



## Using Pile Group to Mitigate Lateral Spreading in Uniform and Stratified Liquefiable Sand Strata: Three-Dimensional Numerical Simulation

A. Asgari\*, F. Ranjbar, H. Akbarzadeh Bengar

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

**ABSTRACT:** According to reports from past earthquakes around the world, the phenomenon of liquefaction is one of the main hazards of earthquakes that causes damage to structures and infrastructures. The risk of liquefaction and associated lateral spreading can be reduced by various ground improvement techniques, including densification, solidification (e.g., cementation), Vibro-compaction, drainage, explosive compaction, deep soil mixing, deep dynamic compaction, permeation grouting, jet grouting, pile-pinning, and gravel drains or SCs. In this research, the effects of pile groups on reducing the potential for liquefaction during earthquakes are investigated parametrically, using three-dimensional finite element (FE) simulations via OpenSees. Saturated uniform and stratified loose sand are subjected to two realistic destructive events with different characteristics. A multi-yield-surface plasticity model, Drucker–Prager yield criterion, is considered for the dynamic analysis conducted in this study based on constitutive laws applicable to all types of soils. The objective of this research is to assess the effectiveness of the pile group based on several different factors, including area replacement ratio ( $A_{rr}$ ), piles diameter, number of piles, thickness and position of liquefiable soil, and earthquake characteristics. This parametric study evaluates the effect of each of these factors on soil acceleration, lateral displacement, and excess pore pressure. The results showed that the lateral displacement and excess pore pressure decrease, as the area replacement ratio, number, and diameter of the pile increase. Besides, the responses of the saturated stratified sand strata are not only dependent on the thickness of the liquefiable layer but are also highly influenced by its position. The presence of a liquefiable layer at lower depths, although acting as an isolate relative to the acceleration, can increase lateral displacements. Also, according to the results, there is an appropriate correlation between the variations of lateral displacement rate of piles and soil and earthquake parameters including Arias intensity, the time corresponding to the PGA, and the number of significant excitation cycles. Therefore, the results of this study may be applicable for other earthquakes.

### Review History:

Received: Jan. 05, 2020

Revised: Jan. 14, 2020

Accepted: May. 15, 2020

Available Online: Jul. 13, 2020

### Keywords:

Liquefaction

Pile groups

Liquefiable soil layer

3D numerical simulation

OpenSees

## 1. INTRODUCTION

The lateral spreading of mildly sloping ground and the 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 [1]. One of the effective methods to reducing the risk of liquefaction and associated ground deformation in saturated sands is the pile-pinning technique. The soil near the pile pinning tends to respond as undrained, and a larger lateral resistance is mobilized due to the dilative response of liquefied soil. Many attempts have been made in recent decades to study the behavior of a pile in liquefied soil, using various experimental techniques including dynamic centrifuge experiments, shaking Table tests, and full-scale field tests as well as various numerical modeling methods [1-3]. This study focuses on the effects of pile-pinning on the seismic response of saturated soil based on numerical

simulation. Additional simulations considering a wider range of values for the area replacement ratio, pile diameter, liquefiable layer thickness, situation of very loose sand, and input motion parameters were conducted to fully characterize the seismic response of saturated uniform and stratified sand deposits in the presence of piles and compared together.

## 2. NUMERICAL SIMULATIONS

Generally, 72 numerical simulations have been performed using the open-source computational platform OpenSees [4] to gain insight into the seismic performance of the pile-pinning in 10-m-thick mildly inclined ( $4^\circ$ ) saturated uniform and stratified sand soil above the bedrock (Fig. 1).

The physical and mechanical properties of the soil layers and the pile are presented in Table 1. To examine characteristics of motions effects, different models have been subjected to the El Centro (1940) and Loma Prieta (1989) earthquakes (shown in Fig. 2) with 0.25 g scaled peak ground accelerations.

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



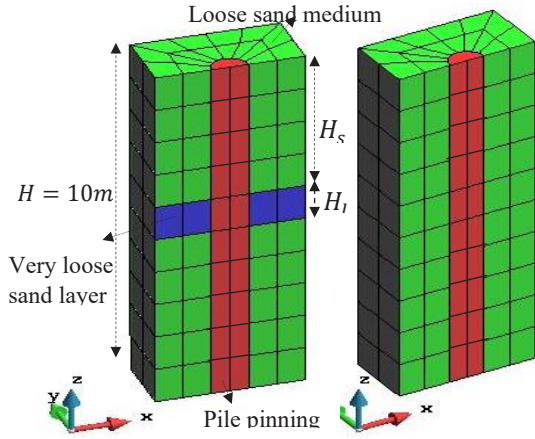


Fig. 1. 3D view of soil mesh and pile pinning, Right side: Uniform saturated sand, Left side: Stratified saturated sandy soil

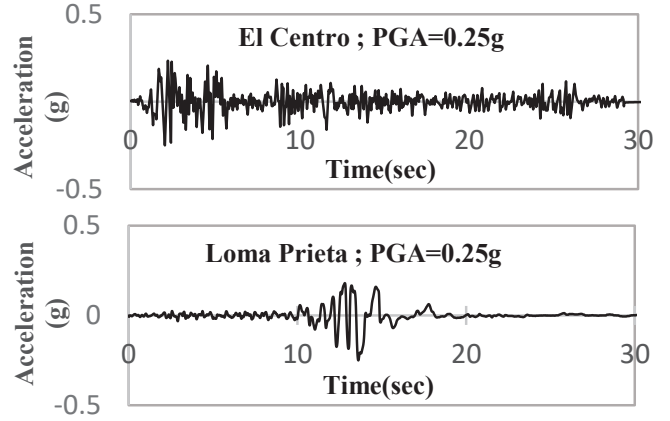


Fig. 2. Horizontal acceleration history for the El Centro (1940) and Loma Prieta (1989) with scaled PGA of 0.25 g, of the input events

Table 1. Soil and pile model parameters

Soil Parameters	Medium	Very Loose
Mass density, $\rho$	2000 kg/m <sup>3</sup>	1700 kg/m <sup>3</sup>
Permeability coefficient, $k$	$6.6 \times 10^{-6}$ m/s	$10^{-5}$ m/s
Shear modulus, $G$	100 MPa	55 MPa
Bulk modulus, $B$	300 MPa	150 MPa
Friction angle, $\phi$	35°	29°
Phase transformation (PT) angle, $\phi_{PT}$	26.5°	29°
Contraction parameter, $c1$	0.21	0.35
Dilation parameter, $d$	0.6	0
Dilation parameter, $d2$	0.3	0
Pile Parameters		
Mass density	2400 kg/m <sup>3</sup>	
Elastic modulus	20000 MPa	
Poisson's ratio	0.3	

The effects of various  $A_{rr} = \pi D^2 / 4S^2$  ( $D$  and  $S$  are pile diameter and spacing between the pile centers, respectively) [1, 3] values on lateral displacement are considered. In addition, diameter effects are investigated several piles pinning configurations (1×1, 2×2, and 4×4). For more detail, refer to Ref [5]. Besides, In the case of remediation of stratified medium sand, two dimensionless parameters have been defined to investigate the effect of the very loose layer thickness and its position on the lateral deformation as follow:

$$H_{lr} = H_l / H, \quad H_{sr} = H_s / H \quad (1)$$

Where  $H$  is the height of soil medium,  $H_s$  is the distance from the ground surface to the very loose sand layer, and  $H_l$  is the thickness of the liquefiable very loose layer (See Fig. 1).

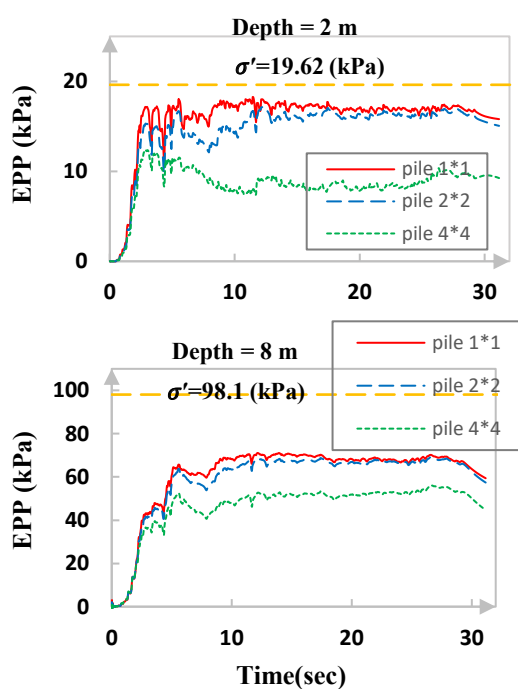
As mentioned, all of the simulations conducted were developed and executed using the open-source computational platform OpenSees [4] based on u-p formulation. In 3D, the soil domain is represented by 8-20 node, fully coupled (solid-fluid) brick elements. The multi-yield-surface plasticity [6] model was chosen for the analysis conducted in this study. The analysis framework and its assumptions, boundary conditions, and constitutive law for saturated soil response were considered according to the Refs [7].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

To investigate the effect of the number of piles on the generation and dissipation of pore water pressure, the time history of excess pore water pressure in surrounding piles 1×1 - 2×2 - 4×4 for depths of 2 and 8 m is shown in Fig. 3. According to Fig. 3, as the number of piles increases, the maximum EPP decreases and disappears sooner, which is due to the increase in system stiffness and the increasing effect of the dilatancy phenomenon. In other words, increasing the stiffness of the system reduces the displacement (not shown here) of the surrounding soil, thereby reducing the incremental process of excess pore water pressure. Also, the result is shown that with increasing  $H_{lr}$  and  $H_{sr}$ , the lateral displacement of the pile head increases.

### 4. CONCLUSION

In this paper, the behavior of the pile group with different configurations of 1×1 - 2×2 - 4×4 in two cases (uniform saturated sand strata/stratified saturated sand layer) has been evaluated under two earthquake records. The main important conclusions drawn from the present study are as follows: Generally, the lateral displacements were amplified as the



**Fig. 3. Time history of excess pore water pressure in surrounding piles 1×1 - 2×2 - 4×4 for different depths**

Arias intensity in an event increased. The variations of lateral displacement rate are related to rates of Arias intensity (not shown). The maximum excess pore pressure ratio has been observed in the very loose sandy soils, due to the contractile behavior of this type of sand. In stratified saturated sand soils, when a very loose layer with a constant thickness is placed at the deeper depth, excess pore water pressure in the upper layers of the soil decreases (not shown). However, in contrast to excess pore water pressure, the displacement of the pile head increases due to the increase in the lateral force of the liquefied soil at a lower depth, which in turn leads to

an increase in rotation at the same height from the pile and eventually increases horizontal displacement. Therefore, it can be mentioned that in the designs, it is not possible to make a decision alone based on only one of the outputs (e.g., displacement, excess pore water pressure in the soil, or bending moment of the along pile).

## REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Ebeido, A. Elgamal, K. Tokimatsu, A. Abe, Pile and Pile-Group Response to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Four Large-Scale Shake-Table Experiments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10) (2019) 04019080.
- [3] Elgamal, J. Lu, D. Forcellini, Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(11) (2009) 1672-1682.
- [4] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual*, (2006).
- [5] 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*, (2020) Accepted (in Persian).
- [6] Elgamal, Z. Yang, E. Parra, A. Ragheb, Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils, *International Journal of Plasticity*, 19(6) (2003) 883-905.
- [7] J. Lu, P. Kamatchi, A. Elgamal, Using stone columns to mitigate lateral deformation in uniform and stratified liquefiable soil strata, *International Journal of Geomechanics*, 19(5) (2019) 04019026.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

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 J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 675-678.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17657.6639







## استفاده از گروه شمع برای کنترل جابه‌جایی افقی در خاک‌های ماسه‌ای قابل روانگرایی یکنواخت و لایه‌ای: بر پایه‌ی شبیه‌سازی سه‌بعدی

علی عسگری\*، فرامرز رنجبر، حبیب اکبرزاده بنگر

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

روانگرایی

گروه شمع

خاک روانگرایی لایه‌ای

شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی

اپنسیس

**خلاصه:** بر اساس گزارش هایی از زلزله های گذشته، پدیده ی روانگرایی یکی از اصلی ترین خطرهای زلزله است که باعث ایجاد خسارت در سازه ها و زیرساخت های آن می شود. برای مقابله با خطرهای ناشی از روانگرایی راهکارهای مختلفی شامل استفاده از ستون سنگی، شمع کوبی، تراکم دینامیکی، تزریق دوغاب و اختلاط عمیق خاک - بتن پیشنهاد شده است. در این پژوهش سعی شده است اثر گروه شمع ها در کاهش خطرات ناشی از پدیده روانگرایی در خاک های ماسه ای یکنواخت و لایه ای با حضور لایه بسیار سست به صورت پارامتریک و با استفاده از تحلیل سه بعدی همبسته دینامیکی در حوزه زمان و با بکارگیری مدل چندصفحه ای دراگر - پراگر برای خاک، در نرم افزار اپنسیس مورد بررسی قرار گیرد. لایه های خاک اشباع تحت دو زلزله واقعی قرار گرفته اند. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهایی شامل نسبت سطح مقطع تسلیح شده، قطر و تعداد شمع، ضخامت و موقعیت لایه روانگرا در خاک های لایه ای و محتوای فرکانسی بر روی شتاب، جابه‌جایی های افقی و اضافه فشار آب حفره ای می باشد. نتایج نشان می دهد افزایش سطح مقطع تسلیح شده، قطر و تعداد شمع، بطور بدیهی باعث کاهش در جابه‌جایی های افقی و اضافه فشار آب حفره ای می شود. همچنین پاسخ خاک های ماسه ای اشباع لایه ای، نه تنها به ضخامت لایه روانگرا وابسته است، بلکه بسیار تحت تأثیر موقعیت آن لایه قرار دارد. وجود یک لایه روانگرا در عمق های پایین تر اگرچه به صورت یک ایزوله در مقابل شتاب عمل می کند، ولی می تواند باعث افزایش جابه‌جایی های سطحی شود. همچنین با توجه به نتایج، همگرایی مناسبی میان روند تغییرات جابه‌جایی شمع و خاک و پارامترهای زلزله های بررسی شده از جمله: شدت آریاس، زمان متناظر با بیشینه شتاب زلزله و تعداد سیکل های معادل مشاهده شده است؛ بنابراین، به نظر می رسد که نتایج این پژوهش می تواند قابل گسترش برای زلزله های دیگر باشد.

### ۱ - مقدمه

این پدیده ها نسبت به آثار زلزله روی سازه ناشناخته ترند [۱]. یکی از این مخاطرات لرزه ای بنا بر آمارهای موجود در زلزله های اخیر، پدیده روانگرایی است. این پدیده در دنیا با دو زلزله نیگاتا و آلاسکا در سال ۱۹۶۴ میلادی و در کشور ما با زلزله منجیل در سال ۱۳۶۹ شمسی به عنوان یک خطر لرزه ای مهم شناخته شده است. توده وسیعی از خاک های سطحی موجود در مناطق ساحلی خلیج فارس و دریای خزر و فراساحلی و همچنین در مسیر رودهای بزرگ از نوع ماسه ای سست یا نیمه‌تراکم و یا از نوع سیلت های غیرچسبنده

با توجه به قرارگیری ایران در منطقه ای با خطر لرزه ای بالا، نیروهای ناشی از زلزله یکی از عوامل کنترل کننده طراحی در مهندسی عمران است. ماهیت و روش اعمال این نیروها به سازه ها موضوع شناخته شده ای است که در آیین نامه های مختلف در مورد آنها توضیح داده شده است. درحوزه ژئوتکنیک، با وجود آن که سال های نسبتاً زیادی از مشاهده خطرهای لرزه ای مختلف می گذرد،

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



لو<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۱] با انجام شبیه سازی سه بعدی عددی، اثرات گروه ستون سنگی نامحدود در کاهش روانگرایی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تمرکز آنها بر روی ارزیابی پارامترهایی نظیر: قطر ستون سنگی، موقعیت لایه روانگرا با ضخامت ثابت و نفوذپذیری ستون سنگی بر روی جابه جایی جانبی، اضافه فشار آب حفره ای و شتاب در لایه ی خاک تسلیح شده می باشد. آنها دریافتند که موقعیت لایه روانگرا تأثیر کمی در جابه جایی سطح دارد، ولی بیشترین جابه جایی ناشی از همین لایه روانگرا ناشی می شود. به عبارت دیگر آنها دریافتند که وجود لایه روانگرا حتی با ضخامت کم هم باعث افزایش چشمگیری در جابه جایی های افقی زمین می شود. هی<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۲] با بهره گیری از آزمایش میز لرزان، رفتار لرزه ای شمع های تکی و گروهی را در خاک روانگرا مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در آن پژوهش، مسأله ی فشار وارده به شمع تک و گروه شمع و اثرات سایه و همسایگی در خاک روانگرا تحت شرایط گسترش جانبی مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است. آنها دریافتند که در گروه شمع، نیروی وارده به هر شمع به موقعیت آن شمع در گروه بستگی دارد. همچنین آنان دریافتند که در گروه شمع، شمع های میانی نسبت به شمع های کناری تقریباً به میزان ۵۰ درصد جابه جایی های کمتری را تجربه خواهند کرد و علت آن را محصورشدگی شمع های میانی توسط شمع های پایین دست و بالادست و اثر سایه و همسایگی معرفی کردند. همچنین آنان استفاده از شمع های قربانی شونده<sup>۱۴</sup> در بالادست و پایین دست شمع های اصلی جهت کاهش اثرات روانگرایی بر روی سازه مورد نظر را پیشنهاد کردند.

عملکرد سیستم شمع - خاک به طور قابل توجهی می تواند تحت تأثیر بسیاری از ویژگی های یک حرکت زمین لرزه باشد، در نتیجه به منظور پیشرفت و فهم بهتر نسبت به عملکرد لرزه ای شمع ها در خاک روانگرا مطالعاتی در سال های اخیر صورت گرفته است. پناغی<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۳] به بررسی اثر محتوی فرکانسی زمین لرزه بر پاسخ شمع ها در خاک روانگرا پرداختند. آنها دریافتند که زمان و محتوای فرکانسی زمین لرزه باعث تغییر در زمان شروع تغییر شکل های بزرگ می شود. همچنین آنها مشاهده کردند که در زمین های سست، زمین لرزه ها با محتوای فرکانسی پایین، فشار آب حفره ای بیشتری

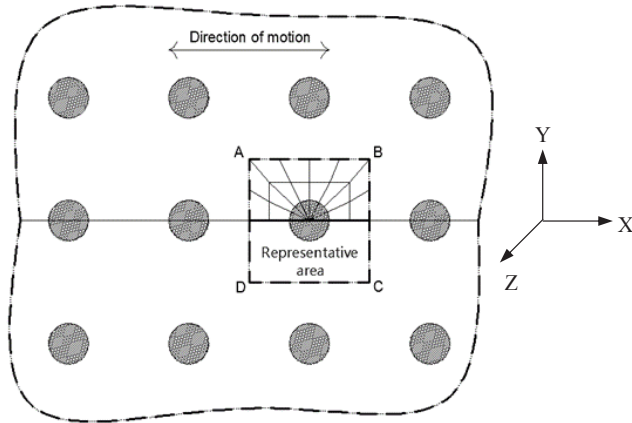
هستند که در صورت قرارگیری در شرایط لرزه ای، سختی خود را به شدت از دست می دهند. به همین علت در این نواحی گاهی اوقات سازه ها بر روی فونداسیون های شمعی ساخته می شوند تا نیروهای وارد شده از عهده خاک مستعد روانگرایی برداشته شوند.

مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار لرزه ای شمع ها در خاک روانگرا، یکی از موضوعات اصلی پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای به شمار می رود. از جمله کارهای عددی و آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه می توان به مطالعات فلاح زاده و جعفریان [۲]، الجمال<sup>۱</sup> و همکاران [۳]، زانگ<sup>۲</sup> و تنگ<sup>۴</sup>، ابیدو<sup>۴</sup> و همکاران [۵]، رحمانی و پاک [۶]، سو<sup>۵</sup> و همکاران [۷]، سرکار<sup>۶</sup> و همکاران [۸]، هوی<sup>۶</sup> و تنگ<sup>۸</sup> [۹] اشاره کرد.

الجمال و همکاران [۳] بر اساس یک مطالعه ی پارامتریک، مجموعه ای از شبیه سازی های سه بعدی عددی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود اپنسیس<sup>۹</sup> و با کمک رابط کاربری ساده کننده ی مرحله ی پیش و پس پردازش یعنی اپنسیس پی ال<sup>۱۰</sup> به ارزیابی استفاده از ستون سنگی و شمع کوبی در کاهش پدیده ی روانگرایی پرداختند. همچنین در این پژوهش الجمال و همکاران [۳] فاکتورهای مهمی از جمله نفوذپذیری خاک، ضریب سطح مقطع تسلیح شده<sup>۱۱</sup> در بهبود تغییر شکل های ایجاد شده ناشی از روانگرایی را مورد شناسایی و بررسی قرار دادند. آنها همچنین دریافتند که شمع کوبی چه در لایه های ماسه و چه در لایه های سیلت اثر یکسانی در کاهش تغییر شکل های جانبی لایه ی خاک دارد، در حالی که ستون سنگی اثر کمتری در کاهش روانگرایی در خاک سیلتی دارد. در ادامه ی کار الجمال و همکاران [۳]، عسگری و همکاران [۱۰] با بهره گیری از شبیه سازی عددی با کمک رابط کاربری اپنسیس پی ال به بررسی اثرگذاری پارامترهایی نظیر: شیب زمین، قطر شمع، جرم سازه، خصوصیات زلزله بر روی شتاب خاک و شمع، جابه جایی جانبی، فشار آب حفره ای و تنش کرنش برشی پرداختند.

- 1 Elgamal
- 2 Zhang
- 3 Tang
- 4 Ebeido
- 5 Su
- 6 Sarkar
- 7 Hui
- 8 Tang
- 9 OpenSees
- 10 OpenSeesPL
- 11 Area replacement ratio

- 12 Lu
- 13 He
- 14 Sacrifice pile
- 15 Panaghi



شکل ۱. محیطی با تعداد شمعی زیاد [۱۸]

Fig. 1. Infinit pile goroup in the mudium[18]

تحلیل‌هایی غیرممکن می‌باشد. در گروه شمعی‌های نامحدود به علت رفتار یکسان شمعی‌ها نیاز به مدل‌سازی همه شمعی‌ها نیست و با مدل‌سازی یکی از آن‌ها و در نظر گرفتن شرایط مرزی تکرارشونده<sup>۴</sup> می‌توان اثر شمعی‌های دیگر را در نظر گرفت. این روش مدل‌سازی در طراحی شمعی‌های پل کارکینز<sup>۵</sup> کالیفرنیا [۱۷] و مطالعات لو و لام<sup>۶</sup> [۱۷]، کلار<sup>۷</sup> [۱۸]، الجمال [۳] و عسگری [۱۰] استفاده شده است.

در شکل ۱ قطعه ABCD بیانگر گروه شمعی‌های نامحدود می‌باشد. در این قطعه تمام نقاط واقع بر مرزهای جانبی عمود بر جهت تحریک لرزه‌ای (AD و BC) در جهت X و Z با استفاده از دستور equal Dof موجود در نرم‌افزار اپنسیس به هم مقید شده‌اند، لذا این نقاط دارای تغییرمکان‌های یکسان در جهت X و Z می‌باشند. همچنین مرزهای پایینی کاملاً ثابت بوده و بدون تغییرمکان می‌باشد و امکان زهکشی فقط از مرز بالایی امکان‌پذیر است. با توجه به متقارن بودن مدل نسبت به محور موازی با جهت تحریک، تنها نصف مدل تحت آنالیز قرار گرفته است.

در مسائل مربوط به بهسازی با گروه شمعی نامحدود ضریب سطح مقطع تسلیح شده ( $A_{rr}$ ) به صورت نسبت مساحت شمعی ( $A_r$ ) به مجذور فاصله‌ی شمعی‌ها (مستطیل ABCD در شکل ۱) تعریف می‌شود.

$$A_{rr} = \frac{A_r}{A} = \frac{\pi D^2}{4S^2} \quad (1)$$

- 4 Periodic Boundary Conditions
- 5 Carquinez
- 6 Law and Lam
- 7 Klar

را نسبت به زمین لرزه‌هایی با محتوای فرکانسی بالا ایجاد خواهد کرد. زانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] در یک شبیه‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار اپنسیس به بررسی اثر بیشینه سرعت زمین<sup>۲</sup> و خصوصیات حرکت زمین لرزه در پاسخ سیستم شمعی-خاک پرداختند. آنها در آن مطالعه به این نتیجه رسیدند که بیشینه سرعت زمین به عنوان یک پارامتر مناسب از حرکت زمین لرزه جهت توصیف پاسخ سیستم شمعی-خاک، در خاک روانگراست. همچنین آنها دریافتند که افزایش بیشینه سرعت زمین، باعث افزایش بیشینه لنگر خمشی و بیشینه جابه‌جایی جانبی در شمعی و خاک خواهد شد.

