

Soil-Structure Interaction Effect on the Optimal Design of Low-, Mid- and High-Rise Reinforced Concrete Frames

H. Jafari, A. Rafiee*

Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

ABSTRACT: In procedure for analysis, design and optimization of reinforced concrete buildings, for most or maybe all regular buildings, different parts of the procedure for different parts of the building, including main structure and its foundation, are usually carried out independently. This means that these structures are mainly analyzed and designed by supposing a fixed-base, and then, forces at the foot of columns are obtained and used to analyze and design the foundation. Thereby, no attention is paid to the effects of foundation settlements on the distribution of forces in structural elements. Interaction between the structure, the foundation and its subsoil (flexible-base), changes the actual behavior of the structure compared to the method in which the structure is investigated alone (fixed-base). In this paper, various RC buildings, including low-, mid- and high-rise types, with foundations and soil under their foundations in three different layers, with a depth of each layer equal to ten meters, are modeled using SAP2000. Also, all the frames are optimized using Artificial-Bee-Colony algorithm in MATLAB, subject to stress and drift constraints. The results show that, since in a structure with optimal design the values of stress in elements and drift of stories are usually very close to the maximum allowable limits, hence, a slight increase in structural response, induced by soil-structure interaction effects, may lead to the violation of optimal design constraints. Therefore, taking not into account such effects in design optimization of structure, may lead to not only a non-optimal but also an infeasible design.

Review History:

Received: Dec. 12, 2021

Revised: Jun. 23, 2023

Accepted: Sep.09, 2023

Available Online: Sep. 25, 2023

Keywords:

Soil-Structure interaction

RC Moment Frame

minimum cost

tall building

optimal structural design

1- Introduction

In order to design a reinforced concrete moment frame, the current approaches model the structure as fixed-base; whereas, the flexibility of the base may have considerable contributions to the structural response. Hence, the Soil-Structure-Interaction (SSI) effects must be accounted for in the design of such buildings, especially when the optimal structural design is pursued.

Nowadays, the ever-increasing rate of construction and material costs urges designers to optimize the design of the structures. It is well-known that in most cases, in an optimal structural design, the values of the structural responses are very close to the allowable limits (design optimization constraints); hence, the response of the structure must accurately be evaluated. Therefore, SSI effects may substantially alter the optimization results. Although numerous literature studies are focusing on design optimization of structures (e.g. [1-2]), but in very rare cases the SSI effects are accounted for [3-4].

The review of the literature shows that the previous studies are limited to bridges, steel frames, and simple design optimization with no SSI accounted for. In the present study, RC frames are optimized with the SSI effects accounted for. For this aim, three examples of low-, mid-, and high-

rise buildings are studied and the optimal structural designs obtained in fixed-base and flexible-base cases are compared and discussed.

2- Methodology

Generally, to investigate the flexible base, the soil can be modeled using one rotational (k_{yy}) and two translational (k_x , k_z) springs as shown in Figure 1. This approach can also be

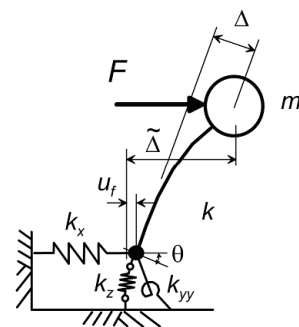


Fig. 1. Soil-Structure model

*Corresponding author's email: a.rafiee@maragheh.ac.ir

Table 1. Soil properties

Layer	Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)	Friction angle
1(Bottom)	10	375	37.5
2(Middle)	10	300	37.5
3(Top)	10	200	32.5

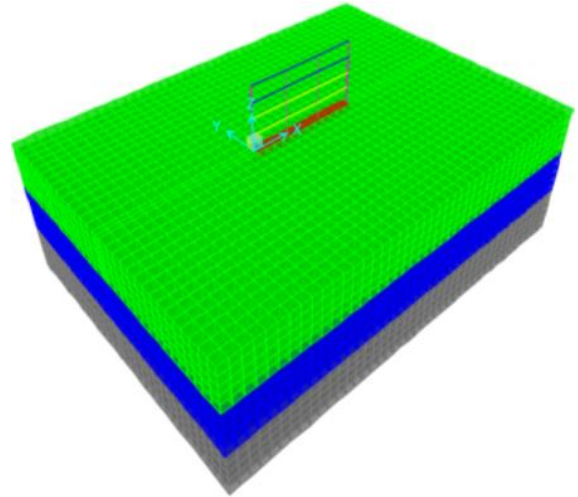


Fig. 2. story building

generalized to Multi-Degree-of-Freedom systems.

The lateral force and displacement values in this system are related by

$$\Delta = \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{F.h}{k_{yy}} \right) \quad (1)$$

where, h is the height of the lumped mass from the base; and k is the building stiffness in closed-end case

$$k = 4\pi^2 \left(\frac{W}{gT^2} \right) \quad (2)$$

where, g is the gravitational acceleration; \widetilde{W} is the effective mass of the building. Thereby, the fundamental period of fixed-base building (T) is related to that of flexible-base building (\widetilde{T}) by

$$\frac{T}{\widetilde{T}} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{k.h^2}{k_{yy}}} \quad (3)$$

3- Results and Discussion

The soil properties used for investigations are given in Table 1 adopted from [3].

Example 1: 4-story building. This example is adapted from [5]. Figure 2 shows the model of the building and soil layers.

The DCR¹ values for columns of this building, in the optimal design, are shown in Figure 3. Results show that by considering SSI, the optimal design obtained for the fixed-base building, is no longer a feasible design.

Example 2: 12-story building. This example is also adopted from [5]. Figure 4 shows the model of this building and the soil.

