



## An investigating into the effect of various modeling parameters on the behavior of special steel moment frames

M. Zare Aghbolagh, H.R. Shokrgozar\*

Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

**ABSTRACT:** In this paper, the effect of various modeling parameters such as beam-column connections, soil and shallow foundation types are studied to assess the seismic response of steel moment frames. For this purpose, five-story special steel moment frames with two different soil types (II and IV) were considered. The footing and strip shallow foundations were designed for these buildings, with a safety factor of three. Prequalified bolted flange plate connections were used in these buildings. The finite element models were developed using OpenSees software considering soil – foundation – structure interaction. The seismic performance of SMFs was evaluated using nonlinear time history analyses, through seven far-fault ground motions. Nonlinear behavior of soil was modeled by nonlinear Winkler springs. The numerical results showed that in the models that considered beam-column connections, SFSDI and soil type IV, the maximum inter-story drift was more, compared to models without connections and with fixed based conditions. The maximum base-shear force of structures in the mentioned models was reduced. In models, that structures rested on soil type II, maximum values of these two parameters were diminished. The effect of foundation type in models resting on the soil type IV was more than models with soil type II. Generally, connections, foundation type and soil-foundation-structure interactions have a great influence on the nonlinear responses of steel moment frames.

### Review History:

Received: 6/28/2018

Revised: 7/26/2018

Accepted: 8/5/2018

Available Online: 8/14/2018

### Keywords:

Special steel moment frame

Soil – foundation – structure interaction

Fixed connections

Soil and foundation type

Time history dynamic analysis

## 1. INTRODUCTION

Accurate structural analysis against the dynamic loads, especially earthquake, has significant importance. The nonlinear behavior of ground, in soft or relatively soft soils, produces structure responses completely different from the structures with fixed-based or free-field motion. The term “free-field” represents the movements that they are not affected by the structural vibration or waves scattering around the foundation. So, the process, in which the response of soil is influenced by the structure responses and the dynamic response of structures is also affected by the deformation in the soil of sub-layers, is known as soil-structure interaction. Two kinematic and inertial interactions are considered in the dynamic soil-structure interactions. Kinematic interaction results from the presence of stiff foundation elements on or in soil, which causes motions at the foundation to deviate from free-field motions. The inertial interaction is the result of the mass of the structure and movement of them during the vibrations. Inertial interaction produces base shear, moment and torsion forces at the structures [1].

In majorities of recent researches, the simultaneous effect of beam-column connections, shallow foundations and soil types on the structural responses have not been investigated. The procedures regulated in some codes do not elaborate on different types of foundations. Moreover, an equivalent

\*Corresponding author's email: h\_rshokrgozar@uma.ac.ir

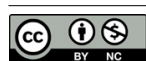
linear behavior for the subsoil has also been adopted in these codes without directly capturing any soil nonlinearity. So, in this study, the impact of beam-column connections, the variation of soil and foundation types, and also considered soil–foundation–structure interaction, are studied to assess the seismic behaviors of special steel moment-resisting frame buildings. For this purpose, the five-stories steel moment-resisting frame was modeled in six various conditions with two different soil types; as follows:

- Fixed-based and without beam-column connections effect.
- Fixed-based and with beam-column connections effect.
- Flexible base with footing foundation and considering beam-column connections.
- Flexible base with footing foundation and without considering beam-column connections.
- Flexible base with strip foundation and considering beam-column connections.
- Flexible base with strip foundation and without considering beam-column connections.

The nonlinear dynamic time-history analyses using seven far-fault ground motions were performed.

## 2. DETAILS OF MODELS

In this study, five-stories buildings located on the soil types II and IV [2] were considered for evaluating the effect of



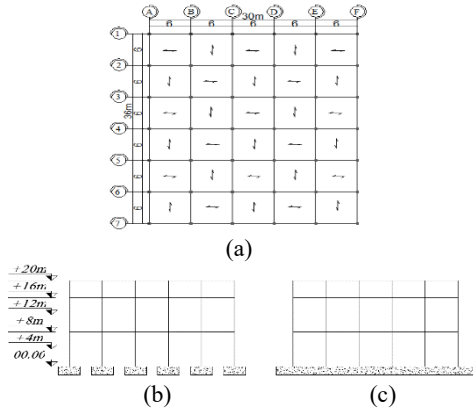


Fig. 1. (a) Plan, (b) sections of building with footing and (c) strip foundations

soil and foundations on the seismic behavior of special steel moment-resisting frames. Plan and the view of the assumed buildings are shown in Figure 1. The buildings were designed according to the Iranian National Building Code [3] and all seismic provisions were included. BFP prequalified moment connections were designed to connect the beams and columns based on the mentioned code (Figure 2). The structures were assumed to be rested on square isolated footing and strip foundations with a safety factor of 3. The ultimate bearing capacity of shallow foundations, located on the soil types IV and II, have been calculated by Meyerhof equations and SPT [4] results, respectively.

### 3. NUMERICAL MODELING WITH OPENSEES

In this study, the numerical modeling of structures was performed using OpenSees software. The structural members are modeled to behave nonlinearly. The beams and columns were modeled as nonlinear beam-column elements, with Steel01 materials. The impact of rigid beam-column connections has been included in the modeling of frames. Separate nodes were introduced to model connections at the end of beams and columns. Then, two nodes with the same coordinates have been joined with ZeroLength element as a RotSpring2D. Uniaxial hysteretic material was used for the connections. At this study, moment rotation relationship of connections with flange plates has been utilized to define hysteretic behavior of connection's material as [5]:

$$M = \frac{k\phi}{[1 + (k\phi / M_p)^{0.5}]^{1/0.5}} \quad (1)$$

In which the value of  $k$  and  $M_p$  is obtained as follows [5]:

$$k = 0.5 E b t h^2 / l \quad (2)$$

$$M_p = b t h \sigma_s \quad (3)$$

Beam on nonlinear Winkler foundation (BNWF) model was used for modeling of nonlinear behavior of soil. In the BNWF model, the two-dimensional shallow foundation model

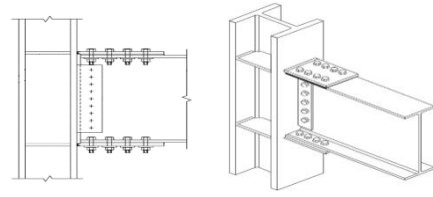


Fig. 2. Bolted flange plate moment connection [3]

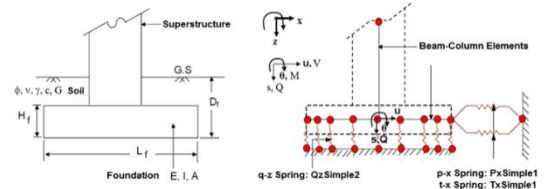


Fig. 3. Schematic diagram of the BNWF model [6].

is modeled as a flexible, elastic beam-column element with three degree-of-freedom per node (Figure 3). These elements were supported by a number of discrete, nonlinear Winkler springs that leads to forces and deformations in horizontal, vertical, and rotational directions. Each nonlinear Winkler spring was independent of other springs and was considered as one-dimensional ZeroLength element in the framework of OpenSees. The q-x springs are used to simulate the vertical and rotational resistance of the footing, while two springs, namely p-x and t-x, are placed horizontally to capture the passive and sliding resistance of the footing, respectively [6]. Horizontal and vertical stiffness specifications of springs are calculated using Gazetas [7] equations.

### 4. RESULTS AND DISCUSSION

Nonlinear time history analysis was performed using seven ground motion records; therefore, the PEER's database of strong ground motions was used for choosing them. The selected ground motions are far-fault records, their central distance from the station was more than 20 km and they were recorded on bedrock. An overall assessment of structural damages showed that ground condition had significant effects on the distribution of destruction; furthermore, it is one of the influential factors in variation of input earthquake parameters such as frequency and intensity. In this study, NERA [8] software was used for investigating the mentioned effects in the models with soil.

The results of these analyses are shown as maximum inter-story drift and maximum story-shear forces diagrams for five-stories models with footing and strip foundations resting on the soil types IV and II in Figures 4 to 7. Four conditions were assumed for evaluating the seismic behavior of this frame including (a): fixed-based without connections, (b): fixed-based with connections, (c): flexible base with connections and (d): flexible base without connections influences, that they are discussed in this section.

As it was observed from the given data in Figures 4 and 5, the maximum inter-story drift of frames with fixed-based and

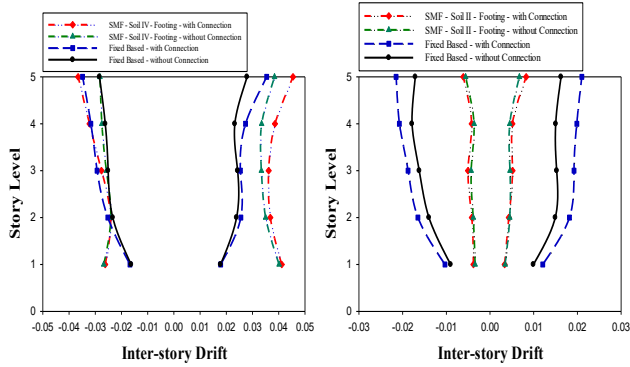


Fig. 4. The maximum inter-story drift with footing foundation resting on the soil types IV and II

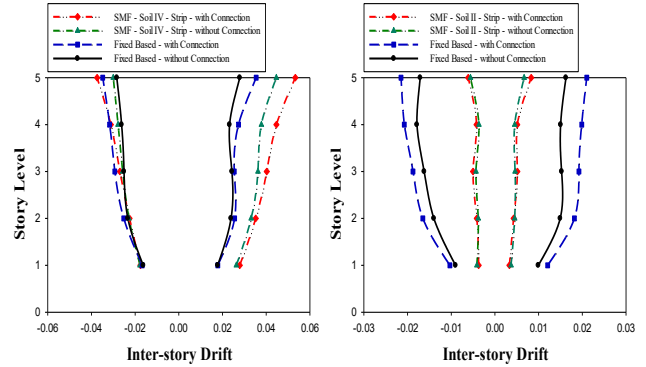


Fig. 5. The maximum inter-story drift with strip foundation resting on the soil types IV and II

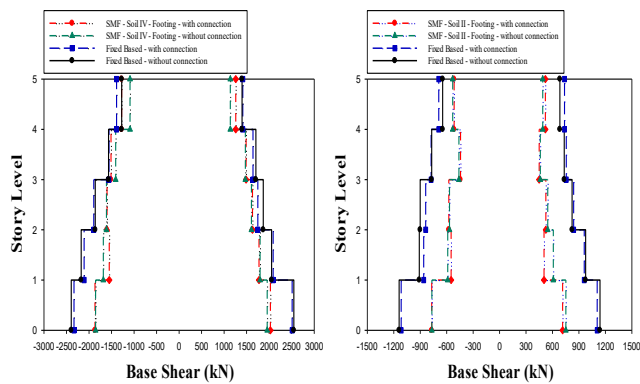


Fig. 6. The maximum story-shear forces with footing foundation resting on the soil types IV and II

