



## Experimental investigation of the effect of relative densities and type of loading on sand liquefaction under irregular earthquake loading

B. Katebi<sup>1</sup>, N. Ganjian<sup>1</sup>, M. Derakhshandi<sup>1\*</sup>, A. Ghalandarzadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### Review History:

Received: May, 05, 2019

Revised: Jun. 09, 2019

Accepted: Jun. 15, 2019

Available Online: Jul. 04, 2019

### Keywords:

Liquefaction

Dynamic triaxial tests

Relative density

Firozkooh sand

Irregular time history loads

**ABSTRACT:** The cyclic triaxial test has been widely used to evaluate the liquefaction potential of soil over the past few decades. When a specimen is subjected to repeated shear loading, the sand particles tend to rearrange their stacking into a denser state. While drainage is prevented, pore pressure generation and loss of effective stress have resulted. This paper presents a systematic experimental investigation into the liquefaction behavior of saturated sand subject to seismic loading with various relative densities such as 30, 50 and 70 percent. Dynamic triaxial tests were run on saturated firozkooh sand using irregular time history loads that were recorded during the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. The records could be classified as shock and vibration type waveforms. The effect of each type of waveform and relative densities of sand samples on the liquefaction potential of sand was also evaluated in order to compare these results with previous studies, some cyclic tests have been done with various relative densities 30, 50 and 70 percent. The triaxial test results indicate that the pore pressure generation and liquefaction resistance of sand are influenced by the relative densities and the type of irregular loadings. Also, with the increasing duration of the records in the same PGA, the vibration waveform have more liquefaction potential than the shock waveform.

### 1- Introduction

Liquefaction is a soil mechanics problem that often influences structures supported on saturated sand deposits. Seed and Idriss [1] proposed an equivalent approach and evaluated the equivalent uniform cyclic stress as 65% of the maximum stress in random loadings. Recent research has evaluated sand behavior under random loading [2-6]. However, the previous researches show that the most studies have been carried out on the specimens subjected to uniform cyclic loading because of the lack of ability of the facilities to apply the irregular loading on the specimens. Furthermore, the effects of cyclic loading forms on the specimens with various densities have not been considered.

In this paper, the effects of irregular loading of strong ground motions, including two patterns of shock and vibration ground motion, are applied to the sand specimens then the liquefaction potential and pore water pressure characteristics of Firoozkuh #161 in various densities are compared with those results which obtain from the same specimens subjected to harmonic sinusoidal cyclic loading.

### 2- Methodology

The 6 records of the Chi-Chi earthquake are considered at different stations. In terms of appearance, the records

at stations 4, 5 and 6 were classified as shock loading and records at stations 1, 2 and 3 were vibration waveforms.

Cyclic triaxial test specimens 50 mm in diameter and 100 mm in height were prepared in watertight rubber membranes with porous stone and filter paper on each end. The wet tamping method has been used for sampling. The specimens had consolidation stress of = 100 KPa.

The experiments performed in this research were at relative densities ( $D_r$ ) of 30%, 50%, 70%. All tests were performed at a similar relative density and all samples were prepared using the method described above.

### 3- Results and Discussion

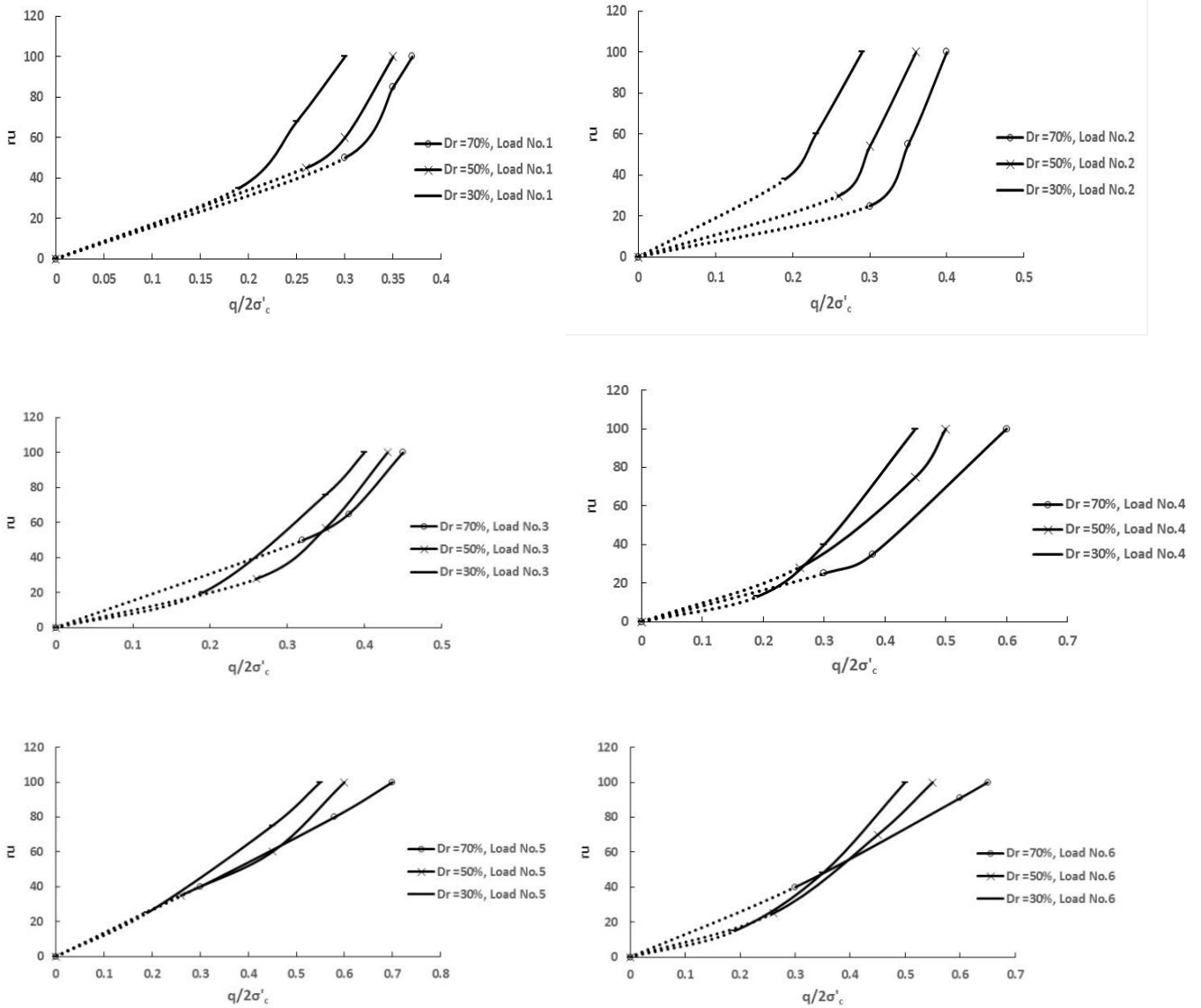
the variation of pore-water pressure values of all irregular tests are presented in Figure 1. It is noteworthy that no loading is done in parts of the graphs shown in the dotted line.

Figure 1 portrays that with increase relative densities 30 to 70%, the diagram tends to go to the right as last research, the specimen needs more ( $q/2\sigma'_c$ ) to liquefy.

In order to investigate soil behavior under shock and vibration waveform more precisely, the variation of excess pore pressure at different PGA that occurred liquefaction, in the relative densities 30, 50 and 70 percent are plotted in Figure 2.

\*Corresponding author's email: m.derakhshandi@gmail.com





**Fig. 1. The variation of pore-water pressure values of all irregular tests**

According to Figure 2, by increasing the relative density of specimens, the PGA of record that leading to liquefaction has increased. Samples under the relative density of 70% require about 20% higher PGA values for liquefaction. Thus, relative density has a major role in defining the dynamic behavior of cohesionless soils.

**4- Conclusion**

A comparison of soil behavior indicated that a higher stress ratio for liquefaction occurred during shock loading than vibration loading.

In cyclic uniform loading, by increasing the relative density of the specimens from 30% to 70%, the pore-water pressure increased; meanwhile, with the increase in the density of the specimens, the Stress correction coefficient increased.

At a similar PGA, due to the number of acceleration cycles that reached to 0.65PGA in vibration waveform is more than shock waveform and the high value of the effective duration of them so, the shock records have less liquefaction potential than vibration one.

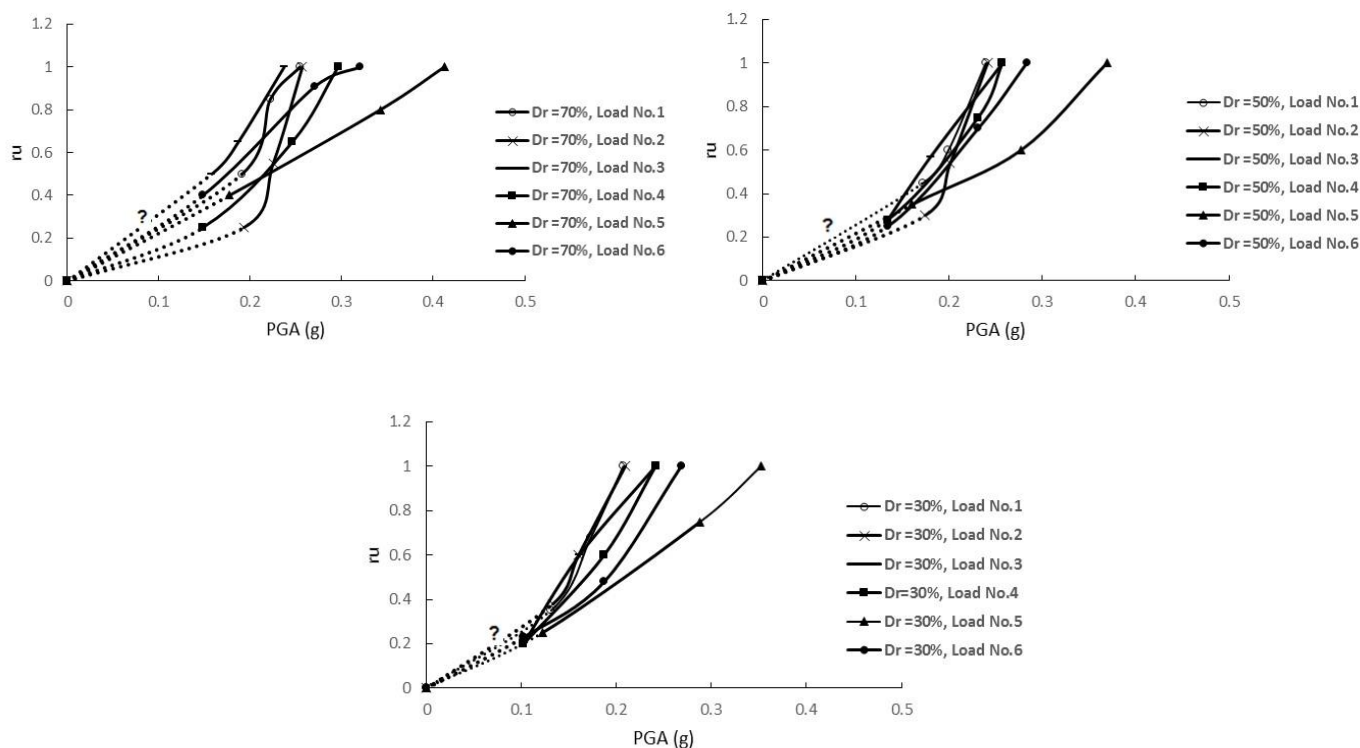


Fig. 2. The variation of excess pore pressure at different PGA that occurred liquefaction

