باشد)، که این میزان تغییرات در سطح آب ۴ متر به دلیل غرق بودن تنها نصف لایه‌ی وسط و کاهش روانگرایی بیشتر بوده است. در شکل ۱۶-ب تغییرات نشست در حوزه‌ی دور مشابه‌ی حوزه‌ی نزدیک می‌باشد، اما در سطح آب ۲ متر میزان نشست مقدار کمی (حدود ۱۰ درصد) نسبت به سطح آب ۱ متر افزایش یافته است، در

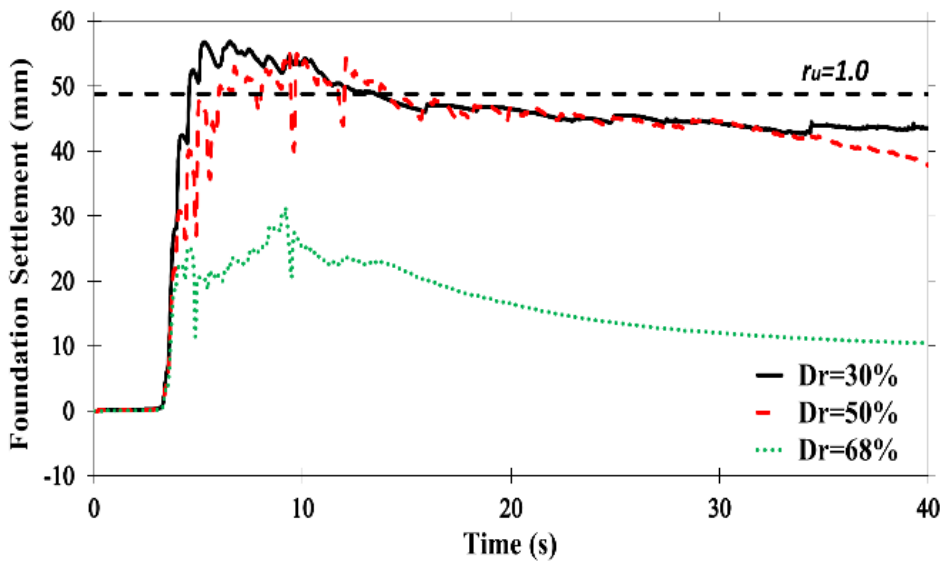
شکل ۱۴ تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای بر حسب زمان را برای تراکم‌های مختلف لایه‌ی روانگرا نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اضافه فشار آب حفره‌ای با افزایش تراکم چه در حوزه‌ی نزدیک (مدل با سازه) و چه حوزه‌ی دور (مدل بدون سازه) کاهش پیدا کرده است، که این امر باعث کاهش پتانسیل روانگرایی خاک می‌شود. همچنین در اثر افزایش تراکم مکش‌های زیادی در خاک ایجاد می‌شود که علت این رفتارها را می‌توان ناشی از تقویت رفتار اتساعی خاک در تراکم‌های بالا دانست که باعث افت اضافه فشار آب حفره‌ای شده است.

۴-۳- تأثیر سطح آب زیرزمینی

جهت بررسی تأثیر کاهش سطح آب زیرزمینی بر نشست شالوده سه مدل با سطح آب به عمق ۱، ۲ و ۴ متر از سطح زمین مورد بررسی قرار گرفتند. در تمامی این مدل‌ها خاک دارای شیب ۱ درجه بوده و سایر پارامترهای خاک و سازه ثابت نگه داشته شده است. شکل ۱۵ جابجایی‌های جانبی شالوده و سطح خاک را در حوزه‌ی نزدیک (مدل با سازه) و حوزه‌ی دور (مدل بدون سازه) به ازای مقادیر مختلف سطح آب نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با کاهش سطح آب زیرزمینی مقدار جابجایی‌های جانبی در