The DCR values for columns of this building, in the

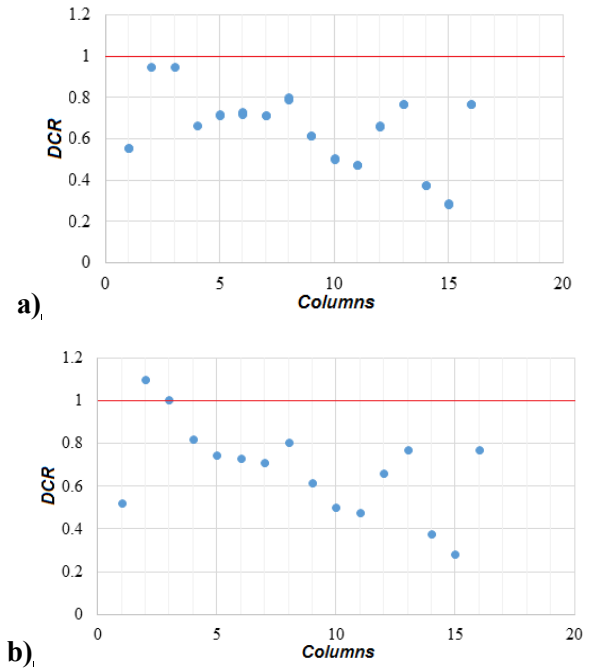


Fig. 3. DCR in columns of 4-story building; a) fixed-base, b) flexible-base

optimal design, are shown in Figure 5. Results show that by considering SSI, the optimal design obtained for the fixed-base building, exceeds the allowable DCR limit and is non-optimal and even infeasible.

Example 3: 24-story building. The model of the building and the soil is shown in Figure 6.

The drift values of the stories of the optimally designed

¹ Demand-to-Capacity Ratio

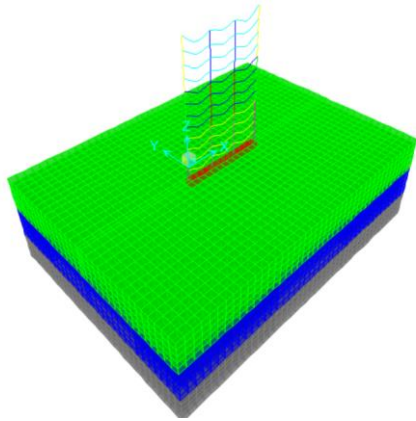


Fig. 4. 12-story building

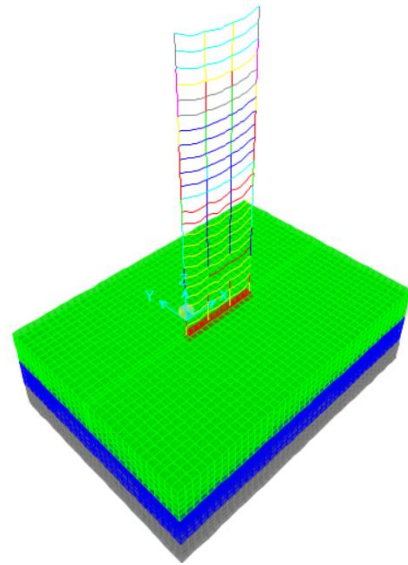


Fig. 6. 24-story building

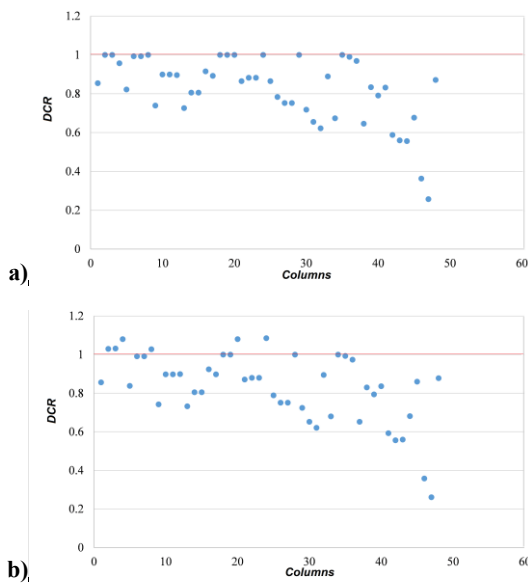


Fig. 5. DCR values for 12-story building; a) fixed-base, b) flexible-base

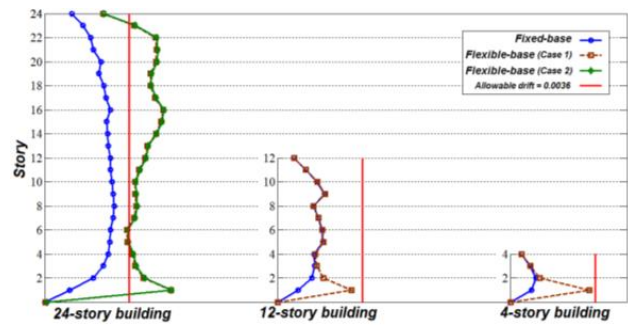


Fig. 7. Drift values in the investigated buildings

examples are compared with the allowable limit in Figure 7. The comparison shows that by considering SSI, the optimal design obtained for the fixed-base 24-story building, exceeds the allowable drift limit and is no longer a feasible design.

4- Conclusions

The conclusions of this study can be summarized as:

Generally, if the SSI effects are not accounted for in the design optimization of the building, then the obtained design may be not only non-optimal but also infeasible.

The results show that the SSI effect increases the stress in the columns for low- and mid-rise buildings. Also, it increases the story drifts for high-rise buildings.

According to the results, the SSI effect is more considerable in high-rise buildings compared to low- and mid-rise buildings.

The investigations on the high-rise 24-story building example show that the effect of the properties of a certain soil layer on the structural response is more important rather than the depth in which that layer exists. Hence, the characteristics of the different layers of the soil under the building should be studied to a sufficient depth.

References

- [1] H.-G. Kwak, J. Kim, An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of RC frames, *Computer-Aided Design*, 41(7) (2009) 490-500.
- [2] A.R. Shooli, A. Vosoughi, M.R. Banan, A mixed GA-PSO-based approach for performance-based design optimization of 2D reinforced concrete special moment-resisting frames, *Applied Soft Computing*, 85 (2019)

105843.

- [3] M. Khatibinia, E. Salajegheh, J. Salajegheh, M. Fadaee, Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil–structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel, *Engineering Optimization*, 45(10) (2013) 1147-1165.
- [4] A.T. Daloglu, M. Artar, K. Özgan, A.İ. Karakas, Optimum design of steel space frames including soil-structure interaction, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54 (2016) 117-131.
- [5] A. Tapao, R. Cheerarot, Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames, *Engineering Structures*, 151 (2017) 802-820.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Jafari, A. Rafiee, Soil-Structure Interaction Effect on the Optimal Design of Low-, Mid- and High-Rise Reinforced Concrete Frames, Amirkabir J. Civil Eng., 55(10) (2024) 417-420.

