



Experimental and Numerical Study on the Seismic Performance of MSE/Soil Nail Hybrid Walls

N. Ahmadi¹, M. Yazdandoust²

¹ Department of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

² Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

Review History:

Received: May, 08, 2020

Revised: Aug. 18, 2020

Accepted: Aug. 20, 2020

Available Online: Jul. 03, 2021

Keywords:

MSE/Soil nail hybrid wall

Dynamic failure mechanism

Seismic Performance levels

Shaking Table Test

Numerical modeling

ABSTRACT: In this study, a series of 1-g shaking table tests using variable-amplitude harmonic excitations were performed on 0.8 m high MSE/Soil nail hybrid wall models to investigate the seismic behavior of this innovative retaining system. Ten finite element models were also prepared with different wall heights and nail lengths to carry out a parametric study. Findings showed that in models with constant length of steel strip, the deformation mode of MSE/Soil nail hybrid walls highly depends on the length of nails and the combination of a base sliding and overturning deformation mode was observed as the predominant mode of deformation. Irrespective of different nail lengths, the pattern of the observed failure mechanisms included a moving block and a combination of a reverse curve and flat failure surface with certain intersection point. Also, a range of $\Delta x/H = 0.55 - 1.10\%$ as a transitional level from quasi-elastic to plastic state and based on starting the development of active wedge failure, a range of $\Delta x/H = 5.0\% - 5.6\%$ as a transitional level from plastic to failure state were determined. On the other hand, according to the significant increase in wall displacements by decreasing the L/H ratio of 0.7, $L/H = 0.7$ was presented as the critical ratio in seismic conditions.

1- Introduction

The ease of implementation and economic efficiency of MSE/Soil nail hybrid retaining walls have caused their use quickly spread universally as a permanent retaining system in recent years. Although the seismic behavior of each of the components of the hybrid retaining walls (MSE wall and soil-nailed wall) has been investigated separately [1-5], the behavior of the hybrid reinforced wall as a combination of soil-nailed mass and MSE wall has not been well known. To enhance the future use of this system in engineering practices, the performance and behavior of this system need to be further investigated. Therefore, the current study attempted to investigate the seismic performance of the first type of MSE/Soil nail hybrid walls using experimental and numerical methods. For this purpose, first, a series of reduced-scale uni-axial shaking table tests were carried out on the five wall models with different nail lengths under different input motion parameters for investigating the performance of hybrid walls. The quantitative and qualitative responses of the walls to base shaking in terms of facing displacements, the geometry of the failure surface, the boundaries of performance levels and the acceleration amplification were studied and identified. Then, based on the numerical analysis, a parametric study was carried out to determine the seismic performance of hybrid walls with different heights and nail lengths under harmonic loading

whit different base accelerations and cumulative absolute velocities.

2- Physical Model Tests

A series of 1-g shaking table tests were carried out on hybrid walls at the Centrifuge and Physical Modeling Center at Tehran University. Taking account of the height of walls studied by other researchers and the selected scale factor ($N = 10$) and considering the limitation in the height of the box container, 0.8 m was selected as the total height of hybrid wall models. To study the models in the same geometrical conditions and the elimination of additional geometric variables, the steel-strip reinforced zone and the soil-nailed mass were considered with equal heights ($H_1 = H_2 = 0.45$ m). To construct the different parts of the hybrid wall models (foundation, backfill, soil-nailed mass and steel-strip reinforced zone), a wet mixture of Firuzkooh 161 sand and Firuzkooh silt with different relative densities was used. As recommended by FHWA [6], a relative density of %85 was selected to construct the reinforced zone in the MSE portion. Other zones of these models (foundation, backfill and soil-nailed zone) were constructed of a medium state of density (%56). By considering the pull-out behavior as the main criterion to scale down the reinforcement elements, the reduced-scale metal strip and nail were selected based on the similitude rules and scaling factor (1:10). To reinforce the main portions of hybrid retaining wall models (soil-

*Corresponding author's email: M.yazdandoust@qom.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

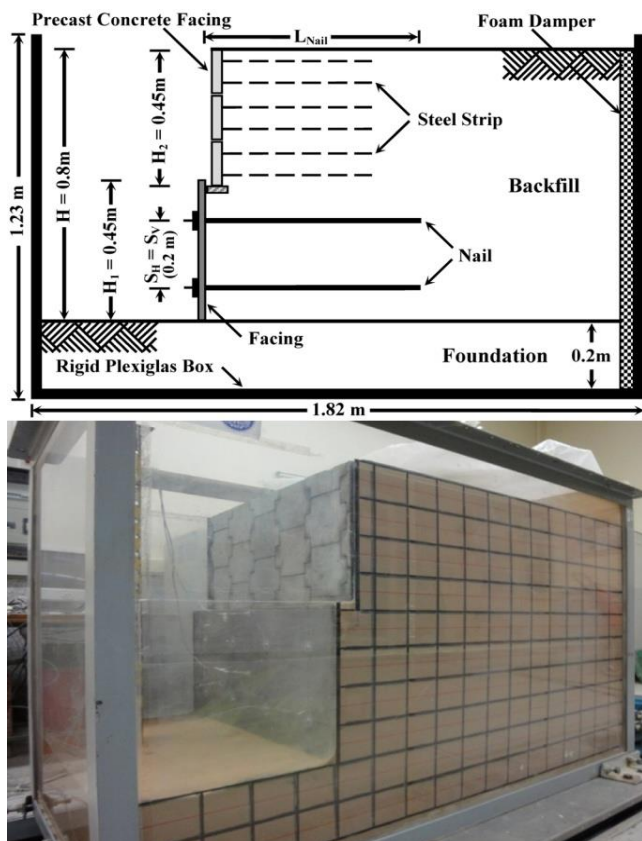


Fig. 1. The schematic geometry and pictures of the hybrid wall model

nailed mass and MSE zone), uniform lengths of nail and steel strip were used. Since, in seismic conditions, the minimum value of nail length to wall height ratio $L/H = 0.7$ has been recommended by FHWA [7], physical models were constructed with the values of $L/H = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.9 . Selecting this range of values made it possible to investigate the seismic behavior of hybrid walls which have been reinforced with different lengths of the nail, greater and less than the minimum recommended value. It should be noted that in all models, based on the minimum recommended length of reinforcement FHWA [7], the reinforced soil portion (MSE wall) was constructed of steel strips with the value of $L/H_2 = 0.7$. The models were shaken using a variable-amplitude harmonic excitation and their response was measured by four displacement transducers (LVDT) and thirteen accelerometers installed in the models. The schematic geometry and picture of the hybrid wall models have been shown in Figure 1.

3- Numerical studies

In order to perform numerical studies, FLAC software was used. All numerical models were prepared by selecting two categories including 6, and 9 meters, for the height of the wall and five categories including $0.6H, 0.8H, 1.0H, 1.2H$

and $1.4H$ for the length of nails. To select the geotechnical parameters, it has been tried to consider soil type effects by introducing 3 kinds of soil profiles, which are represented as 1 to 3 in 2800 standard of Iran. Considering and using geotechnical parameters from many boreholes representing 3 kinds of soil types in different regions of Iran, geotechnical parameters for modeling the different parts of the model were chosen. After preparing the numerical models, harmonic loads were applied to the foundation level and the dynamic analysis was performed. During each of the dynamic analyses, the history of horizontal wall displacements as a representative of the seismic performance were recorded. Regarding the studies investigated by Yazdandoust [8], harmonic load frequency, maximum acceleration and cumulative absolute velocity instead effective time were considered in based of soil type and regions seismic risk categories.

4- Results and Discussion

As illustrated in Figure 2, the pattern of failure mechanisms in all models was similar regardless of the nail length and this failure pattern included a moving block which was delineated by a combination of a slant and reverse curve with certain intersection point. Among all the geometric parameters of the failure surface, only the angle of inflection point was a function of the length of nails, so increasing the length of nails led to the increase in the angle of inflection point.

Also, to determine the boundaries of performance levels of soil-nailed walls for use in the performance base design method, based on the formation of initial cracks and failure surface, a range of $\Delta x/H = 0.55 - 1.10$ % as a transitional level from quasi-elastic to plastic state and based on starting the development of active wedge failure, a range of $\Delta x/H = 5.0 - 5.6$ % as a transitional level from plastic to failure state were determined and recommended.

According to the results, for MSE/Soil nail hybrid walls that have been reinforced with constant length of steel strip, $L/H = 0.7$ can be presented as the critical ratio in seismic conditions so that in the specified seismic situation, the reduction in L/H of 0.7 leads to significant horizontal displacement of the MSE/Soil nail hybrid walls. This ratio is the key criteria in the performance-based design for the selection of the appropriate nail length. Moreover, given the proper convergence between the maximum normalized horizontal displacement and L/H ratio at different levels of acceleration and duration, the maximum normalized horizontal displacement of the MSE/Soil nail hybrid walls can be defined as a function of L/H ratios and seismic parameters for use in the performance-based design method.

It was observed that the amplification factors are nonlinear with elevation and the accelerations are amplified more on top of the wall in all models. This nonlinearity was greater at the wall facing than at the reinforced zone and backfill soil. It was also observed that the acceleration amplification factors increase with the increasing magnitude of peak acceleration and decrease with increasing nail length.

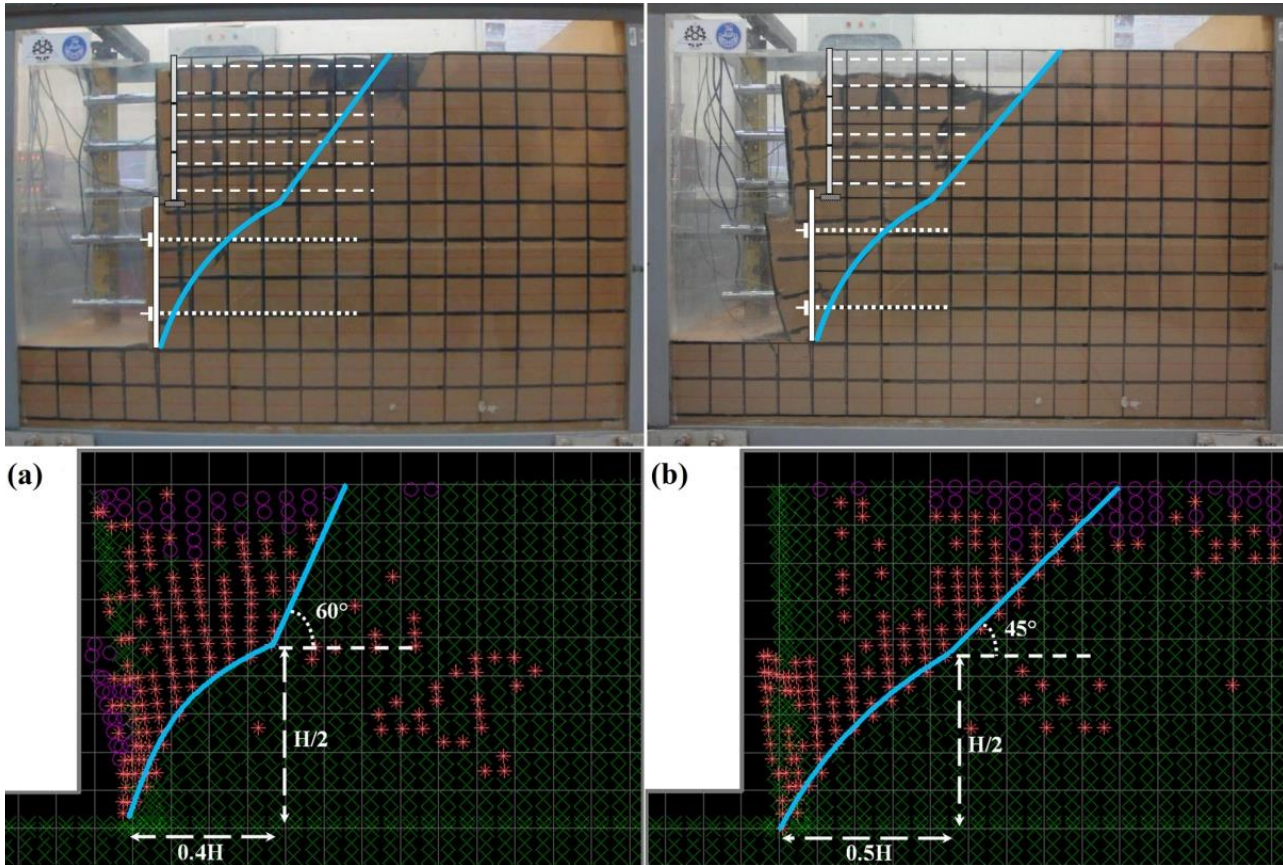


Fig. 2. The geometry of the failure mechanism of hybrid walls with: (a) $L > 0.7H$; (c) $L < 0.7H$

5- Conclusion

The main conclusions regarding physical and numerical models can be summarized as follows:

1) The combination of a base sliding and rotating deformation mode was observed as the predominant mode of deformation. It was found that the deformation mode of hybrid walls highly depends on the length of nails, so with increasing nails length from $0.5H$ to $0.7H$, the base sliding deformation mode faded and the bulging deformation mode in the MSE zone appeared gradually.

2) The pattern of the observed failure mechanisms in all models was similar regardless of the nail length. This failure pattern includes a moving block which is delineated by a combination of a slant and reverse curve with certain intersection point

3) To determine the boundaries of performance levels of MSE/Soil nail hybrid walls for use in the performance base design method, based on the formation of initial cracks and failure surface, a consistent range of $\Delta x/H = 0.55 - 1.10\%$ represents a transitional state of the walls from quasi-elastic to plastic state and based on starting the development of active wedge failure, a range of $\Delta x/H = 5.0\% - 5.6\%$ representing a transitional state of the walls from plastic to failure state were determined and recommended.

4) According to the significant increase in wall displacements by decreasing the L/H ratio of 0.7 , $L/H = 0.7$ was presented as the critical ratio in seismic conditions for MSE/Soil nail hybrid walls which have been reinforced with constant length of steel strip.

5) It was concluded that the most acceleration amplification occurred at the reinforced zone and only at low levels of peak acceleration ($a_{max} < 0.5 g$), the assumption of constant amplification factor at all elevations of the backfill in pseudo-static design can be true.

References

- [1] L.P. Wang, G. Zhang, J.M. Zhang, Nail reinforcement mechanism of cohesive soil slopes under earthquake conditions. *Soils and Foundations*, 50(4) (2010) 459–469.
- [2] L. Wang, G. Chen, S. Chen, Experimental study on seismic response of geogrid reinforced rigid retaining walls with saturated backfill sand. *Geotext. Geomembr.*, 43(1) (2015) 35–45.
- [3] A.M. Krishna, G.M. Latha, Modeling the Dynamic Response of Wrap-Faced Reinforced Soil Retaining Walls. *International Journal of Geomechanics*, 12(4) (2012) 439–450.

