



Investigating the Effect of Loading Frequency on the Dynamic Properties of Sand-Tire Powder Mixture Using Shaking Table Tests

H. Bahadori* , A. Khalili

Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT: Nowadays, the use of waste tires has been expanded in various geotechnical projects to absorb and reduce the vibration caused by seismic and dynamic loads, and therefore it is crucial to study the effect of different parameters on their behavior and dynamic characteristics in combination with soil. So this study examined the effects of loading frequency on dynamic properties of sand-tire powder mixtures such as shear modulus (G) and damping ratio (D). A series of 1-g shaking table tests were performed on sand-tire powder mixture. Tire powders were added to the sand with 5%, 10%, 15% and 20% in gravimetric basis and with a relative density of zero were subjected to sinusoidal loading at frequencies of 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 and 9 Hz and input acceleration of 0.1g and 0.3g. The results showed that in all cases, the increase in frequency in the same cycles increased the shear modulus and the damping ratio. Also, with increasing shear strain, the shear modulus of the mixture decreased, but the damping ratio increased. On the other hand, by increasing the tire powder, the value of the shear modulus is reduced, but the amount of damping ratio is increased.

Review History:

Received: 2018-11-29

Revised: 2019-02-04

Accepted: 2019-02-05

Available Online: 2019-02-06

Keywords:

Sand

Tire Powder

Shaking Table

Shear Modulus

Damping Ratio

1. INTRODUCTION

Soil reinforcement is a useful technique for increasing the strength and stability of geotechnical structures and improving their performance. Several methods have been proposed for this purpose in various scientific sources and have been expanding over the years. The cost of each of these methods is very different, and the conditions under which they can be used depend on the nature, proximity of structures and construction installations. Attempts to find new methods of soil reinforcement and reduction of economic and administrative costs, as well as to reduce the environmental degradation by materials, have attracted the attention of researchers to the use of new recycled materials, such as the waste tire-derived materials. Due to its low specific gravity, high strength and compression, these materials have many applications in geotechnical projects such as reinforcing soft soil in road construction [1], controlling soil erosion [2], as aggregates in leach beds of landfills [3] and lightweight material for backfilling in retaining structures [4]. Another important application of waste tires in combination with soil, which has recently been of great interest, is their use as lightweight materials in retaining walls and embankments, machine foundations and railroad track beds in seismic zones. Having high damping characteristic, tires can be used as either soil alternative or mixed with soil to reduce vibration when seismic and dynamic loads are of great concern. So, to investigate the dynamic behavior of soil-tire mixture and

various factors affecting it, several studies have been done.

In this paper, 1-g shaking table tests were employed to investigate the effect of loading frequency content on dynamic properties of sand-tire mixture. The response obtained from mixture samples during loading with different frequencies and input accelerations were used to generate hysteresis loops of tested samples at different strain amplitudes. Then, hysteresis loops were used to determine the shear modulus and damping ratio at different strain levels. Finally, the effects of loading frequency on the changes of each parameter (G and D) were investigated.

2. METHODOLOGY

A hydraulic shaking table with a single degree of freedom, designed and constructed at the Crisis Management Center of Urmia University, was used to conduct the experiments. Firoozkuh No. 161 sand was used in all the experiments and tire powders were used as a soil reinforcement material. Tire powders are made from discarded tires that have been broken into pieces and sieved by an industrial tire-shredder system. Also, accelerometers were used to measure the acceleration of the input to the sample as well as to record the acceleration caused by the input excitation at different depths of the soil sample. The displacement transducers (LVDT sensors) were also used to measure linear displacement. To record information, all sensors were plugged into a 16-channel dynamic data logger ART-DL16D. Samples were constructed in both unreinforced (pure sand) and reinforced form and

*Corresponding author's email: h.bahadori@urmia.ac.ir



Table 1. Variable parameters in shaking table tests

Soil / Tire Powder	Frequency of loading (Hz)	Acceleration of loading (g)	Number of cycles	Total no.
Sand/0%	0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9	0.1, 0.3	30	14
Sand/ 5%	0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9	0.1, 0.3	30	14
Sand/10%	0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9	0.1, 0.3	30	14
Sand/15%	0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9	0.1, 0.3	30	14
Sand/20%	0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9	0.1, 0.3	30	14

with a relative density of zero. In reinforced samples, tire powders were added to the sand with 5%, 10%, 15% and 20% on a gravimetric basis. To prepare the sample, a wet tamping method was utilized in both the unreinforced (pure sand) and the reinforced (sand mixed with tire powders) specimens. In this method, first, the sand was mixed with 5% water. Samples were subjected to sinusoidal loading at frequencies of 0.5 to 9 Hz and input acceleration of 0.1g and 0.3g. Variable parameters in various experiments are listed in Table 1.

The main objective of this study is to obtain hysteresis loops for soil samples, using data recorded by accelerometers inside the soil in the shaking table tests, and then, to use these loops to determine the changes in the shear modulus and the damping ratio versus shear strain in the fixed number of cycles. In this study, the shear stress and shear strain values were calculated at 225 mm and 375 mm height from the model container floor and the hysteresis loops were plotted.

The shear stress at depth z is obtained from the solution of the integral as follows [5, 6]:

$$\tau(z) = \frac{1}{2} \rho z \left(\ddot{u}(0) + \ddot{u}(z) \right) \quad (1)$$

Where τ , ρ , z and \ddot{u} are the shear stress, soil density, depth of soil and acceleration, respectively.

Also, the following equation is used to calculate shear strain [5, 6]:

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \quad (2)$$

Where u is the displacement of soil.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Shear Modulus

Shear modulus can be obtained through a hysteresis loop. The shear modulus for an arbitrary loop is obtained from the following:

$$G = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (3)$$

Where τ and γ are the shear stress and shear strain, respectively.

The results showed that in the same cycles the shear modulus especially maximum shear modulus (G_{max}) increases as the frequency increases in all cases, and this increase is observed at lower frequencies and increases with increasing frequency. At a frequency of 9 Hz, the maximum shear modulus (G_{max}) has the most considerable value and at a frequency of 0.5 Hz, it has the lowest value. On the other hand, the shear modulus decreases with increasing shear strain. At a constant testing frequency, the sand mixture with 5% tire powder has a similar behavior to pure sand, and there is no significant difference between the shear modulus values. However, by increasing the tire powder, the shear modulus values of samples reduced so that the sample of sand with 20% tire powder has the lowest shear modulus between mixtures at all tested frequencies. As for the effect of input acceleration on the shear modulus, increasing the input acceleration increases the shear strain and consequently, decreases the shear modulus in all states. Also, at the higher input acceleration, the effects of tire powder on the shear modulus, notably the maximum observed shear modulus (G_{max}), is more pronounced.

3.2. Damping Ratio

The damping ratio for an ideal loop is obtained from the following equation. First, the energy lost per cycle (ΔW) and the energy stored in each cycle ($W_{elastic}$) must be calculated.

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_{elastic}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\oint \tau d\gamma}{0.125 \times \Delta \tau \times \Delta \gamma} \quad (4)$$

The results show that, in all cases, the damping ratio increases with shear strain. At low strain levels, the damping ratio values at various frequencies are low and yet very close. At higher strain levels, the increase in frequency increases the damping ratio. Also, by increasing the tire powder, the damping ratio values of samples increase so that the sample of sand with 20% tire powder has the highest damping ratio between mixtures. On the other hand, the damping ratio increases with input acceleration. Also, the effect of tire powder on the increase in the damping ratio is more obvious at higher acceleration. For example, the difference between the maximum damping ratio (at the highest shear strain) under the acceleration of 0.3g between sand mixtures with 5 and 10% of tire powder is about 12%, while at acceleration of 0.1g this value is about 8%. The damping ratio variations versus the shear strain are irregular and inconsistent. By observing relatively irregular and non-uniform trends of damping ratios versus the shear strain, a new parameter has been presented as the mean value of the damping ratio (D_m) by Sabermahani et al. [7] to compare the values of the damping ratios of reinforced models with each other. The mean damping ratio (D_m) was obtained by averaging the damping ratio values. The results showed that the value of the mean damping ratio is increased with the increase in loading frequency, and by increasing the content of tire powders.

4. CONCLUSIONS

In the present study, the effects of loading frequency on the dynamic properties of sand-tire powder mixture were investigated using shaking table tests. The following conclusions were drawn:

- 1) The shear modulus, especially maximum shear modulus (G_{max}) increases with loading frequency in the same number of cycles. The trend is more obvious at larger frequencies.
- 2) The effect of loading frequency on the damping ratio at low levels of strain is negligible, and at relatively large strain levels, damping ratio increases with loading frequency.
- 3) Mean damping ratio (D_m) is increased with increasing loading frequency and tire powder content in all samples.
- 4) The shear modulus reduced by increasing the tire powder. The reduction in the mixture with 5% tire powder is very low compared to pure sand, and the highest reduction is observed in the mixture with 10% to 15% of tire powder.
- 5) By increasing the tire powder, the damping ratio values of samples increased so that the mixture with 20% of the tire powder has the highest damping ratio.
- 6) In all cases, the shear strain increased by increasing the amplitude of the input acceleration, and as a result, the shear modulus decreased and the damping ratio increased. Also, in higher input acceleration, the difference between the values of shear modulus and damping ratio of sand mixtures with tire powder is more visible.

REFERENCES

- [1] Khabiri, MM., Khishdari, A., and Gheibi, E., 2016. "Effect of tyre powder penetration on stress and stability of the road embankments". *Road Mate Pavement Des*, 14, pp. 1-4.
- [2] Poh, PS., and Broms, B.B., 1995. "Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles". *J Perform Constr Facil*, 9(1), pp. 76-79.
- [3] Kaushik, M.K., Kumar, A., and Bansal, A., 2016. "Drainage performance of different sizes tire chips used alone and mixed with natural aggregates as leachate drainage layer material". *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), pp. 167-191.
- [4] O'Shaughnessy, V., and Garga, VK., 2000. "Tire-reinforced earthfill. Part 3: environmental assessment". *Can Geotech J*, 37(1), pp. 117-131.
- [5] Zeghal, M., Elgamal, A.W., Tang, H.T., and Stepp, J.C., 1995. "Lotung downhole array-II: Evaluation of soil nonlinear properties". *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), pp. 363-378.
- [6] Brennan, A.J., Thusyanthan, N.I., and Madabhushi, S.P., 2005. "Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge test", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), pp. 1488-1497.
- [7] Sabermahani, M., Ghalandarzadeh, A., and Fakher, A., 2009. "Experimental study on seismic deformation modes of reinforced - soil walls". *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), pp. 121-136.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Bahadori, A. Khalili, *Investigating the Effect of Loading Frequency on the Dynamic Properties of Sand-Tire Powder Mixture Using Shaking Table Tests*, Amirkabir J. Civil Eng., 52(6) (2020) 341-344.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15362.5895](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15362.5895)





بررسی تأثیر فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک با استفاده از آزمایش‌های میزلرزه

هادی بهادری*، امین خلیلی

گروه عمران، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۰۸
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۱۵
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

ماسه
پودر لاستیک
میزلرزه
مدول برشی
ضریب میرایی

خلاصه: امروزه استفاده از مشتقات تایرهای لاستیکی فرسوده در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی به منظور جذب و کاهش ارتعاش ناشی از بارهای لرزه‌ای و دینامیکی گسترش یافته و از این نظر بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار و مشخصات دینامیکی آن‌ها در ترکیب با خاک از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. لذا در این مقاله تأثیر فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک از قبیل مدول برشی (G) و ضریب میرایی (D) مورد بررسی قرار گرفته‌است. یک سری آزمایش میزلرزه ۱g بر روی مخلوط ماسه-پودر لاستیک انجام گرفت. نمونه‌های خاک در دو حالت غیر مسلح و مسلح به پودر لاستیک با درصدهای وزنی ۰/۵٪، ۱/۰٪، ۱/۵٪ و ۲/۰٪ پودر لاستیک، و در تراکم نسبی صفر درصد تحت بارگذاری سینوسی در فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹ هرتز و تحت شتاب ورودی ۰/۱g و ۰/۳g قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در همه حالات، افزایش در فرکانس بارگذاری در تعداد سیکل یکسان، باعث افزایش در مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی می‌شود. ضمن اینکه با افزایش کرنش برشی مدول برشی مخلوط کاهش یافته ولی نسبت میرایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش درصد پودر لاستیک، از مقدار مدول برشی کاسته شده ولی بر میزان ضریب میرایی افزوده می‌شود.