DOI: [10.22060/ceej.2023.20872.7555](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.20872.7555)





اثر اندرکنش خاک-سازه بر طرح بهینه قاب‌های خمشی بتن‌آرمه کوتاه، میان و بلندمرتبه

حامد جعفری، امین رفیعی*

گروه مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

کلمات کلیدی:

اثر اندرکنش خاک-سازه
قاب خمشی بتن‌آرمه
هزینه حداقل
ساختمان بلند
طراحی بهینه سازه

خلاصه: در فرآیند تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی طرح ساختمان‌های بتن‌آرمه در اغلب موارد و شاید در تمامی ساختمان‌های متعارف، بخش‌های مختلف این فرآیند برای بخش‌های مختلف ساختمان، اعم از سازه اصلی و پی آن، معمولاً به صورت مستقل از هم انجام می‌گیرد. بدین معنی که این سازه‌ها عمدتاً با فرض یک بستر صلب، تحلیل و طراحی شده و سپس نیروهای به‌دست آمده در پای ستون‌ها برای تحلیل و طراحی پی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روند توجهی به تاثیر نشست پی بر توزیع نیروها در اعضای سازه نمی‌شود. این در حالی است که اندرکنش بین سازه، پی و خاک زیرین آن (بستر انعطاف‌پذیر) رفتار واقعی سازه را در مقایسه با وضعیتی که سازه به تنهایی (بستر صلب) بررسی می‌شود تغییر می‌دهد. در این پژوهش، به مطالعه طرح بهینه قاب‌های خمشی بتن‌آرمه کوتاه، میان و بلند مرتبه همراه با پی و خاک زیر پی آن‌ها در سه لایه مختلف با عمق هر لایه برابر ده متر در نرم‌افزار سپ پرداخته می‌شود. همچنین، تمام قاب‌ها با استفاده از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی تحت قیود تنش و دررفت، در نرم‌افزار متلب بهینه‌سازی می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، از آنجایی که در یک سازه با طرح بهینه، معمولاً مقادیر تنش اعضا و دررفت طبقات، به حداکثر مقادیر مجاز طراحی بسیار نزدیک هستند، لذا افزایشی هر چند اندک در پاسخ سازه، ناشی از اثرات اندرکنش خاک-سازه، ممکن است موجب نقض قیود طراحی بهینه شود. بنابراین، عدم لحاظ چنین اثراتی در طراحی بهینه سازه می‌تواند منجر به حصول طرحی نه تنها غیربهینه بلکه ناایمن شود.

۱- مقدمه

سازه را به طور قابل توجهی نسبت به وضعیتی که سازه به تنهایی و با بستر صلب طراحی شده باشد تغییر داده و همچنین در نظر گرفتن نشست‌های ایجاد شده در پی سازه وضعیت توزیع بار جدیدی را در سازه روی پی ایجاد می‌کند که می‌تواند باعث آسیب دیدن و ترک برداشتن المان‌های موجود در سازه شود. به عبارت دیگر، با لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه می‌توان به منظور جلوگیری از خرابی‌های احتمالی در سازه اقداماتی را در نظر گرفت. از سوی دیگر، با توجه به این که ماهیت خاک زیر پی نسبت به سنگ بستر می‌تواند متفاوت باشد، بدون در نظر گرفتن سازه روی خاک در طراحی پی، اثرات موج‌های زلزله انتقالی از سنگ بستر تشدید می‌شود که با در نظر گرفتن سازه روی خاک این اثرات دچار تغییراتی می‌شوند که می‌تواند در طراحی پی و سازه تأثیرات مهمی داشته باشد. تمامی این تغییرات در اثرات اندرکنش خاک-سازه تعریف می‌شوند. به عبارت بهتر، این پدیده به بررسی اثرات متقابل خاک و سازه روی آن در اثر وقوع زلزله، و یا به طور کلی، بارهای دینامیکی می‌پردازد.

در حال حاضر روش متداول در طراحی ساختمان‌ها در ایران به صورت در نظر گرفتن بستر صلب برای سازه‌های قاب خمشی بتن‌آرمه می‌باشد. بعد از تحلیل و طراحی سازه نیروهای ایجاد شده در پای ستون‌ها ناشی از بارگذاری‌های در نظر گرفته شده در تحلیل و طراحی سازه استخراج شده و برای طراحی پی به نرم‌افزار مختص طراحی پی انتقال داده شده و سپس پی سازه به صورت مستقل از خود سازه تحلیل و طراحی می‌شود. از طرفی، پی‌های سازه‌های طراحی شده در اصل عملکردی انعطاف‌پذیر داشته و تحت بارهای وارده از طرف سازه و المان‌های روی آن، دچار نشست‌های کلی و غیریکنواخت می‌شود. با این حال، مهندسان هنگام تحلیل و طراحی پی سازه آن را صلب در نظر گرفته و اثرات نشست خاک زیر پی و همچنین انعطاف‌پذیری پی را بر روی پاسخ‌های سازه در نظر نمی‌گیرند. این در حالی است که، در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه رفتار واقعی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.rafee@maragheh.ac.ir



اندرکنش خاک-سازه می‌تواند موجب افزایش احتمال وقوع آسیب شود، لذا باید در مدل‌سازی لحاظ گردد.

وانگ و همکاران [۶] یک سازه بنایی بلندمرتبه را بر اساس عملکرد لرزه‌ای و با لحاظ اندرکنش خاک-سازه بررسی کردند. نتایج نشان داد اثر اندرکنش می‌تواند آسیب‌پذیری سازه‌های قدیمی را تشدید کند. مارکوس و همکاران [۷] به مطالعه تاثیرات اندرکنش خاک-سازه (SSI) و نیز اثرات روند ساخت سازه (IE)^۲ اعم از تاثیرات ناشی از مراحل پیشرفت ساخت مانند بارهای حین ساخت، در سازه‌های بلند بتنی دارای پی‌های کم عمق بر روی خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد اثر اندرکنش می‌تواند موجب بازتوزیع نامطلوب تلاش‌ها در شالوده شود.

