



The effect of farfield and nearfield earthquakes on the seismic behavior of micropile group in loose and dense granular soils

E. Mohamadi Esfahani, R. Naderi*

Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran

ABSTRACT: Studying the performance of micropile system as an effective, practical and affordable method for seismic retrofitting of the site and foundation and considering the different characteristics and effects of nearfield and farfield earthquakes on structures, justifies the need to study the performance of micropile group under nearfield and farfield earthquakes. In this research, using Opensees software, two types of loose ($D_r = 40\%$) and dense ($D_r = 80\%$) granular soils with elastoplastic behavior and two reinforcement models including vertical and inclined micropiles with elastic behavior and concrete material were affected by three sets of farfield and nearfield earthquakes due to the shear wave velocity of the site (V_{s30}). The responses of the micropile group, including horizontal displacement, acceleration and internal forces, were studied and compared and important results were presented to use the micropile group in order to seismic retrofitting of areas close to and far from the epicenter. The results showed that the effect of near-fault records significantly increases the horizontal displacement, especially in the loose granular site. The increase in lateral displacement due to near earthquakes compared to far earthquakes is 125% and 124% for the vertical and inclined micropile group in the loose granular structure and 15% and 13% for the vertical and inclined micropile group in the dense granular site, respectively. Also, the inclined micropile group shows almost similar performance in controlling horizontal displacements and better performance in controlling internal forces than the vertical micropile group.

Review History:

Received: Feb. 09, 2021

Revised: Jul. 18, 2021

Accepted: Aug. 22, 2021

Available Online: Sep. 21, 2021

Keywords:

Micropile group

Nearfield and farfield earthquakes

Finite elements

Time history analysis

Opensees

1- Introduction

Micropiles are piles with a diameter of less than 300 mm that are accompanied by light steel reinforcement and grout injection. Micropiles are used for a variety of purposes, including bearing axial and lateral loads, enhancing soil or foundation performance, and generally as part of a soil-micropile system, depending on the design purpose [1].

Numerous laboratory and numerical studies were conducted on the seismic performance of vertical and inclined micropiles. The study of Shahrouz et al. (2012) and Ghorbani et al. (2013) confirmed that inclined micropiles have a completely positive effect on seismic performance and a significant reduction effect on the amount of shear and bending forces [2, 3]. In addition, using physical models, the seismic performance of the micropile group was studied on a laboratory scale by Jalilian et al. (2018). The study clearly showed the positive effect of micropile group performance, especially inclined ones [4].

The above studies indicate the efficiency of the micropile group and also show the important differences between farfield and nearfield earthquakes in the frequency content and the formation of surface deformations despite the

inherent similarities. Also, the study of Moradi Moghaddam et al. (2021) using laboratory physical modeling showed that the different percentages of relative densities in granular soils could cause a significant difference in the load-bearing capacity of micropiles [5]. Based on the facts, two types of granular elastoplastic soils with different mechanical characteristics, including loose granular soils ($D_r = 40\%$) and dense granular soils ($D_r = 80\%$) were reinforced by two groups of vertical and inclined concrete micropiles with linear elastic behavior. The responses of the micropile group, including horizontal displacement, acceleration and internal forces, were examined and compared and important points were presented for using the micropiles group for seismic improvement in areas close to and far from the epicenter.

2- Materials and Methodology

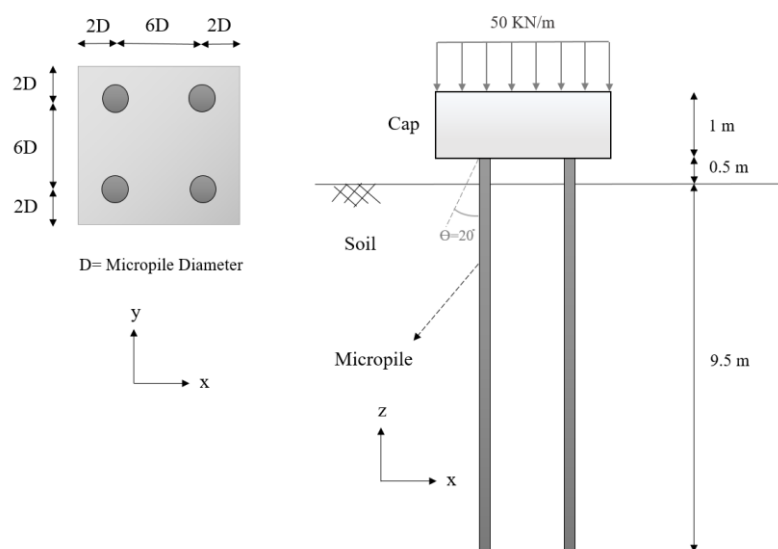
A homogeneous soil mass consisting of eight-node Brick u-p elements was considered for soil modeling. The nodes of this element have four degrees of freedom, which includes three degrees of freedom for transitional movement and one degree of freedom for pore water pressure. Pressure Depend Multi Yield (PDMY) material was used to define granular soil

*Corresponding author's email: nozar@ssau.ac.ir



Table 1. Characteristics of granular soil [7]

<i>Parameters</i>	<i>Nevada Sand</i>	
Relative density (%)	40	80
Saturated mass density ρ (ton/m ³)	1.96	2.03
Reference shear modulus G_r (MPa)	46.2	88.4
Reference bulk modulus B_r (MPa)	123.3	236
Friction angle φ°	32	36.5
Peak Shear Strain γ_{max}	0.1	0.1
Void Ratio	0.73	0.618

**Fig. 1. Details of modeling of micropile and concrete cap**

materials [6]. Two types of granular materials with different mechanical properties were considered for soil block. Soil characteristics are given in Table 1.

Displacement-Based Beam-Column element was selected for micropiles and cap modeling. This element has the ability to produce beam-column with prismatic or non-prismatic sections by considering the effect of plasticity. The micropiles are made of concrete and have a diameter of 0.2 meters

According to the research topic, two categories of farfield and nearfield earthquakes are required to apply earthquakes to the model floor (bedrock). For this purpose, farfield and nearfield earthquakes, according to the shear wave velocity (V_{s30}) based on the classification method of Verdugo et al. (2018) [8], were selected from the proposed accelerogram of P695-Femma instruction [9]. Thus, the farfield and nearfield records of the Imperial Valley, Kocaeli, and Chi-

Chi earthquakes were considered for the loose site and the farfield and nearfield records of the Northridge, Loma Prieta and Landers earthquakes were considered for the dense site.

3- Results and Discussion

The results show a significant effect of nearfield earthquakes on increasing lateral displacement in both vertical and inclined micropile groups compared to farfield earthquakes in the loose granular sites. The increase in lateral displacement due to nearfield earthquakes compared to farfield earthquakes is 125% and 124% for the vertical and inclined micropile group in the loose granular site and 15% and 13% for the vertical and inclined micropile group in the dense granular site, respectively.

In dense granular sites, nearfield earthquakes have increased lateral displacement in both vertical and inclined

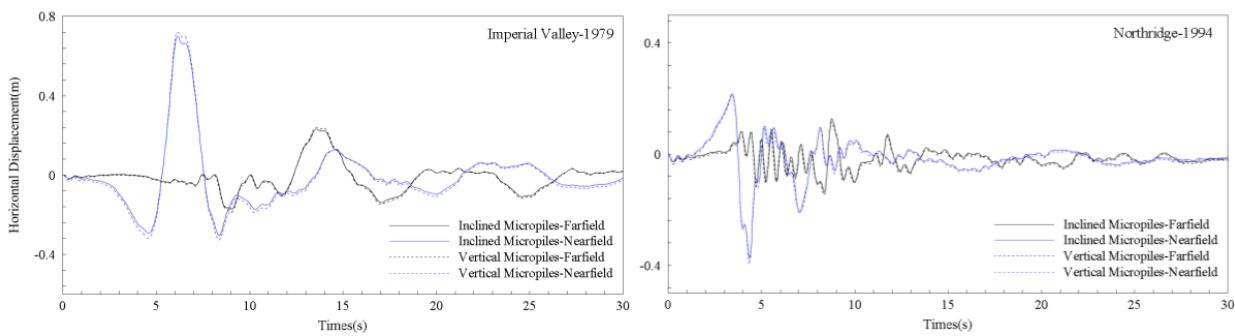


Fig. 2. History of horizontal displacement of the vertical and inclined micropile group
(a): Loose granular site (b): Dense granular site

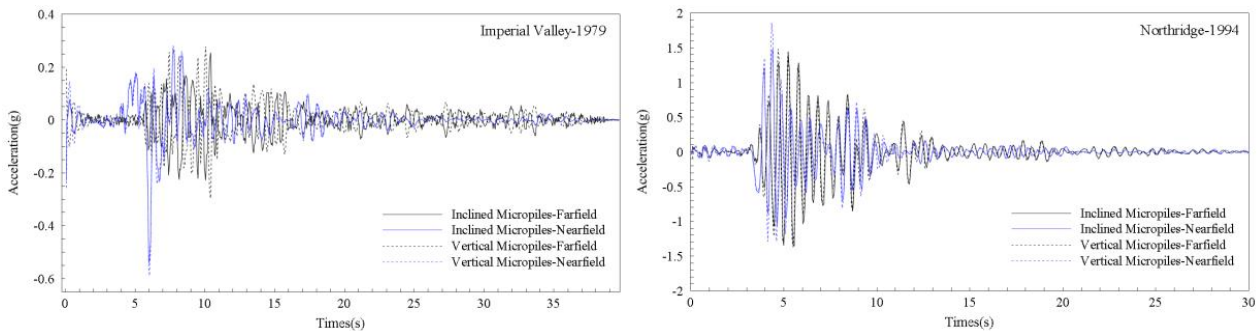


Fig. 3. Acceleration history of vertical and inclined micropile group
(a): Loose granular site (b): dense granular site

micropile groups, which is far less than similar values for the loose sites. The ratio of values in the two groups of earthquakes shows that the effect of nearfield records on increasing lateral displacement in loose granular soils is on average about 96% and 98% more than dense granular soils for vertical and inclined micropiles. It seems that the increase of Riley damping which is due to the increase of shear wave in the dense site, plays a decreasing role in the enhancing effect of near-fault records on the lateral displacement of the micropile group.

In general, the increase in maximum acceleration of the vertical and inclined micropile group due to near-fault records in both loose and dense sites is significant and the effect of these records should be considered in the design of the soil-micropile-cap system. The increase in acceleration due to nearfield earthquakes compared to farfield earthquakes is 35% and 33% for the vertical and inclined micropile group in the loose granular site and 36% and 21% for the vertical

and inclined micropile group in the dense granular site, respectively.

The acceleration of the vertical and inclined micropile group in the dense sites and in nearfield earthquakes recorded larger numbers. This seems reasonable considering the larger input acceleration in these earthquakes and confirms the results of previous studies in increasing system acceleration due to increased input acceleration [4].

4- Conclusion

Since the effect of three components affecting the system, including the type of site, the type of input record and the micropile reinforcement model was seen simultaneously in this study, it was possible to make comprehensive conclusions about the seismic performance of the micropile group in a variety of possible conditions during farfield and nearfield earthquake.

1) The results showed that the studied parameters in the micropile group including displacement, acceleration,

bending and shear force are a function of one of the three characteristics of site type, input record and reinforcement model and other factors have less effect on responses. In a general view, it can be said that the shear and bending forces of micropile depend on the type of reinforcement and the type of site and input earthquake have less effect on these responses while the acceleration and displacement of the system are more affected by the site type and input earthquake.

2) The effect of nearfield earthquakes on the increase of lateral displacement and acceleration in both vertical and inclined micropile groups is significant especially in loose granular sites, which have weaker mechanical properties. Therefore, the effect of near-fault records should be considered in the design and deformation control of foundations or sites reinforced with a group of micropiles.

3) The acceleration changes of the vertical and inclined micropile groups are a function of the two components of the earthquake, input acceleration and magnification coefficient of the site. The system acceleration recorded larger numbers in dense sites and in nearfield earthquakes and in conditions of reinforcement with vertical micropile groups.

4) From the point of view of comparing the performance of vertical and inclined micropile groups in two granular sites, it can be concluded that the inclined micropile group has almost the same performance in controlling lateral displacements and system acceleration and better performance in controlling internal forces than vertical micropile group. Also, the results showed that the performance of both micropile groups is better in reducing acceleration and lateral displacement in dense sites. This feature was more clearly observed in inclined micropiles.