۱- مقدمه

هم‌چون مشتقات تایرهای لاستیکی فرسوده شده‌است. روش‌های گوناگونی وجود دارد که لاستیک‌های فرسوده را به تکه‌هایی با اندازه و اشکال متفاوت مانند پودر لاستیک و خرده لاستیک تبدیل می‌کنند. این مصالح بدلیل برخورداری از وزن مخصوص پایین، مقاومت و فشردگی بالا کاربردهای زیادی را در پروژه‌های ژئوتکنیکی دارند که از آن جمله می‌توان به مسلح‌سازی خاک‌های نرم بسترهای راهسازی [۱-۳]، کنترل فرسایش خاک [۴]، به عنوان لایه زهکش شیرابه در سازه‌های دفن زباله [۵] و هم چنین به عنوان مصالح سبک و پرکننده جهت خاکریزی پشت دیوارهای حائل [۶-۹] اشاره کرد. یکی دیگر از کاربردهای مهم مشتقات لاستیک در ترکیب با خاک که اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است استفاده از آنها به عنوان

تسلیح خاک یک تکنیک موثر در جهت بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها به منظور افزایش قابلیت استفاده از آن‌ها در پروژه‌های مختلف می‌باشد. روش‌های متعددی در منابع علمی مختلف برای این منظور پیشنهاد و در طول سالین متممادی گسترش یافته‌است. هزینه هر کدام از این روش‌ها بسیار متفاوت بوده و شرایطی که تحت آن قابل استفاده می‌باشند به ماهیت، نزدیکی سازه‌ها و تاسیسات احداثی وابسته است. تلاش برای یافتن روش‌های جدید مسلح‌سازی خاک‌ها از یک سو و کاهش هزینه‌های اقتصادی و اجرایی و همچنین کاستن از اثرات تخریبی محیط‌زیستی موادزائد از سوی دیگر باعث جلب توجه محققین به سوی کاربرد مصالح نوین بازیافتی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.bahadori@urmia.ac.ir



مصالح سبک در دیوارهای حائل و خاکریزها، پی‌های ماشین‌آلات و بستر مسیرهای راه‌آهن در مناطق لرزه‌خیز و مناطقی که بارهای دینامیکی قابل توجهی در آن‌ها وارد می‌شود می‌باشد. لاستیک‌ها با داشتن خواص میرایی بالا می‌توانند به‌عنوان جایگزین خاک و یا در ترکیب با خاک جهت جذب و کاهش ارتعاش ناشی از بارهای لرزه‌ای و سایر بارهای دینامیکی عمل کنند. لذا برای بررسی رفتار دینامیکی مخلوط خاک-لاستیک و عوامل مختلف موثر بر آن تاکنون تحقیقات متعددی انجام گرفته‌است. در این میان با توجه به اینکه خاک‌های ماسه‌ای، بخش عمده‌ای از رسوبات طبیعی را تشکیل داده و سازه‌های بسیاری نیز روی این‌گونه خاک‌های دانه‌ای بسته به شرایط بارگذاری و خصوصیات رفتاری خاک محل ساخته می‌شوند، بررسی رفتار مخلوط ماسه - لاستیک بخش عمده‌ای از تحقیقات انجام گرفته را به خود اختصاص داده‌است.

جمشیدی چناری و همکاران [۱۰] به منظور بررسی پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای مخلوط با خرده لاستیک تعدادی آزمایش برش مستقیم سیکلی انجام دادند. آزمایش‌ها در درصدهای وزنی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد خرده لاستیک و تحت دامنه‌های تغییرشکل برشی و فشارهای سربار متفاوت انجام گرفتند. نتایج نشان داد که در یک فشار سربار ثابت، افزایش در میزان خرده لاستیک باعث کاهش مدول برشی می‌شود. اما با افزایش خرده لاستیک از میزان ۲۰٪، مدول برشی افزایش می‌یابد. هم‌چنین ضریب میرایی با افزایش خرده لاستیک کاهش می‌یابد با این تفاوت که در خاک با ۲۰٪ خرده لاستیک، افزایش ناگهانی در میزان ضریب میرایی مشاهده می‌شود. جمشیدی چناری و همکاران هم‌چنین در مطالعات دیگری [۱۱-۱۳] با استفاده از آزمایش‌های ادنومتر و بارگذاری صفحه مقیاس بزرگ ویژگی‌های تراکم پذیری، نشست و ظرفیت باربری ماسه‌های مخلوط با لاستیک را مورد بررسی قرار داده‌اند.

ماشیری^۱ و همکاران [۱۴] تعدادی آزمایش المان خمشی^۲ بر روی نمونه‌های ماسه که با درصدهای مختلفی از لاستیک مخلوط شده‌اند انجام دادند. آزمایش‌ها در یک دانسیته نسبی اولیه ثابت ۵۰٪ و تحت فشارهای محصورکننده موثر اولیه متفاوت انجام گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مدول برشی مخلوط‌های مورد آزمایش با افزایش فشار محصورکننده افزایش یافته ولی با افزایش درصد

لاستیک کاهش می‌یابد.

سنتاکیس^۳ و آناستازیادیس^۴ [۱۵] یک سری آزمایش ستون تشدید بر روی نمونه‌های مخلوط ماسه-لاستیک با درصدهای وزنی ۱۵٪-۰٪ لاستیک در تنش‌های موثر ایزوتروپیک متغیر و حالات مختلف نمونه‌های آزمایش، انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش درصد لاستیک در مخلوط‌های مورد آزمایش، مدول برشی کاهش ولی ضریب میرایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر حالت نمونه آزمایش (خشک، مرطوب، اشباع کامل) تاثیر ناچیزی بر روی مدول برشی مخلوط داشته اما ضریب میرایی را به‌صورت قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. به نحوی که در حالت اشباع مقدار ضریب میرایی بیشتر از حالت مرطوب و در حالت مرطوب بیشتر از حالت خشک می‌باشد.

احسانی و همکاران [۱۶] به‌منظور بررسی تاثیر درصد لاستیک و نسبت اندازه دانه‌های لاستیک به دانه‌های خاک ($D_{5.0}/D_{5.0}$) بر روی پاسخ دینامیکی مخلوط ماسه-لاستیک تعدادی آزمایش ستون تشدید و سه‌محوری دینامیکی انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش درصد لاستیک به‌صورت قابل توجهی باعث کاهش مدول برشی و افزایش ضریب میرایی مخلوط می‌شود. هم‌چنین افزایش نسبت $D_{5.0}/D_{5.0}$ باعث افزایش در مدول برشی مخلوط می‌شود در حالی که تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار میرایی مخلوط ندارد.

ماشیری و همکاران [۱۷] در یک مطالعه دیگر به‌منظور بررسی تاثیر سطح کرنش برشی، تعداد سیکل‌های بارگذاری و فشارمحصور کننده موثر اولیه بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک تعدادی آزمایش سه محوری سیکلی با درصد جرمی ۳۵٪ لاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که مدول برشی مخلوط با افزایش فشارمحصور کننده افزایش یافته ولی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و افزایش کرنش برشی کاهش می‌یابد. هم‌چنین ضریب میرایی در فشارمحصور کننده پایین به صورت قابل توجهی تحت تاثیر تغییرات کرنش برشی قرار نمی‌گیرد اما در فشار محصور کننده بالا، با افزایش کرنش برشی و افزایش تعداد سیکل‌ها، افزایش می‌یابد.

اگرچه مطابق موارد فوق، تحقیقات متعددی در رابطه با تاثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار دینامیکی مخلوط ماسه-لاستیک

3 Senetakis
4 Anastasiadis

1 Mashiri
2 Bender elements



شکل ۱. محفظه مدل بر روی میز لرزه
Fig. 1. Model container on the shaking table

امواج ورودی و امواج تولید شده وجود دارد. میز لرزه قابلیت کار با حداکثر شتاب $5g$ و حداکثر فرکانس ۲۰ هرتز را دارا می‌باشد. همچنین حداکثر تغییر مکانی که به این سیستم می‌تواند وارد شود ۲۴۰ میلی‌متر است. این دستگاه دارای دو موتور محرکه بوده که هر کدام سرعتی معادل ۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را می‌توانند ایجاد کنند و دستگاه این قابلیت را دارد که به صورت تک یا دو موتور سرعت را در سیستم شبیه‌سازی کند. مدل‌های خاک درون یک محفظه مدل که بر روی میز لرزه قرار می‌گیرد ساخته می‌شوند. این محفظه از ورق‌های پلکسی گلس با ضخامت ۲ سانتی‌متر و به ابعاد $180 \times 60 \times 80$ سانتی‌متر مکعب ساخته شده است. شکل ۱ محفظه مدل را بر روی میز لرزه نشان می‌دهد.

۲-۲- ماسه فیروزکوه

از ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ در تمامی آزمایش‌ها استفاده شده است. ماسه فیروزکوه دارای رنگی متمایل به طلایی بوده و از دانه‌بندی یکنواختی برخوردار است که از این جهت شبیه به ماسه Toyora می‌باشد. بعضی از مشخصات فیزیکی این ماسه در جدول ۱ ذکر شده است.

