



## Experimental Study on Vibration Transfer from Shaking Table to the Surrounding Environment

F. Nabati, M. Ziyaefar\*

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

**ABSTRACT:** Interaction study on shaking tables is considered necessary for such devices to guarantee their operational accuracy in vibration simulation. In such studies, accurate estimation of dynamic characteristics of the foundation of shaking tables and their neighboring soil is usually required. In this regard, experimental studies on the soil the foundation after its completion are recommended to reduce uncertainties in the operation of the table in future. In this work, a forced vibration study on the foundation of a six degrees of freedom shaking table (to be operated by the international institute of earthquake engineering and seismology) has been performed. In addition to the measured excitation data collected for determination of dynamic characteristics of the foundation, that part of the vibration that transfers to the soil (at different distances from the foundation) was also evaluated. Based on the results of such measurements, dynamic characteristics of the shaking table foundation using a single degree of freedom model are estimated. Later the magnitude and the frequency contents of the vibration that was transferred to the soil in distances up to 25 meters from the edge of the foundation (in both vertical and horizontal directions) were also determined. According to the results of this study, the level of transferred acceleration to the soil reduces, rapidly, by distance from the foundation. However, the results of these measurements indicate that acceleration magnitude in the range of high-frequency vibration remains untouched.

### Review History:

Received: 7/9/2017

Revised: 8/14/2017

Accepted: 2/17/2018

Available Online: 4/22/2018

### Keywords:

Shaking table

Soil-structure interaction

Vibration transfer

Soil dynamic parameters

## 1. INTRODUCTION

Accuracy in experimental studies using shaking table devices depends on a variety of different parameters. Among those, determination of dynamic characteristics the foundation for such tables is considered quite important. On the other hand, operating such large-scale vibrating systems may cause undesirable vibrational effects on the surrounding environment. To address such problems, performing a series of forced vibration tests on the foundation is usually recommended [1].

In this work, a preliminary forced vibration test on the foundation of a moderate size shaking table system (to be operated in IIEES) has been performed to find its dynamic characteristics and to understand the mechanism of vibration transfer from the system to its neighborhood [2] [3].

## 2. FORCE VIBRATION TEST

The Foundation of the table is in the form of a square in plan with a dimension of 15×15 and a depth of 9 meters. The total weight of the foundation is about 40000 kN. Forced vibration of the foundation has been carried out using an electro-mechanical shaker with the maximum capacity of 30 kN in the range of 0-35 Hz excitation frequency. This device was installed in the middle of the foundation in a cavity with

a depth of 3 meters below the top surface of the foundation (shown in Fig. 1).

In the test, 12 one-dimensional accelerometers at 4 different locations (shown in the figure) are used to record the movement of the foundation and its surrounding area. The sensors are arranged in both vertical and horizontal directions to find dynamical aspects of the system in all directions.

Three series of forced vibration tests based on sweeping

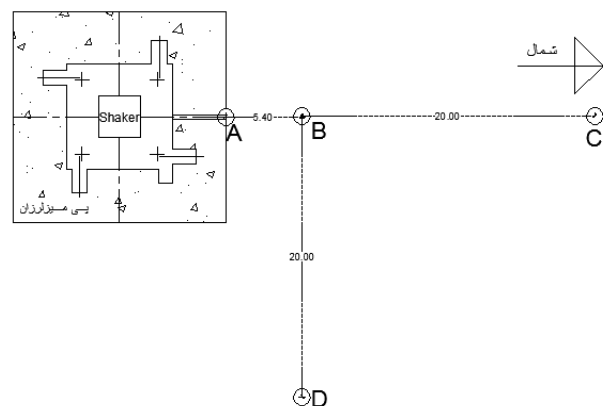
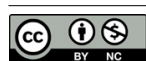
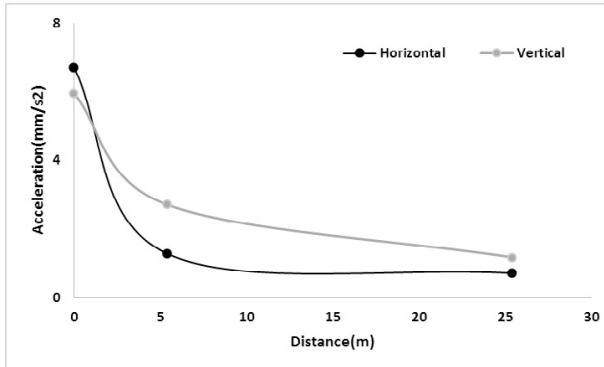


Fig. 1. Acceleration ratio at distance 25/4 meter from foundation edge.



**Table 1. Soil-foundation dynamic parameters.**

Vibration	Damping ratio (%)	Stiffness (N. mm)	Natural frequency
Horizontal	10	$1/4 \times 10^7$	9.4
vertical	20	$2/47 \times 10^7$	12.1



**Fig. 2. Variation of acceleration amplitude according to distance**

frequency technique, using vibration excitation at a very slow frequency increment rate, have been performed on the foundation. The excitation range of frequency was limited to 0-20Hz in both vertical and horizontal directions due to a mechanical problem that was discovered in the shaker during operation. The frequency increment step size was 0.2 Hz and in each step, the excitation continues for 20 seconds to ensure a stabilized steady-state forced vibration status for the foundation system.

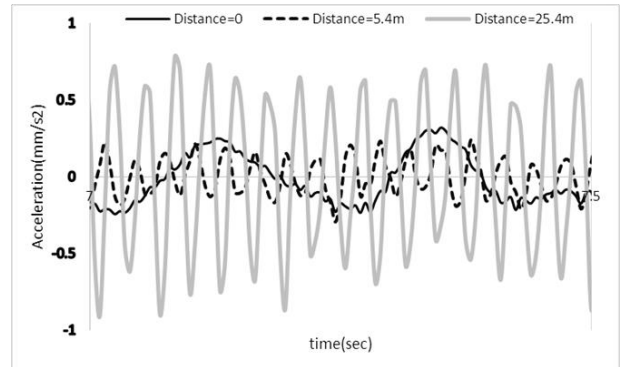
**3. DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE FOUNDATION**

Using a single degree of freedom model for the foundation, the steady-state maximum acceleration response of the system on top of the foundation subjected to harmonic loading can be written as follows [4] [5]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \cdot \sin(\omega t) \tag{1}$$

In this equation  $\omega$  is the natural frequency of the foundation, while  $\omega$  and  $P_0$  are excitation frequency and its amplitude, respectively. In above relationship  $c$  and  $k$  are stiffness and damping ratio of the foundation located on the ground. Having known the values of  $m$ ,  $P_0$ , and  $\omega$  the above equation can be solved to find approximate values for the two unknown  $c$  and  $k$  using trial and error for each frequency increment in the test result.

Later, using this technique, the dominant values for  $c$  and  $k$  for both vertical and horizontal direction have been determined to serve for the whole range of frequency excitation (tabulated in Table 1).



**Fig. 3. Changes in the accelerated amplitude range at a steady acceleration of 4.5 Hz for different distances.**

**4. VIBRATION TRANSFER TO THE SURROUNDING ENVIRONMENT**

The main objective of this study was to understand the mechanism of vibration transfer from the foundation to its neighborhood. Acceleration records on the ground at distances of 5.4 and 25.4 meters, far from the tip of the foundation during forced vibration tests, are used for such investigation. According to the results of this study, if the excitation frequency matches the natural frequency of the foundation, the amplitude of acceleration on the ground rapidly decreases by distance from the foundation (shown in Fig. 2).

However, the amplitude of recorded acceleration in other excitation frequencies follows a different trend in terms of distance. According to these results, in distances far from the foundation, acceleration responses are not represented by a simple trend in terms of distance. In fact, as shown in Fig. 3 acceleration responses are mostly dominated by high-frequency components at far distances due to refraction and reflection of body waves on a buried foundation at nearby installations in the area.

**5. CONCLUSIONS**

In this article a force vibration study on the foundation of IIEES shaking table have been performed. According to measured data dynamic parameters of foundation has been calculated and amplitude and frequency contents of transferred vibration was to its neighborhood determined. Study shows that level of transferred acceleration was reduced but its frequency contents does not have a specific pattern.

**REFERENCES**

[1] Luco, J. E, Ozcelik, O., Conte, J. P., & Mendoza, L. “Experimental study of the dynamic interaction between the foundation of the NEES/UCSD Shake Table and the surrounding soil: Reaction block response.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31.7 (2011): 954-953.

[2] Soltani, Behroz. *Soil-structure interaction in massive foundations*. M.S. Thesis. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2015.

[3] Nabati, Farzaneh. Sensitivity analysis of a shaking table subjected to interaction with surrounding environment. M.S. Thesis. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2015.

[4] Wolf, John P. Dynamic Soil-Structure Interaction. Vol. 1. Englewood: Prentice-Hall, 1985.