References

- [1] D.A. Bruce, I. Juran, Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review, Volume I: Background, Classifications, Cost (1997).
- [2] S. Isam, A. Hassan, S. Mhamed, 3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles, *Computers and Geotechnics*, 39 (2012) 1-7.
- [3] A. Ghorbani, H. Hasanzadehshooiili, E. Ghamari, J. Medzvieckas, Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil–micropile–superstructure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58 (2014) 21-36.
- [4] H.J. Mashhoud, J.-H. Yin, A.K. Panah, Y.F. Leung, Shaking table test study on dynamic behavior of micropiles in loose sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110 (2018) 53-69.
- [5] H.M. Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental Evaluation of the Effects of Structural Parameters, Installation Methods and Soil Density on the Micropile Bearing Capacity, *International Journal of Civil Engineering*, (2021) 1-13.
- [6] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006) 137-158.
- [7] 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.
- [8] R. Verdugo, F. Ochoa-Cornejo, J. Gonzalez, G. Valladares, Site effect and site classification in areas with large earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126 (2019) 105071.
- [9] A.T. Council, U.S.F.E.M. Agency, Quantification of building seismic performance factors, US Department of

HOW TO CITE THIS ARTICLE

E. Mohamadi Esfahani, R. Naderi, *The effect of farfield and nearfield earthquakes on the seismic behavior of micropile group in loose and dense granular soils*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4) (2022) 293-296.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19598.7209





بررسی اثر زلزله‌های دور و نزدیک بر رفتار لرزه‌ای گروه ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم

احسان محمدی اصفهانی، رضا نادری*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

کلمات کلیدی:

گروه ریزشمع
زلزله‌های دور و نزدیک
اجزاء محدود
تحلیل تاریخچه زمانی
Opensees

خلاصه: مطالعه عملکرد سیستم ریزشمع به عنوان یک روش موثر، اجرایی و مقرون به صرفه برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان و فونداسیون و در نظر گرفتن ویژگی‌ها و اثرات متفاوت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر سازه‌ها، ضرورت مطالعه عملکرد گروه ریزشمع تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک را توجیه می‌نماید. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Opensees، دو نوع خاک دانه‌ای سست ($Dr = 40\%$) و متراکم ($Dr = 80\%$) با رفتار الاستوپلاستیک و دو مدل تسلیح شامل گروه ریزشمع قائم و مایل با رفتار الاستیک و مصالح بتنی با توجه به سرعت موج برشی ساختمان (V_{s30}) تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. پاسخ‌های گروه ریزشمع شامل تغییر مکان افقی، شتاب و نیروهای داخلی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نتایج مهم برای بهره‌گیری از گروه ریزشمع به منظور مقاوم‌سازی لرزه‌ای در مناطق نزدیک به کانون لرزه‌زا و دور از آن ارائه گردید. نتایج نشان داد اثر رکوردهای نزدیک گسل موجب افزایش قابل ملاحظه تغییر مکان افقی به ویژه در ساختمان دانه‌ای سست می‌گردد. افزایش تغییر مکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختمان دانه‌ای سست به ترتیب 125% و 124% و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختمان دانه‌ای متراکم به ترتیب 15% و 13% می‌باشد. همچنین گروه ریزشمع مایل عملکردی تقریباً مشابه در کنترل شتاب و تغییر مکان‌های افقی و عملکرد بهتری در کنترل نیروهای داخلی نسبت به گروه ریزشمع قائم از خود نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

مقاومت خوبی در برابر زلزله در مقایسه با شمع‌های بتنی مسلح و با قطر بزرگ دارند. در دو دهه اخیر از جمله کارهای مهم انجام شده در زمینه تحلیل عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع می‌توان به مطالعات سادک و شاهرور (۲۰۰۴) و (۲۰۰۶) اشاره کرد [۲ و ۳]. این مطالعه نشان داد استفاده از ریزشمع مایل موجب کاهش شتاب جانبی سازه می‌گردد و اتصال مفصلی بین ریزشمع و کلاهک، موجب کاهش ممان خمشی و نیروی محوری به خصوص در ریزشمع‌های مایل می‌شود. مطالعه شاهرور و همکاران (۲۰۱۲) مویید این مطلب بود که مایل بودن ریزشمع‌ها اثر کاملاً مثبتی بر عملکرد لرزه‌ای و اثر کاهشی قابل توجهی بر مقدار نیروی برشی و خمشی آن‌ها دارد. همچنین زاویه 20° درجه به عنوان مقدار بهینه برای شیب ریزشمع‌ها معرفی گردید [۴]. در سال ۲۰۱۳ توسط قربانی و همکاران، یک مطالعه جامع پارامتری و تحلیل اجزای محدود سه بعدی و آنالیز حساسیت بر روی عملکرد لرزه‌ای سیستم خاک - ریزشمع - سازه صورت گرفت و اثر پارامترهای مختلف مانند شتاب زلزله ورودی، مشخصات خاک بستر، اثر روسازه و سرشمع و اتصال آن‌ها،

ریزشمع (میکروپایل) به شمع‌هایی با قطر کمتر از 300 میلی‌متر اطلاق می‌گردد که با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب همراه است. ریزشمع‌ها برای مقاصد متفاوتی از جمله تحمل بارهای محوری و جانبی، تقویت عملکرد بستر خاکی یا فونداسیون و به طور کلی به عنوان جزئی از سیستم ترکیبی خاک و ریزشمع، بسته به هدف طراحی به کار برده می‌شود. علاوه بر این به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مقاومتی خاک اطراف شده و به عنوان روشی برای بهسازی خاک محسوب می‌گردد. ریزشمع‌ها را می‌توان با توجه به هدف طراحی و زمینه کاربرد به صورت تکی یا آرایش گروهی و به صورت قائم یا مایل تحت یک زاویه مشخص نسبت به سطح افق اجرا کرد [۱].

گرچه پژوهش در مورد شمع‌ها سابقه زیادی دارد لکن زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ را می‌توان نقطه عطفی در آغاز مطالعات ویژه ریزشمع‌ها دانست. آنالیز خرابی پی‌ها در این زلزله نشان داد که گروه شمع‌های فولادی با قطر کوچک،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rz_naderi@yahoo.com



مدل خاک-شمع-پل، نشان داد تحریکات نزدیک به گسل، اثرات اندرکنش خاک و شمع را به طور قابل توجهی تقویت می‌کند [۱۷].

مطالعات فوق از یک سو بیانگر کارآمدی گروه ریزشمع و از سوی نشانگر تفاوت‌های مهم زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در محتوای فرکانسی و ایجاد تغییر شکل‌های سطحی علی‌رغم مشابهت‌های ذاتی است. همچنین مطالعه مرادی مقدم و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی نشان داد، درصد تراکم نسبی متفاوت در خاک‌های دانه‌ای می‌تواند اختلاف قابل توجهی در ظرفیت باربری ریزشمع‌ها ایجاد کند [۱۸]. بر این اساس دو نوع خاک دانه‌ای سست ($D_r=40\%$) و متراکم ($D_r=80\%$) با دو مدل تسلیح (گروه ریزشمع قائم و گروه ریزشمع مایل) با توجه به نوع ساختگاه تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. پاسخ‌های گروه ریزشمع شامل تغییر مکان افقی، شتاب و نیروهای داخلی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نکات مهمی برای بهره‌گیری از گروه ریزشمع به منظور مقاوم‌سازی لرزه‌ای در مناطق نزدیک به کانون لرزه‌زا و دور از آن ارائه گردید.

۲- مدل‌سازی عددی

۲-۱- مدل خاک

یک توده خاک همگن متشکل از المان‌های هشت گرهی از نوع Brick u-p برای مدل‌سازی خاک در نظر گرفته شد. گره‌های این المان دارای چهار درجه آزادی است که شامل سه درجه آزادی برای حرکت انتقالی و یک درجه آزادی برای فشار آب حفره‌ای می‌باشد. برای تعریف مصالح خاک از ماده چند تسلیمی وابسته به فشار (PDMY) استفاده شد. این ماده الاستوپلاستیک برای شبیه‌سازی خصوصیات پاسخ خاک حساس به فشار تحت حالت‌های بارگذاری عمومی به کار می‌رود و در طول بارگذاری استاتیکی دارای رفتار الاستیک خطی و در طول بارگذاری دینامیکی دارای رفتار الاستوپلاستیک است [۱۹]. سطح تسلیم این ماده از مدل دراگر-پراگر پیروی می‌کند که با توجه به تجربه‌های قبلی در مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک یکی از حالت‌های مناسب برای تعریف رفتار غیرخطی مصالح اصطکاکی از جمله خاک‌های دانه‌ای محسوب می‌شود که مقاومت آن‌ها وابسته به فشار است. میرایی رایلی مرسوم‌ترین نوع میرایی مکانیکی است که در تحلیل‌های دینامیکی به کار گرفته می‌شود و یک ترکیب خطی از دو ماتریس جرم و سختی است که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

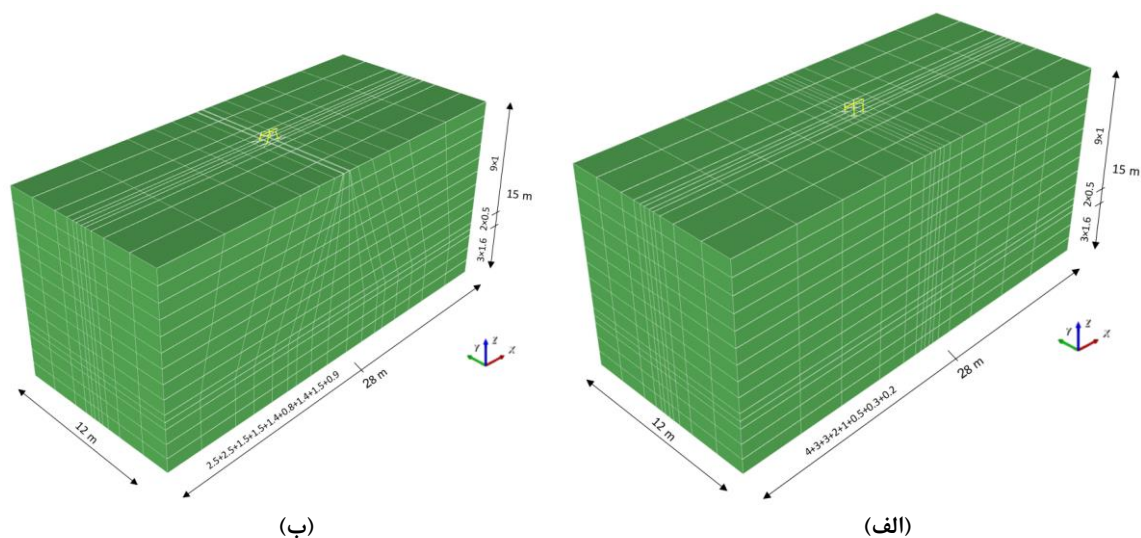
$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (1)$$

مشخصات ریزشمع‌ها (شامل تعداد، قطر، شیب، سختی و فاصله از یکدیگر) بر پاسخ لرزه‌ای ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت [۵]. علاوه بر این به کمک مدل‌های فیزیکی، عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع در مقیاس واقعی به صورت برج‌توسط کاپاتی و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۶) و در مقیاس آزمایشگاهی توسط جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸) مورد مطالعه گرفت. این مطالعات علاوه بر بررسی عوامل اثرگذار بر پاسخ ریزشمع به روشنی تاثیر مثبت عملکرد گروه ریزشمع به ویژه ریزشمع‌های مایل را نشان داد [۸-۶].

حرکات زمین در محدوده نزدیک گسل به شدت تحت تاثیر مکانیزم چشمه لرزه‌ای، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جابجایی ماندگار ناشی از حرکات تکنونیک زمین می‌باشد. این تاثیر باعث به وجود آمدن خصوصیات منحصر به فردی از جمله جهت پذیری پیش‌رونده، اثر تغییر مکان ماندگار، محتوای فرکانسی بالا و اثر مولفه قائم در زلزله‌های نزدیک گسل می‌شود و موجب رفتار متفاوت این زلزله‌ها در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل می‌گردد. تاثیر این مولفه‌ها به صورت یک پالس شدید با دامنه بزرگ و مدت دوام کوتاه، محتوی فرکانسی بالا و یا تغییر مکان ماندگار حاصل از گسلش زمین، در نگاهت‌های نزدیک گسل نمود پیدا می‌کند [۹]. با افزایش فاصله از گسل همچنان که تاثیر سایر پارامترها نظیر بزرگی زلزله و شرایط ساختگاه بر روی خصوصیات جنبش‌های ثبت شده افزایش می‌یابد، تاثیر خصوصیات ذاتی زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش می‌یابد. با این وجود تعیین یک فاصله کانونی دقیق برای مشخص نمودن مرز زلزله‌های حوزه نزدیک دور امری مشکل و غیرمنطقی است [۱۱ و ۱۰].