۲-۳- پودر لاستیک

پودر لاستیک از خرد نمودن لاستیک‌های فرسوده ماشین آلات سبک و سنگین توسط خردکن‌های صنعتی و سرد نمودن آن حاصل می‌شود. لاستیک فرسوده شامل سیم فلزی، نخ تاپر و سایر ناخالصی‌ها

انجام گرفته است، اما با توجه به اینکه بارهای دینامیکی از منابع متعددی مانند زلزله، ترافیک، ساختمان‌های بلند، ماشین‌آلات، امواج، ریل‌های راه‌آهن با سرعت بالا و مخازن نفت و با فرکانس‌های مختلف و متفاوت ممکن است بر خاک وارد شوند تا کنون تحقیق مستقلی در ارتباط با تاثیر فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط خاک-لاستیک صورت نگرفته است. لذا در این مقاله با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه $1g$ تاثیر فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای مسلح به پودر لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. از پاسخ بدست آمده از مدل‌های مخلوط ماسه-پودر لاستیک در طول بارگذاری با فرکانس‌های مختلف برای تولید حلقه‌های هیستریزس نمونه‌های آزمایش شده در دامنه‌های مختلف کرنش استفاده شده و سپس حلقه‌های هیستریزس تولید شده برای تعیین ضریب میرایی و مدول برشی در سطوح مختلف کرنش، مورد استفاده قرار می‌گیرند. و در نهایت تاثیر فرکانس بارگذاری بر روی تغییرات هر کدام از پارامترهای فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- وسایل و تجهیزات آزمایش

۲-۱- میز لرزه

از یک میز لرزه هیدرولیکی دارای یک درجه آزادی که در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه طراحی و ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. ابعاد میز لرزه ۲ در ۳ مترمربع بوده و حداکثر ظرفیت بارگذاری آن ۵ تن می‌باشد و قادر به شبیه‌سازی دو نوع بارگذاری هارمونیک و زلزله می‌باشد که تطابق لازم بین

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه [۲۰]

Table 1. Physical properties of Firoozkuh Sand

نام ماسه	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	G _s	F _c (%)	C _u	C _c	e _{max}	e _{min}
فیروزکوه ۱۶۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۳	۲/۶۵	۱	۱/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۷۴	۰/۵۴۸

جدول ۲. مشخصات فیزیکی پودر لاستیک استفاده شده در آزمایش‌ها

Table 2. Physical properties of Tire Powder

نام مصالح	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	G _s
پودر لاستیک	۰/۲۱	۰/۴۱	۰/۵۹	۰/۷	۳/۳۳	۱/۱۴۳	۰/۸۶

و مسلح به پودر لاستیک با درصدهای وزنی ۰/۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰. پودر لاستیک، و در تراکم نسبی صفر درصد ساخته شده‌اند. برای ساخت نمونه در هر یک از دو حالت مسلح و غیرمسلح از روش مرطوب برای آماده‌سازی استفاده شده‌است. در این روش ابتدا مصالح با ۰/۵٪ رطوبت مخلوط شده و به‌صورت یکنواخت و از یک ارتفاع ثابت بر روی سطح محفظه ریخته می‌شوند تا پروفیل یکنواختی به‌دست آید. مطابق مطالعات مشابه انجام شده در رابطه با نحوه ساخت نمونه [۲۲]، نمونه‌های خاک در چهار ارتفاع یکسان ۱۵۰ میلی‌متری تا رسیدن به ارتفاع کل ۶۰۰ میلی‌متر ساخته می‌شوند. سپس هر لایه به مقدار مشخصی تراکم می‌شود. به‌منظور اطمینان از پیوند مناسب بین دولایه خاک و عدم ایجاد لایه بندی، سطح هر لایه تراکم شده باید توسط کاردک خراشیده شود. شتاب سنج‌های A_۱، A_۲ و A_۳ در اعماق ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متری از کف محفظه درون خاک و در وسط لایه قرار داده می‌شوند. هم‌چنین یک شتاب سنج A نیز به‌منظور اندازه‌گیری شتاب پایه به‌صورت ثابت به میز لرزه متصل می‌شود. سنسورها باید قبل از اینکه مدفون شوند کالیبره گردیده و پس از انجام کنترل‌های لازم به دستگاه ثبت و جمع‌آوری اطلاعات متصل گردند. تراکم خاک‌های اطراف شتاب‌سنج‌های قرار داده شده درون خاک برای جلوگیری از صدمه دیدن و جابجایی آنها باید با دقت بیشتری صورت گیرد. یک جابجایی‌سنج (L_۱) بر روی سطح خاک در ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متری از کف محفظه قرار داده می‌شود تا جابجایی‌های قائم سطح خاک را اندازه‌گیری کند. پاسخ خاک به‌صورت شتاب در اعماق مختلف و به‌صورت جابجایی در سطح خاک ثبت می‌شود. شکل شماتیک نمونه‌های آزمایش همراه با ابزارگذاری در شکل ۲ نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه محفظه صلب مدل

می‌باشد که در جریان سرنده نمودن برخی از ناخالصی‌ها از آن جدا می‌شود. پودر لاستیک مورد استفاده در آزمایش‌ها فاقد سیم فلزی، نخ تایلر و سایر ناخالصی‌ها می‌باشد. برخی از مشخصات فیزیکی پودر لاستیک در جدول ۲ ذکر شده‌است.

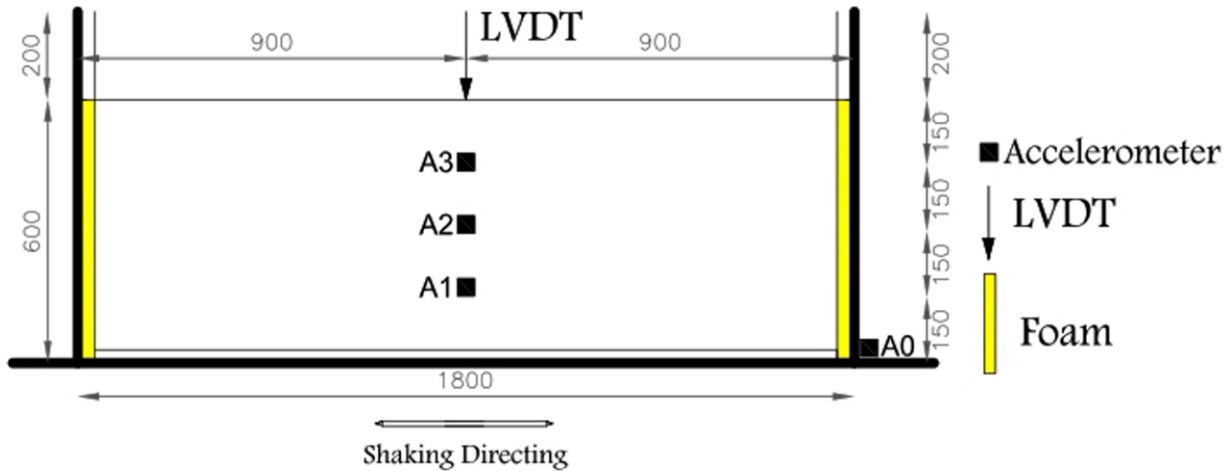
۲-۴- ابزارگذاری

در این مطالعه از سنسورهای شتاب‌سنج جهت اندازه‌گیری شتاب ورودی به مدل و هم‌چنین ثبت تغییرات شتاب در اعماق مختلفی از خاک استفاده شده‌است. برای جلوگیری از کج‌شدن سنسورها در حین ساخت و آزمایش و هم‌چنین برقراری تماس پایدارتر با توده خاک، پایه‌هایی متشکل از دو صفحه با ابعاد ۵×۵ و ۲×۵ سانتی‌متر مربع ساخته شده و به کف سنسورها به‌صورت محکم چسبانده می‌شود. هم‌چنین از سنسور جابجایی‌سنج (LVDT)، برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های خطی استفاده می‌شود. جهت ثبت اطلاعات، همه سنسورها به دستگاه ثبت و جمع‌آوری اطلاعات^۱ دینامیکی ۱۶ کاناله ART-DL۱۶D متصل می‌شوند. این دستگاه قادر است تغییر ولتاژهای ایجاد شده توسط سنسورهای فوق‌الذکر را لحظه به لحظه در طول آزمایش ثبت کند [۱۸ و ۱۹].

۳- ساخت نمونه و روش انجام آزمایش

ابتدا برای جلوگیری از انعکاس امواج تولید شده در اثر لرزش و تحت تاثیر قرار دادن نمونه، ناشی از صلب بودن دیواره‌های انتهایی محفظه مدل میز لرزه از یک لایه فوم به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده می‌شود [۲۱]. نمونه‌های خاک در دو حالت غیرمسلح (ماسه خالی)

1 Data Logger



شکل ۲. شکل شماتیک نمونه‌های آزمایش همراه با ابزارگذاری
Fig. 2. Schematic form of test samples with instrumentation

جدول ۳. پارامترهای متغیر در آزمایش‌های میز لرزه
Table 3. Variable parameters in shaking table tests

مصلح	فرکانس بارگذاری (هرتز)	شتاب بارگذاری	تعداد سیکل‌ها	تعداد کل آزمایش‌ها
ماسه خالی	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹	۰/۳g - ۰/۱g	۳۰	۱۴
ماسه با ۵٪ پودر لاستیک	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹	۰/۳g - ۰/۱g	۳۰	۱۴
ماسه با ۱۰٪ پودر لاستیک	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹	۰/۳g - ۰/۱g	۳۰	۱۴
ماسه با ۱۵٪ پودر لاستیک	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹	۰/۳g - ۰/۱g	۳۰	۱۴
ماسه با ۲۰٪ پودر لاستیک	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹	۰/۳g - ۰/۱g	۳۰	۱۴

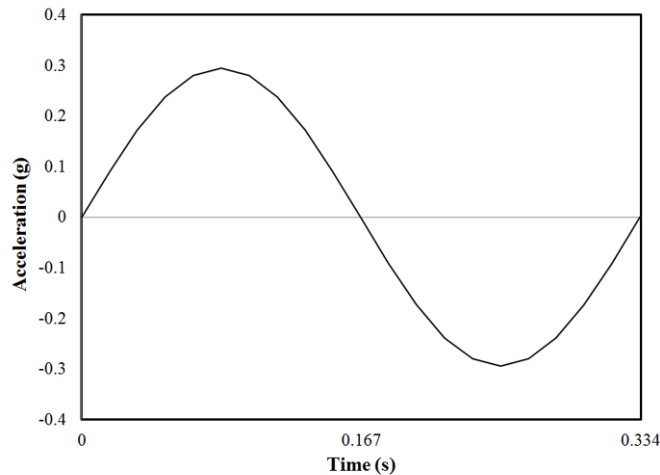
می‌تواند پاسخ دینامیکی مدل‌های آزمایش را تحت تاثیر قرار دهد [۲۳] لذا به منظور کاهش اثرات منفی آن، داده‌های شتاب در محدوده ۰/۰۵ تا ۲۰ هرتر فیلتر می‌شوند. در این مطالعه ۷۰ آزمایش میز لرزه به منظور بررسی تاثیر فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک انجام گرفته است. کلیه مراحل ساخت نمونه برای هر آزمایش به صورت مجزا صورت گرفته و هر آزمایش بر روی یک نمونه جدید انجام گرفته است. پارامترهای متغیر در آزمایش‌های مختلف در جدول ۳ ذکر شده است. نمونه‌های آزمایش تحت بارگذاری سینوسی (شکل ۳)، فرکانس‌های ۰/۵ تا ۹ هرتز و شتاب‌های ورودی ۰/۱g و ۰/۳g قرار گرفته‌اند.

۴- رابطه تنش- کرنش هیستریزس و پارامترهای دینامیکی خاک

هدف اصلی از این مطالعه، به دست آوردن حلقه‌های هیستریزس برای نمونه‌های آزمایش، با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط

شتاب‌سنج‌های قرار داده شده درون نمونه در آزمایش‌های میز لرزه و سپس استفاده از آن‌ها برای تعیین تغییرات مدول برشی و ضریب میرایی در برابر کرنش برشی در تعداد سیکل ثابت می‌باشد، قابل ذکر است کوچکترین قسمت موج که به صورت مداوم تکرار می‌شود، سیکل نامیده شده و فرکانس، تعداد سیکل‌هایی است که در یک ثانیه تولید می‌شود. (برای مقایسه، تعداد سیکل‌ها در همه فرکانس‌ها یکسان در نظر گرفته شده است (جدول ۳)). مطالعات مشابهی قبلاً با استفاده از مفاهیم فوق توسط محققین مختلف برای تعیین پارامترهای دینامیکی خاک‌ها انجام گرفته است [۱۸ و ۲۴-۲۷]. در یک مطالعه که توسط صابرمهانی و همکاران [۱۹] انجام گرفته، برای تعیین پارامترهای دینامیکی از داده‌های ثبت شده توسط شتاب‌سنج و LVDT به همراه معادله تیربرشی یک‌بعدی ارائه شده توسط زغال^۱ و همکاران [۲۸] استفاده شده است. هم‌چنین الگاما^۲

1 .Zeghal
2 .Elgama



شکل ۳. نمونه‌ای از شکل موج سینوسی در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی ۰/۳g برای دوره زمانی ۱ پرئود
 Fig. 3. Typical sinusoidal waveform at loading frequency of 3 Hz and acceleration of 0.3g (for the time of 1 period)

را از آزمایش‌های مدل (میزلرزه یا سانتریفیوژ) بدست آورد. دلیل آن این است که سنسورهای شتاب سنج جهت ثبت صحیح داده های زلزله می بایست در عمق مناسبی قرار گیرند تا تماس کافی با جسم خاک داشته باشند. بنابراین جهت حل مشکل فوق پیشنهاد شده است که تاریخچه زمانی شتاب سطح زمین با برون‌یابی خطی داده‌های شتاب جفت سنسورهای مدفون در عمق با استفاده از رابطه زیر [۳۰] به‌دست‌آید:

$$\ddot{u}(z) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) \quad (3)$$

که در رابطه فوق، $\ddot{u}(z)$ شتاب در موقعیت Z و Z_1 موقعیت نقطه i می باشد.