علی‌رغم مطالعات گسترده بر روی اثربخشی شمعی‌ها در سال‌های اخیر، پژوهش‌های اندکی بر روی اثرات اندازه ضخامت لایه‌ی روانگرا و موقعیت آن لایه بر روی عملکرد افقی شمعی‌ها به صورت کمی انجام شده است، در نتیجه بررسی این موارد به صورت پارامتریک را می‌توان از نوآوری‌های این پژوهش دانست. در این پژوهش علاوه بر بررسی این اثرات، تأثیر پارامترهایی نظیر: قطر شمعی، ضریب سطح مقطع تسلیح شده و محتوای فرکانسی زلزله نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

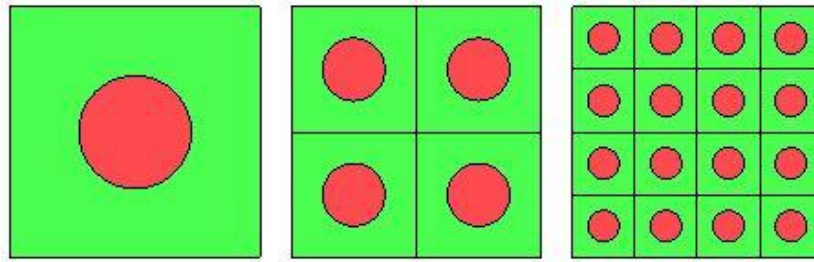
## ۲- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش از برنامه اجزای محدود کد باز اپنسیس استفاده شده است که یک برنامه اجزای محدود جامع برای مدل‌سازی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد که در پییر<sup>۳</sup> توسعه داده شده است. اپنسیس دارای محدوده وسیعی از المان‌های مختلف، الگوریتم‌هایی برای حل مسأله و همچنین مدل‌های رفتاری متنوع برای مصالح بوده و در نتیجه دارای قابلیت‌های پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی آنالیزهای دینامیکی همبسته محیط متخلخل اشباع و تحلیل پاسخ غیرخطی سیستم‌ها است [۱۵]، [۱۶].

### ۲-۱- مدل‌سازی سیستم خاک و گروه شمعی نامحدود

مدل‌سازی سه‌بعدی گروه شمعی محدود با تعداد شمعی‌های زیاد نیازمند ابزار محاسباتی پیشرفته‌اند و در بعضی مواقع انجام چنین

- 1 Zhang
- 2 Peak ground velocity
- 3 PEER



شکل ۲. آرایش گروه شمع محدود ۱ × ۱ - ۲ × ۲ -

Fig. 2. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

جدول ۱. قطر و فاصله ی شمع ها در تحلیل های مختلف

Table 1. Diameter and pile spacing in different analyzes

آرایش شمع ها	قطر شمع بر حسب متر	$A_{rr} = 1\%$	$A_{rr} = 5\%$	$A_{rr} = 10\%$
		فاصله بر حسب متر	فاصله بر حسب متر	فاصله بر حسب متر
۱ × ۱	۰/۸	۷/۰۸۹	۳/۱۷۰	۲/۲۴۱
۲ × ۲	۰/۶	۵/۳۱۷	۲/۳۷۷	۱/۶۸۱
۴ × ۴	۰/۴	۳/۵۴۴	۱/۵۸۵	۱/۱۲۰

جدول ۲. مشخصات شمع بتنی

Table 2. Concrete pile properties

مقدار	واحد	نماد	مشخصات
۲/۴	ton/m <sup>3</sup>	$\rho$	جرم مخصوص شمع
۲۰۰۰۰۰۰۰	kPa	$E$	مدول الاستیسیته
۷۶۹۲۳۰۸	kPa	$G$	مدول برشی

در رابطه (۱)،  $S$ ، فاصله مرکز تا مرکز شمع ها و  $D$  قطر شمع

می باشد.

در این پژوهش با استفاده از روش مذکور، رفتار گروه شمع های محدود با آرایش مختلف در زمین هایی با خاک های یکنواخت و لایه ای سست مورد ارزیابی قرار می گیرد. لو و همکاران [۱۱] نیز با استفاده از همین روش مدل سازی، رفتار گروه ستون سنگی محدود با آرایش مختلف را در خاک روانگرا مورد بررسی قرار دادند. شکل ۲ و جدول ۱ به ترتیب آرایش گروه شمع محدود و ضریب سطح مقطع تسلیح شده ی مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می دهد.

در این پژوهش جهت مدل سازی خاک از المان های آجری<sup>۱</sup> هشت گره ای با ۴ درجه آزادی (۳ درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و ۱ درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره ای) و برای مدل سازی شمع از المان تیر ستون<sup>۲</sup> با ۶ درجه آزادی (۳ درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و ۳ درجه آزادی مربوط به دوران) استفاده شده است. در همه ی تحلیل ها، مقطع شمع به صورت دایره ای و جنس شمع طبق جدول ۲ از نوع بتنی درجاریز با طول

۱۰ متر و تنها با مقاومت اتکایی<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است. رفتار شمع در مراحل بارگذاری به صورت الاستیک و با در نظر گرفتن اثر کمانش پی دلتا<sup>۴</sup> می باشد. همچنین در مدل سازی شمع، جرم شمع به صورت جرم متمرکز در گره های المان شمع در نظر گرفته شده است. جهت اتصال المان های شمع به خاک، مطابق شکل ۳ با استفاده از یک سری المان های صلب از نوع المان تیر<sup>۵</sup> هر نقطه از المان شمع به نقاط هم تراز از المان های خاک اطراف شمع متصل می گردد.

3 Bearing Pile  
4  $P - \Delta$   
5 Beam Element

1 BrickUP  
2 Beam Column



خیلی سست برابر با خاک ماسه ای اشباع یکنواخت در نظر گرفته شده است. از طرفی در این پژوهش برای بررسی اثر ضخامت لایه ی خیلی سست و موقعیت آن بر تغییرشکل های جانبی مدل های بهسازی شده بوسیله شمع، به ترتیب دو پارامتر ضریب ضخامت  $H_{lr}$  و ضریب موقعیت  $H_{sr}$  به صورت زیر تعریف می گردد:

$$H_{lr} = \frac{H_l}{H} \quad (2)$$

$$H_{sr} = \frac{H_s}{H} \quad (3)$$

که در آن  $H$  ضخامت کل خاک و  $H_l$  و  $H_s$  به ترتیب ضخامت لایه ی خیلی سست و فاصله ی سطح بالایی خاک خیلی سست تا سطح زمین مطابق شکل ۴-د می باشد.

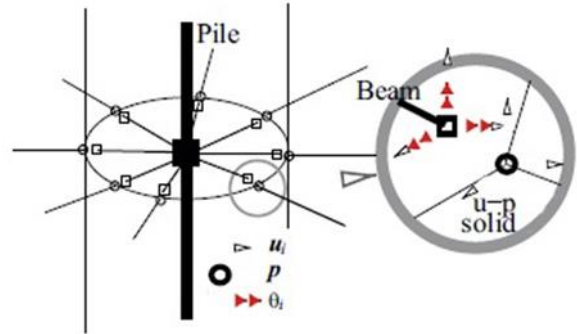
### ۲-۲- روش تحلیل

در این پژوهش خاک اشباع بر اساس نظریه بیوت<sup>۳</sup> [۲۳] به صورت یک محیط دو فازه در نظر گرفته شده است. در این روش تغییر شکل های فاز جامد و جریان سیال به صورت همبسته می باشد. همچنین برای مدل کردن رفتار محیط متخلخل اشباع، از فرمولاسیون  $U-P$  استفاده شده است که  $U$  جابه جایی خاک و  $P$  فشار سیال می باشد. این فرمولاسیون زمانی که فرکانس بارگذاری بالا باشد قابل استفاده است. بار زلزله نمونه ای از این بارگذاری می باشد. معادلات  $U-P$  بر اساس تعریف چن<sup>۴</sup> [۲۴] از رابطه (۴) و رابطه (۵) تشکیل شده است. رابطه (۴)، معادله مومنتم برای کل المان و رابطه (۵)، معادله تعادل جرم برای فاز سیال است.

$$M\ddot{U} + \int B^T \sigma' dv - QP - f^{(s)} = 0 \quad (4)$$

$$Q^T \ddot{U} + HP + SP - f^{(p)} = 0 \quad (5)$$

در این روابط  $M$  ماتریس جرم سیستم،  $B$  ماتریس کرنش جابه جایی،  $Q$  ماتریس همبستگی دو معادله،  $S$  ماتریس تراکم پذیری و  $H$  ماتریس نفوذ پذیری است. بردارهای  $f^{(s)}$  و  $f^{(p)}$  شامل تمام اثرات نیروهای حجمی و نیروهای سطحی تعریف شده در مرزها می باشد.



شکل ۳. نحوه اتصال المان شمع به خاک [۱۹]

Fig. 3. Connection between pile and soil elements[19]

### ۲-۱-۲- مدل سازی خاک ماسه ای اشباع یکنواخت

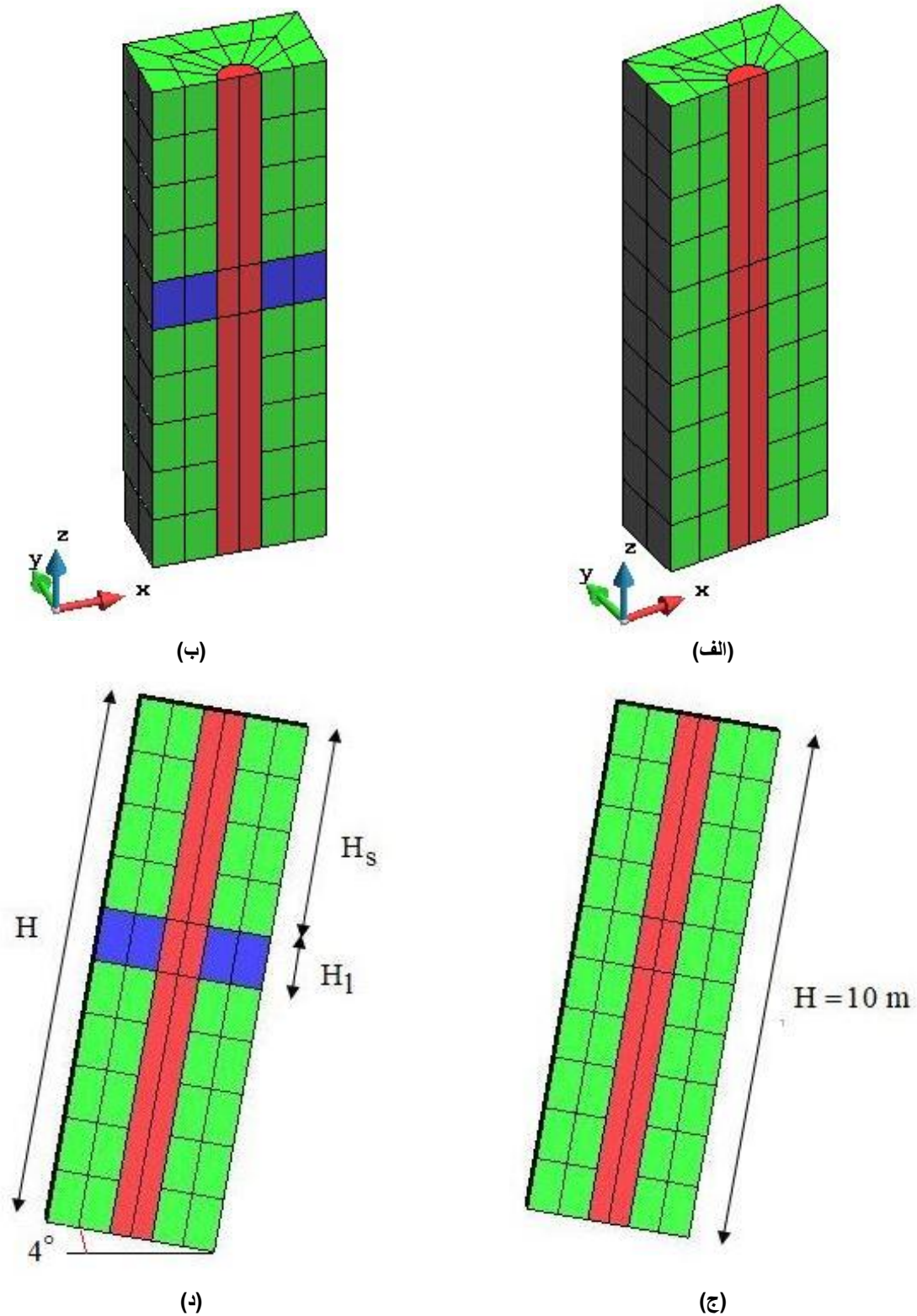
در این حالت پروفیل خاک از یک لایه ماسه اشباع با ضخامت ۱۰ متر و شیب ملایم ۴ درجه مطابق شکل ۴ الف تشکیل شده است. از طرفی خاک مورد نظر از نوع ماسه نوادا<sup>۱</sup> با تراکم نسبی متوسط می باشد. مدل رفتاری به کار گرفته شده برای ماسه، مدل چندصفحه ای ارائه شده بوسیله پروست<sup>۲</sup> [۲۰] است. این مدل رفتاری بوسیله یانگ و الجمال [۲۱] برای در نظر گرفتن اثر روانگرایی و اتساع خاک اصلاح شده است. پارامترهای مورد استفاده در این مدل رفتاری برای ماسه ی نوادا در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین در این مدل، ضرایب ماتریس جرم و سختی در میرایی رایلی به ترتیب صفر و ۰/۰۳ جهت افزایش پایداری سیستم عددی در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱-۲- مدل سازی خاک ماسه ای اشباع لایه ای