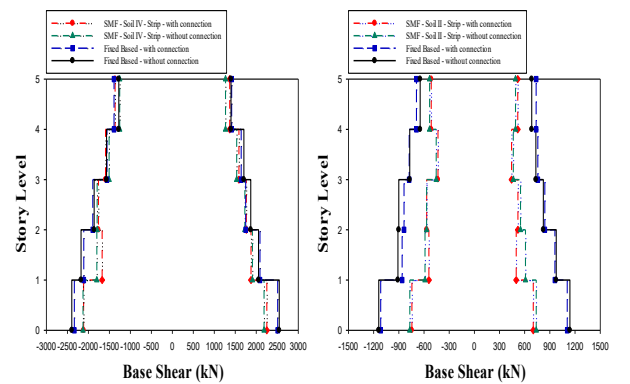


Fig. 7. The maximum story-shear forces with strip foundation resting on the soil types IV and II

with connection, resting on the soil type IV and II, increased by 24.67% and 20.40% compared to models without the impacts of connections and with fixed-based, respectively. The maximum inter-story drift in the models with footing and strip foundation and without connections which were located on the soil type IV, enhance by 41.34% and 57.16% compared to models with fixed-based, respectively. But, this parameter decreases 63% in models resting on the soil type II. It can be also seen that, when the connections and flexible base are considered, the maximum inter-story drift of structures with footing and strip foundations located on the soil type IV enhanced up to 60.01% and 87.85% to models without considering effects of them, respectively. In contrast, in models rested on the soil type II, this parameter was decreased as much as 54%.

According to Figures 6 and 7, the maximum story-shear forces of models with fixed-based and with connection, resting on the soil type IV and II, diminished 1.49% and 2.86% relative to models without connections. The maximum base shear in the models with footing and strip foundation and without connections resting on the soil type IV, decreased by 23.23% and 14.23% compare to models with fixed-based, respectively. But, this parameter decreased by 32% in the models resting on the soil type II. As well as, when the connections and flexible

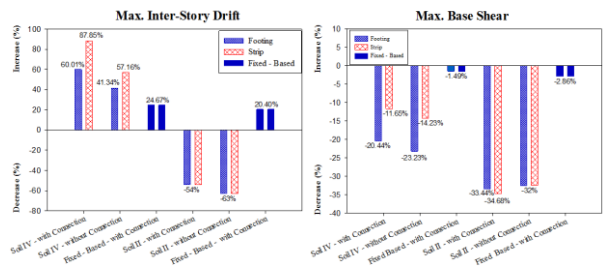


Fig. 8. The percentage of variations at the maximum inter-story drift and maximum story-shear forces

base are considered, the maximum story-shear forces of models with footing and strip foundations situated on the soil type IV decreased as much as 20.44% and 11.65% compared to models without considering effects of them, respectively. Furthermore, in models with structures rested on the soil type II, this parameter was decreased as much as 33.4% and 34.68%, respectively.

The percentage of maximum inter-story drift and maximum story-shear forces variations are illustrated in Figure 8 for models including connections and soil-foundation-

structure interaction, models with one component like soil or connections to models without them. The maximum story-shear forces of models resting on the soil type IV with footing foundation had the most reduction percentage, and the maximum inter-story drift of models with strip foundation resting on the soil type IV has the most enhanced. But, considering these effects leads to the same decrease in the models situated on soil type II.

## 5. CONCLUSIONS

In this paper, the influence of two prominent parameters such as beam-column connections and soil-foundation-structure interaction on the seismic behavior of five-stories steel moment-resistance frames with different soil and foundation types was investigated. The following specific findings of this research were obtained:

1- Modeling of connections in frames with fixed-based led to the enhancement of maximum inter-story drift and reduction maximum story-shear forces.

2- In models with footing and strip foundation, rested on the soil type IV, the maximum inter-story drift was observed to increase, but the maximum story-shear force is decreased when connections and flexible base were considered, compared to models with fixed-based conditions and without connections. But, in models rested on the soil type II, considering the above parameters caused reduction at structure responses.

3- The foundation type had a significant impact on the

maximum inter-story drift and maximum story-shear forces of structures located on the soil type IV, but it did not have any influence on responses of structures located on the soil type II.

## REFERENCES

- [1] T.K. Datta, Seismic analysis of structures, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Building and Housing Research Center, Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800 (4th edition), (2015).
- [3] Central Research and Building House, Iranian National Building Code, part 10, steel structures design, (2013).
- [4] J. Bowles, Foundation analysis and design: McGraw-Hill Book Company, (1996).
- [5] G.-Q. Li, J.-J. Li, Advanced analysis and design of steel frames, John Wiley & Sons, 2007.
- [6] P. Raychowdhury, Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures, University of California, San Diego, 2008.
- [7] G. Gazetas, Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 29(2) (1992) A126.
- [8] J. Bardet, T. Tobita, NERA, A computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits. Univ. of Southern California, (2001).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Zare Aghblagha, H.R. Shokrgozar, An investigating into the effect of various modeling parameters on the behavior of special steel moment frames, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 71-74.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14671.5713](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14671.5713)





## بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مدل سازی بر رفتار قاب های خمشی فولادی ویژه

مریم زارع آقبلاغ، حامد رحمن شکرگزار\*

دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۰۷  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۰۴  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۵-۲۳

### کلمات کلیدی:

قاب خمشی فولادی ویژه  
اندرکنش خاک - فونداسیون -  
سازه  
اتصالات گیردار، نوع خاک و  
فونداسیون  
تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی

**خلاصه:** در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف در جزئیات مدل سازی از قبیل اتصالات تیر - ستون، نوع خاک و فونداسیون بر پاسخ لرزه ای قاب های خمشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ساختمان پنج طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه واقع بر دو نوع خاک متفاوت (II و IV) در نظر گرفته شده است. دو نوع فونداسیون سطحی، نواری و منفرد، برای این ساختمان با ضریب اطمینان سه در ظرفیت باربری طراحی گردیده است. برای مدل سازی اتصالات تیر - ستون، اتصالات گیردار از پیش تأیید شده ی پیچی به کمک ورق های روسری و زیرسری بکار رفته است. مدل سازی اجزا محدود حالت های مفروض توسط نرم افزار OpenSees صورت گرفته و از تحلیل های دینامیکی غیرخطی توسط هفت شتاب نگاشت زلزله جهت بدست آوردن پاسخ ها استفاده شده است. در مدل هایی که اثر اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه برای آن ها لحاظ گردیده است، رفتار غیرخطی خاک به صورت فنرهای غیرخطی وینکلر مدل سازی شده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که با لحاظ اثر اتصالات و خاک در مدل های واقع بر خاک نوع IV، حداکثر تغییرمکان نسبی نسبت به مدل های بدون لحاظ آن ها افزایش و حداکثر برش پایه کاهش می یابد و در مدل های واقع بر خاک نوع II، حداکثر مقدار این پارامترها کاهش می یابد. همچنین تأثیر تغییر نوع فونداسیون در مدل های واقع بر خاک نوع IV بیشتر از مدل های واقع بر خاک نوع II است. بنابراین لحاظ اتصالات تیر - ستون، نوع فونداسیون و اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در مدل سازی تأثیر بسزایی بر پاسخ های غیرخطی قاب های خمشی فولادی دارد.

### ۱- مقدمه

سازه ای یا پراکندگی امواج در اطراف فونداسیون قرار نمی گیرند، این فرض در مورد سازه های ساخته شده بر سنگ بستر یا زمین سخت صحیح است. اما در حالتی که سازه بر روی یک لایه خاک نرم قرار گرفته باشد، پاسخی کاملاً متفاوت خواهد داشت. از یک طرف بسته به هندسه ی فونداسیون و نحوه ی انتشار امواج و خاک زیرسازه، حرکت فونداسیون متأثر از پاسخ زمین بوده و لذا حرکت پای سازه با حرکت میدان آزاد متفاوت خواهد بود. از طرف دیگر، پاسخ دینامیکی سازه باعث تغییرشکل خاک زیرسازه می شود. این روند که در آن پاسخ

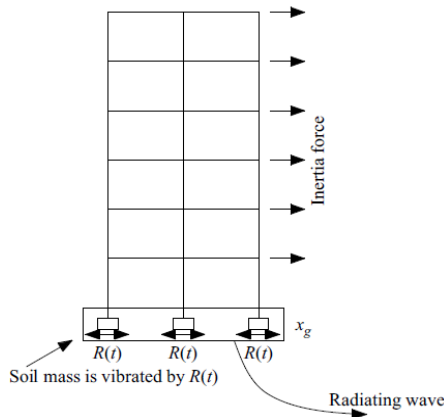
تحلیل سازه ها در برابر نیروهای دینامیکی به خصوص زلزله از اهمیت فراوانی برخوردار بوده و از دیرباز مورد توجه محققان قرار گرفته است. در حالت کلاسیک تحلیل سازه ها فرض بر این است که حرکت اعمال شده به پای سازه، همان حرکت میدان آزاد زمین است. اصطلاح میدان آزاد بیانگر حرکتی است که تحت تأثیر ارتعاشات

### 1 Free-field motion

\*نویسنده عهده دار مکاتبات: h\_rshokrgozar@uma.ac.ir







شکل ۱. اثرات اندرکنش اینرسی [۱]  
Fig. 1. Inertial interaction effects

خاک زیرسازه تحت تأثیر حرکت سازه و پاسخ سازه، تحت تأثیر حرکت لایه ی خاک قرار می گیرد، اندرکنش خاک - سازه نامیده می شود. در این حالت، یک مؤلفه ی دورانی ناشی از انعطاف پذیری خاک به حرکت های افقی و قائم فونداسیون اضافه شده و منجر به ایجاد حرکت گهواره ای می گردد. وجود این مؤلفه ی دورانی، برای پاسخ سازه های بلند می تواند مهم باشد. همچنین در حالت سازه با پای شکل پذیر قسمتی از انرژی ارتعاشی سازه می تواند با انتقال به خاک زیرسازه، بر اثر میرایی حاصل از انتشار موج و مصالح خاک تلف شود. یعنی با در نظر گرفتن اندرکنش، امواج متشعشع از سازه در چرخه های مختلف بازتاب، باعث ایجاد تنش و تغییر شکل در خاک می شود و در واقع انرژی در داخل سازه به دام نمی افتد و چرخه بسته ای وجود نداشته بلکه با انتقال انرژی از سازه به خاک مواجه خواهد بود.

لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در شرایط مختلف می تواند برخی از پارامترها از قبیل میرایی، زمان تناوب و پاسخ سازه را تحت تأثیر قرار دهد و منجر به افزایش تعداد درجات آزادی و در نتیجه تغییر ویژگی های دینامیکی آن گردد. میرایی در محیط انعطاف پذیر را می توان به دو بخش میرایی تشعشعی (هندسی) و میرایی هیستریزس خاک تقسیم بندی نمود. میرایی تشعشعی تابعی از چگالی خاک، مدول ارتجاعی زمین، ضریب پواسون خاک، جرم واحد سطح سازه و فرکانس زاویه ای طبیعی است که برای مودهای بالاتر دچار کاهش می گردد. شایان ذکر است میرایی تشعشعی با نرم تر شدن خاک و عمیق تر شدن محیط فراگیر افزایش می یابد. میرایی هیستریزس خاک در اثر تغییر شکل های غیرارتجاعی زمین در مجاورت فونداسیون صورت می گیرد و هر چه شدت زلزله بیشتر باشد بسته به نوع خاک این میرایی نیز افزایش می یابد [۱].

اندرکنش دینامیکی خاک - سازه شامل دو مکانیزم اندرکنشی بین خاک، فونداسیون و سازه است که به صورت اندرکنش سینماتیکی و اینرسی بیان می گردد. اندرکنش اینرسی ناشی از نیروهای اینرسی ایجاد شده در سازه در اثر حرکت جرم های سازه ای در طول ارتعاش است (شکل ۱). اندرکنش سینماتیکی ناشی از وجود المان های سخت فونداسیون واقع بر روی خاک است که منجر به ایجاد اختلاف در حرکت های فونداسیون نسبت به حرکت میدان آزاد می گردد [۱].

اخیرا محققان بسیاری تأثیر اندرکنش خاک - سازه را بر پاسخ

لرزه ای ساختمان ها مورد بررسی قرار داده اند. رایچودهوری [۲]، عملکرد سازه های تحت بارگذاری لرزه ای را با استفاده از مدل فونداسیون های سطحی واقع بر بستر غیرخطی وینکلر<sup>۱</sup> بررسی نمود. در این پژوهش، سطح مشترک خاک - فونداسیون با استفاده از المان های غیرخطی وینکلر مدل سازی گردید. اثر اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه (SFSI) بر سیستم دارای دیوار برشی - فونداسیون سطحی و سیستم دیوار برشی - قاب - فونداسیون های سطحی ارزیابی شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که در میان تمام پارامترهای ورودی مربوط به مدل BNWF، ظرفیت کششی تأثیر قابل ملاحظه ای بر تقاضاهای نیرو و جابه جایی فونداسیون سطحی دارد. با توجه به مدل فرض شده در این تحقیق مشاهده شد که تقاضای نیرو برای یک سازه دارای سیستم دیوار برشی - فونداسیون با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. برای سازه های دارای دیوار برشی سخت تر و کوتاه تر اتلاف انرژی در حالت لغزشی غالب است، در حالی که برای سازه های بلندتر و با زمان تناوب بالا، اتلاف انرژی در حالت گهواره ای دارای سهم نسبتاً بزرگتری است. رایچودهوری [۳]، پاسخ لرزه ای ساختمان های دارای قاب خمشی فولادی کوتاه را با لحاظ اثر اندرکنش غیرخطی خاک - سازه ارزیابی نمود. برای این منظور از مدل تیر واقع بر بستر غیرخطی وینکلر استفاده کرد. نتایج بدست آمده نشان دادند که با لحاظ بستر غیرخطی، تقاضای نیرو و شکل پذیری به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد، بنابراین عملکرد فونداسیون تأثیر بسزایی

1 Beam on Nonlinear Winkler Foundation (BNWF)

نوع فونداسیون سطحی و نوع خاک بر پاسخ های سازه مورد توجه واقع نشده است. همچنین در آیین نامه های ATC40 [۸]، BSSC [۹]، ASCE7-10 [۱۰] تأثیر تغییر نوع و اندازه ی فونداسیون بر پاسخ لرزه ای سازه ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این آیین نامه ها خاک زیر فونداسیون که به صورت بسیار ساده و با یک سری فنر و میراگر و روسازه به صورت یک نوسانگر یک درجه آزادی مدل سازی شده اند، استفاده شده است. همچنین رفتار خاک در این آیین نامه ها به صورت خطی معادل در نظر گرفته شده و از غیرخطی بودن خاک کاملاً صرف نظر گردیده است. بنابراین هدف عمده ی این مقاله، بررسی رفتار لرزه ای ساختمان های دارای سیستم سازه ای قاب خمشی ویژه با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون، تغییر نوع خاک و نوع فونداسیون با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه است. در این مقاله، قاب خمشی فولادی ویژه در شش حالت مختلف با فرض دو نوع خاک متفاوت مدل سازی شده است که در قالب موارد ذیل ارائه می گردند:

۱- بستر صلب و بدون لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون

۲- بستر صلب و با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون

۳- بستر انعطاف پذیر با فونداسیون منفرد و با لحاظ اثر اتصالات

تیر - ستون

۴- بستر انعطاف پذیر با فونداسیون منفرد و بدون لحاظ اثر

اتصالات تیر - ستون

۵- بستر انعطاف پذیر با فونداسیون نواری و با لحاظ اثر اتصالات

تیر - ستون

۶- بستر انعطاف پذیر با فونداسیون نواری و بدون لحاظ اثر

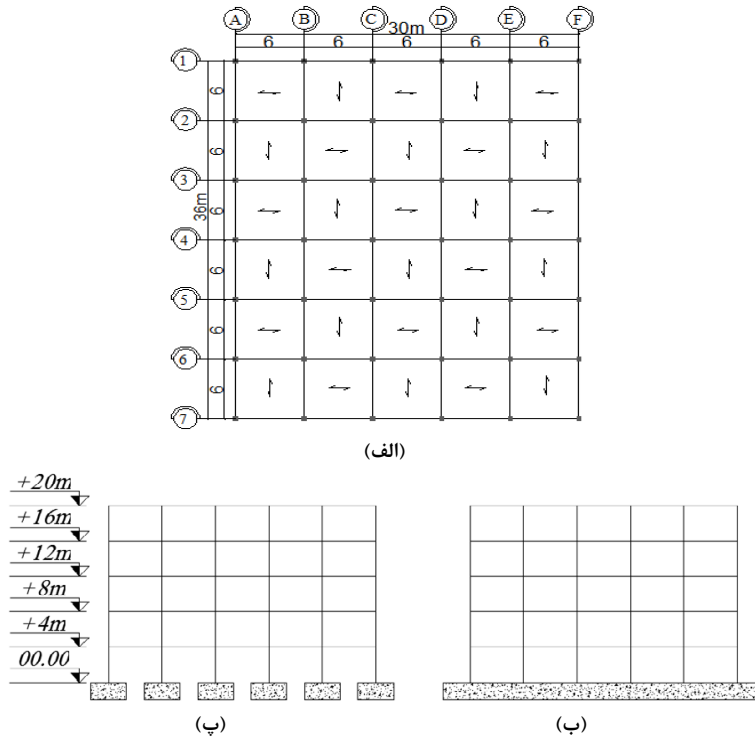
اتصالات تیر - ستون

جهت ارزیابی رفتار لرزه ای سازه ها از تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی غیرخطی تحت هفت شتاب نگاشت زلزله ی حوزه ی دور استفاده گردیده است.

## ۲- جزئیات مدل انتخابی

در این مقاله، به منظور بررسی تأثیر مدل سازی اتصالات تیر - ستون، خاک و نوع فونداسیون بر رفتار لرزه ای قاب خمشی فولادی، یک ساختمان با شکل پذیری ویژه واقع بر خاک نوع II و IV در نظر گرفته شده است. شکل ۲، پلان و نمای این ساختمان (در راستای محور ۴) را نشان می دهد. مشخصات خاک نوع II و IV بکار رفته در

در پاسخ های بدست آمده دارد. حکم آبدی و فتاحی [۴]، تأثیر نوع فونداسیون را بر پاسخ لرزه ای ساختمان ها با لحاظ اندرکنش خاک - سازه ارزیابی کردند. برای این منظور یک سازه ی ۱۵ طبقه با چهار نوع فونداسیون متفاوت از قبیل تکیه گاه صلب، فونداسیون سطحی، شمع، شمع - رادیه و شمع اصطکاکی واقع در خاک نرم به صورت سه بعدی مدل سازی گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که نوع فونداسیون یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر پاسخ لرزه ای ساختمان ها با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه است، بنابراین به منظور اطمینان از طراحی ایمن و مقرون به صرفه، نوع فونداسیون باید با دقت بسیار بالایی انتخاب گردد. تحقیقی و اربابی [۵]، پاسخ ساختمان های فولادی را با لحاظ اندرکنش غیرخطی خاک - سازه مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، ساختمان های فولادی در سه ارتفاع متفاوت و با دو نوع سیستم باربر جانبی قاب خمشی و مهاربندی در نظر گرفته شدند. برای مدل سازی سیستم خاک و فونداسیون در حالت خطی و غیرخطی از مدل BNWF استفاده گردید. نتایج تحلیل ها نشان دادند که اندرکنش خاک - سازه موجب افزایش زمان تناوب و تغییر مکان افقی ساختمان ها در تمامی مدل ها می شود. نگوین و همکاران [۶]، تأثیر اندازه ی فونداسیون های سطحی را بر پاسخ لرزه ای ساختمان دارای سیستم سازه ای قاب خمشی با ارتفاع متوسط و با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه با استفاده از روش مستقیم و تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. تأثیر تغییر اندازه ی فونداسیون بر فرکانس طبیعی سیستم و طیف پاسخ سازه ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل بیان کننده ی این بود که با کاهش اندازه ی فونداسیون و افزایش زمان تناوب طبیعی سازه، کاهش قابل ملاحظه ای در برش پایه سازه ایجاد می گردد. مکی و همکاران [۷]، اثر اندرکنش خاک - سازه و تغییر نوع خاک را بر رفتار لرزه ای ساختمان های بتن آرمه ارزیابی کردند. هدف فرمول بندی روش تقریبی برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه و بررسی اهمیت نسبی پارامترهای اصلی همچون نقطه ی عملکرد، پارامترهای خاک، نسبت سختی فونداسیون به خاک بود. نتایج بدست آمده نشان دادند که پاسخ سازه نه تنها به مشخصات دینامیکی سازه و تحریکات لرزه ای بستگی دارد، بلکه به عوامل خارجی همچون شرایط پای سازه نیز بستگی دارد. در اغلب تحقیقات گذشته اثر توأم اتصالات تیر - ستون، تغییر



شکل ۲. (الف): پلان، (ب): نمای ساختمان با فونداسیون نواری و (پ): با فونداسیون منفرد  
 Fig. 2. (a): Plan, (b): sections of building with strip foundation, and (c): with footing foundation

