



## Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) effects on seismic response of low-, mid- and high-rise steel moment resisting frame structures

A. H. Fatollahpour, S. A. A. Arjmandi\*, E. Tafakori

Department of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

**ABSTRACT:** Unknown situations or factors in the design of a structure, such as underlying soil characteristics and the presence of adjacent structures, can affect the reliability and, consequently, the cost of the project. Therefore, the effects of soil-structure interaction as well as the simultaneous effects of this interaction in the presence of adjacent structures on the seismic response of 3, 9 and 20-story benchmark steel moment resisting frame structures are investigated, including six different adjacency cases of the structures in three different distances. The effect of soil-structure interaction is considered by using a hybrid method, in which the stiffness matrix of the soil system is obtained through analysis of a two-dimensional model in Abaqus considering a plain strain condition. Then, the obtained stiffness matrix is added to the nonlinear 2D model of the structure by using a set of pre-defined and a new developed element in OpenSEES. The results obtained from the time history analysis under ten far-field earthquake records show that the effect of soil-structure interaction on the response of a 20-story structure is more significant than the other two structures and leads to a maximum increase of 9 percent in the maximum average drift ratio and decrease of 6.99 percent in the average base shear in this structure compared to the fixed base. In addition, the presence of high-rise and mid-rise structures increase the maximum average drift ratio of low-rise structures by 10.44 and 9.36 percent and the average base shear in this structure by 2.87 and 3.93 percent, respectively, compared to the flexible base.

### Review History:

Received: Sep. 13, 2020

Revised: Dec. 12, 2020

Accepted: Mar. 31, 2021

Available Online: Apr. 08, 2021

### Keywords:

Soil-Structure Interaction (SSI)

Structure – Soil – Structure Interaction (SSSI)

Substructure Method

Finite Element Method (FEM)

Steel moment resisting frame.

### 1- Introduction

The development of urbanization and the increase in the population of cities have made humans to build tall structures densely and side by side in urban areas. In these conditions, Unknown situations or factors such as subsoil and the presence of adjacent structures can affect the design reliability in the classical case and, consequently, the cost of the project. The effects of soil and adjacent structures on each other which is studied in the field of civil engineering called dynamic Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI).

The first studies in this field were conducted in the 1970s. Mulliken & Karabalis [1] developed discrete models to evaluate the effects of SSSI using masses, springs and frequency-independent dampers. Alexander et al. [2], used a simple structural model and a rotational spring to obtain a certain formulation for considering the effects of SSSI. Madani et al. [3] investigated the effects of pounding and SSSI on seismic responses of 3, 5, 6 and 12-story steel frames considering nonlinear behavior for structures and soil and five different adjacency cases with three different distances. Aldaikh et al. [4] estimated the effects of SSSI on the response of a scaled structure adjacent to one and two other structures using a set of shaking table experiments.

Liang et al. [5] modeled two identical shear walls with solid foundation embedded in the soft soil layer on the elastic bedrock under the effect of the out-of-plane horizontal shear wave using the indirect boundary element method to study SSSI phenomena. Vicencio and Alexander [6] studied the effects of SSSI between two linear structures using nonlinear Bouc-Wen model and a rotational spring for modeling soil and adjacent structure effects, respectively. Cilsalar and Cadir [7] investigated the seismic response of a 4-story steel structure considering SSSI with nonlinear behavior for soil and structure and soil layering effects under time history analyses and in the form of fragility curves.

The purpose of this article is to investigate Soil-Structure Interaction (SSI) and also the simultaneous effect of this interaction in the presence of the adjacent structure considering six different adjacency cases between low-, mid- and high-rise (3, 9 and 20-story) steel structures. In this study, the substructure method is used to model SSI and SSSI systems to decrease the limitations of other methods such as the inability to consider the relationship between responses of horizontal and vertical components of soil and increase in analysis time of complicated models, while maintaining the acceptable accuracy.

\*Corresponding author's email: arjmandi@znu.ac.ir



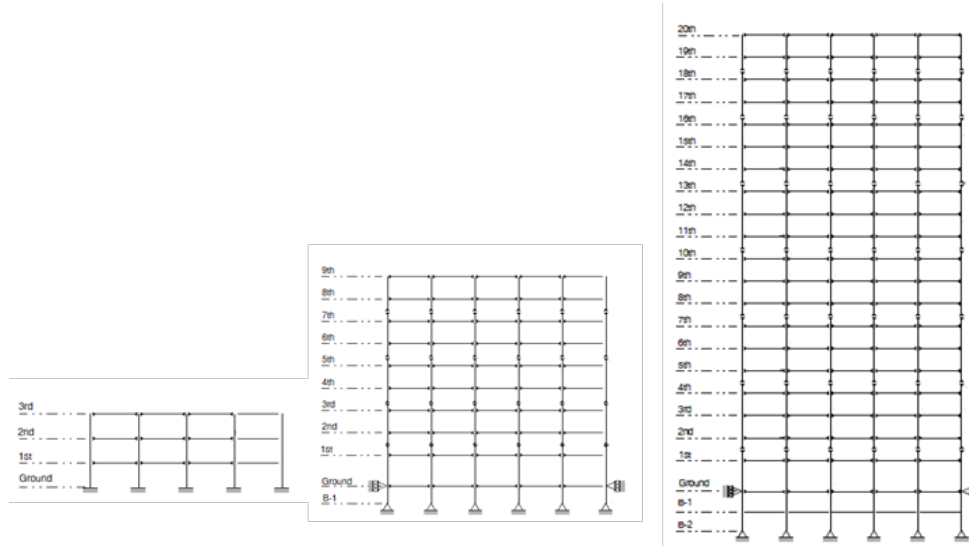


Fig. 1. The frames in this study

## 2- Modeling

### 2- 1- Modeling of Structures

The three 3, 9 and 20-story benchmark steel moment frames in Ref. [8] are selected as case studies. The structures are modeled in the OpenSees framework using RembergOSgood uniaxial material [9] and nonlinearBeamColumn element with distributed plasticity and fiber sections. The inherent damping of the steel structures is considered 2% and applied as Rayleigh damping in the software. These frames are shown in Figure 1.

### 2- 2- Modeling of SSI and SSSI

The effects of SSI and SSSI are considered using the substructure method. For this purpose, soil medium is modeled in Abaqus software using the finite element method. Then, the reduced or condensed stiffness matrix of the soil-foundation or foundation-soil-foundation systems in different adjacency cases are evaluated using a series of static analyses

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{12} + k_{13} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} + k_{21} + k_{23} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} + k_{31} + k_{32} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$+ \begin{bmatrix} -k_{12} - k_{13} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & -k_{21} - k_{23} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & -k_{31} - k_{32} \end{bmatrix}$$

Based on Equation (1), This matrix for a system with three degree of freedom can be written as the sum of two matrices. The first matrix is a diagonal matrix that is added to structural models in OpenSees by transitional springs as zeroLength element in two horizontal and vertical directions. The schematic diagram of the springs under the

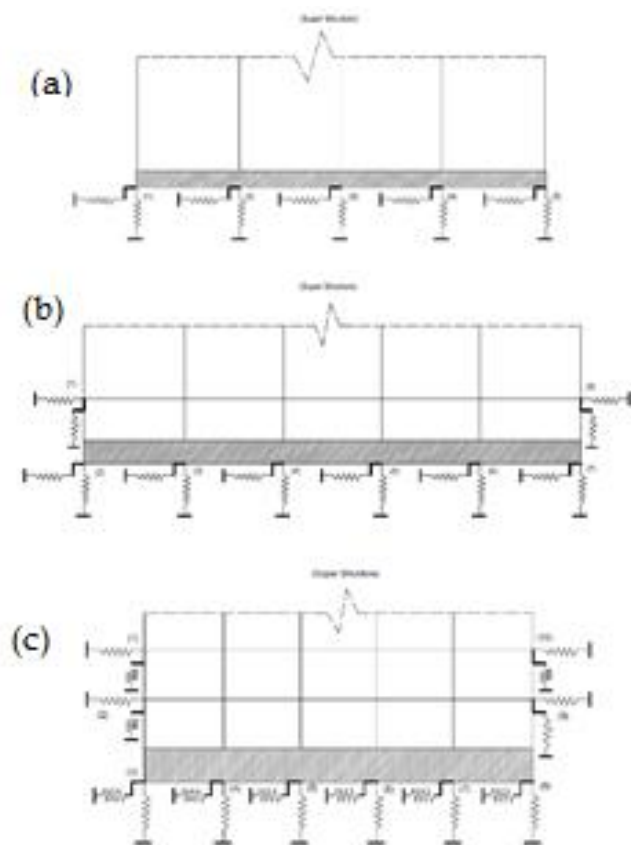
foundation are shown in Figure 2. But about the second matrix, please consider that the sum of the elements of each column or row equals to zero. So, one concludes that, this matrix is related to the relative translation between the common nodes considered in the boundary of soil and foundation. This matrix is added to the structural models by a new developed element in the OpenSees framework. In fact, this element can assemble a pre-defined matrix to the global stiffness matrix of the model.

## 3- Analysis process

In this study, the results are obtained in the form of the maximum of the average drift ratio and base shear of the fixed-based models and the models considering SSI and SSSI using 240 time-history analyses under ten far-field earthquakes listed in Table 1. The earthquakes are selected from PEER ground motion records dataset, based on shear wave velocity between 200 to 375 m/s in the depth of 30 m of soil, earthquake magnitude between 6.5 to 7.5 Richter and 20 to 50 km distance from the fault.

## 4- Conclusion

This study investigates the effect of SSI and SSSI on the seismic response of 3, 9 and 20-story benchmark steel moment frames, considering six different adjacency cases. The behavior of underlying soil is considered elastic, but nonlinearity is considered for the steel frames. The drift ratio and base shear of the frames under ten far-field earthquakes are compared between fixed-based, SSI and SSSI cases. The results show that the SSI effect on responses of high-rise structure is more than two other structures. Moreover, the presence of 9 and 20-story adjacent structures increases the response of the 3-story structure as a consequence of SSSI effect.



**Fig.2. Schematic diagram of soil and foundation modeling in (a) 3-story (b) 9-story (c) 20-story structures**

**Table 1. Parameters of earthquakes used in this study**

No.	Earthquake Name	Station	PGA (g)
1	San Fernando	L.A. - Hollywood Stor FF	0.225
2	Loma Prieta	Hollister City Hall	0.246
3	Loma Prieta	Palo Alto - 1900 Embarc.	0.215
4	Landers	Yermo Fire Station	0.245
5	Northridge	L.A. - Baldwin Hills	0.239
6	Kobe	Abeno	0.221
7	Kobe	Morigawachi	0.214
8	Kocaeli	"Duzce"	0.312
9	El Mayor- Cucapa	El Centro Differential Array	0.507
10	Darfield	Pages Road Pumping Station	0.223

[5] H. Aldaikh, NA. Alexander, et al., Shake table testing of the dynamic interaction between two and three adjacent buildings (SSSI), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89 (2016) 219-232.

[6] J. Liang, B. Han, Todorovska MI., Trifunac MD., 2D dynamic structure-soil-structure interaction for twin buildings in layered half-space I: Incident SH-waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, (2017) 172-94.

[7] F. Vicencio, NA. Alexander, Dynamic interaction between adjacent building through nonlinear soil during earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 108 (2018) 130-141.

[8] H. Cilsalar, and C. C. Cadir, Seismic performance evaluation of adjacent buildings with consideration of improved soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140 (2021) 106464.

[9] Y. Ohtori, R.E. Christenson, Spencer Jr, B.F. and Dyke, S.J., Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 366-385.

[10] W. Ramberg, W. R. Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC. (1943).

**References**

[1] JS. Mulliken, DL. Karabalis, Discrete model for dynamic through-the-soil coupling of 3-D foundations and structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27(7) (1998) 687-710.

[2] NA. Alexander, E. Ibraim, Aldaikh H., A simple discrete model for interaction of adjacent buildings during earthquakes, *Computers & Structures*, 124 (2013) 1-10.

[3] C. Roy, S. Bolourchi, Eggers D., Significance of structure-soil-structure interaction for closely spaced structures, *Nuclear Engineering and Design*, 295 (2015) 680-687.

[4] B. Madani, F. Behnamfar, Riahi HT., Dynamic response of structures subjected to pounding and structure-soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 78 (2015) 46-60.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

A. H. Fatollahpour, S. A. A. Arjmandi , E. Tafakori, *Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) effects on seismic response of low-, mid- and high-rise steel moment resisting frame structures*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) A. H. Fatollahpour et al., *Amirkabir J. Civil. Eng.*, 54(2) (2022) 125-128  
**DOI: 10.22060/ceej.2021.19002.7024**







## اثر اندرکنش سازه- خاک- سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی کوتاه، میان و بلندمرتبه

امیرحسین فتح‌الله‌پور، سید علی‌اصغر ارجمندی\*، احسان تفکری

دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹

### کلمات کلیدی:

اندرکنش سازه و خاک (SSI)، اندرکنش سازه - خاک - سازه (SSSI)  
روش زیرسازه  
روش اجزاء محدود  
قاب خمشی فولادی

**خلاصه:** وضعیت‌های ناشناخته و یا عوامل در نظر گرفته نشده در طراحی یک سازه مانند مشخصات خاک زیر آن و نیز وجود سازه‌های مجاور، می‌توانند بر ضریب اطمینان طراحی و به تبع آن، قیمت تمام شده پروژه تاثیرگذار باشند. از این رو، این مطالعه به بررسی اثرات اندرکنش سازه و خاک و نیز اثرات همزمان این اندرکنش با حضور سازه مجاور بر پاسخ لرزه‌ای سه ساختمان بنچمارک قاب خمشی فولادی ۳، ۹ و ۲۰ طبقه در شش حالت مختلف همسایگی میان آن‌ها و در سه فاصله مختلف پرداخته است. برای اعمال اثرات اندرکنش خاک و سازه، ماتریس سختی محیط خاک، از طریق تحلیل مدل دو بعدی کرنش مسطحه در نرم‌افزار آباکوس به دست آمده و با استفاده از مجموعه‌ای از المان‌های از پیش تعریف شده و المان جدید گسترش‌یافته در نرم‌افزار این سیس به مدل‌های دو بعدی غیرخطی از سازه‌ها اضافه می‌گردد. میانگین نتایج به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی تحت اثر ده رکورد لرزه‌ای حوزه دور نشان می‌دهند، که تاثیر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سازه بلندمرتبه ۲۰ طبقه نسبت به دو سازه‌ی دیگر قابل توجه‌تر است و منجر به افزایش ۹ درصدی بیشینه‌ی میانگین نسبت دریافت و کاهش ۶/۹۹ درصدی میانگین برش پایه در این سازه نسبت به حالت بستر صلب می‌گردد. به علاوه، وجود سازه‌های بلندمرتبه و میان‌مرتبه، بیشینه‌ی میانگین نسبت دریافت سازه‌ی کوتاه‌مرتبه را نزدیک‌ترین فاصله‌ی دو سازه به ترتیب ۱۰/۴۴ و ۹/۳۶ درصد و میانگین برش پایه در این سازه را به ترتیب ۲/۸۷ و ۳/۹۳ درصد نسبت به حالت بستر انعطاف‌پذیر افزایش می‌دهد.