- [4] A. Komak Panah, M. Yazdi, A. Ghalandarzadeh, Shaking table tests on soil retaining walls reinforced by polymeric strips. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2) (2015) 148-161.
- [5] C-C Huang, J-C Horng, W-J Chang, J-S Chiou, C-H Chen, Dynamic behavior of reinforced walls-Horizontal displacement response. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3) (2011) 257–267.
- [6] FHWA, Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, vol. I. Federal Highway Administration and National Highway Institute, Washington DC. NHI-10-024, (2009).
- [7] FHWA, Geotechnical Engineering Circular No. 7, Soil Nail Walls Reference Manual. Federal Highway Administration and National Highway Institute, Washington DC, NHI-14-007, (2015).
- [8] M. Yazdandoust, Laboratorial and Numerical Studies on Reinforced Soil and Earth whit Steel Elements, PhD Thesis, (2013).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

N. Ahmadi, M. Yazdandoust , *Experimental and Numerical Study on the Seismic Performance of MSE/Soil Nail Hybrid Walls*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 39-42.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18379.6862](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18379.6862)





مطالعه آزمایشگاهی و عددی بر روی عملکرد لرزه ای دیوار مسلح شدهی ترکیبی

نبی الله احمدی^۱، مجید یزدان دوست^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

خاک مسلح ترکیبی
عملکرد لرزه ای
سطوح گسیختگی
آزمایش میز لرزه
مدل سازی

خلاصه: محدودیت ها و معایب موجود در هر یک از روش های پایدار سازی توده خاک سبب شده است تا در دهه های اخیر، استفادهی همزمان از چند روش مختلف در کنار هم در قالب یک سیستم مرکب ابداع و معرفی گردد. در این راستا، سیستم خاک مسلح شدهی ترکیبی به صورت تلفیقی از دو روش خاک میخ کوبی شده و خاک مسلح، ضمن اختصاص جایگاه مناسبی در میان روش های پایدارسازی، با استقبال گسترده ای مواجه شده است. عدم وجود شناخت کافی از عملکرد این سیستم نوظهور به خصوص در شرایط لرزه ای، ما را بر آن داشت تا در تحقیق حاضر ضمن ساخت ۳ مدل فیزیکی g_1 با ارتفاع یکسان و طول میخ های مختلف بر روی میز لرزه و همچنین ۱۰ مدل عددی با مقادیر متفاوت از ارتفاع دیوار و طول المان تسلیح، به بررسی عملکرد لرزه ای این سیستم در قالب مرزهای سطوح عملکرد، اشکال گوه گسیختگی، بزرگ نمایی شتاب و تغییر مکان های افقی در شرایط لرزه ای مختلف پرداخته شود. نتایج به دست آمده حاکی از ورود سیستم به فاز پلاستیک و آغاز تشکیل گوه گسیختگی به ازای تغییر مکان های افقی نرمالیزه شده $(x/H\Delta)$ ۰/۵۵ الی ۱/۱۰ درصد و ۵/۰ الی ۵/۶ درصد می باشد. همچنین مشاهده شد که گوه گسیختگی احتمالی به صورت ترکیبی از یک سطح منحنی با تقعر رو به پایین و یک سطح مایل با نقطه تلاقی مشخص می باشد. رشد ناگهانی ۲۶ تا ۳۳ درصدی تغییر شکل های افقی سیستم ضمن عبور از مرز ردهی طولی $0.8H$ در خلال کاهش طول المان های تسلیح صحت توصیه های آیین نامه FHWA را در خصوص انتخاب $H/7$ به عنوان طول بحرانی المان های تسلیح در شرایط لرزه ای تأیید کرد. از سوی دیگر، کاهش تأثیرپذیری تغییر شکل های سیستم مرکب سری از تغییرات طول المان تسلیح، شتاب پایه و CAV در خلال افزایش ارتفاع سیستم نشان داد که انتخاب طول المان های میخ و المان های تسمه در سیستم مرکب سری به صورت ضربی یکسان از ارتفاع کل سیستم می تواند به عنوان یک چیدمان کارآمد معرفی گردد.

۱- مقدمه

متفاوت را در کنار هم به عنوان یک سیستم مسلح سازی مرکب، مسجل می سازد. از سوی دیگر سازگاری و هماهنگی مناسب بین روش های مختلف مسلح سازی خاک با المان های تسلیح، سبب شده است تا طی سال های اخیر استفادهی ترکیبی از این سیستم به عنوان یک روش ایده آل و کارآمد در بسیاری از پروژه های عمرانی مطرح شود.

سیستم خاک مسلح شدهی ترکیبی عبارت است از استفادهی همزمان از دو یا چند سیستم مسلح سازی مختلف در قالب یک طرح واحد. در این سیستم، بر اساس شرایط اجرایی حاکم بر طرح، دو یا چند سیستم مسلح سازی با المان های تسلیح مختلف جهت دستیابی به پایداری کل طرح مورد استفاده قرار می گیرند [۱].

ایدهی سیستم ترکیبی نخستین بار در سال ۲۰۰۴ توسط شرکت

استقبال از سیستم خاک مسلح شده با المان های تسلیح طی چهار دهه ای گذشته به لحاظ دارا بودن مزایایی از جمله سرعت اجرای بالا، صرفه اقتصادی مناسب، سازگاری با فضاهای اجرایی محدود و پیچیده، قابلیت برقراری هماهنگی با سایر سیستم های پایدارسازی، در دسترس بودن ملزومات اجرایی، انعطاف پذیری مناسب، عدم نیاز به پی سازی، عملکرد مناسب لرزه ای و ... سبب شده این سیستم رفته رفته به عنوان یک سیستم پایداری دائمی و مستقل، جایگزین سیستم های متداول گردد.

محدودیت های موجود در برخی شرایط اجرایی مانند فقدان فضای لازم جهت اجرای یک سیستم پایداری مشخص، کافی نبودن ظرفیت باربری خاک و توجیحات اقتصادی، ضرورت استفادهی همزمان از چند سیستم مسلح سازی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: M.yazdandoust@qom.ac.ir





شکل ۱. سیستم ترکیبی موازی متشکل از تسمه فلزی و المان‌های میخ بدون اتصال به یکدیگر [۲]

Figure 1. Hybrid wall consisting of metal strips and nail elements without connecting to each other [2]

ساختمانی نیکولسن^۱ و با اجرای سیستم میخ کوبی به منظور پایدارسازی یک دیوار خاک مسلح با تسمه فلزی، ارائه گردید. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به علت نامناسب بودن عملکرد دیواره‌ی خاک مسلح یک بزرگراه در ایالت ایلوی نوین آمریکا در زمان بهره‌برداری، با بهره‌گیری از سیستم میخ کوبی به پایدار سازی آن پرداخته شده است [۲].

سیستم‌های ترکیبی بر حسب نحوه‌ی عملکرد سیستم‌های تشکیل دهنده‌ی آن به دو گروه اصلی تقسیم بندی می‌شوند:

الف- سیستم‌های ترکیبی موازی

در این، سیستم نیروهای وارد شده به کل مجموعه به نسبت ظرفیت اندرکنشی المان‌های تسلیح، بین دو سیستم تقسیم می‌شود. به بیانی دیگر مجموع ظرفیت اندرکنشی تمامی سیستم‌های تشکیل دهنده، موجب برقراری پایداری کل سیستم می‌گردد (شکل ۲) [۳].

ب- سیستم‌های ترکیبی سری

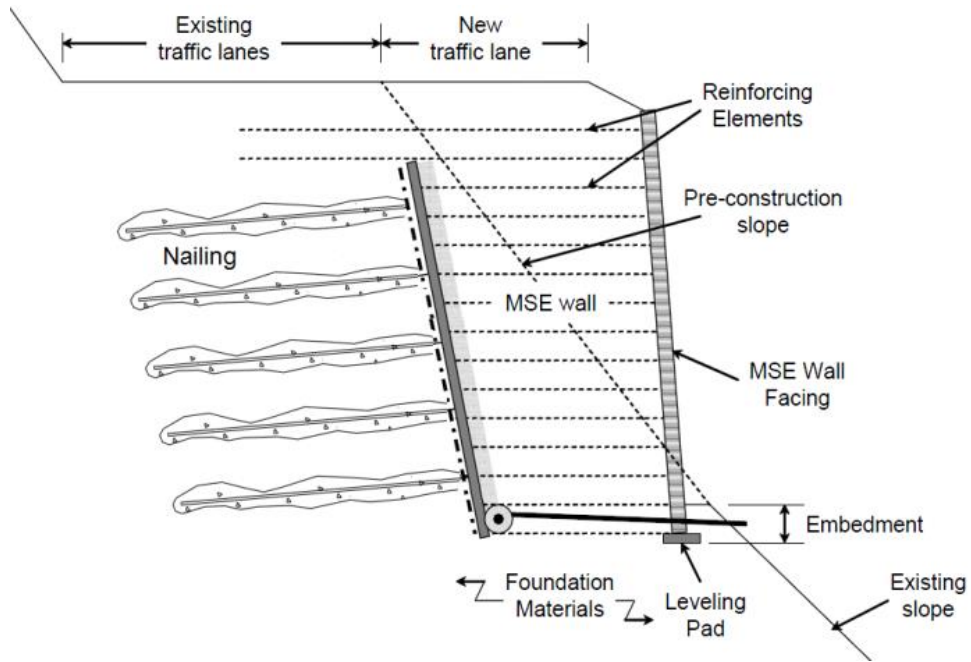
در این سیستم نیروهای وارد شده به کل مجموعه بر حسب موقعیت سیستم‌های تشکیل دهنده، به طور مستقیم به هر سیستم اعمال می‌شود و هر سیستم بر حسب موقعیت هندسی آن، تأمین کننده‌ی پایداری بخشی از

کل مجموعه می‌باشد.

این سیستم که عموماً متشکل از سیستم میخ کوبی در قسمت تحتانی سازه و سیستم خاک مسلح در قسمت فوقانی می‌باشد (شکل ۳) و استفاده از آن به شرط امکان اجرای سیستم میخ کوبی، منجر به کاهش چشمگیر حجم عملیات خاکی و افزایش بهره‌وری اقتصادی پروژه می‌گردد [۱].

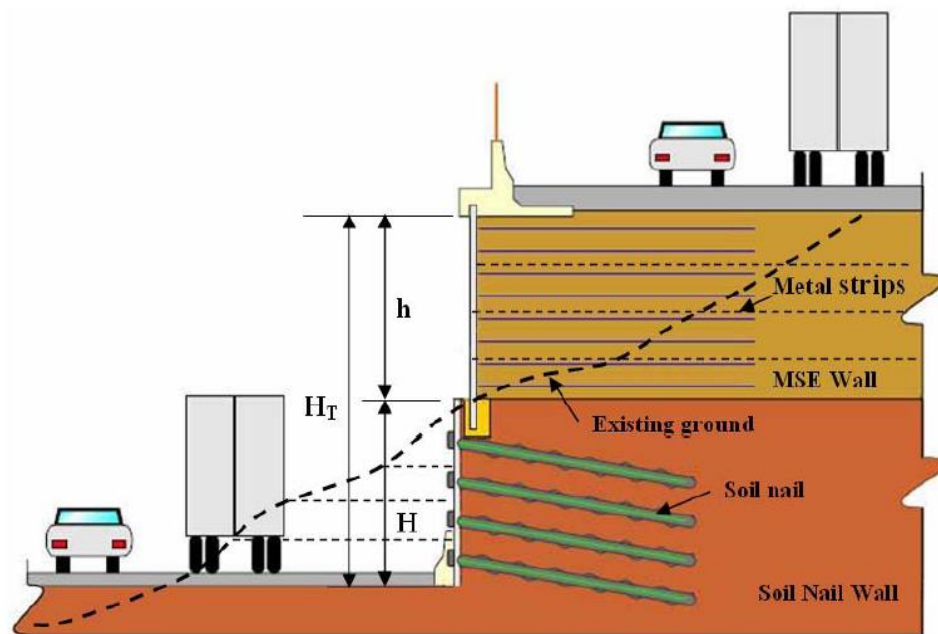
با توجه به مکانیزم ترکیب و قرارگیری سیستم‌های سازنده‌ی سازه‌های مرکب، شناخت اندرکنش سیستم‌های تشکیل دهنده با یکدیگر جهت دستیابی به یک طراحی ایده‌آل، اجتناب ناپذیر است. پیچیده بودن رفتار سیستم‌های مسلح‌سازی از یک سو و نوپا بودن این سیستم از سوی دیگر سبب شده است که تاکنون شناختی جامع در زمینه‌ی عملکرد سیستم‌های مرکب صورت نگرفته باشد. لذا مطالعات انجام شده بر روی این سیستم بسیار اندک بوده و تنها در شرایط استاتیکی صورت گرفته است که می‌توان به آن‌ها اشاره نمود.

چینگ-چانگ فنگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۱ با ابزار بندی یک سیستم مرکب موازی مطابق شکل ۴، اقدام به بررسی رفتار استاتیکی این سیستم نمودند.



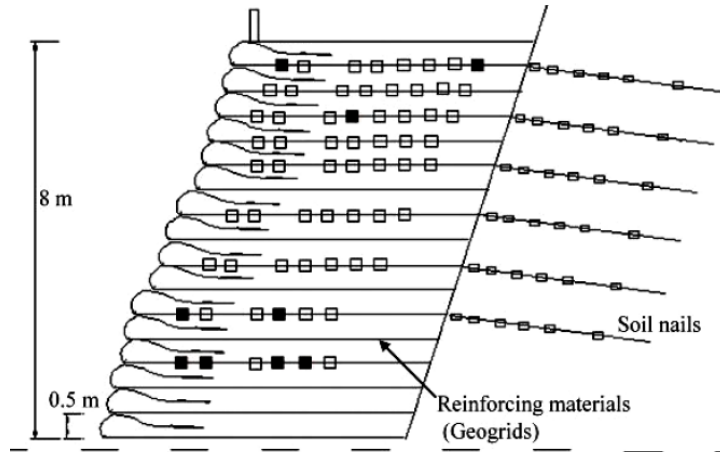
شکل ۲. سیستم ترکیبی موازی متشکل از تسمه فلزی و المان‌های میخ با اتصال به یکدیگر [۳]

Fig. 2. Hybrid wall consisting of metal strips and nail elements with connecting to each other [3]



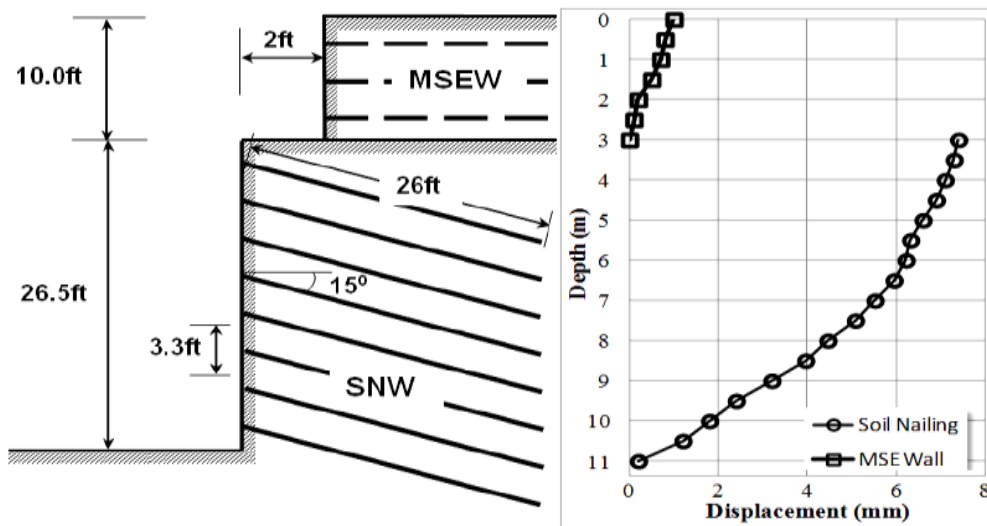
شکل ۳. سیستم ترکیبی سری متشکل از خاک مسلح در قسمت فوقانی و میخ کوبی در قسمت تحتانی [۱]

Fig.3. Hybrid wall consisting reinforced soil mass at the top and soil nailing at the bottom [1]



شکل ۴. سیستم ترکیبی موازی متشکل از خاک مسلح ژئوگرید و میخ کوبی [۴]

Fig. 4. MSE/soil nail hybrid retaining wall consisting of geogrids connected to nail elements [4]



شکل ۵. سیستم ترکیبی سری متشکل از خاک مسلح با تسمه در قسمت فوقانی و میخ کوبی در قسمت تحتانی [۵]

Fig.5. A MSE/soil nail hybrid retaining wall in cut/fill situations [5]

در مطالعه‌ی میدانی دیگر که توسط پژوهشگاه حمل و نقل تگزاس بر روی یک سیستم مرکب سری به ارتفاع ۱۱ متر صورت گرفت، بیشترین تغییر مکان سازه در تاج سیستم میخ کوبی مشاهده شد. در این سیستم که در شکل ۵ نشان داده شده است، سازه‌ی خاک مسلح با تغییر مکان‌های بسیار ناچیز همراه با سیستم میخ کوبی جا به جا شده است. این امر بیانگر اهمیت سیستم میخ کوبی به عنوان یک بستر برای سازه‌ی خاک مسلح بوده و عملکرد آن را به طور مستقیم وابسته به سیستم میخ کوبی می‌سازد [۵].