است. ظرفیت باربری نهایی فونداسیون های واقع بر خاک نوع IV با استفاده از روابط میرهوف (معادله ی ۱) و فونداسیون های واقع بر خاک نوع II با استفاده از روابط مبتنی بر SPT (معادله ی ۲) محاسبه گردیده است [۱۳]. طبق مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، مقدار تغییرشکل مجاز برای فونداسیون های منفرد و نواری ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شد [۱۶]. نتایج طراحی و تنش های مجاز به ترتیب در جدول های ۵ و ۶ ارائه گردیده اند.

$$q_{ult} = CN_c S_c d_c + qN_q S_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma \quad (1)$$

$$q_a = (N'_{70}/F_1) K_d \quad B \leq F_4$$

$$q_a = (N'_{70}/F_2) ((B + F_3)/B)^2 K_d \quad B > F_4 \quad (2)$$

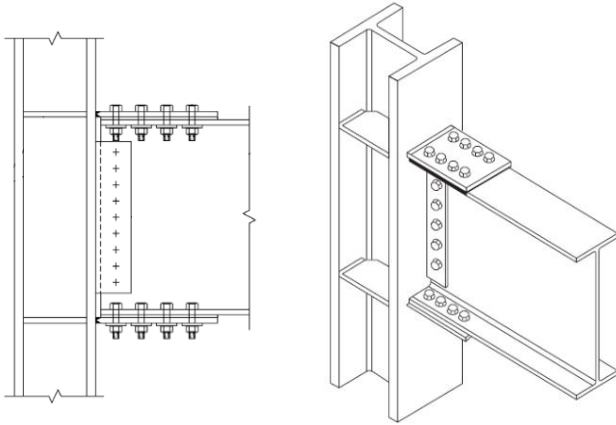
که در آن،  $q_a$  و  $q_{ult}$  به ترتیب ظرفیت باربری نهایی و مجاز، ضریب چسبندگی خاک،  $q$  سربار ناشی از خاک در بالای تراز کف فونداسیون ( $q = \gamma D_f$ )،  $N_c$ ،  $N_q$ ،  $N_\gamma$  ضرایب ظرفیت باربری میرهوف،  $S_c$ ،  $S_q$ ،  $S_\gamma$  ضرایب شکل میرهوف،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $d_c$ ،  $d_q$ ،  $d_\gamma$  ضرایب عمق میرهوف،  $B$  عرض فونداسیون،  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  و  $F_4$  به ترتیب برابر ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۳ و ۱/۲،  $N'_{70}$  متوسط عدد نفوذ

اطراف فونداسیون مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. بار مرده و زنده ی طبقات و بام به ترتیب برابر ۶/۴ و ۲/۴۵ کیلونیوتن بر مترمربع مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران در نظر گرفته شده است [۱۴]. جهت تعیین نیروی زلزله، از آیین نامه ی زلزله ی ایران استفاده گردیده است [۱۲]. محل احداث پروژه در منطقه ای با خطر نسبی خیلی زیاد بوده و طراحی تیرها و ستون های این سازه ها با استفاده از نرم افزار ETABS V.9.7.4 مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۵] انجام گرفته و نتایج طراحی در جدول های ۲ و ۳ ارائه گردیده اند.

اتصالات تیر - ستون برای ساختمان های مفروض مطابق اتصالات خمشی از پیش تأیید شده ی مبحث دهم مقررات ملی ایران [۱۵] و از نوع اتصالات گیردار پیچی به کمک ورق های روسری و زیرسری (BFP) طراحی شده است. شکل ۳، اتصالات گیردار پیچی با استفاده از ورق های روسری و زیرسری را نشان می دهد. نتایج طراحی اتصالات در جدول ۴ نشان داده شده است.

فونداسیون هر یک از ساختمان ها یک بار به صورت منفرد و یک بار به صورت نواری و با فرض ضریب اطمینان طراحی ۳ طراحی شده





شکل ۳. اتصال گیردار بیچی به کمک ورقهای روسری و زیرسری [۱۵]  
Fig. 3. Bolted flange plate moment connection

در پلان ارائه شده در شکل ۲ نشان داده شده است، برای مدل سازی اجزای محدود و انجام تحلیل های دینامیکی انتخاب گردیده است.

### ۳-۱- مدل سازی تیرها و ستون ها

برای مدل سازی این اعضا از المان های غیرخطی تیر - ستون و مقاطع الیافی با مصالح STEEL01 استفاده شده است. این مصالح برای ساخت مصالح فولادی تک محوری دوخطی با سخت شوندگی سینماتیک و سخت شوندگی ایزوتروپیک اختیاری که با یک معادله ی تکاملی غیرخطی توصیف می شود، بکار می رود. شیب ناحیه ی غیرخطی ۳ درصد لحاظ شده است. مدل رفتاری مصالح تیرها و ستون ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳-۲- مدل سازی اتصالات تیر - ستون

برای مدل سازی اتصالات گیردار از المانی با طول صفر، که دو گره با مختصات یکسان را در محل تقاطع تیر به ستون توسط فنر دورانی غیرخطی به یکدیگر متصل می کند، استفاده شده است.

در این مقاله، به منظور بیان رفتار چرخه ای مصالح اتصالات، از رابطه ی ممان - دوران اتصالات دارای ورق های روسری و زیرسری طبق رابطه ی (۳) [۱۸، ۱۹] استفاده گردیده است.

$$M = \frac{k \phi}{[1 + (k \phi / M_p)^{15.5}]^{1/15.5}} \quad (3)$$

در این رابطه، مقدار  $k$  و  $M_p$  با استفاده از روابط (۴) و (۵) [۱۸، ۱۹] بدست می آید.

جدول ۱. مشخصات خاک نوع II و IV [۱۱-۱۳]  
Table 1. Characteristics of soil types II and IV

نوع خاک	$V_s$ (m/s)	$C$ (kPa)	$\phi$	$\nu$
II	۵۶۰	۰	۴۲	۰/۳
IV	۱۵۰	۴۵	۹	۰/۴۵

جدول ۲. مشخصات سازه های مدل واقع بر خاک نوع II  
Table 2. Cross sections of model resting on the soil type II

مقطع ستون ها (mm)	مقطع تیرها (mm)	طبقات
BOX 300 x 300 x 30	IPE400	۱ و ۲
BOX 300 x 300 x 25	IPE360	۳ و ۴
BOX 300 x 300 x 20	IPE300	۵

جدول ۳. مشخصات سازه های مدل واقع بر خاک نوع IV  
Table 3. Cross sections of model resting on the soil type IV

مقطع ستون ها (mm)	مقطع تیرها (mm)	طبقات
BOX 350 x 350 x 35	IPE500	۱ و ۲
BOX 350 x 350 x 30	IPE450	۳ و ۴
BOX 350 x 350 x 20	IPE300	۵

استاندارد در عمق تأثیر فونداسیون،  $K_f$  برابر  $1 + 0.33 D/B$  است که باید کوچکتر یا مساوی  $1/33$  باشد [۱۳].

### ۳- جزئیات مدل سازی

در این مقاله، از نرم افزار المان محدود OpenSees جهت مدل سازی کلیه ی حالت های مفروض مفروض استفاده شده است. این نرم افزار در حوزه ی سیستم های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله طراحی شده است و با این هدف از سال ۱۹۹۰ تاکنون در حال توسعه است [۱۷]. برای مدل سازی قاب، فونداسیون و خاک در این نرم افزار فرضیات زیر در نظر گرفته شده اند و قاب محور ۴ که

جدول ۴. مشخصات اتصالات تیر - ستون ساختمان ها  
Table 4. Details of beam-column connections of buildings

ورق‌های برشی جان		ورق‌های بال		طبقات	نوع اتصال	نوع خاک
ابعاد (mm)	پس‌ها (mm)	ابعاد (mm)	پس‌ها (mm)			
5M22	PL 320 x 120 x 10	20M20	PL 670 x 200 x 15	۲-۱	۱	
5M20	PL 270 x 100 x 8	16M20	PL 610 x 200 x 14	۴-۳	۲	II
4M24	PL 265 x 120 x 8	20M16	PL 545 x 200 x 12	۵	۳	
6M24	PL 335 x 120 x 10	22M22	PL 805 x 300 x 18	۲-۱	۱	
5M24	PL 325 x 120 x 10	18M22	PL 805 x 250 x 17	۴-۳	۲	IV
5M16	PL 260 x 100 x 8	18M16	PL 550 x 200 x 12	۵	۳	

جدول ۵. ابعاد فونداسیون های منفرد واقع بر خاک نوع II و IV  
Table 5. Dimensions of footing foundations resting on the soil types II and IV

ضخامت (m)	طول (m)	عرض (m)	ظرفیت مجاز خاک (kN/m <sup>2</sup> )	نشست حداکثر (m)	ضریب اطمینان	خاک
۰/۵	۲/۱	۲/۱	۱۰۰۶/۲۵	۰/۰۰۳۵	۳	II
۰/۵	۲/۸	۲/۸	۱۶۷/۷۴	۰/۰۱۱۸	۳	IV

جدول ۶. ابعاد فونداسیون های نواری واقع بر خاک نوع II و IV  
Table 6. Dimensions of strip foundations resting on the soil types II and IV

ضخامت (m)	طول (m)	عرض (m)	ظرفیت مجاز خاک (kN/m <sup>2</sup> )	نشست حداکثر (m)	ضریب اطمینان	خاک
۰/۵	۳۱/۵	۱/۵	۱۱۴۱/۷۱	۰/۰۰۲	۳	II
۰/۵	۳۲	۲	۱۳۶/۰۴	۰/۰۰۷۵	۳	IV

برای قاب خمشی ویژه برابر ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است.  
۳-۳- مدل سازی فونداسیون و مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر

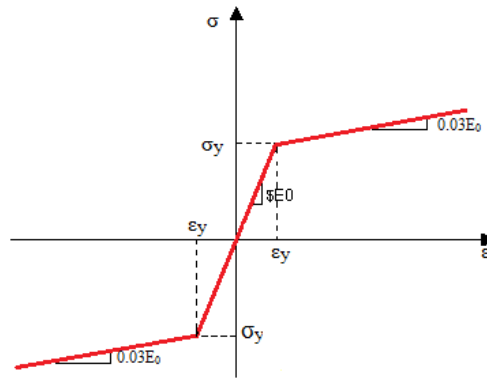
مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر، یکی از پرکاربردترین روش ها در مدل سازی اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه محسوب می گردد. در این روش، از المان های غیرخطی و یک بعدی فنرها برای اتصال فونداسیون سازه به خاک اطراف (میدان نزدیک) استفاده می شود. این فنرها قادر به مدل سازی رفتار قائم، خمشی و جانبی هستند. فونداسیون سطحی دو بعدی به صورت یک تیر ارتجاعی توسط المان های یک بعدی تیر - ستون با سه درجه آزادی در هر گره

$$k = 0.5Ebth^2 / l \quad (۴)$$

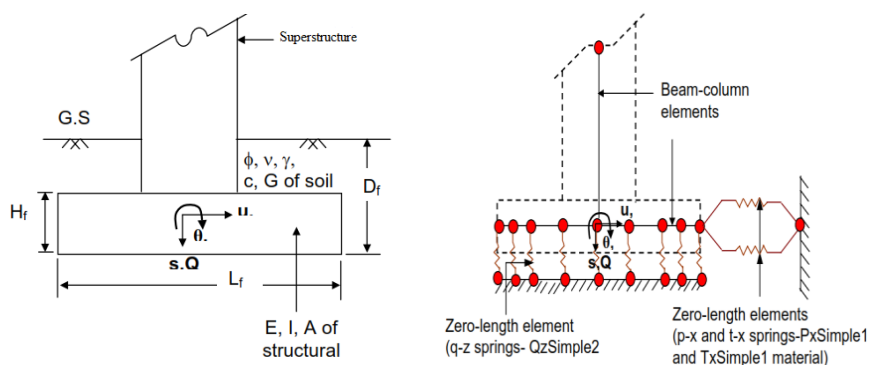
$$M_p = bth\sigma_s \quad (۵)$$

که در آن،  $l$ ،  $b$  و  $t$  به ترتیب طول، عرض و ضخامت ورق اتصال به بال تیر،  $h$  ارتفاع تیر و  $\sigma_s$  تنش تسلیم صفحه ی اتصال است.