۱۹۷۰ می‌باشد. این موضوع برای اولین بار توسط لوکو<sup>۲</sup> و کانتسسه<sup>۳</sup> [۱] مطرح شد. مطالعات لی<sup>۴</sup> و وسلی<sup>۵</sup> [۲]، کوبوری<sup>۶</sup> و کوزاباکه<sup>۷</sup> [۳]، وونگ<sup>۸</sup> و تریفوناک<sup>۹</sup> [۴]، مائوروکامی<sup>۱۰</sup> و لوکو [۵] نیز از جمله‌ی مطالعات پیش‌گام در مورد اثرات این اندرکنش بودند. با توسعه‌ی کامپیوتر و روش‌های محاسباتی، مطالعه‌ی این اندرکنش به عنوان اندرکنش دینامیکی بین چند سازه از طریق خاک زیر آن‌ها در دهه‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. مولیکن<sup>۱۱</sup> و کارابالیس<sup>۱۲</sup> [۶ و ۷] مدل‌های گسسته‌ی مناسبی را با استفاده از

### ۱- مقدمه

توسعه‌ی شهرنشینی و افزایش جمعیت شهرها، انسان را بر آن داشته است تا به ساختن سازه‌هایی بلند به صورت متراکم و در کنار هم در نواحی شهری روی آورد. در این شرایط، وضعیت‌های ناشناخته و یا عوامل در نظر گرفته نشده مانند خاک زیر سازه و وجود سازه‌های مجاور می‌توانند بر ضریب اطمینان طراحی در حالت کلاسیک و به تبع آن، قیمت تمام شده پروژه تاثیرگذار باشند. هنگامی که سازه تحت تاثیر نیروهای خارجی از جمله زلزله قرار می‌گیرد، پاسخ آن و پاسخ زمین به یکدیگر وابسته می‌باشند. از طرفی دیگر، وجود سازه‌های مجاور نیز می‌توانند از طریق محیط خاک زیر خود، پاسخ‌های یکدیگر را تغییر دهند. بررسی این اثرات تحت شاخه‌ای از علم با عنوان اندرکنش دینامیکی سازه-خاک-سازه<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد.

آغاز فاز اول مطالعات مربوط به اندرکنش سازه-خاک-سازه مربوط به دهه

### 1 Structure – Soil – Structure (SSSI)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: arjmandi@znu.ac.ir

- 2 Luco
- 3 Contesse
- 4 Lee
- 5 Wesley
- 6 Kobori
- 7 Kusakabe
- 8 Wong
- 9 Trifunac
- 10 Maurakami
- 11 Mulliken
- 12 Karabalis

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



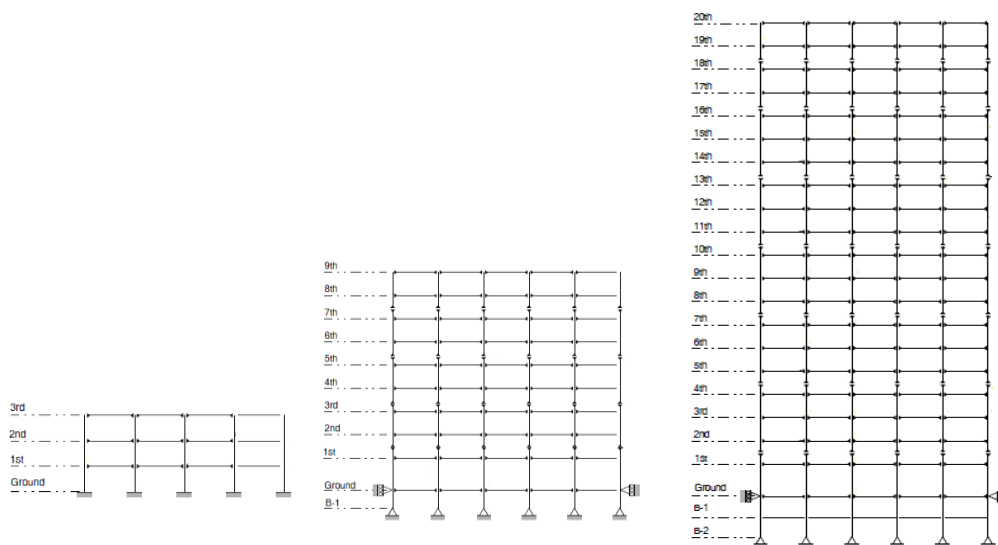
کردند. ویسنسیو<sup>۹</sup> و الکساندر [۱۴] با استفاده از یک مدل ساده غیرخطی دو بعدی گسسته اثرات اندرکنش سازه- خاک- سازه بین دو ساختمان با رفتار خطی را با در نظر گرفتن نسبت ارتفاع به عرض و فاصله‌ی بین آن‌ها و نیز نوع خاک با استفاده از یک مدل بوک-ون<sup>۱۰</sup> غیرخطی برای مدل‌سازی خاک زیر پی و یک فنر دورانی برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی مورد بررسی قرار دادند. بولیستی<sup>۱۱</sup> و ویتاکار<sup>۱۲</sup> [۱۵] اثرات اندرکنش سازه- خاک- سازه را به صورت عددی با روش اجزا محدود به دست آورده و با نتایج مطالعه آزمایشگاهی سانتریفیوژ<sup>۱۳</sup> مقایسه نمودند. سیلسالار<sup>۱۴</sup> و قادیر<sup>۱۵</sup> [۱۶] رفتار لرزه‌ای سازه‌های ۴ طبقه فولادی را با در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه، رفتار غیرخطی برای خاک و سازه و نیز اثرات لایه‌بندی خاک تحت تحلیل‌های تاریخیچه زمانی و نیز در قالب منحنی‌های شکنندگی بررسی نمودند.

با توجه به اهمیت تعیین نحوه‌ی تغییرات پاسخ یک سازه با توجه به مشخصات خاک زیر آن و نیز سازه‌های مجاور به ویژه برای سازه‌های واقع بر خاک‌های سست در مناطق متراکم شهری، انجام مطالعات با دقت کافی به منظور یافتن چگونگی تاثیر این عوامل بر پاسخ‌های دینامیکی سازه‌هایی با ویژگی‌های مختلف می‌تواند در نحوه‌ی طراحی و تفسیر رفتار آن‌ها موثر باشد و سبب کاهش خسارات و یا حتی صرفه اقتصادی در اجرا گردد. بر خلاف مطالعات انجام شده بر روی اندرکنش خاک و سازه، مطالعات کم‌تری بر روی اثرات همزمان این اندرکنش با وجود سازه‌ی مجاور متمرکز شده‌اند و به نظر می‌رسد می‌توان با انجام مطالعات بیش‌تر و ارائه مدل‌های جدید به نتایج علمی و در نهایت کاربردی کردن آن‌ها در زمینه اجرایی دست یافت. از این رو، هدف این مطالعه بررسی اثرات اندرکنش سازه و خاک و نیز اثر همزمان این اندرکنش با حضور سازه مجاور با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف همسایگی میان ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه می‌باشد. در این بررسی، از روش زیرسازه برای مدل‌سازی سیستم‌های خاک و سازه و نیز سازه-خاک-سازه استفاده شده است تا محدودیت‌های روش‌های قبلی از جمله عدم توانایی برقراری ارتباط بین پاسخ‌های مولفه‌های افقی و قائم سختی‌های خاک و افزایش زمان تحلیل مدل‌های پیچیده را ضمن حفظ دقت قابل قبول به حداقل برساند.

جرم‌ها، فنرها و میراگرهای مستقل از فرکانس برای بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه ارائه کردند. ناکاگاو<sup>۱</sup> و همکاران [۸] آزمایشات ارتعاش اجباری و میز لرزان<sup>۲</sup> را با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی ساده شامل پسماند سیلیکونی<sup>۳</sup> و آلومینیوم به ترتیب برای مدل‌سازی خاک و سازه‌ها به منظور ارزیابی مشخصات اولیه‌ی اندرکنش سازه-خاک-سازه انجام دادند. الکساندر<sup>۴</sup> و همکاران [۹] با استفاده از یک مدل ساده و یک فنر دورانی، با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده فرمول‌بندی مشخصی را برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه به دست آوردند. نتایج کار آن‌ها بیان‌گر اثرات منفی وجود سازه‌ی بلندتر در کنار سازه‌ی کوتاه‌تر بود و لذا نتیجه گرفتند که انرژی زلزله اغلب از سازه‌ی جدید بلندتر به سمت سازه‌ی قدیمی کوتاه‌تر حرکت می‌کند. روی<sup>۵</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی اثرات اندرکنش سازه- خاک- سازه در حالت مجاورت یک سازه سبک با یک سازه سنگین و همچنین دو سازه سنگین در کنار هم به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن انواع خاک با عمق‌های مدفونی و فواصل مختلف بین پی‌ها پرداختند. مدنی و همکاران [۱۱] به بررسی پدیده‌های ضربه<sup>۶</sup> و اندرکنش سازه-خاک-سازه و اثرات آن‌ها با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک و سازه بر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی<sup>۳</sup>، ۵، ۶ و ۱۲ طبقه در پنج حالت مختلف همسایگی و در سه فاصله‌ی مختلف میان آن‌ها پرداختند. نتایج این مطالعه نشان دادند که ضربه در مقایسه با اندرکنش سازه- خاک- سازه به عنوان عامل اصلی افزایش برش و جابه‌جایی خارجی طبقات به ویژه در ساختمان بلندتر و در طبقات بالاتر از ساختمان کوتاه می‌باشد. الدیخ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] با استفاده از مجموعه‌ای از آزمایشات میز لرزه‌ای به بررسی اثرات اندرکنش سازه- خاک- سازه بر روی پاسخ یک ساختمان مقیاس شده در مجاورت یک و نیز دو ساختمان دیگر پرداختند. لیانگ<sup>۸</sup> و همکاران [۱۳] اندرکنش سازه-خاک- سازه را با مدل کردن دو دیوار برشی مشابه با پی صلب مدفون بر روی لایه‌ی نرم خاک روی سنگ بستر الاستیک تحت اثر موج برشی افقی در حالت خارج از صفحه با استفاده از روش المان مرزی غیرمستقیم و با تاکید بر اثرات لایه‌بندی خاک بررسی

- 1 Nakagawa
- 2 Shaking table
- 3 Silicon rubber
- 4 Alexander
- 5 Roy
- 6 Pounding
- 7 Aldaikh
- 8 Liang

- 9 Vicencio
- 10 Bouc-Wen
- 11 Bolisetti
- 12 Whittaker
- 13 Centrifuge
- 14 Cilsalar
- 15 Cadir



شکل ۱. قاب‌های مورد مطالعه [۱۷]

Fig. 1. Studied Steel Frames

برای فاز دو از پروژه ساختمان SAC توسط شرکت مشاوره‌ی شرکای براندو و جانستون<sup>۱</sup> طراحی شده‌اند و نمایان‌گر سازه‌های رایج کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه در شهر لس‌آنجلس می‌باشند. طول تمام دهانه‌ها در سازه‌های ۳ و ۹ طبقه برابر با ۹/۱۵ متر و در سازه ۲۰ طبقه برابر ۶/۱ متر می‌باشند. ارتفاع تمام طبقات در سازه‌ی ۳ طبقه ۳/۹۶ متر است. در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه، ارتفاع طبقات زیرزمین ۳/۶۵ متر، طبقه‌ی همکف ۵/۴۹ متر و سایر طبقات ۳/۹۶ متر می‌باشند. در سازه‌های ۳ و ۹ طبقه، از مقاطع بال‌پهن برای تیر و ستون و در سازه‌ی ۲۰ طبقه از مقاطع بال‌پهن برای تیر و ستون و برای جعبه‌ای و بال‌پهن برای ستون استفاده شده است. جزئیات بیشتر از مشخصات مصالح و مقاطع سازه‌ها را میتوان در مرجع [۱۷] یافت.

#### ۲-۲- مشخصات پی و خاک

با توجه به ابعاد دهانه‌ها و ارتفاع سازه‌ها، از پی گسترده برای سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه و از پی نواری در سازه ۳ طبقه استفاده شده است. ضخامت پی گسترده در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب برابر ۲ و ۲/۵ متر و طول، عرض و ضخامت پی نواری در سازه ۳ طبقه به ترتیب ۳۷/۱، ۱/۵ و ۱/۱ متر می‌باشند. رفتار هر سه پی نزدیک به صلب است، با این وجود، به منظور نزدیک شدن به واقعیت در مدل‌سازی انعطاف‌پذیر فرض شده‌اند.

بدین منظور، ماتریس سختی مربوط به سیستم خاک و پی در تمام حالات با مدل‌سازی اجزا محدودی خاک در نرم‌افزار آباکوس به دست آمده و با توجه به دقت بالا در انجام تحلیل‌های غیرخطی و متن‌باز بودن نرم‌افزار این‌سیس، با توسعه‌ی یک المان جدید در این نرم‌افزار به صورت یک ماتریس خارجی به مدل غیرخطی سازه‌ها اعمال شد. در نهایت، نتایج مربوط به بیشینه‌ی میانگین نسبت دررفت و میانگین برش پایه‌ی سازه‌ها تحت اثر ده رکورد زلزله حوزه دور در حالت‌های مختلف مقایسه شده و بر روی آن‌ها بحث می‌شود.