با جای‌گذاری $Z = 0$ در رابطه فوق شتاب در سطح زمین برابر خواهد بود با [۳۰]:

$$\ddot{u}(0) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(0 - z_1) \quad (4)$$

بنابراین، تنش برشی در عمق Z از حل انتگرال رابطه (۲) به‌صورت زیر [۳۰] حاصل می‌شود:

$$\tau(z) = \frac{1}{2} \rho z (\ddot{u}(0) + \ddot{u}(z)) \quad (5)$$

و همکاران [۲۹] و برنان^۱ و همکاران [۳۰] نیز از معادله تیربرشی یک‌بعدی برای تعیین پارامترهای دینامیکی در آزمایشات دینامیکی سانتریفیوژ مقیاس کوچک استفاده کرده‌اند. علاوه بر آن در یک مطالعه اخیر، بهادری و فرضعلیزاده [۳۱] از مفاهیم فوق برای بررسی تاثیر پودر و تکه‌های لاستیک بر روی پارامترهای دینامیکی ماسه‌های اشباع استفاده کرده‌اند.

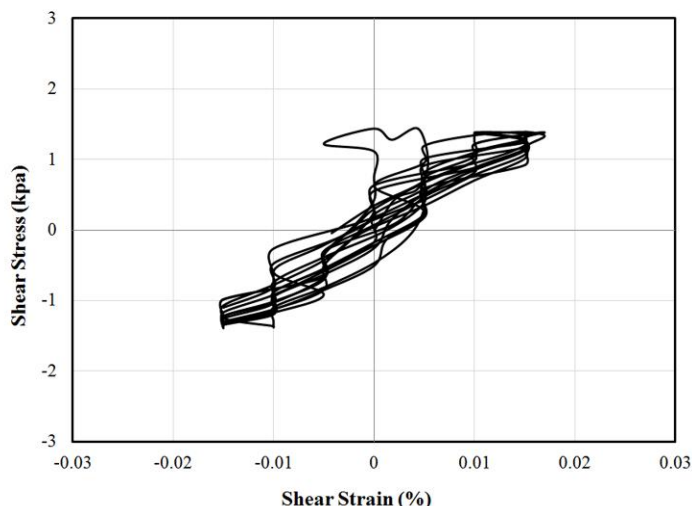
معادله تیربرشی یک‌بعدی که نخستین بار توسط زغال و همکاران [۲۸] ارائه شده‌است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \ddot{u} \quad (1)$$

که در آن، \ddot{u} شتاب در عمق Z و ρ دانسیته خاک می‌باشد. از معادله تیربرشی، تنش برشی τ در عمق دلخواه Z با انتگرال‌گیری از حاصل‌ضرب دانسیته $\rho(z)$ در شتاب $\ddot{u}(z)$ در بازه $(0, Z)$ به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau(z) = \int_0^z \rho(z) \ddot{u}(z) dz \quad (2)$$

به‌طور معمول مقدار تنش برشی از اندازه‌گیری‌های میدانی که با استفاده از شتاب سنج‌هایی که تا سطح زمین ادامه می‌یابد به دست می‌آید. اما به‌ندرت می توان تاریخچه شتاب سطحی قابل اطمینانی



شکل ۴. نمونه‌ای از رفتار تنش - کرنش نمونه ماسه خالی در ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متری، فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی ۰/۳g (برای ۱۰ سیکل اول)
Fig. 4. Typical shear stress-strain behavior of pure sand sample at elevation 225mm at loading frequency of 3 Hz and input acceleration of 0.3g

در این مطالعه مقادیر تنش برشی و کرنش برشی در ارتفاع های ۲۲۵ میلی‌متری (نقطه میانی شتاب‌سنج‌های A_1 و A_2) و ۳۷۵ میلی‌متری (نقطه میانی شتاب‌سنج‌های A_3 و A_4) از کف محفظه مدل محاسبه و حلقه‌های هیستریزس ترسیم شدند. شکل ۴، نمونه‌ای از یک حلقه هیستریزس رسم شده تحت فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی $0.3g$ در ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متری از کف محفظه مدل را نشان می‌دهد (جهت چرخش حلقه به صورت ساعت‌گرد می‌باشد).

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مدول برشی

مدول برشی به صورت نسبت دامنه تنش برشی به دامنه کرنش برشی تعریف می‌شود که می‌توان آن را از طریق یک حلقه هیستریزس به دست آورد. مدول برشی برای یک حلقه دلخواه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \quad (7)$$

با توجه به اینکه منحنی های γ -D و γ -G از پارامترهای ورودی مهم در آنالیزهای دینامیکی می‌باشند، لذا پس از محاسبه مدول برشی، تغییرات مدول برشی در برابر کرنش برشی مورد بررسی قرار

که در رابطه فوق، $\tau(Z)$ تنش برشی در عمق Z ، ρ دانسیته خاک، Z عمق خاک و $\ddot{u}(Z)$ شتاب در موقعیت Z می‌باشد.

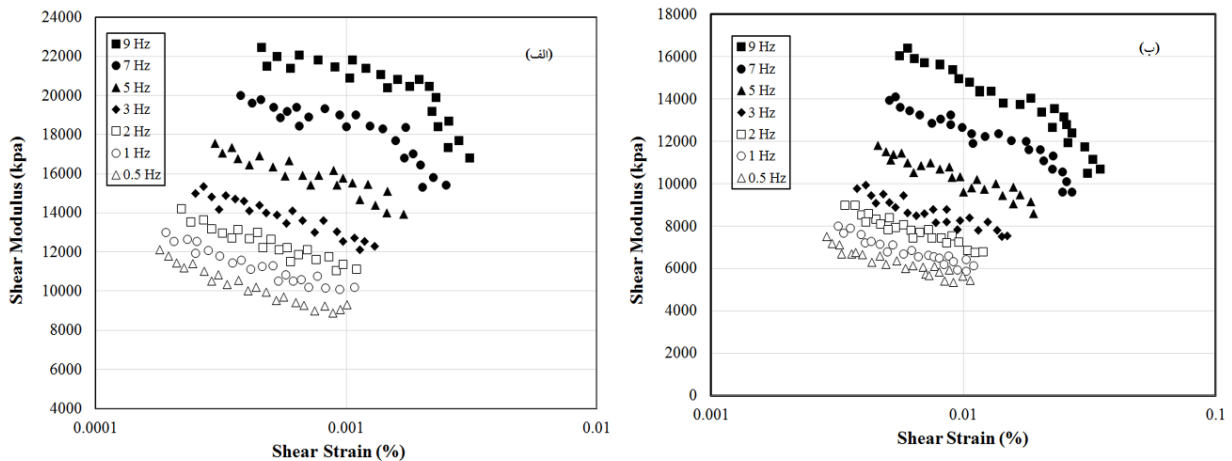
در ادامه، جهت محاسبه کرنش برشی در ابتدا می‌بایست جابجایی‌ها را از داده‌های شتاب ثبت شده توسط سنسورهای شتاب سنج به دست آورد. داده‌های شتاب به کار برده شده جهت محاسبات جابجایی از چند دهم ثانیه قبل از اعمال بارگذاری لرزه‌ای تا مقدار زمان مشخصی بعد از بارگذاری ادامه می‌یابد. با این عمل آن قسمت از داده‌ها که مربوط به نویز دستگاه‌های اندازه‌گیری شتاب می‌باشد شناسایی شده و در مرحله فیلترینگ داده‌ها حذف می‌گردد. جهت محاسبه سرعت از داده‌های شتاب انتگرال‌گیری می‌شود ولی قبل از انجام این پروسه، داده‌های شتاب در فرکانس‌های بالا جهت حذف نویز و در فرکانس‌های پایین جهت کاستن از خطای جابجایی محور انتگرال‌گیری فیلتر می‌شوند (۰/۵ - ۲۰ هرتز). بعد از محاسبه سرعت، داده‌های حاصله دوباره در محدوده فرکانسی ذکر شده فیلتر می‌شوند. سپس جابجایی با انتگرال‌گیری از این داده‌ها حاصل می‌شود. از رابطه زیر جهت محاسبه کرنش برشی استفاده می‌شود:

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \quad (8)$$

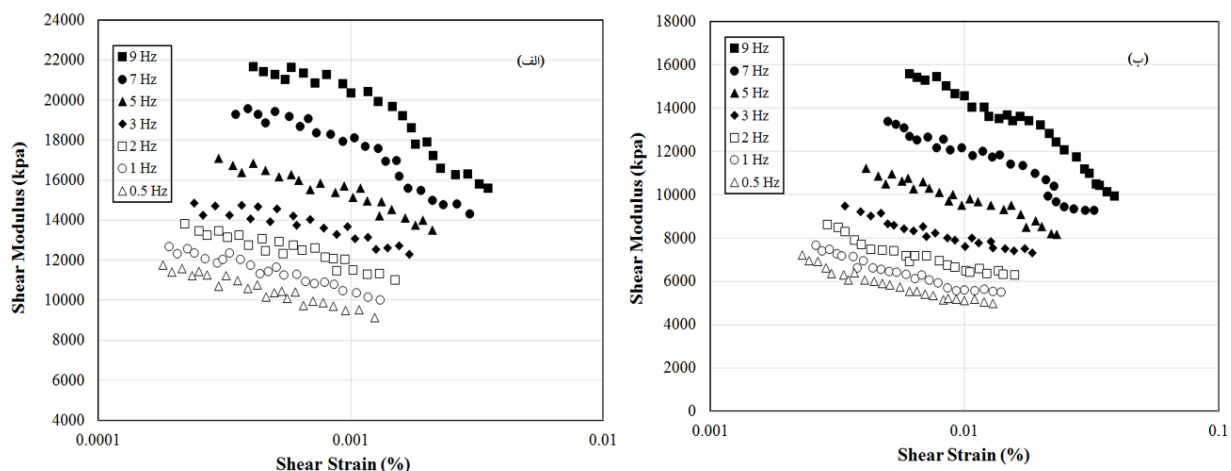
که در رابطه فوق، γ نشان دهنده کرنش برشی، u میزان جابجایی و Z عمق خاک می‌باشد.