با استفاده از رابطه ی (۳)، منحنی های ممان - دوران هر یک از اتصالات ترسیم گردیده و دوران و لنگر نقطه ی تسلیم  $(\vartheta_y, M_y)$  و دوران و لنگر نهایی  $(\vartheta_{II}, M_{II})$  به عنوان پارامترهای ورودی برای مصالح چرخه ای در نظر گرفته شده است. مطابق با آیین نامه ی FEMA350 [۲۰]، مقدار



شکل ۴. مدل رفتاری مصالح تیرها و ستون ها  
Fig. 4. Materials behavior models of beams and columns



شکل ۵. مدل BNWF برای فونداسیون های سطحی [۲]  
Fig. 5. Schematic diagram of the proposed BNWF model for shallow foundations

این اصلاحات بر مبنای نتایج چندین آزمایش بر روی پی های سطحی است. منحنی های برگشتی غیرخطی مدل های مصالح اولیه (مدل های پیاده سازی شده توسط بولانگر) مطابق منحنی های شکل ۶ می باشند.

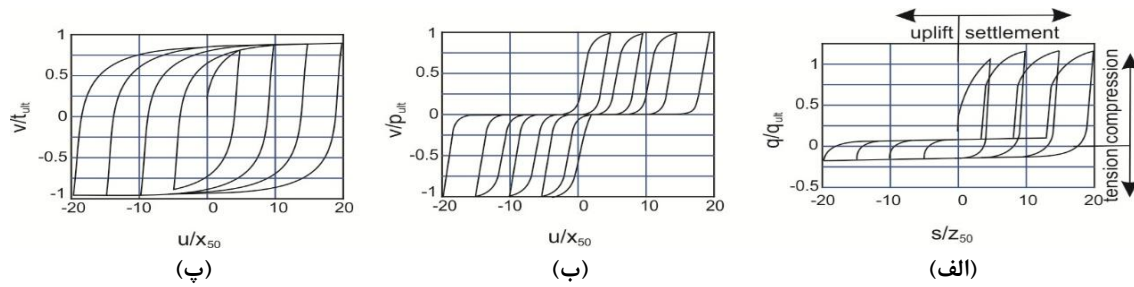
#### ۴- تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی غیرخطی

به منظور بررسی عملکرد لرزه ای سازه ها و طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله، نیروی ناشی از زلزله باید با روشی مناسب به سازه اعمال شده و با انجام تحلیل غیرخطی، پاسخ های لرزه ای آن محاسبه شوند. روش تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه ی ساختمان، واقعی ترین رفتار را از وقوع زلزله شبیه سازی می کند و به عنوان دقیق ترین روش در این زمینه شناخته می شود. این روش نیازمند تعدادی شتاب نگاشت زلزله است که برای هماهنگ شدن با طرح مورد نظر مقیاس سازی شده و به عنوان ورودی تحلیل مورد استفاده قرار

مدل می گردد که توسط تعدادی فنر غیرخطی وینکلر نگهداری شده است. شکل ۵، طرح کلی از مدل BNWF را برای فونداسیون های سطحی نشان داده است [۲]. مشخصات سختی و میرایی این مدل بر مبنای روابط گازتاس محاسبه شده است [۲۱].

#### ۴-۳- مدل سازی فنرهای غیرخطی وینکلر

هر فنر وینکلر مستقل از سایر فنرها بوده و به صورت المان های یک بعدی با طول صفر در نظر گرفته می شوند. در مدل BNWF، فنرهای قائم q-z برای بیان مقاومت قائم و دورانی فونداسیون سطحی بکار می روند، در حالی که فنرهای p-x و t-x به ترتیب بیانگر نیروی مقاوم خاک در برابر جداره ی فونداسیون و مقاومت اصطکاکی مرتبط با لغزش فونداسیون هستند. این المان ها نسخه ی اصلاح شده ی مدل های مصالح TzSimple1, PySimple1, QzSimple1 هستند که توسط بولانگر و همکارانش (۱۹۹۹) برای شمع بیان شدند [۲۲].



شکل ۶. پاسخ چرخه ای فنرهای (الف): QzSimple1، (ب): PySimple1 و (پ): TySimple1 [۲]  
 Fig. 6. Hysteretic response of (a): QzSimple1, (b): PySimple1, (c): TzSimple1 springs

جدول ۷. مشخصات شتاب نگاشت ها  
 Table 7. Details of selected ground motions

فاصله ایستگاه ثبت از مرکز (Km)	سرعت موج برشی (Km/h)	بزرگی	سال	زلزله
۸۷/۳۷	۸۱۳/۴۸	۶/۶۱	۱۹۷۱	San Fernando
۳۰/۷۰	۶۶۷/۱۳	۶/۶۱	۱۹۷۱	San Fernando
۶۱/۷۵	۶۶۹/۴۸	۶/۶۱	۱۹۷۱	San Fernando
۳۸/۲۲	۶۸۰/۳۷	۶/۰۲	۱۹۸۶	N. Palm Springs
۳۲/۱۱	۷۴۰/۰۵	۵/۹۹	۱۹۸۷	Whittier Narrows-01
۵۴/۹۷	۷۳۵/۴۴	۶/۹۳	۱۹۸۹	Loma Prieta
۳۷/۹۲	۱۱۰۰	۶/۵۲	۲۰۰۳	San Simeon, CA

شده به حداکثر مقدار خود مقیاس شده اند و با استفاده از مقررات آیین نامه ی زلزله ی ایران [۱۲] ضریب مقیاس تعیین گردیده و در تحلیل های اندرکنش خاک - سازه، این شتاب ها به عنوان شتاب های ورودی در تراز پایه به کار رفته اند. مشخصات شتاب نگاشت ها در جدول ۷ ارائه شده است.

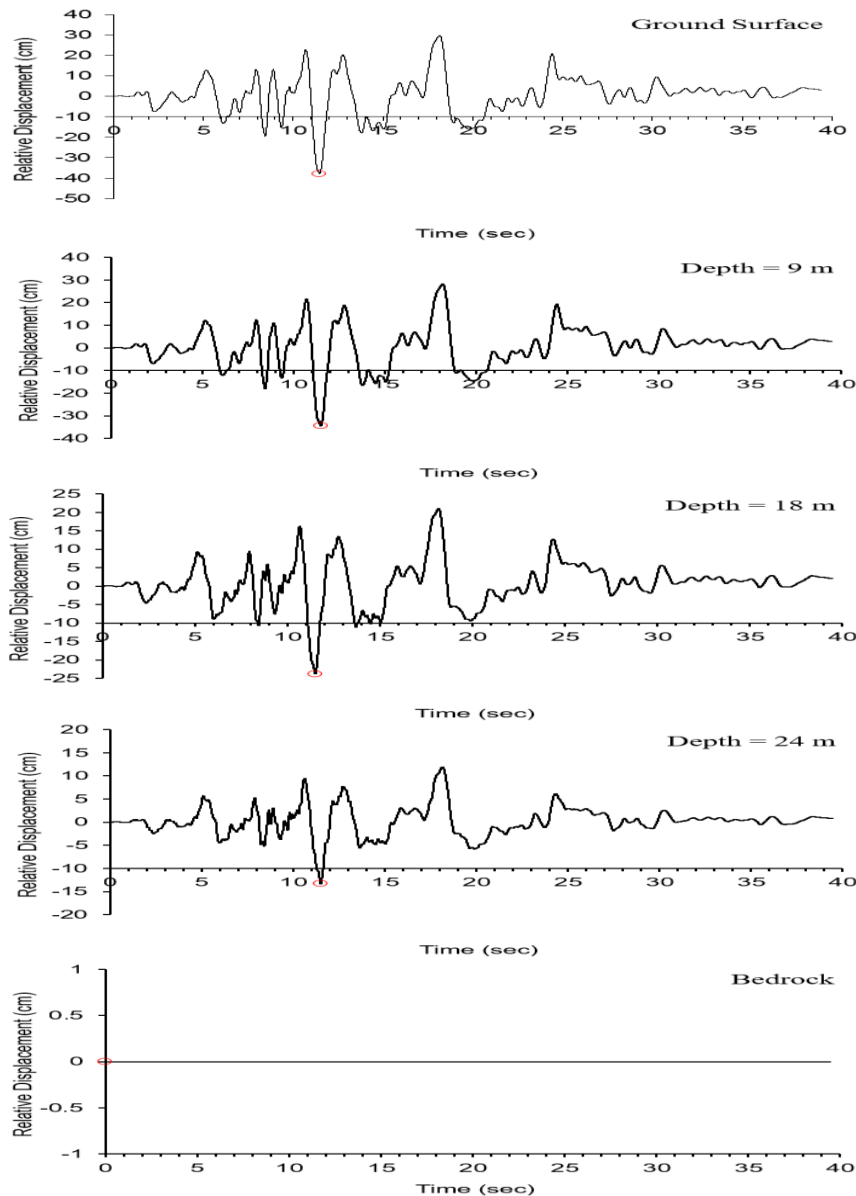
#### ۴-۲- بررسی اثر ساختگاه بر امواج زلزله در نرم افزار NERA<sup>1</sup>

امواج زمین لرزه در حین عبور از سنگ بستر و وارد شدن به محیط دیگر تغییر ماهیت می دهند. به عبارتی خصوصیات یک زلزله با توجه به مشخصات دینامیکی و مشخصات فیزیکی ساختگاه از قبیل وجود لایه هایی با دانسیته ی پایین تر نسبت به بستر سنگی در اعماق مختلف، می تواند در فرکانس های مشخصی تشدید و یا تضعیف گردد. وزن مخصوص، سختی، ضخامت و دیگر خواص فیزیکی لایه های خاک عوامل اساسی هستند که خصوصیات موج های لرزه ای را

می گیرند. برای انجام تحلیل های دینامیکی از روش انتگرال گیری نیومارک استفاده شده است.