نتایج این مطالعات نشان داد که بیشترین نیروی استاتیکی ایجاد شده در سیستم خاک مسلح در تراز ۰/۴۵ ارتفاع سازه و در سیستم میخ کوبی در تراز ۰/۵۵ ارتفاع اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در مورد سیستم خاک مسلح و سیستم خاک میخ کوبی منفرد شده، محل برآیند نیروی استاتیکی در تراز ۰/۳۳ گزارش شده است. همچنین وقوع بیشترین نیرو در بالاترین ردیف میخ‌ها در خلال تجربه‌ی بارهای ترافیکی، لزوم توجه بیشتر به المان‌های تسلیح قرار گرفته در ترازهای ارتفاعی بالاتر در این سیستم را مسجل ساخت [۴].

جدول ۱. پارامترهای لرزه ای در سطح زمین بر اساس نوع ساختگاه و منطقه لرزه ای [۷]

Table 1. Seismic parameters at the ground level based on the type of site and seismic zone [7]

| نوع منطقه | خطر پذیری خیلی زیاد | | | خطر پذیری زیاد | | | خطر پذیری متوسط | | |
|-----------------|---------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ |
| نوع ساختگاه | | | | | | | | | |
| پریود غالب (s) | ۰/۱۵ | ۰/۲۰ | ۰/۳۰ | ۰/۱۵ | ۰/۲۰ | ۰/۳۰ | ۰/۱۵ | ۰/۲۰ | ۰/۳۰ |
| شتاب بیشینه (g) | ۰/۴۵ | ۰/۵۳ | ۰/۶۷ | ۰/۴۰ | ۰/۴۷ | ۰/۶۱ | ۰/۳۵ | ۰/۴۰ | ۰/۵۵ |

II و تیپ III و ۳ منطقه با خطرپذیری لرزه‌ای خیلی زیاد، زیاد و متوسط تقسیم‌بندی شده است. پارامترهای لرزه‌ای در سطح زمین بر اساس این تقسیم‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی توده میخ‌کوبی شده (زمین طبیعی) بر اساس تقسیمات ساختگاهی

از آنجا که تقسیمات ساختگاهی در آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده بر اساس سرعت موج برشی صورت گرفته است، لذا با انتخاب خاک‌های دانه‌ای به عنوان مصالح با قابلیت اجرای سیستم میخ‌کوبی و استفاده از روابط موجود میان سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و سایر پارامترهای ژئوتکنیکی (جدول ۲)، به تعیین و انتخاب پارامترهای مذکور و مدل‌سازی آن با استفاده از مدل رفتار مورکلمب پرداخته شده است.

۲-۳- انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی توده خاک مسلح شده با تسمه فلزی
از آنجا که خاک‌های مورد استفاده در سیستم خاک مسلح می‌بایستی از یک چهارچوب مشخص پیروی نمایند (شن ماسه‌دار با تراکم بالای ۹۰٪) [۳]، تفاوت و گوناگونی چشمگیری در پارامترهای آن دیده نمی‌شود. اما از آنجا که میزان دقت در مدل‌سازی اندرکنش تسمه فلزی با خاک در مدل‌های عددی، وابسته به نتایج آزمایشات در این زمینه می‌باشد، انتخاب مصالح باید به گونه‌ای صورت گیرد که از رفتار اندرکنشی المان تسلیح با مصالح انتخابی اطلاعاتی دقیق در اختیار باشد تا بتوان رفتار اندرکنشی تسمه با خاک را در مدل‌های عددی به درستی تعریف نمود. بدین منظور، جهت مدل‌سازی توده مسلح شده با تسمه فلزی از گزارشات ارائه شده توسط سانکار^۱ در سال ۲۰۱۰ استفاده شده است [۱۵]. این گزارشات که حاصل انجام یک سری آزمایش بیرون کشیدگی تسمه می‌باشد در جدول ۳ ارائه شده است.

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط یزدان دوست در سال ۲۰۱۹، جزء اولین مطالعات لرزه‌ای صورت گرفته بر روی دیوارهای مرکب سری می‌باشد. در این مطالعات، با انجام یک سری آزمایش میز لرزه بر روی مدل‌های فیزیکی سیستم مرکب سری با مقیاس ۱/۱۰، تأثیر آرایش میخ‌ها بر روی عملکرد این سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده افزایش طول میخ‌ها می‌تواند نقش چشمگیری در افزایش پایداری و کاهش تغییر شکل‌های سیستم بازی کند. همچنین، بر اساس شتاب آستانه گسیختگی به دست آمده برای هر سیستم، $H/7$ به عنوان طول بحرانی میخ‌ها در شرایط لرزه‌ای معرفی شده است [۶].

با توجه به گسترش روز افزون استفاده از این سیستم کارآمد و عدم شناخت کافی از عملکرد لرزه‌ای آن، تلاش شد گامی موثر در روشن‌تر شدن ابعاد مختلف رفتار این سیستم در شرایط لرزه‌ای حاکم بر مناطق مختلف ایران برداشته شود. از این رو، با انتخاب پارامترهای لرزه‌ای بر اساس تقسیمات ساختگاهی ایران و همچنین با انجام یک سری مطالعه عددی و آزمایشگاهی، تأثیر شتاب بیشینه (PGA)، سرعت مطلق تجمعی (CAV)، طول المان تسلیح و ارتفاع دیوار بر عملکرد لرزه‌ای سیستم خاک مسلح ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مراحل انجام تحقیق

۲-۱- انتخاب پارامترهای لرزه‌ای بر اساس تقسیمات ساختگاهی ایران
یزدان دوست و همکاران در سال ۱۳۹۲ با انجام یک سری مطالعات لرزه‌ای بر روی پاسخ ساختگاه‌های مختلف نشان داد که هر ساختگاه با توجه به منطقه لرزه‌ای قرار گرفته در آن نماینده‌ی محدوده‌ای از شتاب بیشینه و پریود غالب در سطح زمین می‌باشد [۷]. لذا در این تحقیق نوع ساختگاه و منطقه لرزه‌ای قرارگیری آن به عنوان جایگزین پارامترهای شتاب بیشینه و پریود غالب انتخاب و بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ به ۳ ساختگاه تیپ I، تیپ

جدول ۳. مشخصات ژئوتکنیکی گزارش شده توسط Suncar [15] برای توده خاک مسلح شده با تسمه

Table 3. Geotechnical characteristics reported by Suncar [15] for steel-strip reinforced soil mass

| واحد | مقدار | پارامتر |
|-----------------------|--|------------------------------|
| (kg/m ³) | ۲۰۶۰ | وزن مخصوص |
| | ۰/۳۰ | ضریب پواسون |
| (kg/cm ²) | ۰/۰۵ | چسبندگی |
| | ۰/۴۰ | نسبت تخلخل |
| درجه | $\phi_{max} = -0.022\sigma_n + 46.95$ | زاویه اصطکاک داخلی بیشینه |
| درجه | $\phi_{residual} = -0.016\sigma_n + 39.04$ | زاویه اصطکاک داخلی نهایی |
| درجه | $\psi_{max} = \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{6}\right)\phi_{max}$ | زاویه اتساع |
| Pa | $G_0 = 1200P_a \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{\sigma'_0}{P_a}\right)^{0.85}$ | مدول برشی |

جدول ۴. محدوده تغییرات CAV در سطح زمین بر اساس نوع ساختگاه و منطقه لرزه ای [۷]

Table 4. Range of CAV changes at ground level based on site type and seismic zone [7]

| نوع منطقه | خطر پذیری خیلی زیاد | | | خطر پذیری زیاد | | | خطر پذیری متوسط | | |
|-------------|---------------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ |
| نوع ساختگاه | | | | | | | | | |
| CAV (cm/s) | ۳۰۴~۱۶۹۷ | ۴۹۶~۱۹۳۹ | ۱۰۶۳~۲۸۰۸ | ۳۲۷~۱۱۱۵ | ۳۹۵~۱۷۲۰ | ۷۲۴~۲۴۱۶ | ۲۰۴~۸۹۲ | ۴۲۸~۱۵۰۲ | ۶۰۴~۱۹۸۱ |

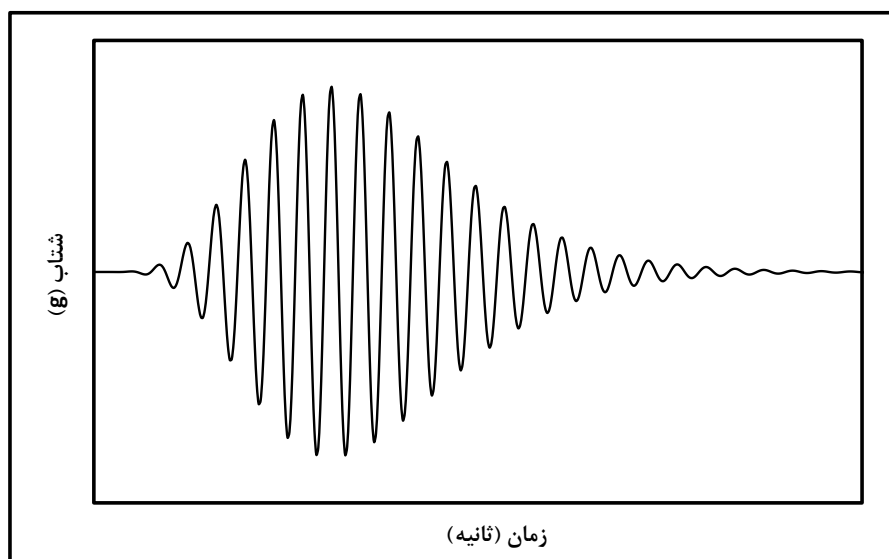
تعریف پارامترهای دامنه‌ی بیشینه، پرپود غالب و تعداد سیکل‌های بارگذاری (مدت دوام) به عنوان پارامترهای ورودی این بار هارمونیک، برای تعریف آن ضروری می‌باشد. لذا برای تکمیل پارامترهای ورودی این بار، با استناد بر شتاب‌های بیشینه و پرپود غالب تعیین شده در بخش ۲-۱ بر اساس تقسیمات ساختگاهی و لرزه‌ای، تنها کافی است تعداد سیکل‌های بارگذاری به عنوان یک پارامتر ورودی برای این بار تعیین گردد. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط یزدان دوست [۷]، پارامتر سرعت مطلق تجمعی (CAV) به عنوان جایگزینی مناسب برای پارامتر تعداد سیکل بارگذاری (مدت دوام) توصیه و حدود تغییرات مقادیر این پارامتر بر حسب نوع ساختگاه و مناطق لرزه‌ای در قالب جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۴- انتخاب بار لرزه‌ای

بار هارمونیک مورد استفاده در این تحقیق از نوع سینوسی - نمایی بوده که ضمن حفظ پرپود ثابت در طول بارگذاری، قابلیت افزایش و کاهش دامنه بارگذاری را دارا می‌باشد. این قابلیت تا حد زیادی این بار هارمونیک را شبیه نگاشت‌های طبیعی می‌سازد. شکل عمومی این بار هارمونیک که از رابطه (۱) تبعیت می‌کند مطابق با شکل ۶ می‌باشد.

$$G_{max} = 20 \times 1000 (N_1)_{60}^{1/3} (\sigma'_m)^{1/2} \quad (1)$$

که در آن f فرکانس بارگذاری بوده و ξ ، α و β ضرایبی هستند که شکل فرم و تعداد سیکل‌ها را مشخص می‌سازد. با توجه به رابطه‌ی مذکور،



شکل ۶. شکل عمومی بار هارمونیک مورد استفاده

Fig.6. Schematic form of input acceleration time history used in analyzes

قرار گرفته است. استفاده از مدل‌های رفتاری متنوع خاک، توانمندی در مدل‌سازی اندرکنش مصالح، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح، مدل‌سازی مناسب رفتار مصالح حین زلزله و همچنین قابلیت کد نویسی توسط کاربر از جمله مزیت‌های این نرم افزار به شمار می‌آید [۱۶].

۲-۵-۲- مشخصات هندسی مدل عددی

از آنجا که ارتفاع سازه و طول المان‌های تسلیح نقش مهمی در رفتار لرزه‌ای سیستم مرکب ایفا می‌کند، بررسی عملکرد لرزه‌ای این سیستم در ۲ رده‌ی ارتفاعی ۶ و ۹ متر با نسبت ارتفاعی برابر توده‌ی میخ‌کوبی شده به توده مسلح شده با تسمه فلزی و ۵ رده‌ی طولی از المان تسلیح ($0.6 H$ ، $0.8 H$ ، $1.0 H$ ، $1.2 H$ و $1.4 H$) صورت گرفته است. همچنین بر اساس مطالعات انجام شده توسط یزدان دوست [۶]، طول المان‌های میخ به عنوان ضریبی از ارتفاع کل سیستم (αH) و طول المان‌های تسمه به ضریبی از ارتفاع سیستم خاک مسلح (αh) با ضرایب برابر، در نظر گرفته شده است (شکل ۷).

در راستای انتخاب ابعاد بهینه مدل‌های عددی و حذف تأثیر مرزهای تعریف شده بر نتایج تحلیل، ابعاد مدل‌ها بر اساس تحلیل‌های حساسیت انجام شده توسط یزدان دوست [۱۷] صورت گرفت. بر اساس این تحلیل‌ها، طول توده خاک پشت ناحیه‌ی مسلح شده و جلوی سیستم به ترتیب پنج

همان طور که در رابطه‌ی (۲) مشاهده می‌شود، CAV^1 عبارت است از جمع مطلق تجمعی سرعت و یا به عبارت دیگر سطح زیر نمودار شتاب که به صورت تجمعی و بدون در نظر گرفتن علامت منفی حاصل می‌شود. مطابق با این تعریف، هر اندازه تعداد سیکل‌های موثر یک نگاشت در یک دامنه‌ی ثابت بیشتر باشد، آن نگاشت دارای مقدار بزرگتری از CAV خواهد بود.

$$CAV = \int_0^T |a(t)| \quad (2)$$

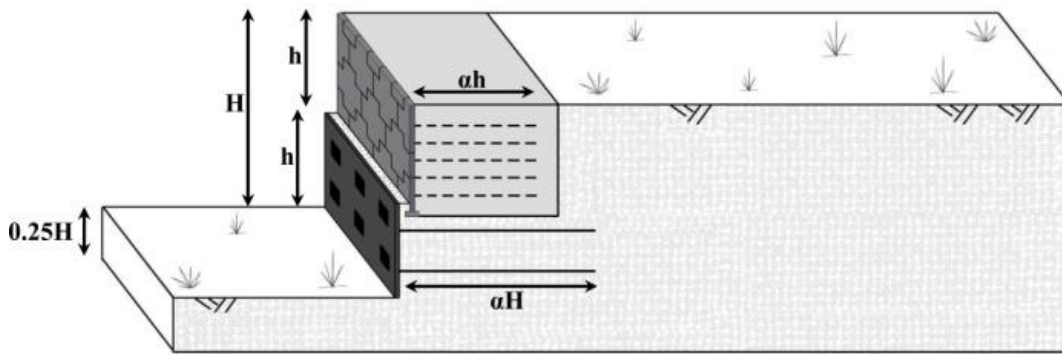
در این رابطه، (at) تغییرات شتاب در برابر زمان می‌باشد. لذا با انتخاب مقادیر پارامتر CAV در محدوده‌های توصیه شده توسط یزدان دوست [۷]، بارهای هارمونیک نظیر هر ساختگاه و منطقه لرزه‌ای تولید خواهد شد.