شکل ۱۰، تحت شتاب $0.1g$ و نمونه با ۱۰ درصد پودر لاستیک، مقدار G_{max} از فرکانس ۱ به ۲ هرتز، ۸ درصد و از فرکانس ۵ به ۷ هرتز، ۱۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین تحت شتاب $0.3g$ و نمونه با ۲۰ درصد پودر لاستیک، میزان افزایش G_{max} از فرکانس ۱ به ۲ هرتز، ۱۴ درصد بوده در حالی که از فرکانس ۵ به ۷ هرتز، در حدود ۲۰ درصد می‌باشد. مشابه این روند در بقیه نمونه‌های مورد آزمایش نیز مشاهده می‌شود. از طرف دیگر با افزایش کرنش برشی میزان مدول برشی کاهش می‌یابد. قابل ذکر است با توجه به اینکه همه نمونه‌ها در حالت خشک آزمایش شده‌اند لذا دامنه تغییرات کرنش برشی محدود می‌باشد.

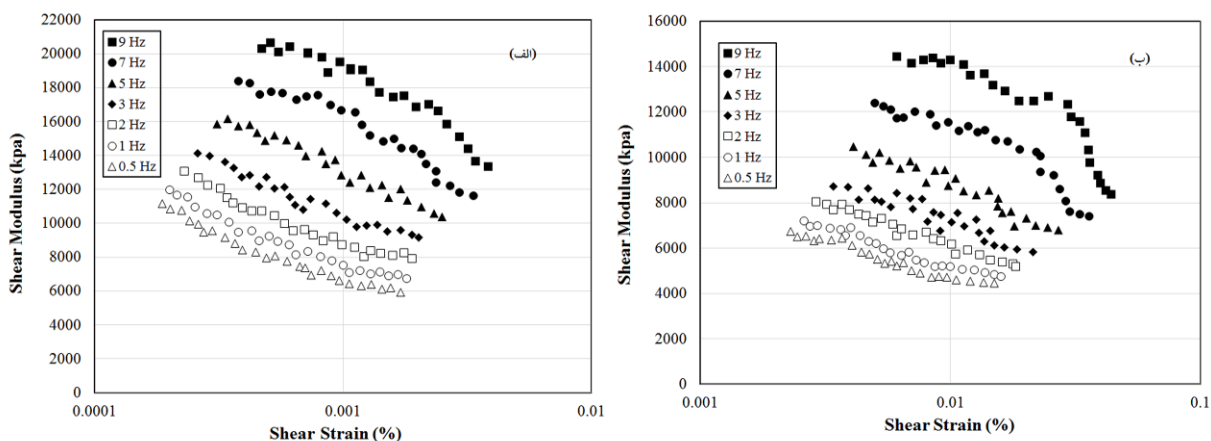
گرفته‌است. شکل‌های ۵-۹ رابطه بین مدول برشی و کرنش برشی را در حالات مختلف فرکانس و شتاب بارگذاری برای نمونه‌های مخلوط ماسه با درصد‌های مختلف پودر لاستیک نشان می‌دهند. بر اساس نتایج بدست‌آمده، در همه حالات با افزایش فرکانس بارگذاری در تعداد سیکل یکسان، مدول برشی به‌ویژه مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) افزایش می‌یابد، به‌نحوی که در فرکانس ۹ هرتز، مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) دارای بیشترین مقدار و در فرکانس 0.5 هرتز دارای کمترین مقدار می‌باشد. هم چنین نرخ این افزایش در فرکانس‌های پایین کمتر بوده ولی با افزایش فرکانس به‌ویژه از فرکانس ۳ هرتز به بعد میزان این افزایش بیشتر مشاهده می‌شود. به نحوی که مطابق



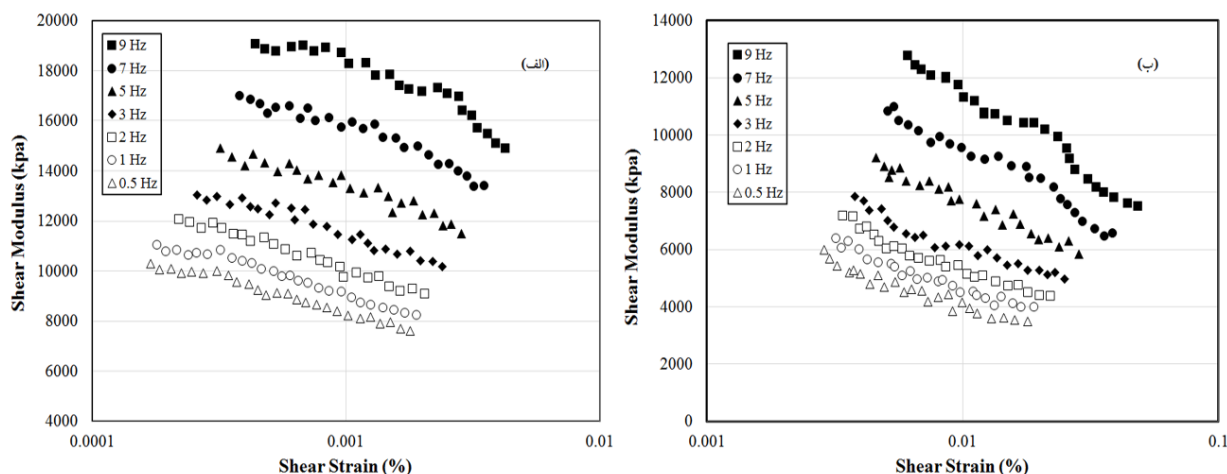
شکل ۵. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه ماسه خالی (غیرمسلح) تحت شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$
 Fig. 5. Variation of shear modulus with shear strain at different loading frequency for pure sand at input acceleration of (a) $0.1g$ (b) $0.3g$



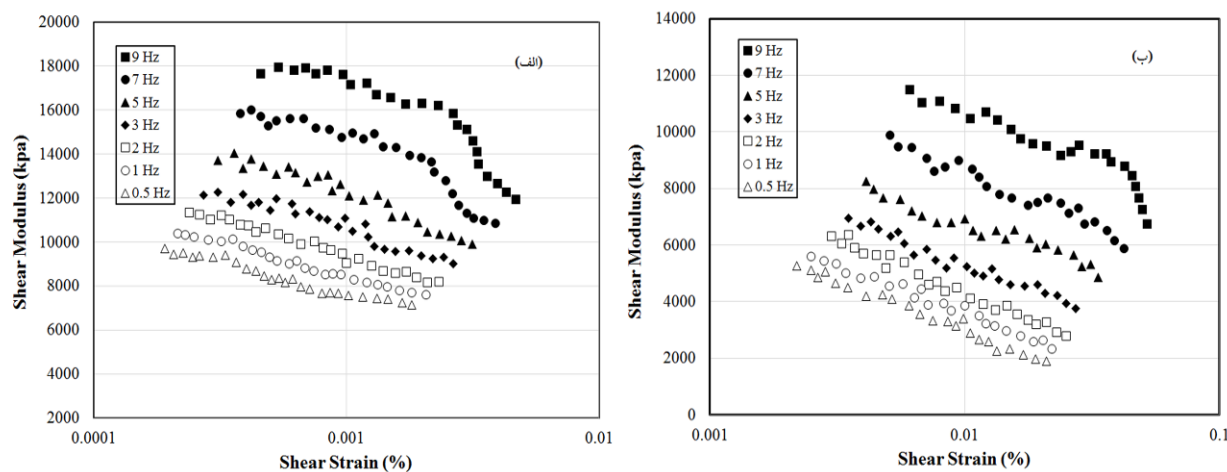
شکل ۶. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۵٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$
 Fig. 6. Variation of shear modulus with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 5% tire powder at input acceleration of (a) $0.1g$ (b) $0.3g$



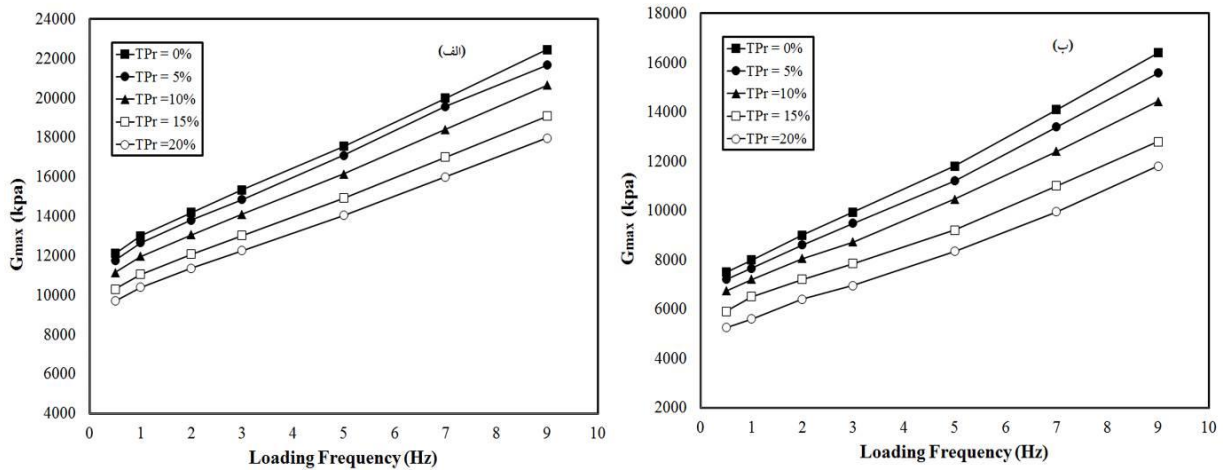
شکل ۷. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۱۰٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳g
 Fig. 7. Variation of shear modulus with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 10% tire powder at input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g



شکل ۸. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۱۵٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳g
 Fig. 8. Variation of shear modulus with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 15% tire powder at input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g



شکل ۹. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۲۰٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳g
 Fig. 9. Variation of shear modulus with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 20% tire powder at input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g



شکل ۱۰. تغییرات مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) در برابر فرکانس بارگذاری در شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$ (نشان دهنده درصد پودر لاستیک می باشد)

Fig. 10. Variation of G_{max} at different loading frequency at input acceleration of (a) $0.1g$ (b) $0.3g$

بارگذاری بر روی مدول برشی در درصدهای مختلف پودر لاستیک مشابه بوده و از این نظر تفاوتی وجود ندارد. در مورد تاثیر شتاب ورودی بر روی مدول برشی نیز همان طور که از شکل های ۵ تا ۹ در فرکانس ها و نمونه های با درصد پودر لاستیک متفاوت مشخص است، با افزایش شتاب ورودی، کرنش برشی افزایش یافته و در نتیجه از میزان مدول برشی در همه حالات کاسته می شود (مقادیر مدول برشی در همه حالات تحت شتاب ورودی $0.1g$ بیشتر از مقادیر مدول برشی تحت شتاب ورودی $0.3g$ می باشد). هم چنین در شتاب ورودی بالاتر تاثیر پودر لاستیک بر روی کاهش مقادیر مدول برشی به ویژه مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) بیشتر دیده می شود به نحوی که در شتاب ورودی $0.3g$ تفاوت بین مقادیر مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) در فرکانس های مختلف، بین نمونه های با پودر لاستیک ۱۰ و ۱۵ درصد، در حدود ۱۰٪ بوده در حالیکه این میزان در شتاب ورودی $0.1g$ ، در حدود ۷٪ می باشد.