### References

- [1] H.B. Seed, I.M. Idriss, Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, (1966).
- [2] S.S. Kumar, A. Dey, A.M. Krishna, Response of saturated cohesionless soil subjected to irregular seismic excitations, *Natural Hazards*, 93(1) (2018) 509-529.
- [3] K. Pan, Z. Yang, Evaluation of the liquefaction potential of sand under random loading conditions: Equivalent approach versus energy-based method, *Journal of Earthquake Engineering*, (2017) 1-25.
- [4] K. Pan, Z. Yang, Effects of initial static shear on cyclic resistance and pore pressure generation of saturated sand, *Acta Geotechnica*, 13(2) (2018) 473-487.
- [5] J. Qiu, X. Wang, J. Lai, Q. Zhang, J. Wang, Response characteristics and preventions for seismic subsidence of loess in Northwest China, *Natural Hazards*, 92(3) (2018) 1909-1935.
- [6] S. Sağlam, S. Bakir, Models for pore pressure response of low plastic fines subjected to repeated loads, *Journal of Earthquake Engineering*, 22(6) (2018) 1027-1041.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Katebi, N. Ganjian, M. Derakhshandi, A. Ghalandarzadeh, *Experimental investigation of the effect of relative densities and type of loading on sand liquefaction under irregular earthquake loading*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 3-6.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16278.6175







## مطالعه آزمایشگاهی بررسی اثر تراکم و نوع بارگذاری بر روی رفتار روانگرایی ماسه‌ها تحت بارگذاری نامنظم زلزله

بهاره کاتبی<sup>۱</sup>، نوید گنجیان<sup>۱</sup>، مهدی درخشندی<sup>۱\*</sup>، عباس قلندر زاده<sup>۲</sup>

۱- واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۳/۱۹

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۴/۱۳

### کلمات کلیدی:

روانگرایی

آزمایش‌های سه محوری سیکلی

تراکم نسبی

ماسه فیروزکوه

بارگذاری لرزه‌ای نامنظم

**خلاصه:** آزمایش‌های سه محوری سیکلی به منظور بررسی پتانسیل روانگرایی خاک‌ها به صورت گسترده‌ای در تحقیقات آزمایشگاهی استفاده می‌شوند. هنگامی که یک نمونه ماسه سست تحت بارگذاری برشی تناوبی قرار می‌گیرد، تمایل به متراکم‌تر شدن دارد و در صورت عدم امکان زهکشی باعث ایجاد فشار آب حفره‌ای و در نتیجه آن کاهش تنش مؤثر می‌شود. این پژوهش به تفصیل رفتار روانگرایی ماسه اشباع با تراکم ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد را با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی تحت بارگذاری نامنظم زلزله مورد مطالعه قرار می‌دهد. در این آزمایش‌ها از ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه و داده‌های ثبت شده از زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان در ایستگاه‌های مختلف، استفاده شده است. داده‌های لرزه‌ای از نظر ظاهری به دو دسته شوکی و لرزشی تقسیم شده‌اند تا اثر اعمال هر کدام از این دو دسته بارگذاری بر رفتار روانگرایی نمونه‌های ساخته شده از ماسه فیروزکوه بررسی شود. همچنین به منظور مقایسه این نتایج با مطالعات پیشین، تعدادی آزمایش سه محوری سیکلی با بارگذاری سیکلی هارمونیک سینوسی و در تراکم‌های مختلف ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد نیز انجام شده است. نتایج آزمایش‌های سه محوری سیکلی انجام شده در شرایط بارگذاری نامنظم، وابستگی اضافه فشار آب حفره‌ای و مقاومت روانگرایی را به تراکم نسبی نمونه‌های ماسه‌ای نشان می‌دهد. همچنین با افزایش مدت زمان مؤثر رکورد در یک PGA یکسان رکوردهای لرزشی پتانسیل روانگرایی بیشتری نسبت به رکوردهای شوکی دارند.

### ۱- مقدمه

به صورت مایعی غلیظ با جرم واحد حجم بالا روان می‌گردد؛ بنابراین ساخت و ساز روی این خاک‌ها می‌تواند موجب وارد آمدن خسارات به سازه‌ها شود [۱-۳].

کاساگرانده (۱۹۳۶) [۴] اولین محققی است که این پدیده را مطالعه کرده است. وی مشخصه‌های خاک‌های غیرچسبیده تأثیرگذار بر پایداری شیروانی‌ها و خاک‌ریزها را بررسی کرد. اگر چه او در آن زمان از عبارت روانگرایی استفاده نکرد، اما مفهوم و تعریف این پدیده را به طور واضح پایه‌گذاری کرد. او روانگرایی را به وسیله تعدادی آزمایش ساده توصیف نمود و چند نمونه مربوط به آن زمان را معرفی کرد.

از جمله موارد خرابی‌های ثبت شده ناشی از روانگرایی در ادبیات فنی، می‌توان به خسارات وارده به ساختمان‌ها در زلزله نیگاتای ژاپن (۱۹۶۴) و نشست زیاد و جابه‌جایی جانبی پی‌ها در طول زلزله شیلی (۱۹۶۰) و زلزله مکزیکوسیتی (۱۹۵۹) اشاره کرد که جزئیات بیشتر آن‌ها را می‌توان در مطالعات سید و ادريس (۱۹۶۷) [۵] و کاسترو (۱۹۶۹) [۶] یافت. از موارد جدیدتر روانگرایی می‌توان به زلزله توهوکو (۲۰۱۱) و زلزله نیوزیلند

روانگرایی یکی از پدیده‌های مخرب طبیعی است که حین زلزله اتفاق می‌افتد. نهشته‌های دانه‌ای سست به همراه سطح بالای آب زیر زمینی در مناطق زلزله‌خیز، مستعد پدیده روانگرایی هستند. این پدیده در اثر افزایش اضافه فشار آب منفذی و در نتیجه کاهش تنش مؤثر بین ذرات در نهشته‌های خاکی روی می‌دهد. افزایش فشار آب منفذی اثر قابل توجهی بر مقاومت برشی، پایداری و نشست توده خاک دارد، حتی اگر خاک دچار روانگرایی کامل نشود.

دلیل ایجاد پدیده روانگرایی تمایل به تراکم و کاهش حجم خاک‌های ماسه‌ای در اثر رخداد زلزله است. در این شرایط به دلیل اعمال بار در مدت زمان کوتاه و رفتار زهکشی نشده ماسه، فشار منفذی در توده ماسه افزایش می‌یابد. در صورتی که این افزایش فشار منفذی معادل سربار وارد شود، تنش مؤثر بین ذرات ماسه صفر شده و ماسه با از دست دادن مقاومت خود

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.derakhshandi@gmail.com



جدول ۱. مشخصات دانه‌های ماسه فیروزکوه

Table 1. The physical specifications of Firoozkuh sand

$G_s$	$e_{min}$	$e_{max}$	$C_u$	$C_c$	خاک مورد استفاده
۲/۶۵	۰/۵۵۵	۰/۹۱۶	۲/۲۸	۰/۹۲۵	ماسه فیروزکوه

۲-۲- مراحل انجام آزمایش

۲-۲-۱- نمونه‌سازی

روش‌های گوناگونی برای نمونه‌سازی در ادبیات فنی آمده است که هر یک اثر مستقیم روی بافت خاک دارد. همین مسئله باعث می‌شود که روش نمونه‌سازی بر مقاومت سیکلی خاک مؤثر باشد. در این تحقیق، از روش تراکم کاهش یافته، برای نمونه‌سازی استفاده شده است [۲۴] Ladd, ۱۹۷۸. به این ترتیب که در ابتدا خاک با رطوبتی متناسب با درصد رطوبت حدود ۵ درصد مخلوط شده و پس از توزیع یکنواخت رطوبت خاک، به تعداد لایه‌های مورد نظر تقسیم شده و در نایلون‌های جداگانه قرار گرفته و سپس خاک مخلوط به صورت لایه به لایه در قالب جایگزین می‌شود. به منظور در نظر گرفتن کاهش حجم و افزایش تراکمی که با قرار دادن لایه بالاتر روی لایه‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد، هر لایه در تراکمی بیشتر از لایه زیرین خود جایگزین می‌شود. این روش به طور گسترده‌ای در مطالعات روانگرایی استفاده می‌شود. مزیت عمده روش تراکم کاهش یافته ایجاد نمونه‌های کاملاً یکنواخت است که در محدوده وسیعی از دانسیته‌ها شکل می‌گیرد. در شکل ۲ مراحل مختلف نمونه‌سازی نشان داده شده است. قطر نمونه‌های مورد آزمایش برابر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها برابر ۱۰ سانتی‌متر بوده و به دلیل آن که روانگرایی در اعماق کم نزدیک به سطح زمین اتفاق می‌افتد، مقدار تنش تحکیمی در کلیه آزمایش‌های انجام شده ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است و در کل تعداد ۶۳ آزمایش سه محوری کنترل تنش، تحت بارگذاری نامنظم و سیکلی روی نمونه‌هایی با تراکم ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد انجام شده است (جدول‌های ۳ و ۴).

۲-۲-۲- تاریخچه زمانی تنش انحرافی استفاده شده در آزمایش‌ها

برای انجام این تحقیق به تعدادی تاریخچه زمانی تنش انحرافی (تنش برشی) زلزله نیاز بود. می‌توان تاریخچه زمانی شتاب از نظر شکل ظاهری را به دو گروه تقسیم کرد. آن دو گروه عبارت‌اند از: نوع شوکی یا ناگهانی، و نوع لرزشی [۲۵].