[5] Clough, R. W., and Penzien, J., Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw-Hill. Inc., New York, NY, 1993.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*F. Nabati , M. Ziyaefar, Experimental Study on Vibration Transfer from Shaking Table to the Surrounding Environment, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 95-98.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2018.13126.5331](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13126.5331)







## مطالعه تجربی انتقال ارتعاشات از میز لرزان به محیط پیرامونی

فرزانه نباتی، منصور ضیایی فر\*

پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

بازنگری: ۱۳۹۶/۰۵/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۰۲

### کلمات کلیدی:

میز لرزان

انتقال ارتعاشات

پارامترهای دینامیکی خاک

**خلاصه:** اندرکنش پی میز لرزه با خاک بر دقت عملکردی آن مؤثر بوده و در صحت نتایج آزمایش‌ها بر روی میز تأثیرگذار است. برای شناسایی این رفتار، دانستن پارامترهای دینامیکی این سیستم ارتعاشی لازم بوده و در این راستا استفاده از مطالعات تجربی یک راهکار مناسب تشخیص داده شده است. با استفاده از این روش عدم قطعیت‌های موجود در عملکرد میز لرزه به سبب وجود اندرکنش‌های گفته شده در این سیستم ارتعاشی در حین بهره‌برداری کاهش می‌یابد. در این تحقیق به شرح یک آزمایش ارتعاش اجباری انجام شده بر روی پی میز لرزان شش درجه آزادی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله اقدام گردیده است. در این آزمایش داده‌برداری از ارتعاشات انتقال یافته به محیط اطراف پی نیز صورت پذیرفته و با استفاده از نتایج حاصل از آن چگونگی انتقال ارتعاشات از میز به محیط مجاور ارزیابی گردیده است. همچنین از داده‌های ثبت شده روی پی برای شناسایی پارامترهای دینامیکی سیستم خاک و پی استفاده شده است. بر مبنای نتایج این تحقیق دامنه ارتعاشات انتقال یافته از پی به محیط اطراف با افزایش فاصله از لبه پی به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شده است که این کاهش دامنه ارتعاشات انتقالی در خصوص ارتعاشات افقی و قائم دارای روند یکسانی نیستند. علاوه بر آن نتایج به دست آمده در خصوص انتقال ارتعاشات ناشی از تحریک پی به محیط پیرامونی آن حاکی از تغییرات قابل توجه در محتوای فرکانسی ارتعاشات انتقال یافته به خاک برحسب فاصله از مرکز تحریک است.

### ۱- مقدمه

میرایی خاک در تعیین دامنه این ارتعاشات در فرکانس‌های مختلف و تعیین شرایط یکسانی فرکانس تحریک با فرکانس سیستم خاک و پی و ایجاد پدیده تشدید مهم به شمار می‌آید. برای ارزیابی چگونگی این ارتعاشات و تعیین اثر پارامترهای دینامیکی خاک استفاده از مطالعات تجربی راهکاری لازم به نظر می‌رسد. از طریق انجام این آزمایشات عدم قطعیت‌های موجود در ارتباط با میز لرزان در زمان بهره‌برداری کاهش یافته و محدودیت‌های عملکردی آن را با دقت بالاتری مشخص می‌گردد.

در میان مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به بررسی‌های صورت گرفته بر روی میز لرزان شش درجه آزادی دانشگاه سن‌دیگو<sup>۱</sup> اشاره کرد. با توجه به سختی بالای خاک محل نصب این میز، سعی

دقت عملکرد میز لرزه به دانستن مشخصه‌های اندرکنشی پی این سیستم ارتعاشی با خاک وابسته است. انجام آزمایش‌های تجربی اطلاعات مناسبی را برای شناسایی این رفتار ارائه می‌دهد. اندرکنش میز با خاک همچنین ممکن است بر عملکرد سیستم کنترلی و مکانیزم تحریک میز تأثیرگذار باشد. در این حالت اغلب لازم است تا با تغییر در سیستم کنترلی میز به حذف این اندرکنش اقدام گردد. علاوه بر آن ارتعاشات ایجاد شده ناشی از حرکت میز از طریق پی به خاک انتقال یافته و ارتعاشات انتقالی در فرکانس‌های مختلف با توجه به خصوصیات دینامیکی محیط تغییر یافته و به ساختمان‌های مجاور انتقال می‌یابد. در این ارتباط دانستن میزان صحیح سختی و

1 University of California at San Diego

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mansour@iiees.ac.ir



## ۲- معرفی میز لرزان و ابزارگذاری آن

پی میز لرزه شش درجه آزادی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با ابعاد ۱۵×۱۵ متر و ارتفاع ۹ متر دارای وزنی بیشتر از ۴۰۰۰ تن است. این میز لرزان دارای ۴ جک افقی و ۴ جک قائم است که جک‌های قائم آن علاوه بر تحمل وزن عرشه و نمونه مستقر بر آن بایستی بتواند اثرات بارهای دینامیکی ناشی از حرکات افقی، قائم و دورانی میز را با حفظ موقعیت حرکتی تعیین شده در شتاب‌نگاشت‌های وارده به میز تحمل نمایند. برآیند نیروهای حاصل از عکس‌العمل جک‌ها از طریق پی به خاک انتقال می‌یابد. نحوه عملکرد میز و همچنین اثرات آن بروی ساختمان‌های مجاور به میزان و چگونگی انتقال ارتعاشات ناشی از حرکت میز به خاک وابسته است. در این ارتباط تعیین خصوصیات دینامیکی خاک از پارامترهای مهم در این مطالعات است.

در این تحقیق آزمایش ارتعاش اجباری با رژیم بارگذاری جاروی فرکانسی برای تعیین خصوصیات خاک و بررسی دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات انتقالی به خاک در فواصل مختلف از میز بکار گرفته شده است. در این آزمایش یک دستگاه لرزاننده در مرکز پی نصب گردیده و ثبت ارتعاشات توسط شتاب‌نگارهایی با دقت بالا و در فواصل معین از مرکز پی صورت پذیرفته است. لرزاننده مورد استفاده قابلیت ایجاد ارتعاشات در جهات افقی و قائم را در دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف بصورت مجزا دارا می‌باشد. شکل ۱ موقعیت قرارگیری لرزاننده و شتاب‌نگارها را نسبت به پی میز لرزه نشان می‌دهد.

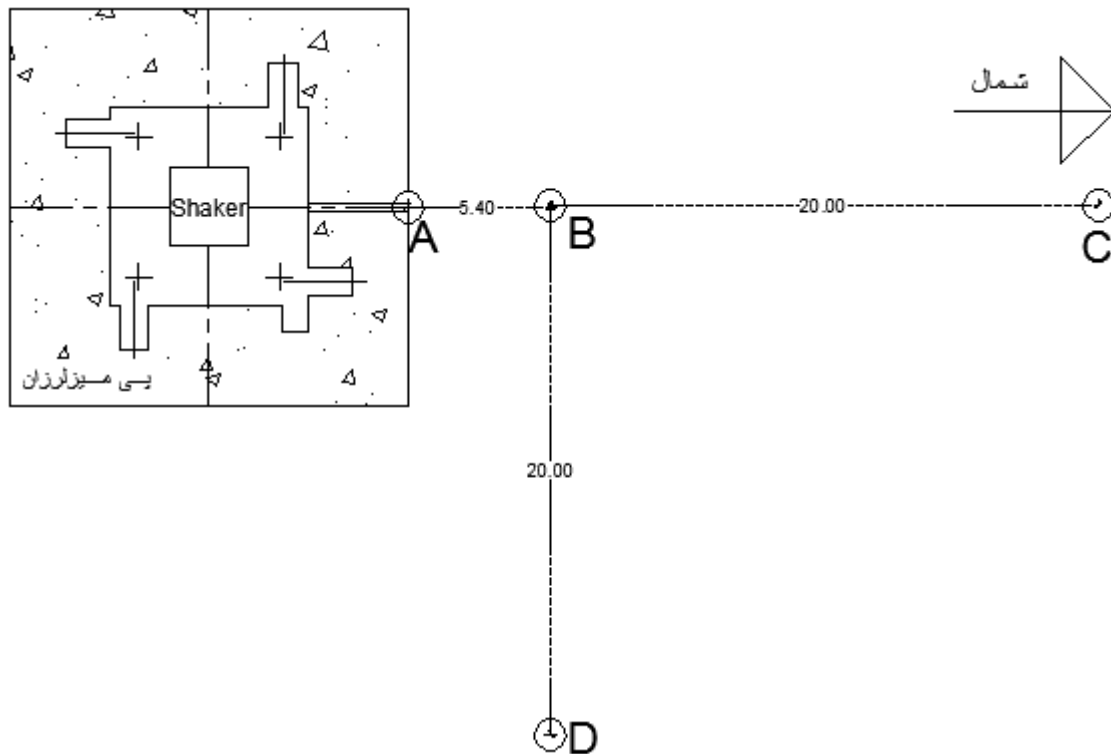
دستگاه لرزاننده مورد استفاده از نوع دورانی با دو جرم خارج از مرکز ناهم‌فاز بوده و ظرفیت ایجاد نیروی لرزاننده تا محدوده ۳۰ کیلو نیوتن را در فرکانس‌های بالای تحریک دارا می‌باشد. دامنه فرکانسی تحریک این دستگاه به صورت ایده‌آل تا محدوده ۴۰ هرتز بوده و می‌تواند بار سینوسی با فرکانس تحریک انتخابی  $\omega$  را مطابق با رابطه شماره (۱) در جهات افقی و قائم ایجاد نماید [۲].