۵-۲- ضریب میرایی

ضریب میرایی برای یک حلقه ایده آل از رابطه زیر به دست می آید. که نخست باید انرژی تلف شده در هر سیکل (ΔW) و انرژی ذخیره شده در هر سیکل ($W_{elastic}$) را محاسبه نمود [۱۸ و ۳۰]:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_{elastic}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\oint \tau d\gamma}{0.125 \times \Delta \tau \times \Delta \gamma} \quad (۸)$$

در یک فرکانس ثابت، نمونه مخلوط ماسه با ۵ درصد پودر لاستیک رفتار مشابهی با نمونه ماسه خالی داشته و تفاوت قابل توجهی بین مقادیر مدول برشی آن ها وجود ندارد. اما با افزایش درصد پودر لاستیک، از میزان مدول برشی کاسته می شود به نحوی که نمونه مخلوط ماسه با ۲۰ درصد پودر لاستیک دارای کمترین مدول برشی بین مخلوط ها با درصدهای مختلف پودر لاستیک در همه فرکانس های مورد آزمایش می باشد. جمشیدی چناری و همکاران [۱۰] با انجام آزمایشات برش مستقیم سیکلی بر روی نمونه های ماسه ای مسلح به خرده لاستیک نتایج مشابهی را گزارش نمودند. آنان اذعان داشتند که مدول برشی نمونه ها با افزایش درصد خرده لاستیک کاهش می یابد. هم چنین در مطالعه صورت گرفته توسط برارا و همکاران [۳۲] بر روی نمونه های ماسه مخلوط با لاستیک با استفاده از آزمایش های المان خمشی نیز نتایج مشابه حاصل شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه، با افزایش نسبت لاستیک در ماسه، میزان مدول برشی کاهش می یابد.

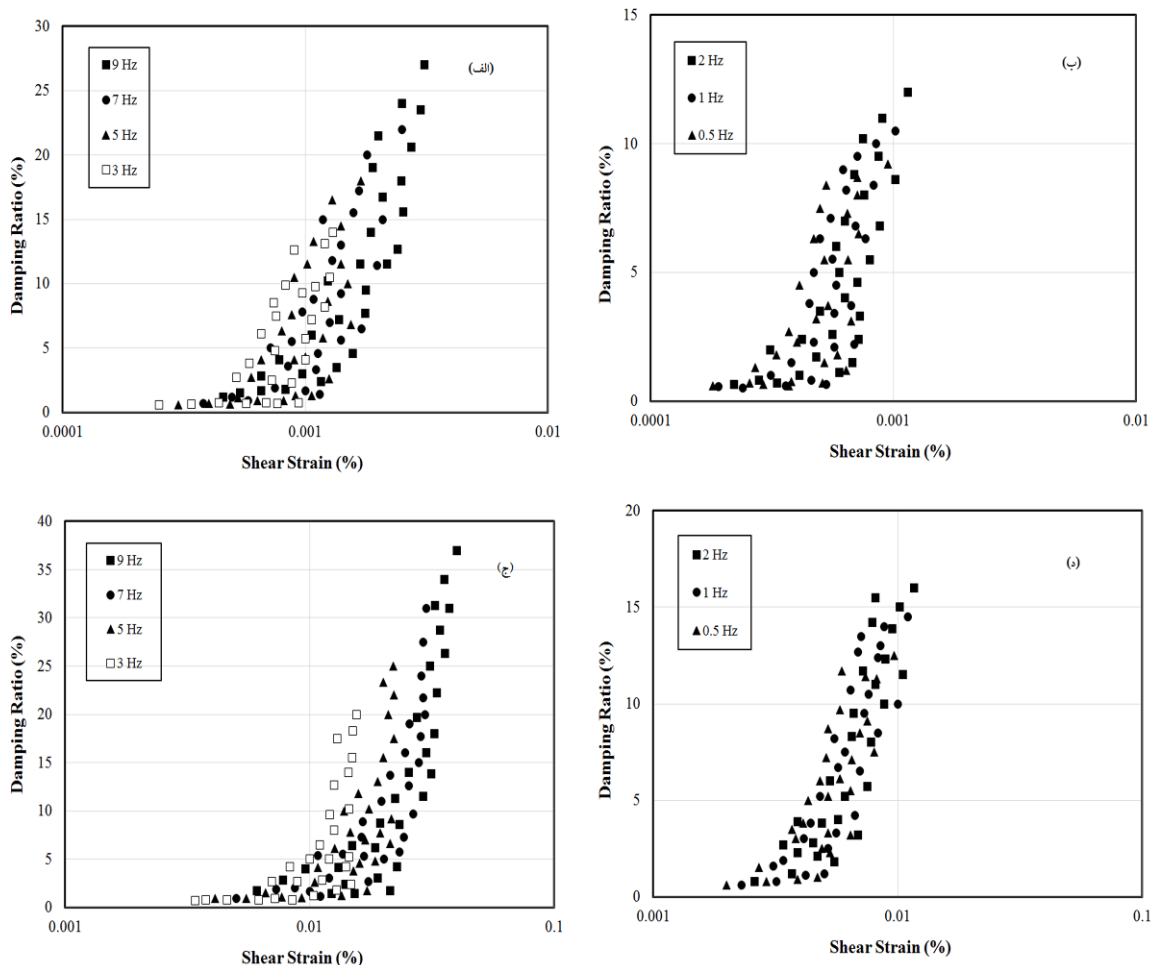
از طرف دیگر افزایش درصد پودر لاستیک باعث افزایش کرنش برشی مخلوط های ماسه و پودر لاستیک می شود. هم چنین بیشترین میزان (نرخ) کاهش در مدول برشی از درصد پودر لاستیک ۱۰٪ به ۱۵٪ اتفاق می افتد به نحوی که به عنوان مثال تحت شتاب $0.3g$ ، میزان کاهش G_{max} در نمونه های با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر لاستیک نسبت به یکدیگر در فرکانس های مختلف در حدود ۷، ۱۰ و ۸ درصد می باشد. قابل ذکر است که میزان تاثیر فرکانس

فرکانس‌های بالاتر بیشتر مشاهده می‌شود به نحوی که در فرکانس‌های پایین، افزایش در فرکانس باعث افزایش نسبتاً کمی در مقدار ضریب میرایی می‌شود.

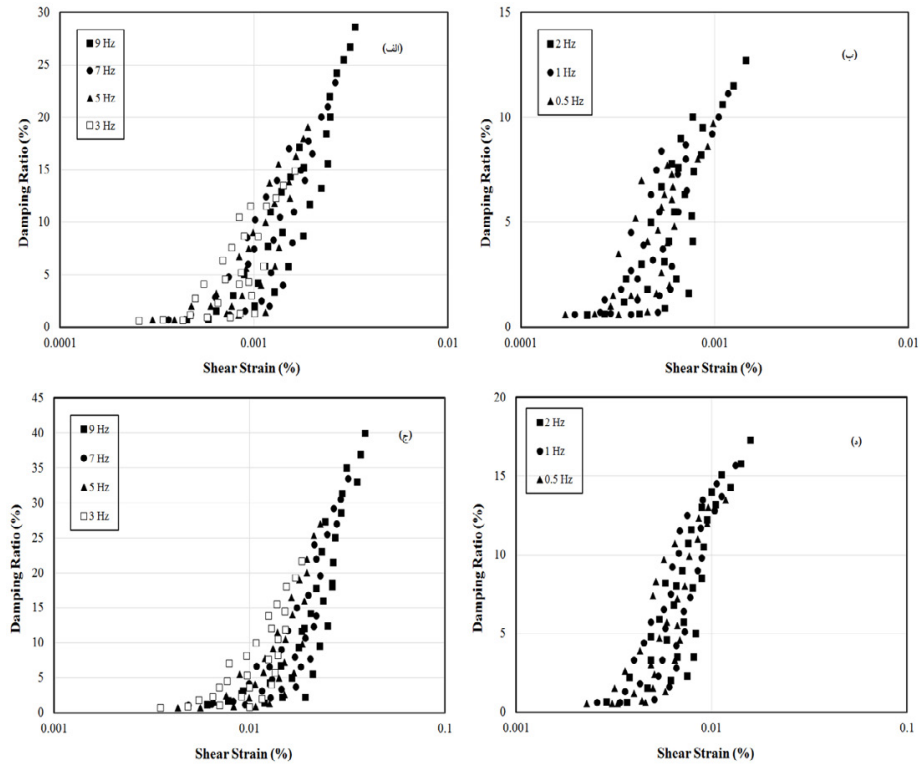
از طرف دیگر افزایش در درصد پودر لاستیک نیز باعث افزایش ضریب میرایی مخلوط ماسه - پودرلاستیک می‌شود. به نحوی که در یک فرکانس ثابت، مخلوط با ۲۰٪ پودرلاستیک دارای بیشترین ضریب میرایی می‌باشد که این نتایج، تطابق خوبی با نتایج به دست آمده توسط احسانی و همکاران [۱۶] دارد. آنها تعدادی آزمایش ستون تشدید و سهمحوری دینامیکی به منظور بررسی تاثیر درصد لاستیک بر روی پاسخ دینامیکی مخلوط ماسه - لاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد لاستیک، میزان ضریب میرایی مخلوط به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. سنتاکیس و

که در رابطه فوق، ΔW انرژی تلف شده در هر سیکل، $W_{elastic}$ انرژی ذخیره شده در هر سیکل، τ تنش برشی و γ کرنش برشی می‌باشد.

تغییرات ضریب میرایی در برابر کرنش برشی برای حالات مختلف فرکانس و شتاب بارگذاری در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تمام حالات، با افزایش کرنش برشی مقدار ضریب میرایی افزایش می‌یابد. در سطوح کرنش پایین مقادیر ضریب میرایی در فرکانس‌های مختلف، پایین و بسیار نزدیک به هم می‌باشد اما در سطوح کرنش بالاتر، افزایش در فرکانس باعث افزایش ضریب میرایی می‌شود. لذا تاثیر فرکانس در افزایش ضریب میرایی در سطوح کرنش بالا قابل توجه بوده ولی در سطوح کرنش پایین ناچیز می‌باشد. هم چنین افزایش در ضریب میرایی ناشی از افزایش فرکانس، در

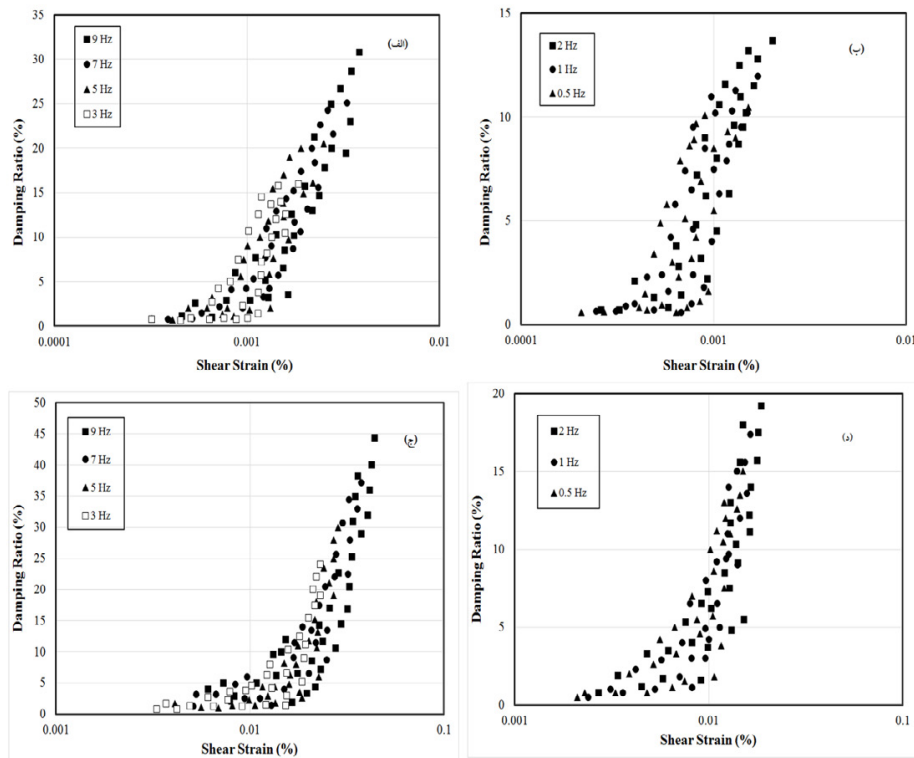


شکل ۱۱. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه ماسه خالی تحت شتاب ورودی (الف و ب) ۰/۱g (ج و د) ۰/۳g
 Fig. 11. Variation of damping ratio with shear strain at different loading frequency for pure sand at input acceleration of (a,b) 0.1g (c,d) 0.3g