(۲۰۱۰) اشاره کرد که جزئیات وقوع روانگرایی در آن‌ها به ترتیب در مطالعات کوبرینوفسکی و همکاران (۲۰۱۱) [۷] و باتاچریا و همکاران (۲۰۱۱) [۸] منتشر شده است.

در هنگام وقوع زلزله، بارگذاری اعمالی بر خاک همواره به صورت نامنظم است. این نوع بارگذاری با دامنه‌های نامنظم موجب بروز تغییرات نامتقارن در خاک می‌شود. با توجه به سادگی اعمال بارگذاری هارمونیک، در اکثر تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای و مقاومت روانگرایی خاک از چند روش میانگین‌گیری استفاده شده است تا بدین وسیله یک تاریخچه زمانی پیچیده تنش به تعدادی سیکل تنش هارمونیک با دامنه ثابت تبدیل شود [۹-۱۱ و ۱].

به دلیل عدم امکان اعمال بارگذاری نامنظم در بیشتر دستگاه‌های موجود سه محوری، تاکنون تعداد محدودی از آزمایش‌ها در شرایط بارگذاری تنش یا کرنش غیریکنواخت انجام شده است [۱۹-۱۲].

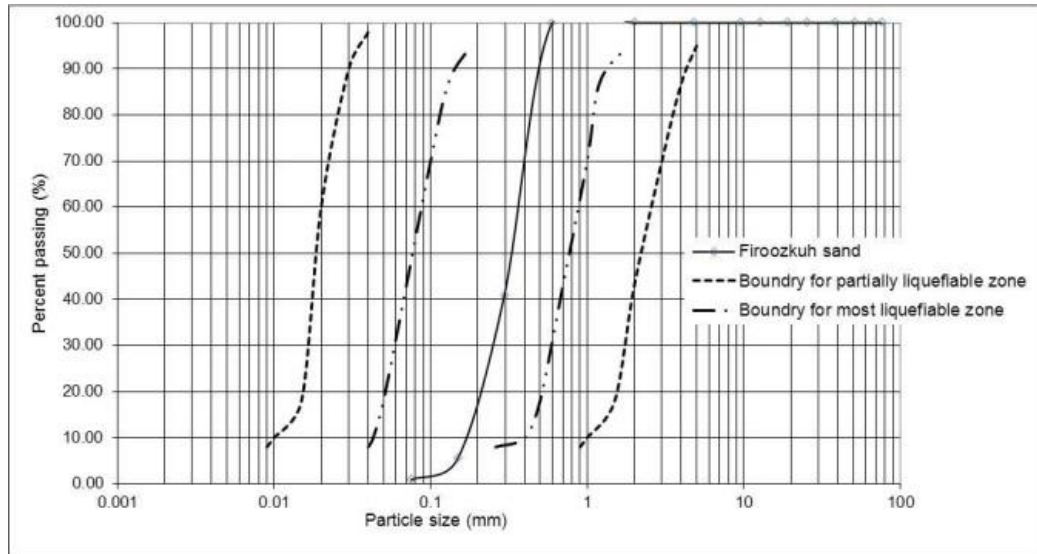
با وجود تحقیقات انجام شده در مورد روانگرایی ماسه، در زمینه شناخت اثر نامنظمی زلزله بر رفتار ماسه‌ها و مقایسه جامع در مورد پارامترهای مؤثر بر رفتار این نمونه‌ها تحت بارگذاری نامنظم مطالعه‌ای انجام نشده است. در این پژوهش، داده‌های واقعی زلزله بر نمونه‌های ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه در دستگاه سه محوری سیکلی اعمال شده و اثر تراکم بر رفتار روانگرایی ماسه‌های تحت بارگذاری نامنظم بررسی شده است.

۲- الگوسازی تجربی

۲-۱- مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها

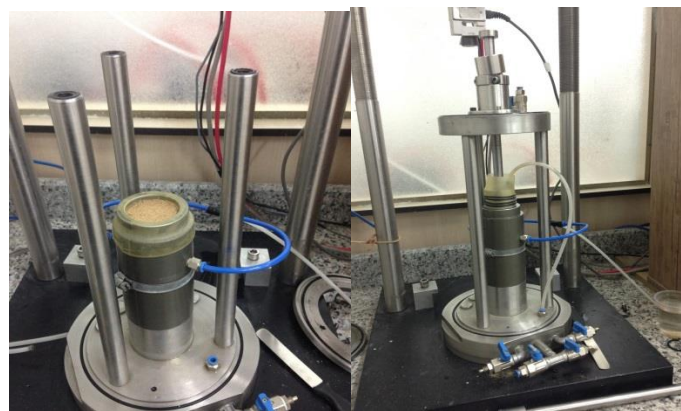
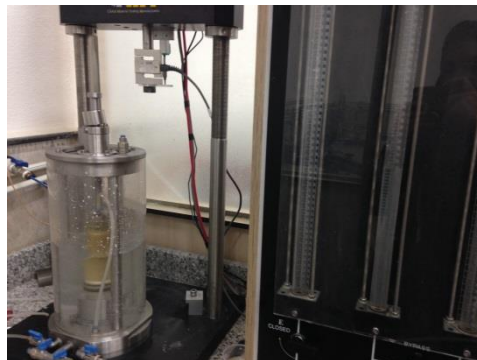
در این تحقیق، از ماسه سیلیسی شماره ۱۶۱ فیروزکوه در نمونه‌سازی استفاده شده است. این ماسه زرد رنگ است و دانه‌بندی یکنواختی دارد. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه ارائه شده است. همچنین منحنی دانه‌بندی این ماسه در کنار محدوده دانه‌بندی مستعد روانگرایی، در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، ماسه فیروزکوه دانه‌بندی یکنواختی دارد و برای آزمایش‌های روانگرایی مناسب است [۲۳-۲۰].





شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه ۱۶۱

Fig. 1. Grain size distribution of firozkuh sand



شکل ۲. مراحل مختلف نمونه سازی

Fig. 2. The preparation of specimen

جدول ۲. مشخصات داده‌های زلزله چی چی ۱۹۹۹ در ایستگاه‌های مختلف

Table 2. The specification of the records of the 1999 Chichi earthquake

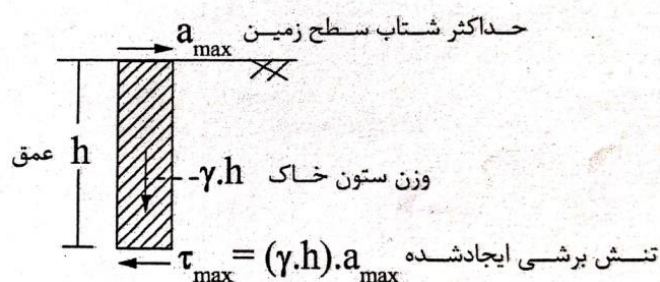
شکل الگو	نام ایستگاه ثبت	الگو
لرزشی	"CHY057"	۱
لرزشی	"CHY061"	۲
لرزشی	"CHY062"	۳
شوکی	"CHY025"	۴
شوکی	"TCU026"	۵
شوکی	"TCU076"	۶

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌های انجام شده تحت بارگذاری منظم سیکنلی

Table 3. The relation between acceleration and shear stress in specific depth

شماره آزمایش	پارامترهای آزمایش		
	$\sigma'_c$ (Kpa)	$D_r$ (%)	CSR
۱	۱۰۰	۳۰	۰/۱۵
۲	۱۰۰	۳۰	۰/۲۳
۳	۱۰۰	۳۰	۰/۲۵
۴	۱۰۰	۵۰	۰/۲
۵	۱۰۰	۵۰	۰/۲۵
۶	۱۰۰	۵۰	۰/۳
۷	۱۰۰	۷۰	۰/۲۵
۸	۱۰۰	۷۰	۰/۲۸
۹	۱۰۰	۷۰	۰/۳۲





شکل ۳. رابطه بین شتاب ثبت شده در سطح زمین و تنش برشی ایجاد شده در عمق

Fig. 3. The relation between acceleration and shear stress in specific depth

کلی از بحث فوق این است که فرم تاریخچه تنش برشی وارده بر المان خاک را می‌توان با فرم تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده سطح زمین، هم شکل در نظر گرفت و این فرم فقط به عمق خاک و تنش روی المان وابسته است. بدین ترتیب از تاریخچه زمانی شتاب سطح زمین، تاریخچه تنش برشی ناشی از حرکت زمین در عمق ۱۰ متری محاسبه شد. این شش الگوی تنش برشی حاصله از شتاب زلزله، در دستگاه سه محوری استفاده شده است. تاریخچه زمانی شتاب شوکی و لرزشی در اشکال ۴ و ۵ و مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده‌اند.

### ۲-۲-۳- آزمایش‌های انجام شده با بارگذاری سینوسی هارمونیک

به منظور ارزیابی و مقایسه نتایج و مطالعه روند اثرگذاری نامنظمی در بارگذاری، چند تست با بارگذاری یکنواخت سینوسی کنترل تنش انجام گرفته است.

آزمایش‌ها با بارگذاری سینوسی هارمونیک در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد و تنش تحکیمی انجام شده‌اند. هر چه نسبت تنش سیکلی (CSR) وارده به نمونه کوچک‌تر باشد، نمونه در تعداد سیکل‌های بالاتر روانگرا می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تنش سیکلی (CSR) لازم برای روانگرایی نمونه‌ای با تراکم نسبی و تنش تحکیمی ثابت در هر تعداد سیکل مبنا را به دست آورد. جدول ۳ جزئیات آزمایش‌های انجام شده تحت این نوع بارگذاری را نشان می‌دهد.