$$\begin{cases} F(\omega) = A(\omega) \cdot \sin(\omega t) \\ A(\omega) = \frac{288/7 \cdot \sin(\alpha)}{g} \omega^2 \end{cases} \quad (1)$$

شده است تا با استفاده از این سختی، پی میز لرزه با وزن کمتر و به صورت توخالی طراحی گردد. برای بررسی نحوه حرکت پی بر روی خاک و چگونگی انتقال ارتعاشات از پی به محیط پیرامون و همچنین شناسایی مؤلفه‌های دینامیکی خاک، آزمایش ارتعاش اجباری بر روی پی این میز انجام شده است. در این آزمایش دو دستگاه لرزاننده در دو طرف پی و محل قرارگیری جک‌های افقی میز نصب و با روش جاروی فرکانسی به تحریک پی پرداخته شده است. در این آزمایش در نقاط مختلف اطراف پی شتاب‌نگار نصب و ارتعاشات در جهات مختلف ثبت گردیده است. با استفاده از نتایج حاصله از این تحقیق، میزان سختی و میرایی خاک و چگونگی انتقال ارتعاشات به محیط اطراف پی تعیین و در راه‌اندازی میز لرزه مورد استفاده قرار داده شده است. ارزیابی نتایج آزمایش نشان‌دهنده آن بوده است که میزان تغییر مکان پی کوچک بوده و بر سیستم کنترلی میز تأثیرگذار نیست. از طرف دیگر مشخص گردیده است که احتمال ایجاد نشست غیرمستقران در یکی از گوشه‌های پی وجود داشته و لازم است تا اقدامات لازم قبل از بهره‌برداری از میز برای رفع این مسأله صورت پذیرد [۱].

به کاراندازی میز لرزان شش درجه آزادی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله نیز نیاز به انجام مطالعات مشابهی را دارد. در این راستا یک آزمایش ارتعاش اجباری اولیه قبل از تکمیل سازه‌های اطراف میز لرزه صورت پذیرفته که در این مطالعه به آن پرداخته شده است. از اهداف این آزمایش مطالعه رفتار پی و شناسایی خصوصیات دینامیکی آن از قبیل سختی و میرایی بوده است. محققین دیگری نیز از نتایج حاصله از این آزمایش در ارتباط با بررسی مسأله اندرکنش خاک با پی‌های حجیم استفاده به عمل آورده‌اند [۲ و ۴].

در بخش دیگری از مطالعه حاضر به ارائه یک مدل ساده رفتاری برای پی میز لرزه پرداخته شده است. در این مدل، پی به صورت سازه یک درجه آزاد در نظر گرفته شده است تا محاسبه خصوصیات دینامیکی خاک با سهولت بیشتری صورت پذیرد. سپس با استفاده از این مدل و نتایج به دست آمده از آزمایش برای تعیین مشخصه‌های دینامیکی پی و پس از آن صحت‌سنجی رفتار مدل یک درجه آزادی در فرکانس‌های مختلف تحریک اقدام شده است. همچنین در این تحقیق به چگونگی انتقال ارتعاشات از میز به محیط اطراف نیز پرداخته شده است.



شکل ۱. موقعیت هندسی قرارگیری لرزاننده و شتابنگارها

Fig. 1. Acceleration ratio at distance 25/4 meter from foundation edge.



شکل ۲. دستگاه لرزاننده نصب شده بر روی پی میز لرزه

Fig. 2. Installed shaker on the foundation of table

شتاب‌نگارهای بکار گرفته شده در این آزمایش از نوع الکترومکانیکال (Force-balance) با دقت کالیبره شده در اندازه‌گیری شتاب به میزان  $0.02 \text{ mm/sec}^2$  در محیط با نوفه پایین هستند. این شتاب‌نگارها تک جهت بوده و از طریق کابل به سیستم جمع‌آوری اطلاعات متصل می‌شوند. شکل ۳ چگونگی نصب این شتاب‌نگارها را نشان می‌دهد.

در این رابطه  $F$  نیروی ایجاد شده توسط لرزاننده به نیوتون،  $\alpha$  زاویه انحراف محور جرم دوار در دستگاه لرزاننده به رادیان و  $g$  شتاب ثقل زمین در مقیاس متر بر مجذور ثانیه است. شکل ۲ دستگاه لرزاننده مورد استفاده را در هنگام نصب بر روی پی میز لرزه نشان می‌دهد.





شکل ۳. شتابنگارهای نصب شده بر روی پی میز لرزه  
Fig. 3. Installed sensors on the foundation of table

فرض شده است و از فرکانس ۱۵ به بعد این زاویه کاهش یافته تا دامنه نیروی اعمالی  $A(\omega)$  در رابطه (۱) از محدوده حداکثر ظرفیت نیرویی لرزاننده متجاوز نگردد. بدین طریق در فرکانس‌های تحریک ۰/۱ تا ۱۵ هرتز  $\alpha$  برابر با حداکثر میزان آن معادل با ۵۵ درجه بوده ولی در فرکانس‌های تحریک بالاتر این میزان معادل با ۴۰ درجه انتخاب شده است.

آزمایش در عمل سه بار تکرار شده است. علت تکرار آزمایش ایرادات دستگاهی سیستم لرزاننده بوده است. در نهایت بعد از کالیبره کردن سیستم تحریک ارتعاش در محدوده دقت دستگاهی مورد نیاز، داده برداری نهایی انجام پذیرفته است. پس از پایان کار در هر یک از آرایش‌های شتابنگارهای نصب شده با تغییر در جهت شتاب‌نگاری (از عرضی به طولی و یا از افقی به قائم) به تکرار آزمایش در موقعیت جدید شتاب‌نگارها پرداخته شده است. سپس همین شیوه برای سایر موقعیت‌های تحریک محور لرزاننده بکار گرفته شده است. جدول ۱ مشخصه‌های آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

اطلاعات حاصل از انجام آزمایش در سیستم ثبت اطلاعات مربوطه ذخیره شده و پس از اعمال ضرایب کالیبراسیون هر شتاب‌نگار به شتاب‌نگاشت حاصله از آن و استفاده از فیلترهای لازم برای حذف نوفه و اصلاحات مرتبط با آن، اطلاعات پالایش یافته برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار داده شده است. اشکال ۵ تا ۷ نمونه‌هایی از اطلاعات بدست‌آمده از انجام آزمایش را نشان می‌دهند (گام زمانی ثبت شتاب برابر ۰/۰۰۵ ثانیه است).

سیستم جمع‌آوری و ثبت اطلاعات ارتعاشی به کارگرفته شده در آزمایش از نوع ۲۴ بیتی با ۱۲ کانال مستقل بوده و امکان برداشت ۲۰۰ نمونه با قدرت تفکیک بالا را در ثانیه دارا می‌باشد.

### ۳- آزمایش ارتعاش اجباری

پس از نصب شتاب‌نگارها در جهات شرقی و غربی نشان داده شده در شکل ۱ و آماده‌سازی دستگاه لرزاننده، آزمایش ارتعاش اجباری بر مبنای محدودیت نیرویی سیستم تحریک انجام گرفت. از آنجایی که دامنه تحریک میز لرزان معمولاً در محدوده ۰/۱ هرتز تا ۳۵ هرتز برای موارد استاندارد آزمایشات لرزه‌ای قرار دارد و با توجه به محدودیت‌های به وجود آمده در ایجاد فرکانس‌های بالا برای سیستم لرزاننده در حین کار، انجام آزمایش به طریق جاروی فرکانسی در محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۲۰ هرتز با افزایش پلکانی ۰/۲ هرتز در این پروژه صورت پذیرفت. در هر پلکان فرکانسی لرزاننده به مدت ۲۰ ثانیه با فرکانس تعیین شده به اعمال تحریک در یکی از جهات افقی و یا قائم پرداخته و پس از آن افزایش فرکانس در پله بعدی به سیستم اعمال گردیده است. مدت زمان ۲۰ ثانیه از آن جهت انتخاب شده است که با توجه به فرکانس تحریک، دامنه پاسخ ارتعاشی سیستم پس از افزایش فرکانس بارگذاری در هر پلکان به حالت مانا<sup>۱</sup> مجانب گردد و اثرات گذرای تغییر در فرکانس تحریک میرا شود. میزان زاویه انحراف محور جرم دستگاه لرزاننده  $\alpha$  تا فرکانس ۱۵ هرتز ثابت