در این حالت یک لایه پروفیل خاک از نوع ماسه روانگرا با مقاومت برشی خیلی پایین مطابق با شکل ۴ ب با ضخامت متغیر و در ارتفاع های مختلف در بین پروفیل خاک ماسه ای اشباع یکنواخت قرار می گیرد. از طرفی در این مدل برای بدست آوردن پایین ترین سطح مقاومت برشی، ضرایب ماتریس جرم و سختی در میرایی رایلی به ترتیب صفر و ۰/۰۰۰۰۳ در نظر گرفته شده است. همچنین جهت پایداری استاتیکی تحت بارگذاری ثقلی، مقدار مقاومت پسماند برای این ماسه روانگرایی خیلی سست ۴/۸ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. برای تسهیل در مقایسه نتایج، پارامترهای دیگر برای خاک

3 Biot  
4 Chan

1 Nevada  
2 Prevost



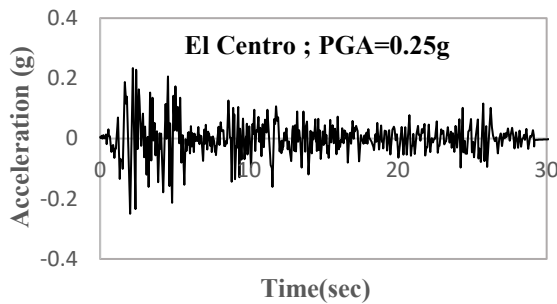
شکل ۴. مش بندی خاک و شمع در ارتفاع: (الف) نمای سه بعدی از خاک ماسه ای اشباع یکنواخت، (ب) نمای سه بعدی از خاک ماسه ای اشباع لایه ای، (ج) نمای جانبی از خاک ماسه ای اشباع یکنواخت، (د) نمای جانبی از خاک ماسه ای اشباع لایه ای

Fig. 4. Finite element mesh for the ground modification study: (a) 3D view of Uniform saturated Sand Stratum (b) 3D view of Stratified saturated Sand Stratum (c) Side view of Uniform saturated Sand Stratum (d) Side view of Stratified saturated Sand Stratum

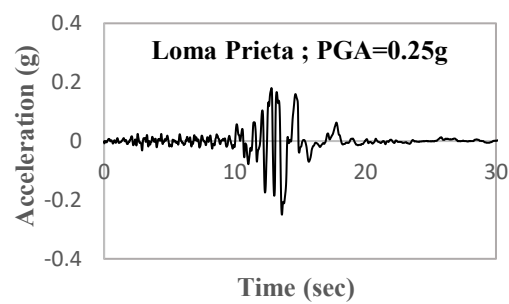
جدول ۳. مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی ماسه نوادا [۲۲، ۳]

Table 3. Soil model parameters for Nevada sand

Very Loose Sand	Medium Dense Sand	واحد	نماد	پارامتر
۱۷۰۰	۲۰۰۰	$kg/m^3$	$\rho$	جرم مخصوص اشباع
$1 \times 10^{-5}$	$6/6 \times 10^{-5}$	$m/s$	$k$	ضریب نفوذ پذیری
۸۰	۸۰	kPa	$p'_r$	فشار مرجع
۵۵	۱۰۰	MPa	$G$	مدول برشی مرجع
۱۵۰	۳۰۰	MPa	$B$	مدول بالک
۲۹	۳۵	درجه	$\phi$	زاویه اصطکاک خاک
۲۹	۲۶/۵	درجه	$\phi_{PT}$	زاویه PT
۰/۳۵	۰/۲۱	-	$c_1$	پارامتر انقباضی
۰/۰	۰/۶	-	$d_1$	پارامتر اتساعی اول
۰/۰	۰/۳	-	$d_2$	پارامتر اتساعی دوم
۱۰	$72/5 \times 10^{-5}$	kPa	$l_1$	پارامتر روانگرایی اول
۰/۰۲	۰/۰۰۳	kPa	$l_2$	پارامتر روانگرایی دوم
۱	۱	kPa	$l_3$	پارامتر روانگرایی سوم



(ب)



(الف)

شکل ۵. تاریخچه شتاب افقی زلزله السنترو و لوماپریتا؛ (الف) شتاب نگاشت زلزله لوماپریتا، (ب) شتاب نگاشت زلزله السنترو

Fig. 5. Horizontal acceleration history for the El Centro (1940) and Loma Prieta (1989) with scaled PGA of 0.25 g, (a) Loma Prieta earthquake (b) El Centro earthquake

### ۲-۳- انتخاب شتاب نگاشت ها

در این پژوهش برای بررسی اثر پارامترهای مختلف زلزله بر روی پاسخ سیستم شمع و خاک از شتاب نگاشت های مقیاس شده السنترو<sup>۱</sup> ۱۹۴۰ و لوماپریتا<sup>۲</sup> ۱۹۸۹ مطابق شکل ۵ با بیشینه شتاب ۰/۲۵g در انتهای مدل و در جهت X (درجهت شیب) استفاده شده است. مشخصات این زلزله ها در جدول ۴ آورده شده است. به دو دلیل شتاب نگاشت های بالا انتخاب شده اند:

به طور کلی جهت تحلیل دینامیکی مدل، چهار مرحله در نظر گرفته شده است. مرحله اول: در این مرحله المان های خاک به صورت الاستیک تحت بار ژئواستاتیکی قرار داده می شود. مرحله دوم: در این مرحله خاک با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی تحت بار ژئواستاتیکی قرار داده می شود تا شرایط طبیعی زمین بوجود آید. مرحله سوم: در این مرحله المان های شمع در داخل محیط خاک تعریف می شود و با اعمال بارهای استاتیکی، آنالیز استاتیکی انجام می شود. مرحله چهارم: در این مرحله کل مجموعه تحت بار دینامیکی قرار می گیرد.

1 El Centro  
2 Loma Prieta

جدول ۴. پارامترهای شتاب نگاشت های انتخابی

Table 4. Earthquake data for the parametric analysis

El Centro/ N-S	Loma Prieta/ E- W	واحد	نماد	پارامترهای حرکت زلزله
1940-05-18	1989-10-18	-	-	زمان وقوع
Rock	Rock	-	-	شرایط ساختگاه
117 El Centro	Treasure Island	-	-	ایستگاه ثبت زلزله
7.1	6.93	ریشتر	$M_w$	بزرگای زلزله
0.314	0.16	g	PGA	بیشینه شتاب زمین
0.113	0.219	-	PGV/PGA	نسبت بیشینه سرعت به بیشینه شتاب زمین
2.02	13.62	sec	$t_p$	زمان متناظر با بیشینه شتاب افقی
0.5	0.62	sec	$T_p$	پریود غالب
1.11	0.888	m/s	$I_\alpha$	شدت آریاس
990.291	593.337	cm/s	CAV	سرعت تجمعی مطلق
14.5	5.8	-	$N_c$	تعداد سیکل های معادل زلزله

نوادا تشکیل شده است که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۵ ارائه شده است. لایه اول با تراکم ۳۵ درصد و ارتفاع ۹/۱ متر (در مقیاس اصلی) و لایه دوم با تراکم ۸۰ درصد و ارتفاع ۱۱/۴ متر (در مقیاس اصلی) است. توجه شود که کلیه ابعاد و پارامترهای مکانیکی خاک و شمع مانند: طول، مساحت، ممان اینرسی، مدول یانگ، مدول برشی و غیره در این مقاله از این به بعد در مقیاس واقعی ارائه می شوند. همچنین نتایج ارائه شده نیز در مقیاس واقعی هستند.

در این مدل آزمایشگاهی، شمع از جنس آلومینیوم با چگالی ۲۹۰ تن بر متر مکعب، مدول یانگ ۷۰ گیگاپاسکال که به صورت یک لوله ی توخالی با قطر خارجی ۰/۶۷ متر و ضخامت جداره ۱۹ میلی متر بوده استفاده شده است. همچنین در این مدل، ۱۶/۸ متر از طول شمع در خاک مدفون بوده و همچنین سرشمع که در ارتفاع ۳/۸ متری از سطح زمین قرار دارد باری به اندازه ۴۸۰ کیلونیوتن به عنوان بار روسازه بر آن اعمال گردیده است. ذکر این نکته هم لازم است که به دلیل متقارن بودن مدل آزمایشگاهی فقط نصف مدل در شبیه سازی عددی در نظر گرفته شده است.

۲-۳- نتایج راستی آزمایی

در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج آزمایش سانتریفیوژ و مدل سازی عددی پرداخته شده است. در شکل ۷ تغییرات اضافه

بر اساس گزارش های ارائه شده در اثر وقوع این زلزله ها پدیده روانگرایی بطور گسترده مشاهده شده است و همچنین جابه جایی های بزرگی در سطح زمین رخ داده است.  
 داشتن محتوای فرکانسی مختلف که در شکل ۵ نشان داده شده است.

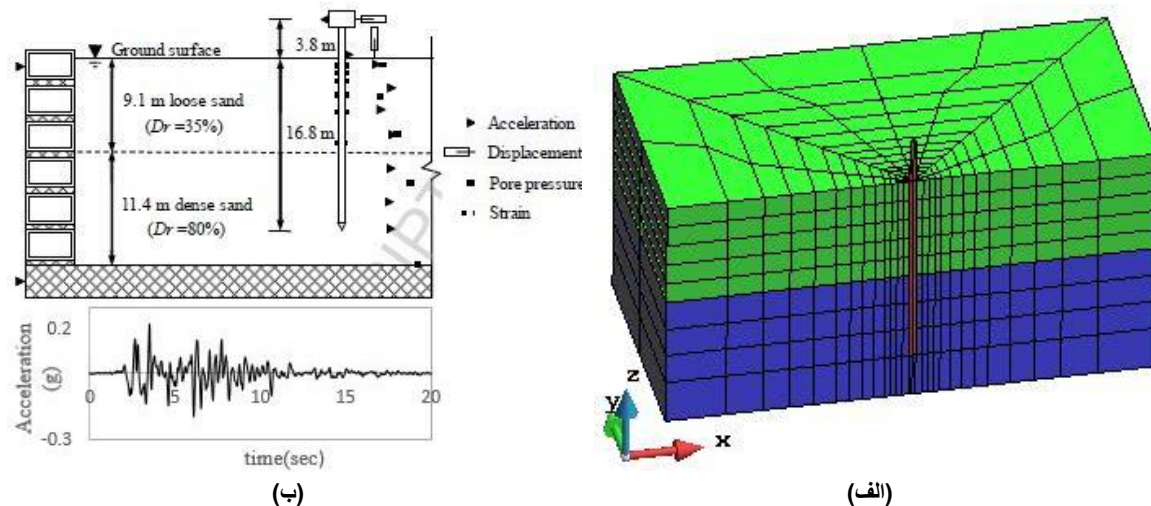
۳- راستی آزمایی

۳-۱- معرفی آزمایش سانتریفیوژ ویلسون و همکاران (۱۹۹۸)

با توجه به پیچیدگی مدل سازی عددی سیستم خاک و گروه شمع به صورت سه بعدی، برای حصول اطمینان از درستی مدل سازی، نتایج عددی با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی ویلسون<sup>۱</sup> و همکاران [۲۵] مقایسه گردیده است. داده های آزمایشگاهی ویلسون و همکاران [۲۵]، مربوط به ۵ مدل فیزیکی سانتریفیوژ بوده که هر کدام از این مدل ها تحت شتاب نگاشت مختلف قرار گرفته است. در این پژوهش به منظور راستی آزمایی مدل عددی، تنها از مدل فیزیکی شماره ۲ (CSP۲) با تاریخچه شتاب ورودی رخداد F (شتاب نگاشت زلزله کوبه) با بیشینه شتاب ۰/۲۲ g به مدل استفاده شده است.