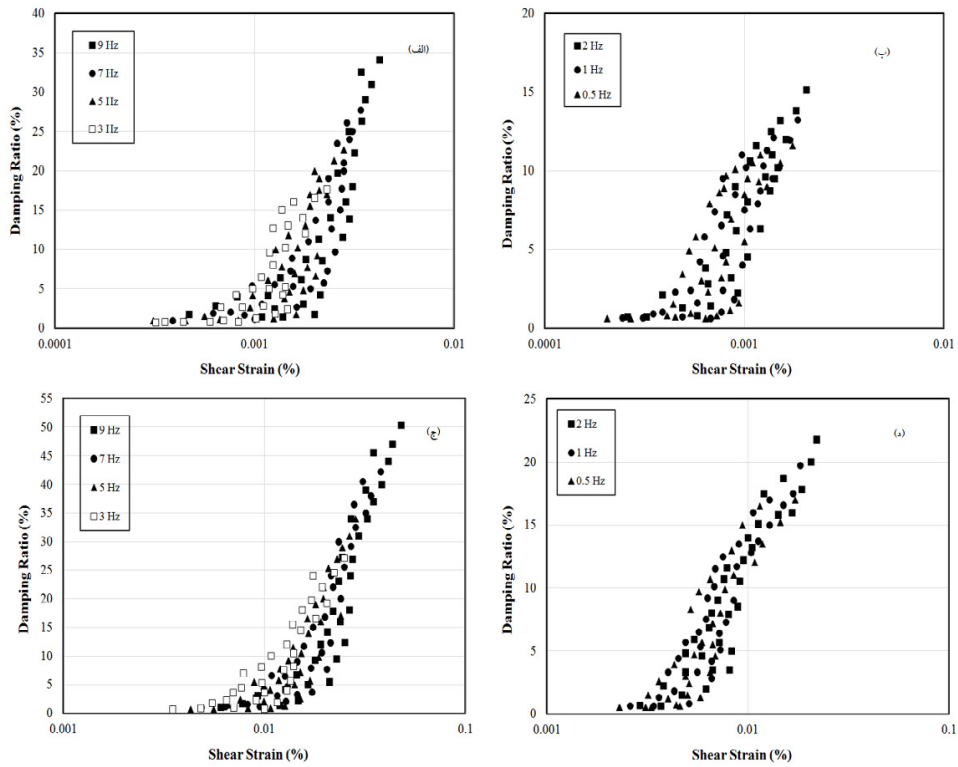
شکل ۱۲. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۵٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف و ب) ۰/۱g (ج و د) ۰/۳g

Fig. 12. Variation of damping ratio with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 5% tire powder at input acceleration of (a,b) 0.1g (c,d) 0.3g



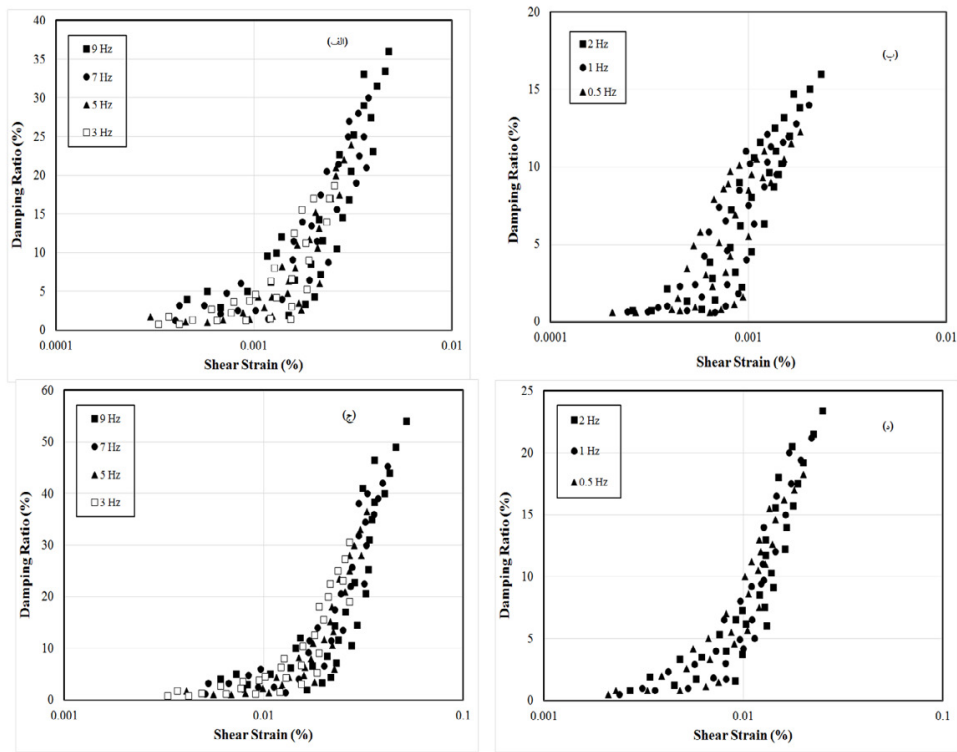
شکل ۱۳. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۱۰٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف و ب) ۰/۱g (ج و د) ۰/۳g

Fig. 13. Variation of damping ratio with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 10% tire powder at input acceleration of (a,b) 0.1g (c,d) 0.3g



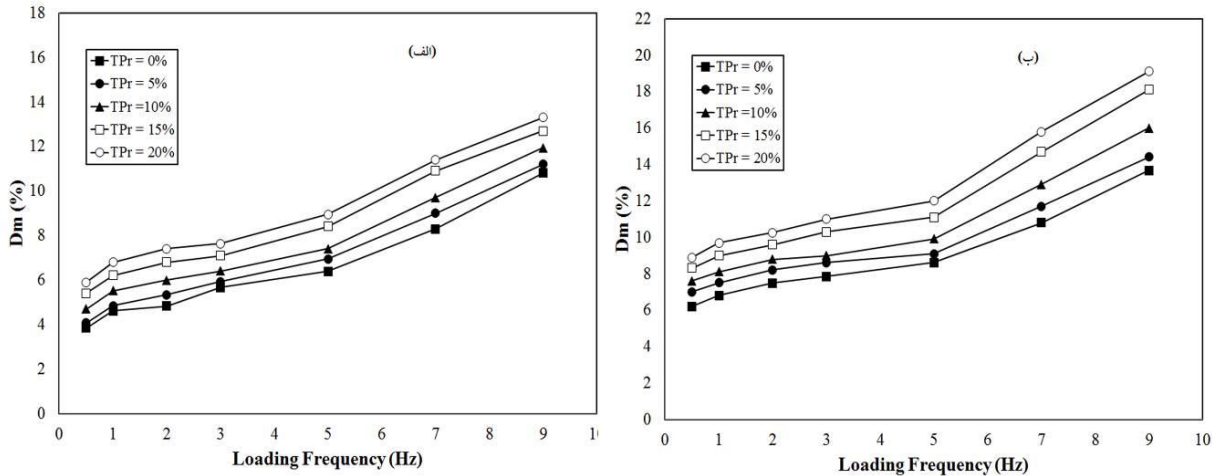
شکل ۱۴. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۱۵٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف و ب) ۰/۱g (ج و د) ۰/۳ g

Fig. 14. Variation of damping ratio with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 15% tire powder at input acceleration of (a,b) 0.1g (c,d) 0.3g



شکل ۱۵. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری برای نمونه مخلوط ماسه با ۲۰٪ پودر لاستیک تحت شتاب ورودی (الف و ب) ۰/۱g (ج و د) ۰/۳ g

Fig. 15. Variation of damping ratio with shear strain at different loading frequency for sand mixed with 20% tire powder at input acceleration of (a,b) 0.1g (c,d) 0.3g



شکل ۱۶. تغییرات میانگین ضریب میرایی (D_m) با فرکانس بارگذاری در شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$ نشان دهنده درصد پودر لاستیک می باشد
 Fig. 16. Variation of D_m at different loading frequency at input acceleration of (a) $0.1g$ (b) $0.3g$

ضریب میرایی معرفی کردند. پارامتر فوق از میانگین‌گیری مقادیر ضریب میرایی در هر یک از آزمایش‌ها حاصل می‌شود. از این پارامتر در مطالعات پیشین توسط محققین مختلف [۱۸، ۳۱ و ۳۴] نیز استفاده شده است. شکل ۱۶ مقادیر ضریب میرایی میانگین (D_m) در برابر فرکانس بارگذاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۶، مقادیر ضریب میرایی میانگین در همه حالات (تمام درصدهای پودر لاستیک و شتاب‌های ورودی)، با افزایش فرکانس بارگذاری، افزایش می‌یابد، که این افزایش از فرکانس ۵ هرتز به بعد بیشتر ملاحظه می‌شود. به عنوان مثال، تحت شتاب ورودی $0.1g$ و ۱۵ درصد پودر لاستیک، ضریب میرایی میانگین از فرکانس ۳ به ۵ هرتز، در حدود ۱۸ درصد افزایش از خود نشان می‌دهد در حالی که از فرکانس ۵ به ۷ هرتز، میزان افزایش ۲۹ درصد می‌باشد، به همین ترتیب تحت شتاب ورودی $0.3g$ و ۱۰ درصد پودر لاستیک، افزایش میرایی میانگین بین فرکانس‌های ۳ و ۵ هرتز، در حدود ۱۲ درصد بوده در حالی که این مقدار بین فرکانس‌های ۵ و ۷ هرتز، ۳۰ درصد می‌باشد. روند مشابه در همه نمونه‌های مورد آزمایش مشاهده می‌شود.

از طرف دیگر با افزایش درصد پودر لاستیک نیز مقادیر ضریب میرایی میانگین، از خود افزایش نشان می‌دهند. با این توضیح که فاصله مقادیر ضریب میرایی میانگین بین نمونه‌های با پودر لاستیک ۱۰ و ۱۵ درصد، بیشتر از سایر حالت‌ها می‌باشد. همچنین با افزایش شتاب ورودی از $0.1g$ به $0.3g$ ، با توجه به افزایش کرنش برشی، ضریب میرایی میانگین افزایش می‌یابد.

همکاران [۳۳] نیز نتایج مشابهی را با انجام آزمایش‌های ستون تشدید بر روی نمونه‌های ماسه مخلوط با درصدهای مختلف لاستیک گزارش نموده‌اند. طبق این نتایج، ضریب میرایی مخلوط با افزایش درصد لاستیک، افزایش می‌یابد.