اثرات اندرکنشی بر کیفیت کنترل ارتعاشات سازه‌ها نیز شایان توجه است. بدین منظور، رادکیا و همکاران [۸] تاثیر جداسازهای لرزه‌ای در سازه‌های فولادی نامتقارن را با لحاظ اندرکنش خاک-سازه بررسی کردند. نتایج حکایت از آن داشت که نوع خاک تاثیر چشمگیری بر پارامترهای طراحی جداسازها دارد. نظری مفرد و زهرایی [۹] کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های چندطبقه غیرمعمول با استفاده از کابل‌های پیش‌تنیدگی^۳ فعال با لحاظ اثر خاک-سازه را مطالعه کردند. نتایج نشان داد این کابل‌ها در مواقعی که سازه روی خاک نرم احداث شده باشد، کارایی بسیار کمی در کنترل ارتعاشات سازه خواهند داشت.

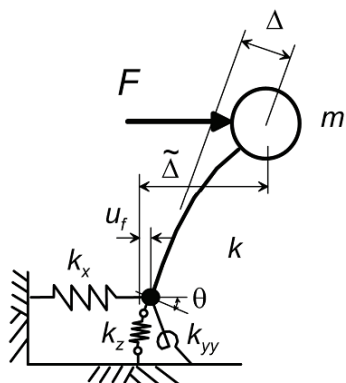
میتروپاولو و همکاران [۱۰] به بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه در ارزیابی شکنندگی سازه ساختمان‌های بتن‌آرمه و فولادی پرداختند. مشاهده شد سیستم شالوده مشارکت چشمگیری در عملکرد کلی سازه‌های بلندمرتبه دارد. حکم‌آبادی و فتاحی [۱۱] به مطالعه اثرات نوع پی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه پرداختند. نتایج نشان داد نوع پی می‌تواند در شدت اثرات اندرکنشی نقش تعیین‌کننده داشته باشد. کاراپترو و همکاران [۱۲] نیز به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های بلند غیرشکل‌پذیر بتن‌آرمه با لحاظ اندرکنش خاک-سازه پرداختند. بر اساس نتایج، اثرات اندرکنش و ساخت‌گاه، در هر دو حالت رفتار خطی یا غیرخطی خاک، می‌تواند نقش بسیار مهمی در عملکرد و شکنندگی ساختمان‌های بلند داشته باشد. همچنین، یگانه و همکاران [۱۳] نیز تحلیل لرزه‌ای اندرکنش خاک-سازه را برای یک ساختمان بلندمرتبه که در مجاورت یک حفاری عمیق قرار دارد، بررسی کردند و نتایج نشان داد که نحوه مدل‌سازی سازه

در ایران نیز اغلب ساختمان‌ها به صورت سازه‌های بتن‌آرمه ساخته می‌شوند، لذا مطالعه اثرات عوامل و متغیرهای گوناگون بر رفتار این سازه‌ها حائز اهمیت است. از طرفی، با توجه به افزایش روزافزون هزینه‌های مصالح و ساخت و اجراء، بهینه‌سازی طرح چنین سازه‌هایی بسیار مهم است. یکی از عواملی که مسلماً بر رفتار این سازه‌ها تاثیر بسزایی خواهد داشت، اندرکنش خاک با سازه و انعطاف‌پذیری پی است. این در حالی است که در کشور ما مطالعات کمی در این خصوص انجام گرفته است. البته تاکنون در برخی از منابع و پژوهش‌ها در جهان به طراحی بهینه‌ی ساختمان‌های بتن‌آرمه و همچنین مطالعه اندرکنش خاک-سازه پرداخته شده است. در ادامه، به منظور روشن‌تر شدن هر چه بیشتر اهمیت موضوع و خلاء پژوهشی منابع پیشین، به بررسی و تشریح مطالعات انجام شده در رابطه با طراحی بهینه ساختمان‌ها با لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه پرداخته می‌شود. در این بین، از پژوهش‌هایی که به مطالعه اثرات اندرکنش خاک-سازه پرداخته‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

خطیبی‌نیا و همکاران [۱] به طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد سازه‌های بتن‌آرمه با لحاظ اندرکنش خاک-سازه پرداختند. از دو قاب بتن‌آرمه دوبعدی ۶ و ۹ طبقه و روش مونت-کارلو استفاده شد. روش عددی جدید برای طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد ارائه شد و کارایی آن نشان داده شد. دال‌وگلو و همکاران [۲] نیز به طراحی بهینه قاب‌های فولادی فضایی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه پرداختند. از سه قاب خمشی فولادی سه‌بعدی ۲، ۴ و ۲۰ طبقه و روش‌های فراکاووشی استفاده شد و مقاطع بهینه برای اعضای قاب انتخاب شد. طراحی سازه بر مبنای آیین‌نامه AISC-LRFD [۳] انجام شد. چارچوب محاسباتی مناسب، بر اساس توسعه نرم‌افزاری، به منظور طراحی بهینه ساختمان‌های فولادی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه ارائه شد و دقت و کارایی آن ارزیابی شد.

آخوندی و بهنام‌فر [۴] در سال ۲۰۲۱ تاثیر تغییرات پارامترهای خاک در منحنی‌های شکنندگی سازه‌های فولادی را با لحاظ اندرکنش خاک-سازه مطالعه کردند. از سه قاب خمشی ویژه فولادی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه استفاده شد و با نظریه تیر و شالوده غیرخطی وینکلر مدل‌سازی انجام گرفت. نتایج نشان داد از بین پارامترهای مختلف خاک، مدول برشی خاک بیشترین تاثیر را بر منحنی‌های شکنندگی دارد. راجدی و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی خطر و رفتار لرزه‌ای یک پل بتن‌آرمه موجود با لحاظ اندرکنش خاک-سازه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. از این طریق پاسخ سازه پیش‌بینی شد و منحنی‌های شکنندگی ترسیم شدند. نتایج نشان داد

1 Soil-Structure Interaction
2 Incremental Constructive Effects
3 Tendon



شکل ۱. مدل یک درجه آزادی خاک - سازه [۱۷]

Fig. 1. Single-Degree-of-Freedom soil-structure model [17]

است.