شکل ۶ مدل آزمایشگاهی CSP۲ و مدل عددی شبیه سازی شده در نرم افزار اپنسیس را نشان می دهد که از دو لایه خاک از جنس ماسه

1 Wilson



شکل ۶. الف) مدل عددی در نرم افزار اپنسیس، ب) مدل سانتریفیوژ ویلسون نمونه CSP2 [۲۵]

Fig. 6. (a) Numerical model in OpenSees software (b) Layout of the model for centrifuge test by Wilson et al [25]

جدول ۵. مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی ماسه نوادا آزمایش سانتریفیوژ [۳، ۲۲]

Table 5. Calibrated characteristics of Nevada sand in centrifugal test

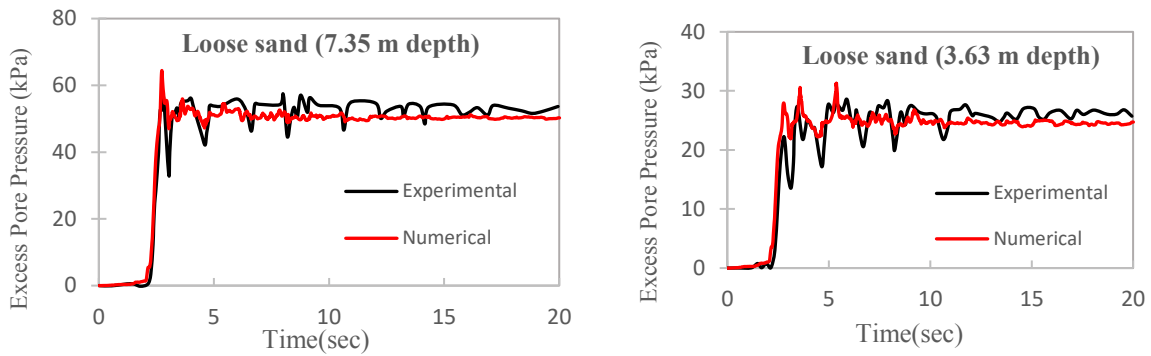
Loose Sand	Dense Sand	واحد	نماد	پارامتر
۱۷۰۰	۲۱۰۰	$kg/m^3$	$\rho$	جرم مخصوص اشباع
$1 \times 10^{-5}$	$6/6 \times 10^{-5}$	$m/s$	k	ضریب نفوذ پذیری
۸۰	۵۰	kPa	$p'_r$	فشار مرجع
۵۵/۵	۱۳۰	MPa	G	مدول برشی مرجع
۱۵۰	۳۹۰	MPa	B	مدول بالک
۲۹	۴۰	درجه	$\phi$	زاویه اصطکاک خاک
۲۹	۲۷	درجه	$\phi_{PT}$	زاویه PT
۰/۲۱	۰/۰۳	-	$c_1$	پارامتر انقباضی
۰/۰	۰/۸	-	$d_1$	پارامتر اتساعی اول
۰/۰	۵	-	$d_2$	پارامتر اتساعی دوم
۱۰	۰/۰	kPa	$l_1$	پارامتر روانگرایی اول
۰/۰۲	۰/۰	kPa	$l_2$	پارامتر روانگرایی دوم
۱	۰/۰	kPa	$l_3$	پارامتر روانگرایی سوم

می باشد را نشان می دهد.

همانگی مطلوب نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، اطمینان از روند خوب مدل سازی سه بعدی را ایجاد کرده است که این امر نشان می دهد تمامی عوامل مؤثر در نظر گرفته شده بر روی پاسخ لرزه ای خاک مانند: تعیین مدل رفتاری و پارامترهای آن، تعیین ابعاد کلی و المان های مدل، شرایط مرزی در حد قابل قبولی مناسب است.

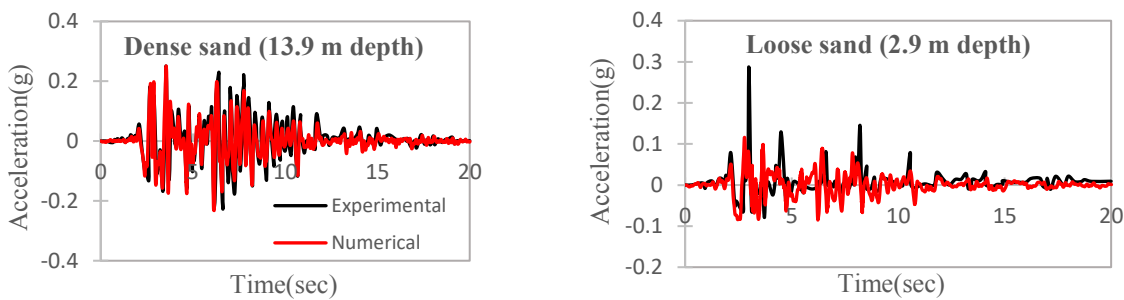
فشار آب حفره ای حاصل از مدل سازی عددی به همراه نتایج آزمایش سانتریفیوژ در ۲ عمق ۳/۶۳ و ۷/۳۵ متری ارائه شده است.

شکل های ۸ و ۹ به ترتیب تاریخچه زمانی شتاب خاک در عمق های مختلف از میدان آزاد و تاریخچه زمانی شتاب سرشمع که حاصل از مدل سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی



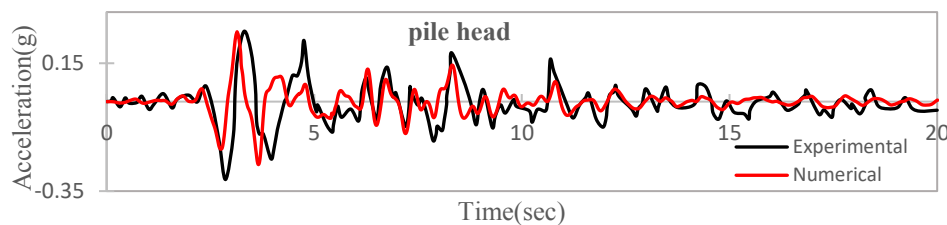
شکل ۷. مقایسه تغییرات فشار آب حفره ای حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

Fig. 7. Comparison between of numerical and experimental pore water pressure time histories at free-field



شکل ۸. مقایسه شتاب افقی خاک در میدان آزاد حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

Fig. 8. Comparison between of numerical and experimental acceleration time histories at free-field



شکل ۹. مقایسه شتاب افقی سرشمع حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

Fig. 9. Comparison between of numerical and experimental acceleration time histories at the pile head

مشخص از گروه شمع، با افزایش سطح مقطع تسلیح شده و یا کاهش فاصله ی شمع ها، مقدار جابه‌جایی بیشینه سر شمع کاهش می‌یابد، که علت آن را می‌توان افزایش سختی و به تناسب آن افزایش رفتار اتساعی سیستم و تسریع در زائل شدن فشار آب حفره ای دانست. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که محتوای فرکانسی تأثیر زیادی بر جابه‌جایی افقی شمع دارد. همان طور که مشاهده می‌شود اثر زلزله ی السنترو بر روی بیشینه جابه‌جایی افقی سرشمع بیشتر از زلزله ی لوماپریتا است. با توجه به مطالعات قبلی این روند را می‌توان

#### ۴ - تحلیل نتایج

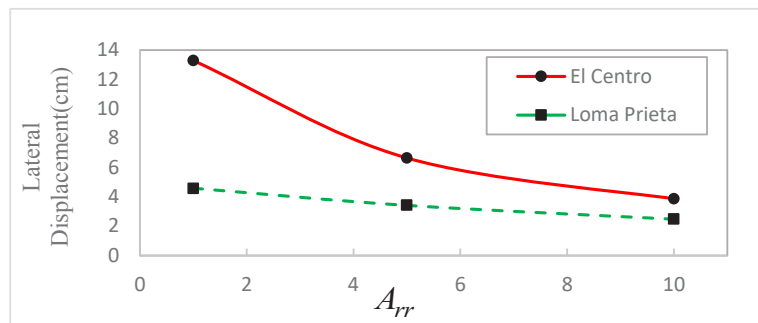
##### ۴ - ۱ - بهسازی خاک ماسه ای اشباع یکنواخت

در این حالت در مجموع ۱۸ شبیه سازی عددی تحت دو رکورد زلزله انجام شده است که در آن، اثر پارامترهای مختلفی از قبیل آرایش گروه شمع، ضریب سطح مقطع تسلیح شده و محتوای فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۶ بیشینه جابه‌جایی جانبی سر شمع را تحت دو رکورد زلزله ی لوماپریتا و السنترو نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که در یک آرایش

جدول ۶. بیشینه جابه‌جایی جانبی سرشمع در خاک ماسه ای اشباع یکنواخت تحت رکورد زلزله لوماپریتا و السنترو (جابه‌جایی جانبی بر حسب سانتی‌متر)

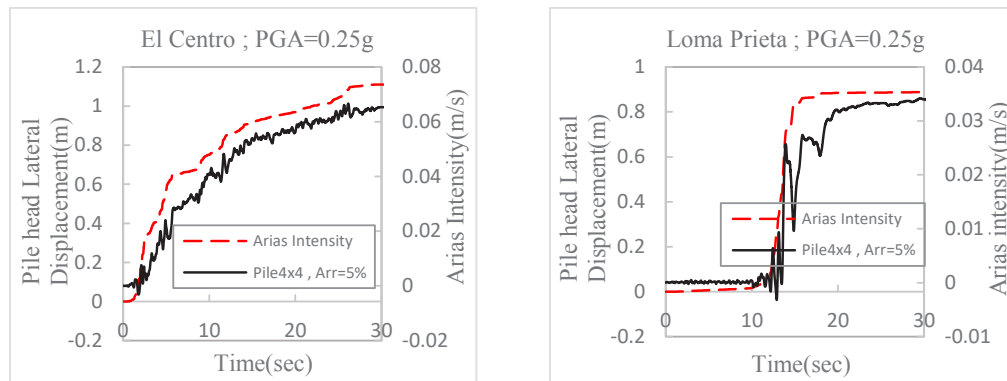
Table 6. Maximum lateral displacement of the pile head in Uniform saturated Sand Stratum under the El Centro and Loma Prieta earthquake

آرایش شمع	قطر شمع (سانتی‌متر)	لوماپریتا			السنترو		
		$A_{rr} = 1\%$	$A_{rr} = 5\%$	$A_{rr} = 10\%$	$A_{rr} = 1\%$	$A_{rr} = 5\%$	$A_{rr} = 10\%$
۱×۱	۸۰	۴/۵۶	۲/۸۱	۱/۹۵	۱۱/۵۰	۴/۲۸	۲/۳۱
۲×۲	۶۰	۴/۵۹	۳/۴۲	۲/۴۸	۱۳/۲۹	۶/۶۵	۳/۸۷
۴×۴	۴۰	۴/۶۳	۳/۹۳	۳/۲۵	۱۵/۱۲	۸/۸۲	۶/۳۹



شکل ۱۰. تأثیر سطح مقطع تسلیح شده بر بیشینه جابه‌جایی سرشمع در گروه شمع ۲×۲ برای شتاب نگاشت های انتخابی با بیشینه شتاب ۰/۲۵ g

Fig. 10. The effect of area replacement ratio on the maximum pile head displacement in the 2×2 pile group for the El Centro and Loma Prieta with scaled PGA of 0.25 g



شکل ۱۱. تغییرات جابه‌جایی سرشمع و شدت آریاس برای شتاب نگاشت های انتخابی با بیشینه شتاب ۰/۲۵ g

Fig. 11. Variation of pile head lateral displacement and arias intensity for the El Centro and Loma Prieta with scaled PGA of 0.25 g

به زلزله ی لوماپریتا دارد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده شده است که روند تغییرات جابه‌جایی افقی شمع متناسب با تغییرات شدت آریاس می باشد. با توجه به مشابهت نتایج، در شکل ۱۱ روند تغییرات جابه‌جایی افقی سرشمع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود هم زمان با افزایش شدت آریاس مقدار جابه‌جایی افقی سرشمع افزایش می یابد.