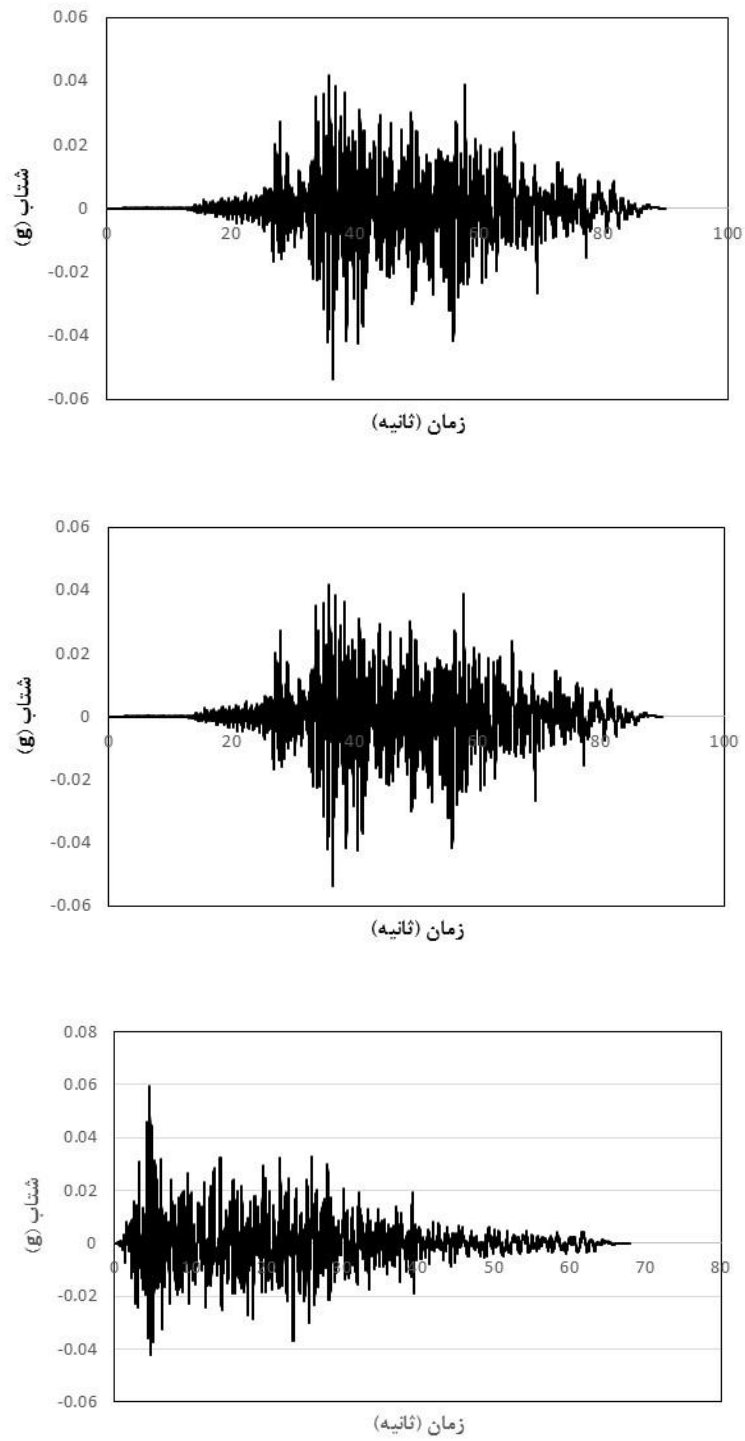
در شکل ۶ یکی از آزمایش‌ها رسم شده است. در شکل الف فرم سینوسی تنش انحرافی را مشاهده می‌کنید. شکل ب نحوه افزایش آب حفره‌ای باقی مانده را نشان می‌دهد.

بنابراین برای بررسی اثر نامنظمی در بارگذاری، سه الگوی تنش انحرافی شوکی و سه الگوی تنش انحرافی لرزشی انتخاب شده است. در نوع شوکی یا ناگهانی فقط ۱ یا ۲ پیک بزرگ وجود دارد که به صورت ناگهانی وارد می‌شود؛ ولی در نوع لرزشی چندین پیک متوالی با دامنه‌های نه چندان متفاوت وجود دارد. برای تشخیص نوع شکل تاریخچه زمانی شتاب روش‌های مختلفی وجود دارد.

در آسان‌ترین روش تشخیص، سمت هم علامت با شتاب ماکزیمم را در نظر می‌گیریم، اگر کمتر از سه پیک با دامنه بزرگ‌تر از ۶۰ درصد شتاب ماکزیمم در تاریخچه زمانی وجود داشته باشد به آن نوع شوکی یا ناگهانی، و برخلاف آن اگر بیش از سه پیک بیشتر از ۶۰ درصد دامنه شتاب ماکزیمم در تاریخچه زمانی وجود داشته باشد، به آن نوع لرزشی اطلاق می‌شود.

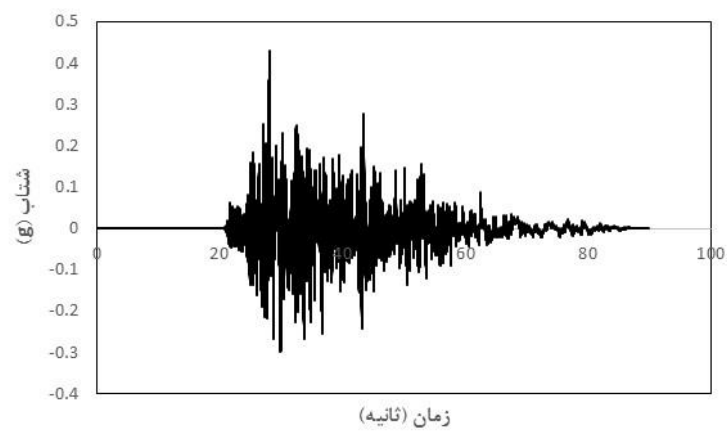
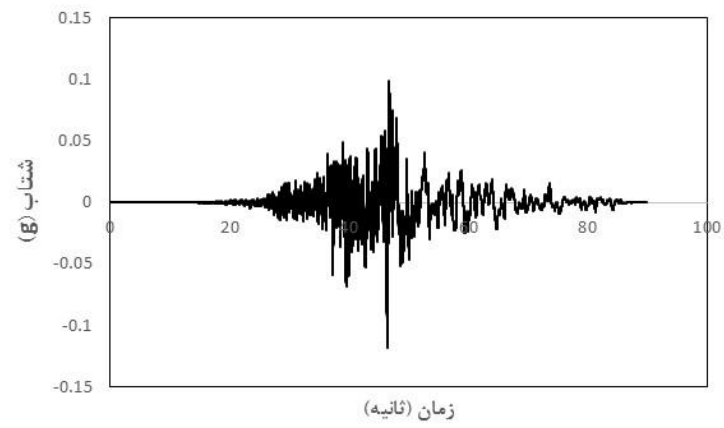
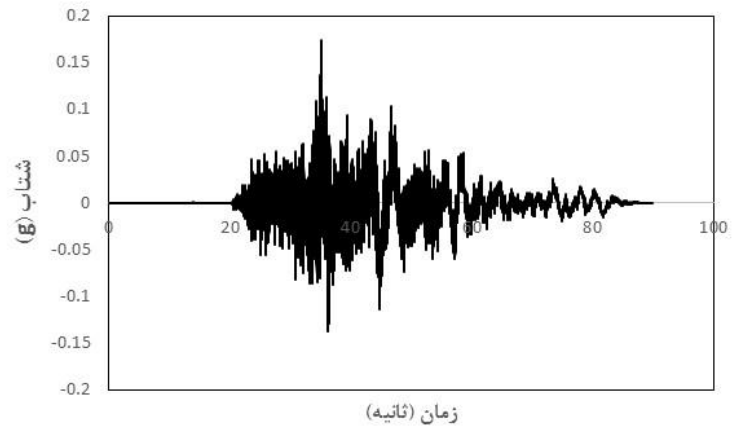
البته در فرم شتاب لرزشی، تعداد تغییر علامت شتاب، بیشتر از فرم شوکی یا ناگهانی است که همین منجر به تعداد بیشتر تغییر جهت تنش انحرافی در تاریخچه زمانی خواهد شد. به منظور انتخاب فرم‌های بارگذاری بهتر است از داده‌های مختلف یک زلزله واحد استفاده شود. از میان زلزله‌های موجود، داده‌های زلزله چی‌چی انتخاب شده است. علت این انتخاب تعدد رکوردهای ثبت شده روی سطح زمین در این زلزله است.

برای بارگذاری نامنظم، از شش تاریخچه شتاب سطح زمین به دست آمده از ایستگاه‌های مختلف استفاده شده است. به منظور تبدیل تاریخچه شتاب سطح زمین به تاریخچه تنش برشی، یک سری محاسبات با توجه به خطی بودن رابطه بین تنش برشی یک المان از خاک در عمق مشخص و شتاب سطح زمین انجام شده است. با استفاده از این مفهوم و شکل ۳ می‌توان گفت که در هر لحظه از زلزله تنش برشی وارده بر یک المان خاک، متناسب با تغییرات تاریخچه زمان شتاب در سطح زمین تغییر می‌کند. نتیجه



شکل ۴. تاریخچه زمانی شتاب فرم شماره ۱ و ۲ و ۳ از نوع لرزشی

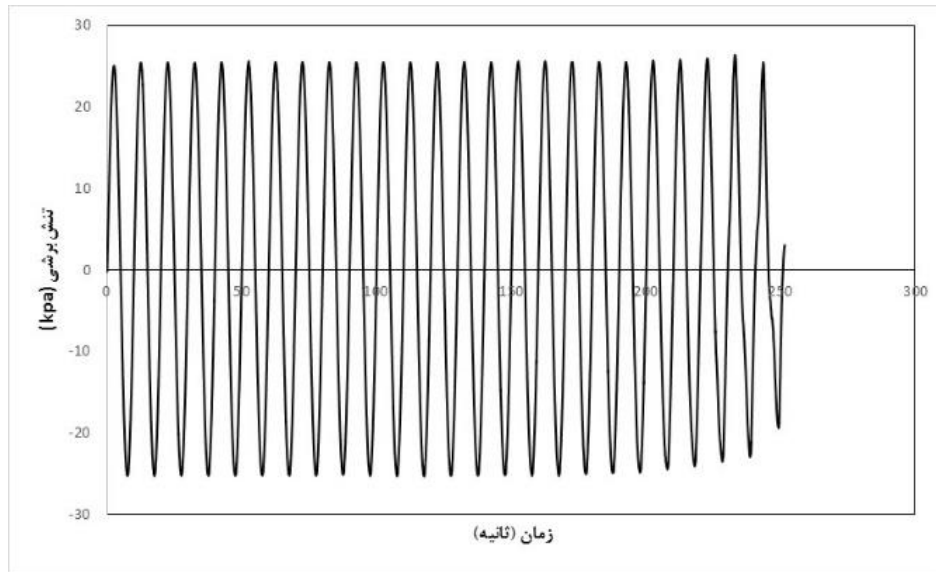
Fig. 4. The vibration waveform that records at stations 1, 2 and 3