به علت کمبود اطلاعات تا اواخر قرن بیستم، مطالعات اندکی بر روی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های دور و تاثیر آن‌ها بر روی سازه‌ها انجام شده است. در دو دهه اخیر از چندین زلزله مشهور مانند زلزله نورث‌ریج آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه ژاپن (۱۹۹۵)، کجایی ترکیه (۱۹۹۹) و چی‌چی تایوان (۱۹۹۹)، اطلاعات ارزشمندی در مورد شناخت خصوصیات و تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر سازه‌ها به دست آمد که راه را برای مطالعه بیشتر در مورد زلزله‌های حوزه نزدیک و اثرات آن‌ها باز کرد.

مصطفی و تاکی واکا (۲۰۱۰) و لیو و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌هایی را برای شبیه‌سازی حرکت زمین نزدیک به گسل ارائه دادند [۱۳ و ۱۲]. مطالعات احمدی و خوشنودیان (۲۰۱۵)، کرک و همکاران (۲۰۱۶) و یگانه و فتاحی (۲۰۱۹)، تاثیرات متفاوت زلزله‌های نزدیک به گسل را بر ساختگاه، مدل‌های سازنده خاک و اندرکنش خاک و سازه بیش از پیش نشان داد [۱۴-۱۶]. همچنین نتایج آزمایش میز لرزه‌زی و سان (۲۰۲۱) بر روی یک



شکل ۱. مدل کلی سیستم خاک - ریزشمع - سرریزشمعالف- گروه ریزشمع قائم (ب) - گروه ریزشمع مایل

Fig. 1. General model of soil - micropile - cap system (a): Vertical micropile group (b): Inclined micropile group

برای اعمال میرایی رایلی از دستور رایلی در نرم افزار استفاده شد. این دستور برای اختصاص میرایی به تمام المان و گره‌های تعریف شده در دامنه مدل به کار می‌رود.

دو نوع مصالح دانه‌ای (ماسه نوادا) با دو تراکم متفاوت ($Dr = 40\%$ و $Dr = 80\%$) برای بلوک خاکی در نظر گرفته شد. مشخصات خاک‌ها در جدول ۱ آمده است.

۲-۲- مدل ریزشمع و کلاهک (سر ریزشمع)

برای مدل‌سازی ریزشمع المان Displacement-Based Beam-Column انتخاب گردید. این المان قابلیت تولید تیر- ستون با مقاطع منشوری یا غیرمنشوری و با در نظر گرفتن اثر پلاستیسیته را دارد. همچنین ماده الاستیک تک محوره از نوع بتن با مقطع دایره‌ای به عنوان مصالح به ریزشمع اختصاص یافت. رفتار ریزشمع‌ها خطی و الاستیک در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی کلاهک (سر ریزشمع) از المان تیر- ستون مشابه ریزشمع استفاده شده است. مصالح اختصاص یافته به کلاهک ریزشمع از نوع بتن با رفتار ماده الاستیک تک محوره و با مقطع مستطیلی می‌باشد و به وسیله قیدهای equalDOF که درجات آزادی گره‌ها را به هم متصل می‌کند به ریزشمع‌ها به صورت صلب بسته شده است.

در مطالعات مربوط به میرایی خاک، میرایی رایلی هم به صورت ترکیبی از ماتریس‌های جرم و سختی و هم به صورت ساده فقط با در نظر گرفتن ماتریس سختی پیشنهاد شده است. چنانچه از ماتریس جرم صرف نظر شود، ماتریس میرایی به ماتریسی منفرد تبدیل می‌شود [۲۰ و ۲۱]. بنابراین داریم:

$$\beta_k = \frac{2\zeta_0}{\omega_0} \quad (2)$$

در رابطه فوق، ω_0 فرکانس غالب بارگذاری و ζ_0 نسبت میرایی مواد است که ۵٪ در نظر گرفته شده است.

فرکانس طبیعی خاک برای هر مود قابل محاسبه است. این مقدار برای مود اول از رابطه (۳) به دست می‌آید [۲۲].

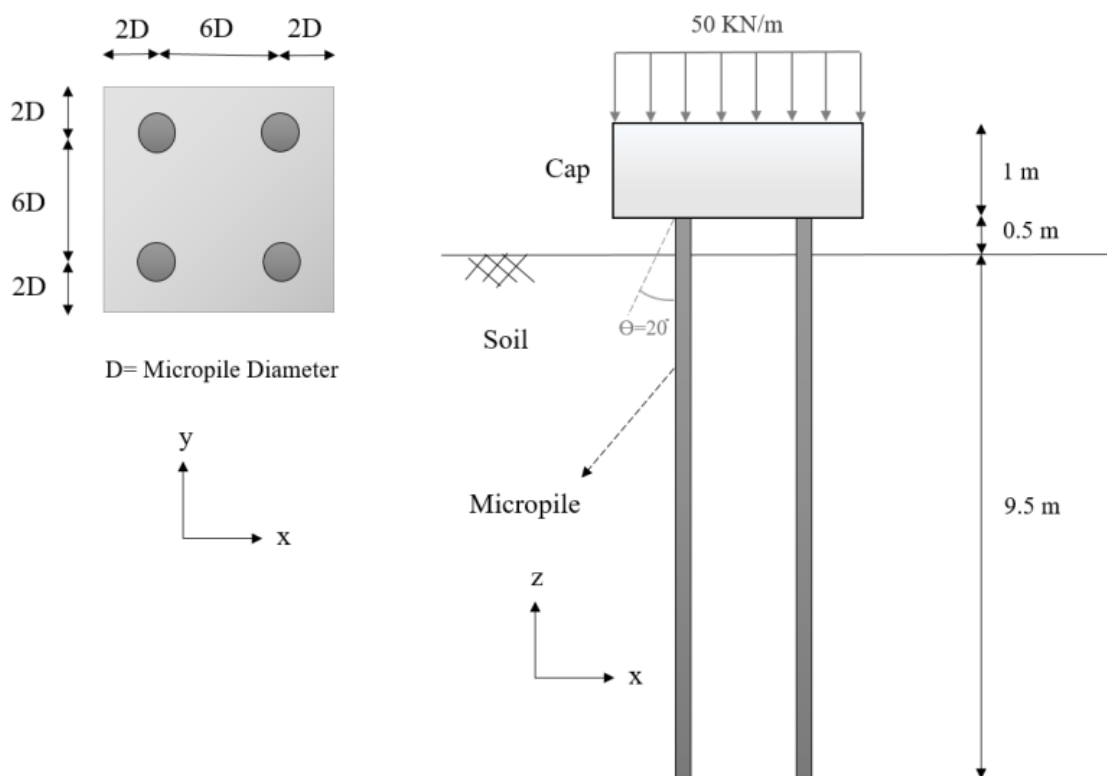
$$f_s = \frac{V_s}{4H_s} \quad (3)$$

در این رابطه f_s فرکانس طبیعی خاک، V_s سرعت موج برشی در خاک و H_s ضخامت لایه خاک می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات خاک دانه‌ای [۲۳]

Table 1. Characteristics of granular soil

ماده نوادا		پارامترها
۴۰	۸۰	تراکم نسبی (%)
۱/۹۶	۲/۰۳	جرم مخصوص اشباع ρ (ton/m ³)
۴۶/۲	۸۸/۴	مدول برشی مرجع Gr (MPa)
۱۲۳	۲۳۶	مدول بالک مرجع Br (MPa)
۳۲	۳۶/۵	زاویه اصطکاک ϕ
۰/۱	۰/۱	گرانش برشی حداکثر γ_{max}
۱۰۱	۱۰۱	فشار محصور کننده موثر مرجع (kPa)
۰/۵	۰/۵	ضریب وابستگی فشار
۳۰	۲۶	زاویه تبدیل فاز ϕ_{PT}
۰/۷۳	۰/۱۶۱۸	نسبت تخلخل



شکل ۲. جزئیات مدل‌سازی ریزشمع و کلاهک بتنی

Fig. 2. Details of modeling of micropile and concrete cap

جدول ۲. مشخصات ریزشمع

Table 2. Micropile Characteristics

پارامترها	جرم مخصوص ρ (kg/m ³)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته E (GPa)	قطر D (m)
بتن	۲۴۰۰	۰/۳	۲۵	۰/۲

جدول ۳. مشخصات ماسه ۳۰/۶۰ آکلند- آزمایش میز لرزه منوس و همکاران [۲۵]

Table 3. Auckland 30/60 Sand Specifications - Manus shaking table test

پارامترها	مقدار	توضیحات
ρ_s	۲/۶۵ ton/m ³	وزن مخصوص ذرات جامد
D_{10}	۰/۳ mm	اندازه دانه با ۱۰ درصد ذرات خاک ریزتر
D_{60}	۰/۴۵ mm	اندازه دانه با ۶۰ درصد ذرات خاک ریزتر
e_{min}	۰/۵۳	بیشینه نسبت تخلخل
e_{max}	۰/۸۳	کمینه نسبت تخلخل
ϕ_s	۳۳°	زاویه اصطکاک داخلی در حالت ثابت

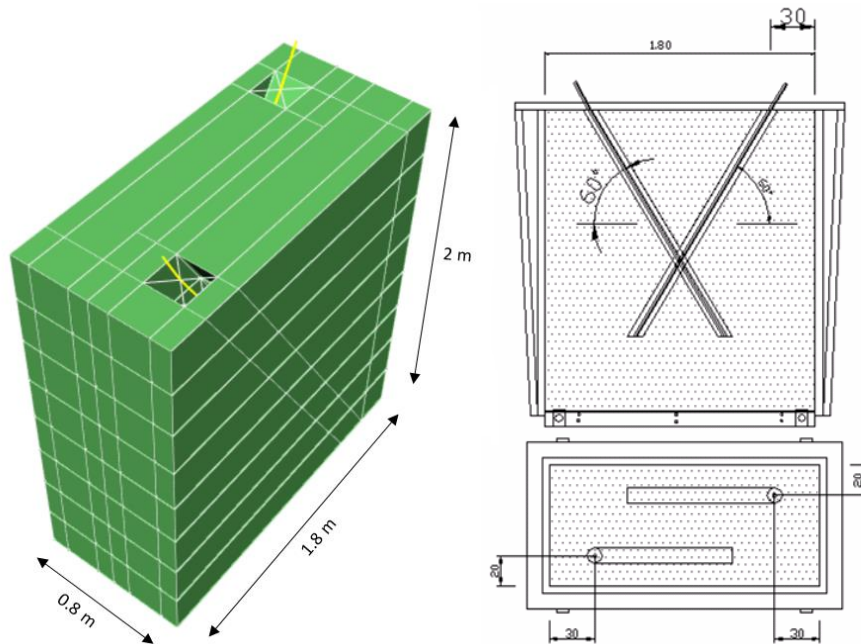
۲-۳- شرایط مرزی

به منظور جلوگیری از خطای تحلیل ناشی از برخورد امواج زلزله به مرزهای مدل و بازگشت آن‌ها به داخل محیط، شرایط مرز آزاد در وجوه مدل، با اتصال گره‌های هم تراز در وجوه راست و چپ مدل در راستای X (جهت اعمال شتاب زلزله) تامین گردید. کف مدل به عنوان سنگ بستر در نظر گرفته شده و در سه راستای X، Y و Z مقید شده است. برای در نظر گرفتن اثرات سنگ بستر، از میراگر با المان طول صفر و مواد تک محوره ویسکوز بر اساس روش لیزمر و کول میر در راستاهای X و Z استفاده شد [۲۴].