۲-۵-۲- ساخت مدل‌های عددی و تحلیل‌های دینامیکی

۲-۵-۱- نرم افزار مورد استفاده

جهت انجام تحلیل‌ها نرم افزار تفاضل محدود $FLAC^2$ مورد استفاده

- 1 Cumulative Absolute Velocity
- 2 Fast Lagrangian Analysis of Continuum



شکل ۷. ابعاد مدل‌های ساخته شده

Fig.7. The schematic geometry of the numerical models

آزمایشات انجام شده در زمینه‌ی رفتار اندرکنشی میخ‌ها، شرایط اندرکنش این المان با توده خاک به خوبی مدل گردد [۱۶]. در توابع اندرکنشی تعریف شده برای المان Cable، ظرفیت بیرون کشیدگی (S_{bond}) یکی از پارامترهای اصلی در مدل‌سازی عددی المان میخ می‌باشد. این پارامتر به صورت تابعی از عدد نفوذ استاندارد (N_{SPT}) و در قالب رابطه‌ی (۳) توسط دستورالعمل NCHRP توصیه شده است [۱۸].

$$S_{bond} = a(0.05N_{SPT})^b$$

$$a = \begin{cases} 119(sand) \\ 122(gravel) \end{cases} \quad (3)$$

$$b = \begin{cases} 0.390(sand) \\ 0.469(gravel) \end{cases}$$

لذا با استفاده از رابطه مذکور و همچنین اعداد نفوذ استاندارد نظر گرفته شده برای تقسیمات مختلف ساختمانی (جدول ۲)، مقدار پارامتر S_{bond} به عنوان یک پارامتر ثابت و مستقل برای هر ساختمان محاسبه و به همراه سایر پارامترهای المان میخ در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به نگرش دائمی بودن سیستم میخ‌کوبی در این تحقیق، در انتخاب پارامترهای رویه‌ی به کار رفته در مدل‌های عددی از ضوابط مربوط به رویه‌های دائمی پیروی شده است. در این راستا، با توجه به توصیه‌های

و دو برابر ارتفاع سازه در هر یک از مدل‌ها انتخاب شده است. همچنین به علت عدم نیاز به مدل‌سازی ساختمانی به علت استفاده از پارامترهای لرزه‌ای در سطح زمین و با توجه به تأثیر چشمگیر ابعاد پی بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم، بر اساس توصیه‌های ارائه شده توسط یزدان دوست [۱۷]، از یک پی با ارتفاعی برابر با $0.25H$ استفاده شده است. شکل ۷ حاوی نمای شماتیک از سیستم خاک مسلح با ابعاد مذکور می‌باشد.

همچنین به جهت عبور موج از مدل و جلوگیری از فیلتر شدن امواج با فرکانس‌های بالا، ابعاد مش‌ها تقریباً به اندازه طول موج بزرگترین فرکانس موج ورودی، انتخاب شده است.

۲-۵-۳ المان‌های تسلیح و رویه سیستم میخ‌کوبی

از آنجا که ابعاد چال حفاری و آرماتور مورد استفاده تابعی از آرایش میخ‌ها و شرایط محیطی و اجرایی می‌باشد لذا در این پروژه با در نظر گرفتن تمامی حالات و شرایط مورد مطالعه و همچنین توصیه‌های دستورالعمل NCHRP در خصوص سیستم‌های میخ‌کوبی شده [۱۸]، از چال حفاری با قطر ۱۰ cm و آرماتور به قطر ۲۵ mm استفاده شده است.

در راستای مدل‌سازی عددی میخ‌ها از المان Cable استفاده شده است. این المان تنها با قابلیت تحمل نیروهای محوری و مدل رفتاری الاستو-پلاستیک، گزینه‌ای مناسب جهت مدل نمودن رفتار میخ‌های تزریقی می‌باشد. از سوی دیگر توابع اندرکنشی غیر خطی تعریف شده برای المان Cable در نرم افزار FLAC، این امکان را فراهم می‌سازد تا با استفاده از نتایج

جدول ۵. پارامترهای مکانیکی المان‌های میخ [۷]

Table 5. Mechanical parameters of nail elements [7]

| پارامتر | واحد | نوع ساختگاه | | |
|--------------------|----------------------|-------------|-------|-------|
| | | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ |
| ظرفیت بیرون کشیدگی | (kN/m ²) | ۲۱۴/۲ | ۱۵۱/۴ | ۹۶/۸ |
| وزن مخصوص | (kg/m ³) | | ۷۸۰۰ | |
| مدول الاستیسیته | (GPa) | | ۲۰۰ | |
| تنش گسیختگی | (MPa) | | ۲۳۵ | |

جدول ۶. پارامترهای مکانیکی المان‌های رویه [۱۹]

Table 6. Mechanical parameters of surface elements [19]

| پارامتر | مقدار | واحد |
|-----------------|-------|----------------------|
| وزن مخصوص | ۲۵۰۰ | (kg/m ³) |
| مدول الاستیسیته | ۲۰ | (GPa) |
| ضخامت | ۱۰ | (cm) |
| تنش گسیختگی | ۲۱ | (MPa) |

مساوی بر روی هر پوسته ۱/۵ متری نصب می‌گردد. تسمه‌ها به ابعاد رایج ۶×۵ میلی متر مربع جهت مدل‌سازی انتخاب گردیدند. سایر مشخصات تسمه‌های فولادی در جدول ۷ نشان داده شده است.

همانند مدل‌سازی المان میخ، شبیه‌سازی اندرکنش میان تسمه و خاک نیز از گام‌های مهم در فرایند مدل‌سازی تسمه‌های فولادی می‌باشد. به این منظور، از المان Strip با قابلیت مدل‌سازی رفتار فولاد و همچنین مدل‌سازی رفتار اندرکنش تسمه با خاک استفاده شد. در این المان، اندرکنش تسمه با خاک با استفاده از یک مدل رفتاری الاستو-پلاستیک و به صورت تابعی از فشار سربار تعریف می‌شود. بنابراین، جهت تعریف پارامترهای این مدل رفتاری در نرم افزار FLAC نیاز به نتایج آزمایش بیرون کشیدگی تسمه می‌باشد. از این رو در تحقیق حاضر از نتایج مطالعات انجام شده توسط سانکار [۱۵] بر روی رفتار اندرکنشی تسمه فولادی با خاک استفاده شده است.

آیین‌نامه‌ی AASHTO در خصوص شرایط رویه‌های دائمی، از رویه‌ای با ضخامت ۱۰ cm و پارامترهای مکانیکی منطبق با جدول ۶ استفاده شده است [۱۹]. فرایند مدل‌سازی این رویه بتنی در نرم افزار FLAC با بهره‌گیری از المان Beam انجام شده است. این المان با قابلیت تحمل نیروهای خمشی، برشی و محوری و مدل رفتاری الاستوپلاستیک، گزینه‌ای مناسب جهت مدل نمودن رفتار قطعات بتنی رویه می‌باشد.

۲-۴-۵-۴ المان‌های تسلیح و رویه سیستم خاک مسلح با تسمه فلزی

فاصله قائم و افقی تسمه، طول تسمه و ابعاد آن تاثیر به سزایی در رفتار دیوارهای خاک مسلح ایفا می‌کند. در تحقیق حاضر با توجه به استفاده از المان‌های پوسته به صورت صلیبی شکل، ابعاد آن‌ها و روش‌های اجراء، فواصل تسمه‌ها در راستای قائم و افق به صورت مساوی برابر با ۷۵ سانتی‌متر انتخاب گردید. بدین گونه که ۲ تسمه به صورت افقی و عمودی با فواصل

جدول ۷. مشخصات بلوک بتنی صلیبی و تسمه فلزی [۳]

Table 7. Specifications of cruciform concrete panel and steel strip [3]

| پارامتر | تسمه | بلوک | واحد |
|-----------------|---------|----------------|----------------------|
| وزن مخصوص | ۷۸۰۰ | ۲۵۰۰ | (kg/m ³) |
| مدول الاستیسیته | ۲۰۰ | ۲۰ | (GPa) |
| ابعاد | ۶ × ۰/۵ | ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵ | (cm) |
| تنش گسیختگی | ۲۳۵ | ۲۱ | (MPa) |

۲-۵-۵- شرایط مرزی و تکیه‌گاهی

شرایط مرزی در تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی از اهمیت خاصی برخوردار است. در حالت استاتیکی از تکیه‌گاه‌های غلتکی برای مدل‌سازی خاک اطراف مدل استفاده شده است. به این معنی که در تکیه‌گاه‌های جانبی، حرکت خاک در جهت افقی بسته شده و در جهت قائم حرکت آزادانه انجام می‌گیرد. اما در تکیه‌گاه زیرین مدل، حرکت در جهت قائم بسته و در راستای افقی رها شده است. این روش در تحلیل سبب نزدیک شدن مدل‌سازی به واقعیت خواهد شد. در تحلیل‌های دینامیکی با توجه به امکان بازتاب امواج به داخل مدل و کاهش شدید دقت نتایج، مرزهای استاتیکی جای خود را به مرزهای آرام^۱ می‌دهند.

۲-۵-۶- میرایی

در راستای تعیین پارامترهای میرایی هیسترسیس توده خاک نظیر روابط D و G/G_0 با کرنش برشی، از نتایج مطالعات ککوشو^۲ در سال ۱۹۸۰ استفاده شده است. در این مطالعات تأثیر فشار همه‌جانبه بر روابط میان D و G/G_0 با کرنش برشی برای خاک‌های دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. لذا با تکیه بر نتایج مطالعات مذکور و استفاده از قابلیت برنامه نویسی در محیط FLAC، روابط میان D و G/G_0 با کرنش برشی به گونه‌ای کُد نویسی شده است که نرم افزار در هر گام تحلیل بر اساس تنش‌های همه‌جانبه موجود، روابط مذکور را با توجه به نتایج مطالعات ککوشو برای مدل تعریف نماید.

۲-۵-۷- انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح حد فاصل^۳

به منظور تحقق رفتار مناسب در فصل مشترک دو توده از مصالح ژئوتکنیکی با پارامترهای متفاوت، استفاده از یک لایه‌ی حد فاصل با مشخصات ژئوتکنیکی معادل در مدل‌سازی عددی توصیه شده است. مدل‌سازی اندرکنش بین مصالح با سختی متفاوت توسط این روش برای اولین بار توسط هوانگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۸ توصیه شد. در این روش، در فصل مشترک مصالح با پارامترهای متفاوت، از یک لایه با ضخامت ۵ سانتی‌متر و با مشخصات معادل مصالح ضعیفتر مطابق جدول ۸ استفاده می‌شود [۲۱]. اگر چه این روش ماحصل مطالعات استاتیکی می‌باشد، اما گزارشات ارائه شده از سایر محققین نشان داده است که استفاده از این روش در شرایط دینامیکی نیز منجر به دستیابی به نتایج قابل قبولی می‌شود [۲۳ و ۲۲]. مقایسه انجام شده بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در این تحقیق نیز به عملکرد مناسب این روش در مطالعات لرزه‌ای اشاره دارد (شکل ۱۲). از سوی دیگر، از آنجا که در این روش پارامترهای مصالح حد فاصل به صورت تابعی از مصالح اطراف آن تعریف می‌شود، امکان تغییر این پارامترها متناسب با تغییر پارامترهای مصالح اطراف آن حین بارگذاری دینامیکی فراهم می‌شود. همانند قسمت‌های قبل، تعریف این پارامترها برای مدل توسط قابلیت کُد نویسی در محیط نرم افزار FLAC صورت گرفته است (شکل ۸).

۲-۵-۸- ساخت مدل عددی مطابق با روش اجرای سیستم مرکب سری

در راستای نزدیکتر شدن هر چه بیشتر فرآیند ساخت مدل به مراحل

3 Interface
4 Chia-Cheng Fan

1 Quiet boundary
2 Kokusho

جدول ۸. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح حد فاصل [۲۱]

Table 8. Geotechnical characteristics of interface element [21]

| پارامتر معادل | پارامتر |
|--|--------------------|
| $\gamma_{\text{interface}} = \gamma_{\text{soil}}$ | وزن مخصوص |
| $G_{\text{interface}} = G_{\text{soil}}$ | مدول برشی |
| $\nu_{\text{interface}} = \nu_{\text{soil}}$ | ضریب پواسون |
| $C_{\text{interface}} = 0$ | چسبندگی |
| $\phi_{\text{interface}} = 2/3$ | زاویه اصطکاک داخلی |

مدل، بارگذاری دینامیکی بر اساس اعمال بارهای هارمونیک انتخاب شده در طول بستر پی و تحلیل دینامیکی در طول زمان هر شتاب نگاشت و با گام‌های زمانی $10^{-7} \times 5/207$ انجام گردیده است.

۲-۶- ساخت مدل‌های فیزیکی و انجام آزمایشات میز لرزه

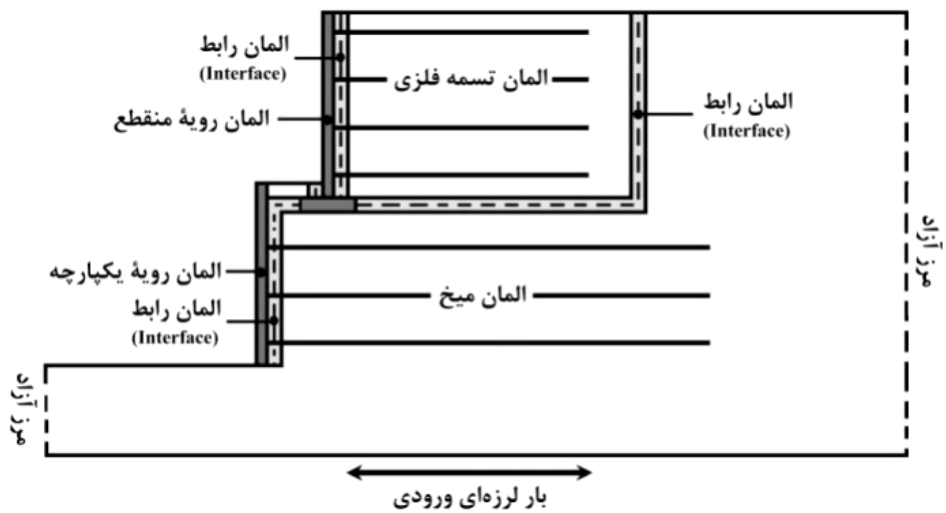
به منظور کنترل نتایج حاصل از مطالعات عددی در زمینه عملکرد لرزه‌ای سیستم مرکب سری، بررسی عملکرد لرزه‌ای این سیستم در قالب مدل‌های واقعی و یا مدل‌های آزمایشگاهی در شرایط مشابه با مدل‌های عددی، اجتناب ناپذیر است. لذا در این تحقیق، با ساخت سه مدل فیزیکی از سیستم مرکب سری با مقیاس ۱/۱۰، به بررسی رفتار لرزه‌ای این سیستم پرداخته شده است. جهت ساخت مدل‌های فیزیکی، پارامترهای ژئوتکنیکی ساختگاه تیپ ۲ و همچنین پارامترهای مورد استفاده جهت مدل‌سازی المان‌های میخ و تسمه فلزی در مدل‌های عددی به عنوان پارامترهای مرجع انتخاب و سپس با استفاده از روابط مدلینگ توصیه شده توسط وود [۲۴]، تمامی اجزاء مدل‌ها شبیه‌سازی شده‌اند. جزئیات کامل مراحل شبیه‌سازی اجزاء مدل‌های فیزیکی را می‌توان در تحقیق ارائه شده توسط یزدان دوست [۶] مشاهده نمود. پس از شبیه‌سازی مصالح، المان‌ها و اجزاء تشکیل دهنده‌ی سیستم مرکب سری در مقیاس ۱/۱۰، مدل‌های فیزیکی با ارتفاعی برابر با ۸۰ سانتی‌متر و در سه آرایش مختلف از طول المان‌های میخ ($L=0.5H$ ، $L=0.7H$ و $L=0.9H$) مطابق با مراحل واقعی اجرا بر روی میز لرزه ساخته (شکل ۱۰) و ضمن ابزارگذاری مناسب (شکل ۱۱) و اعمال بارهای هارمونیک نظیر ساختگاه تیپ ۲ (مشابه با شرایط مطالعات عددی)، به بررسی عملکرد لرزه‌ای این سیستم در قالب تغییر شکل‌های جانبی، مکانیزم گسیختگی و همچنین بزرگ‌نمایی شتاب پرداخته شده است.