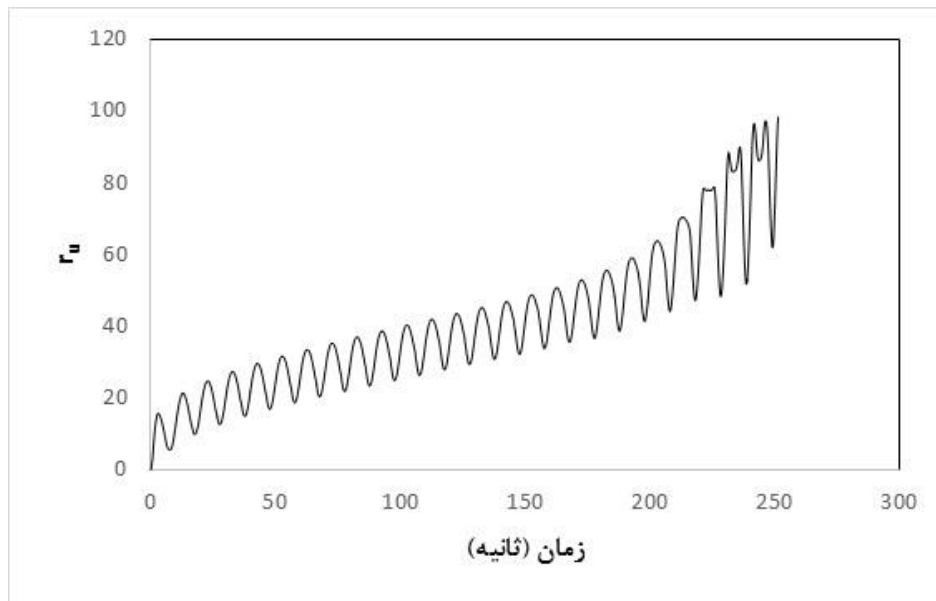
شکل ۵. تاریخچه زمانی شتاب فرم شماره ۴ و ۵ و ۶ از نوع شوکی

Fig. 5. The shock waveform that records at stations 4, 5 and 6

الف

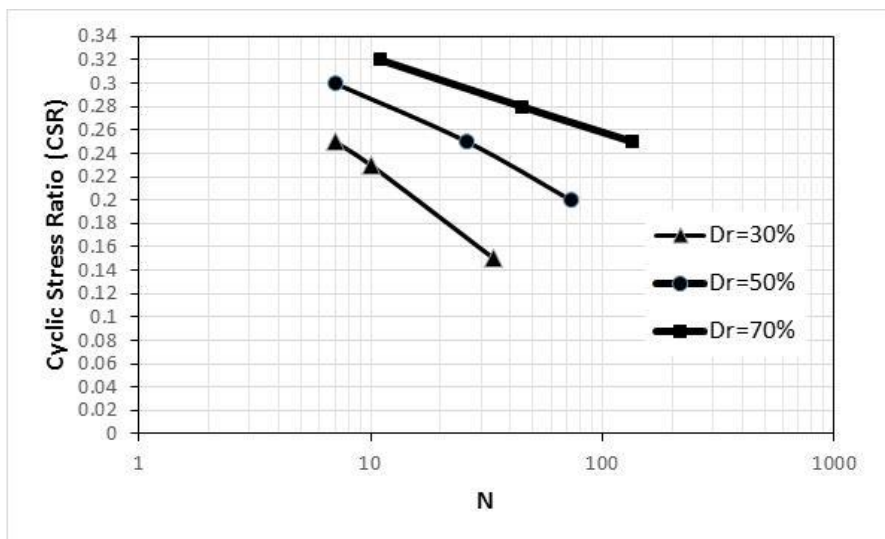


ب



شکل ۶. الف) فرم سینوسی تنش انحرافی و ب) نمودار افزایش آب حفره‌ای

Fig. 6. a) Sinusoidal waveform of deviatoric stress b) increasing excess pore pressure during loading



شکل ۷. آزمایش‌های بارگذاری منظم در سه درصد تراکم ۳۰ و ۵۰ و ۷۰

Fig. 7. Cyclic stress ratio CSR uniform for different relative densities 30, 50 and 70%

انحرافی حداکثر و نسبت فشار آب حفره‌ای باقی مانده ناشی از آن بارگذاری برداشت می‌گردد.

پس در تاریخچه زمانی که شکل پیچیده‌ای دارد بزرگ‌ترین تغییرات در جایی رخ داده که تنش ماکزیمم ( $q$ ) به نمونه اعمال شده بنابراین فشار آب حفره‌ای به تدریج در طول بارگذاری افزوده شده است؛ پس افزایش یا کاهش ناگهانی در اضافه فشار آب حفره‌ای در جایی رخ داده که تفاوت دامنه تنش زیاد بوده است. این فشار آب حفره‌ای اضافه شده در اثر بارگذاری، فشار آب حفره‌ای باقی مانده نام‌گذاری شده است ( $u'$ ) و نسبت فشار آب حفره‌ای باقی مانده به صورت  $r_u = \frac{u'}{\sigma'_c}$  و نسبت تنش انحرافی ماکزیمم  $CSR_{max} = \frac{q}{2\sigma'_c}$  تعریف شده است.

در گام بعدی، شدت بار وارده اندکی افزایش یافته ولی فرم آن ثابت نگاه داشته شده است. ذکر این نکته لازم است که آزمایش روی نمونه‌هایی با تراکم نسبی و روش ساخت مشابه انجام شده است. نمودار مربوط به نسبت فشار آب حفره‌ای باقی مانده در خصوص یک بارگذاری، در شکل ۸ آورده شده است.

در گام سوم، مقدار تنش بیشتر از مرحله قبل در نظر گرفته شده است. این روند تا رسیدن نمونه به روانگرایی تکرار شده است. شکل ۸ نمونه‌ای از روند انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. جدول ۴ در پیوست، جزئیات آزمایش‌های انجام شده تحت این نوع بارگذاری را نشان می‌دهد.

هر چه نسبت تنش وارد شده بیشتر باشد در نهایت میزان فشار آب

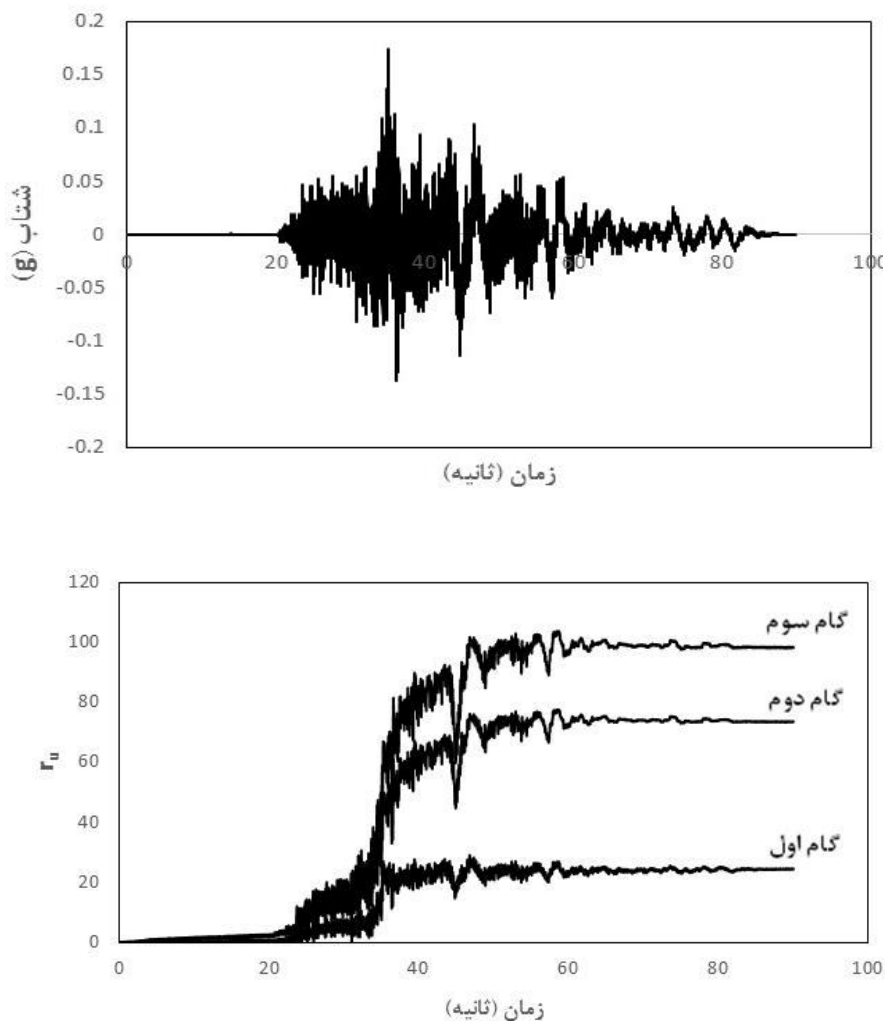
۲-۲-۴- نتایج حاصل از بارگذاری سینوسی هارمونیک در تراکم‌های مختلف

روند انجام این آزمایش‌ها به این صورت است که در هر آزمایش، نسبت تنش سیکلی (CSR) وارده را تغییر داده و در مقابل تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی رسم شده است. شکل ۷ تغییرات نسبت تنش سیکلی (CSR) را در برابر تعداد سیکل مسبب روانگرایی در درصد تراکم ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد نشان می‌دهد. گفتنی است محور N تعداد سیکل تا رسیدن به روانگرایی را نشان می‌دهد. هر چه نسبت تنش سیکلی (CSR) وارد به نمونه کوچک‌تر باشد، نمونه در تعداد سیکل‌های بیشتر روانگرا می‌شود.

با توجه به شکل ۷، با افزایش تراکم نسبی نمونه‌ها افزایش فشار آب حفره‌ای با نرخ کمتری رخ می‌دهد؛ بنابراین احتمال وقوع روانگرایی کاهش می‌یابد و روانگرایی در تنش بالاتری در خاک رخ می‌دهد و مشابه مطالعات گذشته، ماسه تحت اثر بارگذاری سیکلی یکنواخت بزرگ‌تر و مقدار تراکم نسبی کمتر، در تعداد سیکل کمتری روانگرایی در آن رخ می‌دهد.