چنین توضیح داد که از پارامترهای لرزه ای مؤثر در تعیین جابه‌جایی افقی شمع می توان به شدت آریاس<sup>۱</sup>، سرعت تجمعی مطلق<sup>۲</sup>، تعداد سیکل های معادل زلزله اشاره کرد. با توجه به جدول ۴ مشاهده می شود که در زلزله ی السنترو این پارامترها مقادیر بیشتری نسبت

1 Arias Intensity  
2 Cumulative Absolute Velocity

#### ۴-۲- بهسازی خاک ماسه ای اشباع لایه ای

در این حالت در مجموع ۵۴ شبیه سازی عددی تحت دو رکورد زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت برای آرایش گروه شمع های  $1 \times 1$  -  $2 \times 2$  -  $4 \times 4$  و به ازای یک ضریب سطح مقطع تسلیح شده ثابت  $A_{rr} = 5\%$ ، جهت پیدا کردن دید بهتری نسبت به رفتار شمع ها در خاک روانگرا انجام شده است. جدول های ۷ و ۸ به ترتیب بیشینه جابه جایی جانبی سرشمع ها با  $A_{rr} = 5\%$  در خاک ماسه ای اشباع لایه ای تحت دو رکورد زلزله لوماپریتا و السنترو را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می گردد، در هر دو زلزله با افزایش ضخامت لایه روانگرا مقدار تغییرمکان های افقی سرشمع افزایش می یابد. به عنوان مثال در زلزله ی لوماپریتا برای گروه شمع  $1 \times 1$  که لایه ی خیلی سست در عمق ۵ متری از سطح زمین قرار دارد با افزایش ضریب ضخامت از  $0/15$  به  $0/3$  مقدار جابه جایی افقی سرشمع  $1/4$  برابر شده است. این افزایش را می توان به کاهش سختی سیستم در اثر روانگرایی خاک نسبت داد. همچنین با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می شود که زلزله ی السنترو با وجود داشتن بیشینه شتاب یکسان با زلزله لوماپریتا اثر بیشتری بر روی تغییرمکان های سیستم داشته است که این را می توان ناشی از اثر برخی از پارامترهایی نظیر: شدت آریاس بزرگتر، سرعت تجمعی مطلق و تعداد سیکل معادل بیشتر زلزله ی السنترو نسبت به رکورد لوماپریتا دانست. در ادامه می توان نتیجه گرفت با افزایش ضریب موقعیت از  $0/2$  به  $0/8$ ، جابه جایی سرشمع نیز افزایش می یابد که علت آن افزایش نیروی جانبی ناشی از خاک روانگرا شده در عمق پایین تر است که خود موجب افزایش دوران در همان ارتفاع از شمع می شود و نهایتاً باعث افزایش جابه جایی افقی می شود. با توجه به جدول های ۷ و ۸، وجود لایه روانگرا باعث تغییرشکل های بزرگی در شمع و خاک شده است که چنین تغییرشکل های بزرگی در مطالعات صحرایی هاماتا<sup>۲۷</sup> [۲۷] در طی زلزله ی نیگاتا و مطالعات عددی الجمال [۳]، عسگری [۱۰] و لو [۱۱] دیده شده است.

شکل ۱۵ تأثیر ضخامت لایه ی خیلی سست بر روی جابه جایی جانبی سرشمع در عمقی مشخص را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود وجود لایه ی خیلی سست به شدت بر روی جابه جایی جانبی شمع تأثیرگذار است، به طور مثال در این پژوهش

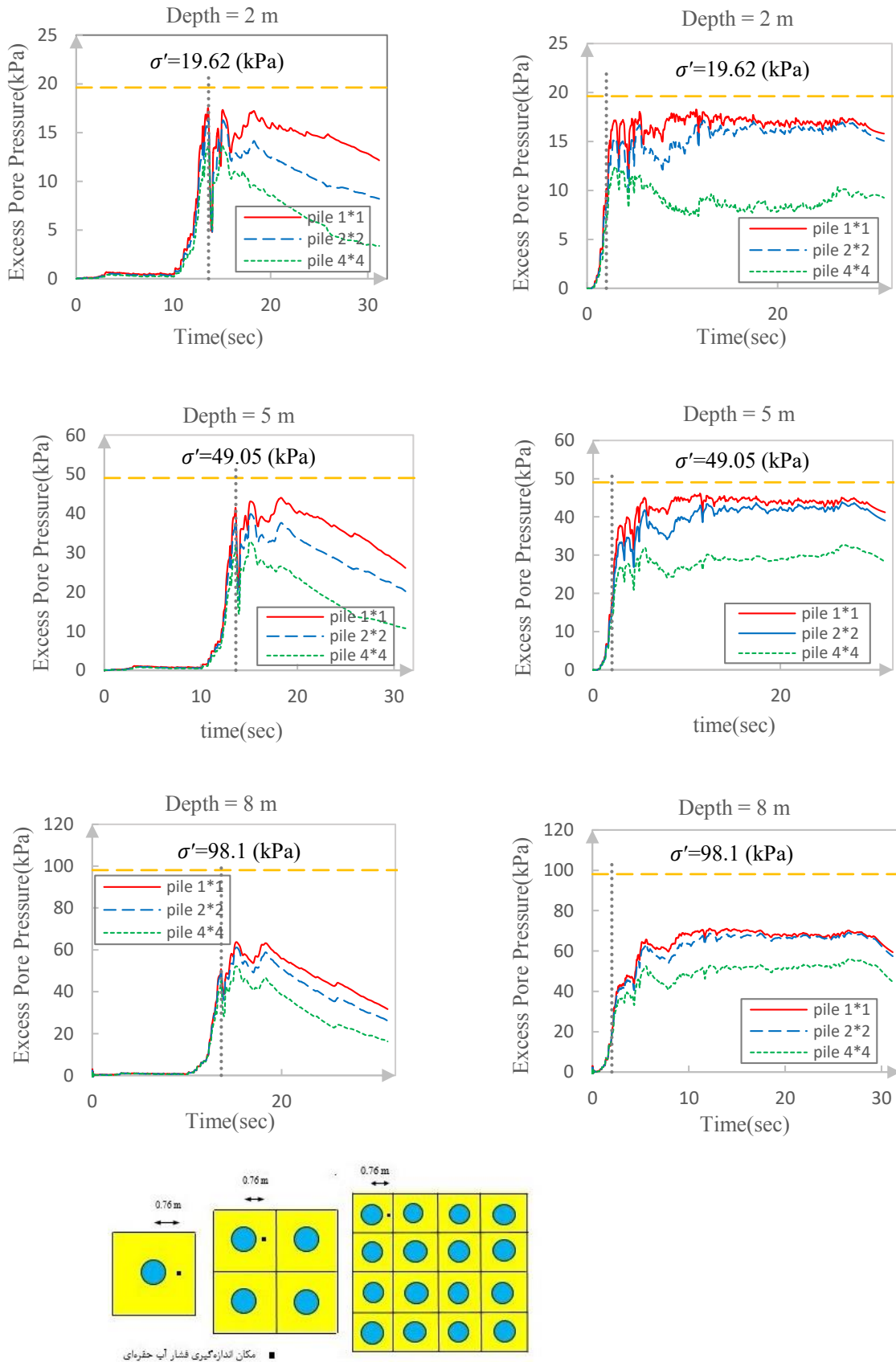
به منظور بررسی تأثیر تعداد شمع بر نحوه تولید و زائل شدن فشار آب حفره ای، نمودار تاریخچه زمانی اضافه فشار آب حفره ای در نواحی نزدیک شمع  $1 \times 1$  -  $2 \times 2$  -  $4 \times 4$  برای عمق های ۲، ۵ و ۸ متری در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شمع، بیشینه اضافه فشار آب حفره ای کاهش می یابد و زائل شدن فشار آب حفره ای زودتر آغاز می شود که این رفتار ناشی از افزایش سختی سیستم و افزایش اثر پدیده اتساع با افزایش تعداد شمع می باشد. به عبارت دیگر افزایش سختی سیستم باعث کاهش جابه جایی خاک اطراف آن می شود (مطابق با جدول ۶) و در نتیجه باعث کاهش روند افزایشی اضافه فشار آب حفره ای خواهد شد. چنین نتایج در مدل های تحلیل شده، می تواند بیانگر توانمندی مدل رفتاری و روش تحلیل U-P باشد.

با توجه به شکل ۱۲ همچنین می توان تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر روی روند فشار آب حفره ای در عمق های مختلف را مورد بررسی قرار داد. همان طور که مشاهده می شود در زلزله ی السنترو در عمق های مختلف بیشینه اضافه فشار آب حفره ای در زمان کمتری ایجاد می شود. این روند را چنین می توان توجیه کرد که با توجه به مطالعات تابودا<sup>۲۶</sup> [۲۶] یکی از پارامترهای مهم که بر روی روند تغییرات اضافه فشار آب حفره ای تأثیر می گذارد زمان مربوط به بیشینه شتاب افقی<sup>۲</sup> می باشد. با توجه به جدول ۴ مشاهده می شود که در زلزله ی السنترو مقدار شتاب افقی در زمان کمتری به مقدار بیشینه خود نسبت به زلزله لوماپریتا می رسد.

شکل ۱۳ تاریخچه زمانی شتاب اعمالی به مدل و شتاب روی سطح زمین را برای گروه شمع  $1 \times 1$  با ضریب سطح مقطع تسلیح شده ۱۰ درصد تحت رکورد زلزله ی السنترو نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۳ بیشینه شتاب افقی روی سطح زمین تقریباً ۹ برابر شتاب اعمالی به مدل می باشد که می توان نتیجه گرفت که وجود شمع در خاک روانگرا اثر تشدید کنندگی<sup>۳</sup> بر روی شتاب دارد، زیرا وجود شمع در خاک روانگرا در حین زلزله موجب افزایش سختی خاک می شود. همچنین این موضوع در نتایج مطالعات الجمال و همکاران [۳]، و نیز عسگری و همکاران [۱۰] دیده شده است.

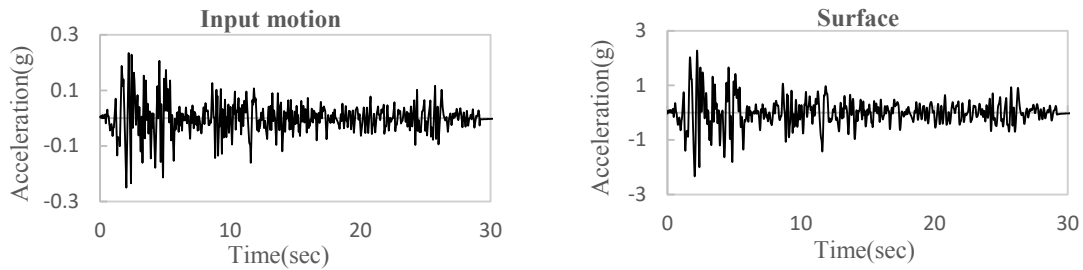
1 Taboada  
2 Maximum horizontal acceleration  
3 Amplification





شکل ۱۲. تغییرات اضافه فشار آب حفره ای در طول زمان به ازای تعداد شمع های مختلف برای  $A_{rr} = 10\%$

Fig. 12. XRD Variation of excess pore pressure versus time for the number of different piles with  $A_{rr}=10\%$



شکل ۱۳. تاریخچه شتاب افقی برای گروه شمع  $1 \times 1$  با  $A_{rr} = 10\%$  در خاک ماسه ای اشباع یکنواخت در عمق های مختلف تحت رکورد زلزله السنترو  
**Fig. 13. Horizontal acceleration time histories for the  $1 \times 1$  pile group with  $A_{rr} = 10\%$  in Uniform saturated Sand Stratum at different depths under the El Centro earthquake**

جدول ۷. بیشینه جابه‌جایی جانبی سرشمع با  $A_{rr} = 5\%$  در خاک ماسه ای و لایه ای اشباع تحت رکورد زلزله لوماپریتا

**Table 7. Maximum lateral displacement of the pile head with  $A_{rr} = 5\%$  in Stratified saturated Sand Stratum under Loma Prieta earthquake**

$H_{lr}$	0.015			0.03			0.045		
$H_{sr}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$1 \times 1$	0.1979	0.5843	1.052	0.2654	0.8344	1.007	0.3193	0.9852	1.262
$2 \times 2$	0.1976	0.5865	1.036	0.2656	0.8337	1.005	0.3196	0.9804	1.263
$4 \times 4$	0.1980	0.5884	1.052	0.2651	0.8342	1.004	0.3201	0.9835	1.263