1 Steady State



جدول ۱. مشخصه‌های آزمایش‌ها روی پی میزلرزان

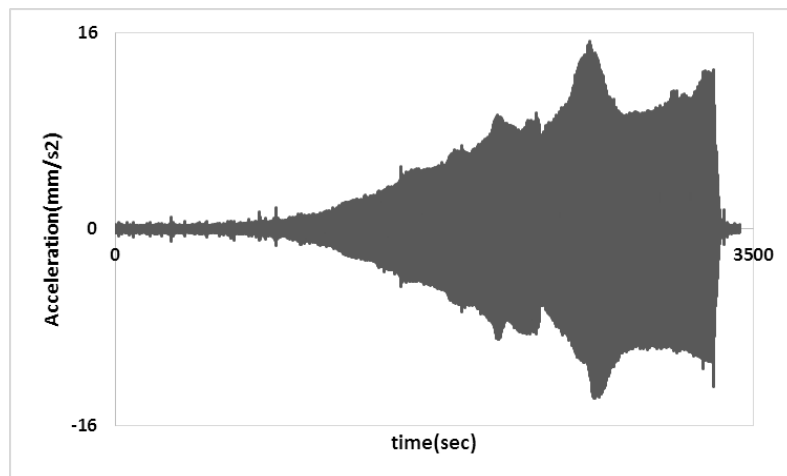
Table 1. Tests Properties

شماره آزمایش	محور نصب لرزاننده	جهت نصب شتاب‌نگارها			گام پلکانی تحریک (هرتز)	θ (درجه)	
						(۱۵-۰)	(۲۰-۱۵)
۱	شرقی-غربی	قائم	شرقی-غربی	شمالی-جنوبی	۰.۲	۵۵	۴۰
۲	شمالی-جنوبی	قائم	شرقی-غربی	شمالی-جنوبی	۰.۲	۵۵	۴۰
۳	قائم	قائم	شرقی-غربی	شمالی-جنوبی	۰.۲	۵۵	۴۰



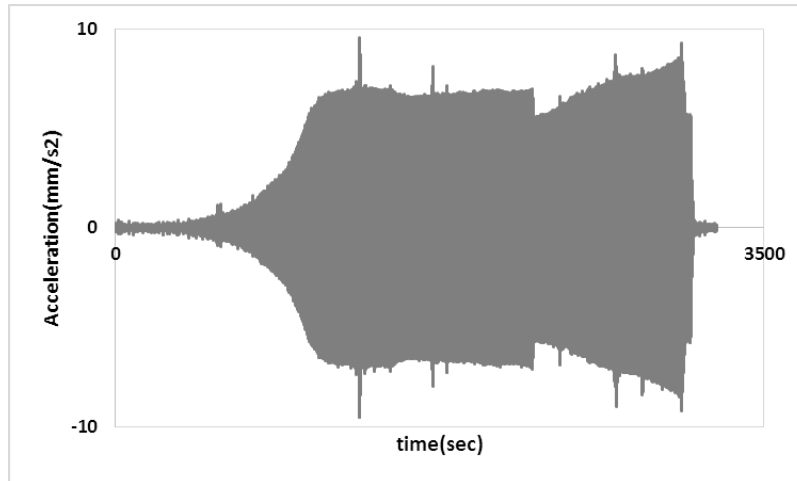
شکل ۴. سیستم جمع‌آوری و ثبت اطلاعات بکارگرفته شده در آزمایش

Fig. 4. Data logger

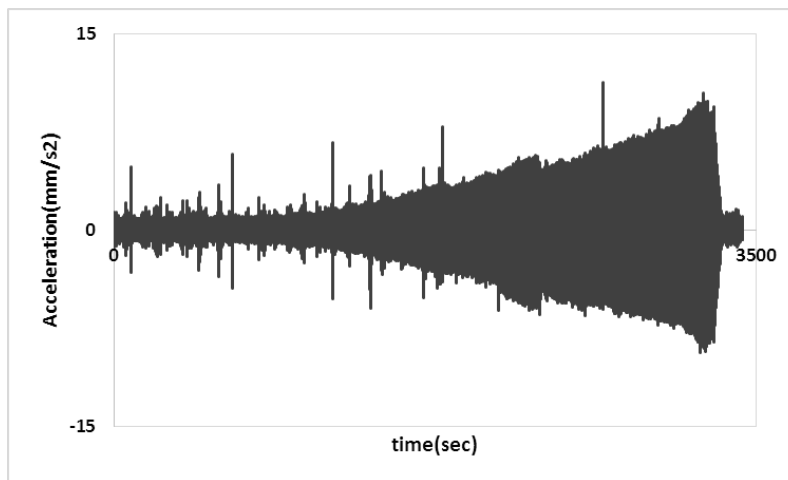


شکل ۵. شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه A بر اثر تحریک قائم

Fig. 5. Recorded accelerometer in station A due to vertical excitation



شکل ۶. شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه A بر اثر تحریک افقی  
 Fig. 6. Recorded accelerometer in station A due to horizontal excitation

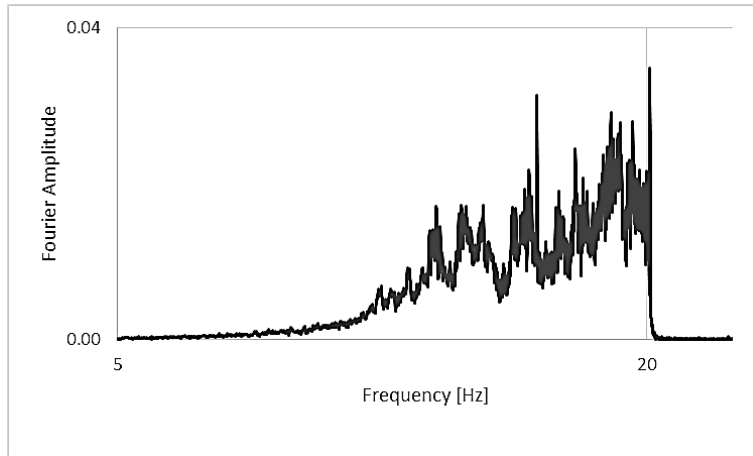


شکل ۷. شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه B بر اثر تحریک قائم  
 Fig. 7. Recorded accelerometer in station B due to vertical excitation

#### ۴- تحلیل داده‌های شتاب‌نگاری

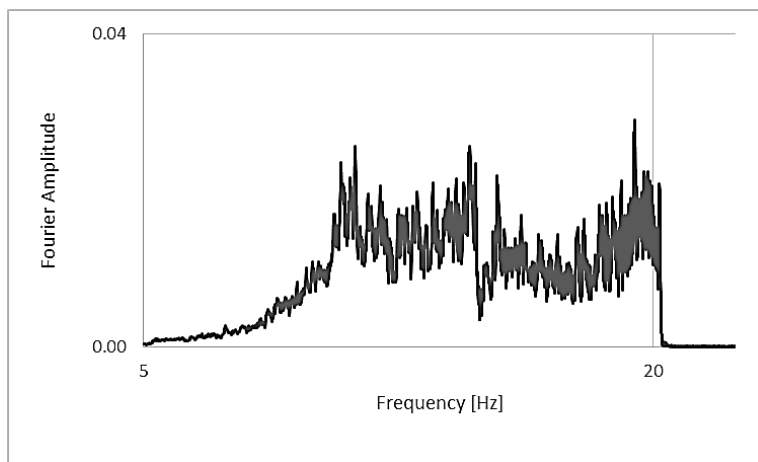
اشکال ۸ تا ۱۱ نمونه‌هایی از محتوای فرکانسی شتاب ثبت شده در لبه پی (ایستگاه A) و محیط اطراف آن (ایستگاه B) را در جهات افقی و قائم نشان می‌دهند. با توجه به این نتایج و همچنین نتایج شتاب‌نگاری نشان داده شده در اشکال ۵ تا ۷ مشخص می‌گردد که دامنه و فرکانس پاسخ در روی پی (ایستگاه A) با نقاط خارج از پی (ایستگاه B) متفاوت بوده و با فاصله گرفتن از لبه پی دامنه شتاب‌های ثبت شده در تمامی فرکانس‌ها (خصوصاً تحریک افقی) کاهش یافته است.

اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان‌دهنده نسبت پاسخ شتاب‌های ثبت شده بر روی خاک مجاور پی در فواصل ۵/۴ و ۲۵/۴ متری (به ترتیب ایستگاه‌های B و C) به شتاب اندازه‌گیری شده در روی لبه پی (ایستگاه A) بر حسب فرکانس‌های مختلف تحریک (نشان داده شده بر روی محور افقی) می‌باشند. همان‌گونه که در این اشکال نشان داده شده است با فاصله گرفتن از لبه پی در ارتعاش افقی دامنه پاسخ شتاب ثبت شده در فرکانس‌های مختلف تحریک کاهش بسیاری یافته ولی این کاهش در ارتعاش قائم با روند متفاوتی صورت پذیرفته است. این تغییر در دامنه



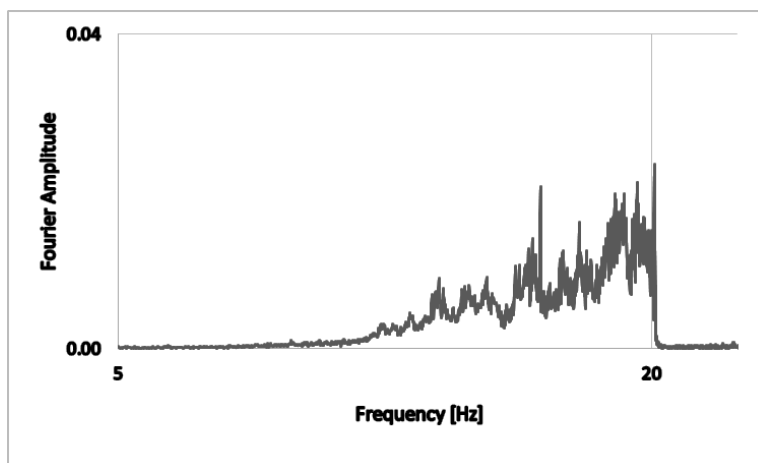
شکل ۸. محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه A بر اثر تحریک قائم

Fig. 8. Frequency content of recorded accelerometer at station A due to vertical excitation



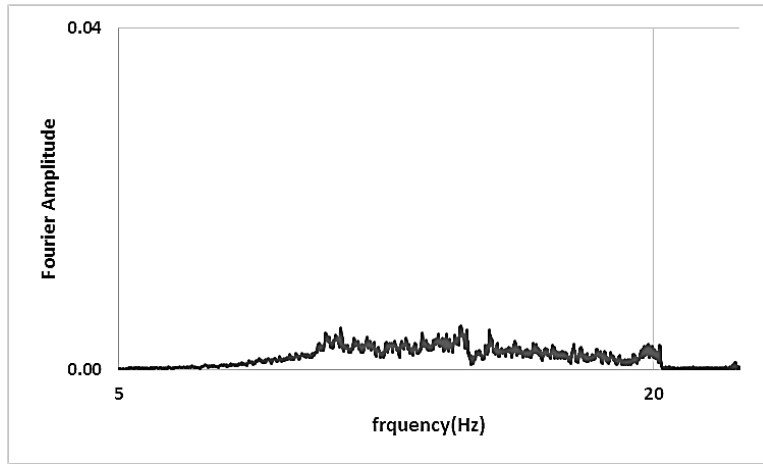
شکل ۹. محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه A بر اثر تحریک افقی

Fig. 9. Frequency content of recorded accelerometer at station A due to horizontal excitation



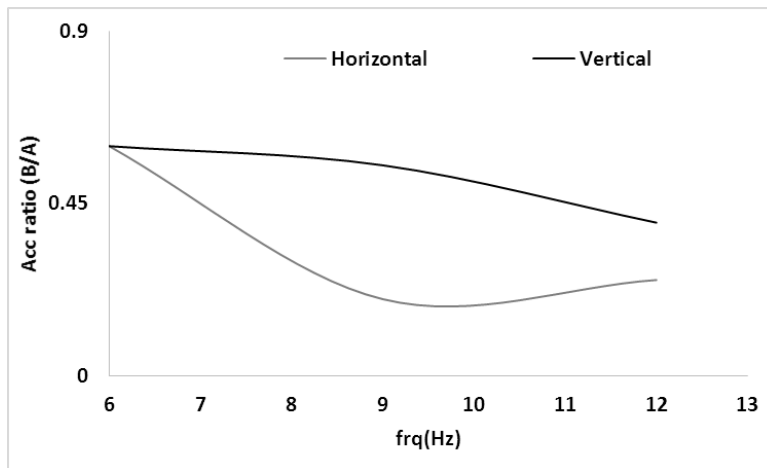
شکل ۱۰. محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه B بر اثر تحریک قائم

Fig. 10. Frequency content of recorded accelerometer at station B due to vertical excitation



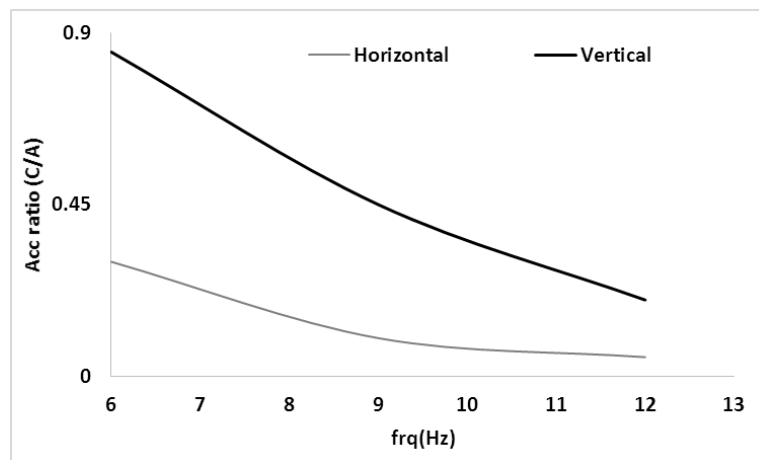
شکل ۱۱. محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه B بر اثر تحریک افق

Fig. 11. Frequency content of recorded accelerometer at station B due to horizontal excitation



شکل ۱۲. تغییرات در پاسخ شتاب ثبت شده در فاصله ۵/۴ متری از لبه پی

Fig. 12. Variation of acceleration amplitude at the distance of 4.5 m from the edge of the foundation



شکل ۱۳. تغییرات در پاسخ شتاب ثبت شده در فاصله ۲۵/۴ متری از لبه پی

Fig. 13. Variation of acceleration amplitude at the distance of 25.4 m from the edge of the foundation

که در این رابطه مقدار حداکثر دامنه پاسخ سازه معادل با مقدار

$$u_{\max} = \frac{p_0}{k} \left[ \left( 1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right)^2 + \left( 2\xi \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در این حالت بیشینه پاسخ شتاب سیستم یک درجه آزاد تحت بارگذاری هارمونیک به صورت رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\ddot{u}_{\max} = u_{\max} \cdot \bar{\omega}^2 \quad (7)$$

با استفاده از این روش می‌توان حداکثر تغییرمکان پی را در فرکانس‌های مختلف تحریک محاسبه کرد. لازم به ذکر است که چون هر گام فرکانسی تحریک به مدت ۲۰ ثانیه‌ای ادامه داشته و پس از آن به فرکانس تحریک افزوده شده است، فرض میرا شدن پاسخ گذرا قابل قبول خواهد بود.

بدین ترتیب با استفاده از روابط ارائه شده برای پاسخ ماندگار سازه و بکارگیری داده‌های ثبت شده شتاب در آزمایش ارتعاش اجباری در دو راستای افقی و قائم مقادیر تغییرمکان حداکثر پی و متعاقب آن سختی و نسبت میرایی خاک قابل استخراج خواهد بود. در این روش ابتدا با تخمین فرکانس طبیعی ارتعاشی پی در جهات افقی و قائم از طریق یافتن مقادیر حداکثر شتاب اندازه‌گیری شده از میزان تمامی فرکانس‌ها مختلف تحریک به استخراج مقادیر اولیه سختی و میرایی خاک در هر فرکانس اقدام شده و سپس با سعی و خطا به همگرایی نتایج برای تمامی فرکانس‌ها اقدام می‌گردد. شکل ۱۴ تغییرات شتاب حداکثر ثبت شده در محل دستگاه‌گذاری واقع بر روی پی (ایستگاه A) را با استفاده از دو راستای افقی و قائم نشان می‌دهد.

براساس نتایج به دست آمده مشخص می‌گردد که بیشترین شتاب ثبت شده بر روی پی در ارتعاش افقی در فرکانس حدود ۹ هرتز و در ارتعاش قائم در مجاورت ۱۲ هرتز اتفاق افتاده است. این دو فرکانس، می‌توانند فرکانس‌های طبیعی اولیه پی در دو جهت افقی و قائم برای تعیین مشخصه‌های دینامیکی پی در مرحله بعدی محسوب شوند.

بر حسب فرکانس‌های مختلف تحریک و مشخص بودن مقدار جرم پی و شتاب ثبت شده بر روی آن، با استفاده از معادله زیر می‌توان به تعیین مشخصه‌های دینامیکی دقیق پی اقدام نمود.

ارتعاشات در عمل متأثر از بازتاب امواج درون خاک در فواصل مختلف نیز بوده است که به ایستگاه آخر داده برداری رسیده است. این نتایج همچنین حاکی از آن است که دامنه شتاب انتقالی در فرکانس‌های بالای تحریک با افزایش فاصله از مرکز تحریک با سرعت بیشتری نسبت به فرکانس‌های پایین کاهش می‌یابد.