۲-۲-۵- آزمایش‌های انجام شده با بارگذاری نامنظم و تصادفی

روند انجام آزمایش‌ها بدین صورت است که پس از اعمال تاریخچه تنش برشی به نمونه، با توجه به شکل ۸، فشار آب حفره‌ای تا قبل از تنش ماکزیمم، به آرامی افزایش یافته ولی در حوالی تنش ماکزیمم، مقدار آن ناگهان افزایش پیدا کرده و بدون تغییر باقی می‌ماند. در هر آزمایش، تنش



شکل ۸. نمونه‌ای از نتایج آزمایش با بارگذاری نامنظم برای نمونه تحت بار لرزشی با تراکم نسبی ۳۰ درصد

Fig. 8. Example of increase in  $r_u$  during vibration waveform at  $dr=30\%$

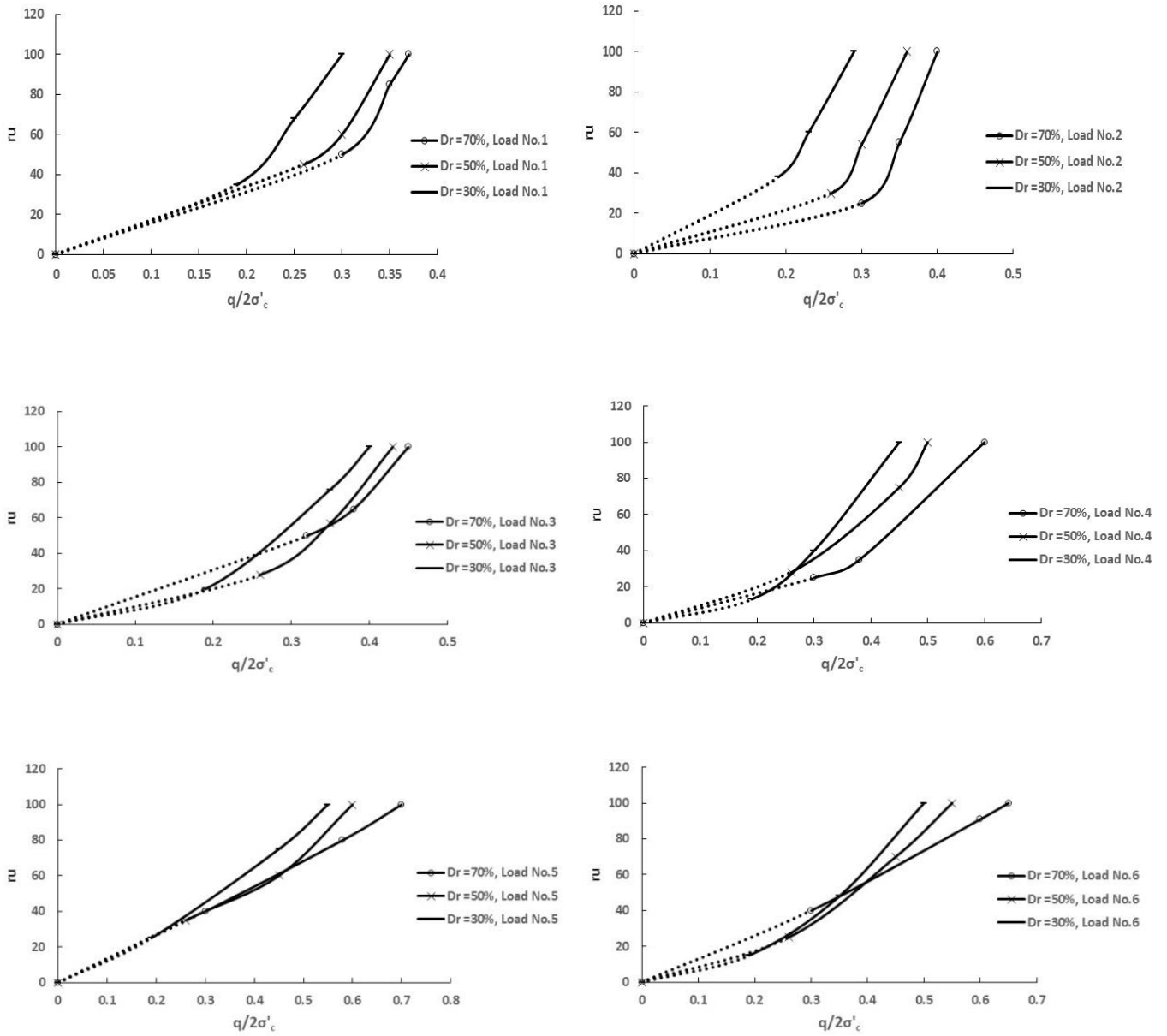
است. در خصوص بارگذاری لرزشی (۱ تا ۳) که اعمال شتاب حداکثر لرزشی به صورت یکنواخت‌تری است فشار آب حفره‌ای به تدریج با زمان افزایش یافته است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش درصد تراکم از ۳۰ به ۷۰، نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای برحسب تنش اعمالی به سمت راست هدایت می‌شود که این امر بیانگر آن است که با افزایش تراکم نسبی، در هر دو نوع بارگذاری لرزشی و شوکی به مقدار تنش بیشتری جهت روانگرا شدن نمونه نیاز است.

در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، در نواحی‌ای که با خطچین نشان داده شده‌اند،

حفره‌ای باقی‌مانده در انتهای آزمایش بیشتر است؛ بنابراین این افزایش فشار آب حفره‌ای در لحظه‌ای که روانگرایی رخ داده برابر با تنش همه جانبه مؤثر اولیه خواهد شد. برای سایر الگوهای بارگذاری زلزله، در تراکم نسبی‌های به ترتیب حدود ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد، این روند انجام شده است. نتایج فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده مربوط به الگوهای بارگذاری نامنظم مختلف در شکل ۹ آورده شده است.

در خصوص بارگذاری شوکی (۴ تا ۶)، افزایش ناگهانی فشار آب حفره‌ای در لحظه‌ای که شتاب به بیشترین مقدار خود رسیده، رخ داده است؛ زیرا در داده‌های شوکی حداکثر شتاب لرزه‌ای به صورت ناگهانی به نمونه وارد شده

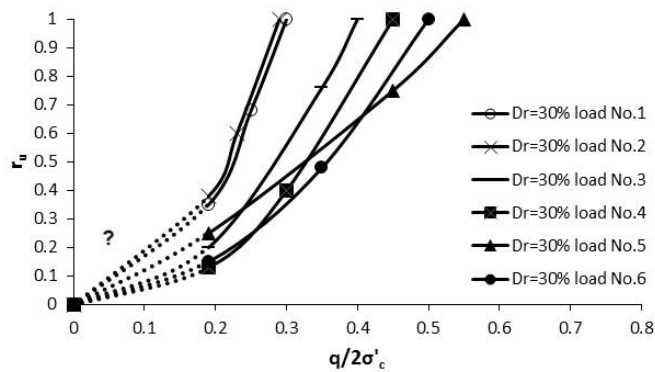


شکل ۹. نتایج آزمایش با بارگذاری نامنظم لرزشی (۱ تا ۳) و شوکی (۴ تا ۶)، در تراکم‌های مختلف

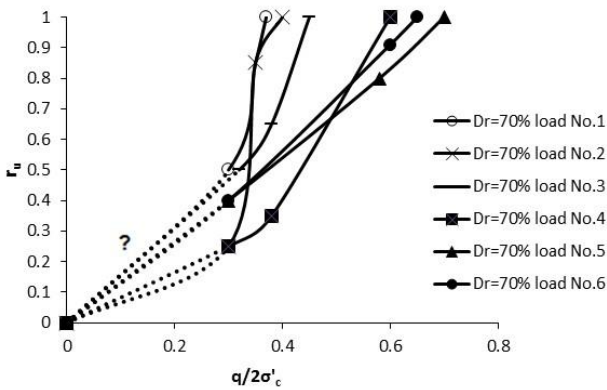
Fig. 9. The variation of pore-water pressure values of all irregular tests (1-3) vibration and (4-6) shock waveform at different densities



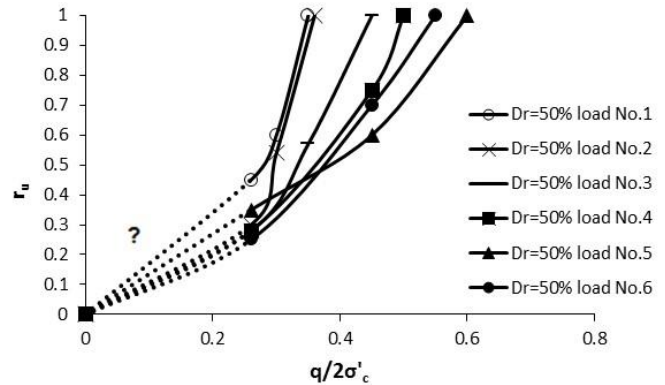
(الف)



(ج)



(ب)



شکل ۱۰. نمودار فشار آب حفره‌ای در تراکم‌های یکسان برای بارگذاری (۱، ۲ و ۳ لرزشی ۴، ۵ و ۶ شوکی به ترتیب الف)  $Dr=30\%$  (ب)  $Dr=50\%$  (ج)  $Dr=70\%$

Fig. 10. Seismic test results at same relative densities for tests 1,2,3 vibration and 4,5,6 shock wave-form a)  $Dr=30\%$  b)  $Dr=50\%$  and c)  $Dr=70\%$

فشار آب حفره‌ای نیز نسبت به آزمایش قبل بیشتر شده است. در شکل ۱۰ نسبت فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده ( $U_{II}$ ) در مقابل نسبت تنش انحرافی ماکزیمم برای هر شش الگوی بارگذاری در تراکم‌های مختلف ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد ترسیم شده است.

با توجه به شکل ۱۰ نمونه‌های تحت بارگذاری از نوع لرزشی، پتانسیل روانگرایی بیشتری نسبت به بارگذاری شوکی دارند؛ در حالی که در بارگذاری

بارگذاری اعمال نشده است؛ بنابراین روند احتمالی امتداد نمودار تا مبدأ به صورت خط‌چین نشان داده شده است.

۲-۲-۶- نتایج حاصل از بارگذاری تصادفی زلزله در تراکم‌های مختلف در این مرحله نیز در هر آزمایش نسبت به آزمایش قبل، تنش برشی با حفظ شکل تاریخی‌ه زمانی به تدریج افزایش یافته است؛ بنابراین افزایش

شوکی ۴، ۵ و ۶ هر کدام برابر ۳ بوده است؛ بنابراین تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی رکوردهای لرزشی به مراتب بیشتر از رکوردهای شوکی است. پس نمونه‌های تحت این نوع بارگذاری مقدار PGA کمتری به منظور روانگرا کردن خاک نیاز داشته است.

همچنین مدت زمان مؤثر برای کلیه رکوردهای شوکی و لرزشی ارزیابی شده است. در خصوص رکوردهای لرزشی ۱، ۲ و ۳ این مقدار به ترتیب برابر ۳۹، ۳۸ و ۳۴ ثانیه و در خصوص رکوردهای شوکی ۴، ۵ و ۶ برابر ۳۱/۵، ۲۴/۷ و ۲۸ ثانیه می‌باشد. بنابراین با افزایش مدت زمان مؤثر رکورد در یک PGA یکسان رکوردهای لرزشی پتانسیل روانگرایی بیشتری نسبت به رکوردهای شوکی دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نمونه‌ها از ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه ساخته شده و با تنش تحکیمی ۱۰۰ کیلوپاسکال و با سه دانسیته نسبی متفاوت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد در دستگاه سه محوری قرار داده شده و تحت حدود ۶ رکورد متفاوت زمین‌لرزه قرار گرفته‌اند. در کل، تعداد ۶۳ آزمایش سه محوری کنترل تنش، تحت بارگذاری نامنظم و سیکلی روی نمونه‌هایی با تراکم ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد انجام شده است. بدین ترتیب رفتار روانگرایی ماسه تحت تراکم‌های مختلف تحت اثر بارگذاری زلزله به صورت دقیق‌تری بررسی می‌گردد بنابراین این تحقیق می‌تواند در جهت تخمین دقیق‌تر رفتار ماسه تحت اثر زلزله مؤثر باشد.