با اعمال نیروی جانبی به این سامانه، جابجایی آن تحت اثر سه پارامتر k_x ، k_{yy} و k_z قرار می‌گیرد. رابطه (۱) این مقدار را نشان می‌دهد:

$$\Delta = \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{F \cdot h}{k_{yy}} \right) \quad (1)$$

که در آن h ارتفاع جرم از پایه سازه است؛ k سختی ساختمان در حالت انتهایی بسته است که از رابطه (۲) به دست می‌آید، و سایر پارامترها نیز قبلاً بیان شده‌اند.

$$k = 4\pi^2 \left(\frac{W}{gT^2} \right) \quad (2)$$

که g شتاب جاذبه زمین بوده و T در رابطه (۳) شرح داده شده است. همچنین، \bar{W} بار وزن مؤثر ساختمان است. بر این اساس، تغییرشکل سازه با در نظرگیری اثرات خاک افزایش می‌یابد. برای تعمیم این رابطه به چند درجه آزادی، می‌توان ضریبی از ارتفاع موردنظر در سازه چند درجه را به عنوان ارتفاع مورد نظر استفاده کرد که مقدار این ضریب معمولاً ۰/۷ است. با این کار می‌توان برای به دست آوردن دوره تناوب مود اول سازه چند درجه آزادی

اصلی نیز می‌تواند بر پاسخ سازه در چنین شرایطی تاثیرگذار باشد.

به علاوه، از بین پژوهش‌هایی که صرفاً به طراحی بهینه ساختمان‌های بتن‌آرمه (بدون لحاظ اثرات خاک و پی) پرداخته‌اند، به موارد زیر اشاره می‌گردد:

کواک و کیم [۱۴] یک الگوریتم بهبودیافته برای طراحی بهینه قاب‌های ساختمانی بتن‌آرمه پیشنهاد کردند. از دو قاب دو بعدی ۳ و ۶ طبقه و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان از کارایی مناسب روش ارائه شده دارد. شولی و همکاران [۱۵] نیز الگوریتمی ترکیبی برای طراحی بهینه قاب‌های ساختمانی بتن‌آرمه ارائه دادند. روش طراحی بهینه، مبتنی بر عملکرد سازه بود و از سه قاب دو بعدی ۳، ۶ و ۹ طبقه و الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات استفاده شد. نتایج این تحقیق نیز نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی بود. به علاوه، ژو و همکاران [۱۶] هم روشی را مبتنی بر پس-انتشار^۱ برای طراحی بهینه لرزه‌ای سازه‌های قابی بتن‌آرمه و فولادی توسعه دادند. از قاب‌های مختلف سه‌بعدی بتن‌آرمه و فولادی دارای مهاربند استفاده شد. هدف اصلی در این پژوهش نیز توسعه روش عددی مناسب برای پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای و طراحی بهینه سازه بود و بر همین اساس، عملکرد روش پیشنهادی ارزیابی شد.

همان‌طور که از مرور فوق بر پژوهش‌های پیشین آشکار است، در منابع، یا به مطالعه سازه‌های فولادی و پل‌ها پرداخته شده است؛ یا ساختمان‌های مورد مطالعه صرفاً از نوع با طبقات کم (غیر بلند) بوده‌اند؛ و یا اساساً اثرات خاک و پی در تحلیل و طراحی ساختمان لحاظ نشده و صرفاً بهینه‌سازی آن مدنظر بوده و هدف از پژوهش فقط ارائه چارچوب محاسباتی بوده است. از همین روی، در این پژوهش، به طراحی بهینه ساختمان‌های بتن‌آرمه، با در نظر گرفتن اثرات خاک و انعطاف‌پذیری پی پرداخته می‌شود. به همین منظور، قاب خمشی کوتاه مرتبه ۴ طبقه، میان مرتبه ۱۲ طبقه و بلندمرتبه ۲۴ طبقه همراه با پی و خاک زیر پی آن‌ها در سه لایه مختلف با عمق هر لایه برابر ۱۰ متر با استفاده از نرم‌افزار سپ^۲ مطالعه می‌شود.

۲- اثرات تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

به طور کلی برای بررسی تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، می‌توان خاک را مطابق شکل ۱، به صورت فنرهایی مدل کرد، بنابراین بر اساس این شکل، می‌توان خاک را با دو فنر انتقالی (k_x و k_z) و یک فنر دورانی (k_{yy}) جایگزین نمود. سازه موردنظر یک درجه آزادی می‌باشد که قابل تعمیم به چند درجه آزادی

1 Back-Propagation
2 SAP2000

با استفاده از روابط اساسی دینامیک، رابطه (۱) را به رابطه (۳) تبدیل کرد:

$$\frac{T}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{k \cdot h^2}{k_{yy}}} \quad (3)$$

که در آن T و \tilde{T} به ترتیب دوره تناوب سازه با بستر انعطاف‌پذیر و صلب هستند.

بخش دیگری از رفتار اندرکنش خاک-سازه مربوط به اثرات میرایی خاک است که در اندرکنش اینرسی خاک منظور می‌شود. میرایی خاک شامل دو بخش میرایی پسماند^۱ خاک و تشعشی است؛ بنابراین رابطه (۴) برای احتساب میرایی سامانه ایجاد شده است:

$$\beta_0 = \beta_f + \left(\frac{T}{T}\right)^{-n} \beta_i \quad (4)$$

که در آن β_f ، β_i و n به ترتیب میرایی پی، میرایی سازه و توان دوره تناوب که مقدار آن در آیین‌نامه‌ها مشخص شده است، می‌باشند.

بخش دیگری از اثرات اندرکنش خاک-سازه، اندرکنش حرکتی خاک است، که بیانگر رفتار خاک در صورت وجود یا عدم وجود سازه می‌باشد. اندرکنش حرکتی، نسبت پاسخ پی به پاسخ میدان آزاد را بیان می‌کند. این مسئله در رابطه (۵) نشان داده شده است:

$$u_{FIM} = H_u \times u_g \quad (5)$$

که در آن u_{FIM} ، H_u و u_g به ترتیب بیانگر پاسخ پی، ضریب پاسخ در وضعیت اندرکنش حرکتی و پاسخ میدان آزاد هستند. مقدار H_u در آیین‌نامه‌های مربوطه آمده است.

۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه

برای اطمینان از درستی مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه در پژوهش حاضر، در این بخش به صحت‌سنجی مدل عددی ساخته شده پرداخته می‌شود. در واقع، مدل‌سازی نمونه‌ای نزدیک به موضوع تحقیق حاضر و

1 Hysteretic

مقایسه نتایج آن با داده‌های گزارش شده در منابع پیشین، جهت اطمینان از عملکرد صحیح نرم‌افزار و دقت کافی تحلیل سازه بسیار حائز اهمیت بوده و در رسیدن به نتایج قابل اعتماد مؤثر خواهد بود. به همین منظور، در این پژوهش، صحت‌سنجی مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه با مدل‌سازی نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی مطالعه شده توسط آلدایخ و همکاران [۱۸] صورت گرفته است.