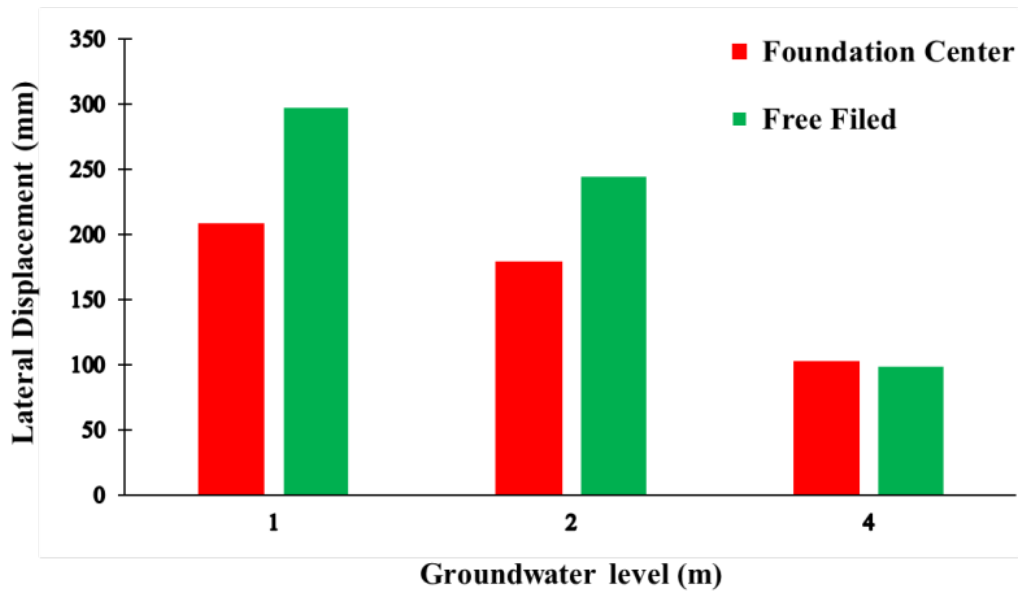
(الف)



(ب)

شکل ۱۴. تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای مرکز لایه‌ی روانگرا بر حسب تراکم لایه میانی: الف) حوزه‌ی نزدیک ب) حوزه‌ی دور

Fig. 14. Predicted time history of excess pore pressure at the middle of liquefiable layer a) Near the foundation b) Free Filed



شکل ۱۵. جابجایی جانبی شالوده به ازای عمق‌های مختلف سطح آب زیرزمینی

Fig. 15. Variation of lateral displacement foundation versus groundwater level

اضافه فشار آب حفره‌ای تأثیر می‌گذارد. افزایش فشار تماسی شالوده باعث افزایش میزان نشست در دو سمت شالوده (برای فشارهای تماسی ۱۳۰ و ۱۸۰ کیلوپاسکال به ترتیب حدود ۲ و ۳ برابر فشار تماسی ۸۰ کیلوپاسکال) و کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای در مرکز لایه‌ی روانگرا در عمق ۴ متری از سطح زمین شده است. که علت آن را می‌توان ناشی از افزایش تنش‌های برشی استاتیکی و دینامیکی منتقل شده از شالوده به خاک در اثر افزایش فشار تماسی دانست که در نتیجه‌ی آن کرنش‌های حجمی استاتیکی و دینامیکی تقویت شده و نشست در دو سمت شالوده افزایش می‌یابد.