#### ۲- مدل‌های مطالعه شده

##### ۲-۱- مشخصات سازه‌ها

در این مطالعه، مدل دو بعدی از قاب انتهایی سه سازه قاب خمشی فولادی ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به منظور بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این قاب‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این سه سازه، بررسی تاثیراتی است که حالت‌های مختلف همسایگی سازه‌های کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه همزمان با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ سازه‌ی مجاور خود تحت اثر بار لرزه‌ای می‌گذارند. هر سه سازه‌ی مورد استفاده در این مطالعه، سازه‌های پنجم‌مارک معرفی شده در مرجع [۱۷] می‌باشند. این ساختمانها، با ارضای ضوابط لرزه‌ای

جدول ۱. مشخصات خاک

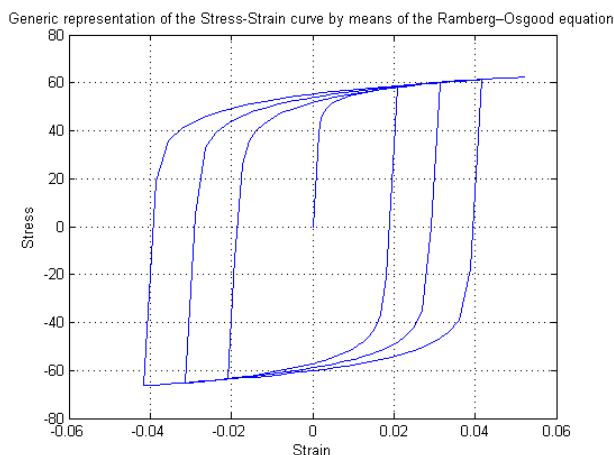
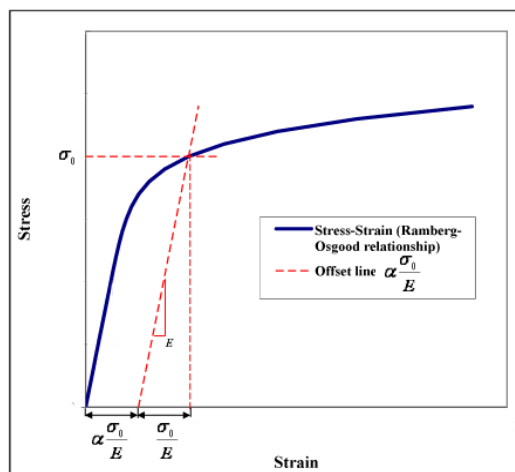
Table 1. Soil properties

مدول برشی (MPa)	ضریب پواسون	ضریب الاستیسیته (MPa)	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	سرعت موج برشی (m/s)	نوع خاک
۷۷/۵	۰/۴	۲۱۷	۱۹	۲۰۰	خاک نوع III

جدول ۲. مشخصات مصالح فولادی

Table 2. Steel material properties

مدول الاستیسیته (MPa)	تنش تسلیم فولاد استفاده شده در تیر (MPa)	تنش تسلیم فولاد استفاده شده در ستون (MPa)
۲۰۱۰۵	۲۴۸	۳۴۵



شکل ۲. منحنی تنش- کرنش و چرخه هیستریزس مصالح فولادی RambergOsgood

Fig.2. Stress- Strain curve and hysteresis cycle of RambergOsgood steel material

غیرخطی مدل شده است. به منظور تعریف رفتار مصالح فولادی در این نرم‌افزار، از مدل رمبرگ- اسگاد (RembergOSgoodSteel) [۱۹] استفاده شده است. مشخصات این مصالح در جدول ۲ و منحنی تنش-کرنش و چرخه هیستریزس آن در شکل ۲ ارائه گردیده است. از المان تیرستون غیرخطی nonlinearBeamColumn با پلاستیسیته‌ی گسترده برای مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها استفاده شده است. در این روش، مقاطع تیر یا ستون با مش‌بندی و تقسیم به چندین فایبر<sup>۲</sup> مدل می‌شود که هر فایبر دارای روابط تنش-کرنش غیرخطی است. به علاوه، به عنوان یک فرض ساده

خاک مورد استفاده در این مطالعه، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [۱۸] در محدوده خاک نوع III (خاک متراکم تا متوسط شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت با ضخامت بیش‌تر از ۳۰ متر) قرار دارد. مشخصات مربوط به خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- مدل‌سازی

۳-۱- مدل‌سازی سازه‌ها

هر سه سازه معرفی شده در این مطالعه در نرم‌افزار اپن‌سیس<sup>۱</sup>، با مصالح

2 Fiber

1 OpenSEES



پی‌ها و عمق مدفون آن‌ها برای لایه‌ی یکپارچه ۳۰ متری از خاک زیر سازه در آباکوس ساخته می‌شوند. نمونه‌ای از این مدل‌سازی برای سازه‌ی ۲۰ طبقه در شکل ۳ نشان داده شده است. رفتار خاک، ارتجاعی و مشخصات آن طبق جدول ۱ فرض شده است. ابعاد محیط خاک مدل شده نیز به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است تا مرزهای مقید شده مدل، تغییر مکان‌های پی را محدود نکنند. از المان‌های ۸ گره‌ای با تابع شکل درجه ۲ با انتگرال کاهش‌یافته (CPE8R) به منظور مش‌بندی محیط خاک بهره گرفته شده است. از آنجا که گسسته‌سازی محیط خاک ریزتر از گسسته‌سازی سازه و پی مجاور می‌باشد، در مرز مشترک خاک و پی تعداد گره‌های خاک بیشتر از تعداد گره‌های پی است. گسسته‌سازی طوری انجام شده است که در محل گره‌های پی، خاک نیز گره داشته باشد، که این گره‌ها همان گره‌های مشترک هستند و تعداد کم آن‌ها باعث میشود ابعاد ماتریس سختی کاهش‌یافته پایین نگه داشته شود. برای ایجاد سازگاری تغییر شکلها، جابجایی‌های افقی و قائم گره‌های غیرمشترک، با معادلات مقید کننده<sup>۵</sup> خطی به جابجایی دو گره مشترک طرفین وابسته می‌شوند.

مطابق با تعریف سختی، مقادیر هر سطر یا ستون از ماتریس سختی کاهش‌یافته خاک برابر مقادیر نیروهای عکس‌العمل به دست آمده در درجات آزادی مشترک در اثر اعمال تغییر مکان واحد در درجه آزادی مربوط به این سطر یا ستون و مقید نمودن سایر درجات آزادی مشترک می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به فرض مسئله کرنش مسطحه، سختی‌های به دست آمده از آباکوس به منظور محاسبه ماتریس سختی کاهش‌یافته باید در عرض هر پی ضرب گردند.

پس از محاسبه ماتریس سختی کاهش‌یافته خاک، این ماتریس مطابق رابطه (۱) به صورت مجموع دو ماتریس نوشته میشود:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{12} + k_{13} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} + k_{21} + k_{23} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} + k_{31} + k_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_{12} - k_{13} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & -k_{21} - k_{23} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & -k_{31} - k_{32} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ماتریس اول یک ماتریس قطری است و ماتریس دوم ماتریسی است که مجموع عناصر هر سطر و ستون آن برابر صفر است. در حقیقت ماتریس سختی دوم با انتقال یکنواخت همه گره‌های مشترک نیروی خالص صفر را

کننده از اثرات زوال در مدل‌سازی چشم‌پوشی شده است. در تمام سازه‌ها، گره‌ها در هر طبقه در محل اتصال تیر به ستون تعریف شده‌اند. با توجه به وجود وصله ستون‌ها در برخی از طبقات سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه، از مشخصات مقطع معادل به دست آمده از میانگین‌گیری وزنی میان مقاطع ستون‌های بالایی و پایینی استفاده گردیده و لذا در محل وصله‌ها، گره جدیدی تعریف نشده است. جرم‌های لرزه‌ای مربوط به هر طبقه به صورت یکنواخت میان گره‌های آن طبقه توزیع و در دو راستای افقی و عمودی (انتقالی) به گره‌ها وارد گردیده و از اینرسی دورانی و در نتیجه جرم دورانی صرف‌نظر شده است. بارگذاری ثقلی نیز به صورت بارهای متمرکز در گره‌های هر طبقه اعمال شده است. میرایی ذاتی مصالح فولادی ۲ درصد در نظر گرفته شده و به صورت میرایی رایلی در نرم افزار اعمال شده است.

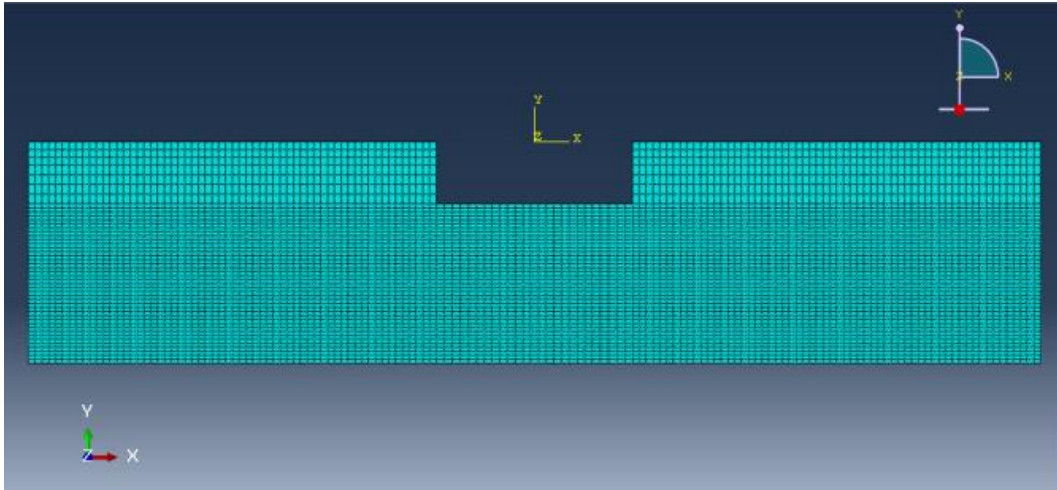
### ۳-۲- مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه (سازه تنها)

به منظور بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه، از روش زیرسازه<sup>۱</sup> استفاده شده است. برای این منظور ابتدا محیط خاک به تنهایی تحلیل شده و ماتریس سختی کاهش‌یافته یا متراکم شده<sup>۲</sup> آن، که فقط مربوط به درجات آزادی مشترک بین محیط خاک و پی است، محاسبه میشود. درجات آزادی مشترک مربوط به گره‌های مشترک است که در سازه ۳ طبقه در مرز مشترک خاک و پی، و در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه علاوه بر آن در مرز مشترک خاک و طبقه زیر زمین، قرار دارند. سپس این ماتریس سختی، در مدل اجزای محدود سازه و پی در درجات آزادی مشترک مذکور اسمبل میشود. ماتریس سختی کاهش‌یافته محیط خاک از تحلیلهای استاتیکی خطی در نرم‌افزار آباکوس<sup>۳</sup> به دست می‌آیند، شکل ۳ سازه و پی آن نیز در نرم‌افزار این‌سیس مدل شده و با فرض رفتار غیرخطی برای مصالح، تحت تحلیلهای تاریخچه زمانی قرار میگیرند، شکل ۴ تعداد گره‌های مشترک مذکور، در سازه ۳ طبقه، ۵ گره در زیر پی و در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۸ و ۱۰ گره در محل طبقات زیر زمین و زیر پی در نظر گرفته شده، که در شکل ۴ نمایش داده شده است. لذا در سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱۰، ۱۶ و ۲۰ درجه آزادی مشترک وجود دارد و ماتریس سختی کاهش‌یافته محیط خاک دارای این تعداد سطر و ستون است.

مدل‌های دو بعدی کرنش مسطحه<sup>۴</sup> محیط خاک با در نظر گرفتن هندسه‌ی

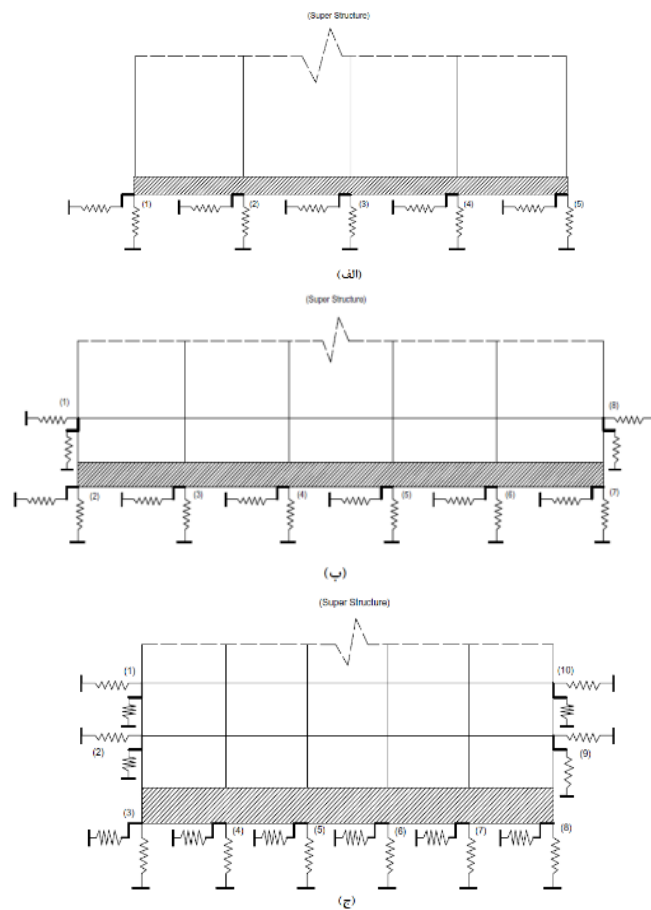
- 1 Sub-structure
- 2 Reduced or Condensed Stiffness Matrix
- 3 Abaqus
- 4 Plain Strain

5 Constraint Equation (CE)



شکل ۳. مدل سازی کرنش مسطحه محیط خاک در نرم افزار آباکوس برای ساختمان ۲۰ طبقه

Fig.3. Plane strain modeling of soil medium in Abaqus software for 20-story structure



شکل ۴. طرح شماتیک مدل سازی خاک و پی در (الف) سازه ۳ طبقه (ب) سازه ۹ طبقه (ج) سازه ۲۰ طبقه

Fig. 4. Schematic modeling of soil and foundation (a) 3-story structure (b) 9-story structure (c) 20-story structure

جدول ۳. فاصله‌ی بین سازه‌ها در حالت‌های مختلف همسایگی

Table 3. Distances between the structures in different adjacency cases

حالت‌های همسایگی	$d_1$ (m)	$d_2$ (m)	$d_3$ (m)
۳ و ۳	۰/۶۷۲	۲/۶۹	۶/۷۲
۹ و ۳	۰/۹۷۷	۳/۹۱	۹/۷۷
۲۰ و ۳	۰/۷۵۳	۳/۰۰	۷/۵۳
۹ و ۹	۱/۲۱	۴/۸۲۵	۱۲/۱
۲۰ و ۹	۱/۰۰	۴/۱۳	۱۰/۳۳
۲۰ و ۲۰	۰/۸۲۵	۳/۳	۸/۲۵

۲۰ و ۲۰ طبقه برای در نظر گرفتن حالت‌های مختلف همسایگی سازه‌های کوتاه، میان و بلندمرتبه و اثرات آن‌ها در سه فاصله مختلف در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی بین سازه‌ها، ۰/۵، ۲/۰ و ۵/۰ برابر فاصله مینا در نظر گرفته شده است، که به ترتیب به صورت  $d_1$ ،  $d_p$  و  $d_p$  نشان داده می‌شوند. فاصله مینا (a) به صورت نصف بعد پی مربعی که مساحت آن برابر میانگین مساحت سهم ستون‌های انتهایی از پی در دو سازه مجاور است، تعریف می‌شود، که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$a = \sqrt{\frac{L_1 B_1 + L_2 B_2}{8}} \quad (2)$$

در این رابطه  $L_p$  و  $L_1$  به ترتیب طول سهم ستون انتهایی سازه‌های اول و دوم از پی این سازه‌ها و  $B_p$  و  $B_1$  به ترتیب عرض پی‌های سازه‌های اول و دوم می‌باشند. مقادیر مربوط به فواصل بین سازه‌ها در شش حالت همسایگی بین آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. پس از تعیین فواصل مینا، مطابق با آنچه که در مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه انجام شد، مدل اجزای محدود خاک با در نظر گرفتن هندسه پی‌های مجاور هم در سه فاصله‌ی  $d_1$ ،  $d_p$  و  $d_p$  برای هر حالت از همسایگی در نرم‌افزار آباکوس ساخته می‌شود. فرضیات و روند مدل‌سازی همانند موارد مربوط به حالت اندرکنش خاک و سازه می‌باشند. در شکل ۵، نمونه‌ای از مدل‌سازی محیط خاک در حالت همسایگی پی‌های مربوط به دو سازه‌ی ۳ و ۹ طبقه نشان داده شده است. هر سطر یا ستون از ماتریس سختی خاک همانند مدل‌های مربوط به اندرکنش خاک و سازه، با اعمال جابجایی واحد در

در این گره‌ها ایجاد می‌کند. این به این معنی است که، ماتریس دوم مربوط به سختی‌های انتقال نسبی بین گره‌های مشترک است و ماتریس سختی اول مربوط به سختی‌های انتقال کل سازه. معادله فوق برای یک ماتریس نمونه ۳ در ۳ نوشته شده است، ولی در واقع ابعاد ماتریس‌های سختی کاهش‌یافته ۱۰، ۱۶ و ۲۰ می‌باشد.