در مدل آزمایشگاهی مذکور، یک سازه مقیاس شده از جنس آلومینیوم مطابق با شکل ۲ بر روی قطعه‌ای از فوم پلی‌اورتان (به عنوان خاک) قرار گرفته است. همچنین، آلدایخ و همکاران مدل اجزاء محدود این نمونه‌ی آزمایشگاهی را با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس^۲ ایجاد کردند. علاوه بر مدل نرم‌افزاری مذکور، فتح‌الله‌پور و همکاران [۱۹] نیز با هدف صحت‌سنجی، مدل آزمایشگاهی شکل ۲ را با استفاده همزمان از نرم‌افزارهای این‌سیس^۳ و آباکوس^۴ مدل‌سازی کردند.

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی در پژوهش حاضر، زمان تناوب مربوط به نمونه‌ی شکل ۲ در دو حالت بستر صلب^۵ (بدون لحاظ اندرکنش خاک-سازه) و بستر انعطاف‌پذیر^۶ (با لحاظ اندرکنش خاک-سازه) مطابق با جدول ۱ به دست می‌آید. طبق نتایج این جدول، می‌توان مشاهده کرد که مدل عددی ایجاد شده در تحقیق حاضر با نرم‌افزار سپ (شکل ۳) برای در نظر گرفتن اندرکنش میان خاک و سازه نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد.

۴- مطالعه عددی مثال‌های سازه‌ای

در این بخش به بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه بر تنش‌های ایجاد شده در اعضای سازه و همچنین بر تغییرمکان جانبی نسبی ایجاد شده در طبقات سازه، در وضعیت طرح بهینه سازه پرداخته می‌شود. به عبارت بهتر، سازه‌های معیار با طرح بهینه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه مدل‌سازی شده و سپس به مقایسه نتایج به دست آمده در دو شرایط سازه با بستر صلب (بدون اثرات اندرکنش) و سازه با در نظر گرفتن اثرات خاک و پی (با لحاظ اندرکنش / بستر انعطاف‌پذیر) پرداخته می‌شود.

در تحقیق حاضر، به منظور مدل‌سازی خاک زیر سازه، از پژوهش خطیبی‌نیا و همکاران [۱] استفاده شده است. بر همین اساس، خاک زیر سازه در سه لایه، با ضخامت هر لایه برابر ۱۰ متر، در نظر گرفته شده که سرعت

2 PLAXIS2D
3 OpenSEES
4 ABAQUS
5 Fixed-Base
6 Flexible-Base



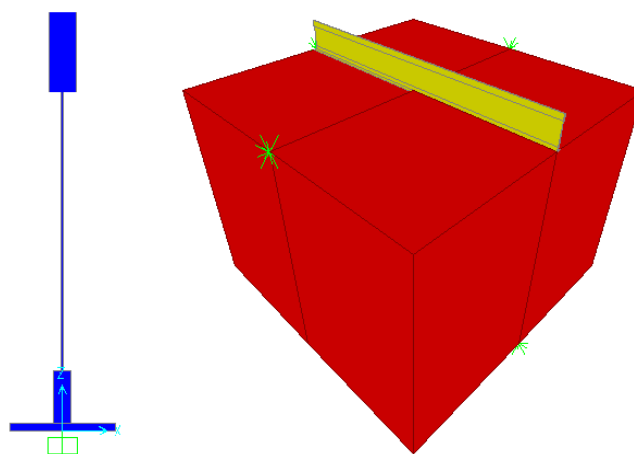
شکل ۲. نمونه‌ی آزمایشگاهی مطالعه شده توسط آلدایخ و همکاران [۱۸]

Fig. 2. The experimental specimen studied by Aldaikh et al. [18]

جدول ۱. مقایسه نتایج زمان تناوب سازه در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

Table 1. Comparison of structural periods obtained by experimental and numerical models

زمان تناوب اصلی سازه (ثانیه)				وضعیت سازه
مدل پژوهش حاضر	مدل این‌سیس-آباکوس [۱۹]	مدل پلکسیس [۱۸]	مدل آزمایشگاهی [۱۸]	
۰/۱۱۰۵	۰/۱۱	۰/۱۱۰۸	۰/۱۱۰۷	سازه بر روی بستر صلب
۰/۱۸۵۹	۰/۱۸۵	۰/۱۸۸۶	۰/۱۹۰۵	سازه بر روی بستر انعطاف‌پذیر



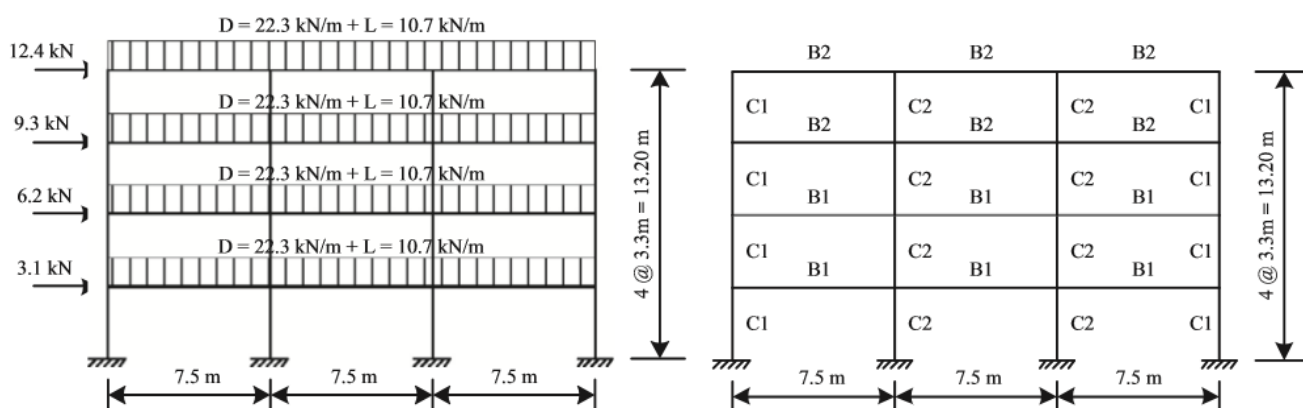
شکل ۳. مدل عددی پژوهش حاضر

Fig. 3. Numerical model of present study

جدول ۲. مشخصات لایه‌های خاک

Table 2. Properties of soil layers

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	سرعت موج برشی (V_s) (m/s)	لایه خاک
۳۷/۵	۳۷۵	لایه اول (پایینی)
۳۷/۵	۳۰۰	لایه دوم (وسط)
۳۲/۵	۲۰۰	لایه سوم (بالایی)