جدول ۸. بیشینه جابه‌جایی جانبی سرشمع با  $A_{rr} = 5\%$  در خاک ماسه ای و لایه ای اشباع تحت رکورد زلزله السنترو

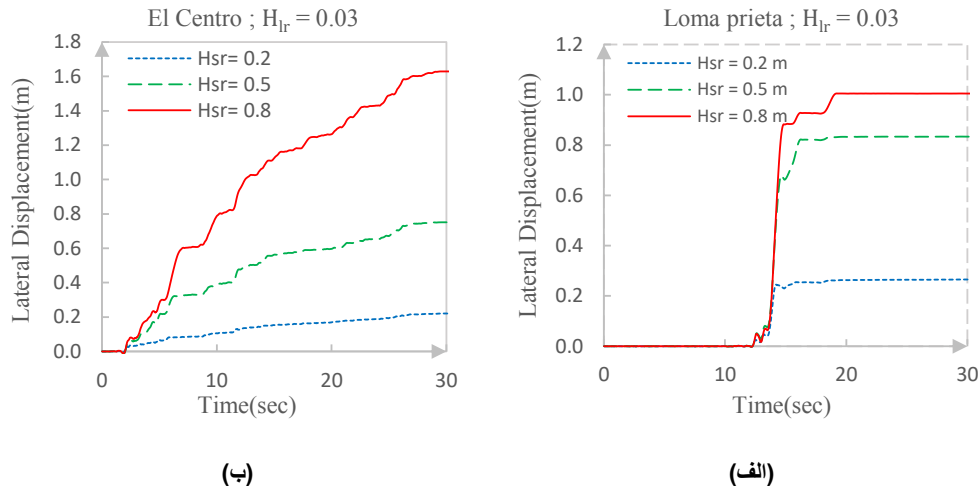
**Table 8. Maximum lateral displacement of the pile head with  $A_{rr} = 5\%$  in Stratified saturated Sand Stratum under El Centro earthquake**

$H_{lr}$	0.015			0.03			0.045		
$H_{sr}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$1 \times 1$	0.2020	0.5430	1.080	0.2220	0.7510	1.660	0.2360	1.004	2.005
$2 \times 2$	0.2015	0.5451	1.0805	0.2210	0.7515	1.629	0.2364	1.003	2.296
$4 \times 4$	0.2024	0.5469	1.0770	0.2208	0.7494	1.627	0.2359	1.009	2.304

تحت رکورد زلزله لوماپریتا نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود در لحظات ۰ تا ۱۰ ثانیه (قبل از شروع روانگرایی) ضخامت لایه خیلی سست تأثیر ناچیزی در بیشینه جابه‌جایی جانبی شمع دارد، در حالی که در لحظات ۱۰ تا ۲۰ ثانیه تغییرات قابل توجهی در بیشینه جابه‌جایی جانبی شمع در مرز لایه خیلی سست و متراکم مشاهده شده است. به عنوان مثال با توجه به شکل ۱۶ افزایش ۲ و ۳ برابری ضخامت لایه خیلی سست به ترتیب باعث افزایش ۲۹ و ۴۰ درصدی بیشینه جابه‌جایی جانبی شمع شده است که دلیل این رفتار را می توان افزایش فشار آب حفره ای به دلیل وجود لایه ی خیلی سست و کاهش سختی خاک و به تبع آن نیروهای کینماتیکی

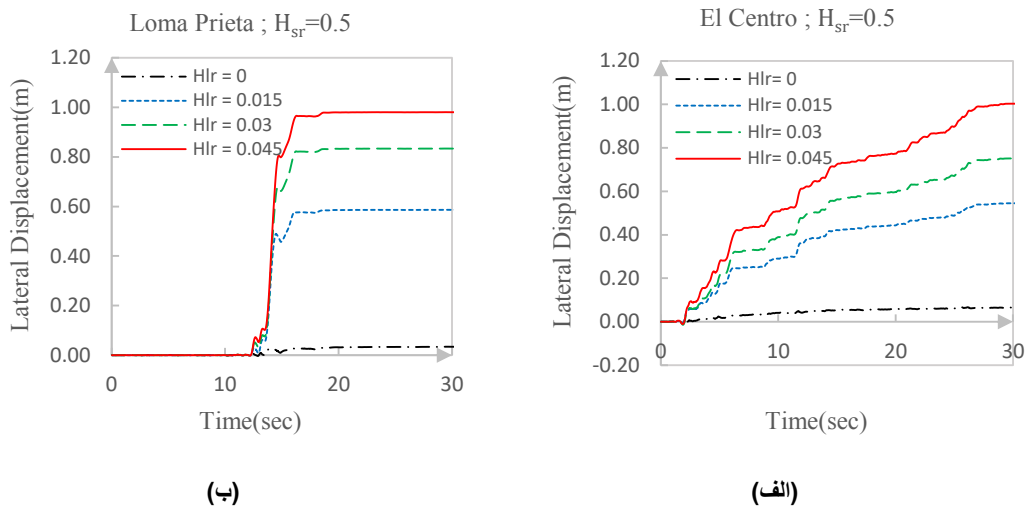
در شبیه سازی عددی یک شمع  $2 \times 2$  در خاک ماسه ای اشباع یکنواخت با ضریب سطح مقطع تسلیح شده ۵ درصد ( $A_{rr} = 5\%$ ) تحت رکورد زلزله لوماپریتا، بیشینه مقدار جابه‌جایی جانبی سر شمع  $3/42$  سانتی متر است؛ در حالی که اگر در همین مدل در عمق ۵ متری از سطح زمین ( $H_{sr} = 0.5$ ) لایه ی خیلی سست به ضخامت ۱۵ سانتی متر ( $H_{Lr} = 0.15$ ) قرارگیرد بیشینه جابه‌جایی سر شمع به  $58/68$  سانتی متر خواهد رسید.

در شکل ۱۶ پروفیل جابه‌جایی جانبی شمع در لحظات ۰ تا ۱۰ ثانیه (قبل از شروع روانگرایی) و ۱۰ تا ۲۰ ثانیه (روانگرایی کامل) برای گروه شمع  $2 \times 2$  و با ضخامت های متغیر لایه خیلی سست



شکل ۱۴. تاریخچه جابه‌جایی جانبی برای گروه شمع ۲×۲ با  $A_{rr} = 5\%$  در خاک ماسه‌ای اشباع و لایه‌ای (الف) زلزله لوماپریتا، (ب) زلزله سنترو

**Fig. 14. Pile head lateral displacement time histories for the 2×2 pile group with  $A_{rr}=5\%$  in Stratified saturated Sand Stratum for different position of very loose sand (a) Loma Prieta earthquake (b) El Centro earthquake**



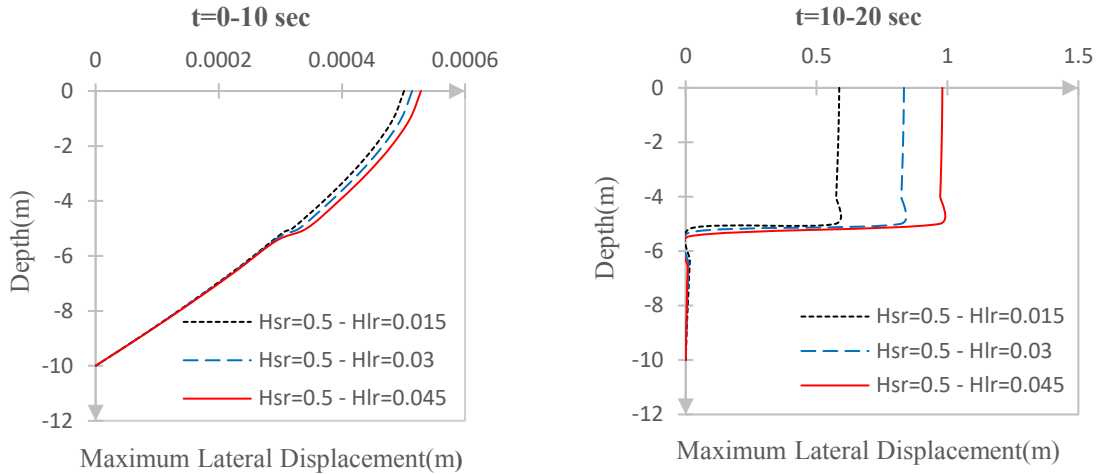
شکل ۱۵. تاریخچه جابه‌جایی جانبی برای سرشمع گروه ۲×۲ با  $A_{rr} = 5\%$  در خاک ماسه‌ای اشباع و لایه‌ای (الف) زلزله سنترو، (ب) زلزله لوماپریتا

**Fig. 15. Pile head lateral displacement time histories for the 2×2 pile group with  $A_{rr}=5\%$  in Stratified saturated Sand Stratum for different thickness of very loose sand (a) El Centro earthquake (b) Loma Prieta earthquake**

حفره‌ای ( $r_{ii}$ )، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای تولید شده ( $\Delta u$ ) به تنش مؤثر اولیه ( $\sigma'_v$ ) می‌باشد. با محاسبه مساحت زیر نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای برحسب عمق، مشاهده گردید که هرچه لایه‌ی خیلی سست با ضخامت ثابت در عمق‌های پایین‌تری از سطح زمین قرار گیرد، پتانسیل روانگرایی خاک در طول شمع کاهش می‌یابد. به طور مثال در شکل ۱۷ مساحت زیر نمودار نسبت اضافه

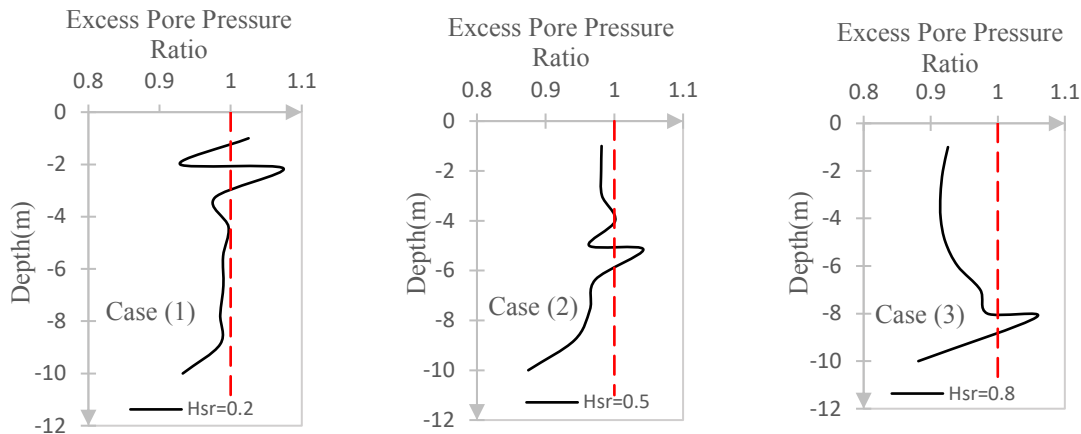
بزرگتری که به شمع وارد می‌گردد دانست، و از آنجایی که در این بازه زمانی، شمع به شدت تحت کنترل خاک روانگرایی اطراف خود است. در نتیجه خاک روانگرا با ضخامت بیشتر به طور قابل توجهی بر روی جابه‌جایی جانبی شمع اثرگذار است.