برای اضافه کردن ماتریس سختی به دست آمده از آباکوس به مدل غیرخطی سازه‌ها در این سیس، بخش اول ماتریس سختی، به صورت فنرهای انتقالی در راستای افقی و قائم در گره‌های مشترک مدل می‌شوند. بدین منظور، از المان‌های با طول صفر (zeroLength) این سیس استفاده شده است. بخش دوم ماتریس سختی کاهش‌یافته که در حقیقت حرکت‌های افقی و قائم گره‌های مشترک را به هم مرتبط می‌کند، از طریق المان توسعه‌یافته در این سیس به مدل اضافه می‌شود. این المان در حقیقت بخش دوم ماتریس سختی کاهش‌یافته را از یک فایل متنی خوانده و در درجات آزادی مشترک اسمبل می‌کند. تجزیه ماتریس سختی کاهش‌یافته به دو قسمت و روش اضافه کردن متفاوت هر قسمت به مدل سازه و پی، به این دلیل مورد استفاده قرار گرفته است که، بخش اول ماتریس را میتوان با المانهای دقیقتر اپنسیس که مخصوص خاک توسعه یافته‌اند مدل کرد. طرح شماتیک مدل سیستم خاک و پی در نرم‌افزار این سیس در سه سازه در شکل ۴ نشان داده شده است.

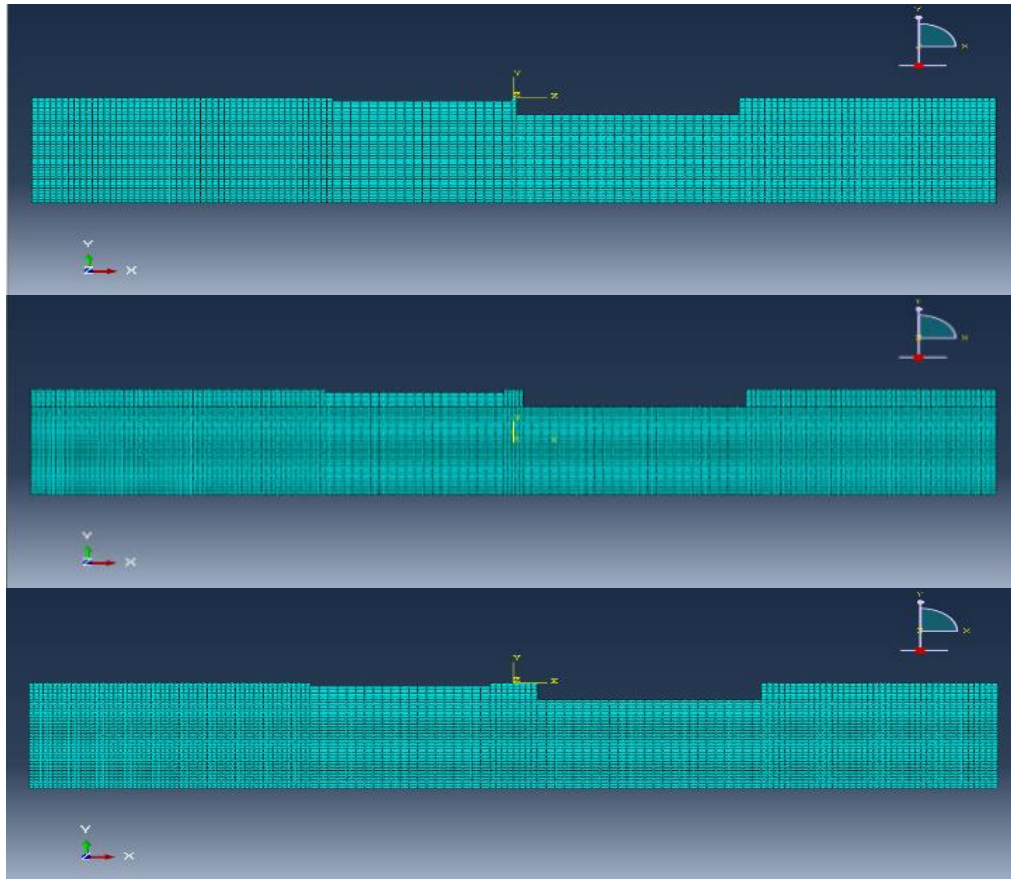
۳-۳- مدل‌سازی اندرکنش سازه - خاک - سازه (دو سازه همسایه)

به منظور بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه، سیستم شامل دو سازه مجاور با خاک زیر آن‌ها مدل شده است. شش حالت مختلف از سه سازه مورد مطالعه شامل همسایگی سازه‌های ۳ و ۳، ۳ و ۹، ۳ و ۲۰، ۹ و ۹، ۹ و ۲۰ و ۲۰ و

جدول ۴. مقایسه پریودهای مدل آزمایشگاهی مطالعه [۱۲] با مدل اپن سیس

Table 4. Comparison of periods of the experimental model in [12] and OpenSees model

اختلاف (%)	پریود در مدل عددی (sec)	پریود در مدل آزمایشگاهی [۱۲] (sec)	حالت
۰	۰/۱۱	۰/۱۱	سازه تنها بر بستر صلب
۲/۶	۰/۱۸۵	۰/۱۹	سازه تنها بر روی فوم

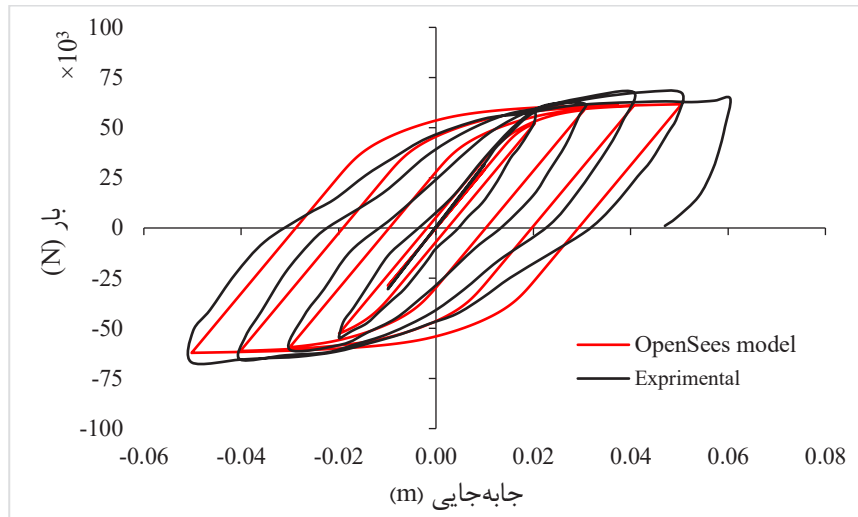


شکل ۵. مدل اجزای محدودی خاک برای دو ساختمان ۳ و ۹ طبقه در سه فاصله

Fig. 5. Finite element model of soil for 3 and 9-story structures in three distances

به دلیل اینکه مدل خاک برای عرض واحد (کرنش مسطحه) ساخته شده است، مقادیر سختی محاسبه شده باید در عرض واقعی پی هر سازه ضرب شود. بدین منظور، درایه‌های ماتریس سختی کاهش یافته که درجات آزادی پی یک سازه را به هم مربوط می‌کنند، به مقدار عرض آن پی ضرب می‌شوند. سایر درایه‌ها که درجات آزادی از دو پی مختلف را به هم مربوط می‌کنند، با قبول کمی تقریب، به جذر حاصل ضرب عرض‌های دو پی ضرب می‌شوند.

یک درجه آزادی مشترک و مقید نمودن سایر درجات آزادی مشترک به دست می‌آید. با این تفاوت که در این مدلها دو سری درجه آزادی مشترک وجود دارد که مربوط به هر کدام از سازه‌ها است. بدین ترتیب بعد ماتریس سختی کاهش یافته در این حالت برابر مجموع درجات آزادی مشترک دو سازه خواهد بود. لطفاً توجه شود که هر درایه از این ماتریس، سختی فخر فرضی است که دو درجه آزادی از درجات آزادی مشترک را به هم وصل می‌کند.



شکل ۶. منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در اپن سیس

Fig.6. Hysteresis curves of experimental model and numerical model in OpenSees

دقت مناسبی برخوردار است.

### ۳-۴-۲- مدل سازی خطی اندرکنش خاک و سازه

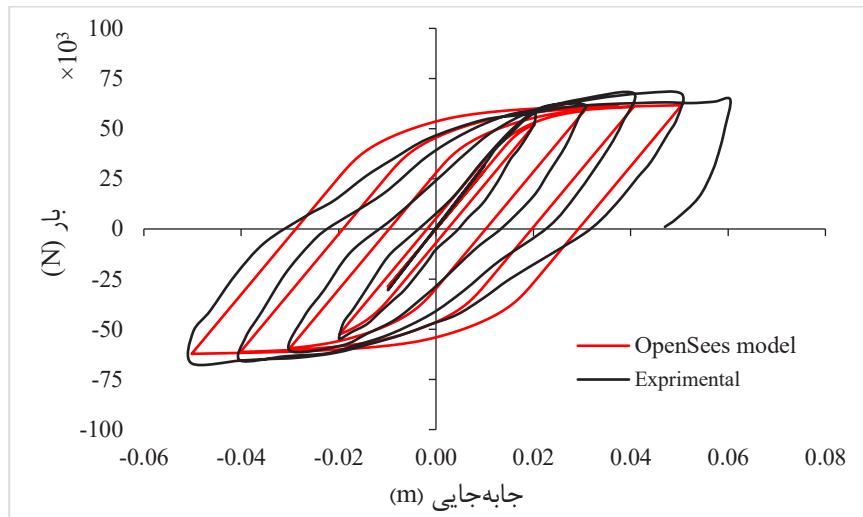
صحت سنجی مدل سازی اندرکنش خاک و سازه با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله با مدل سازی مطالعه‌ی آزمایشگاهی [۱۲] صورت گرفته است. این مدل سازی در حقیقت به بررسی صحت عملکرد المان جدید نوشته شده در اپن سیس می پردازد. در مدل آزمایشگاهی مورد نظر، یک سازه مقیاس شده از جنس آلومینیوم مطابق با شکل ۷ بر روی قطعه‌ای از فوم پلی اورتان قرار گرفته است. در طول فرایند تحلیل و آزمایش، رفتار سازه و فوم (به عنوان خاک) به صورت خطی و الاستیک فرض شده است. به منظور مدل سازی این مدل در نرم افزار اپن سیس، ابتدا ماتریس سختی کاهش یافته مربوط به قطعه‌ی فوم با انجام تحلیل استاتیکی در نرم افزار آباکوس به دست آمده است. سپس، این ماتریس از طریق المان جدید نوشته شده در این نرم افزار به صورت یک ماتریس خارجی بین درجات آزادی نقاط زیر پی در ماتریس سختی کل اسمبل می شود. به منظور صحت سنجی مدل و با توجه به فرض رفتار الاستیک در این مدل آزمایشگاهی، پیوندهای مربوط به حالت اندرکنش خاک و سازه مطابق با جدول ۴ به دست می آیند. مطابق با نتایج این جدول، می توان مشاهده کرد که المان به کار رفته برای در نظر گرفتن اندرکنش میان خاک و سازه به درستی کار می کند.

در مدل های مربوط به اندرکنش سازه-خاک - سازه در اپن سیس بخش اول ماتریس سختی به صورت فنرهای انتقالی افقی و قائم، با امکان مدل سازی خصوصیات دقیقتر خاک، در گره های مشترک (مطابق با شکل ۴) در مرز خاک، سازه و پی وارد می شوند. بخش دوم ماتریس سختی نیز که مربوط به سختی نسبی بین درجات آزادی مشترک در هر دو پی مجاور است، با استفاده از المان توسعه یافته و در قالب یک فایل متنی شامل این مقادیر سختی اعمال می گردند. در این روش، بر خلاف روش معمول، ارتباط بین درجات آزادی افقی و قائم در خود پی و پی مجاور نیز به طور دقیق در نظر گرفته می شود.

### ۳-۴-۳- صحت سنجی مدل سازی

#### ۳-۴-۱- مدل غیرخطی سازه

به منظور صحت سنجی مدل سازی غیرخطی سازه ها، مربوط به قاب فولادی بدون میان قاب در مطالعه آزمایشگاهی [۲۰] در نرم افزار اپن سیس با استفاده از مصالح فولادی RembergOSgoodSteel مدل شده است. در ادامه، با انجام بارگذاری چرخه ای، منحنی هیستریزس این قاب در نرم افزار به دست آمده و مطابق با شکل ۳ با منحنی هیستریزس به دست آمده از آزمایش مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، مقادیر مربوط به دو منحنی دارای انطباق مناسبی می باشند و لذت می توان نتیجه گرفت که مدل سازی غیرخطی صورت گرفته در نرم افزار اپن سیس از



شکل ۶. منحنی هیستریزیس مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در این سیس

Fig.6. Hysteresis curves of experimental model and numerical model in OpenSees



شکل ۷. مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در مطالعه [۱۲]

Fig. 7. Experimental model in [12]

جدول ۴. مقایسه پریودهای مدل آزمایشگاهی مطالعه [۱۲] با مدل این سیس

Table 4. Comparison of periods of the experimental model in [12] and OpenSees model

اختلاف (%)	پریود در مدل عددی (sec)	پریود در مدل آزمایشگاهی [۱۲] (sec)	حالت
۰	۰/۱۱	۰/۱۱	سازه تنها بر بستر صلب
۲/۶	۰/۱۸۵	۰/۱۹	سازه تنها بر روی فوم

جدول ۵. اثر اندرکنش خاک و سازه بر زمان تناوب سازه‌ها

Table 5. SSI effect on periods of the structures

سازه	زمان تناوب مود اول (sec)			زمان تناوب مود دوم (sec)			زمان تناوب مود سوم (sec)		
	$T_{fixed}$	$T_{SSI}$	$T_{SSI}$	$T_{fixed}$	$T_{SSI}$	$T_{SSI}$	$T_{fixed}$	$T_{SSI}$	$T_{SSI}$
۳ طبقه	۱/۰۱۷	۱/۰۵۸	۱/۰۴	۰/۳۳۷	۰/۳۵۲	۱/۰۴۴	۰/۱۹۷	۰/۲۰۸	۱/۰۵۶
۹ طبقه	۲/۲۶۷	۲/۳۰۸	۱/۰۲	۰/۸۵۴	۰/۸۶۶	۱/۰۱۴	۰/۴۹۱	۰/۴۹۸	۱/۰۱۴
۲۰ طبقه	۳/۷۶۴	۳/۸۹۱	۱/۰۳۴	۱/۳۱	۱/۳۴۸	۱/۰۲۹	۰/۷۷۷	۰/۷۹۴	۱/۰۲۲

جدول ۶. زمان تناوب مربوط به سیستم سازه - خاک - سازه در سه فاصله مختلف

Table 6. Periods of SSSI system in three different distances

حالت همسایگی دو سازه	زمان تناوب مود اول سیستم (sec)			زمان تناوب مود دوم سیستم (sec)			زمان تناوب مود سوم سیستم (sec)		
	$d_3$	$d_2$	$d_1$	$d_3$	$d_2$	$d_1$	$d_3$	$d_2$	$d_1$
	۳ و ۳	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵	۱/۰۶۶	۱/۰۴۱	۱/۰۴۲	۱/۰۴۵	۰/۳۵۶	۰/۳۵۶
۹ و ۳	۲/۲۹۹	۲/۲۹۲	۲/۳۰۱	۱/۱	۱/۰۶۸	۱/۰۹۵	۰/۸۶۱	۰/۸۵۹	۰/۸۶۳
۲۰ و ۳	۳/۸۸۳	۳/۸۸۸	۳/۸۹۵	۱/۳۴۳	۱/۳۴۶	۱/۳۴۹	۱/۰۹۶	۱/۰۹۷	۱/۰۹۹
۹ و ۹	۲/۳۲۱	۲/۳۳۲	۲/۳۳	۲/۲۹۵	۲/۲۹۹	۲/۳	۰/۸۷۳	۰/۸۷۷	۰/۸۷۵
۲۰ و ۹	۳/۹۰۸	۳/۸۹	۳/۸۹۲	۲/۳۰۸	۲/۳۰۴	۲/۳	۱/۳۵۲	۱/۳۴۷	۱/۳۴۸
۲۰ و ۲۰	۳/۸۶۲	۳/۸۶۲	۳/۸۸	۳/۷۳	۳/۷۳	۳/۷۳	۱/۳۳۹	۱/۳۳۷	۱/۳۴

۴- فرآیند تحلیل

۴-۱- تحلیل مودال

تحلیل مقادیر ویژه برای درک چگونگی تاثیر پدیده اندرکنش خاک و سازه و نیز اثرات همزمان این اندرکنش با حضور سازه مجاور بر روی سازه انجام شده است. نسبت افزایش زمان تناوب یکی از کلیدی‌ترین پارامترهایی است که در ارزیابی اثرات اندرکنش بر روی رفتار سازه‌ها وجود دارد. این پارامتر به صورت نسبت زمان تناوب سازه در حالت بستر انعطاف‌پذیر (وجود خاک) و نیز در حالت در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه به زمان تناوب آن در حالت بستر صلب تعریف می‌شود. در این مطالعه، دوره تناوب سازه‌ها برای سه مود اول محاسبه شده است. مقادیر زمان تناوب سازه‌ها در حالت‌های مختلف در حالت اندرکنش خاک و سازه در جدول ۵ و برای اندرکنش سازه- خاک- سازه در جدول ۶ نشان داده می‌شوند.