#### ۴-۱- انتخاب شتاب نگاشت ها

از آن جایی که امروزه انتخاب حرکت های زمین با استفاده از بانک های اطلاعاتی اینترنتی صورت می گیرد، باید به گزینه های موجود در این پایگاه ها توجه نمود. برای نمونه، بانک اطلاعات سایت PEER که یکی از کامل ترین مراجع در این زمینه است، امکان انتخاب بزرگا ( $M$ )، فاصله از گسل ( $R$ )، نوع گسل ( $F$ ) و نوع خاک محل شتاب نگار ( $S$ ) را فراهم ساخته است. به همین دلیل در این مقاله، از شتاب نگاشت های زلزله های سایت PEER استفاده گردیده است. شتاب نگاشت های زلزله ی انتخاب شده به صورت شتاب نگاشت های حوزه ی دور که فاصله ی ایستگاه ثبت از مرکز آن ها بیشتر از ۲۰ کیلومتر بوده و همچنین بر روی سنگ بستر به ثبت رسیده اند، هستند. تمامی زوج شتاب نگاشت های انتخاب



شکل ۷. پاسخ اثر ساختگاه بر جابجایی زلزله ی Loma Prieta در مدل واقع بر خاک نوع IV

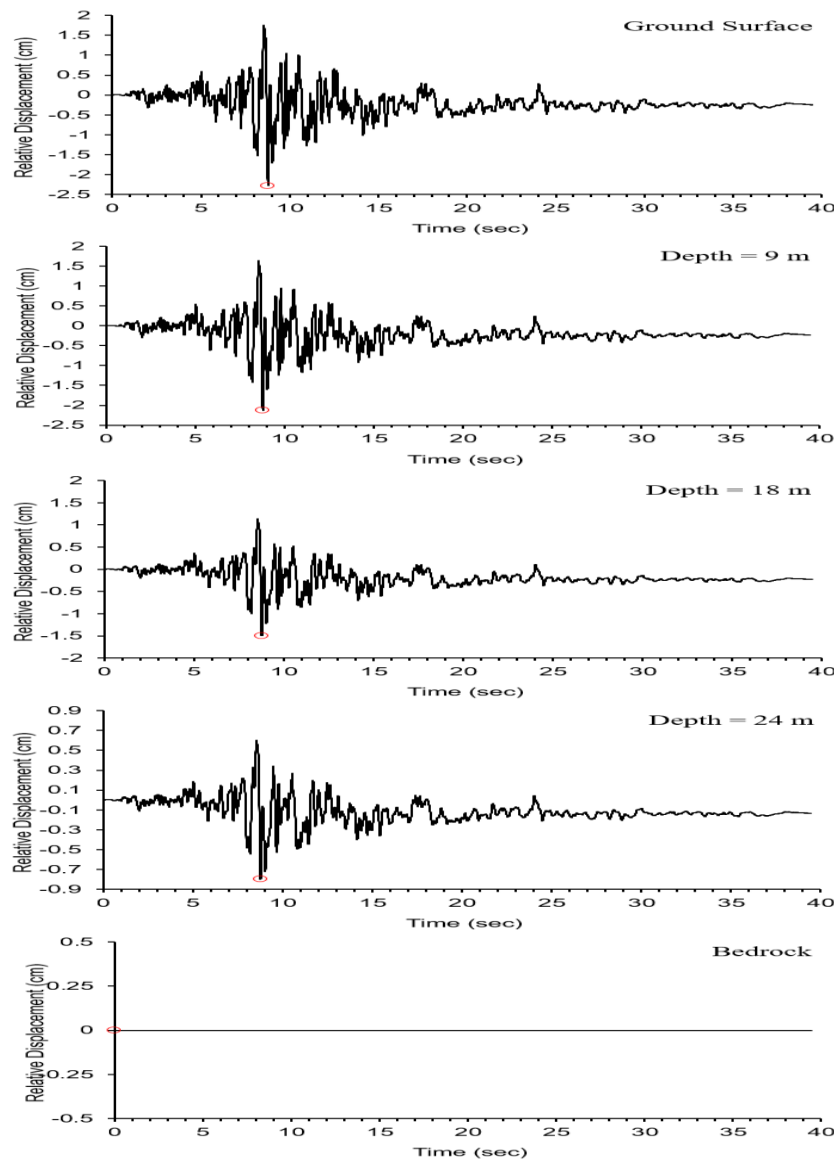
Fig. 7. Effect of ground response analysis on the displacement of Loma Prieta earthquake in the model resting on the soil type IV

بستر تا سطح زمین از مقدار صفر به  $37/8$  سانتی متر و در خاک نوع II از صفر به  $2/28$  سانتی متر رسیده است.

#### ۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی غیرخطی برای سازه های دارای فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع II و IV، به صورت جداگانه و در قالب نمودارهای حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه ای و حداکثر برش پایه طبقات استخراج شده است. در این نمودارها، پاسخ ها برای چهار حالت مختلف، حالت اول

تحت تأثیر قرار می دهد. اثر ساختگاه نیز برای تمامی شتاب نگاشت های زلزله در خاک نوع II و IV توسط نرم افزار NERA [۲۳] بررسی شده است. با استفاده از این نرم افزار، پاسخ دینامیکی خاک با حل معادلات دیفرانسیل حرکت امواج در لایه های افقی خاک توسط روش غیرخطی بدست آمده است. پاسخ این اثر در مدل های مفروض به صورت جابه جایی لایه ی زیر پی به عنوان پارامتر ورودی برای تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه شکل های ۷ و ۸ تفاوت اثر ساختگاه را به صورت تاریخچه ی زمانی جابه جایی تحت زلزله ی Loma Prieta در خاک نوع IV و II نشان داده است. در خاک نوع IV، حداکثر تغییرمکان از سنگ



شکل ۸. پاسخ اثر ساختمانی بر جابجایی زلزله‌ی Loma Prieta در مدل واقع بر خاک نوع II

Fig. 8. Effect of ground response analysis on the displacement of Loma Prieta earthquake in the model resting on the soil type II

و مقایسه‌ی جداگانه قرار گرفته است.

#### ۵-۱- حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای

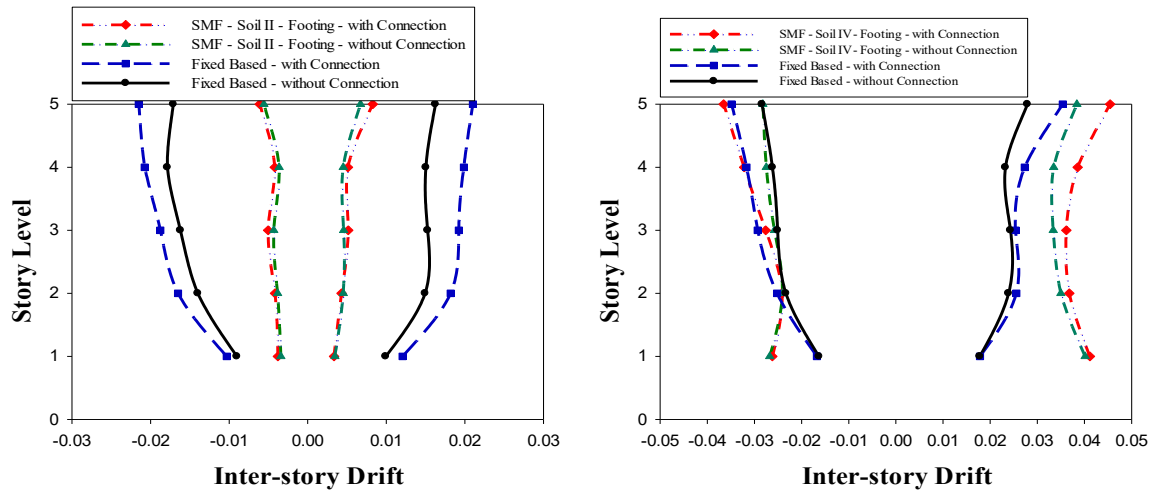
##### ۵-۱-۱- حالت بدون مدل سازی خاک و مدل سازی فقط اتصالات

در حالتی که سازه دارای تکیه‌گاه صلب باشد و تنها اثر اتصالات تیر-ستون در مدل سازی آن لحاظ گردد، مقدار تغییرمکان نسبی طبقات در قاب‌های خمشی ویژه ۵ طبقه واقع بر خاک نوع IV و II نسبت به مدل‌های بدون لحاظ اتصالات افزایش می‌یابد، که مقدار این افزایش در مدل‌های با تکیه‌گاه صلب واقع بر خاک نوع IV برابر ۲۴/۶۷ درصد و در مدل‌های با تکیه‌گاه صلب واقع بر خاک نوع II برابر ۲۰/۴۰ درصد

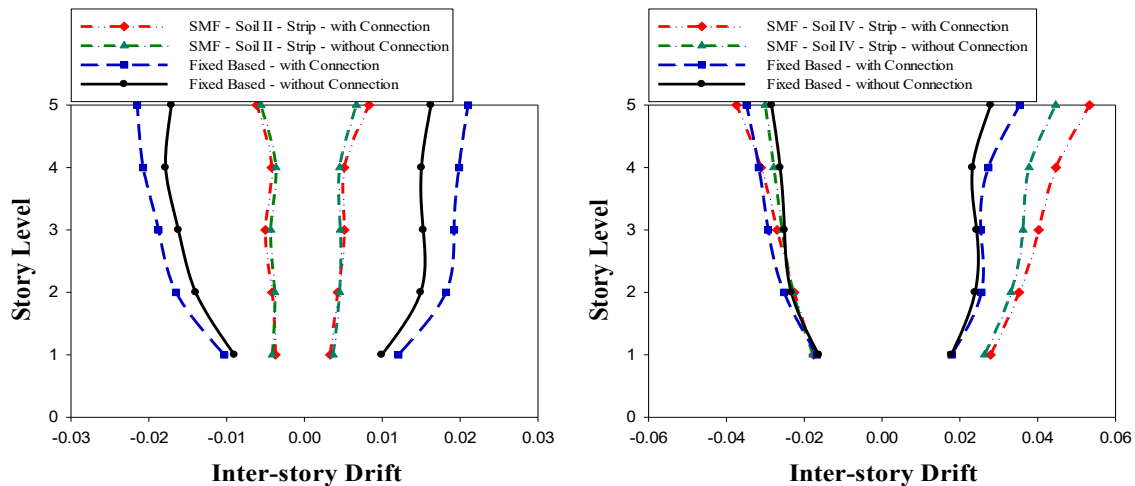
بدون لحاظ خاک و اتصالات، حالت دوم بدون لحاظ خاک و با لحاظ اتصالات، حالت سوم با لحاظ خاک و بدون لحاظ اتصالات و حالت چهارم با لحاظ توأم خاک و اتصالات در مدل سازی ترسیم شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات را برای مدل‌های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV و II در چهار حالت مفروض و شکل‌های ۱۱ و ۱۲، برش پایه حداکثر طبقات را برای مدل مفروض با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV و II نشان می‌دهند.