رفتار خاک تحت بارگذاری تصادفی زلزله وابسته به مشخصات شتاب وارده به خاک است. در این تحقیق، شکل شتاب زلزله به صورت تنش انحرافی به نمونه‌ها وارد شده است؛ بنابراین شکل ظاهری بارگذاری‌ها بررسی شده است. بارهای ناشی از زلزله با توجه به تعداد پیک‌های مؤثر و تعداد تغییر جهت در تنش انحرافی، به دو نوع شوکی و لرزشی تقسیم شده‌اند. به منظور مقایسه رفتار خاک تحت بارگذاری شوکی و لرزشی، با توجه به شکل ۱۰، در لحظه وقوع روانگرایی، بارگذاری شوکی نسبت تنش بیشتری نسبت به فرم بارگذاری لرزشی دارد.

در خصوص رکوردهای شوکی، در لحظه‌ای که شتاب به بیشترین مقدار خود می‌رسد، افزایش ناگهانی فشار آب حفره‌ای رخ داده است؛ بنابراین در رکوردهای شوکی حداکثر شتاب لرزه‌ای به صورت ناگهانی به نمونه وارد شده است. در خصوص بارگذاری لرزشی، فشار آب حفره‌ای به تدریج با زمان افزایش یافته است.

شوکی نسبت تنش بیشتری در لحظه وقوع روانگرایی نسبت به فرم بارگذاری لرزشی رخ داده است.

همچنین با افزایش تراکم نسبی نمونه‌ها مطابق مطالعات پیشین [۱۴]، افزایش فشار آب حفره‌ای با نرخ کمتری رخ داده؛ بنابراین احتمال وقوع روانگرایی کاهش یافته و روانگرایی در تنش بالاتری در خاک رخ داده است. در نهایت، ماسه تحت اثر بارگذاری لرزشی و مقدار تراکم نسبی کمتر، بیشترین پتانسیل روانگرایی را دارد.

#### ۳- نتایج و بحث

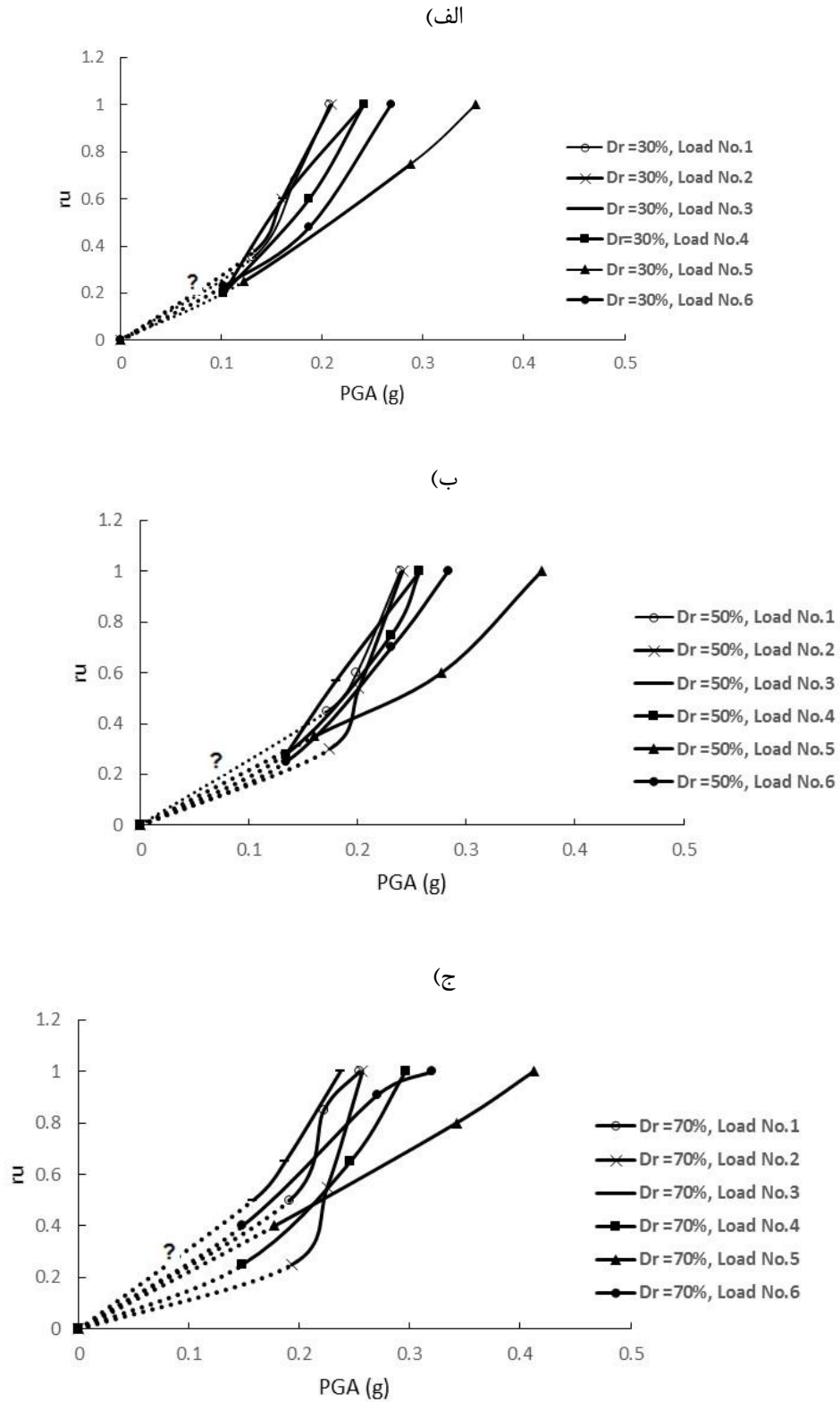
در این تحقیق، تعداد ۶ رکورد مختلف ثبت شده از زلزله چی چی تایوان در ایستگاه‌های متفاوت در نظر گرفته شده است. این رکوردها با توجه به شکل ظاهری به دو دسته شوکی و لرزشی تقسیم شده‌اند. بنابراین رکوردهای ۱ تا ۳ به عنوان رکوردهای لرزشی، و رکوردهای ۴ تا ۶ به عنوان رکوردهای شوکی در نظر گرفته شده‌اند. آزمایش سه محوری در شرایط کنترل تنش، روی نمونه‌هایی با دانسیته ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد انجام شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار خاک تحت بارگذاری‌های شوکی و لرزشی در تراکم‌های مختلف خاک، نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در بارگذاری غیریکنواخت در PGA های مختلف تا رسیدن به روانگرایی خاک در نمونه‌ها در سه تراکم ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد ترسیم شده است. نتایج آزمایش‌ها در شکل ۱۱ آورده شده است.

با مقایسه نمودارهای شکل ۱۱، با افزایش تراکم نسبی نمونه‌ها مقدار PGA رکورد به منظور وقوع روانگرایی افزایش یافته است. نمونه‌ها تحت تراکم نسبی ۷۰ درصد حدوداً ۲۰ درصد مقادیر PGA بالاتری به منظور وقوع روانگرایی نیاز داشته است.

همچنین در خصوص کلیه رکوردهای شوکی و لرزشی صرف نظر از تراکم نمونه، اختلاف PGA برای ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای تا مقدار ۰/۲ بسیار کم است و از حدود اضافه فشار آب حفره‌ای مقدار بیشتر از ۰/۳، در رکوردهای لرزشی مقدار PGA کمتری به منظور وقوع روانگرایی در نمونه نسبت به رکوردهای شوکی نیاز بوده است.

بنابراین به منظور بررسی رفتار خاک تحت بارگذاری شوکی و لرزشی به صورت خاص‌تر به بررسی تعداد سیکل‌های موجود در هر رکورد پرداخته شده است. بدین ترتیب، در هر رکورد تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی تا میزان  $PGA \times 0/65$  به دست آمده است. تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی در بارگذاری لرزشی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۱۳، ۹ و ۶ و در بارگذاری



شکل ۱۱. نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها در PGA های بارگذاری مختلف برای بارگذاری ۱، ۲ و ۳ لرزشی ۴، ۵ و ۶ شوکی به ترتیب الف)  $Dr = 30\%$  ب)  $Dr = 50\%$  ج)  $Dr = 70\%$

Fig. 11. The variation of excess pore pressure at different PGA for tests 1,2 and 3 vibration and 4,5 and 6 shock waveform a)  $Dr=30\%$  b)  $Dr=50\%$  and  $Dr=70\%$

- [4] A. Casagrande, Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, J. Boston Society of Civil Engineers, 23(1) (1936) 13-32.
- [5] B. Seed, K.L. Lee, Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 92(ASCE# 4972 Proceeding) (1966).
- [6] G. Castro, Liquefaction of sands, Harvard soil mechanics series, Harvard Univ., 81 (1969).
- [7] M. Cubrinovski, J.D. Bray, M. Taylor, S. Giorgini, B. Bradley, L. Wotherspoon, J. Zupan, Soil liquefaction effects in the central business district during the February 2011 Christchurch earthquake, Seismological Research Letters, 82(6) (2011) 893-904.
- [8] S. Bhattacharya, M. Hyodo, K. Goda, T. Tazoh, C. Taylor, Liquefaction of soil in the Tokyo Bay area from the 2011 Tohoku (Japan) earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(11) (2011) 1618-1628.
- [9] S. Sağlam, S. Bakir, Models for pore pressure response of low plastic fines subjected to repeated loads, Journal of Earthquake Engineering, 22(6) (2018) 1027-1041.
- [10] W.W. Sim, A. Aghakouchak, R.J. Jardine, Cyclic triaxial tests to aid offshore pile analysis and design, (2013).
- [11] Z. Yang, X. Li, J. Yang, Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil, Geotechnique, (2007).
- [12] J. Berrill, R. Davis, Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model, Soils and Foundations, 25(2) (1985) 106-118.
- [13] J.D. Bray, R.B. Sancio, Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 132(9) (2006) 1165-1177.
- [14] S.S. Kumar, A. Dey, A.M. Krishna, Response of saturated cohesionless soil subjected to irregular seismic excitations, Natural Hazards, 93(1) (2018) 509-529.
- [15] K. Pan, Z. Yang, Evaluation of the liquefaction potential of sand under random loading conditions: Equivalent approach versus energy-based method, Journal of Earthquake Engineering, (2017) 1-25.
- [16] K. Pan, Z. Yang, Effects of initial static shear on cyclic