اجرای سیستم مرکب سری و دستیابی به توزیع واقعی تنش در مدل ساخته شده، ابتدا زمین طبیعی (ساختگاه) بر اساس ملاحظات ارائه شده در بخش ۲-۲ مدل‌سازی شده و تحت تحلیل استاتیکی قرار می‌گیرد. سپس جهت اجرای قسمت خاک مسلح، ابتدا پنل‌های بتنی، فنداسیون تنظیم، المان‌های تسلیح، مصالح توده‌ی خاک مسلح، مصالح حد فاصل و توده‌ی خاک برجا بر اساس ملاحظات موجود برای اولین لایه اجرا و سپس جهت برقراری پایداری در سیستم و توزیع تنش‌های استاتیکی، مدل ساخته شده تحت تحلیل استاتیکی قرار می‌گیرد. این فرآیند تا اجرای لایه‌ی آخر که دستیابی به ارتفاع مورد نظر می‌باشد، ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است که طبق توصیه‌ی آیین‌نامه‌های FHWA و AASHTO مبنی بر اجرای یک لایه به ضخامت ۱/۱۰ ارتفاع سازه در جلوی رویه بتنی (عمق مدفون)، این لایه همزمان با اجرای اولین لایه، اجرا می‌گردد.

در ادامه، جهت اجرای مرحله‌ی اول سیستم میخ‌کوبی ابتدا لایه اول حفاری و پس از انجام تحلیل استاتیکی، المان‌های میخ، رویه و مصالح حد فاصل بر اساس ملاحظات موجود اجرا و جهت برقراری پایداری در سیستم و توزیع تنش‌های استاتیکی، مدل ساخته شده تحت تحلیل استاتیکی قرار می‌گیرد. این فرآیند تا اجرای مرحله‌ی آخر که دستیابی به ارتفاع یا عمق مورد نظر می‌باشد، ادامه می‌یابد. مراحل ساخت مدل به صورت شماتیک در شکل ۹ ارائه شده است.

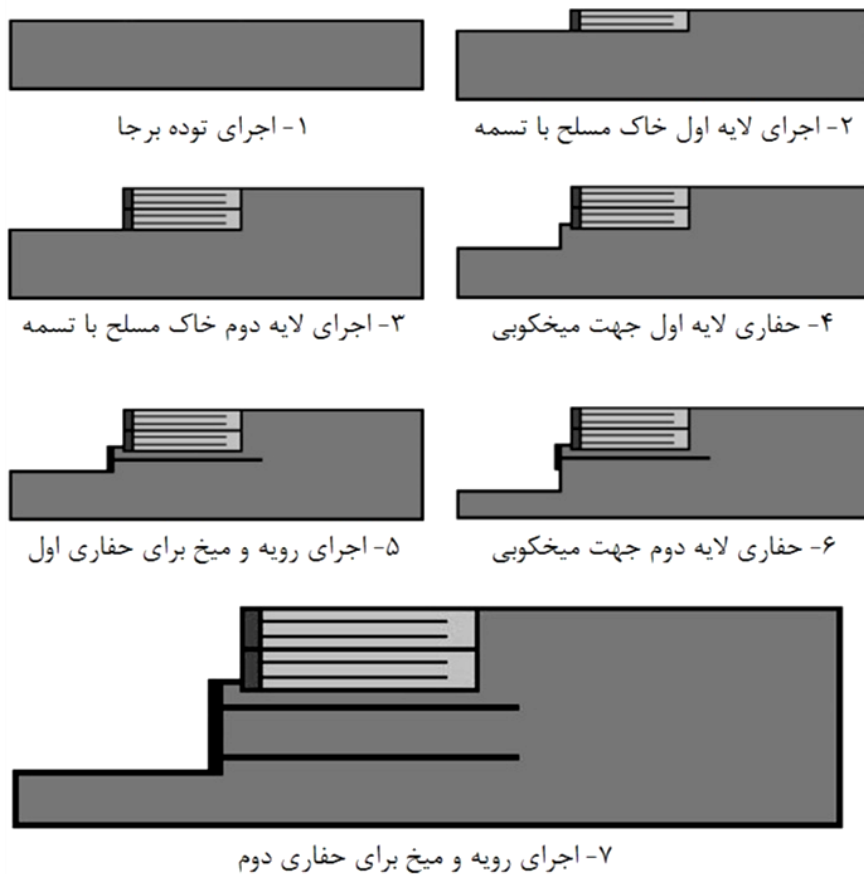
۲-۵-۹- تحلیل مدل‌های عددی در شرایط دینامیکی

منظور تعیین عملکرد لرزه‌ای سیستم مرکب سری در قالب تغییر مکان‌های افقی ماندگار رویه در حالت دینامیکی، پس از انجام تحلیل استاتیکی آخرین گام اجرایی و صفر نمودن تغییر مکان‌های به وجود آمده در



شکل ۸. مدل عددی سیستم مرکب سری

Fig. 8. Numerical model of MSE/soil nail hybrid wall



شکل ۹. مراحل ساخت مدل سیستم مرکب سری

Fig. 9. The construction sequence of numerical models



شکل ۱۰. مدل فیزیکی سیستم مرکب سری

Fig.10. Physical model of MSE/soil nail hybrid retaining wall

۳- نتایج و تحلیل‌ها

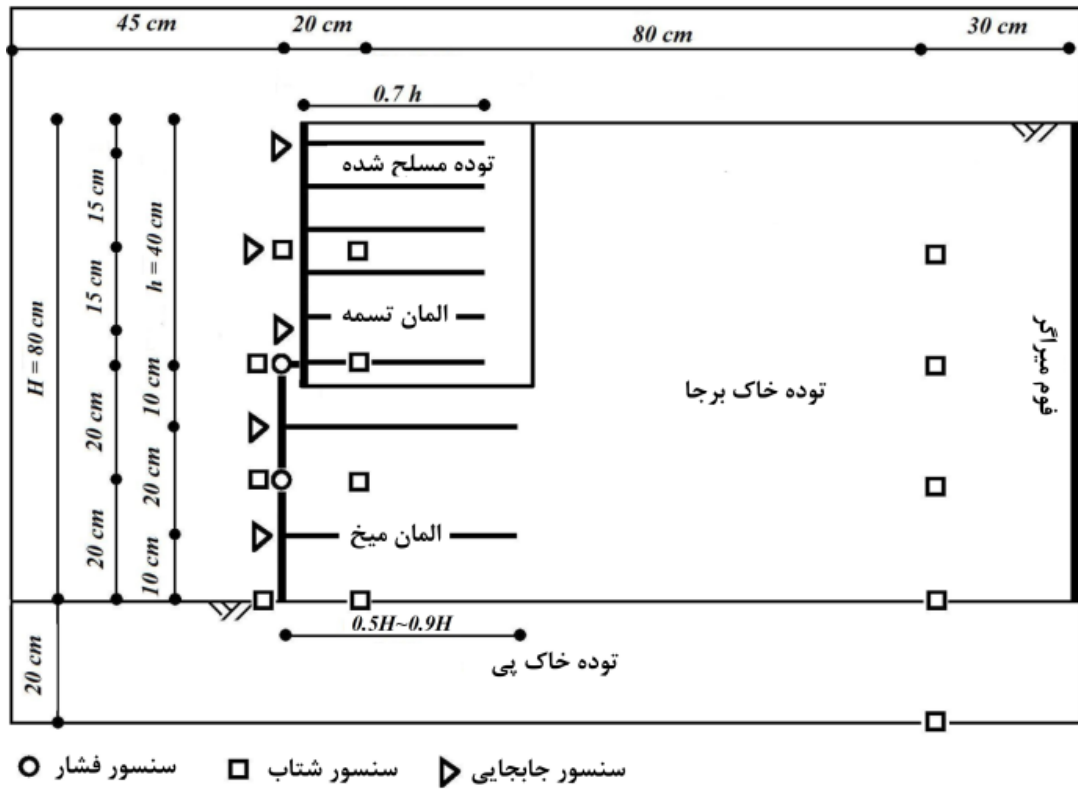
۳-۱- الگوی گوه گسیختگی سیستم مرکب سری

مشاهدات فیزیکی از وضعیت سیستم ترکیبی پس از رسیدن به شرایط گسیختگی حاکی از تشکیل یک سطح لغزش دو جزئی متشکل از تلاقی یک خط شیب‌دار و یک سهمی محدب در یک نقطه مشخص می‌باشد به نحوی که سطح گسیختگی سهمی‌گون در توده میخ‌کوبی و سطح گسیختگی مسطح در توده مسلح شده با تسمه واقع شده است. همان‌طور که هانسن^۱

۲-۷- صحت سنجی مدل عددی

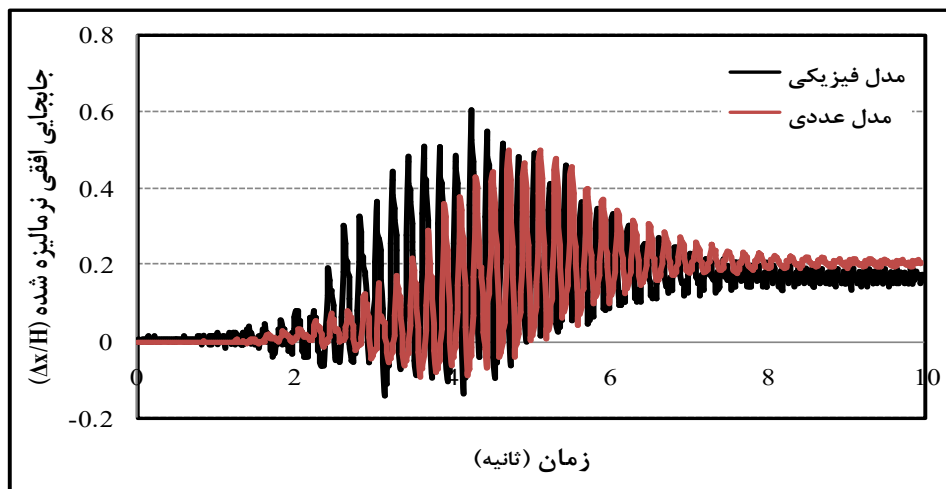
به منظور صحت سنجی مدل‌سازی عددی، از نتایج آزمایشات میز لرزه استفاده شده است. مقایسه بین نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی مدل‌های عددی با مدل‌های آزمایشگاهی، حاکی از انطباق مناسب بین نتایج می‌باشد. این انطباق به گونه‌ای است که می‌توان از اختلافات موجود میان مقادیر مدل عددی و مدل مقیاس کامل چشم‌پوشی نمود. پاسخ‌ها به جایی تاج دیوار در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

1 Hansen



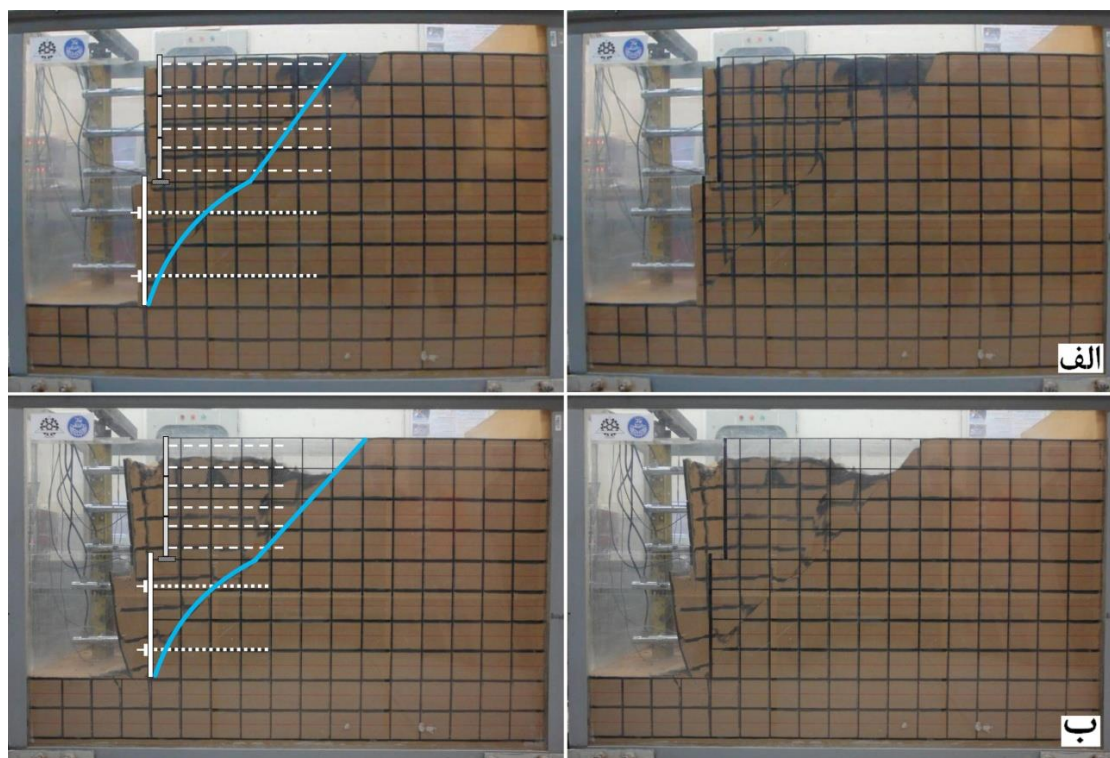
شکل ۱۱. ابزار بندی مدل فیزیکی سیستم ترکیبی بر روی میز لرزه

Fig. 11. Arrangement of instrumentation in physical models



شکل ۱۲. پاسخ جا به جایی افقی نرمالیزه شده تاج سیستم مرکب با طول میخ ۰٫۹H، تحت شتاب ۰٫۶g

Fig. 12. Normalized horizontal displacement response of the crest of physical model with 0.9H nail length under 0.6g acceleration



شکل ۱۳. شکل هندسی گوهی گسیختگی مدل فیزیکی سیستم مرکب سری: الف) طول المان تسلیح: $0.7H$ ، ب) طول المان تسلیح: $0.5H$.

Fig.13. Geometry of failure mechanism and deformation modes during shaking after final shaking in the physical models including nails with lengths of (a) $0.7H$ and (b) $0.5H$

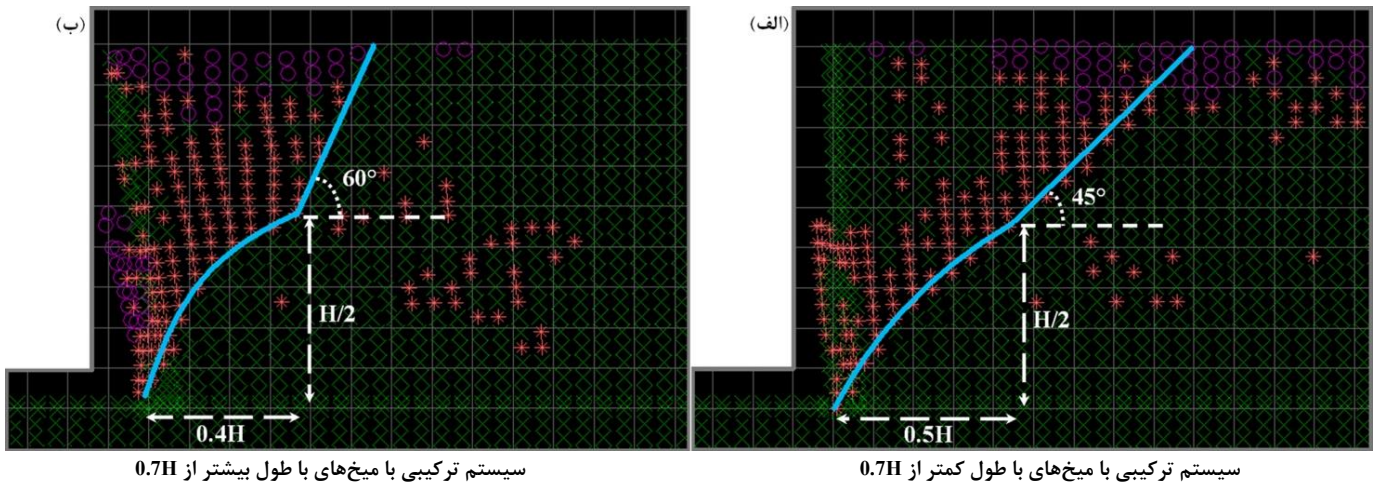
میخ‌ها سبب تضعیف ناحیه میخ‌کوبی شده و در نتیجه افزایش جابجایی‌های این ناحیه به عنوان بستر ناحیه مسلح شده با تسمه می‌شود. این امر سبب می‌شود که حرکات نیمه‌ی فوقانی سیستم مرکب در قالب یک حرکت جانبی متمایل به پایین صورت گیرد. همان‌طور که واتانابه^۳ و همکاران [۲۷] نیز گزارش نموده‌اند، این نوع حرکت زمینه را جهت توسعه بیشتر باندهای برشی به سمت خاکریز و در نتیجه متمایل‌تر شدن سطح گسیختگی فراهم می‌سازد. از سوی دیگر توزیع نواحی پلاستیک در مدل‌های عددی سیستم مرکب سری نیز حاکی از تشکیل یک گوهی گسیختگی دو جزئی متشکل از تلاقی یک خط و یک سهمی در یک نقطه مشخص می‌باشد (شکل ۱۴). با توجه به تطابق چشمگیر نتایج به دست آمده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی و شواهد موجود، می‌توان گوهی گسیختگی احتمالی در سیستم ترکیبی را به فرم شکل ۱۵ ارائه نمود. استفاده از این الگوی گسیختگی به جای الگوهای توصیه شده برای سیستم‌های مسلح‌سازی متداول (اسپیرال‌های لگاریتمی و مکانیزم‌های دو خطی)، می‌تواند منجر به طراحی دقیق و بهینه این سیستم گردد.