## ۵- مدل اندرکنشی خاک و پی میز لرزان

با فرض اینکه تحریک پی در نزدیکی مرکز ثقل آن قرار داشته باشد، می‌توان از فرض سیستم یک درجه آزادی تحت اثر بار هارمونیک برای مدل‌سازی پی استفاده کرد [۳]. با در نظر گرفتن این فرض روابط حاکم بر حرکت سیستم یک درجه‌آزادی تحت بارگذاری هارمونیک به صورت معادله (۲) خواهد بود. با حل این معادله پاسخ تغییرمکانی سیستم یک درجه آزادی به صورت معادله (۳) حاصل می‌گردد [۵].

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \cdot \sin(\bar{\omega}t) \quad (2)$$

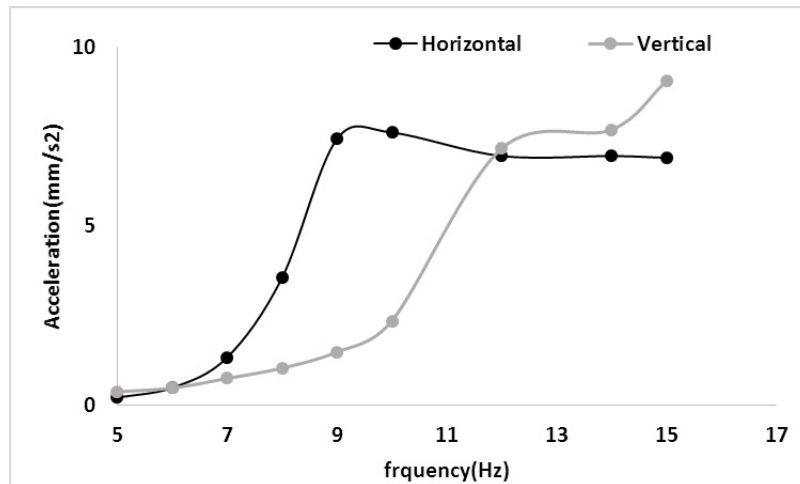
$$u(t) = e^{-\xi\omega t} [A \cdot \sin(\omega_D t) + B \cdot \cos(\omega_D t)] + \frac{p_0}{k} \left[ \left( 1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right)^2 + \left( 2\xi \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left( \left( 1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right) \sin(\bar{\omega}t) - 2\xi \cos(\bar{\omega}t) \right) \quad (3)$$

در معادلات بالا  $m$  جرم سازه یک درجه آزاد،  $c$  ثابت میرایی،  $k$  سختی و  $p_0$  دامنه ارتعاش هارمونیک وارد بر سازه یک درجه آزاد می‌باشد. در این روابط  $\bar{\omega}$  فرکانس تحریک وارد بر سازه و  $\omega_D$  فرکانس میرای آن است که برحسب فرکانس طبیعی  $\omega$  و نسبت میرایی  $\xi$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4)$$

پاسخ سیستم یک درجه آزاد به ارتعاش هارمونیک وارد بر آن شامل دو قسمت پاسخ مانا و قسمت پاسخ گذرا است. اگر از پاسخ‌گذرای آن به علت میرایی سیستم خاک و پی و سرعت بسیار کم جاروی فرکانسی صرف نظر شود پاسخ مدل یک‌درجه آزاد برابر رابطه زیر خواهد بود.

$$u(t) = \frac{p_0}{k} \left[ \left( 1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right)^2 + \left( 2\xi \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left( \left( 1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right) \sin(\bar{\omega}t) - 2\xi \cos(\bar{\omega}t) \right) \quad (5)$$



شکل ۱۴. شتاب حداکثر ثبت شده در روی پی بر حسب فرکانس تحریک در ایستگاه A تحت اثر ارتعاش افقی و قائم

Fig. 14. The maximum acceleration on the foundation due to vertical and horizontal excitation frequency in station A

جدول ۲. مشخصات دینامیکی سیستم خاک-پی با استفاده از مدل سازه یک درجه آزاد

Table 2. Soil-foundation dynamic parameters

ارتعاش	نسبت میرایی (درصد)	سختی (نیوتن میلی‌متر)	فرکانس طبیعی (هرتز)
افقی	۱۰	$۱.۴ \times ۱۰^۷$	۹.۴
قائم	۲۰	$۲.۴۷ \times ۱۰^۷$	۱۲.۱

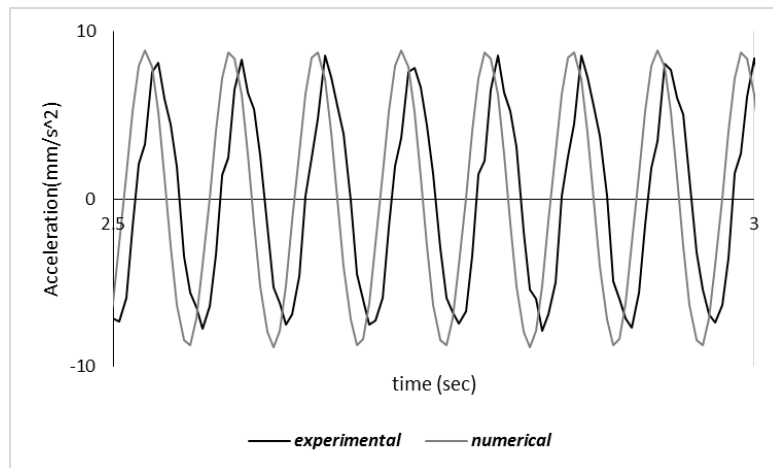
### ۶- صحت سنجی مدل عددی

از نتایج تاریخچه زمانی حاصل شده در آزمایشات تجربی برای اعتبارسنجی مدل یک درجه آزادی بکار رفته استفاده شده است. در این بخش از مشخصه‌های دینامیکی به دست آمده برای پی در مرحله قبل استفاده شده است. بایستی توجه داشت که چون بارگذاری بر روی پی تقریباً در مرکز پی اتفاق افتاده است، فرض پی به عنوان یک سیستم یک درجه آزاد تحت بارگذاری هارمونیک قابل قبول تلقی گردیده است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مقایسه نتایج تاریخچه زمانی شتاب پی حاصل از مدل عددی را با داده‌های ثبت شده از آزمایش در دو راستای افقی و قائم (برای فرکانس‌های تحریک مختلف) را نشان می‌دهند.

نتایج نشان داده شده حاکی از تطابق نسبی اطلاعات حاصل از مدل عددی با نتایج به دست آمده از آزمایش دارد. بایستی توجه داشت که شتاب‌های ثبت شده در آزمایش در عمل حاصل از عبور امواج ارتعاشی از لایه‌های مختلف خاک و برخورد با پی‌های هستند و

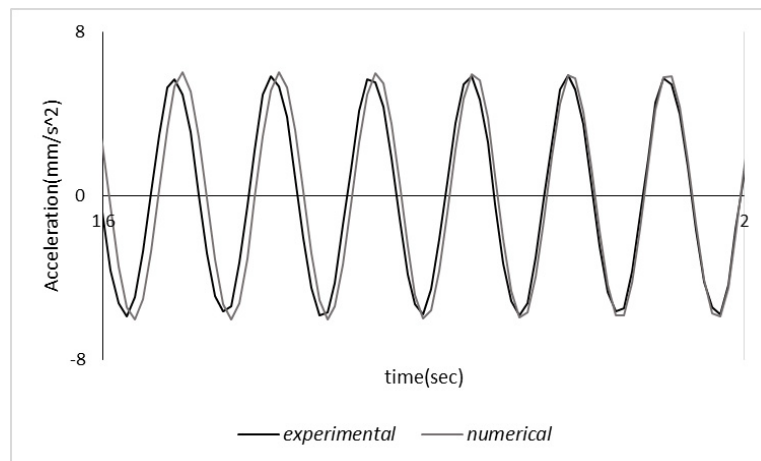
$$\ddot{u}_{\max} = \frac{p_0}{k} \left[ \left( 1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right)^2 + \left( 2\xi \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2 \right]^{-1/2} \times \bar{\omega}^2 \quad (۸)$$

که در این رابطه با قراردادن  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  و با دانستن مقادیر  $\bar{\omega}$  و  $p_0$ ، در معادله تنها دو مجهول سختی و نسبت میرایی  $(k, \xi)$  باقی خواهند ماند. برای محاسبه مقادیر این دو مجهول از سعی و خطا استفاده شده است. در این روش با فرض فرکانس طبیعی پی در نزدیکی فرکانس‌های ۹ و ۱۲ هرتز، سختی اولیه پی محاسبه شده و میرایی آن در فرکانس تحریک مربوطه حاصل می‌شود. سپس این مساله در فرکانس‌های تحریک دیگر مورد آزمایش قرار می‌گیرد. سپس با تغییر در مقادیر سختی و میرایی سعی در ایجاد همگرایی در نتایج می‌گردد. نتایج نهایی حاصله برای سختی و میرایی پی و همچنین فرکانس‌های طبیعی پی با توجه به محدوده فرکانس انجام آزمایش در جدول شماره ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۵. مقایسه شتاب پی در آزمایش تجربی با مدل سازی عددی در ارتعاش قائم در فرکانس ۱۵ هرتز