۳- صحت سنجی

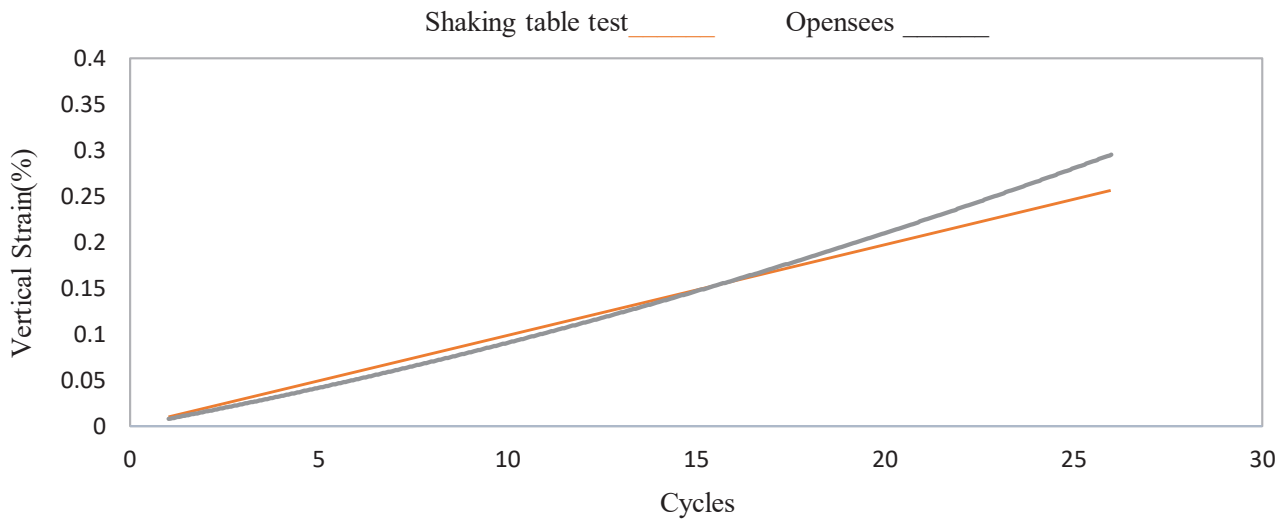
عملکرد مدل نرم افزاری بر اساس مدل میز لرزه منوس و همکاران که در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه کانتربری نیوزلند با موضوع تسلیح خاک با ریزشمع‌های مایل در مقابل روانگرایی انجام شده مورد صحت سنجی قرار گرفت. در این آزمایش یک مدل خاکی از نوع ماسه ۳۰/۶۰ آکلند با تراکم ۴۰٪ در جعبه مدل‌سازی به ابعاد $1/8 \times 0/8 \times 2$ m در دو حالت بدون تسلیح و با تسلیح ریزشمع مایل با زاویه ۳۰ درجه تحت آزمون میز لرزه یک درجه آزادی قرار گرفت. در شرایط تسلیح شده خاک از دو ریزشمع خود حفار

استفاده گردید و دوغاب سیمان هنگام حفاری با فشار کم تزریق شد تا با خاک اطراف مخلوط شود. قطر ریزشمع‌های مورد استفاده پس از اجرای دوغاب با مقاومت ۲۸ روزه ۱۱ MPa برابر ۱۰۰ mm می‌باشد. تحریک ورودی دستگاه، یک بار هارمونیک سینوسی در ۲۶ سیکل با فرکانس ۱ Hz و محدوده دامنه ۴/۰-+ می‌باشد. محفظه مدل‌سازی از جنس لمینت، امکان تغییر شکل‌های برشی خاک را با حداقل اثرات مرزی فراهم کرده است [۲۵]. مدل عددی متناظر با آزمایش میز لرزه از یک بلوک خاکی با مشخصات جدول ۳ و ابعاد مشابه با جعبه مدل‌سازی فیزیکی تشکیل شده است. دو المان با مصالح بتنی مشابه با مشخصات مقاومتی دوغاب سیمانی برای مدل‌سازی ریزشمع‌های مایل در نظر گرفته شد و در نهایت بارگذاری هارمونیک سینوسی به کف مدل اعمال شد. شکل ۳ جزئیات مدل‌سازی فیزیکی و عددی آزمایش میز لرزه منوس و همکاران را به تصویر می‌کشد. نتایج آزمایش میز لرزه شامل کرنش قائم و برشی سطح خاک در هر سیکل بارگذاری برای شرایط تسلیح شده با دو ریزشمع مایل ارائه گردید. شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب نتایج کرنش قائم و برشی خاک را در هر سیکل بار در آزمایش میز لرزه و مدل‌سازی عددی مقایسه می‌کند.



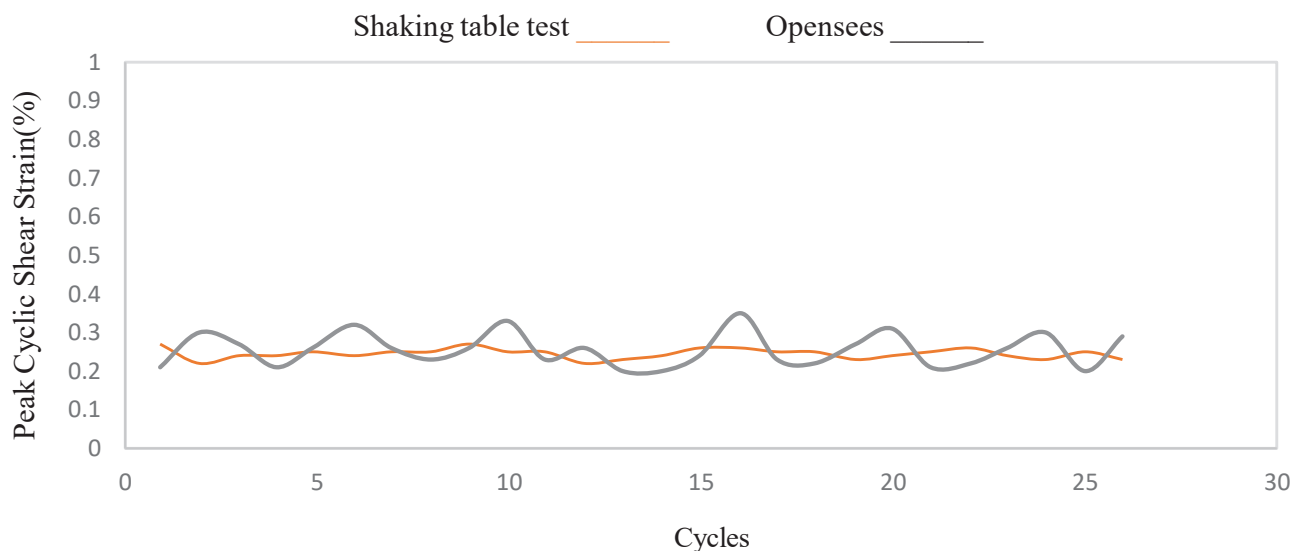
شکل ۳. مدل سازی خاک و ریزش‌م‌های مایل- آزمایش میز لرزه منوس و همکاران الف-مدل فیزیکی در آزمایشگاه ب-مدل عددی در اپنسیس

Fig.3. Modeling of soil and inclined micropiles – shaking table test of Manus et al. (a): Physical model in the laboratory (b): Numerical model in the Opensees



شکل ۴. مقایسه نتایج آزمایش میز لرزه و مدل سازی عددی برای کرنش قائم خاک در هر سیکل بار در شرایط تسلیح خاک با دو ریزش‌م‌های مایل

Fig. 4. Comparison of shaking table test results and numerical modeling for soil vertical strain in each load cycle in the case of soil reinforcement with two inclined micropiles



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایش میز لرزه و مدل سازی عددی برای کرنش برشی خاک در هر سیکل بار در شرایط تسلیح خاک با دو ریزشمع مایل

Fig. 5. Comparison of shaking table test results and numerical modeling for soil shear strain in each load cycle in the case of soil reinforcement with two inclined micropiles

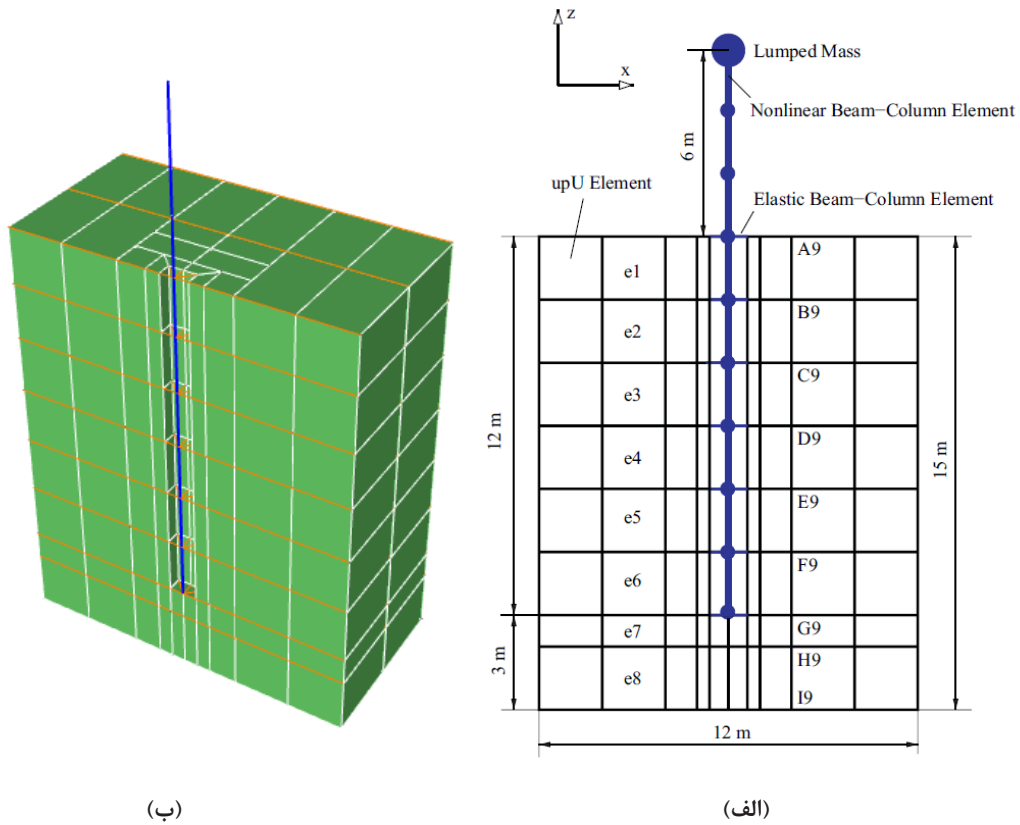
$$R_u = \frac{P'_{initial} - P'_{current}}{P'_{initial}}, P' = \sigma_{kk} / 3 \quad (4)$$

۴- زلزله‌های ورودی

در انتخاب شتاب نگاشت مناسب برای یک ساختمان، لازم است خصوصیات ساختمان و منبع زلزله از نظر بزرگای زلزله، سرعت موج برشی، فاصله ساختمان تا منبع زلزله، زمین شناسی منطقه و شتاب حداکثر مورد توجه قرار گیرد و تا حد امکان این ویژگی‌ها با خصوصیات ساختمان مورد نظر و زلزله محتمل در آن همسان باشد. با توجه به موضوع پژوهش، دو دسته زلزله دور و نزدیک برای اعمال زلزله به کف مدل (سنگ بستر) مورد نیاز است. برای این منظور ابتدا زلزله‌های دور و نزدیک از مجموعه رکوردیهای پیشنهادی دستورالعمل P695-Femina انتخاب گردید و سپس با توجه به سرعت موج برشی خاک مبتنی بر طبقه‌بندی وردوگ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۷]، Vs30>300m/s خاک متراکم - به ساختمان دانه‌ای سست و متراکم اعمال گردید.