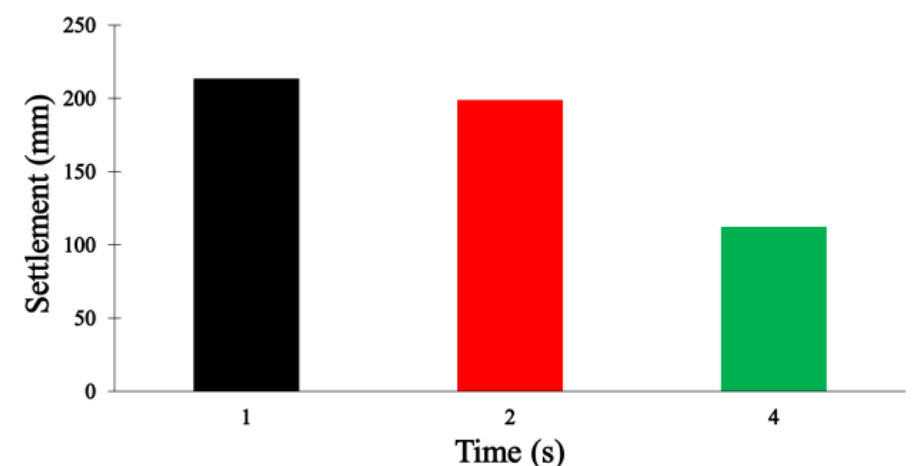
۴-۵- تأثیر نسبت طول به عرض شالوده

جهت بررسی تأثیر نسبت طول به عرض شالوده سه مدل با نسبت طول به عرض‌های ۱، ۱/۳۳ و ۲ مورد بررسی قرار گرفتند. تمامی این مدل‌ها دارای شیب ۱ درجه بوده و سایر پارامترها به غیر از جرم مؤثر روی سازه ثابت در نظر گرفته شدند. جرم مؤثر برای هر مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شد که از تغییر رفتار اینرسی سازه جلوگیری شود. شکل ۱۹ میزان متوسط نشست شالوده به ازای مقادیر مختلف طول به عرض را نشان می‌دهد. همانطور که

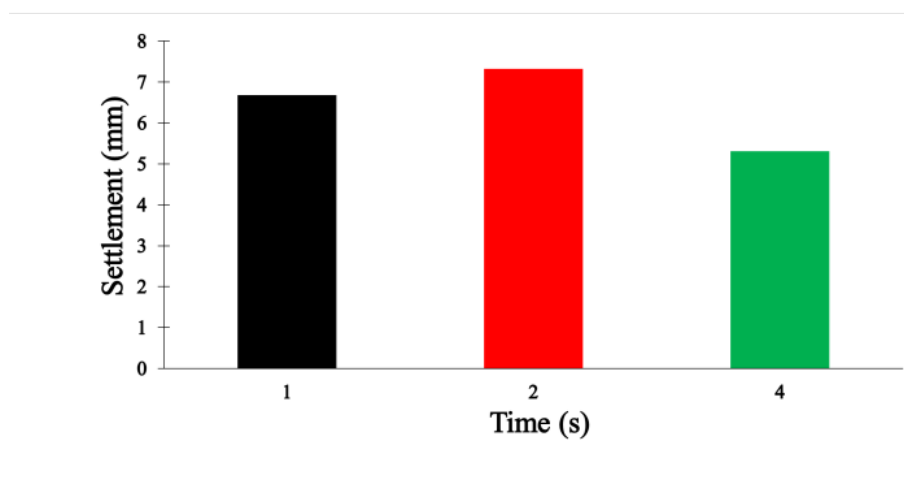
حالی که باید مطابق حوزه‌ی نزدیک به دلیل کاهش روانگرایی و افزایش تنش مؤثر میزان نشست کاهش پیدا کند. علت این رویداد را می‌توان این گونه بیان کرد که کاهش سطح آب زیرزمینی در عمق ۲ متر با آن که باعث کاهش روانگرایی شده است، اما افزایش تنش مؤثر باعث شده است که لایه‌ی ۲ متری ماسه‌ی مونتری بالای لایه‌ی روانگرا به دلیل افزایش وزن مؤثر مانند یک اضافه تنش روی خاک عمل کرده و تنش‌های برشی منتقل شده به لایه‌ی روانگرا را افزایش دهد، که در نتیجه کرنش‌های حجمی خاک تقویت شده و نشست در عمق ۲ متری نسبت به عمق ۱ متری در حوزه‌ی دور افزایش جزئی پیدا کند.

۴-۴- اثر فشار تماسی شالوده

جهت بررسی اثر فشار تماسی شالوده (P) بر میزان نشست سه مدل با فشارهای تماسی ۸۰، ۱۳۰ و ۱۸۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار گرفتند. در تمامی این مدل‌ها شیب خاک برابر ۱ درجه در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای خاک و سازه ثابت نگه داشته شده است. همانطور که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود، افزایش فشار تماسی شالوده بر میزان نشست و



(الف)