Fig. 15. Comparison between the recorded acceleration in experimental and numerical model due to vertical excitation at the frequency of 15 Hz



شکل ۱۶. مقایسه شتاب پی در آزمایش تجربی با مدل سازی عددی در ارتعاش افقی در فرکانس ۱۶/۵ هرتز

Fig. 16. Comparison between the recorded acceleration in experimental and numerical model due to Horizontal excitation at the frequency of 16.5 Hz

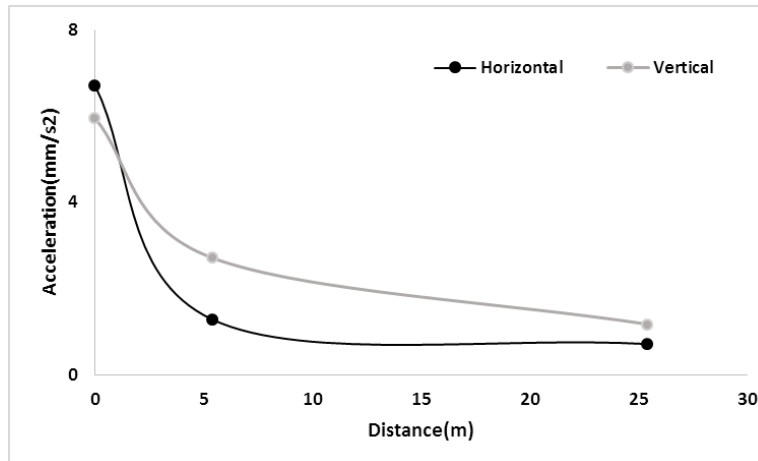
محدوده فرکانسی تحریک است که قبلاً توضیح داده شده است. با این وجود اختلاف حاصله در محدوده خطای محاسباتی ۲ درصد است و قابل قبول تشخیص داده می شود.

#### ۷- انتقال ارتعاشات از پی به محیط پیرامون

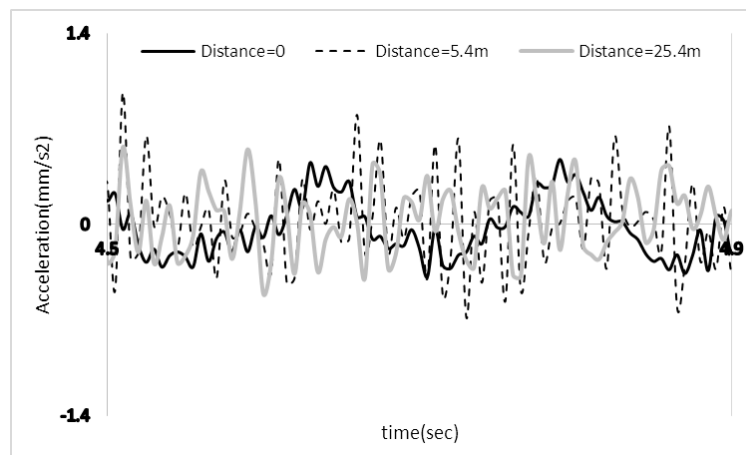
یکی دیگر از اهداف آزمایش تجربی بر روی پی میز لرزان استخراج دامنه ارتعاشات انتقالی به محیط پیرامونی پی بوده است. با استفاده از آزمایش های انجام شده دامنه انتقال ارتعاشات افقی و قائم به محیط و نحوه انتشار آنها در محیط مشخص گردیده است. اطلاعات به دست آمده از داده های ثبت شده از آزمایش نشان دهنده کاهش دامنه ارتعاشات با فاصله گرفتن از میز در هر دو حالت ارتعاش افقی و قائم

این امر می تواند سبب ایجاد اختلاف ما بین نتایج عددی و تجربی شده باشد. در شکل ۱۵ اختلاف مابین دو منحنی عمدتاً نشانگر شیفت زمانی دو منحنی است که در سیکل های مختلف ثابت باقی مانده است. با این وجود می توان با دقت در منحنی نتایج شتاب ثبت شده به عدم تقارن کامل دامنه ها در مقادیر مثبت و منفی که مبین وجود فرکانس های بالاتر در پاسخ مانای سیستم واقعی است پی برد. البته این مسأله در منحنی به دست آمده از مدل سازی عددی مشاهده نمی گردد. اما در شکل ۱۶، اختلاف مشاهده شده ناشی از تفاوت جزئی در فرکانس حالت مانا در سیستم واقعی نسبت به مدل عددی است که در فرکانس تحریک نزدیک به فرکانس طبیعی پی رخ داده است. این امر ناشی از روش ایجاد همگرایی جواب ها برای تمامی





شکل ۱۷. تغییرات دامنه شتاب ثبت شده در تحریک پی در فرکانس‌های طبیعی آن بر حسب فواصل مختلف از لبه پی  
**Fig. 17. Variation of acceleration amplitude according to distance**



شکل ۱۸. تغییرات دامنه شتاب ثبت شده بر حسب زمان در تحریک قائم ۶/۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی  
**Fig. 18. Changes in the vertical acceleration amplitude range at the steady acceleration of 6.5 Hz for different distances.**

افقی بر روی سطح زیرین این پی می تواند موجب تغییرات ناخواسته در سطح ارتعاشات انتقالی به سازه های مجاور گردد و یا خیر. اشکال ۱۸ و ۱۹ دامنه پاسخ شتاب ثبت شده در فواصل مختلف از لبه پی را در تحریک اجباری خارج از محدوده فرکانس طبیعی پی (فرکانس ۶/۵ هرتز) بر حسب زمان نشان می دهند. بر اساس اطلاعات موجود در این اشکال می توان بیان کرد که دامنه و فرکانس ارتعاش انتقالی به خاک بر حسب فاصله به شدت با یکدیگر متفاوت هستند. این مسأله به گونه ای است که در نقاط خارج از پی محتوای فرکانسی ارتعاش انتقالی به سمت فرکانس های بالا تمایل پیدا می کند و این روند به صورت مستقیم تابع فاصله نیست. دلیل این امر انتشار امواج در خاک و نحوه بازتاب و زمان حرکت هر موج در خاک است که در عمل سبب

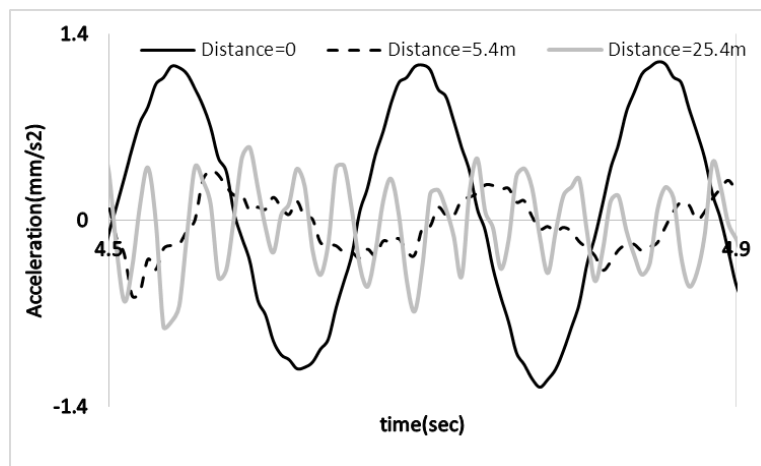
است. شکل ۱۷ نحوه کاهش دامنه شتاب حداکثر ثبت شده برای تحریک اجباری در فرکانس های طبیعی پی (ارائه شده در جدول ۲) در دو حالت افقی و قائم را نشان می دهد.

با توجه به این اشکال مشخص می گردد که با تحریک پی در فرکانس های طبیعی آن برای فاصله ۲۵ متری در جهت افقی و قائم از لبه پی دامنه ارتعاشات به طور متوسط حدود ۷۵ درصد کاهش داشته است.