شکل ۴. هندسه، بارگذاری و گروه‌بندی اعضای ساختمان ۴ طبقه [۲۱]

Fig. 4. Geometry, loading and member grouping for 4-story building [21]

۴-۱- ساختمان ۴ طبقه

به عنوان یک نمونه از ساختمان کوتاه‌مرتبه، اولین مثال سازه‌ای یک ساختمان بتن‌آرمه ۴ طبقه است که اعضای باربر آن توسط تاپائو و چیراروت [۲۱] بهینه‌سازی شده است. جزئیات هندسه، بارگذاری و گروه‌بندی اعضای این قاب خمشی بتن‌آرمه در شکل ۴ نشان داده شده است.

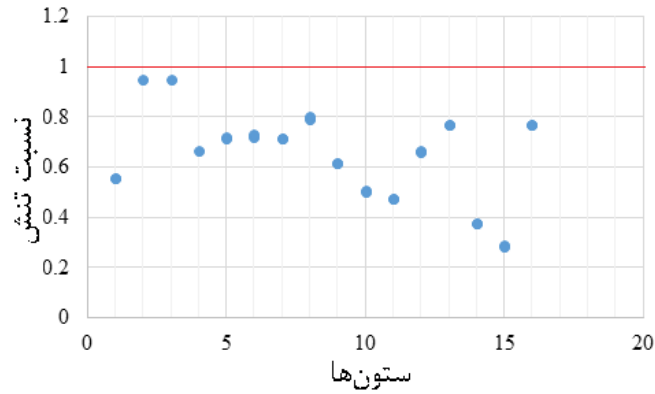
تاپائو و چیراروت [۲۱] اعضای باربر این قاب را با استفاده از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی^۲ (ABC)، بهینه‌سازی کردند. این الگوریتم که اولین بار توسط کارابوگا [۲۲] ارائه شده، از رفتار اجتماعی زنبورهای عسل یک کلونی در طبیعت و این‌که چگونه با همکاری همدیگر طی یک کار گروهی به جستجوی شهد گل‌ها می‌پردازند، الگوبرداری شده است. به منظور صحت‌سنجی بهینه‌سازی مذکور، در پژوهش حاضر نیز مجدداً این قاب با

موج برشی و زاویه اصطکاک لایه‌ها مطابق جدول ۲ می‌باشد. همچنین، در این پژوهش، مدل‌سازی سیستم اندرکنش خاک-سازه بر مبنای روش مستقیم^۱ انجام شده است. این روش قابلیت آن را دارد که با تحلیل سیستم اندرکنش خاک-سازه در یک گام، پاسخ‌های سازه و خاک را به طور همزمان تعیین کند. همچنین، این روش می‌تواند مرزهای بی‌نهایت واقعی خاک را با استفاده از مرزهای مصنوعی مدل کند.

علاوه بر این، به منظور مطالعه اثر اندرکنش خاک-سازه بر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات، مقادیر این دررفت طبقات با مقدار مجاز آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۲۰] مقایسه و ارزیابی می‌شود. طبق این آیین‌نامه، مقدار دررفت مجاز طبقات بر حسب تعداد طبقات و ضریب بزرگنمایی C_d تعیین می‌گردد، که این ضریب نیز بسته به سیستم سازه‌ای ساختمان متغیر است.

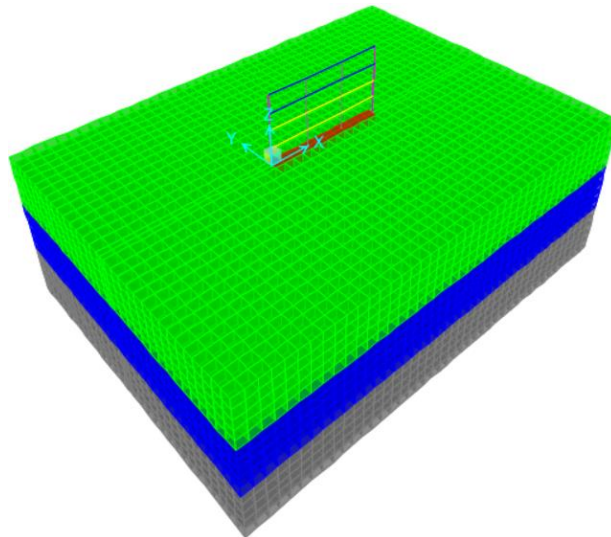
2 Artificial Bee Colony

1 Direct method



شکل ۵. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۴ طبقه (بستر صلب)

Fig. 5. DCRs in columns of 4-story building (fixed-base)



شکل ۶. مدل ساختمان ۴ طبقه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه

Fig. 6. 4-story building model considering soil-structure interaction

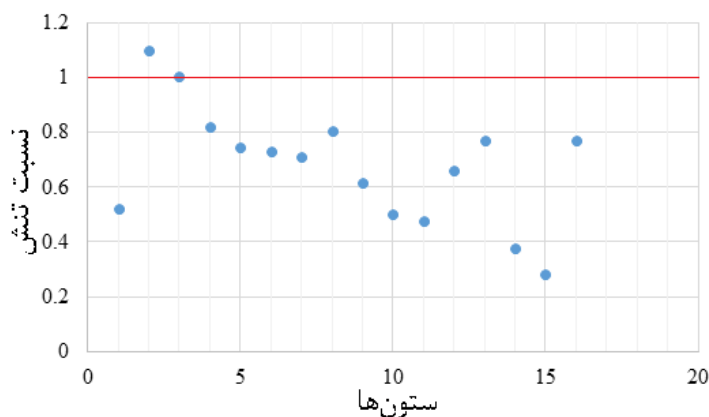
و چیراروت [۲۱] منجر شد. بدین ترتیب، صحت بهینه بودن مقاطع در طرح‌های بهینه سازه معیار مورد مطالعه، احراز می‌گردد. به طور نمونه، شکل ۵ نتایج نسبت تنش در اعضای طرح بهینه‌ی این قاب را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، نسبت تنش ناشی از تاثیر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی در تمامی اعضای این قاب کمتر از حد مجاز تعیین شده در قیود بهینه‌سازی (کمتر از ۱) است.