مشابه نتایج مدول برشی، بیشترین نرخ افزایش در ضریب میرایی مخلوط‌های ماسه - پودر لاستیک از مخلوط با پودر لاستیک ۱۰٪ به ۱۵٪ مشاهده می‌شود. هم چنین با افزایش شتاب ورودی با توجه به افزایش کرنش برشی، ضریب میرایی افزایش می‌یابد ضمن اینکه در شتاب ورودی بالاتر ($0.3g$)، تفاوت بین ضریب میرایی مخلوط‌های ماسه با درصدهای مختلف پودر لاستیک بیشتر مشاهده می‌شود. به عنوان مثال تفاوت بین حداکثر ضریب میرایی (دربالترین کرنش برشی) تحت شتاب $0.3g$ بین مخلوط‌های ماسه با ۵ و ۱۰ درصد پودر لاستیک حدود ۱۲ درصد بوده در حالی که تحت شتاب $0.1g$ این مقدار حدود ۸ درصد می‌باشد.

اما همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ - ۱۵ مشاهده می‌شود، تغییرات ضریب میرایی در مقابل کرنش برشی نامنظم و غیریک‌نواخت می‌باشد و این امر باعث می‌شود تا نتوان مقایسه عددی دقیقی بین مقادیر ضریب میرایی در حالت‌های مختلف انجام داد. تغییرات نامنظم نسبت میرایی در برابر کرنش برشی با نتایج سایر محققان تطابق دارد [۱۹ و ۳۰]. صابرمهانی و همکاران [۱۹] با مشاهده روند غیریک‌نواخت ضریب میرایی در مقابل کرنش برشی برای مقایسه مقادیر میرایی مدل‌های مسلح با یک‌دیگر پارامتری به عنوان D_m یا مقدار میانگین

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر به دست آمدند:

• مدول برشی مخلوط با افزایش فرکانس در تعداد سیکل یکسان، افزایش می‌یابد که این افزایش در فرکانس‌های بالاتر بیشتر مشاهده می‌شود. با افزایش میزان فرکانس، درصد افزایش مدول برشی نیز افزایش می‌یابد.

• تغییرات مدول برشی حداکثر (G_{max}) به عنوان شاخصی از تغییرات مدول برشی، نشان می‌دهد که این پارامتر در فرکانس ۹ هرتز دارای بیشترین مقدار و در فرکانس ۰/۵ هرتز دارای کمترین مقدار می‌باشد.

• افزایش در درصد پودر لاستیک باعث کاهش در مدول برشی مخلوط می‌شود. این کاهش در مخلوط با پودر لاستیک ۵٪ نسبت به ماسه خالی بسیار ناچیز بوده و بیشترین نرخ کاهش، از مخلوط با ۱۰٪ به ۱۵٪ پودر لاستیک مشاهده می‌شود.

• تأثیر فرکانس بارگذاری بر روی نسبت میرایی مخلوط در سطوح پایین کرنش ناچیز بوده ولی با افزایش سطوح کرنش، افزایش در فرکانس بارگذاری باعث افزایش نسبت میرایی می‌شود.

• نسبت میرایی مخلوط با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد. به نحوی که مخلوط با ۲۰٪ پودر لاستیک دارای بیشترین ضریب میرایی می‌باشد.

• با توجه به تغییرات نامنظم ضریب میرایی در برابر کرنش برشی، پارامتری به نام ضریب میرایی میانگین تعریف می‌شود. این پارامتر با افزایش فرکانس بارگذاری و هم چنین با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد. با افزایش هر چه بیشتر فرکانس، افزایش میرایی میانگین نیز بیشتر نمایان می‌شود.

• در همه موارد با افزایش دامنه شتاب ورودی، کرنش برشی افزایش یافته و در نتیجه مدول برشی کاهش و ضریب میرایی افزایش می‌یابد. ضمن اینکه در شتاب ورودی بالاتر تفاوت بین مقادیر مدول برشی و ضریب میرایی مخلوط‌های ماسه با درصد‌های مختلف پودر لاستیک بیشتر قابل مشاهده می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه انجام شد.

بدین ترتیب نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مسئولین مرکز به‌ویژه آقای مهندس امیلی تشکر و قدردانی نمایند.

فهرست علائم

C_c	ضریب انحنای
C_u	ضریب یکنواختی
D	ضریب میرایی
D_{10}	اندازه ای که ۱۰٪ دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{30}	اندازه ای که ۳۰٪ دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{50}	اندازه ای که ۵۰٪ دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{60}	اندازه ای که ۶۰٪ دانه های خاک از آن کوچکتر است
e_{min}	نسبت تخلخل حداقل
e_{max}	نسبت تخلخل حداکثر
F_c	مقدار ریزدانه
G	مدول برشی
g	شتاب زمین
u_i	جابجایی در موقعیت i
\ddot{u}_i	شتاب در موقعیت i
$W_{elastic}$	حداکثر انرژی الاستیک ذخیره شده در هر سیکل
z_i	عمق موقعیت i
ΔW	انرژی از دست رفته در هر سیکل
ρ	دانسیته خاک
τ	تنش برشی
γ	کرنش برشی

مراجع

- [1] Khabiri, MM., Khishdari, A., and Gheibi, E., Effect of tyre powder penetration on stress and stability of the road embankments, Road Mate Pavement Des 14, (2016) 1-4.
- [2] Naval, S., Kumar, A., and Bansal, SK., Model tests on footing resting on waste tire fiber reinforced granular soil, Int J Geotech Eng, 8(4) (2014) 469-476.
- [3] Keskin, M.S., and Laman, M., Experimental study of bearing capacity of strip footing on sand slope reinforced with tire chips, Geomechanics and Engineering, 6(3) (2014) 249-262.
- [4] Poh, PS., and Broms, B.B., Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles, J Perform Constr Facil, 9(1)

- [14] Mashiri, M.S., Vinod, J., Sheikh, M. Neaz., and Carraro, J., Shear modulus of sand-tyre chip mixtures, *Environmental Geotechnics*, (2017) DOI: 10.1680/jenge.16.00016.
- [15] Senetakis, K. and Anastasiadis, A., Effects of state of test sample, specimen geometry and sample preparation on dynamic properties of rubber-sand mixtures, *Geosynthetics International*, 22(4) (2015) 301-310.
- [16] Ehsani, M., Shariatmadari, N., and Mirhosseini, S.M., Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures, *Journal of central south university*, 22 (2015) 3159-3167.
- [17] Mashiri, M. S., Sheikh, M. Neaz., Vinod, J. and Tsang, H., Dynamic properties of sand-tyre chip mixtures, *Australian Earthquake Engineering Society Conference, Tasmania: Australian Earthquake Engineering Society*, (2013) 1-8.
- [18] Bahadori, H., and Manafi, S., Effect of tyre chips on dynamic properties of saturated sands, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 15(3) (2015) 116-128.
- [19] Sabermahani, M., Ghalandarzadeh, A., and Fagher, A., Experimental study on seismic deformation modes of reinforced - soil walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2) (2009) 121-136.
- [20] Bahadori, H., Ghalandarzadeh, A., and Towhata, I., Effect of Non plastic silt on the anisotropic behavior of sand, *Soils and Foundations*, 48(4) (2008) 531-545.
- [21] Lombardi, D., Bhattacharya, S., Scarpa, F., and Bianchi, M., Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries, *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, 69 (2015) 46-56.
- [22] Ghiassian, H., Jamshidi Chenari, R., Shahnazari, H. and Tabarsa, A., Dynamic Performance of Toyoura Sand Reinforced with Randomly Distributed Carpet Waste Strips using a Laminar Box on Shaking Table, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 10 (Special Issue) (2008) 195-203.
- [23] El-Emam, M.M., and Bathurst, R.J., Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1) (2007) 33-49.
- (1995) 76-79.
- [5] Kaushik, M.K., Kumar, A., and Bansal, A., Drainage performance of different sizes tire chips used alone and mixed with natural aggregates as leachate drainage layer material, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1) (2016) 167-191.
- [6] O'Shaughnessy, V., and Garga, VK., Tire-reinforced earthfill. Part 3: environmental assessment, *Can Geotech J*, 37(1) (2000) 117-131.
- [7] Lee, JH., Salgado, R., Bernal, A., and Lovell, CW., Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill, *J Geotech Geoenviron Eng*, 125(2) (1999) 132-141.
- [8] Bosscher, P.J., Edil, T.B., and Kuraoka, S., Design of highway embankments using tire chips, *J Geotech Geoenviron Eng*, 123(4) (1997) 295-304.
- [9] Assadollahi, A., Harris, B., and Crocker, J., Effects of Shredded Rubber Tires as a Fill Material on the Engineering Properties of Local Memphis Loess, In *Geo-Chicago*, (2016) 738-745.
- [10] Jamshidi Chenari, R., Poursalimi, N., and Shamsi Sosahab, J., Dynamic properties of sand- tire crumb mixtures with large cyclic direct shear apparatus, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 22(13) (2017) 5085-5104.
- [11] Jamshidi Chenari, R., Karimpour Fard, M., Shafie, J. and Ghorbanpour, A., Tire Shreds and Tire Crumbs Inclusion: Contrast Effects on Bearing Capacity of Sand, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 22(9) (2017) 3649-3667.
- [12] Jamshidi Chenari, R., Fatahi, B., Akhavan Maroufi, M.A. and Alaie, R., Experimental and Numerical Investigation on Compressibility and Settlement Behavior of Sand Mixed with TDA, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering (Springer)*, 35 (5) (2017) 2401-2420. DOI: 10.1007/s10706-017-0255-3.
- [13] Jamshidi Chenari, R., Alaie, R. and Fatahi, B., Constraint Compression Models for Tire-Derived Aggregate-Sand Mixtures Using Enhanced Large Scale Oedometer Testing Apparatus, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering (Springer)* (2018) (In press).

- S.P., Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12) (2005) 1488-1497.
- [31] Bahadori, H., and Farzalizadeh, R., Dynamic Properties of Saturated Sands Mixed with Tyre Powders and Tyre Shreds, *International Journal of Civil Engineering*, in press, (2016) <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0136-9>.
- [32] Brara, A., Brara, Ah., Daouadji, A., Bali, A., and Daya, El., Dynamic properties of dense sand-rubber mixtures with small particles size ratio, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2016) <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.1139509>.
- [33] Senetakis, K., Anastasiadis, A., and Pitilakis, K., Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 33 (2012) 38-53.
- [34] Manafi, S., Hazarika, H., Bahadori, H., and Chaudhary, B., Dynamic behavior of saturated sandy soil reinforced with non-woven polypropylene fiber, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(1) (2018) 89-100, <http://doi:10.1080/19386362.2016.1250978>.
- [24] Koga, Y., and Matsuo, O., Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground, *Soil and Foundation*, 30(4) (1990) 162-174.
- [25] Abdel-Gaffar, A.M., and Scott, R.F., Shear moduli and damping factors of earth dam, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(GT12) (1979) 1405-1426.
- [26] Kikusawa, M., and Hasegawa, T., Analysis of model embankment dam by shaking table test, *Soil and Foundation*, 25(1) (1985) 1-14.
- [27] Ghayamghamian, M.R., and Kawakami, H., On-site nonlinear hysteresis curves and dynamic soil properties, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6) (2000) 543-555.
- [28] Zeghal, M., Elgamal, A.W., Tang, H.T., and Stepp, J.C., Lotung downhole array-II: Evaluation of soil nonlinear properties, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4) (1995) 363-378.
- [29] Elgamal, A., Yang, Z., Lai, T., and Kutter, B.L., Dynamic Response of Saturated Dense Sand in Laminated Centrifuge Container, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(5) (2005) 598-609.
- [30] Brennan, A.J., Thusyanthan, N.I., and Madabhushi,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Bahadori, A. Khalili, *Investigating the Effect of Loading Frequency on the Dynamic Properties of Sand-Tyre Powder Mixture Using Shaking Table Tests*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(6) (2020) 1361-1378.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15362.5895](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15362.5895)