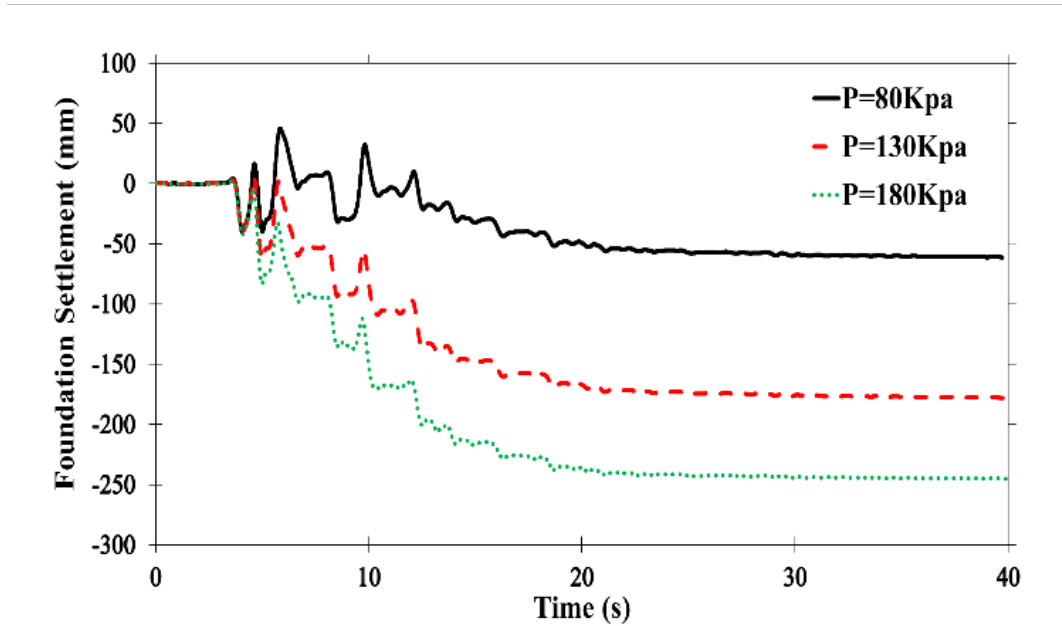
(ب)

شکل ۱۶. مقدار نشست به ازای عمق‌های مختلف سطح آب زیرزمینی: الف) حوزه‌ی نزدیک (ب) حوزه‌ی دور

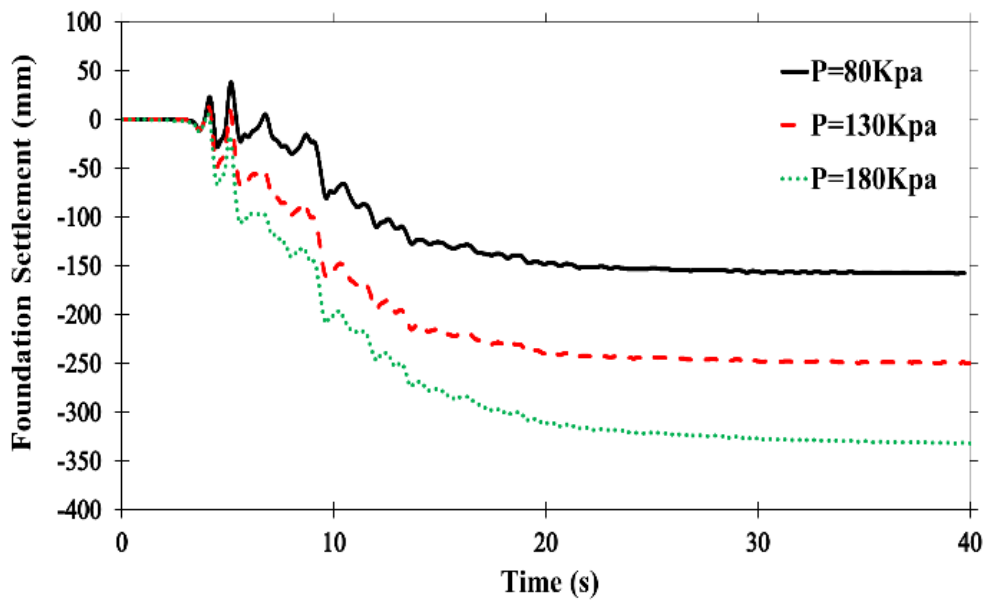
Fig.16. Value of settlement at the a) Near of the foundation and b) Free Filed versus groundwater level

طول به عرض نزدیک به ۱ فشارهای برشی و زهکشی را در تمامی جهات به صورت سه بعدی تجربه می‌کند، ولی با افزایش نسب طول به عرض اگر چه محدوده‌ی اثر و فشار محصور شدگی زیر شالوده افزایش می‌یابد، اما کرنش برشی دینامیکی و استاتیکی و پتانسیل زهکشی در جهت طول شالوده کاهش می‌یابد و به حالت کرنش صفحه‌ای دو بعدی نزدیک می‌شود.