در ادامه نتایج حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و حداکثر برش پایه طبقات در شرایط مختلف خاک و فونداسیون مورد بررسی





شکل ۹. نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات در برابر ارتفاع قاب خمشی ویژه با فونداسیون منفرد واقع بر خاک نوع II و IV  
 Fig. 9. The maximum inter-story drift against the height of special moment-resisting frame with footing foundation resting on the soil types IV and II



شکل ۱۰. نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات در برابر ارتفاع قاب خمشی ویژه با فونداسیون نواری واقع بر خاک نوع II و IV  
 Fig. 10. The maximum inter-story drift against the height of special moment-resisting frame with strip foundation resting on the soil types IV and II

که این مقدار حداکثر در مدل های با فونداسیون منفرد در طبقه ی اول و در فونداسیون های نواری در طبقه ی پنجم اتفاق افتاده است. همچنین تغییرمکان نسبی طبقات در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع II به میزان ۶۳ درصد کاهش یافته است که در این مدل ها، طبقه ی پنجم دارای حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه ای است.

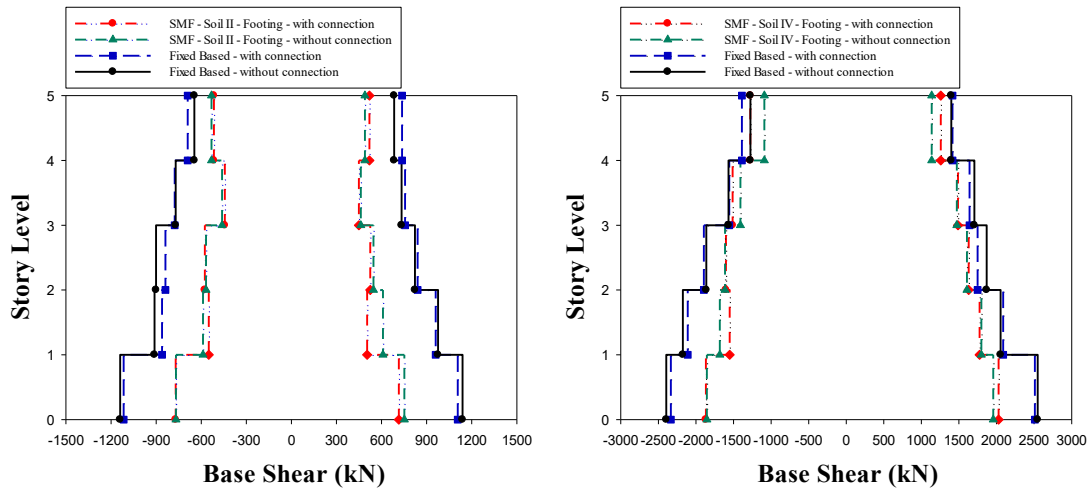
### ۳-۱-۵- حالت مدل سازی همزمان خاک و اتصالات

در قاب های خمشی ویژه با لحاظ اثر اتصالات و خاک، حداکثر تغییرمکان نسبی در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV در طبقه ی پنجم اتفاق افتاده است، همچنین

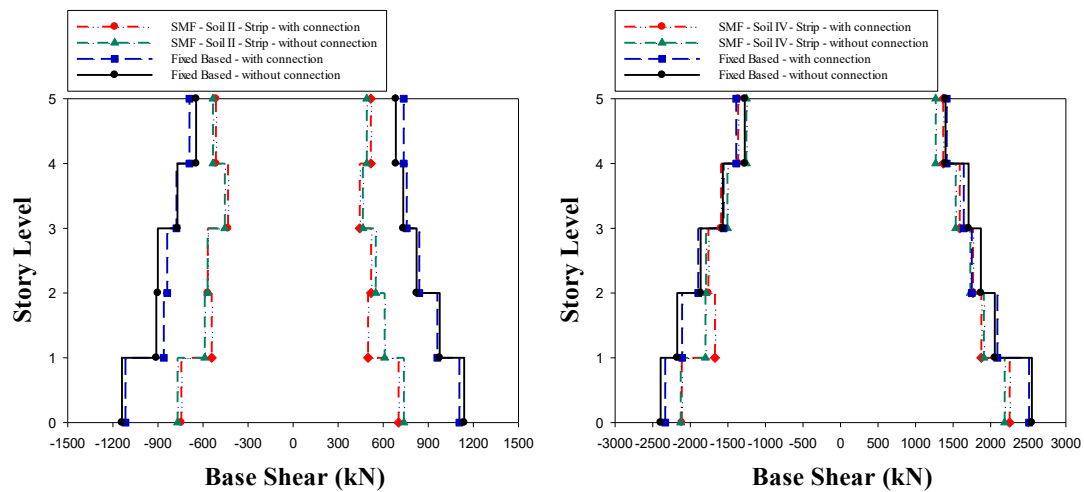
است. بنابراین با مقایسه ی این نتایج مشخص می شود که تأثیر مدل سازی اتصالات بر تغییرمکان نسبی طبقات در مدل های با تکیه گاه صلب واقع بر خاک نوع IV بیشتر از مدل های واقع بر خاک نوع II است.

### ۲-۱-۵- حالت بدون مدل سازی اتصالات و مدل سازی فقط خاک

در صورتی که فقط اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در مدل ها لحاظ گردد و از اثر اتصالات تیر - ستون صرف نظر شود، تغییرمکان نسبی طبقات در مدل های با فونداسیون منفرد واقع بر خاک نوع IV به میزان ۴۱/۳۴ درصد و در فونداسیون نواری به میزان ۵۷/۱۶ درصد نسبت به مدل های دارای تکیه گاه صلب افزایش یافته است،



شکل ۱۱. نمودار برش پایه حداکثر طبقات در برابر ارتفاع قاب خمشی ویژه با فونداسیون منفرد واقع بر خاک نوع II و IV  
 Fig. 11. The maximum base-shears against the height of special moment-resisting frame with footing foundation resting on the soil types IV and II



شکل ۱۲. نمودار برش پایه حداکثر طبقات در برابر ارتفاع قاب خمشی ویژه با فونداسیون نواری واقع بر خاک نوع II و IV  
 Fig. 12. The maximum base-shears against the height of special moment-resisting frame with strip foundation resting on the soil types IV and II

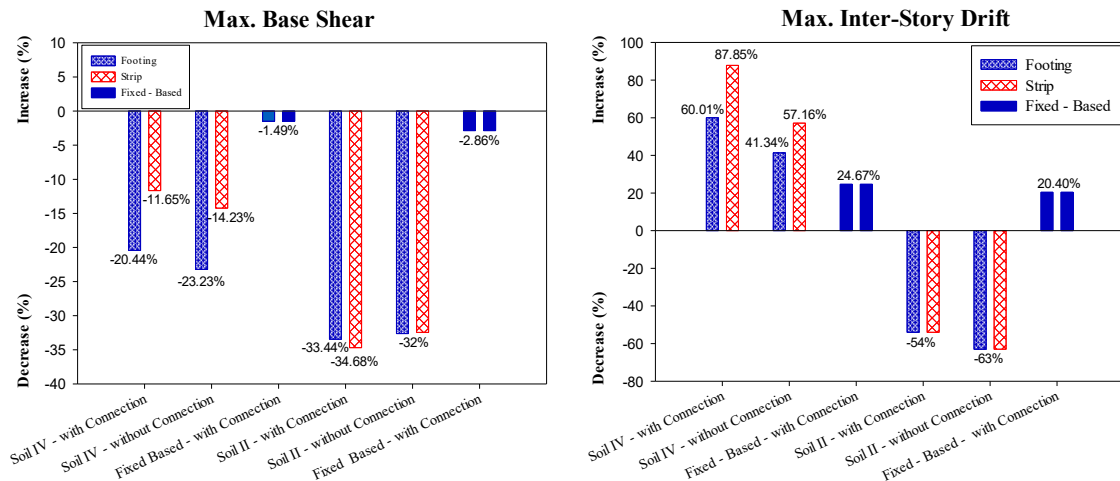
#### ۲-۵- حداکثر برش پایه طبقات

۲-۵-۱- حالت بدون مدل سازی خاک و مدلسازی فقط اتصالات در حالی که سازه دارای تکیه گاه صلب باشد و تنها اثر اتصالات در مدل سازی آن لحاظ گردد، حداکثر مقدار برش پایه در قاب های ۵ طبقه واقع بر خاک نوع IV نسبت به مدل های بدون اتصالات به میزان ۱/۴۹ درصد و در مدل های واقع بر خاک نوع II به میزان ۲/۸۶ درصد کاهش می یابد.

#### ۲-۵-۲- حالت بدون مدل سازی اتصالات و مدل سازی فقط خاک

در صورتی که فقط اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در

در این مدل ها با لحاظ این دو اثر تغییرمکان نسبی حداکثر در فونداسیون های منفرد به میزان ۶۰/۰۱ درصد و در فونداسیون های نواری به میزان ۸۷/۸۵ درصد نسبت به مدل های بدون لحاظ اتصالات و تکیه گاه صلب افزایش یافته است. در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع II، حداکثر تغییرمکان نسبی در طبقه ی پنجم بوده و به میزان ۵۴ درصد نسبت به تغییرمکان نسبی مدل های بدون اتصالات و با تکیه گاه صلب کاهش یافته است. بنابراین لحاظ اثر اتصالات و خاک در مدل های واقع بر خاک نوع IV منجر به افزایش تغییرمکان نسبی بین طبقه ای و در مدل های واقع بر خاک نوع II منجر به کاهش آن می گردد.



شکل ۱۳. نمودار درصد افزایش و کاهش حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه ای و حداکثر برش پایه طبقات  
 Fig. 13. The percentage of increment and reduction of maximum inter-story drift and maximum base shears of stories

صلب با لحاظ اثر اتصالات نسبت به مدل های دارای تکیه گاه صلب و فاقد اثر اتصالات تیر - ستون در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در مدل های واقع بر خاک نوع IV، درصد افزایش تغییر مکان نسبی حداکثر در قاب های دارای فونداسیون نواری بیشتر از قاب های دارای فونداسیون منفرد است و در مدل های واقع بر خاک نوع II، درصد کاهش در هر دو نوع فونداسیون یکسان است.