مقایسه‌ی نسبت افزایش زمان تناوب در سه سازه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه مطابق با جدول ۵ نشان می‌دهد که قاب کوتاه‌مرتبه بیش‌تر از سایر قاب‌ها تحت تاثیر انعطاف‌پذیری پی و اندرکنش خاک و سازه قرار گرفته است. مطابق نتایج این جدول، انعطاف‌پذیری ناشی از در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه منجر به افزایش زمان تناوب سازه‌ها در هر سه مود اول شده است. سازه‌های ۳، ۲۰ و ۹ طبقه به ترتیب با ۴، ۳/۴ و ۲ درصد افزایش در زمان تناوب مود اول بیش‌ترین تاثیرپذیری را از این اندرکنش دارند.

بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل مقادیر ویژه حالت‌های مختلف همسایگی سازه‌ها مطابق با جدول ۶ نشان می‌دهد که وقتی دو سازه مشابه با ارتفاع یکسان در کنار هم قرار گیرند، زمان تناوب اول و دوم سیستم شامل دو سازه و خاک زیر آن‌ها نزدیک به زمان تناوب مود اول آن‌ها در حالت اندرکنش خاک و سازه (SSI) و زمان تناوب مود سوم نزدیک به زمان تناوب

جدول ۷. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در این مطالعه

Table 7. Parameters of earthquakes used in this study

زمان تناوب غالب (sec)	بیشینه شتاب زمین (g) (PGA)	نام ایستگاه	شماره رکورد در PEER	نام رویداد زلزله
۰/۲۴	۰/۲۲۵	L.A. - Hollywood Stor FF	NGA68	سن فرناندو - آمریکا
۰/۸۲	۰/۲۴۶	Hollister City Hall	NGA777	لُما پریتا - آمریکا
۰/۳۸	۰/۲۱۵	Palo Alto - 1900 Embarc.	NGA786	لُما پریتا - آمریکا
۰/۶۸	۰/۲۴۵	Yermo Fire Station	NGA900	لاندرز - آمریکا
۰/۲۸	۰/۲۳۹	L.A. - Baldwin Hills	NGA985	نُثر ریج - آمریکا
۰/۳۸	۰/۲۲۱	Abeno	NGA1100	کوبه - ژاپن
۰/۵۸	۰/۲۱۴	Morigawachi	NGA1110	کوبه - ژاپن
۰/۳۸	۰/۳۱۲	"Duzce"	NGA1158	کوجائلی - ترکیه
۰/۱۴	۰/۵۰۷	El Centro Differential Array	NGA5985	ال مایور - کواپا - مکزیک
۰/۲	۰/۲۲۳	Pages Road Pumping Station	NGA6953	دارفیلد - نیوزلند

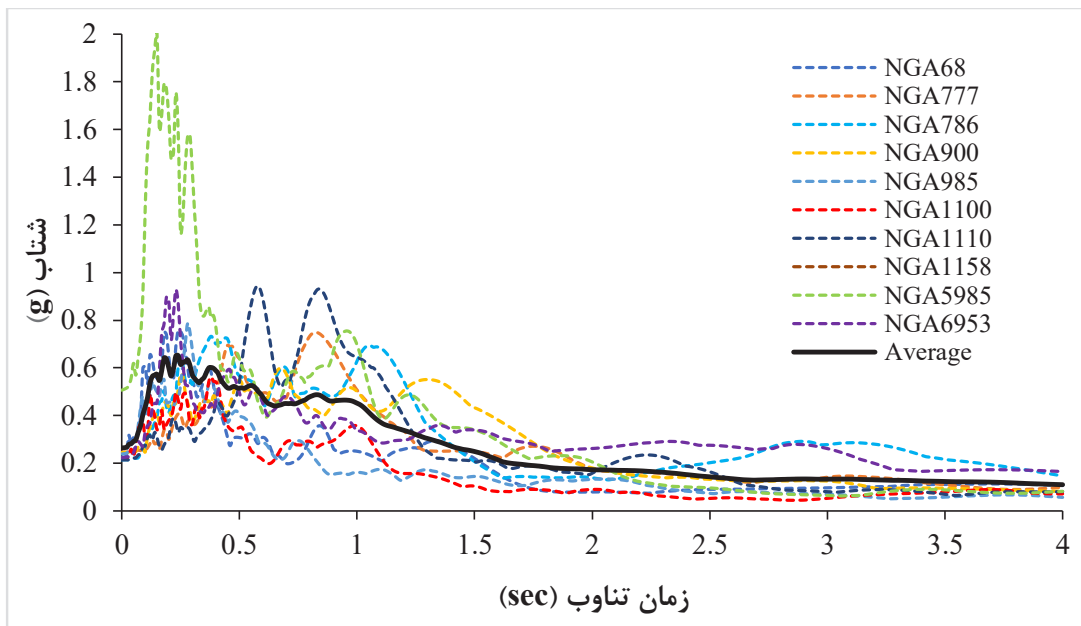
گرفت. به منظور ارائه و بحث بر روی نتایج بررسی صورت گرفته در این مطالعه، بیشینه‌ی میانگین نسبت‌های دررفت طبقات و میانگین برش‌های پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی تحت این زلزله‌ها در حالت‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند. بدین منظور، زلزله‌های مورد استفاده در این کار تحقیقاتی، بر اساس نوع خاک، بزرگای زلزله و فاصله از گسل از بانک اطلاعاتی زمین لرزه (PEER) انتخاب می‌گردند. معیار انتخاب این زلزله‌ها، در نظر گرفتن سرعت موج برشی ۲۰۰ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه در عمق ۳۰ متری خاک، بزرگای بین ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر و فاصله از گسل ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر (حوزه دور) می‌باشد. نام و مشخصات این زلزله‌ها در جدول ۷ گردآوری شده است. به علاوه، منحنی‌های مربوط به طیف شتاب این زلزله‌ها و نیز طیف میانگین حاصل از آن‌ها در شکل ۸ نشان داده می‌شوند. رکوردهای زلزله انتخاب شده بر اساس طیف ASCE-7 [۲۱] برای در خاک نوع D در منطقه‌ی لس‌آنجلس هم‌پایه شدند. ضرایب هم‌پایه‌سازی رکوردها برای مجاورت دو سازه مطابق با روش بیان شده در مرجع [۱۱]، از میانگین ضرایب هم‌پایه‌سازی مرتبط به این دو سازه استفاده شده است.

مود سوم این سازه می‌باشند. در مورد حالتی که دو سازه غیرمشابه با ارتفاع مختلف در کنار هم قرار می‌گیرند، همانطور که انتظار می‌رود زمان تناوب مود اول سیستم متشکل از آن‌ها نزدیک به زمان تناوب مود اول سازه‌ی بلندتر است. در حالت همسایگی سازه‌های کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه (۳ و ۹ طبقه) و نیز سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه (۹ و ۲۰ طبقه)، زمان تناوب مودهای دوم و سوم سیستم سازه-خاک-سازه (SSSI) به ترتیب نزدیک به زمان تناوب مود اول سازه کوتاه‌تر و زمان تناوب مود دوم سازه بلندتر می‌باشند؛ با این وجود، در مورد همسایگی سازه‌های کوتاه‌مرتبه و بلندمرتبه با توجه به اختلاف زیاد بین زمان‌های تناوب مودهای مختلف این دو سازه، زمان‌های تناوب مودهای دوم و سوم سیستم به ترتیب نزدیک به زمان تناوب مود دوم سازه‌ی بلندتر و مود اول سازه‌ی کوتاه‌تر هستند.

۴-۲- تحلیل تاریخچه زمانی

پس از تعریف تمام مدل‌ها، شامل مدل سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه با بستر صلب و انعطاف‌پذیر و نیز مدل‌های مربوط به شش حالت مختلف همسایگی این سازه‌ها در نرم‌افزار اپن‌سیس، ۲۴۰ تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی این مدل‌ها تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مربوط به ده زلزله مختلف صورت





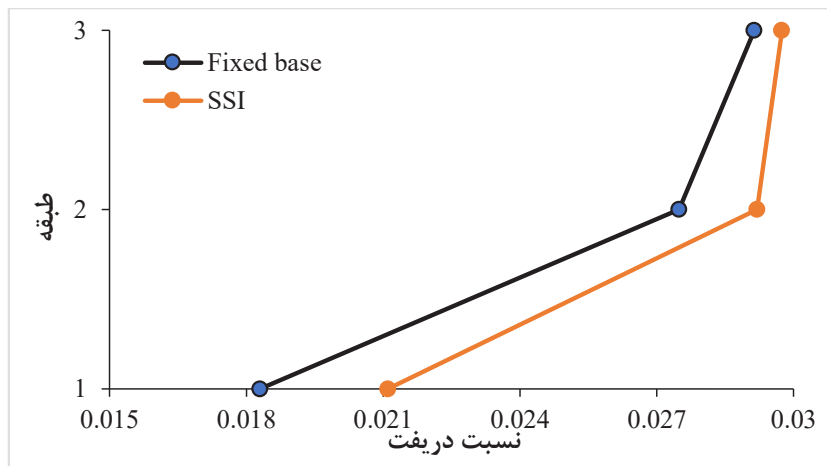
شکل ۸. طیف‌های شتاب زلزله‌ها و طیف میانگین آن‌ها

Fig. 8. Acceleration spectrums of earthquakes and average spectrum of them

جدول ۸. ضرایب هم‌پایه‌سازی زلزله‌ها در حالت‌های مختلف

Table 8. Scale factors of the earthquakes in different cases

$d_3$	$d_2$	$d_1$	
۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۸۱	۰/۰۲۹۱	۳ و ۳
۰/۰	-۳/۵۲	۰/۰	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۲/۰۴	-۵/۴۹	-۲/۰۴	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۲۴	۰/۰۳۲۵	۹ و ۳
۸/۶۲	۱۱/۳۲	۱۱/۶۴	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
۶/۴	۹/۰۶	۹/۳۶	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۳۰۲	۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۲۸	۲۰ و ۳
۳/۶۹	۸/۴۲	۱۲/۷۴	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
۱/۵۸	۶/۲۱	۱۰/۴۴	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)



شکل ۹. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر نسبت دريقت طبقات در سازه ۳ طبقه

Fig. 9. SSI effect on drift ratios of stories in 3-story structure

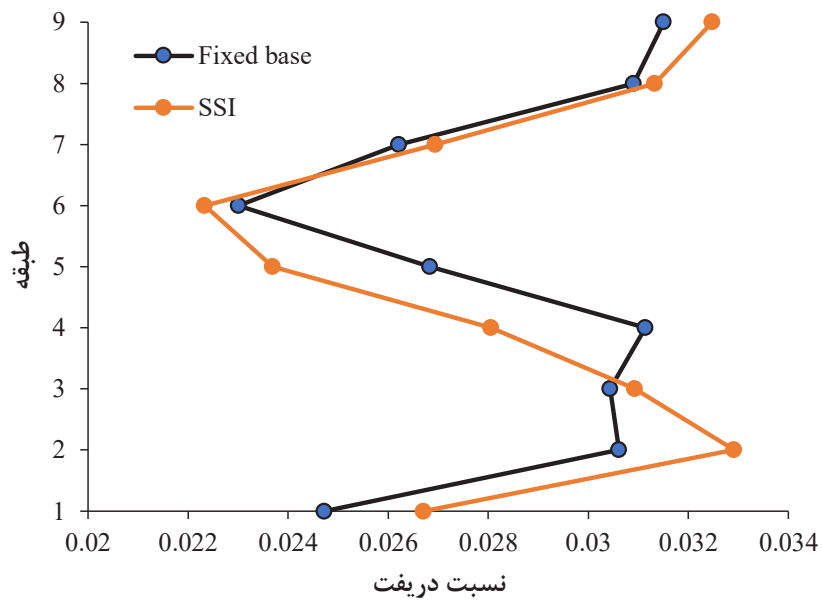
اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بلندمرتبه با توجه به رفتار نرم‌تر سازه به مراتب از اهمیت ویژه‌ای نسبت به سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه برخوردار است و در نظر گرفتن مدل خاک در این سازه‌ها مهم‌تر است. تغییرات میانگین نسبت دريقت طبقات در سازه کوتاه‌مرتبه ۳ طبقه در فواصل مختلف و در حالت‌های مختلف همسایگی شامل دو سازه ۳ طبقه، سازه ۳ و ۹ طبقه و سازه ۳ و ۲۰ طبقه در شکل ۱۳ نشان داده می‌شود. مقادیر مربوط به بیشینه میانگین نسبت دريقت سازه ۳ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی نیز در جدول ۹ در کنار مقادیر مربوط به حالت بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر مقایسه می‌شوند. مطابق با نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده نمود که وجود سازه‌های بلندتر ۹ و ۲۰ طبقه، بیشینه نسبت دريقت سازه ۳ طبقه را هم نسبت به حالت بستر صلب و هم نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه افزایش می‌دهد. مقدار این افزایش نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه در نزدیک‌ترین فاصله‌ی دو سازه از هم ( $d_p$ ) در مجاورت سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب برابر ۹/۳۶ و ۱۰/۴۴ درصد می‌باشد. با این وجود، مجاورت سازه ۳ طبقه در کنار سازه ۳ طبقه مشابه نه تنها منجر به افزایش بیشینه میانگین نسبت دريقت نشده است، علاوه بر این، همانطور که مشاهده می‌شود با وجود این که اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه با افزایش فاصله سازه‌ها از هم کاهش یافته است، این اثرات حتی در فاصله‌ی  $d_p$  نیز وجود دارد و بر میانگین بیشینه نسبت دريقت سازه ۳ طبقه تاثیر می‌گذارند.