در سال ۱۹۵۳ نشان داد، وقوع حالت مقاوم با اصطکاک منفی دیوار تنها دلیل شکل‌گیری یک سطح گسیختگی محدب در توده مسلح شده می‌باشد [۲۵]. این مکانیزم گسیختگی که به مکانیزم "آلمانی" مشهور است، توسط توفنکجیان^۱ و وستیک^۲ نیز در سال ۲۰۰۰ برای دیوارهای میخ‌کوبی شده تحت بار لرزه‌ای گزارش شده است [۲۶]. مشاهدات نشان می‌دهد که مکان هندسی نقطه‌ی تلاقی مستقل از طول‌ها میخ‌ها بوده و مطابق با شکل ۱۳، در طول $3.5H/8$ از پشت دیوار و ارتفاع $H/2$ معادل با فصل مشترک دو سیستم میخ‌کوبی و توده مسلح شده با تسمه فلزی تشکیل می‌شود. وقوع تغییر در شکل گوه گسیختگی در فصل مشترک سیستم میخ‌کوبی و سیستم مسلح شده با تسمه فلزی می‌تواند به وجود تفاوت میان عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم نسبت داده شود.

همچنین مشاهده می‌شود که شیب خط گسیختگی حادث در توده مسلح شده با تسمه نیز تابعی از طول‌ها میخ‌ها بوده و با کاهش طول میخ‌ها کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، کاهش طول

1 Tufenkjian
2 Vucetic

3 Watanabe



شکل ۱۴. شکل هندسی گوهی گسیختگی مدل عددی سیستم ترکیبی با طول میخ معین

Fig. 14. Geometry of failure mechanism in the numerical models with a certain nail length

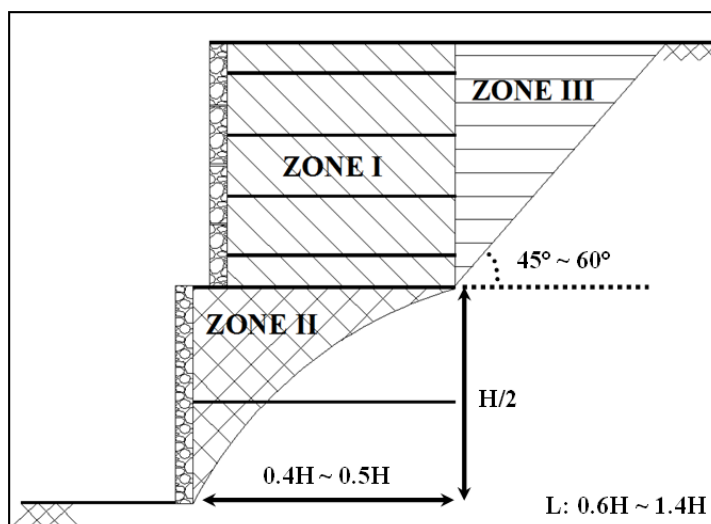
مکان‌های افقی رویه در خلال شتاب نگاشت‌های مذکور برای هر سیستم با طول المان معین، پرداخته شده است. لذا از میان تمامی نتایج به دست آمده، نتایج تحلیل‌های دینامیکی مدل‌های قرار گرفته در ساختگاه نوع ۱ در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی رویه مطابق شکل ۱۷ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی تأثیر چشمگیر طول المان‌های تسلیح بر تغییر مکان‌های الاستیک و پلاستیک به وجود آمده در سیستم ترکیبی می‌باشد به گونه‌ای که در یک بار هارمونیک مشخص کاهش طول المان‌های تسلیح سبب افزایش تغییر شکل‌های افقی سیستم می‌شود. این در حالی است که در خلال کاهش طول المان‌ها، پس از عبور از مرز رده‌ی طولی $0.8H$ ، تغییر مکان‌های افقی سیستم با رشد ناگهانی ۲۶ و ۳۳ درصدی در دیوارهای ۶ و ۹ متری مواجه می‌شود. این امر صحت توصیه‌های آیین‌نامه FHWA را جهت انتخاب $0.7H$ به عنوان طول بحرانی المان‌های تسلیح در شرایط لرزه‌ای، مسجل می‌سازد. لذا می‌توان همانند سیستم خاک مسلح و سیستم میخ‌کوبی، $0.7H$ را به عنوان طول حداقل المان‌های تسلیح در شرایط لرزه‌ای برای سیستم مرکب سری توصیه نمود. در مطالعاتی مشابه که توسط توفنکجیان و همکاران توسط آزمایشات سانتریفیوژ دینامیکی انجام شد، آنان نسبت $0.67H$ را به عنوان طول بحرانی در شرایط لرزه‌ای برای دیوارهای میخ‌کوبی شده معرفی نمودند [۲۶].

از سوی دیگر، ضمن افزایش ارتفاع سازه میزان تغییر مکان‌های افقی سیستم با کاهشی چشمگیر مواجه می‌گردد که علت این پدیده را می‌توان

۳-۲- تعیین مرزهای سطوح عملکرد

از آنجا که در روش طراحی بر اساس سطوح عملکرد، سازه می‌بایستی در راستای دستیابی به یک سطح عملکرد مشخص طراحی شود، تعیین مقدار جا به جایی‌های نظیر هر یک از سطوح عملکرد اجتناب ناپذیر است. بدین منظور، در راستای تعیین مرزهای سطوح عملکرد سیستم مرکب سری، با انتخاب تغییر مکان رویه به عنوان معیار عملکرد و با استناد بر تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های رویه و مشاهدات مدل فیزیکی، به تعیین مرزهای عملکرد این سیستم پرداخته شده است. مشاهدات صورت گرفته حاکی از وقوع ریزترک‌هایی در سیستم ترکیبی در خلال تجربه‌ی تغییر مکان‌های با مقادیر 0.055 الی 0.11 ارتفاع سیستم می‌باشد. این در حالی است که تغییر مکان‌هایی معادل با 0.05 الی 0.06 ارتفاع سیستم، آغازی بر بسیج نواحی پلاستیک و شروع تشکیل گوهی گسیختگی می‌باشد (شکل ۱۶). بنابراین مقادیر تغییر شکل‌های کمتر از 0.06 به عنوان ناحیه شبه الاستیک، مقادیر $0.11-0.55$ به عنوان مرز وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک و $0.56-0.5$ به عنوان مرز تشکیل گوهی گسیختگی و وقوع تخریب برای این سیستم معرفی می‌شود.

۳-۳- بررسی تأثیر طول المان‌های تسلیح بر تغییر مکان‌های افقی سیستم
به منظور بررسی تأثیر طول المان‌های تسلیح بر تغییر مکان‌های افقی سیستم مرکب در خلال بارهای هارمونیک انتخاب شد، به ثبت تغییر



شکل ۱۵. شکل هندسی گوی گسیختگی در سیستم مرکب سری

Fig. 15. Illustration of failure surfaces and soil zones involved in failure mechanism for MSE/soil nail hybrid retaining walls

در انتها با استفاده از نسبت این پارامتر در نقطه مورد نظر به RMS شتاب ورودی به سیستم، ضریب بزرگ نمایی پاسخ شتاب (RMSA) در آن نقطه تعیین می‌گردد.

$$RMS = \left[\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a(t)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

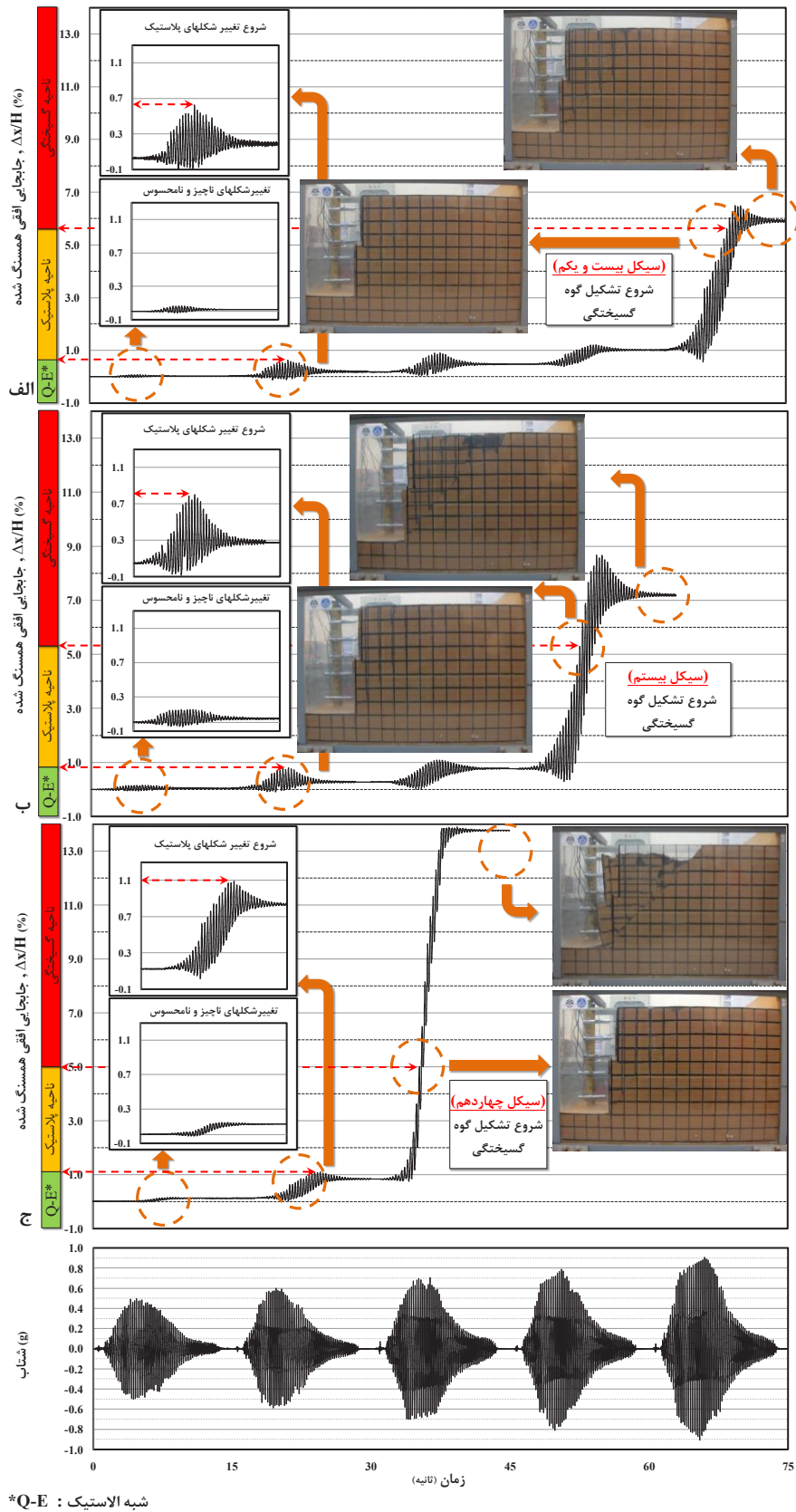
نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی نشان دهنده تأثیر طول المان‌های تسلیح بر میزان بزرگ نمایی پاسخ شتاب به وجود آمده در سیستم ترکیبی می‌باشد به گونه‌ای که افزایش آن سبب کاهش بزرگ نمایی پاسخ شتاب در قسمت‌های مختلف سیستم می‌شود. همان طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، بیشترین تأثیرپذیری بزرگ نمایی شتاب از طول المان‌ها در رویه و کمترین تأثیرپذیری در ناحیه خاک بر جا مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، بررسی توزیع بزرگ نمایی شتاب در ارتفاع سیستم نشان می‌دهد که سهم وقوع بزرگ نمایی شتاب در توده مسلح شده با تسمه به مراتب بیشتر از ناحیه میخ کوبی شده است. این سهم که با افزایش شتاب ورودی پررنگ‌تر نیز می‌شود، در حضور المان‌های تسلیح به طول $0.9H$ و $0.5H$ به ترتیب برابر با ۱۲ و ۳۰ درصد اندازه‌گیری شد.

در رشد تصاعدی طول المان‌های تسلیح در خلال افزایش ارتفاع سازه به علت وابسته بودن آن به ارتفاع سیستم، جستجو نمود. این در حالی است که میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از طول المان‌های تسلیح ضمن افزایش تراز ارتفاعی سیستم، با افزایش قابل توجهی مواجه می‌شود به نحوی که این تأثیر پذیر در قسمت خاک مسلح نسبت به ناحیه میخ کوبی شده برجسته‌تر می‌باشد.

همچنین با وجود آن که سهم اعظم تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم مربوط به تغییر شکل‌های پلاستیک می‌باشد، افزایش صلبیت توده‌ی مسلح شده در اثر افزایش طول المان‌های تسلیح منجر به پر رنگ شدن تغییر شکل‌های الاستیک در کنار تغییر شکل‌های پلاستیک می‌شود (شکل ۱۸).

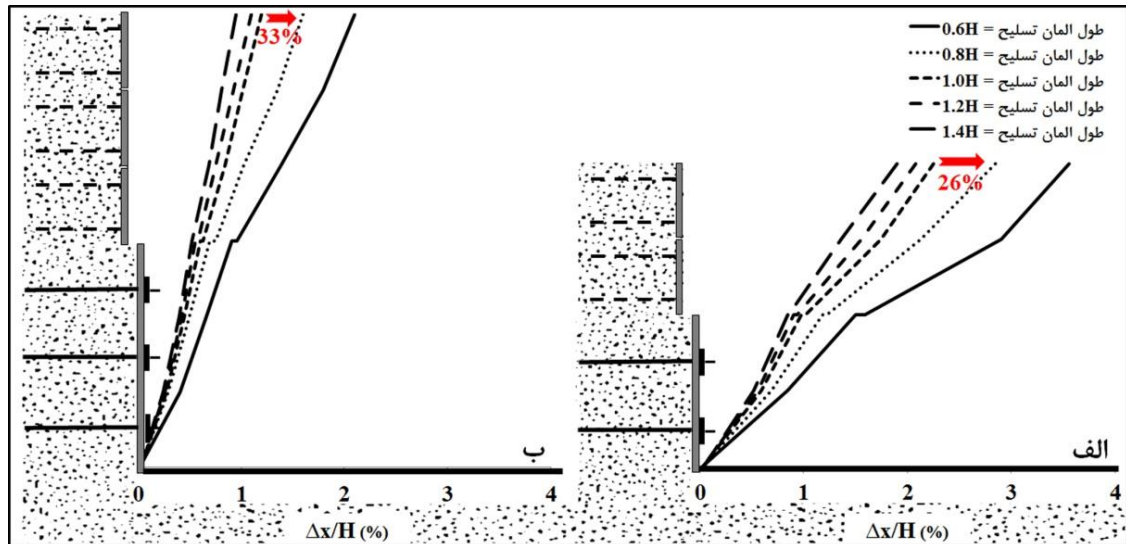
۳-۴- بررسی تأثیر طول المان تسلیح بر مقدار بزرگ نمایی پاسخ شتاب در سیستم

تعیین مقادیر پاسخ شتاب و توزیع آن در ترازهای ارتفاعی مختلف، نقش قابل ملاحظه‌ای در بررسی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مسلح شده ایفا می‌کند. در راستای بررسی توزیع پاسخ شتاب در یک سازه، فاکتور RMS به عنوان یک پارامتر کارآمد مورد استفاده می‌گیرد. به منظور تعیین پارامتر RMS در تراز ارتفاعی مورد نظر، ریشه میانگین مربعات تاریخچه زمانی شتاب آن نقطه که بر اساس رابطه (۴) تعریف می‌شود، محاسبه می‌گردد.