در مدل های واقع بر خاک نوع IV، درصد کاهش برش پایه در قاب های با فونداسیون منفرد بیشتر از قاب های با فونداسیون نواری است، اما در صورتی که هر دو فونداسیون بر روی خاک نوع II واقع شوند، تغییر نوع فونداسیون تأثیر کمی در روند تغییرات برش پایه دارد. با مقایسه ی این نتایج مشخص می شود که در مدل های واقع بر خاک نوع II، تغییر نوع فونداسیون تأثیری در روند تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبی و حداکثر برش پایه ندارد.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، میزان تأثیر مدل سازی دو پارامتر بسیار مؤثر بر رفتار قاب های خمشی فولادی ویژه نظیر اتصالات تیر - ستون و اندرکنش خاک - فونداسیون سازه بر پاسخ های لرزه ای ساختمان ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. همچنین، تأثیر نوع فونداسیون سطحی و نوع خاک بر پاسخ های لرزه ای سازه های مفروض ارزیابی گردید. بدین منظور، ساختمان پنج طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه و پلان مستطیلی شکل در نظر گرفته شد. این ساختمان

مدل ها لحاظ گردد و از اثر اتصالات صرف نظر شود، حداکثر مقدار برش پایه در تراز صفر در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV به ترتیب به میزان ۲۳/۲۳ درصد و ۱۴/۲۳ درصد نسبت به مدل های با تکیه گاه صلب کاهش یافته است. همچنین حداکثر برش پایه در تراز صفر در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع II به میزان ۳۲ درصد کاهش یافته است.

#### ۳-۲-۵- حالت مدل سازی همزمان خاک و اتصالات

با لحاظ اثر اتصالات و خاک در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV و II، میزان نرمی سازه افزایش می یابد و این امر باعث می شود که مقدار حداکثر برش پایه در تراز صفر کمتر از حداکثر برش پایه ی مدل های بدون لحاظ اتصالات و با تکیه گاه صلب گردد. برش پایه حداکثر در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری به ترتیب به میزان ۲۰/۴۴ و ۱۱/۶۵ درصد و در مدل های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع II به میزان ۳۳/۴۴ و ۳۴/۶۸ درصد نسبت به مدل های بدون لحاظ اتصال و با تکیه گاه صلب کاهش یافته است.

#### ۳-۵- درصد تغییرات پاسخ های لرزه ای

درصد تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه ای و حداکثر برش پایه طبقات برای تمام مدل های با فونداسیون منفرد، نواری با و بدون لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و مدل های دارای تکیه گاه

و بدون مدل سازی اتصالات تیر - ستون است؛ در حالی که درصد کاهش برش پایه ی مدل های مذکور بیشتر از مدل های با لحاظ اثر خاک و عدم لحاظ اثر اتصالات است.

۵- تأثیر نوع خاک بر رفتار سازه ها غیرقابل چشم پوشی است و در کلیه ی مدل های مفروض اعم از سازه های با لحاظ اثر اتصالات و اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه و سازه های بدون لحاظ آن ها، حداکثر تغییرمکان نسبی و برش پایه در مدل های واقع بر خاک نوع II، بسیار کمتر از مدل های واقع بر خاک نوع IV است.

۶- تأثیر تغییر نوع فونداسیون در پاسخ های سازه های واقع بر خاک نوع IV قابل ملاحظه است، در حالی که در سازه های واقع بر خاک نوع II تأثیر چندانی بر این پاسخ ها ندارد.

### فهرست علائم

سرعت موج برشی خاک، m/s	$V_s$
ضریب چسبندگی خاک، kPa	$C$
زاویه ی اصطکاک داخلی خاک	$\phi$
ضریب پواسون	$\nu$
ظرفیت باربری مجاز خاک، kN/m <sup>2</sup>	$q_a$
متوسط عدد نفوذ استاندارد در عمق تأثیر فونداسیون	$N'_{70}$
$1 + 0.33 D/B \leq 1.33$	$K_d$
عرض فونداسیون، m	$B$
عمق مدفون فونداسیون، m	$D$
۰/۰۴	$F_1$
۰/۰۶	$F_2$
۰/۳	$F_3$
۱/۲	$F_4$
ظرفیت باربری نهایی خاک، kN/m <sup>2</sup>	$q_{ult}$
ضرایب ظرفیت باربری میرهوف	$N_\gamma, N_q, N_c$
ضرایب شکل میرهوف	$S_\gamma, S_q, S_c$
وزن مخصوص خاک	$\gamma$
ضرایب عمق میرهوف	$d_\gamma, d_q, d_c$
طول ورق اتصال به بال تیر، m	$l$
عرض ورق اتصال به بال تیر، m	$b$

با استفاده از ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی گردید. برای طراحی فونداسیون این ساختمان دو نوع فونداسیون منفرد و نواری و دو نوع خاک (II و IV) لحاظ گردید. اتصالات از پیش تایید شده ی گیردار پیچی به کمک ورق های روسری و زیرسری برای اتصال تیرها و ستون ها بکار رفت. برای مدل سازی این سازه ها از نرم افزار اجزای محدود OpenSees استفاده گردید و فونداسیون و خاک اطراف آن به صورت فنرهای غیرخطی وینکلر مدل گردیدند. جهت مقایسه ی تأثیر مدل سازی یکی از اجزا نظیر اتصالات تیر به ستون یا خاک و تأثیر مدل سازی همزمان اتصالات و خاک، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه ی زمانی تحت هفت شتاب نگاشت حوزه ی دور صورت گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل و مقایسه ی مدل ها نشان می دهد که:

۱- در صورتی که فقط اثر اتصالات تیر - ستون در مدل های دارای تکیه گاه صلب لحاظ گردد، این امر منجر به افزایش حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات و کاهش حداکثر برش پایه طبقات می گردد.

۲- در مدل های دارای فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV، لحاظ اثر همزمان اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه و اتصالات منجر به افزایش حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه ای به ترتیب به میزان ۶۰/۰۱ درصد و ۸۷/۸۵ درصد و کاهش حداکثر برش پایه به میزان ۲۰/۴۴ درصد و ۱۱/۶۵ درصد نسبت به مدل های بدون لحاظ اثر اتصالات و با تکیه گاه صلب می گردد، در حالی که در مدل های واقع بر خاک نوع II، اثر این دو عامل منجر به کاهش این دو کمیت نسبت به مدل های بدون لحاظ اثر اتصالات و خاک می گردد، که مقدار این کاهش تقریباً برابر با ۵۴ درصد و ۳۴ درصد است.

۳- درصد افزایش حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه ای در مدل های با لحاظ اثر همزمان اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه و اتصالات واقع بر خاک نوع IV، بیشتر از مدل های با لحاظ اثر خاک و بدون مدل سازی اتصالات تیر - ستون است؛ در حالی که بر خلاف تغییرمکان نسبی بین طبقه ای، درصد کاهش برش پایه ی مدل های مذکور کمتر از مدل های با لحاظ اثر خاک و عدم لحاظ اثر اتصالات است.

۴- درصد کاهش حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه ای در مدل های با لحاظ اثر همزمان اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه و اتصالات واقع بر خاک نوع II، کمتر از مدل های با لحاظ اثر خاک

- Engineering Structures, 126 (2016) 15-26.
- [8] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, California Department of Transportation, 1996.
- [9] B.S.S. Council, NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures (FEMA P-750), in: Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2009.
- [10] ASCE7-10, Minimum design loads for buildings and other structures, in, ASCE Reston, VA, 2010.
- [11] B.G. Look, Handbook of geotechnical investigation and design tables, CRC Press, 2014.
- [12] Building and Housing Research Center, Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800 (4rd edition), in, 2015. (in persian).
- [13] J. Bowles, Foundation analysis and design: McGraw-Hill Book Company, (1996).
- [14] Central Research and Building House, Iranian National Building Code, part 6, loads on building, in, 2013. (in persian).
- [15] Central Research and Building House, Iranian National Building Code, part 10, steel structures design, in, 2013. (in persian).
- [16] Central Research and Building House, Iranian National Building Code, part 7, foundations, in, 2013. (in persian).
- [17] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006).
- [18] M. Ackroyd, Design of flexibility-connected unbraced steel building frames, Journal of Constructional Steel Research, 8 (1987) 261-286.
- [19] G.-Q. Li, J.-J. Li, Advanced analysis and design of steel frames, John Wiley & Sons, 2007.
- [20] F.E.M. Agency, FEMA 350, Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, in, Fema Washington, DC., 2000.
- [21] G. Gazetas, Formulas and charts for impedances

ضخامت ورق اتصال به بال تیر، $m$	$t$
ارتفاع تیر، $m$	$h$
تنش تسلیم صفحه ی اتصال، $N/m^2$	$\sigma_s$
مدول الاستیسته، $N/m^2$	$E$
لنگر تسلیم، $N/m^2$	$M_y$
دوران تسلیم	$\theta_y$
لنگر نهایی، $N/m^2$	$M_u$
دوران نهایی	$\theta_u$

## مراجع

- [1] T.K. Datta, Seismic analysis of structures, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] P. Raychowdhury, Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures, University of California, San Diego, 2008.
- [3] P. Raychowdhury, Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI), Engineering Structures, 33(3) (2011) 958-967.
- [4] A.S. Hokmabadi, B. Fatahi, Influence of Foundation Type on Seismic Performance of Buildings Considering Soil-Structure Interaction, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 16(08) (2015) 15500431-155004329.
- [5] H. Tahghighi, M. Arbabi, Investigation of steel structures response including nonlinear soil-structure interaction, in: 10th International Congress on Civil Engineering, Iran, Tabriz university, (2015), pp. 1-8. (in persian).
- [6] Q.V. Nguyen, B. Fatahi, A.S. Hokmabadi, The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction, Structural Engineering and Mechanics, 58(6) (2016), 1045-1075.
- [7] M. Mekki, S.M. Elachachi, D. Breysse, M. Zoutat, Seismic behavior of R.C. structures including soil-structure interaction and soil variability effects,

- geotechnical and geoenvironmental engineering, 125(9) (1999) 750-759.
- [23] J. Bardet, T. Tobita, NERA: a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California, (2001).
- of surface and embedded foundations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 29(2) (1992) A126.
- [22] R.W. Boulanger, C.J. Curras, B.L. Kutter, D.W. Wilson, A. Abghari, Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses, Journal of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Zare Aghblagha, H.R. Shokrgozar, An investigating into the effect of various modeling parameters on the behavior of special steel moment frames, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 287-302.*

DOI: [10.22060/ceej.2018.14671.5713](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14671.5713)