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- نسبت دريقت

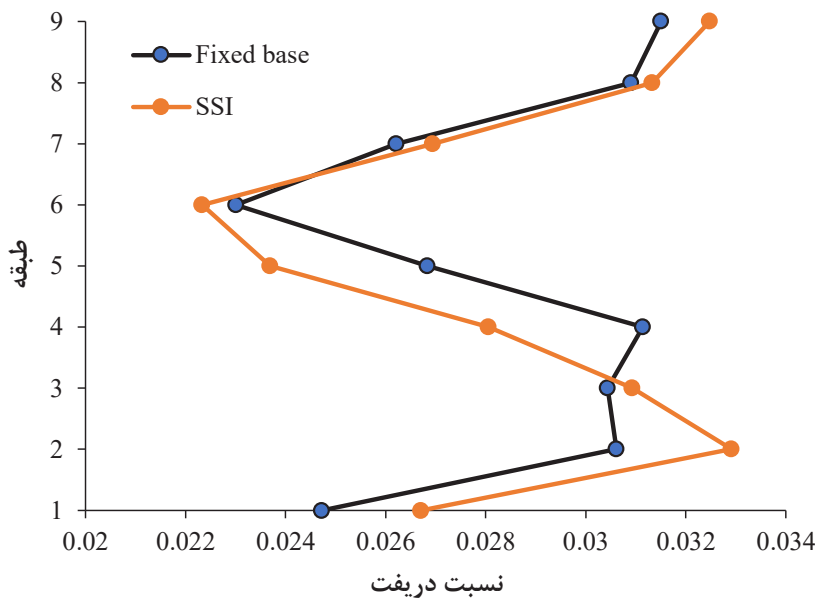
تغییر مکان جانبی نسبی طبقات که به عنوان دريقت سازه<sup>۱</sup> شناخته می‌شود، اختلاف بین تغییر مکان‌های جانبی مراکز جرم کف‌های بالا و پایین آن طبقه است. نسبت دريقت یک طبقه از سازه به نسبت دريقت این طبقه به ارتفاع آن گفته می‌شود. این نسبت در طراحی و تفسیر رفتار سازه بسیار مهم است و تمام آیین‌نامه‌های لرزه‌ای دارای الزاماتی در مورد کنترل این مقدار در یک محدوده مشخص می‌باشند. این نسبت، در حقیقت بیانگر متوسط دورانی است که در یک طبقه توسط تیر و ستون تحمل می‌گردد. از طرفی دیگر، افزایش نسبت دريقت می‌تواند منجر به خرابی اجزای غیرسازه‌ای در یک طبقه از سازه گردد. در این مطالعه، میانگین نسبت دريقت هر طبقه از سازه‌ها تحت زلزله‌های حوزه دور ارائه شده در جدول ۷ در حالت‌های مختلف محاسبه شده است. تغییرات بیشینه میانگین نسبت دريقت هر سازه نیز در حالت‌های مختلف برای بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه و نیز اثر همزمان این اندرکنش با حضور سازه مجاور مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطابق با شکل‌های ۹ تا ۱۱، تغییرات میانگین نسبت دريقت سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه در طبقات مختلف در دو حالت بستر صلب و انعطاف‌پذیر با هم مقایسه می‌شوند. مطابق با شکل ۱۲، اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های ۲۰ طبقه، ۹ طبقه و ۳ طبقه به ترتیب سبب افزایش ۹، ۴/۴۶ و ۲/۱ درصدی بیشینه نسبت دريقت می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که توجه به مسئله‌ی

1 Inter-story drift



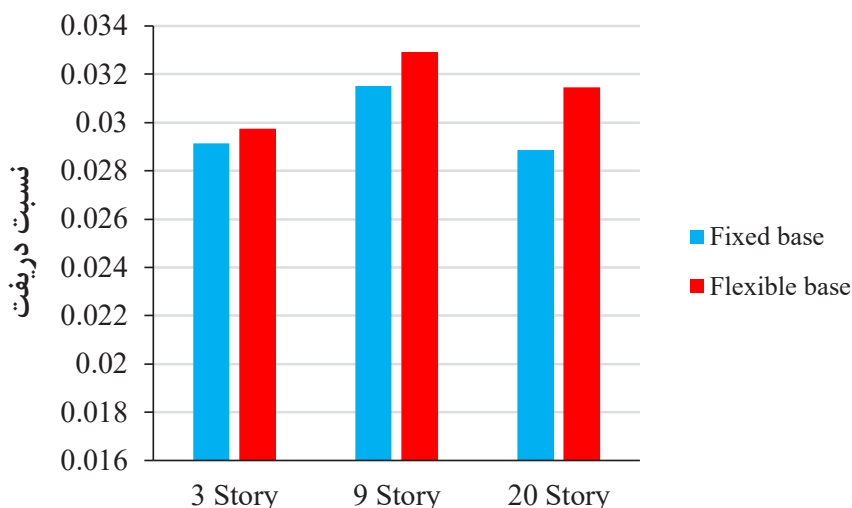
شکل ۱۰. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر نسبت دریفت طبقات در سازه ۹ طبقه

Fig. 10. SSI effect on drift ratios of stories in 9-story structure



شکل ۱۱. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر نسبت دریفت طبقات در سازه ۲۰ طبقه

Fig. 11. SSI effect on drift ratios of stories in 20-story structure



شکل ۱۲. بیشینه میانگین نسبت‌های دریفت سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

Fig. 12. Maximum of the average drift ratios considering SSI

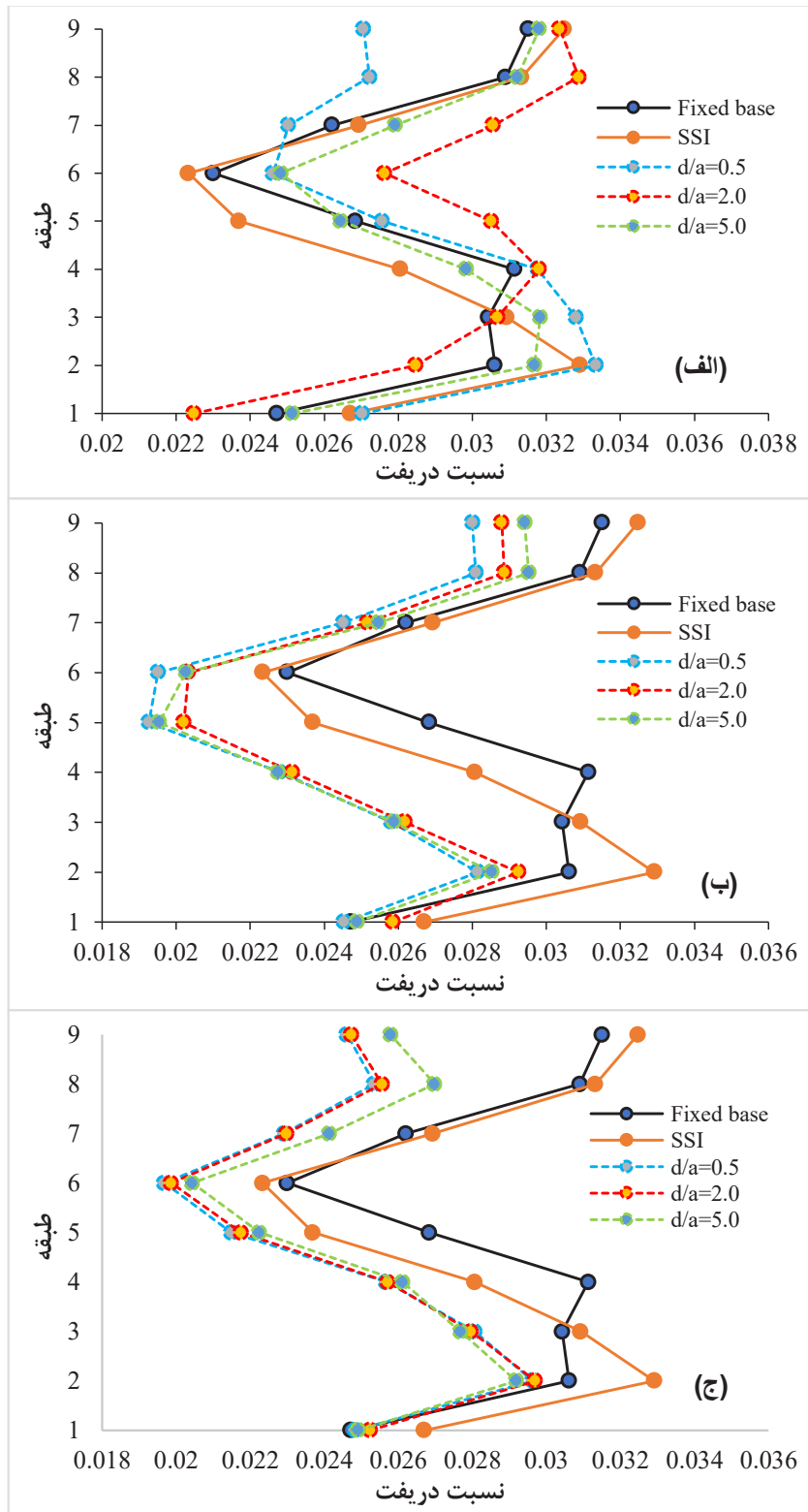
جدول ۹. بیشینه میانگین نسبت دریفت سازه ۳ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی

Table 9. Maximum of the average drift ratio of 3-story structure in different adjacency cases

بیشینه میانگین نسبت دریفت			حالت همسایگی دو سازه
$d_3$	$d_2$	$d_1$	
۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۸۱	۰/۰۲۹۱	۳ و ۳
۰/۰	-۳/۵۲	۰/۰	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۲/۰۴	-۵/۴۹	-۲/۰۴	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۲۴	۰/۰۳۲۵	۹ و ۳
۸/۶۲	۱۱/۳۲	۱۱/۶۴	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
۶/۴	۹/۰۶	۹/۳۶	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۳۰۲	۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۲۸	۲۰ و ۳
۳/۶۹	۸/۴۲	۱۲/۷۴	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
۱/۵۸	۶/۲۱	۱۰/۴۴	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)

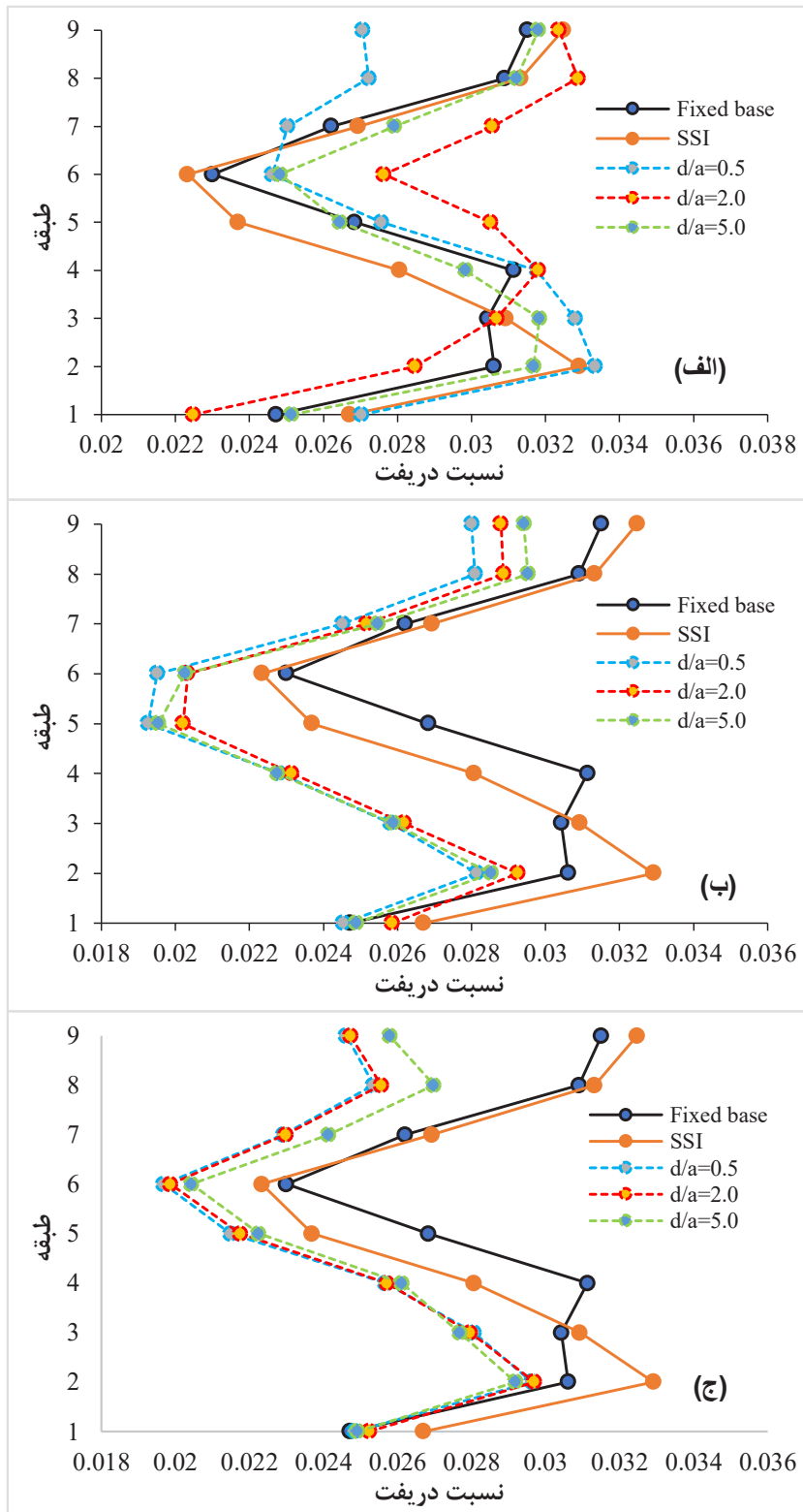
۲۰ طبقه، بیشینه میانگین نسبت دریفت سازه میان مرتبه ۹ طبقه را به طور قابل توجهی افزایش نداده است و در اغلب موارد نیز سبب کاهش این مقدار در طبقات می‌شوند. لذا مشاهده می‌گردد علی‌رغم بلندتر بودن سازه‌ی ۲۰ طبقه نسبت به سازه‌ی ۹ طبقه، اثرات افزایشی ناشی از وجود سازه‌ی بلندتر در مورد بیشینه‌ی میانگین نسبت دریفت سازه‌ی میان مرتبه وجود ندارند. عواملی چون محتوای فرکانسی زلزله‌ها، مشخصات سازه‌های مجاور هم و

تغییرات میانگین نسبت دریفت طبقات در سازه میان مرتبه ۹ طبقه در سه حالت مختلف همسایگی شامل مجاورت سازه‌های ۳ و ۹ طبقه، دو سازه ۹ طبقه مشابه و سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه در سه فاصله متفاوت در شکل ۱۴ نشان داده می‌شود. مقادیر مربوط به بیشینه میانگین نسبت دریفت سازه ۹ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی و در فواصل مختلف نیز در جدول ۱۰ ارائه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که وجود سازه‌های مجاور ۳، ۹ و