شکل ۱۷ تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در طول شمع را به ازای ضریب ضخامت ثابت ( $H_{Lr} = 0.15$ ) و ضریب موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد. منظور از نسبت اضافه فشار آب



شکل ۱۶. پروفیل جابه‌جایی جانبی شمع برای ضخامت‌های مختلف لایه روانگرا تحت زلزله لوماپریتا

Fig. 16. Pile Lateral displacement profiles for different thickness of very loose sand under the Loma Prieta earthquake

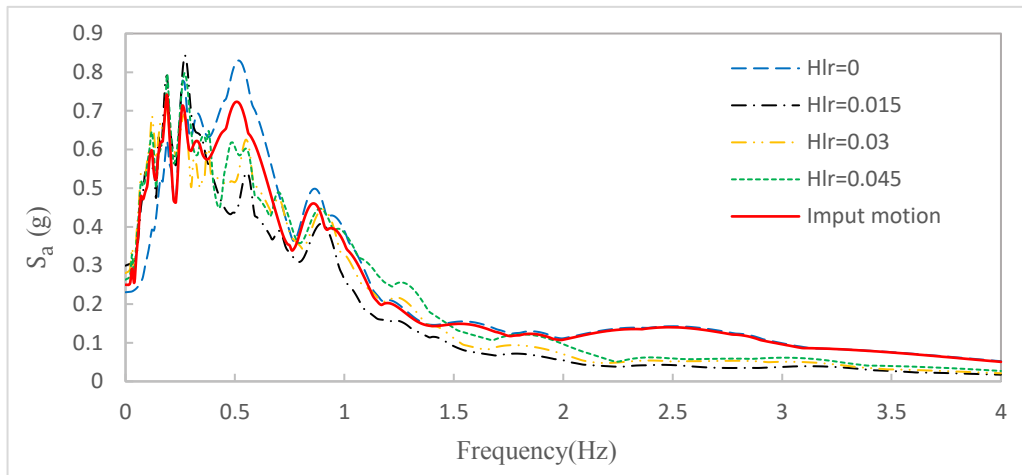


شکل ۱۷. تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره ای در طول شمع ۲×۲ با  $A_{rr} = 5\%$  تحت رکورد زلزله لوماپریتا

Fig. 17. Variation of excess pore pressure ratio profiles for the 2×2 pile group with  $A_{rr} = 5\%$  under the Loma Prieta earthquake

دیگر از آنجایی که خاک روانگرا به صورت یک ایزوله ی لرزه ای عمل می کند و موجب کاهش شتاب در لایه های بالایی خود خواهد شد. در نتیجه، هرچه لایه ی روانگرا در عمق بیشتری از سطح زمین قرار گیرد موجب می شود که ارتفاع بیشتری از خاک تحت شتاب کمتر از شتاب اعمالی به مدل واقع شود و در نتیجه فشار آب حفره ای در لایه های بالای خاک روانگرا کاهش یابد. از طرفی با توجه به شکل ۱۷ در خاک های لایه ای، در محل قرارگیری ماسه ی خیلی سست افزایش ناگهانی فشار آب حفره ای و به تبع آن وقوع پدیده روانگرایی در آن موقعیت نسبت به سایر نقاط دیگر خاک مشاهده می شود. علت این پدیده را می توان به تراکم نسبی کم ماسه ی خیلی سست

فشار آب حفره ای برحسب عمق در حالت ۱ و ۲ به ترتیب ۱/۵۴ و ۱/۲۹ برابر حالت ۳ می باشد که این مورد به معنی بهبود رفتار خاک در حالت ۳ در مقابل افزایش اضافه فشار آب حفره ای می باشد. با توجه به اینکه در ادامه این پژوهش به این نتیجه خواهیم رسید که وجود لایه ی روانگرا موجب کاهش مقدار شتاب در لایه های بالایی خود خواهد شد، روند بالا را این گونه می توان توجیه کرد: از آنجایی که در خاک اشباع تغییرات فشار آب حفره ای تابعی از شتاب می باشد در نتیجه، هرچه شتاب در لایه ای از خاک اشباع کاهش پیدا کند، مقدار تغییرات فشار آب حفره ای کاهش می یابد. از طرف



شکل ۱۸. اثر ضخامت لایه روانگرا بر روی طیف پاسخ شتاب روی سطح زمین برای گروه شمع  $1 \times 1$  با  $A_{rr} = 5\%$  و  $H_{sr} = 0.5$  در خاک ماسه‌ای اشباع و لایه ای برای زلزله السنترو با بیشینه شتاب  $0.25g$

**Fig. 18. Effect of Liquefiable layer thickness on acceleration response spectrum on the ground surface for the  $1 \times 1$  pile group with  $A_{rr} = 5\%$  and  $H_{sr} = 0.5$  in Stratified saturated Sand Stratum for the El Centro earthquake with scaled PGA of  $0.25 g$**

#### ۵ - نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار گروه شمع با آرایش مختلف  $1 \times 1$  -  $2 \times 2$  -  $4 \times 4$  در دو حالت (خاک ماسه ای اشباع یکنواخت - خاک ماسه ای اشباع لایه ای)، تحت دو رکورد زلزله مورد ارزیابی قرار گرفته است. به شکل خلاصه، نتایج بدست آمده از بخش های مختلف این پژوهش به صورت زیر ارائه می شود:

(۱) با وجود وابستگی پارامتر شدت آریاس به چندین پارامتر دیگر زلزله، همگرایی مناسبی میان روند تغییرات جابه‌جایی شمع و خاک و پارامتر شدت آریاس دیده شده است.

(۲) بر اساس نتایج، زمان بیشینه فشار آب حفره ای متناظر با زمان بیشینه شتاب افقی تحریک ورودی می باشد، در نتیجه در یک رکورد مشخص هرچه بیشینه شتاب افقی در زمان کمتری رخ دهد، فشار آب حفره ای زودتر افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود خواهد رسید. (۳) در خاک های ماسه ای اشباع، عدم وجود لایه ی خیلی سست اثر تشدیدکنندگی بر روی شتاب های ایجاد شده در سطح خاک دارد در حالی که وجود لایه ی خیلی سست اثر کاهندگی بر روی شتاب های ایجاد شده در سطح خاک دارد زیرا لایه ی خیلی سست به صورت یک ایزوله لرزه ای در مقابل شتاب عمل می کند.

(۴) بیشترین ضریب اضافه فشار منفذی در خاک های بسیار سست ماسه مشاهده شده است که بدلیل رفتار انقباضی بسیار بالای

نسبت به سایر نقاط دیگر خاک مرتبط ساخت، زیرا ماسه ی خیلی سست هنگامی که تحت یک رکورد زلزله قرار می گیرد (اعمال نیروی برشی) معمولاً تمایل به کاهش حجم یا به عبارت دیگر رفتار انقباضی دارد و در شرایط اشباع، این کاهش حجم منجر به افزایش اضافه فشار آب حفره ای می شود.

در شکل ۱۸ تأثیر ضخامت لایه روانگرا بر روی طیف پاسخ شتاب روی سطح زمین برای میرایی ۵ درصد و در حالتی که خاک خیلی سست با ضخامت های متفاوت در عمق ۵ متری از سطح زمین واقع شده را نشان می دهد. با مقایسه نتایج در شکل ۱۸ مشخص می گردد که وجود لایه روانگرا اثر کاهندگی<sup>۱</sup> بر روی شتاب ها در سطح زمین دارد. به طور مثال، در فرکانس های بالا وجود لایه روانگرا حداقل باعث کاهش  $1/5$  برابری در مقدار شتاب طیفی روی سطح زمین می شود. این روند را چنین می توان توجیه کرد که خاک در حالت روانگرایی به صورت یک سیال بسیار ویسکوز رفتار می کند و همین امر باعث می شود که امواج برشی در خاک روانگرا انتشار نیابد و شتاب روی سطح زمین کاهش پیدا کند. به عبارت دیگر در این حالت خاک به صورت یک ایزوله لرزه ای در مقابل افزایش شتاب عمل می کند.

1 Deamplify

- instability in liquefiable soils, *Engineering Structures*, 205 (2020) 110074.
- [5] A. Ebeido, A. Elgamal, K. Tokimatsu, A. Abe, Pile and Pile-Group Response to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Four Large-Scale Shake-Table Experiments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 10(145) (2019) 04019080.
- [6] Rahmani, A. Pak, Dynamic behavior of pile foundations under cyclic loading in liquefiable soils, *Computers and Geotechnics*, 40 (2012) 126-114.
- [7] L. Su, H.-P. Wan, S. Abtahi, Y. Li, X.-Z. Ling, Dynamic response of soil-pile-structure system subjected to lateral spreading: shaking table test and parallel finite element simulation, *Canadian Geotechnical Journal*, (ja) (2019).
- [8] R. Sarkar, S. Bhattacharya, B. Maheshwari, Seismic requalification of pile foundations in liquefiable soils, *Indian Geotechnical Journal*, 2(44) (2014) 195-183.
- [9] S. Hui, L. Tang, X. Zhang, Y. Wang, X. Ling, B. Xu, An investigation of the influence of near-fault ground motion parameters on the pile's response in liquefiable soil, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 4(17) (2018) 745-729.
- [10] 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) 96-77.
- [11] J. Lu, P. Kamatchi, A. Elgamal, Using Stone Columns to Mitigate Lateral Deformation in Uniform and Stratified Liquefiable Soil Strata, *International Journal of Geomechanics*, 5(19) (2019) 04019026.
- [12] L. He, A. Elgamal, M. Hamada, J. Meneses, Shadowing and group effects for piles during earthquake-induced lateral spreading, in: *Proc. 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, pp. 17-12.
- [13] K. Panaghi, A. Mahboubi, A. Mahdavian, The effect of earthquake motion characteristics on potentially liquefiable pile-pinned sloping ground, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(17) (2019) 1917-1891.
- [14] X. Zhang, L. Tang, X. Ling, A.H.C. Chan, J. Lu, Using peak ground velocity to characterize the response of soil-

این نوع ماسه ها است. به عبارت دیگر این نوع خاک های سست برخلاف ماسه متراکم در هنگام زلزله تمایل به کاهش حجم دارند که با وجود اشباع بودن ماسه و عدم وجود شرایط زهکشی بدلیل سرعت بارگذاری، باعث افزایش سریع ضریب اضافه فشار آب حفره ای می شود. لازم به ذکر است که بیشترین میزان جابه‌جایی نیز در محدوده لایه بسیار سست رخ می دهد.

۵) نتایج نشان می دهد که با ثابت بودن پارامترهایی همچون ضریب ضخامت و ضریب موقعیت، افزایش تعداد شمع در گروه، موجب تغییر چشمگیری در جابه‌جایی های ماندگار سرشمع نمی شود.

۶) در خاک های ماسه ای اشباع لایه ای، هرچه یک لایه ی خیلی سست با ضخامت ثابت در عمق بیشتری از سطح زمین قرار گیرد موجب می شود که ارتفاع بیشتری از خاک تحت شتاب کمتر از شتاب اعمالی به مدل واقع شود و در نتیجه فشار آب حفره ای در لایه های بالای خاک کاهش می یابد. اما برخلاف اضافه فشار آب حفره ای، جابه‌جایی سرشمع افزایش می یابد که علت آن افزایش نیروی جانبی ناشی از خاک روانگرا شده در عمق پایین تر است که خود موجب افزایش دوران در همان ارتفاع از شمع می شود و نهایتاً باعث افزایش جابه‌جایی افقی می شود. بنابراین می توان ذکر کرد که در طراحی ها نمی توان به تنهایی فقط بر اساس یکی از خروجی ها (جابه‌جایی و اضافه فشار آب حفره ای) تصمیم گیری کرد.

## مراجع

- [1] Guideline for Assessment of Soil Liquefaction Potential, Consequences and Mitigation Methods No.525, 2012 (in Persian).
- [2] M. Fallahzadeh, A. Haddad, Y. Jafarian, C. Lee, Seismic performance of end-bearing piled raft with countermeasure strategy against liquefaction using centrifuge model tests, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(17) (2019) -5929 5961.
- [3] A. Elgamal, J. Lu, D. Forcellini, Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 11(135) (2009) -1672 1682.
- [4] X. Zhang, L. Tang, X. Li, X. Ling, A. Chan, Effect of the combined action of lateral load and axial load on the pile

- of cyclic mobility in saturated cohesionless soils, *International Journal of Plasticity*, 6(19) (2003) 905-883.
- [22] Elgamal, Z. Yang, E. Parra, Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(22) (2002) -259 271.
- [23] M.A. Biot, Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, *Journal of applied physics*, 4(33) (1962) 1498-1482.
- [24] A.H.-C. Chan, A unified finite element solution to static and dynamic problems of geomechanics, Swansea University, 1988.
- [25] D.W. Wilson, Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay, Citeseer, 1998.
- [26] V.M. Taboada-Urtuzuastegui, R. Dobry, Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 12(124) (1998) 1206-1195.
- [27] M. Hamada, Large ground deformations and their effects on lifelines: 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, Japanese Case Studies, (1992).
- pile system in liquefying ground, *Engineering geology*, 240 (2018) 73-62.
- [15] Jeremić, Development of geotechnical capabilities in OpenSees, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering ..., 2001.
- [16] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006).
- [17] H.K. Law, I.P. Lam, Application of periodic boundary for large pile group, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 10(127) (2001) -889 892.
- [18] A. Klar, S. Frydman, R. Baker, Seismic analysis of infinite pile groups in liquefiable soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 8(24) (2004) 575-565.
- [19] Z. Cheng, B. Jeremić, Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12-11(29) (2009) 1416-1405.
- [20] J.H. Prevost, A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1(4) (1985) 17-9.
- [21] A. Elgamal, Z. Yang, E. Parra, A. Ragheb, Modeling

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

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 J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 3067-3086.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17657.6639](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17657.6639)