لازم به ذکر است که چون میز لرزه در مجاورت کف قوی با ابعاد ۲۰ در ۳۰ متر به وزن ۴۵۰۰ تن در فاصله افقی ۵ متری از لبه پی میز لرزه و در فاصله قائم ۵ متری بالای کف پی میز لرزه قرار دارد، این نگرانی وجود داشت که آیا اثرات انعکاس و شکست موج های قائم و

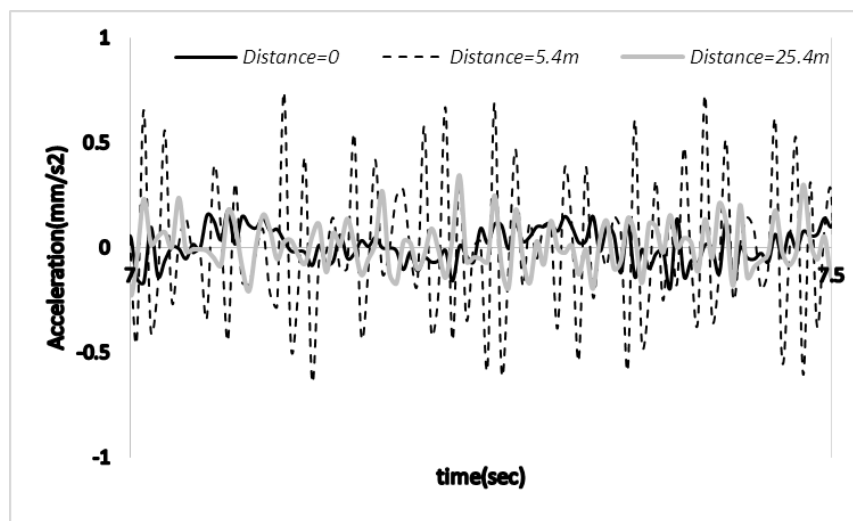
اشکال ۲۰ و ۲۱ نیز به همین شیوه مبین چگونگی تغییر در فرکانس ارتعاش انتقالی به خاک در اثر تحریک پی در فرکانسی خارج از فرکانس طبیعی آن است. در این اشکال فرکانس تحریک در محدوده نصف فرکانس طبیعی افقی پی (۴/۵ هرتز) در هر دو جهت قائم و افقی انتخاب شده است. همان گونه که ملاحظه می شود در این فرکانس تحریک، شتاب افقی انتقالی در فاصله ۲۵/۴ متری دارای دامنه‌ای قابل توجه در فرکانس بالا است که می‌تواند در ارتباط با انتقال ارتعاش به ساختمان مجاور سالن اصلی با توجه به کاربری آزمایشگاهی آن مجموعه مسأله‌ای مهم تلقی گردد.

می‌گردد فرکانس‌های متفاوتی در فواصل مختلف در پاسخ ارتعاشی خاک غالب شوند. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب فرکانسی و دامنه ارتعاشات انتقالی به خاک در فواصل مختلف از پی تغییر می‌یابد و این مسأله می‌بایستی در بررسی ارتعاشات انتقالی به سازه‌های مجاور مد نظر قرار داده شود. این نتیجه از آن جهت دارای اهمیت است که در فاصله ۵/۴ متر از لبه پی میز لرزه، فونداسیون سالن آزمایشگاه قرار دارد که از نظر عملیاتی انتقال ارتعاشات فرکانس بالا به این سازه در عملکرد آن مؤثر بوده و سبب ایجاد محیطی با پس زمینه ارتعاشی ناخواسته در جریان آزمایشات میز لرزه خواهد بود.



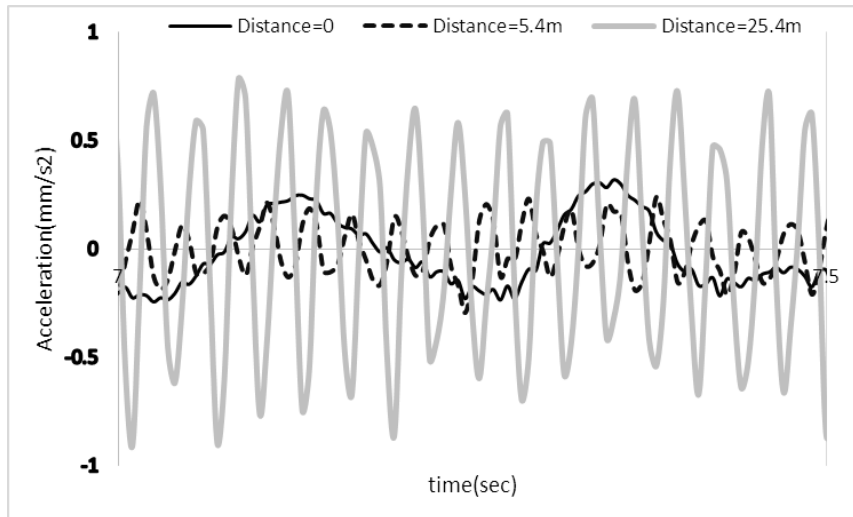
شکل ۱۹. تغییرات دامنه شتاب ثابت شده بر حسب زمان در تحریک افقی ۶/۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی

Fig. 19. Changes in the horizontal acceleration amplitude range at the steady acceleration of 6.5 Hz for different distances.



شکل ۲۰. تغییرات دامنه شتاب ثابت شده بر حسب زمان در تحریک قائم ۴/۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی

Fig. 20. Changes in the vertical acceleration amplitude range at the steady acceleration of 4.5 Hz for different distances.



شکل ۲۱. تغییرات دامنه شتاب ثبت شده بر حسب زمان در تحریک افقی ۴/۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی

Fig. 21. Changes in the horizontal acceleration amplitude range at the steady acceleration of 4.5 Hz for different distances.

## ۸- نتیجه گیری

ثبت شده بر حسب زمان در فرکانس‌های مختلف در آزمایش ارتعاش اجباری صورت پذیرفته که حاکی از صحت نتایج حاصل برای سختی و میرایی پی در جهات افقی و قائم بوده است.

در این مطالعات همچنین به بررسی دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات انتقالی در فواصل معین از لبه پی نیز پرداخته شده است. نتایج حاصله حاکی از کاهش قابل ملاحظه در دامنه شتاب مطلق انتقال یافته به زمین بر حسب فاصله در فرکانس تحریک معادل با فرکانس طبیعی پی است. همچنین نشان داده شده است که دامنه پاسخ ارتعاشی پی در سایر فرکانس‌های تحریک تابع مستقیم فرکانس تحریک نبوده و از محتوای فرکانسی بالاتری در فواصل دور از لبه پی برخوردار است.

از آنجا که لرزاننده بکار گرفته شده دارای محدودیت‌های زیادی در دامنه نیرو، محل اثر و بازه فرکانسی اعمال نیرو دارد، لازم است تا رفتار دینامیکی پی و اثرات انتقال ارتعاشات حاصله از عملکرد میز به محیط اطراف از طریق مدل‌سازی دقیق‌تر پی میز لرزه و ملحقات آن با درجات آزادی دورانی و انتقالی برای پی صورت پذیرد تا از نتایج آزمایشات تجربی بتوان برای کالیبراسیون مدل‌های عددی اندرکنشی میز لرزه با پی استفاده به عمل آورد.

## مراجع

[1] J.E. Luco, O. Ozcelik, J.P. Conte, L.H. Mendoza, Experimental study of the dynamic interaction between

در این تحقیق آزمایش ارتعاش اجباری با رژیم بارگذاری جاروی فرکانسی از طریق بکارگیری یک دستگاه لرزاننده ۳۰ کیلو نیوتنی بر روی پی میز لرزان پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله انجام پذیرفته است. لرزاننده در قسمت میانی پی میز لرزان و شتاب‌نگارها در روی پی و در خارج از آن نصب و ثبت دامنه ارتعاشات بر روی پی و در محیط پیرامونی آن صورت گرفته است. از نتایج این آزمایش برای شناسایی خصوصیات دینامیکی پی و بررسی تغییرات پاسخ شتاب در روی زمین و در فواصل معین از لبه پی استفاده شده است.

با در نظر گرفتن این نکته که تحریک پی توسط لرزاننده مکانیکی مستقر در مرکز جرم آن (بصورت تقریبی) صورت پذیرفته، سیستم پی و خاک متصل به آن به صورت سازه تک درجه آزادی تحت بارگذاری هارمونیک مدل‌سازی شده است. به این ترتیب روابط دینامیکی حاکم بر حرکت جسم تک درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته و از طریق داده‌های ثبت شده و مدل رفتاری بکار گرفته شده خصوصیات دینامیکی پی (سختی و نسبت میرایی) محاسبه گردیده است. در این روش با استفاده از سعی و خطا به ایجاد همگرایی در نتایج حاصله برای سختی و میرایی پی در فرکانس‌های مختلف پرداخته شده و در نهایت مدل یک درجه آزادی با قابلیت کاربری در فرکانس‌های مختلف تحریک بدست آورده شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین پاسخ‌های تاریخیچه زمانی مدل عددی و شتاب‌های

- interaction with surrounding environmen, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2015. (In Persian).
- [4] J.P. Wolf, Dynamic Soil-Structure Interaction, illustrated ed., Prentice Hall, 1988.
- [5] R.W. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, 2 ed., McGraw-Hill, 1993.
- the foundation of the NEES/UCSD Shake Table and the surrounding soil: Reaction block response., Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(7) (2011).
- [2] B. Soltani, Soil-structure interaction in massive foundations, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2015. (In Persian)
- [3] F. Nabati, Sensitivity analysis of a shaking table subjected to

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. Nabati , M. Ziyaefar, Experimental Study on Vibration Transfer from Shaking Table to the Surrounding Environment, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 395-410.*

DOI: [10.22060/ceej.2018.13256.5356](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13256.5356)