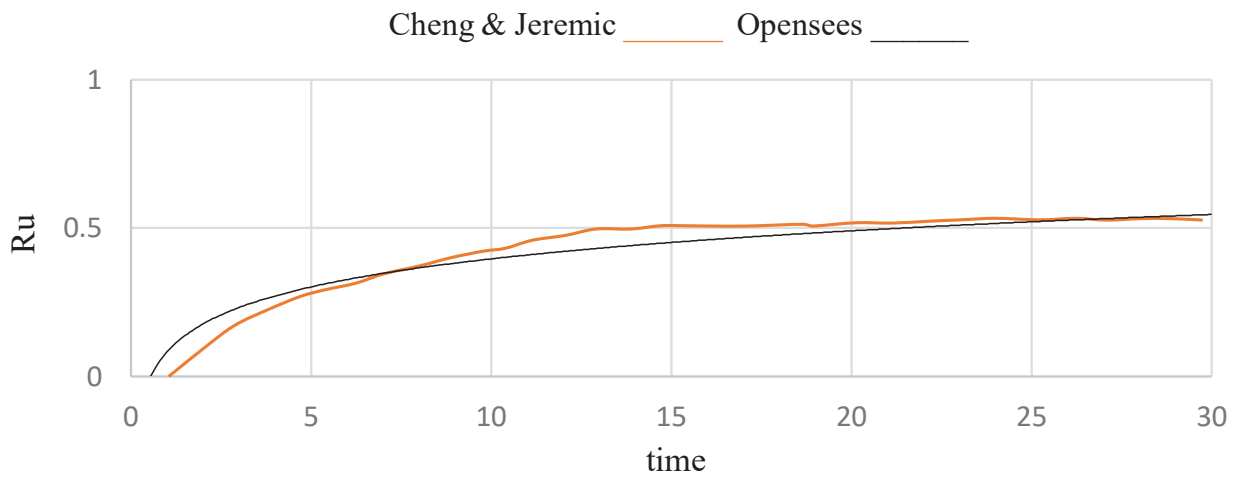
همچنین بر اساس پژوهش چنگ و جرمیک (۲۰۰۹) تحت عنوان مدل سازی عددی و شبیه سازی شمع در خاک روانگرا که به وسیله نرم افزار Opensees انجام شده است، صحت نتایج مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. برای این مدل، یک شمع از جنس آلومینیوم با مقطع دایره توخالی به قطر خارجی یک متر با المان Force Based Beam-Column در توده خاک ماسه‌ای بر اساس مدل مصالح الاستوپلاستیک Manzari Dafalias متشکل از المان‌های هشت گرهی جایگذاری شد. علاوه بر این، سازه یک درجه آزادی شامل ستون با مشخصات مصالح شمع و جرم متمرکز به اندازه ۱۲۰۰ کیلوگرم برای روسازه در نظر گرفته شد. شتاب نگاشت انتخاب شده یک رکورد شتاب افقی برداشت شده توسط انستیتو پلی-تکنیک رنسلر مربوط به مدل یک پروژه می‌باشد که به صورت رکورد زلزله شبیه سازی شده و به مدل اعمال گردیده است [۲۶].

در این پژوهش نسبت R_u به صورت نسبت تفاضل تنش موثر میانگین اولیه و تنش موثر میانگین موجود به تنش موثر میانگین اولیه مطابق رابطه (۴) تعریف شده است. شکل ۷ مقایسه نتایج تغییرات وابسته به زمان R_u در مطالعه چنگ و جرمیک (۲۰۰۹) و مدل سازی عددی اپنسیس را نشان می‌دهد.



شکل ۶. جزئیات مدل‌سازی المان محدود خاک-شمع-روسازه الف-مدل عددی چنگ و جرمیک ب-مدل عددی در اپنسیس

Fig. 6. Details of finite element modeling of soil - micropile - superstructure (a): Cheng and Jeremic Numerical model



شکل ۷. تغییرات R_u نسبت به زمان برای المان e7

Fig. 7. R_u times histories for elements e7

جدول ۴. مشخصات زلزله‌های دور و نزدیک - Femma P695 [۲۸]

Table 4. Characteristics of far-fault and near-fault earthquakes - Femma P695

مجموعه رکورد حوزه دور							
ردیف	مشخصات سایت			زلزله			
	مسافت (km)	Vs30(m/s)	ایستگاه رکورد	PGA(g)	بزرگا	سال	نام
۱	۱۳/۵	۱۹۶	El Centro Array #11	۰/۳۸	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley (آمریکا)
۲	۱۵/۴	۲۷۶	Duzce	۰/۳۶	۷/۱	۱۹۹۹	Kocaeli (ترکیه)
۳	۱۵/۵	۲۵۹	CHY101	۰/۴۴	۷/۶	۱۹۹۹	Chi-Chi (تایوان)
۴	۱۷/۲	۳۵۶	Beverly Hills-Mulhol	۰/۵۲	۶/۷	۱۹۹۴	Northridge (آمریکا)
۵	۲۳/۸	۳۵۴	Yermo Fire Station	۰/۲۴	۷/۳	۱۹۹۲	Landers (آمریکا)
۶	۱۲/۸	۳۵۰	Gilroy Array#3	۰/۵۶	۶/۹	۱۹۸۹	Loma Prieta (آمریکا)

مجموعه رکورد حوزه نزدیک							
ردیف	مشخصات سایت			زلزله			
	مسافت (km)	Vs30(m/s)	ایستگاه رکورد	PGA(g)	بزرگا	سال	نام
۱	۳/۵	۲۰۳	El Centro Array #6	۰/۴۴	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley (آمریکا)
۲	۵/۳	۲۹۷	Yarimca	۰/۳۱	۷/۱	۱۹۹۹	Kocaeli (ترکیه)
۳	۶/۷	۳۰۶	TCU065	۰/۸۲	۷/۶	۱۹۹۹	Chi-Chi (تایوان)
۴	۵/۳	۴۴۱	Sylmar - Olive View	۰/۷۳	۶/۷	۱۹۹۴	Northridge (آمریکا)
۵	۳/۷	۶۸۵	Lucerne	۰/۷۹	۷/۳	۱۹۹۲	Landers (آمریکا)
۶	۳/۹	۴۶۲	Corralitos	۰/۶۴	۶/۹	۱۹۸۹	Loma Prieta (آمریکا)

شبییه‌سازی شرایط تنش بر جا قبل از اعمال بار زلزله، توده خاک تحت اثر بارگذاری اولیه شامل وزن اسکلت خاک و آب منفذی و در شرایط مرزی تعریف شده تحلیل استاتیکی می‌شود.

۲) تحلیل استاتیکی سیستم خاک - ریزشمع تحت اثر بارهای ثقلی: این مرحله شامل حفاری خاک در محل نصب ریزشمع‌ها با حذف المان‌های خاکی این ناحیه، مدل‌سازی ریزشمع‌ها، کلاهدک و در نهایت بارگذاری استاتیکی بر روی گروه ریزشمع برای در نظر گرفتن اثر بارهای ثقلی (زنده و مرده) است. مجموعه فوق تحت اثر بارگذاری ثقلی، تحلیل استاتیکی می‌شود.

بدین ترتیب رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های امپریال‌ولی، کجایی و چی‌چی برای ساختگاه سست و رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های نورث‌ریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه متراکم، در نظر گرفته شد. جدول ۴ به ترتیب مشخصات گروه زلزله‌های دور و نزدیک انتخاب شده را نمایش می‌دهد.

۵- تحلیل و بررسی نتایج

تحلیل اجزاء محدود مدل در سه مرحله زیر انجام شده است:
 ۱) تحلیل استاتیکی بلوک خاک تحت اثر وزن: در اولین گام به منظور

جدول ۵. بیشینه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 5. Maximum horizontal displacement of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه تغییر مکان افقی (m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	0.239	0.719	0.424	0.457	0.362	1.133
ریزشمع مایل	0.231	0.696	0.413	0.439	0.332	1.053

جدول ۶. بیشینه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 6. Maximum horizontal displacement of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

بیشینه تغییر مکان افقی (m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	0.146	0.396	0.134	0.121	0.415	0.281
ریزشمع مایل	0.136	0.375	0.128	0.122	0.419	0.274

گزارش شد، می‌توان در موارد زیر بیان کرد:

(۱) نتایج بیانگر اثر قابل توجه زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل نسبت به زلزله‌های دور در ساختگاه دانه‌ای سست است. افزایش تغییر مکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای سست به ترتیب ۱۲۵٪ و ۱۲۴٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای متراکم به ترتیب ۱۵٪ و ۱۳٪ می‌باشد. تاریخچه تغییر مکان افقی (شکل ۶) در هر دو ساختگاه سست و متراکم نشان می‌دهد، پالس شدید ناشی از جهت‌پذیری پیش رونده در زلزله‌های نزدیک بر پاسخ تغییر مکان افقی در هر دو گروه ریزشمع موثر بوده و تغییر قابل ملاحظه در مقادیر تغییر مکان افقی در یک بازه زمانی کوتاه ایجاد می‌کند. بنابراین ضروریست در کنترل تغییر شکل پی‌ها یا ساختگاه‌های سست مسلح شده با گروه ریزشمع اثر زلزله‌های نزدیک در نظر گرفته شود.

(۲) با وجود ساختگاه دانه‌ای متراکم، علی‌رغم اثر زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل، این افزایش به مراتب کمتر از مقادیر مشابه برای ساختگاه سست است. نسبت مقادیر در دو گروه زلزله نشان می‌دهد اثر رکوردهای نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در خاک دانه‌ای سست نسبت به خاک دانه‌ای متراکم برای گروه

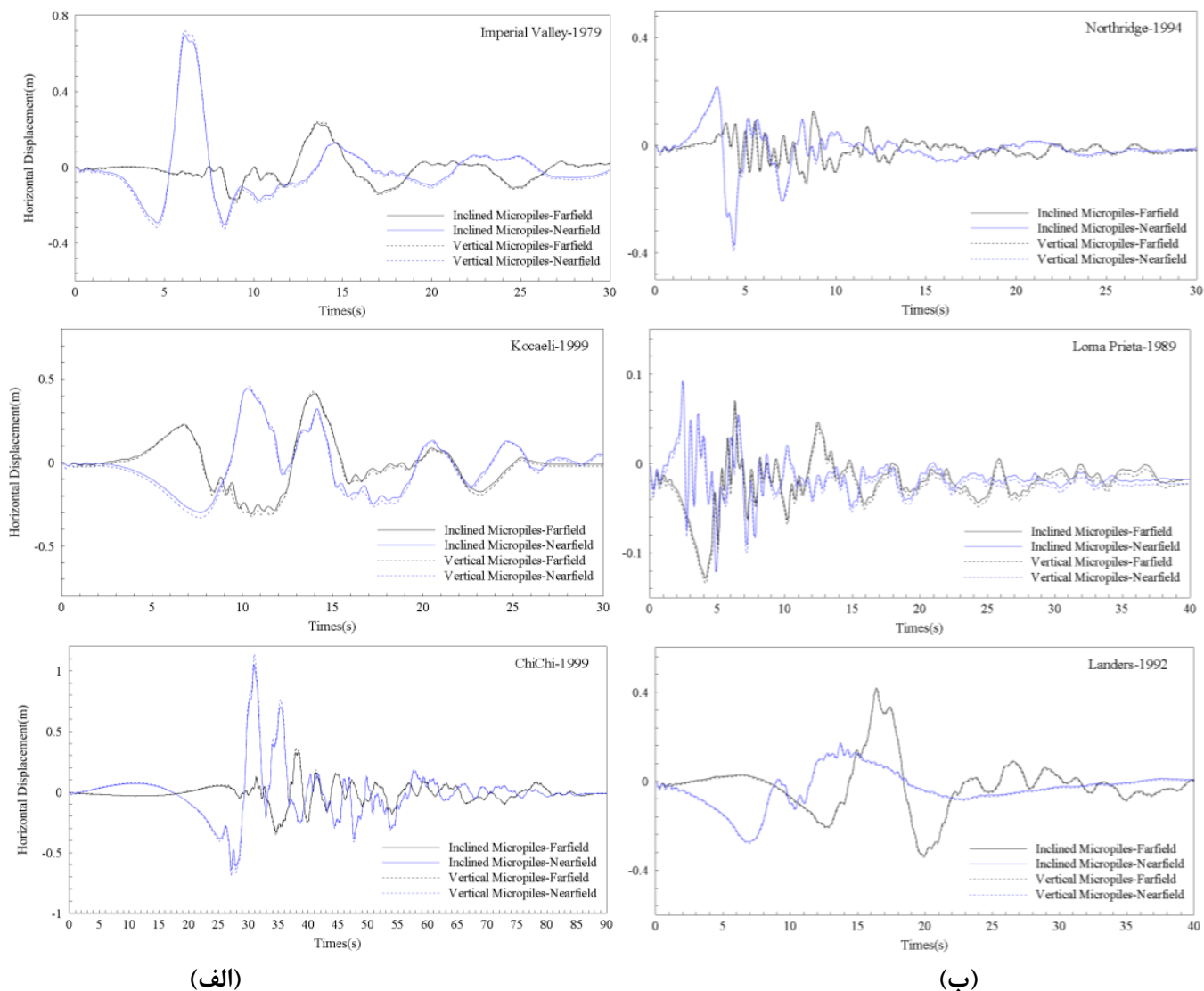
(۳) تحلیل دینامیکی سیستم خاک - ریزشمع - روسازه تحت اثر بار زلزله؛ در این مرحله با تعریف شرایط مرزی جدید و اعمال رکورد زلزله به کف مدل (سنگ بستر)، سیستم، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی می‌شود.