همچنین در بارگذاری سیکلی یکنواخت، با افزایش تراکم نسبی نمونه‌ها افزایش فشار آب حفره‌ای با نرخ کمتری رخ می‌دهد؛ بنابراین احتمال وقوع روانگرایی کاهش می‌یابد و روانگرایی در دامنه تنش بالاتری رخ می‌دهد. مشابه مطالعات گذشته [۲۳ و ۲۲]، ماسه تحت اثر بارگذاری سیکلی یکنواخت بزرگ‌تر و مقدار تراکم نسبی کمتر، بیشترین استعداد روانگرایی را دارد. مطابق مطالعات پیشین [۱۵ و ۱۴]، در بارگذاری‌های غیریکنواخت سیکلی، افزایش ناگهانی در اضافه فشار آب حفره‌ای در جایی رخ می‌دهد که بارگذاری تنش بیشترین مقدار خود بدون در نظر گرفتن دانسیته نسبی را دارد. در این نوع بارگذاری سیکلی افزایش یا کاهش ناگهانی در اضافه فشار آب حفره‌ای در جایی رخ می‌دهد که تفاوت دامنه تنش زیاد است. نمونه‌های تحت بارگذاری از نوع لرزشی، مقاومت کمتری در برابر وقوع روانگرایی از خود نشان داده‌اند؛ بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌ها ماسه تحت اثر بارگذاری لرزشی و مقدار تراکم نسبی کمتر، بیشترین استعداد روانگرایی را دارد. با توجه به کم بودن تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی تا میزان  $PGA \times 0.65$  رکوردهای شوکی نسبت به لرزشی، نمونه‌های تحت این نوع بارگذاری مقدار PGA بیشتری به منظور روانگرا کردن خاک نیاز داشته‌اند. بنابراین از حدود اضافه فشار آب حفره‌ای مقدار بیشتر از  $0.3$ ، در رکوردهای شوکی مقدار PGA بیشتری به منظور وقوع روانگرایی در نمونه نسبت به رکوردهای لرزشی نیاز بوده است. همچنین در خصوص رکوردهای لرزشی ۱، ۲ و ۳ مدت زمان مؤثر رکورد، به ترتیب برابر ۳۹، ۳۸ و ۳۴ ثانیه و در خصوص رکوردهای شوکی ۴، ۵ و ۶ برابر ۳۱/۵، ۲۴/۷ و ۲۸ ثانیه می‌باشد. بنابراین با افزایش مدت زمان مؤثر رکورد در یک PGA یکسان رکوردهای لرزشی پتانسیل روانگرایی بیشتری نسبت به رکوردهای شوکی دارند.

## منابع

- [1] K.H. Andersen, Cyclic soil parameters for offshore foundation design, Frontiers in offshore geotechnics III, 5 (2015).
- [2] Y. Cai, L. Guo, R. Jardine, Z. Yang, J. Wang, Stress-strain response of soft clay to traffic loading, (2016).
- [3] L. Guo, Y. Cai, R.J. Jardine, Z. Yang, J. Wang, Undrained behaviour of intact soft clay under cyclic paths that match vehicle loading conditions, Canadian Geotechnical Journal, 55(1) (2017) 90-106.

- TAKAHASHI, Cyclic strength characteristics of tailings materials, *Soils and Foundations*, 20(4) (1980) 127-142.
- [22] H. Tsuchida, Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits, in: *Abstract of the seminar in the Port and Harbor Research Institute*, 1970, pp. 31-333.
- [23] V. Xenaki, G. Athanasopoulos, Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(3) (2003) 1-12.
- [24] R. Ladd, Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical Testing Journal*, 1(1) (1978) 16-23.
- [25] K. Ishihara, F. Tatsuoka, S. Yasuda, Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses, *Soils and Foundations*, 15(1) (1975) 29-44.
- resistance and pore pressure generation of saturated sand, *Acta Geotechnica*, 13(2) (2018) 473-487.
- [17] C. Polito, R.A. Green, E. Dillon, C. Sohn, Effect of load shape on relationship between dissipated energy and residual excess pore pressure generation in cyclic triaxial tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 50(11) (2013) 1118-1128.
- [18] J. Qiu, X. Wang, J. Lai, Q. Zhang, J. Wang, Response characteristics and preventions for seismic subsidence of loess in Northwest China, *Natural Hazards*, 92(3) (2018) 1909-1935.
- [19] E. Rascol, *Cyclic properties of sand*, EPFL, 2009.
- [20] H. Bahadori, A. GHALANDARZADEH, I. Towhata, Effect of non plastic silt on the anisotropic behavior of sand, *Soils and Foundations*, 48(4) (2008) 531-545.
- [21] K. ISHIHARA, J. TRoNcoso, Y. KAwAsE, Y.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Katebi, N. Ganjian, M. Derakhshandi, A. Ghalandarzadeh, *Experimental investigation of the effect of relative densities and type of loading on sand liquefaction under irregular earthquake loading*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 3-20.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16278.6175



جدول ۴. مشخصات آزمایش‌های انجام شده تحت بارگذاری نامنظم (ادامه دارد)

Table 4. The conditions of all irregular tests performed in this paper(Continude)

آزمایش	پارامترهای آزمایش			
	نوع بارگذاری	$D_r$ (%)	$\sigma_{max}/\sigma'_c$	$\sigma'_c$ (Kpa)
۱-۳۰-۱	لرزشی	۳۰	۰/۱۹	۱۰۰
۱-۳۰-۲	لرزشی	۳۰	۰/۲۵	۱۰۰
۱-۳۰-۳	لرزشی	۳۰	۰/۲۸	۱۰۰
۲-۳۰-۱	لرزشی	۳۰	۰/۱۹	۱۰۰
۲-۳۰-۲	لرزشی	۳۰	۰/۲۳	۱۰۰
۲-۳۰-۳	لرزشی	۳۰	۰/۲۸	۱۰۰
۳-۳۰-۱	لرزشی	۳۰	۰/۱۹	۱۰۰
۳-۳۰-۲	لرزشی	۳۰	۰/۳	۱۰۰
۳-۳۰-۳	لرزشی	۳۰	۰/۳۸	۱۰۰
۴-۳۰-۱	شوکی	۳۰	۰/۱۹	۱۰۰
۴-۳۰-۲	شوکی	۳۰	۰/۳۵	۱۰۰
۴-۳۰-۳	شوکی	۳۰	۰/۴۳	۱۰۰
۵-۳۰-۱	شوکی	۳۰	۰/۱۹	۱۰۰
۵-۳۰-۲	شوکی	۳۰	۰/۴۵	۱۰۰
۵-۳۰-۳	شوکی	۳۰	۰/۵۲	۱۰۰
۶-۳۰-۱	شوکی	۳۰	۰/۱۹	۱۰۰
۶-۳۰-۲	شوکی	۳۰	۰/۳۵	۱۰۰
۶-۳۰-۳	شوکی	۳۰	۰/۴۷	۱۰۰
۱-۵۰-۱	لرزشی	۵۰	۰/۲۶	۱۰۰
۱-۵۰-۲	لرزشی	۵۰	۰/۳	۱۰۰
۱-۵۰-۳	لرزشی	۵۰	۰/۳۴	۱۰۰
۲-۵۰-۱	لرزشی	۵۰	۰/۲۶	۱۰۰
۲-۵۰-۲	لرزشی	۵۰	۰/۳	۱۰۰
۲-۵۰-۳	لرزشی	۵۰	۰/۳۴	۱۰۰
۳-۵۰-۱	لرزشی	۵۰	۰/۲۶	۱۰۰
۳-۵۰-۲	لرزشی	۵۰	۰/۳۵	۱۰۰
۳-۵۰-۳	لرزشی	۵۰	۰/۴۳	۱۰۰
۴-۵۰-۱	شوکی	۵۰	۰/۲۶	۱۰۰
۴-۵۰-۲	شوکی	۵۰	۰/۴۵	۱۰۰

جدول ۴. مشخصات آزمایش‌های انجام شده تحت بارگذاری نامنظم

Table 4. The conditions of all irregular tests performed in this paper

۴-۵۰-۳	شوکی	۵۰	۰/۵	۱۰۰
۵-۵۰-۱	شوکی	۵۰	۰/۲۶	۱۰۰
۵-۵۰-۲	شوکی	۵۰	۰/۴۵	۱۰۰
۵-۵۰-۳	شوکی	۵۰	۰/۵۷	۱۰۰
۶-۵۰-۱	شوکی	۵۰	۰/۲۶	۱۰۰
۶-۵۰-۲	شوکی	۵۰	۰/۴۵	۱۰۰
۶-۵۰-۳	شوکی	۵۰	۰/۵۲	۱۰۰
۱-۷۰-۱	لرزشی	۷۰	۰/۳	۱۰۰
۱-۷۰-۲	لرزشی	۷۰	۰/۳۵	۱۰۰
۱-۷۰-۳	لرزشی	۷۰	۰/۴	۱۰۰
۲-۷۰-۱	لرزشی	۷۰	۰/۳	۱۰۰
۲-۷۰-۲	لرزشی	۷۰	۰/۳۵	۱۰۰
۲-۷۰-۳	لرزشی	۷۰	۰/۳۸	۱۰۰
۳-۷۰-۱	لرزشی	۷۰	۰/۳۲	۱۰۰
۳-۷۰-۲	لرزشی	۷۰	۰/۳۸	۱۰۰
۳-۷۰-۳	لرزشی	۷۰	۰/۴۵	۱۰۰
۴-۷۰-۱	شوکی	۷۰	۰/۳	۱۰۰
۴-۷۰-۲	شوکی	۷۰	۰/۵	۱۰۰
۴-۷۰-۳	شوکی	۷۰	۰/۵۸	۱۰۰
۵-۷۰-۱	شوکی	۷۰	۰/۳	۱۰۰
۵-۷۰-۲	شوکی	۷۰	۰/۵۸	۱۰۰
۵-۷۰-۳	شوکی	۷۰	۰/۷	۱۰۰
۶-۷۰-۱	شوکی	۷۰	۰/۳	۱۰۰
۶-۷۰-۲	شوکی	۷۰	۰/۶	۱۰۰
۶-۷۰-۳	شوکی	۷۰	۰/۶۴	۱۰۰