مشاهده می‌شود مدل‌های با نسبت طول به عرض بزرگ‌تر نشست‌های کوچک‌تری را تجربه کردند (مدل‌های با نسبت طول به عرض $1/33$ و 2 به ترتیب ۸ و ۲۵ درصد نسبت به مدل با نسبت طول به عرض ۱ کاهش داشته‌اند)، که علت این امر را می‌توان ناشی از ایجاد کرنش‌های برشی کوچک‌تر و کاهش پتانسیل زهکشی خارج از صفحه در اثر افزایش نسبت طول به عرض شالوده دانست. ماسه‌ی روانگرا در زیر شالوده‌های با نسبت



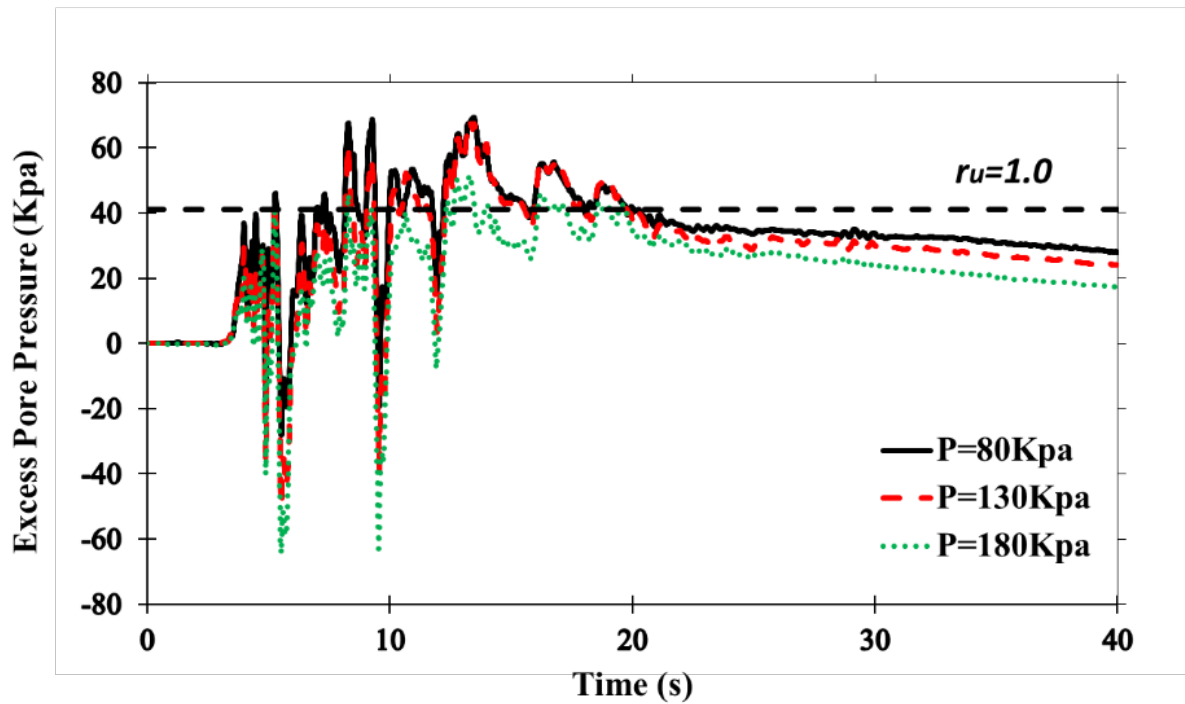
(الف)



(ب)