۵-۱-۱ - تغییر مکان افقی گروه ریزشمع

شکل ۸ تاریخچه تغییر مکان افقی در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. میانگین بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای سست ۲/۲۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. به طور متوسط بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای سست ۲/۲۴ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است که مشابه این نسبت برای گروه ریزشمع قائم است.

نتایج برای ساختگاه دانه‌ای متراکم نشان می‌دهد، بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای متراکم ۱/۱۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. به طور متوسط بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای متراکم ۱/۱۳ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است.

مهم‌ترین نتایج بررسی مقادیر جابجایی افقی گروه ریزشمع را که در بالا



شکل ۸. تاریخچه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل الف-ساختمان دانه‌ای سست ب-ساختمان دانه‌ای متراکم

Fig. 8. History of horizontal displacement of the vertical and inclined micropile group (a): Loose granular site (b): Dense granular site

با گروه ریزشمع قائم ندارد و هر دو مدل تسلیح، کارکرد یکسانی در کنترل تغییر مکان جانبی ناشی از رکوردهای دور و نزدیک دارند. به نظر می‌رسد، با وجود اینکه جرم خاک محصور شده بین گروه ریزشمع قائم کمتر از گروه ریزشمع مایل است، اما به دلیل تراکم مناسب خاک، مقاومت هر دو سیستم در برابر بارگذاری جانبی یکسان است.

لازم به توضیح است اعمال یک بارگذاری جانبی مستقل از بارگذاری زلزله می‌تواند منجر به تفاوت بیشتر در عملکرد ریزشمع‌های قائم و مایل گردد، لکن تمرکز این پژوهش صرفاً بر ارزیابی اثر رکوردهای دور و نزدیک می‌باشد.

ریزشمع قائم و مایل، به طور میانگین حدود ۹۶٪ و ۹۸٪ بیشتر است. به نظر می‌رسد، افزایش میرایی رایلی که ناشی از افزایش موج برشی در ساختمان متراکم است، نقش کاهنده در اثر افزایشی رکوردهای نزدیک گسل بر تغییر مکان جانبی گروه ریزشمع دارد.

در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم در ساختمان دانه‌ای سست اندکی بهتر است و گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه تغییر مکان افقی در سرریزشمع شده است. این بهبود عملکرد در زلزله‌های دور به طور متوسط ۵/۲٪ و در زلزله‌های نزدیک ۵/۵٪ است. برخلاف ساختمان دانه‌ای سست، عملکرد گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای متراکم تفاوت قابل ملاحظه‌ای

جدول ۷. بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 7. Maximum acceleration of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه شتاب (g)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	0.296	0.589	0.571	0.496	0.501	0.756
ریزشمع مایل	0.254	0.541	0.503	0.395	0.510	0.732

جدول ۸. بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 8. Maximum acceleration of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

بیشینه شتاب (g)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	1.487	1.855	0.791	1.377	0.416	0.439
ریزشمع مایل	1.425	1.478	0.737	1.180	0.392	0.431

نزدیک به طور میانگین ۱۰۳٪ و ۷۱٪ بزرگ‌نمایی در شتاب بیشینه را نشان می‌دهد.

مهم‌ترین نتایج بررسی مقادیر تغییرات شتاب گروه ریزشمع را که در بالا گزارش شد، می‌توان در موارد زیر بیان کرد:

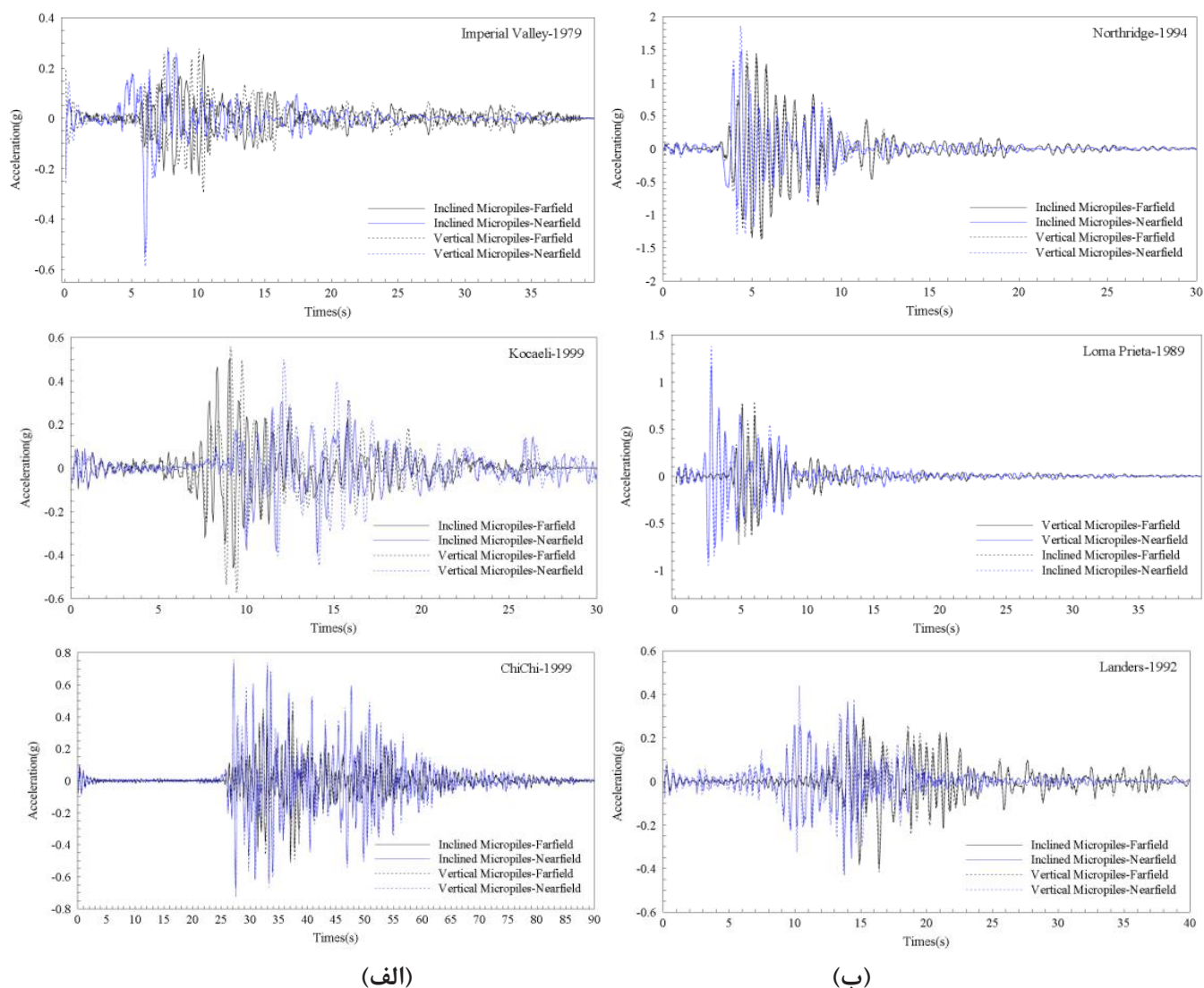
(۱) به طور کلی افزایش شتاب بیشینه گروه ریزشمع قائم و مایل ناشی از رکوردهای نزدیک گسل در هر دو ساختگاه سست و متراکم قابل توجه بوده و می‌بایست اثر این رکوردها در طراحی سیستم خاک-ریزشمع-کلاهدک دیده شود. افزایش شتاب در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای سست به ترتیب ۳۵٪ و ۳۳٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای متراکم به ترتیب ۳۶٪ و ۲۱٪ می‌باشد.

(۲) شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه متراکم و در زلزله‌های نزدیک اعداد بزرگ‌تری را ثبت نمود، این امر با توجه به شتاب ورودی بزرگ‌تر در این زلزله‌ها منطقی به نظر می‌رسد و موید نتایج پژوهش‌های گذشته در افزایش شتاب سیستم ناشی از افزایش شتاب ورودی است [۸ و ۵]. (۳) درصد بزرگ‌نمایی شتاب در ساختگاه متراکم و زلزله‌های دور بیشتر از درصد مشابه در ساختگاه سست و زلزله‌های نزدیک است. ممکن است نزدیکی مقادیر فرکانس طبیعی ساختگاه متراکم و سنگ بستر، باعث شده

۵-۲- تغییرات شتاب گروه ریزشمع

شکل ۹ تاریخچه شتاب سیستم در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. بررسی خروجی تحلیل نشان می‌دهد، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در خاک دانه‌ای سست در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۳۴/۷٪ افزایش یافته است. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای سست در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۳۲/۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. در ساختگاه دانه‌ای متراکم، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۳۵/۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای متراکم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۲۱/۲٪ افزایش را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج به دست آمده از شتاب سرریزشمع با مقادیر PGA در جداول ۵ و ۴ نشان می‌دهد، در ساختگاه دانه‌ای سست برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور به طور میانگین ۱۶/۹٪ و ۸/۲٪ و در زلزله‌های نزدیک به طور میانگین ۱۸/۱٪ و ۷/۷٪ بزرگ‌نمایی در شتاب بیشینه پدید آمده است. مقایسه این مقادیر در ساختگاه دانه‌ای متراکم برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور به طور میانگین ۱۱۳٪ و ۱۰۲٪ و در زلزله‌های



شکل ۹. تاریخچه شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل الف-ساخگاه دانه‌ای سست ب-ساخگاه دانه‌ای متراکم

Fig. 9. Acceleration history of vertical and inclined micropile group (a): Loose granular site (b): dense granular site

سرریزشمع کمی بهتر می‌باشد. این بهبود عملکرد برای ساخگاه دانه‌ای سست در زلزله‌های دور و نزدیک به طور متوسط ۷/۵٪ و ۸/۸٪ است و برای ساخگاه دانه‌ای متراکم در زلزله‌های دور و نزدیک به طور میانگین ۴/۵٪ و ۱۵/۶٪ می‌باشد. این تفاوت عملکرد در زلزله‌های با PGA بزرگ‌تر نمود بیشتری دارد و با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد که زاویه‌دار شدن ریزشمع‌ها، سختی جانبی و مقاومت آن‌ها را در برابر بارگذاری جانبی افزایش می‌دهد [۲۹].

خاک دانه‌ای متراکم دارای تابع تقویت بزرگ‌تری نسبت به خاک دانه‌ای سست باشد. نکته حائز اهمیت آن است که علی‌رغم وجود شتاب‌های بزرگ‌تر، عملکرد گروه ریزشمع قائم و مایل در کنترل تغییر مکان جانبی در ساخگاه متراکم، بهتر بوده است. به نظر می‌رسد تقویت قابل ملاحظه مقاومت اصطکاکی جدار ریزشمع‌ها در خاک دانه‌ای متراکم عامل این بهبود عملکرد باشد.