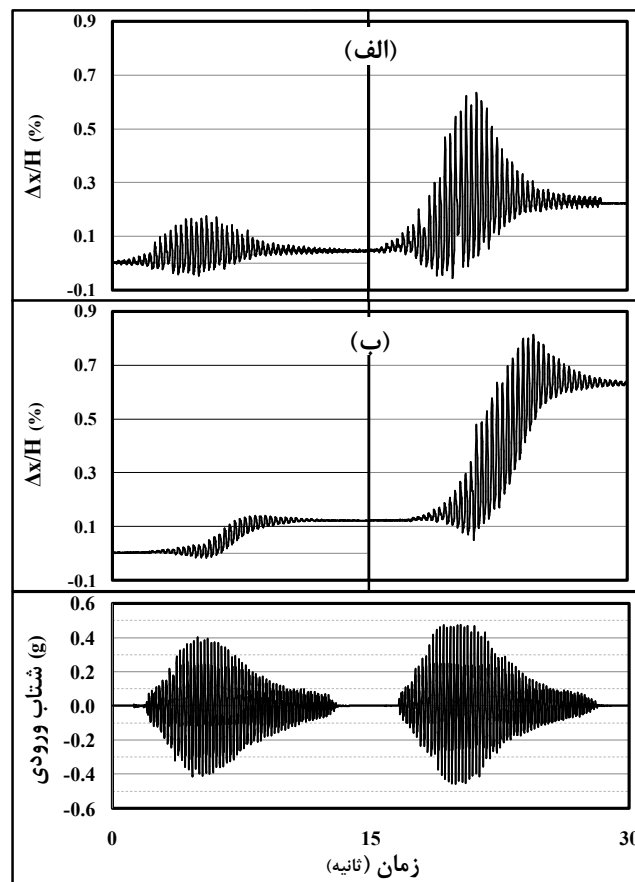
شکل ۱۶. مرزهای سطوح عملکرد سیستم ترکیبی: الف) طول المان تسلیح : ۰٫۹H، ب) طول المان تسلیح : ۰٫۷H، و ج) طول المان تسلیح : ۰٫۵H

Fig. 16. Boundary of failure level in models including nails with lengths of (a) 0.9H, (b) 0.7H and (c) 0.5H



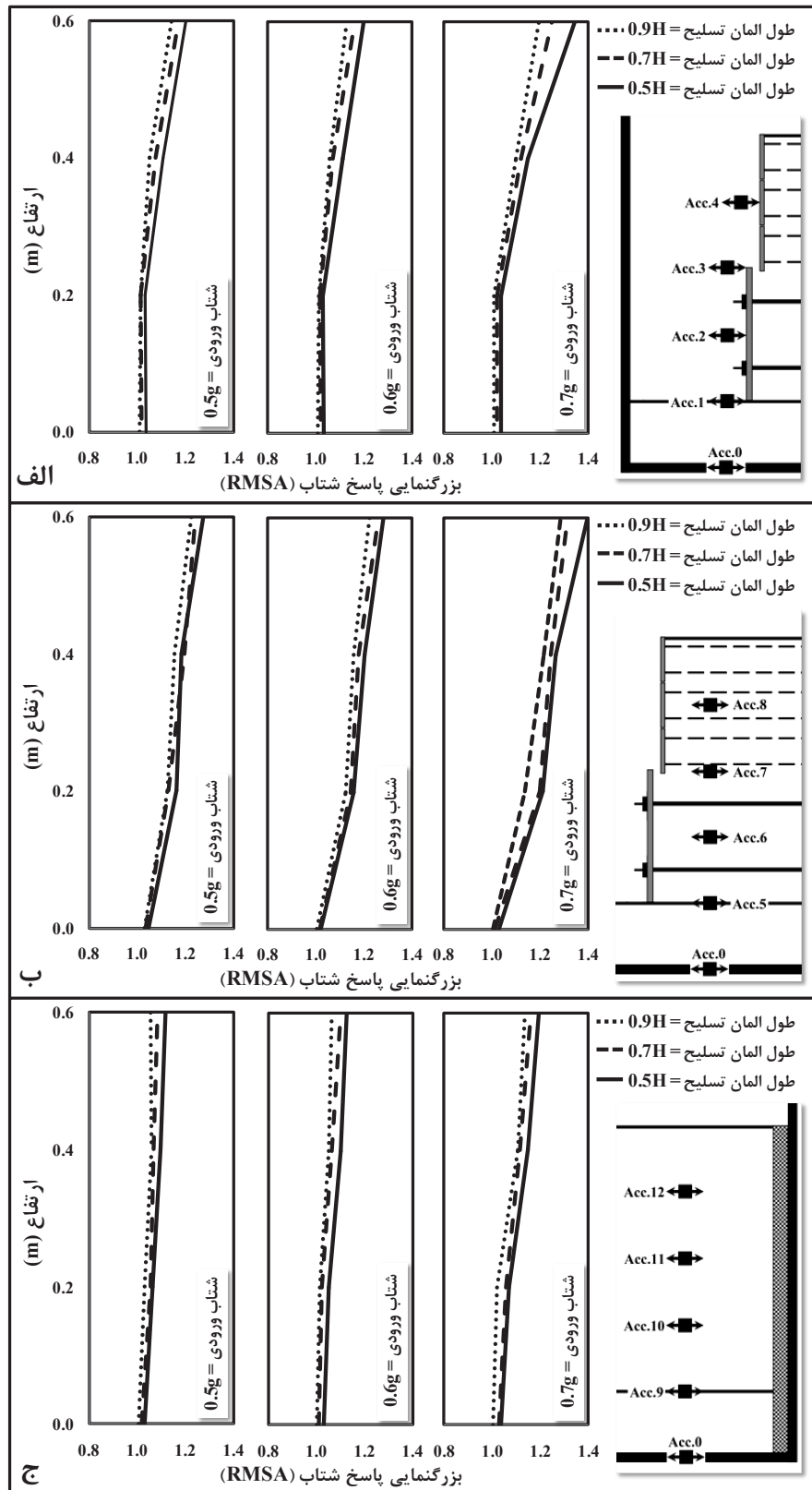
شکل ۱۷. پروفیل تغییر مکان‌های افقی سیستم ترکیبی شامل المان‌های تسلیح با طول مختلف: الف) سیستم ۶ متری؛ ب) سیستم ۹ متری

Fig. 17. Horizontal displacement profile of the hybrid wall including reinforcement elements with different lengths: a) 6-meter wall; B) 9-meter wall



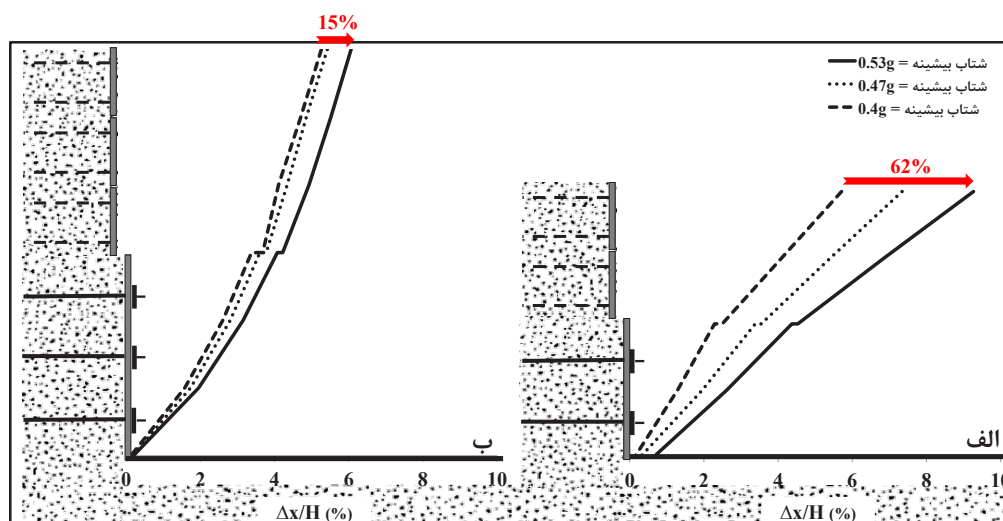
شکل ۱۸. پاسخ جابجایی افقی نرمالیزه شده تاج سیستم مرکب تحت شتاب‌های مختلف: الف) دیوار با طول المان ۰٫۷H؛ ب) دیوار با طول المان ۰٫۵H

Figure 18. Normalized horizontal displacement response of the crest of physical model at different accelerations: (a) models with 0.7H nail length; (b) models with 0.5H nail length



شکل ۱۹. تغییرات بزرگ نمایی پاسخ شتاب قسمت‌های مختلف سیستم مرکب: الف) رویه، ب) توده مسلح شده و ج) توده برجا

Fig.19. Amplification of input base acceleration at different levels of acceleration and at different locations of models: (a) facing; (b) reinforced zone; (c) intact soil mass



شکل ۲۰. پروفیل تغییر مکان‌های افقی سیستم ترکیبی در مناطق با خطر پذیری لرزه ای متفاوت: الف) سیستم ۶ متری؛ ب) سیستم ۹ متری

Fig. 20. Horizontal displacement profile of hybrid walls in areas with different seismic hazards: a) 6-meter wall; b) 9-meter wall

می‌شود به نحوی که این تأثیر پذیری در قسمت خاک مسلح تقریباً ۱/۵ برابر ناحیه میخ‌کوبی شده می‌باشد. این افزایش تأثیر پذیری را می‌توان به وقوع بیشتر بزرگ نمایی شتاب در قسمت خاک مسلح و همچنین انعطاف پذیر بیشتر این ناحیه نسبت داد.

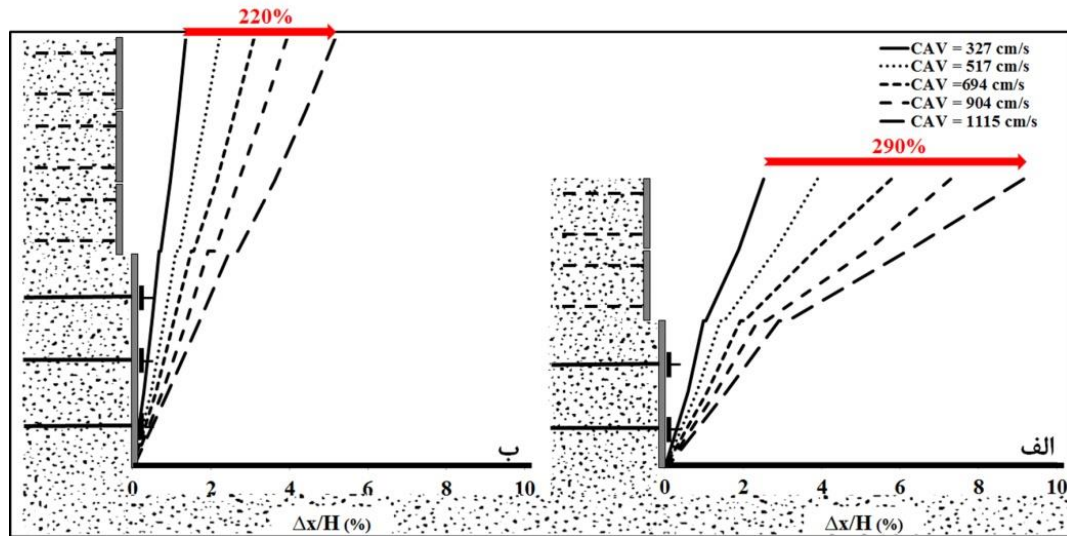
از سوی دیگر، در تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی دیوار ترکیبی دیده می‌شود که میزان تأثیر پذیری تغییر شکل‌های پلاستیک از شتاب بیشینه به مراتب بیشتر از تغییر شکل‌های الاستیک بوده است به نحوی که می‌توان شتاب بیشینه را عامل اصلی انتقال سیستم از حالت الاستیک به محدوده پلاستیک و ایجاد گسیختگی در سیستم دانست.

۳-۶-۳- بررسی تأثیر سرعت مطلق تجمعی (CAV) بر تغییر مکان‌های افقی سیستم

به منظور بررسی تأثیر سرعت مطلق تجمعی بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم مرکب، به ثبت تغییر مکان‌های افقی رویه در حضور بارهای هارمونیک منتخب با مقادیر CAV مختلف پرداخته شده است. لذا از میان تمامی نتایج به دست آمده، نتایج تحلیل‌های دینامیکی مدل‌های مرکب با المان‌هایی به طول $1.0H$ و قرار گرفته در ساختگاه نوع ۱ در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی رویه مطابق شکل ۲۱ ارائه شده است.

۳-۵- بررسی تأثیر شتاب بیشینه بر تغییر مکان‌های افقی سیستم

در راستای بررسی تأثیر شتاب بیشینه بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم مرکب سری، به ثبت تغییر مکان‌های افقی رویه در حضور بارهای هارمونیک مربوط به مناطق لرزه‌ای با میزان خطرپذیری متفاوت پرداخته شده است. لذا از میان تمامی نتایج به دست آمده، نتایج تحلیل‌های دینامیکی مدل‌های مسلح شده با المان‌هایی به طول $1.2H$ و قرار گرفته در ساختگاه نوع ۲ در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی رویه مطابق شکل ۲۰ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده تأثیر چشمگیر شتاب بیشینه بر تغییر مکان‌های به وجود آمده در سیستم ترکیبی می‌باشد به گونه‌ای که افزایش آن سبب افزایش تغییر شکل‌های افقی سیستم می‌شود. این افزایش که در تاج دیوار مشهودتر است، در دیوارهای ۶ و ۹ متری به ترتیب برابر با ۶۲ و ۱۵ درصد اندازه‌گیری شد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تأثیرگذاری شتاب بر تغییر شکل‌های دیوار ضمن افزایش ارتفاع سیستم، به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. عامل این پدیده را می‌توان در تأثیر همزمان رشد تصاعدی طول المان‌های تسلیح در خلال افزایش ارتفاع سازه دانست. از سوی دیگر افزایش این پارامتر مُد لغزش را در سیستم مرکب پر رنگ‌تر می‌سازد که این پدیده با افزایش ارتفاع سیستم کم رنگ می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که ضمن افزایش تراز ارتفاعی در سیستم، میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از شتاب بیشینه با افزایش قابل توجهی مواجه



شکل ۲۱. پروفیل تغییر مکان‌های افقی سیستم ترکیبی تحت بار لرزه ای با مقادیر سرعت تجمعی متفاوت: الف) سیستم ۶ متری؛ ب) سیستم ۹ متری

Fig. 21. Horizontal displacement profile of hybrid walls under seismic loading with different CAV values: a) 6-meter wall; b) 9-meter wall