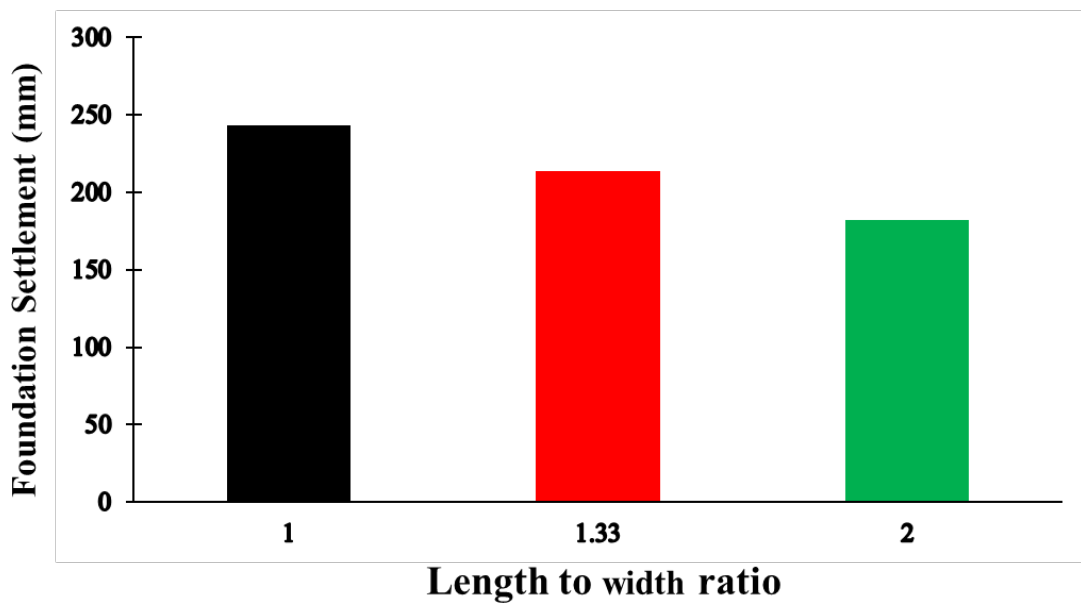
شکل ۱۷. الف) تغییرات نشست سمت چپ شالوده، ب) تغییرات نشست سمت راست شالوده به ازای فشار تماسی مختلف شالوده سطحی

Fig. 17. Variation of settlement at a) the left and b) the right of foundation versus contact pressure on the foundation



شکل ۱۸. تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مرکز لایه‌ی روانگرا به ازای فشار تماسی مختلف شالوده سطحی

Fig. 18. Predicted time history of excess pore pressure at the middle of liquefiable layer versus contact pressure on the foundation



شکل ۱۹. متوسط نشست شالوده به ازای نسبت طول به عرض‌های مختلف

Fig.19. Variation of average foundation settlement versus the ratio of length to width of the foundation

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش نتایج حاصل از بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر روی نشست و گسترش جانبی شالوده‌های سطحی واقع بر روی لایه‌های خاکی شیب‌دار ارائه شده است. هدف اصلی این مطالعه‌ی عددی بررسی و اندازه‌گیری اثر متقابل پارامترهای مختلف از جمله شیب زمین، سطح آب زیرزمینی، فشار تماسی شالوده و نسبت طول به عرض شالوده بر روی نشست و گسترش جانبی لرزه‌ای شالوده‌های سطحی و ارائه‌ی یک مجموعه داده‌های مناسب برای توسعه‌ی مدل‌های عددی احتمالی در آینده می‌باشد. برای این منظور در ابتدا مدل‌های عددی با نتایج آزمایش سانتیفریوژ اعتبارسنجی شده و مدل‌های رفتاری و شرایط مرزی و اندازه‌ی المان‌های آن مورد تأیید قرار گرفتند. سپس شتاب‌نگاشت کوبه ۱۹۹۵ (پورت ایسلند) به پای مدل اعمال شده و پاسخ‌های به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که:

- افزایش شیب زمین باعث ایجاد تنش‌های کششی و فشاری و تشدید تنش‌های برشی استاتیکی می‌شود که نشست شالوده و جابجایی‌های جانبی آن را افزایش می‌دهد ولی اضافه فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد بنابراین کنترل روانگرایی صرف بررسی ضریب اضافه فشار منفذی نمی‌تواند موثر باشد. نیاز هست جابجایی‌ها نیز کنترل شود. همچنین در اثر افزایش شیب زمین اختلاف نشست دو سمت شالوده افزایش یافته که در نتیجه‌ی آن باعث افزایش دوران شالوده شده است.

- با کاهش تراکم لایه‌ی روانگرا میزان نشست افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل تمایلات انقباضی ماسه‌ی سست بوده که موجب افزایش اضافه فشار منفذی و کرنش‌های برشی سیکلی شده و کرنش‌های حجمی و برشی را تقویت کرده و باعث افزایش نشست می‌شود. همچنین باعث کاهش اختلاف نشست دو سمت شالوده می‌شود که در نتیجه آن میزان دوران شالوده کاهش می‌یابد.