(۴) در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم در کاهش مقدار بیشینه شتاب در

جدول ۹. بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 9. Maximum shear force of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه نیروی برشی (KN)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	556.06	565.58	648.88	668.58	676.33	857.37
ریزشمع مایل	468.56	470.46	477.95	496.14	467.15	470.58

جدول ۱۰. بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 10. Maximum shear force of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

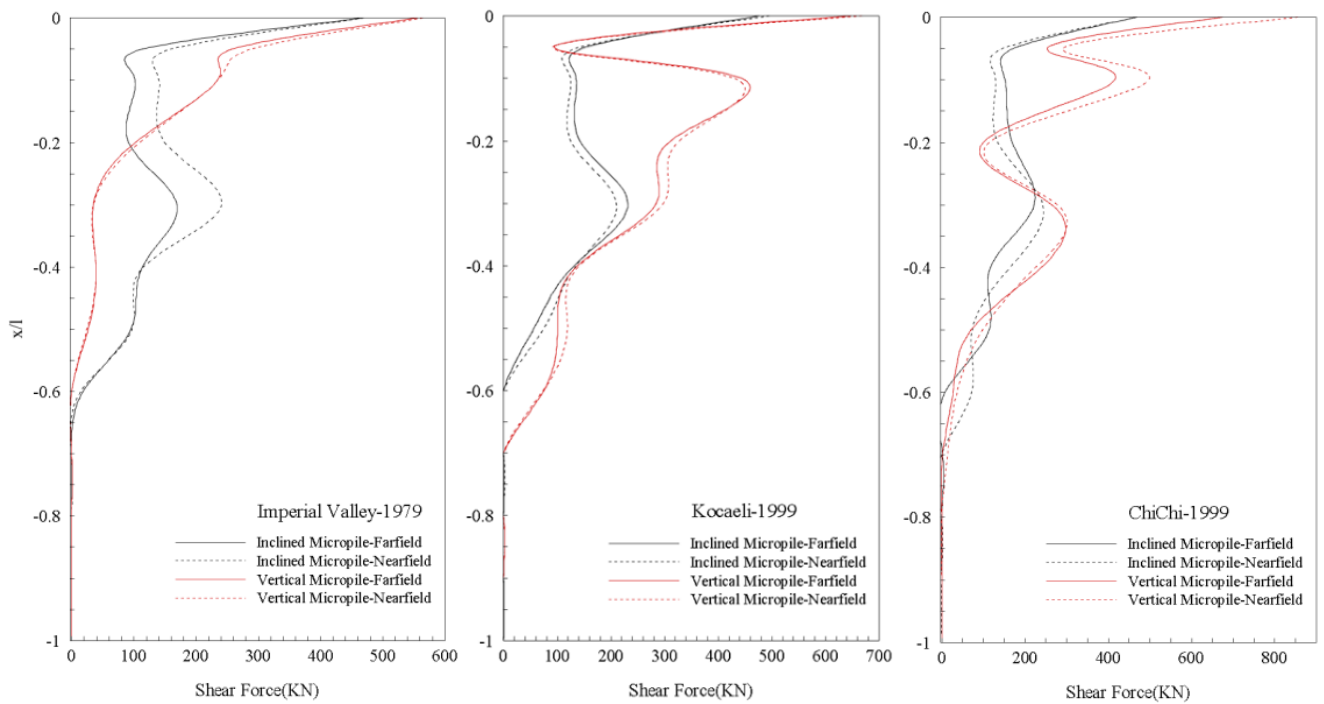
بیشینه نیروی برشی (KN)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	497.88	675.78	471.09	515.93	463.24	456.99
ریزشمع مایل	464.11	495.96	305.98	316.72	344.19	331.33

و خمشی در ریزشمع‌های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین ۱۵٪ برای نیروی برشی و ۱۱/۵٪ برای نیروی خمشی می‌باشد. همچنین افزایش نیروهای ریزشمع در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل ناچیز است. این نتایج به طور کلی نشان می‌دهد، پاسخ نیروهای ریزشمع تحت تاثیر نوع تسلیح گروه ریزشمع (قائم/مایل) است و نوع ساختگاه تاثیر کمتری در مقدار نیروهای ریزشمع دارد، اگر چه ساختگاه دانه‌ای متراکم کمک بیشتری به افزایش ظرفیت باربری گروه ریزشمع مایل در اثر زلزله‌های دور و نزدیک به ویژه در نیروی خمشی به دلیل افزایش سختی سیستم کرده است. (۲) در ساختگاه دانه‌ای سست در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم بهتر است و گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع شده است. کاهش بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۴/۹٪ و در زلزله‌های نزدیک ۳۱/۳٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۵/۸٪ و در زلزله‌های نزدیک ۳۲/۷٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. (۳) در ساختگاه دانه‌ای متراکم در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم بهتر است و

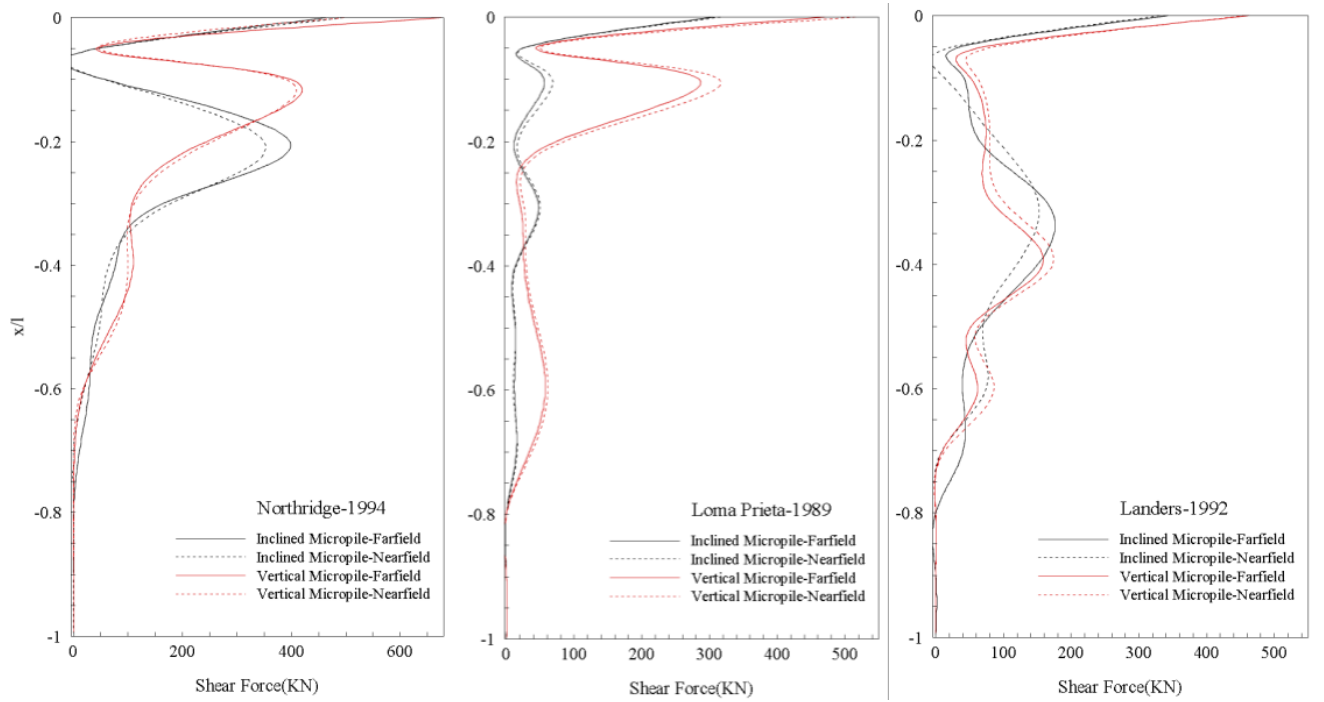
۵-۳- پاسخ نیروهای ریزشمع

منحنی تغییرات نیروی برشی در امتداد طول ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول ۹ و برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول ۱۰ آمده است. همچنین منحنی تغییرات نیروی خمشی در امتداد طول ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول ۱۱ و برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول ۱۲ آمده است. نتایج حاصل از بررسی پاسخ نیروهای گروه ریزشمع قائم و مایل در موارد زیر قابل ارائه است:

(۱) در ساختگاه دانه‌ای سست، رکورد زلزله‌های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع‌های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین ۱۱/۲٪ برای نیروی برشی و ۱۲/۳٪ برای نیروی خمشی می‌باشد. همچنین افزایش نیروی برشی و خمشی در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل ناچیز است. همچنین در ساختگاه دانه‌ای متراکم، رکورد زلزله‌های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. نمودار نیروی برشی در طول ریزشمع قائم و مایل الف-ساخگاه دانه ای سست ب-ساخگاه دانه ای متراکم

Fig.10. Shear force curves along vertical and inclined micropiles (a): Loose granular site (b): dense granular site

جدول ۱۱. بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 11. Maximum bending force of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه نیروی خمشی (KN-m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	356.14	362.21	415.25	427.77	432.71	562.49
ریزشمع مایل	262.16	273.07	360.71	359.93	270.29	276.82

جدول ۱۲. بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 12. Maximum bending force of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

بیشینه نیروی خمشی (KN-m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	387.04	501.48	320.95	348.16	350.08	330.59
ریزشمع مایل	366.73	417.24	239.75	285.49	253.56	233.19

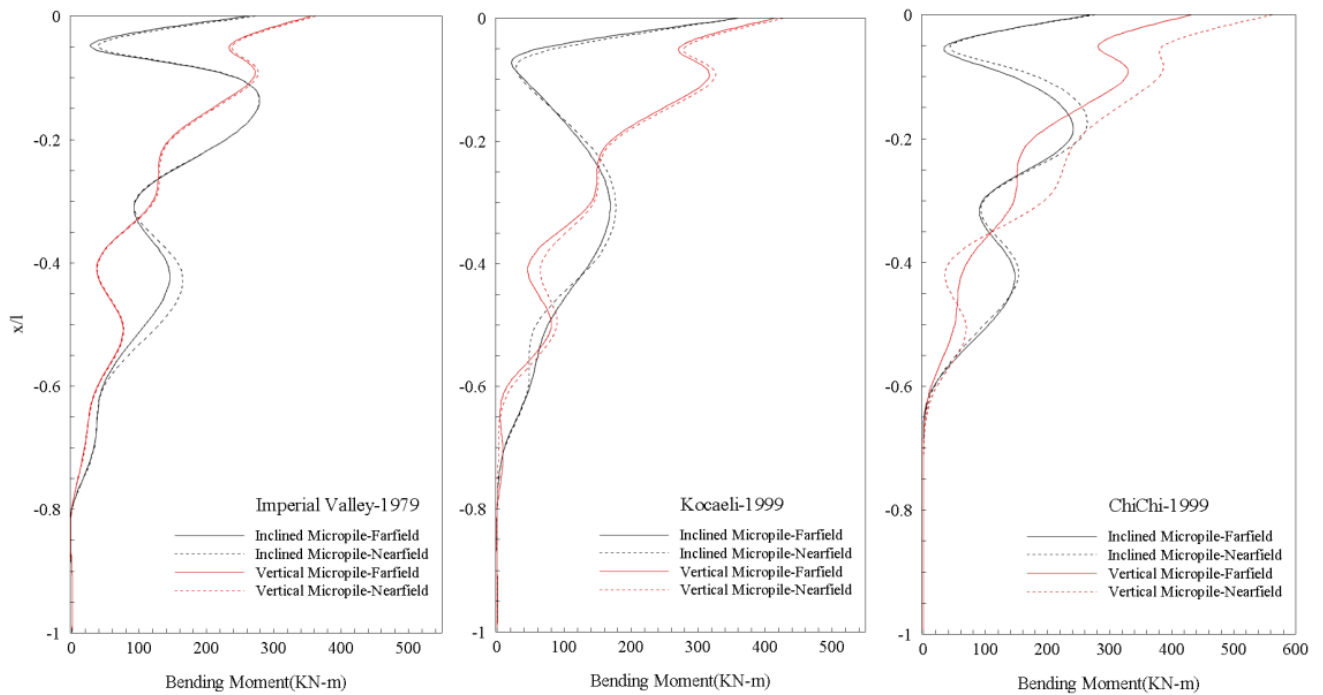
۶- جمع بندی نتایج

در این پژوهش یک مدل استاندارد از خاک-ریزشمع-سرریزشمع متشکل از دو نوع خاک دانه‌ای الاستوپلاستیک با مشخصات مکانیکی متفاوت شامل خاک دانه‌ای سست و خاک دانه‌ای متراکم به وسیله دو گروه ریزشمع قائم و مایل بتنی با رفتار الاستیک خطی مسلح گردید. با توجه به سرعت موج برشی ساختگاه، سیستم تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی شامل پاسخ‌های گروه ریزشمع مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. از آنجا که تاثیر سه مولفه اثرگذار بر سیستم شامل نوع ساختگاه، نوع زلزله ورودی و مدل تسلیح ریزشمع، به صورت همزمان در این پژوهش دیده شد، امکان نتیجه‌گیری جامع از عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع در انواع شرایط محتمل فراهم آمد.