شکل ۱۳. تاثیر اندرکنش سازه - خاک - سازه بر میانگین نسبت دریفت‌های طبقات سازه ۳ طبقه در همسایگی سازه (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

13. SSSI effect on average drift ratios of stories in 3-story structure adjacent to (a) 3-story structure (b) 9-story structure (c) 20-story structure



شکل ۱۴. تاثیر اندرکنش سازه - خاک - سازه بر میانگین نسبت دریفت‌های طبقات سازه ۹ طبقه در همسایگی سازه (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

Fig.14. SSSI effect on average drift ratios of stories in 9-story structure adjacent to (a) 3-story structure (b) 9-story structure (c) 20-story structure

جدول ۱۰. بیشینه میانگین نسبت دررفت سازه ۹ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی

Table 10. Maximum of the average drift ratio of 9-story structure in different adjacency cases

بیشینه میانگین نسبت دررفت			حالت همسایگی دو سازه
$d_3$	$d_2$	$d_1$	
۰/۰۳۱۸	۰/۰۳۲۹	۰/۰۳۳۳	۹ و ۳
۱/۰۳	۴/۳۳	۵/۷۹	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۳/۲۸	-۰/۱۲	۱/۲۷	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۲۹۵	۰/۰۲۹۳	۰/۰۲۸۲	۹ و ۹
-۶/۳۱	-۷/۱۷	-۱۰/۶۵	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۱۰/۳۱	-۱۱/۱۳	-۱۴/۴۷	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۲۹۲	۰/۰۲۹۷	۰/۰۲۹۶	۲۰ و ۹
-۷/۳۸	-۵/۷۳	-۵/۹۶	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۱۱/۳۴	-۹/۷۶	-۹/۹۷	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)

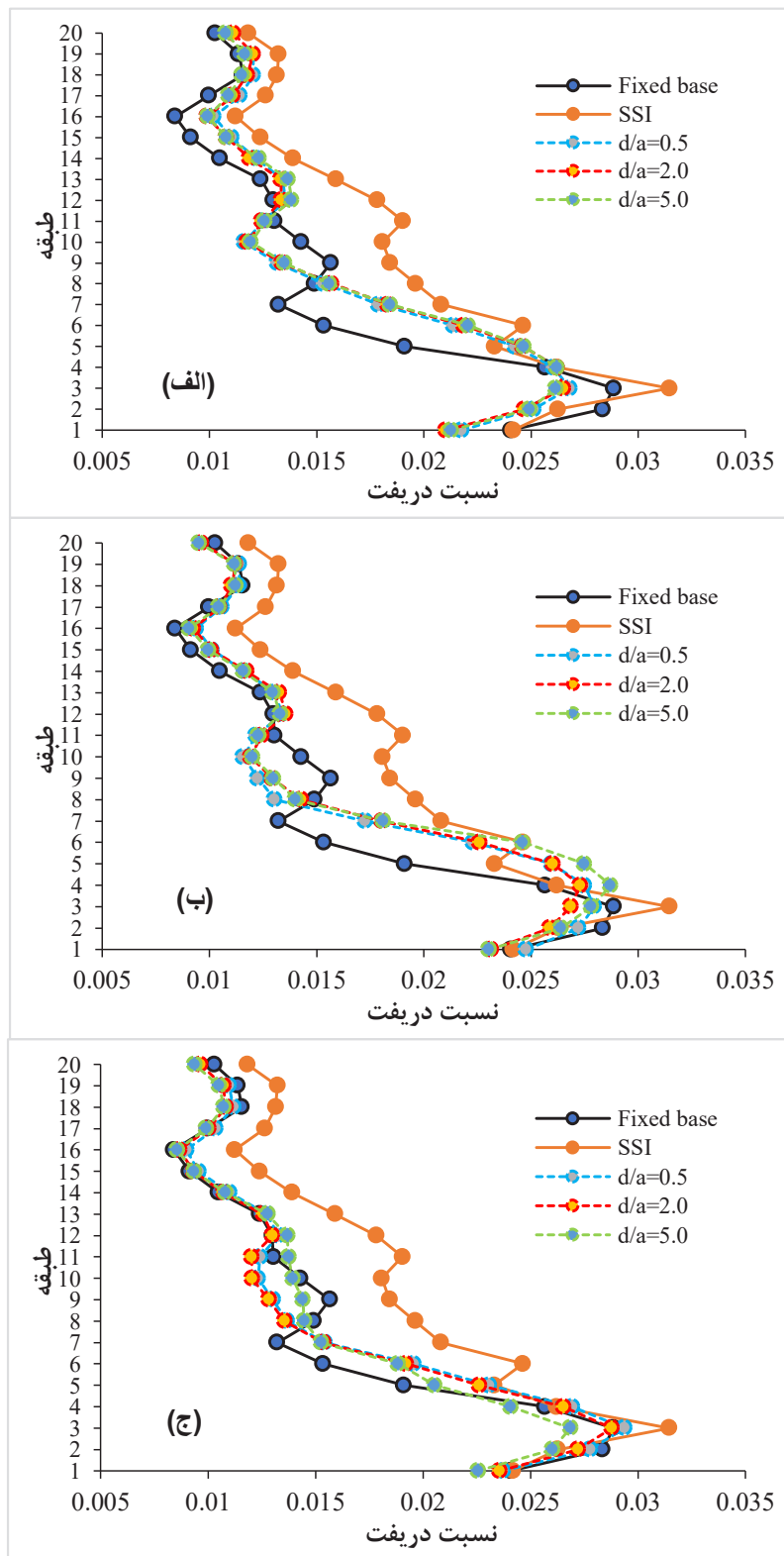
مربوط به میانگین بیشینه نسبت دررفت در سازه ۲۰ طبقه می‌توان نتیجه گرفت که در سازه بلندمرتبه ۲۰ طبقه بر خلاف آن‌چه در سازه کوتاه‌مرتبه ۳ طبقه مشاهده شد، اثرات افزایشی اندرکنش سازه و خاک بیش‌تر از تأثیرات اندرکنش سازه-خاک-سازه است.

۵-۲- برش پایه

برش پایه به مجموع نیروهای جانبی اعمال شده به سازه در تراز پایه‌ی آن گفته می‌شود. مقدار این برش و توزیع آن در طبقات، معیار اساسی طراحی سازه‌ها در بسیاری از آیین‌نامه‌ها می‌باشد. از این رو، پارامتر برش پایه می‌تواند به عنوان پارامتری موثر در ارزیابی کیفیت اثرگذاری انعطاف‌پذیری خاک و پی بر روی نیازهای لرزه‌ای سازه بررسی شود. در این مطالعه، در تمام مدل‌ها میانگین بیشینه برش مربوط به طبقه همکف به عنوان میانگین بیشینه برش پایه تحت ده زلزله‌ی بیان شده در جدول ۷ در حالت‌های مختلف شامل مدل سازه‌ها با حالت بستر صلب، حالت بستر انعطاف‌پذیر و اثر همزمان اندرکنش خاک و سازه با وجود سازه‌ی مجاور با یکدیگر مقایسه می‌شوند. علاوه بر مقادیر میانگین، مقدار برش پایه هر سه سازه در حالت‌های مختلف در هر زلزله نیز به طور جداگانه ارائه شده و بر روی محدوده‌ی تغییرات این مقدار بحث صورت می‌گیرد.

نیز عمق مدفونی پی‌های دو سازه نیز بر آن موثر هستند. همسایگی سازه ۹ طبقه با سازه ۹ طبقه مشابه منجر به بیش‌ترین مقدار کاهش در بیشینه میانگین نسبت دررفت در این سازه در نسبت فاصله و به مقدار ۱۴/۴۷ درصد می‌گردد.

در شکل ۱۵، میانگین نسبت دررفت طبقات در سازه بلندمرتبه ۲۰ طبقه در سه حالت مختلف همسایگی شامل مجاورت سازه‌های ۳ و ۲۰ طبقه، سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه و دو سازه‌های ۲۰ طبقه مشابه در سه فاصله مختلف نشان داده می‌شود. مقادیر مربوط به بیشینه میانگین نسبت دررفت سازه ۲۰ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی در فواصل مختلف نیز در جدول ۱۱ ارائه می‌شوند. همانطور که از نتایج مشاهده می‌گردد، وجود سازه‌های مجاور در همه‌ی حالات، میانگین نسبت دررفت سازه بلندمرتبه ۲۰ طبقه را نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه کاهش داده است. با این وجود، سازه کوتاه‌مرتبه ۳ طبقه در تمام فاصله‌ها، بیشینه میانگین نسبت دررفت سازه ۲۰ طبقه را بیش‌تر از دو سازه دیگر کاهش می‌دهد؛ به طوری که بیش‌ترین مقدار مربوط به کاهش بیشینه میانگین نسبت دررفت سازه ۲۰ طبقه نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه ۱۶/۷۱ درصد می‌باشد. در حالت همسایگی دو سازه مشابه ۲۰ طبقه نیز همانند سایر حالت‌های همسایگی دو سازه مشابه کاهش میانگین نسبت‌های دررفت مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج



شکل ۱۵. تاثیر اندرکنش سازه - خاک - سازه بر میانگین نسبت دریفت‌های طبقات سازه ۲۰ طبقه در همسایگی سازه (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

Fig. 15. SSSI effect on average drift ratios of stories in 20-story structure adjacent to (a) 3-story structure (b) 9-story structure (c) 20-story structure



جدول ۱۱. بیشینه میانگین نسبت دررفت سازه ۲۰ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی

Table 11. Maximum of the average drift ratio of 20-story structure in different adjacency cases

بیشینه میانگین نسبت دررفت			حالت همسایگی دو سازه
$d_3$	$d_2$	$d_1$	
۰/۰۲۶۲	۰/۰۲۶۵	۰/۰۲۶۸	۲۰ و ۳
-۹/۱۹	-۸/۱۴	-۷/۰۹	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۱۶/۷۱	-۱۵/۷۵	-۱۴/۷۸	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۲۸۷	۰/۰۲۷۳	۰/۰۲۷۹	۲۰ و ۹
-۰/۴۹	-۵/۳۸۴	-۳/۱۷	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۸/۷۳	-۱۳/۲۲	-۱۱/۱۸	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)
۰/۰۲۶۹	۰/۰۲۸۸	۰/۰۲۹۴	۲۰ و ۲۰
-۶/۹۶	-۰/۲۵۵	۱/۷۹	اختلاف نسبت به حالت بستر صلب (%)
-۱۴/۶۶	-۸/۵۱	-۶/۶۳	اختلاف نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه (%)

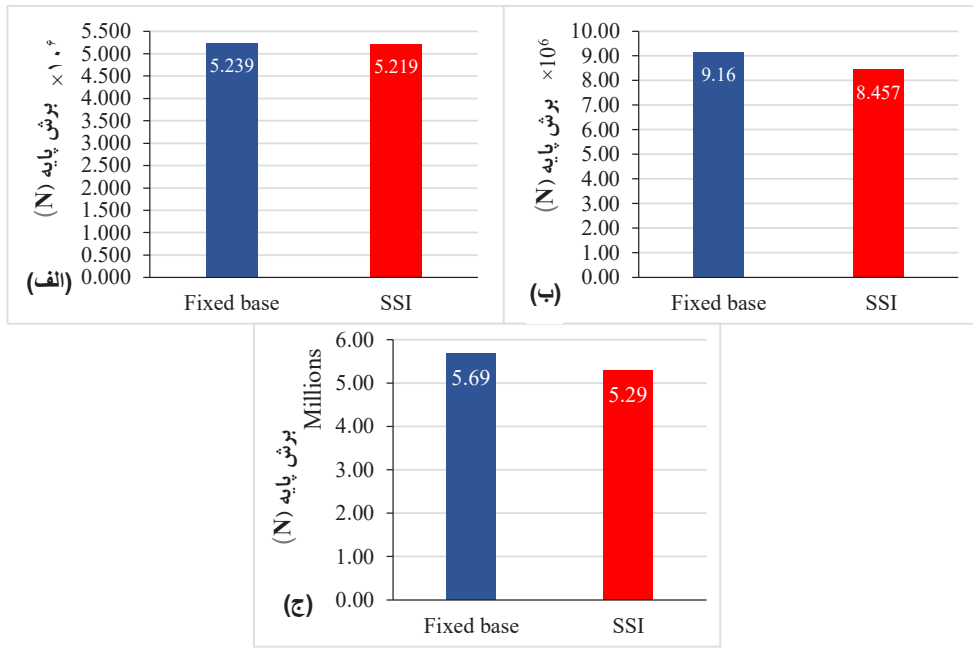
درصدی میانگین برش پایه سازه ۳ طبقه نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه می‌گردند.

میانگین برش پایه در سازه ۹ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل ۱۸ نشان داده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که وجود سازه‌ی کوتاه‌مرتبه در فاصله‌ی  $d_p$  منجر به افزایش ۲/۸۵ درصدی میانگین بیشینه برش پایه در سازه ۹ طبقه شده است. با این وجود، می‌توان گفت در سایر حالات روند مشاهده شده در مورد بیشینه میانگین دررفت در مورد برش پایه‌ی این سازه نیز صادق است و اندرکنش سازه-خاک- سازه در سازه میان‌مرتبه ۹ طبقه تاثیر افزایشی قابل توجهی ندارد. بیشترین مقدار کاهش پاسخ هم مربوط به حالت همسایگی دو سازه ۹ و ۲۰ طبقه در فاصله‌ی  $d_p$  و برابر با ۷/۵۲ می‌باشد.

میانگین برش پایه در سازه ۲۰ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل ۱۹ نشان داده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که وجود سازه‌های مجاور کوتاه‌تر ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب در فواصل  $d_1$ ،  $d_p$  و  $d_3$  منجر به افزایش ۲/۷، ۱/۷ و ۳ درصدی میانگین بیشینه برش پایه در سازه ۲۰ طبقه می‌شوند. با این وجود، در تمام حالت‌ها مقدار میانگین بیشینه برش پایه در تمام حالت‌ها نسبت به حالت بستر صلب کم‌تر است.