- نتایج به دست آمده از پژوهش نشان می‌دهد که کاهش سطح آب زیرزمینی باعث کاهش جابجایی‌های قائم و افقی شالوده شده است، که علت این امر ناشی از افزایش تنش مؤثر و در نتیجه‌ی آن سفت شدن خاک می‌باشد که باعث کاهش جابجایی‌های شالوده می‌شود.

- در اثر افزایش فشار تماسی نشست شالوده افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان ناشی از افزایش تنش‌های برشی استاتیکی و دینامیکی منتقل شده از شالوده به خاک دانست که باعث تقویت کرنش‌های حجمی استاتیکی و دینامیکی شده و نشست را افزایش می‌دهد.

- شالوده‌های با نسبت طول به عرض بزرگ‌تر نشست کوچک‌تری را تجربه می‌کنند که علت آن را می‌توان ناشی از ایجاد کرنش‌های برشی کوچک‌تر و کاهش پتانسیل زهکشی خارج از صفحه در اثر افزایش نسبت طول به عرض شالوده دانست.

نتایج به دست آمده بینش ارزشمندی را در شناسایی پارامترهای مؤثر بر روی نشست و گسترش جانبی در زمین‌های شیب‌دار ارائه می‌دهد، که می‌تواند در پیش‌بینی و راه‌حل‌های کاهش آن‌ها کمک کننده باشد. با این حال مدل عددی ارائه شده دارای یک سری محدودیت‌هایی است، که پیشنهاد می‌شود در مطالعاتی که در آینده صورت می‌گیرد، موارد زیر حتماً لحاظ شود، از جمله: استفاده از المان‌های رابط بین خاک و شالوده، ارائه‌ی مدلی که بتواند ضرایب نفوذپذیری را با توجه به زمان و شدت زلزله تغییر دهد، استفاده از ماسه‌های سیلتی به جای ماسه‌های تمیز و لرزش چند جهته که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است.

منابع

- [1] M. Cubrinovski, D. Henderson, B. Bradley, Liquefaction impacts in residential areas in the 2010-2011 Christchurch earthquakes, (2012).
- [2] R.A. Green, J. Allen, L. Wotherspoon, M. Cubrinovski, B. Bradley, A. Bradshaw, B. Cox, T. Algie, Performance of Levees (Stopbanks) during the 4 september 2010 Mw 7.1 Darfield and 22 February 2011 Mw 6.2 Christchurch, New Zealand, Earthquakes, Seismological Research Letters, 82(6) (2011) 939-949.
- [3] D. Huang, G. Wang, F. Jin, Effectiveness of pile reinforcement in liquefied ground, Journal of Earthquake Engineering, 24(8) (2020) 1222-1244.
- [4] A. Asgari, M. Oliaci, M. Bagheri, Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 51 (2013) 77-96.
- [5] S.M. Haeri, A. Kavand, I. Rahmani, H. Torabi, Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 38 (2012) 25-45.
- [6] A. Elgamal, J. Lu, D. Forcellini, Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum:

- Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(7) (2010) 918-929.
- [16] Y. Tsukamoto, K. Ishihara, S. Sawada, S. Fujiwara, Settlement of rigid circular foundations during seismic shaking in shaking table tests, *International Journal of Geomechanics*, 12(4) (2012) 462-470.
- [17] F. Lopez-Caballero, A.M. Farahmand-Razavi, Numerical simulation of liquefaction effects on seismic SSI, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(2) (2008) 85-98.
- [18] D.K. Karamitros, G.D. Bouckovalas, Y.K. Chaloulos, Insight into the seismic liquefaction performance of shallow foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4) (2013) 599-607.
- [19] J. Macedo, J.D. Bray, Key trends in liquefaction-induced building settlement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11) (2018) 04018076.
- [20] A. Asgari, A. Golshani, M. Bagheri, Numerical evaluation of seismic response of shallow foundation on loose silt and silty sand, *Journal of Earth System Science*, 123(2) (2014) 365-379.
- [21] G. Zheng, W. Zhang, H. Zhou, P. Yang, Multivariate adaptive regression splines model for prediction of the liquefaction-induced settlement of shallow foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132 (2020) 106097.
- [22] Z. Karimi, S. Dashti, Z. Bullock, K. Porter, A. Liel, Key predictors of structure settlement on liquefiable ground: a numerical parametric study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113 (2018) 286-308.
- [23] Z. Karimi, S. Dashti, Seismic performance of shallow founded structures on liquefiable ground: validation of numerical simulations using centrifuge experiments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(6) (2016) 04016011.
- [24] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Three-dimensional numerical simulation, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(11) (2009) 1672-1682.
- [7] H. Toyota, I. Towhata, S.-I. Imamura, K.-I. Kudo, Shaking table tests on flow dynamics in liquefied slope, *Soils and foundations*, 44(5) (2004) 67-84.
- [8] T. Abdoun, R. Dobry, T.D. O'Rourke, S. Goh, Pile response to lateral spreads: centrifuge modeling, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 129(10) (2003) 869-878.
- [9] K. Tokimatsu, H. Kojima, S. Kuwayama, A. Abe, S. Midorikawa, Liquefaction-induced damage to buildings in 1990 Luzon earthquake, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2) (1994) 290-307.
- [10] R. Sancio, J.D. Bray, T. Durgunoglu, A. Onalp, Performance of buildings over liquefiable ground in Adapazari, Turkey, in: *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, Canadian Association for Earthquake Engineering Vancouver, Canada, 2004.
- [11] S.A. Ashford, R.W. Boulanger, J.L. Donahue, J.P. Stewart, Geotechnical quick report on the Kanto Plain region during the March 11, 2011, Off Pacific Coast of Tohoku earthquake, Japan, GEER Association Report No GEER-025a, *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER)*, (2011).
- [12] B. Mehrzad, Y. Jafarian, C. Lee, A. Haddad, Centrifuge study into the effect of liquefaction extent on permanent settlement and seismic response of shallow foundations, *Soils and foundations*, 58(1) (2018) 228-240.
- [13] M. Jahed Orang, R. Motamed, A. Prabhakaran, A. Elgamal, Large-Scale Shake Table Tests on a Shallow Foundation in Liquefiable Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(1) (2021) 04020152.
- [14] S. Dashti, J.D. Bray, J.M. Pestana, M. Riemer, D. Wilson, Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(1) (2010) 151-164.
- [15] S. Dashti, J.D. Bray, J.M. Pestana, M. Riemer, D. Wilson,

- approach to quantitative solutions. I. Fully saturated problems, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 429(1877) (1990) 285-309.
- [33] A. Elgamal, Z. Yang, E. Parra, Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(4) (2002) 259-271.
- [34] Z. Yang, A. Elgamal, K. Adalier, M.K. Sharp, Earth dam on liquefiable foundation and remediation: numerical simulation of centrifuge experiments, Journal of engineering mechanics, 130(10) (2004) 1168-1176.
- [35] Z. Yang, J. Lu, A. Elgamal, OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements user's manual, (2008).
- [36] Z. Karimi, S. Dashti, Numerical and centrifuge modeling of seismic soil–foundation–structure interaction on liquefiable ground, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142(1) (2016) 04015061.
- [37] L. He, J. Ramirez, J. Lu, L. Tang, A. Elgamal, K. Tokimatsu, Lateral spreading near deep foundations and influence of soil permeability, Canadian Geotechnical Journal, 54(6) (2017) 846-861.
- [38] R. Ribó, M. Pasenau, E. Escolano, J. Ronda, L. González, GiD reference manual, CIMNE, Barcelona, 27 (1998).
- Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006).
- [25] B. Jeremic, Development of geotechnical capabilities in OpenSees, Citeseer, 2001.
- [26] J.H. Prevost, A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 4(1) (1985) 9-17.
- [27] Z. Mroz, On the description of anisotropic workhardening, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 15(3) (1967) 163-175.
- [28] A. Elgamal, Z. Yang, E. Parra, A. Ragheb, Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils, International Journal of Plasticity, 19(6) (2003) 883-905.
- [29] K. Ishihara, Stability of Natural Deposits During Earthquakes. Proceedings of The Eleventh international Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 12-16 August 1985, Publication of: Balkema (AA), (1985).
- [30] M.A. Biot, Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Journal of applied physics, 33(4) (1962) 1482-1498.
- [31] A.H.-C. Chan, A unified finite element solution to static and dynamic problems of geomechanics, Swansea University, 1988.
- [32] O.C. Zienkiewicz, A. Chan, M. Pastor, D. Paul, T. Shiomi, Static and dynamic behaviour of soils: a rational

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Pourabbasi, A. Asgari, Investigation of Effective Parameters on the Settlement and Lateral Spreading of Shallow Foundations on the Sloping Liquefiable Soil, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 1191-1216.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19292.7159