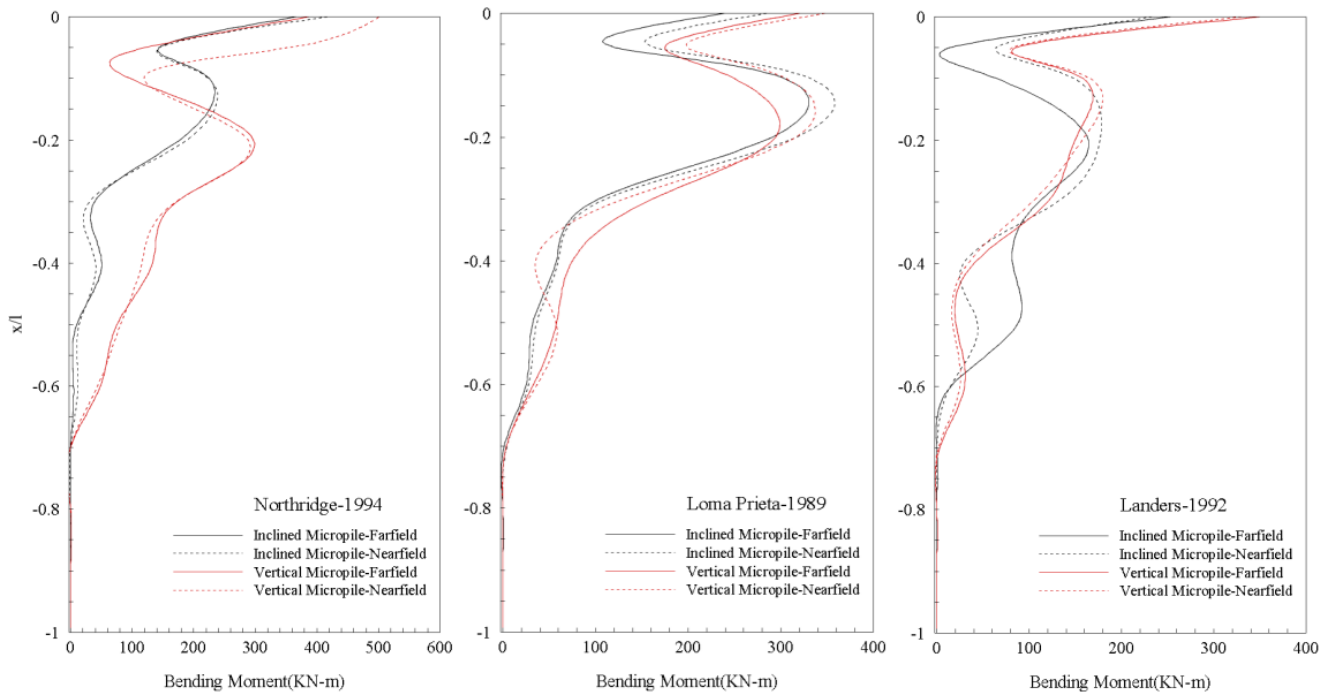
(۱) نتایج نشان داد، پارامترهای مورد بررسی در گروه ریزشمع شامل جابجایی، شتاب، نیروی خمشی و برشی، تابع یکی از سه ویژگی نوع ساختگاه، رکورد ورودی و مدل تسلیح است و سایر عوامل تاثیر کمتری بر پاسخ‌ها دارد. در یک نگاه کلی می‌توان چنین بیان کرد که نیروهای برشی

گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع شده است. کاهش بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۲/۲٪ و در زلزله‌های نزدیک ۳۰/۶٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۱۸/۸٪ و در زلزله‌های نزدیک ۲۰/۷٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. نتایج ۲ و ۳ موید یافته‌های مطالعات گذشته است که وجود ریزشمع‌های مایل موجب افزایش سختی محوری و در نتیجه کاهش پاسخ نیروهای ریزشمع می‌باشد [۴].

(۴) آنچه از بررسی موردی پاسخ نیروهای ریزشمع (نیروی برشی و خمشی) حاصل می‌شود لزوم توجه به اثرات متفاوت رکوردهای نزدیک گسل در هر زلزله صرف نظر از تاثیر کلی این رکوردها بر افزایش پاسخ ریزشمع‌ها است. این اثر ممکن است در برخی زلزله‌ها مانند زلزله امپریال ولی مشابه رکورد دور باشد و در برخی زلزله‌ها مانند زلزله چی‌چی موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. نمودار نیروی خمشی در طول ریزش‌معم قائم و مایل الف-ساختمان دانه‌ای سست ب-ساختمان دانه‌ای متراکم

Fig.11. bending force curves along vertical and inclined micropiles (a): Loose granular site (b): dense granular site

تاثیر کلی این رکوردها بر افزایش پاسخ ریزش‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان مثال پاسخ شتاب و جابجایی سیستم در اثر زلزله‌ی نزدیک کجایی مشابه رکورد دور این زلزله است، در حالی که زلزله‌ی نزدیک چی‌چی موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شده است.

منابع

- [1] D.A. Bruce, I. Juran, Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review, Volume I: Background, Classifications, Cost (1997).
- [2] M. Sadek, S. Isam, Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(6) (2004) 473-485.
- [3] M. Sadek, I. Shahrour, Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(5) (2006) 461-468.
- [4] S. Isam, A. Hassan, S. Mhamed, 3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles, *Computers and Geotechnics*, 39 (2012) 1-7.
- [5] A. Ghorbani, H. Hasanzadehshooili, E. Ghamari, J. Medzvieckas, Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58 (2014) 21-36.
- [6] M.C. Capatti, F. Dezi, M. Morici, Field tests on micropiles under dynamic lateral loading, *Procedia Engineering*, 158 (2016) 236-241.
- [7] M. Capatti, D. Roia, S. Carbonari, F. Dezi, Micropile foundation subjected to dynamic lateral loading, *Procedia engineering*, 199 (2017) 2324-2329.
- [8] H.J. Mashhoud, J.-H. Yin, A.K. Panah, Y.F. Leung, Shaking table test study on dynamic behavior of micropiles in loose sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110 (2018) 53-69.
- [9] J.P. Stewart, S.-J. Chiou, J.D. Bray, R.W. Graves, P.G.

و خمشی ریزش‌ها وابسته به نوع تسلیح (گروه ریزش‌ها قائم/ مایل) می‌باشد و نوع ساختگاه و زلزله ورودی تاثیر کمتری بر این پاسخ‌ها دارد در حالی که شتاب و جابجایی سیستم بیشتر متاثر از نوع ساختگاه و زلزله ورودی می‌باشد.

(۲) اثر زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی و شتاب در هر دو گروه ریزش‌ها قائم و مایل به ویژه در ساختگاه دانه‌ای سست، که مشخصات مکانیکی ضعیف‌تری دارد، قابل توجه است. ضمن اینکه اثر زلزله‌های نزدیک در ایجاد تغییر مکان‌های افقی پالس‌گونه و مخرب در هر دو گروه ریزش‌ها به وضوح قابل مشاهده است. بنابراین تاثیر رکوردهای نزدیک گسل می‌بایست در طراحی و کنترل تغییر شکل پی‌ها یا ساختگاه‌های مسلح شده با گروه ریزش‌ها مدنظر قرار گیرد. هر چند به طور متوسط تاثیر رکوردهای نزدیک بر ساختگاه‌های کیفی‌تر نظیر خاک دانه‌ای متراکم بسیار کمتر است، نتایج موردی نشان داد که در برخی رکوردها افزایش تغییر مکان جانبی و به ویژه شتاب گروه ریزش‌ها در این خاک‌ها می‌تواند قابل توجه باشد.

(۳) تغییرات شتاب گروه ریزش‌ها قائم و مایل تابع دو مولفه شتاب ورودی زلزله و ضریب بزرگ‌نمایی ساختگاه است. شتاب سیستم در ساختگاه متراکم و در زلزله‌های نزدیک و در شرایط تسلیح با گروه ریزش‌ها قائم، اعداد بزرگ‌تری را ثبت نمود. در زلزله‌های نزدیک با توجه به PGA بزرگ‌تر، مولفه شتاب ورودی افزایش پیدا می‌کند و منجر به افزایش شتاب سیستم می‌شود.

(۴) از منظر مقایسه عملکرد گروه ریزش‌ها قائم و مایل در دو ساختگاه دانه‌ای و چسبیده می‌توان چنین نتیجه گرفت که گروه ریزش‌ها مایل عملکردی تقریباً مشابه در کنترل تغییر مکان‌های جانبی و شتاب سیستم و عملکردی بهتر در کنترل نیروهای داخلی نسبت به گروه ریزش‌ها قائم از خود نشان می‌دهد.

(۵) مقایسه نتایج متغیرهای شتاب و جابجایی در گروه ریزش‌ها قائم و مایل نشان داد، عملکرد هر دو گروه ریزش‌ها در کاهش شتاب و جابجایی جانبی در ساختگاه‌های متراکم بهتر است. این ویژگی در ریزش‌ها مایل با وضوح بیشتری مشاهده شد. می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد گروه ریزش‌ها مایل در ساختگاه‌های متراکم‌تر نسبت به ساختگاه‌های ضعیف‌تر قابلیت اطمینان بالاتری دارد.

(۶) با توجه به اینکه نتایج پژوهش، برآیند پاسخ‌های سیستم خاک - ریزش‌ها تحت اثر مجموعه زلزله‌های دور و نزدیک با ماهیت‌های مختلف است، این نتایج لزوماً نشان دهنده اثر یکایک زلزله‌های ورودی نیست. از این رو توجه به اثرات متفاوت رکوردهای نزدیک گسل در هر زلزله صرف نظر از

- Parameters, Installation Methods and Soil Density on the Micropile Bearing Capacity, *International Journal of Civil Engineering*, (2021) 1-13.
- [19] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006) 137-158.
- [20] G. Lanzo, A. Pagliaroli, B. D'Elia, Numerical study on the frequency-dependent viscous damping in dynamic response analyses of ground, *Earthquake Resistant Engineering Structures IV*, WIT Press, Southampton, Boston, (2003) 315-324.
- [21] D. Park, Y.M. Hashash, Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02) (2004) 249-274.
- [22] S. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, (1996).
- [23] 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.
- [24] J. Lysmer, R.L. Kuhlemeyer, Finite dynamic model for infinite media, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4) (1969) 859-877.
- [25] K. McManus, J. Turner, G. Charton, Inclined reinforcement to prevent soil liquefaction, in: *Proceedings of the Annual NZSEE Technical Conference*, Citeseer, 2005, pp. 523-533.
- [26] Z. Cheng, B. Jeremić, Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(11-12) (2009) 1405-1416.
- [27] R. Verdugo, F. Ochoa-Cornejo, J. Gonzalez, G. Valladares, Site effect and site classification in areas with large earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126 (2019) 105071.
- [28] A.T. Council, U.S.F.E.M. Agency, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Somerville, N.A. Abrahamson, Ground motion evaluation procedures for performance-based design, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 22(9-12) (2002) 765-772.
- [10] M. Erdik, E. Durukal, A hybrid procedure for the assessment of design basis earthquake ground motions for near-fault conditions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(5) (2001) 431-443.
- [11] J.D. Bray, A. Rodriguez-Marek, Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 24(11) (2004) 815-828.
- [12] A. Moustafa, I. Takewaki, Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(5) (2010) 412-422.
- [13] T. Liu, Y. Luan, W. Zhong, A numerical approach for modeling near-fault ground motion and its application in the 1994 Northridge earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1) (2012) 52-61.
- [14] E. Ahmadi, F. Khoshnoudian, Near-fault effects on strength reduction factors of soil-MDOF structure systems, *Soils and Foundations*, 55(4) (2015) 841-856.
- [15] T.G. Cork, J.H. Kim, G.P. Mavroedidis, J.K. Kim, B. Halldorsson, A.S. Papageorgiou, Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80 (2016) 102-118.
- [16] N. Yeganeh, B. Fatahi, Effects of choice of soil constitutive model on seismic performance of moment-resisting frames experiencing foundation rocking subjected to near-field earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121 (2019) 442-459.
- [17] W. Xie, L. Sun, Assessment and mitigation on near-fault earthquake wave effects on seismic responses and pile-soil interactions of soil-pile-bridge model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143 (2021) 106596.
- [18] H.M. Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental Evaluation of the Effects of Structural

inclination angle on seismic performance of micropiles,
International Journal of Geomechanics, 18(11) (2018)
04018142.

Homeland Security, FEMA, 2009.

[29] A. Komak Panah, H. Jalilian Mashhoud, J.-H. Yin,
Y. Fai Leung, Shaking table investigation of effects of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Mohamadi Esfahani, R. Naderi, e effect of farfield and nearfield earthquakes on the seismic behavior of micropile group in loose and dense granular soils, Amirkabir J. Civil Eng., 54(4) (2022) 1483-1502.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19598.7209](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19598.7209)