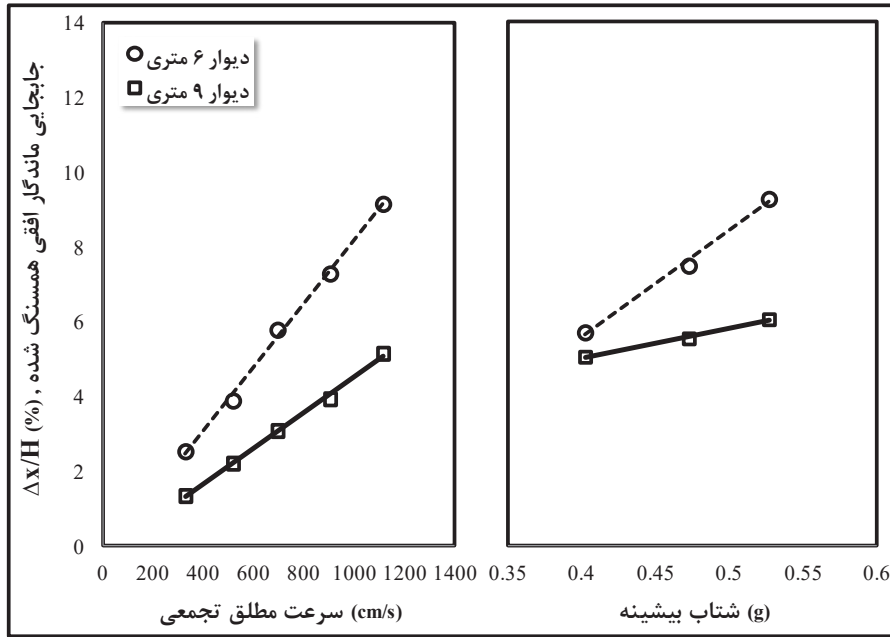
۳-۷- بررسی تأثیر ساختگاه بر تغییر مکان‌های افقی سیستم

نتایج به دست آمده نشان دهنده تأثیر مستقیم نوع ساختگاه بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم ترکیبی می‌باشد به گونه‌ای ضمن حرکت از ساختگاه نوع ۱ به ساختگاه نوع ۳، با افزایش قابل ملاحظه‌ای در تغییر شکل‌های ماندگار به وجود آمده در سیستم مواجه می‌شویم. علت این پدیده را می‌توان در افزایش شتاب بیشینه و کاهش پارامترهای ژئوتکنیکی توده خاک میخ‌کوبی شده ضمن حرکت از ساختگاه نوع ۱ به ساختگاه نوع ۳، جستجو نمود. علی‌رغم افزایش طول المان‌های تسلیح ضمن افزایش ارتفاع سیستم، تأثیر منفی احداث سیستم ترکیبی در ساختگاه نوع ۳ در دیوارهای بلندتر بیشتر است. این تأثیر که در دیوارهای ۶ و ۹ متری به ترتیب برابر با ۱۱۵ و ۲۴۰ درصد اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهد که تأثیر منفی کاهش پارامترهای ژئوتکنیکی توده میخ‌کوبی به مراتب بیشتر از تأثیر مثبت افزایش طول المان‌های تسلیح است. این یافته تأکیدی است بر حساسیت حاکم بر طراحی سیستم ترکیبی جهت اجرا در مناطقی با پارامترهای ژئوتکنیکی ضعیف. از سوی دیگر ضمن حرکت از ساختگاه نوع ۱ به ساختگاه نوع ۳، مد لغزش پررنگ‌تر می‌شود که این پدیده با افزایش ارتفاع سیستم کمرنگ شده و جای خود را به تلفیقی از مد دوران و مد شکم‌دادگی می‌دهد (شکل ۲۳).

نتایج به دست آمده نشان دهنده تأثیر مستقیم پارامتر CAV بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم ترکیبی می‌باشد به گونه‌ای که افزایش آن سبب افزایش تغییر مکان‌های به وجود آمده در سیستم می‌شود. این افزایش که در تاج دیوار مشهودتر است، در دیوارهای ۶ و ۹ متری به ترتیب برابر با ۲۹۰ و ۲۲۰ درصد اندازه‌گیری شد. تفاوت در میزان رشد تغییر شکل‌ها نشان می‌دهد که میزان تأثیرگذاری شتاب بر جابجایی دیوار ضمن افزایش ارتفاع سیستم، به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد.

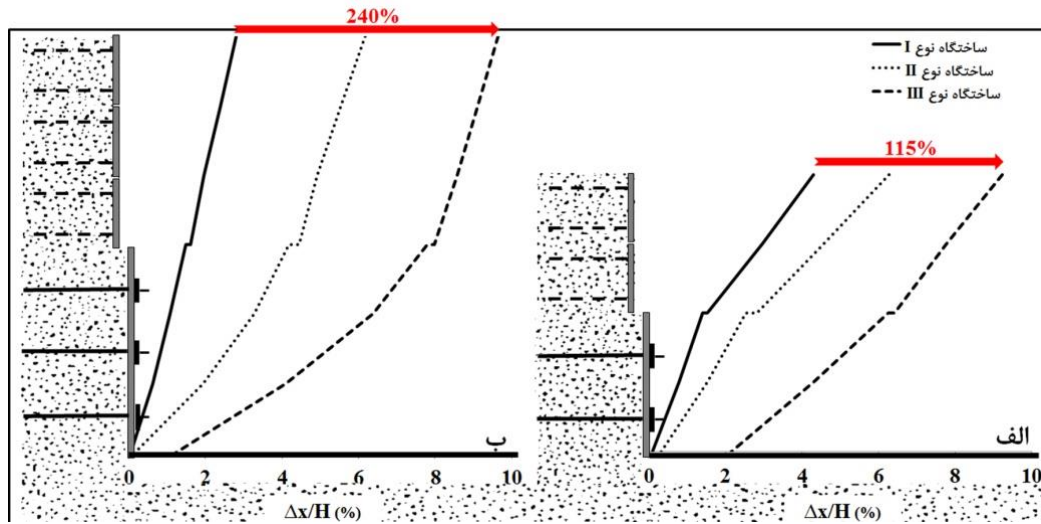
عامل این پدیده را می‌توان در تأثیر همزمان رشد تصاعدی طول المان‌های تسلیح در خلال افزایش ارتفاع سازه دانست. از سوی دیگر افزایش این پارامتر مد لغزش را در سیستم مرکب پررنگ‌تر می‌سازد که این پدیده با افزایش ارتفاع سیستم کمرنگ می‌شود. از سوی دیگر میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از پارامتر CAV ضمن افزایش تراز ارتفاعی سیستم، با افزایش قابل توجهی مواجه می‌شود به نحوی که این تأثیرپذیری در قسمت خاک مسلح نسبت به ناحیه میخ‌کوبی شده برجسته‌تر می‌باشد.

همچنین، وجود همبستگی مناسب میان پارامترهای شتاب بیشینه و پارامتر CAV با تغییر شکل‌های ماندگار به وجود آمده در سیستم مرکب که در شکل ۲۲ نیز مشاهده می‌شود، این دو پارامتر را به عنوان پارامترهای شاخص در انتخاب زلزله طرح در روش طراحی بر مبنای عملکرد لرزه‌ای برای سیستم ترکیبی مطرح می‌سازد.



شکل ۲۲. تغییرات تغییر شکل‌های افقی ماندگار سیستم مرکب در مقابل پارامتر CAV و شتاب بیشینه

Fig. 22. Permanent horizontal deformation changes of the hybrid wall versus CAV and maximum input acceleration



شکل ۲۳. پروفیل تغییر مکان‌های افقی سیستم ترکیبی تحت بار لرزه ای متناظر با نوع ساختگاه: الف) سیستم ۶ متری؛ ب) سیستم ۹ متری

Fig. 23. Horizontal displacement profile of hybrid walls under seismic loading corresponding to the site type: a) 6-meter wall; b) 9-meter wall

۴- نتیجه گیری

با تکیه بر نتایج به دست آمده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی سیستم ترکیبی، می‌توان به موارد زیر در قالب یک نتیجه‌گیری جامع و کاربردی اشاره نمود:

۱- تشکیل یک سطح لغزش دو جزئی متشکل از تلاقی یک خط شیب دار در توده مسلح شده با تسمه و یک سهمی محدب در توده میخ‌کوبی نشان داد که در نظر گرفتن سطوح گسیختگی توصیه شده برای سیستم‌های مسلح‌سازی متداول (اسپیرال‌های لگاریتمی و مکانیزم‌های دوخطی) جهت طراحی لرزه‌ای سیستم ترکیبی بسیار دور از واقعیت بوده و می‌تواند منجر به یک طراح غیر اقتصادی گردد.

۲- رشد ناگهانی ۲۶ تا ۳۳ درصدی تغییر شکل‌های افقی سیستم ضمن عبور از مرز رده طولی $0.8H$ در خلال کاهش طول المان‌های تسلیح تأییدی است بر صحت توصیه‌های آیین‌نامه FHWA در خصوص انتخاب $0.7H$ به عنوان طول بحرانی المان‌های تسلیح در شرایط لرزه‌ای. لذا می‌توان همانند سیستم خاک مسلح و سیستم میخ‌کوبی، $0.7H$ را به عنوان طول حداقل المان‌های تسلیح در شرایط لرزه‌ای برای سیستم مرکب سری توصیه نمود.

۳- بر اساس مشاهدات صورت گرفته از لحظه شروع تشکیل ریزترک‌ها و همچنین لحظه آغاز بسیج نواحی پلاستیک و شروع تشکیل گوهی گسیختگی، مقادیر $x/H = 0.55-1.1\Delta$ به عنوان مرز وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک و $x/H = 5.0-5.6\Delta$ به عنوان مرز تشکیل گوهی گسیختگی و وقوع تخریب برای این سیستم مرکب سری معرفی شد.

۴- بیشتر بودن سهم وقوع بزرگ شتاب و همچنین شکل‌گیری تغییر شکل‌های افقی در توده مسلح شده با تسمه نسبت به ناحیه میخ‌کوبی شده بر لزوم توجه بیشتر به این ناحیه در خلال طراحی لرزه‌ای دیوارهای مرکب سری می‌افزاید.

۵- کاهش تأثیرپذیری تغییر شکل‌های سیستم مرکب سری از تغییرات طول المان تسلیح، شتاب پایه و CAV در خلال افزایش ارتفاع سیستم نشان دهنده کارآمد بودن استفاده از نسبت یکسان (α) در انتخاب طول المان تسمه و میخ می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود طول المان‌های میخ و المان‌های تسمه در سیستم مرکب سری به صورت ضریبی یکسان از ارتفاع کل سیستم (αH) و ارتفاع سیستم خاک مسلح (αh) انتخاب شود.

۶- مواجهه با پارامترهای ضعیف ژئوتکنیکی یکی از اصلی‌ترین معضلات در طراحی دیوارهای مرکب سری می‌باشد که افزایش طول المان‌های تسلیح

نیز چندان تاب مقابله با تأثیرات منفی آن را ندارد. از این رو ضروری است در طراحی دیوارهای ترکیبی واقع شده در ساختگاه‌های ضعیف، طراحی توده میخ‌کوبی شده با در نظر گرفتن تمهیدات ویژه جهت افزایش پایداری آن انجام شود.

۷- بر رنگ شدن مد لغزش در اثر افزایش شتاب پایه، لزوم توجه بیشتر به میخ‌های واقع شده در ردیف‌های تحتانی را جهت مقابله با این پدیده مسجل می‌سازد. همچنین، افزایش طول المان‌های تسلیح می‌تواند به عنوان یک راه‌حل برای کاهش دوران دیوار ترکیبی سری معرفی شود.

۸- با توجه به همبستگی مناسب بین شتاب بیشینه و پارامتر CAV با تغییر شکل‌های ماندگار، می‌توان این دو پارامتر را به عنوان پارامترهای شاخص در انتخاب زلزله طرح در روش طراحی بر مبنای عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مرکب سری پیشنهاد نمود.

منابع

- [1] T.A. Wood, P.W. Jayawickrama, W.D. Lawson, Instrumentation and Monitoring of an MSE/Soil Nail Hybrid Retaining Wall, Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo. ASCE, (2009).
- [2] A. Daniel P.E. Thome, Rehabilitation of an Existing Mechanically Stabilized Earth Wall Using Soil Nails, DFI's 30th Annual Conference on Deep Foundations Chicago, Illinois, (2005).
- [3] FHWA, Shored Mechanically Stabilized Earth (SMSE) Wall Systems Design Guidelines, Publication No. FHWA-CFL/TD-06-001, National Highway Institute, (2006).
- [4] C-C. Fan, C-F. Hsiao, Field Performance of a Hybrid Reinforced Earth Embankment Built Adjacent to a Slope with Narrow Fill Space, Journal of Geotechnique, 6(1) (2011) 47-62.
- [5] B.S. Yiqing wei, Development of equivalent surcharge loads for the design of soil nailed segment of MSE/SOIL NAIL HYBRID Retaining walls based on results from full-scale wall instrumentation and finite element analysis, PhD thesis (2013).

- Amirkabir J. Civil Eng., 50(1) (2018) 189-210.
- [18] NCHRP REPORT 701, Proposed Specifications for LRFD Soil-Nailing Design and Construction, in: National Cooperative Highway Research Program, (2011).
- [19] AASHTO, Interims: Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, American Association of State Highway a Transportation Officials, Washington, D.C., USA, (2002).
- [20] T. Kokusho, Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and foundations*, 20(2) (1980) 45-60.
- [21] B. Huang, R.J. Bathurst, K. Hatami, Numerical study of the influence of reinforcement length and spacing on reinforced soil segmental walls of variable height, *Proceedings of the First Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancun, Mexico, IFAI*, (2008) 1256–1264.
- [22] K. Hatami, R.J. Bathurst, Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls *SoilDynamics and Earthquake Engineering*, 19(3) (2000) 137-157.
- [23] R.J. Bathurst, K. Hatami, Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall, *Geosynthetics International*, 5(1-2) (1998) 127-166.
- [24] D.M. Wood, *Geotechnical modelling, Version 2.2*, (2004).
- [25] J.B. Hansen, *Earth pressure calculation*. Copenhagen: Danish Technical Press, (1953).
- [26] M.R. Tufenkjian, M. Vucetic, Dynamic failure Mechanism of Soil- Nailed Excavation Models in Centrifuge, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3) (2000) 227-235.
- [27] K. Watanabe, Y. Munaf, J. Koseki, M. Tateyama, K. Kojima, Behavior of several types of model retaining walls subjected to irregular exaction, *Soils Found*, 43(5) (2003) 13–27.
- [6] M. Yazdandoust, Shaking table modeling of MSE/soil nail hybrid retaining walls. *Soils Found.*, 59 (2) (2019a) 241–252.
- [7] M. Yazdandoust, Numerical and Experimental Study to Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Earth whit Steel Elements, PhD thesis (2013) (in Persian).
- [8] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Building, Building and Housing Research Center, Standard No. 2800, 3rd Edition, (2014) (in Persian).
- [9] K. Ishihara, A.M. Asal, Dynamic behavior of soils, soil amplification and soil structure interaction', final report for working group d., UNDP/UNESCO project on earthquake risk reduction in Balkan region, (1982).
- [10] M.K. Jafari, A. Shafiee, A. Ramzkhah, Dynamic properties of the fine grained soils in south of Tehran, *J. Seismol. Earthq. Eng.*, 4 (2002) 25–35.
- [11] H.B. Seed, T.R. Wong, I.M. Idriss, K. Tokimatsu, Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11) (1986) 1016–32.
- [12] E.Y. Sharif, A.A. Al Bis, M.K. Harb, An Application of Geophysical Techniques for Determining Dynamic Properties of the Ground in Dubailand Area, UAE, Arab Center for Engineering Studies, (2008).
- [13] J. Chai, and J.P. Carter, *Deformation Analysis in Soft Ground Improvement*, Springer, (2009).
- [14] S.L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, (1996).
- [15] O.E. Suncar, Pullout and Tensile Behavior of Crimped Steel Reinforcement for Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls, Utah State University, (2011).
- [16] *FLAC Manual, Ver. 5.0*, Itasca, USA, (2005).
- [17] M. Yazdandoust, Numerical and Experimental Study on Seismic Behavior of Soil-Nailed Walls to Introduce the Pseudo Static Coefficient Based on Performance Levels.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Ahmadi, M. Yazdandoust, Experimental and Numerical Study on the Seismic Performance of MSE/Soil Nail Hybrid Walls, Amirkabir J. Civil Eng., 54(1) (2022) 165-190.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18379.6862](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18379.6862)