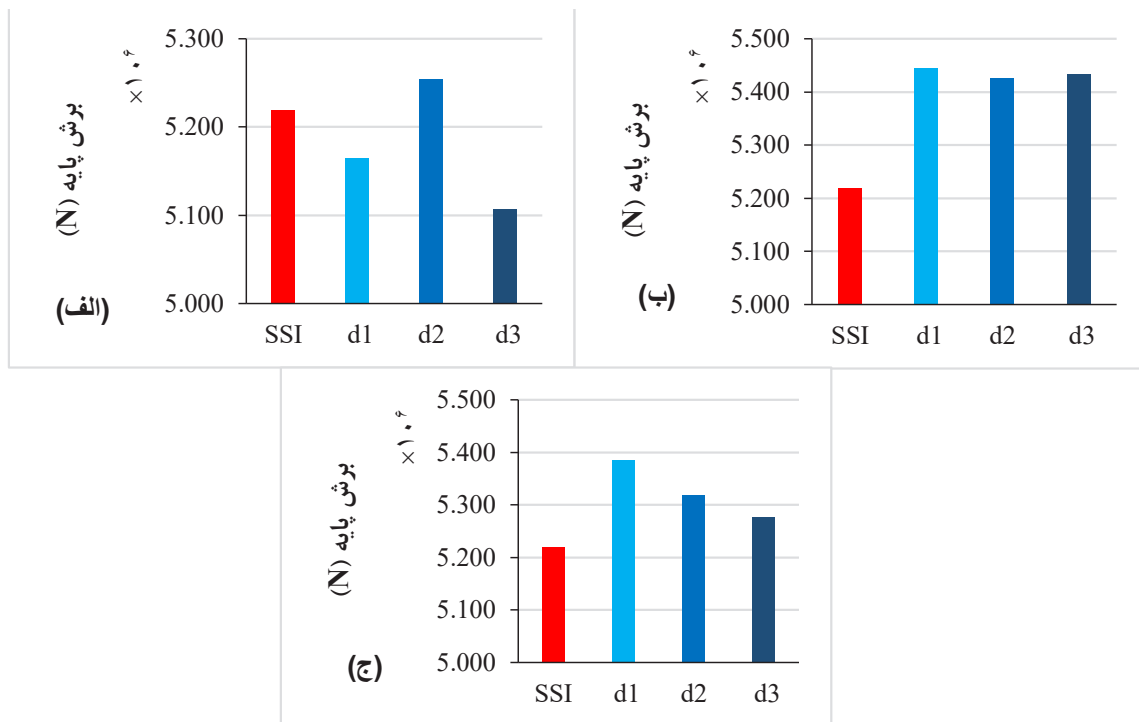
مقادیر میانگین بیشینه برش پایه سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه در دو حالت بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر در شکل ۱۶ به صورت نمودارهای میله‌ای نشان داده می‌شوند. در نظر گرفتن اندرکنش سازه و خاک در هر سازه منجر به کاهش مقدار میانگین برش پایه ساختمان‌ها نسبت به حالت بستر صلب می‌شود که مقدار این کاهش در سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب برابر ۰/۳۸، ۷/۶۶ و ۶/۹۹ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود تاثیر اندرکنش سازه و خاک بر میانگین برش پایه نیز در سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه بیش‌تر از سازه‌ی کوتاه‌مرتبه است. در نظر گرفتن رفتار الاستیک برای خاک می‌تواند منجر به کم‌تر شدن این اتلاف نسبت به واقعیت گردد. از این رو، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک می‌تواند اتلاف انرژی را به صورت واقعی‌تری بیان کند.

میانگین برش پایه در سازه ۳ طبقه در حالت‌های مختلف همسایگی به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل ۱۷ نشان داده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که وجود سازه ۳ طبقه مشابه تاثیر چندانی بر مقدار میانگین برش پایه سازه ۳ طبقه نمی‌گذارد و در فاصله‌ی  $d_p$  منجر به کاهش ۱/۴۳ درصدی برش پایه نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه می‌گردد. همانند روند مشاهده شده در بیشینه میانگین نسبت دررفت، وجود سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب منجر به حداکثر افزایش ۳/۹۳ و ۲/۸۷



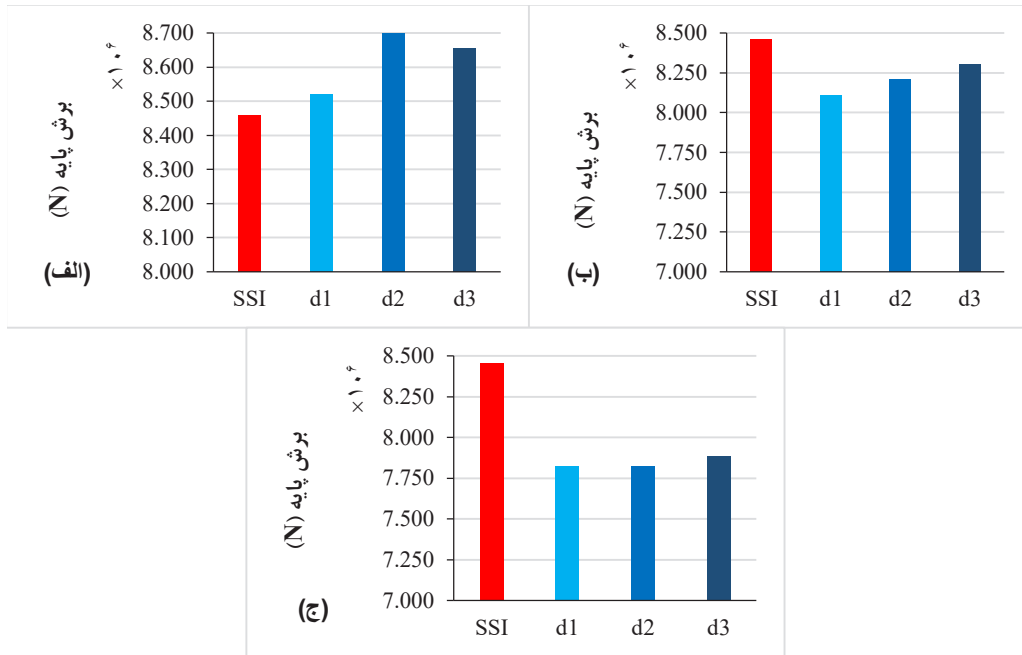
شکل ۱۶. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر میانگین برش پایه ساختمان (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

Fig.16. SSI effect on Average base shear of (a) 3-story (b) 9-story (c) 20-story structure



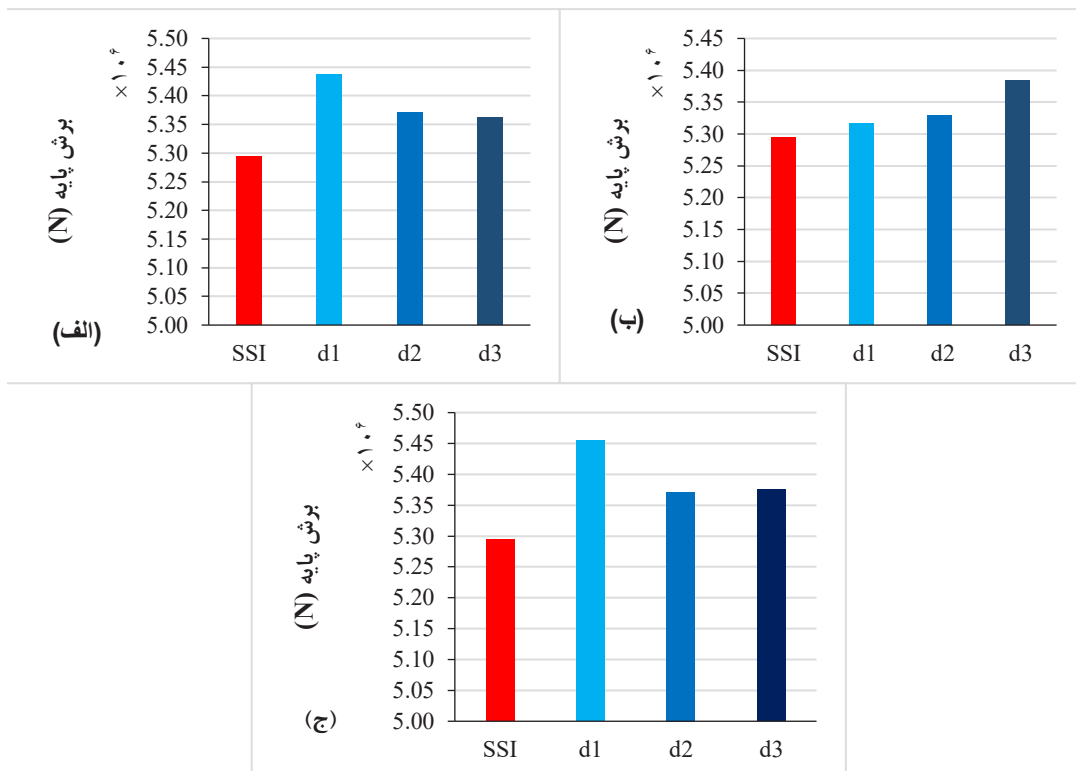
شکل ۱۷. میانگین برش پایه سازه ۳ طبقه در حالت همسایگی با سازه (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

Fig. 17. Average base shear of 3-story structure adjacent to (a) 3-story (b) 9-story (c) 20-story structure



شکل ۱۸. میانگین برش پایه سازه ۹ طبقه در حالت همسایگی با سازه (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

Fig.18. Average base shear of 9-story structure adjacent to (a) 3-story (b) 9-story (c) 20-story structure



شکل ۱۹. میانگین برش پایه سازه ۲۰ طبقه در حالت همسایگی با سازه (الف) ۳ طبقه (ب) ۹ طبقه (ج) ۲۰ طبقه

Fig.19. Average base shear of 20-story structure adjacent to (a) 3-story (b) 9-story (c) 20-story structure

## ۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه و اثرات همزمان این اندرکنش با وجود سازه‌ی مجاور بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی پرداخته است. برای این منظور، مدل‌های غیرخطی قاب انتهایی سه ساختمان پنج‌مترک ۳، ۹ و ۲۰ طبقه با در نظر گرفتن دو حالت بستر صلب و انعطاف‌پذیر و نیز شش حالت همسایگی مختلف در سه فاصله متفاوت و با فرض رفتار الاستیک برای خاک تحت اثر ده شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌های حوزه‌ی دور مورد تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قرار گرفتند. برای مدل‌سازی اندرکنش‌های خاک و سازه و سازه - خاک - سازه از روش زیرسازه بهبود یافته استفاده شد. بدین منظور، ماتریس‌های سختی سیستم‌های پی و خاک و پی-خاک-پی با تحلیل استاتیکی مدل دقیق اجزا محدود در نرم‌افزار آباکوس به دست آمدند. پس از آن، مدل‌های سیستم خاک و سازه و نیز سیستم سازه - خاک - سازه به منظور انجام تحلیل مقادیر ویژه و تاریخچه زمانی با ترکیب فنرهای انتقالی افقی و قائم و المان توسعه‌یافته در نرم‌افزار این‌سیس ساخته شدند.

نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی نشان دادند که اندرکنش خاک و سازه در سازه کوتاه‌مرتبه ۳ طبقه در خاک مورد مطالعه تاثیر افزایشی بر مقدار میانگین بیشینه نسبت دریافت نداشت. با این وجود، اثرات ناشی از آن به ترتیب منجر به افزایش ۴۶/۴ و ۹ درصدی میانگین بیشینه دریافت سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه ۹ و ۲۰ طبقه نسبت به حالت بستر صلب گشت. این موضوع نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بلندتر با توجه رفتار نرم‌تر این سازه‌ها از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. اثرات ناشی از این اندرکنش میانگین برش پایه در سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب برابر با ۳۸/۰، ۶۶/۷ و ۹۹/۶ درصد نسبت به حالت بستر صلب کاهش داد. با این وجود، اختلاف اندک مقدار کاهش را می‌توان ناشی از فرض رفتار ارتجاعی خاک دانست و انتظار می‌رود با مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک، مقدار این کاهش افزایش یابد. بررسی حالت‌های مختلف همسایگی میان این سه سازه نیز نشان داد که در میان تمام حالت‌ها، تنها وجود سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه ۹ و ۲۰ طبقه، بیشینه‌ی میانگین نسبت دریافت در سازه‌ی کوتاه‌مرتبه را در نزدیک‌ترین فاصله‌ی میان دو سازه به ترتیب ۳۶/۹ و ۴۴/۱۰ درصد و میانگین برش پایه‌ی این سازه را به ترتیب ۸۷/۲ و ۳۹/۳ درصد نسبت به حالت بستر انعطاف‌پذیر افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در خاک مورد بررسی، اثرات افزایشی وجود سازه‌ی مجاور میان‌مرتبه و بلندمرتبه بر

پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان کوتاه‌مرتبه نسبت به اثرات افزایشی اندرکنش خاک و سازه در خاک مورد مطالعه غالب بودند. اگرچه، انتظار می‌رود با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و نیز خاک‌های نرم‌تر مقدار اثرات مربوط به این اندرکنش افزایش یابد.

## منابع

- [1] JE. Luco, L. Contesse, Dynamic structure-soil-structure interaction, Bulletin of the Seismological Society of America, 63(4) (1973) 1289-1303.
- [2] TH. Lee, DA. Wesley, Soil-structure interaction of nuclear reactor structures considering through-soil coupling between adjacent structures, Nuclear engineering and design. 24(3) (1973) 374-387.
- [3] T. Kobori, R. Minai, Kusakabe, K., Dynamical characteristics of soil-structure cross-interaction system I, Bulletin of the Disaster Prevention, 22(204) (1973) 111-151.
- [4] HL. Wong, MD. Trifunac. Two-dimensional antiplane building-soil-building interaction for two or more buildings and for incident plane SH waves, Bulletin of the Seismological Society of America, 6(6) (1975), 1863-1885.
- [5] H. Murakami, JE. Luco, Seismic response of a periodic array of structures, Journal of the Engineering Mechanics Division, 103(5) (1977) 965-977.
- [6] JS. Mulliken, DL. Karabalis, Discrete model for foundation-soil-foundation interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 7 (1995) 501- 508.
- [7] JS. Mulliken, DL. Karabalis, Discrete model for dynamic through-the-soil coupling of 3-D foundations and structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27(7) (1998) 687-710.
- [8] S. Nakagawa, et al., Forced vibration tests and simulation analyses of a nuclear reactor building, Nuclear Engineering and Design, 179(2) (1998) 145-156.
- [9] NA. Alexander, E. Ibraim, Aldaikh H., A simple discrete model for interaction of adjacent buildings during earthquakes, Computers & Structures, 124 (2013) 1-10.
- [10] C. Roy, S. Bolourchi, Eggers D., Significance of

- [16] H. Cilsalar, and C. C. Cadir, Seismic performance evaluation of adjacent buildings with consideration of improved soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140 (2021) 106464.
- [17] Y. Ohtori, R.E. Christenson, Spencer Jr, B.F. and Dyke, S.J., Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 366-385.
- [18] ISIR 2800, Seismic resistant design of buildings – Code of practice, Standards and Industrial Research of Iran, 2014 (in Persian).
- [19] W. Ramberg, W. R. Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC. (1943).
- [20] A. A. Tasnimi, A. Mohebkah, Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches, *Engineering Structures*, 33(4) (2011) 968-980.
- [21] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE/SEI 2016;7–10. Reston, VA.
- structure–soil–structure interaction for closely spaced structures, *Nuclear Engineering and Design*, 295 (2015) 680-687.
- [11] B. Madani, F. Behnamfar, Riahi HT., Dynamic response of structures subjected to pounding and structure– soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 78 (2015) 46-60.
- [12] H. Aldaikh, NA. Alexander, et al., Shake table testing of the dynamic interaction between two and three adjacent buildings (SSSI), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89 (2016) 219-232.
- [13] J. Liang, B. Han, Todorovska ML., Trifunac MD., 2D dynamic structure-soil-structure interaction for twin buildings in layered half-space I: Incident SH-waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, (2017) 172-94.
- [14] F. Vicencio, NA. Alexander, Dynamic interaction between adjacent building through nonlinear soil during earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 108 (2018) 130-141.
- [15] C. Bolisetti, and A.S. Whittaker, Numerical investigations of structure-soil-structure interaction in buildings, *Engineering Structures*, 215 (2020) 110709.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. H. Fatollahpour, S. A. A. Arjmandi, E. Tafakori, *Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) effects on seismic response of low-, mid- and high-rise steel moment resisting frame structures*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 605-630.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19002.7024