مدل نرم‌افزاری این ساختمان به انضمام پی و لایه‌های خاک مطابق شکل ۶ می‌باشد. نسبت تنش در اعضای این سازه نیز در جدول ۳ در دو

الگوریتم ABC و تحت همان قیود طراحی، بهینه‌سازی شد. رابطه (۶) فرمول‌بندی این مساله بهینه‌سازی را به طور خلاصه و به سادگی بیان می‌کند.

$$\begin{aligned}
 & \text{جستجو کنید: مقاطع بهینه را برای اعضای سازه، از بین مقاطع ممکن؛} \\
 & \text{به طوری که: هزینه کل سازه کمینه شود؛} \\
 & \text{به شرطی که: اولاً تنش ناشی از اثر همزمان نیروی محوری + لنگر} \\
 & \text{خمشی در هیچ عضوی از حد مجاز آیین‌نامه طراحی فراتر نرود؛ ثانیاً}
 \end{aligned}
 \tag{۶}$$

نتایج بهینه‌سازی مقاطع در پژوهش حاضر، دقیقاً به همان نتایج تاپائو



شکل ۷. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۴ طبقه (با لحاظ اندرکنش خاک-سازه)

Fig. 7. DCRs in columns of 4-story building (flexible-base)

جدول ۳. نسبت تنش اعضای سازه ۴ طبقه در دو شرایط با بستر صلب و با لحاظ اندرکنش خاک-سازه

Table 3. DCRs in columns of 4-story building; fixed-base and flexible-base

نسبت تنش در اعضا		شماره عضو	نسبت تنش در اعضا		شماره عضو
با لحاظ اندرکنش خاک-سازه	بستر صلب		با لحاظ اندرکنش خاک-سازه	بستر صلب	
۰/۶۱۶	۰/۶۱۷	۹	۰/۵۲۱	۰/۵۵۸	۱
۰/۵۰۴	۰/۵۰۵	۱۰	۱/۱۰۲	۰/۹۵۱	۲
۰/۴۷۵	۰/۴۷۵	۱۱	۱/۰۰۶	۰/۹۵۱	۳
۰/۶۶۳	۰/۶۶۱	۱۲	۰/۸۲	۰/۶۶۴	۴
۰/۷۷۱	۰/۷۶۷	۱۳	۰/۷۴۶	۰/۷۱۶	۵
۰/۳۷۶	۰/۳۷۸	۱۴	۰/۷۳۳	۰/۷۲	۶
۰/۲۸۵	۰/۲۸۸	۱۵	۰/۷۱۲	۰/۷۱۲	۷
۰/۷۷۱	۰/۷۶۷	۱۶	۰/۸۰۴	۰/۷۹۳	۸

نمی‌کند. اما آنچه که مهم است این است که با لحاظ اندرکنش خاک-سازه، در برخی از اعضای سازه‌ای که طرح مقاطع آن بهینه شده است، افزایش تنش رخ می‌دهد. چنین افزایشی زمانی در طراحی بهینه سازه نگران‌کننده می‌شود که بتواند باعث شود در ستونی از سازه، نسبت تنش به مقداری فراتر از حد مجاز معین شده در قیود طراحی بهینه برسد. از همین روی، با توجه به این که در یک طرح بهینه غالباً نسبت‌های تنش مقادیری نزدیک به حد مجاز دارند، لذا افزایشی هر چند اندک به احتمال زیاد می‌تواند موجب نقض شدن قیود طراحی بهینه گردد و در نتیجه طرحی نایمن حاصل شود. این مورد در طرح بهینه‌ای که در آن قید تنش فعال باشد، بسیار محتمل است. بر همین

وضعیت سازه با بستر صلب و سازه با بستر انعطاف‌پذیر گزارش شده است. با استفاده از این جدول می‌توان نتایج حاصل از تحلیل سازه با لحاظ و عدم لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه بر نسبت تنش اعضا را بررسی و مقایسه نمود. نتایج مربوط به تحلیل سازه با لحاظ اندرکنش در شکل ۷ نیز به صورت گرافیکی نمایش داده شده است. می‌توان از مقایسه شکل ۷ با شکل ۵، تاثیر وضعیت بستر بر تنش اعضا را به صورت گرافیکی مشاهده کرد.

بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌گردد که در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در سازه ۴ طبقه، در برخی از اعضا موجب کاهش تنش می‌شود و در برخی دیگر از اعضا تغییر چندانی در میزان تنش ایجاد

جدول ۴. تغییر مکان جانبی و دررفت نسبی ایجاد شده در طبقات ساختمان ۴ طبقه

Table 4. Lateral displacement and drift ratios of stories of 4-story building

طبقه	تغییر مکان جانبی (cm)		نسبت دررفت	
	بستر صلب	اندرکنش خاک-سازه	بستر صلب	اندرکنش خاک-سازه
طبقه ۴	۱/۰۸۸۴	۱/۹۶۲۹	۰/۰۰۰۴۷۳	۰/۰۰۰۴۷۵
طبقه ۳	۰/۹۳۲۵	۱/۸۰۶۲	۰/۰۰۰۸۳۹	۰/۰۰۰۸۵۲
طبقه ۲	۰/۶۵۵۷	۱/۵۲۵۱	۰/۰۰۱۰۷۹	۰/۰۰۱۲۴۹
طبقه ۱	۰/۲۹۹۶	۱/۱۱۲۹	۰/۰۰۰۹۰۸	۰/۰۰۳۳۷
پی	۰	۰/۰۰۰۷۲۳	۰	۲,۱۹E-۰۶

افزایش هر چند اندک در مقدار دررفت طبقات سبب تجاوز از حد مجاز تعیین شده در قیدهای طراحی بهینه خواهد شد.

همچنین، از نتایج این مثال مشاهده می‌گردد که در حالت سازه با بستر انعطاف‌پذیر، صرفاً به دلیل نقض شدن قیدهای تنش، طرح بهینه به دست آمده در حالت بستر صلب، نایمن محسوب شده و به این دلیل باید در طرح سازه بازنگری شده و از مقاطع مناسب‌تری استفاده گردد. این در حالی است که قیدهای دررفت تمام طبقات سازه، در هر دو حالت بستر سازه، رعایت شده‌اند. این نتیجه درباره یک سازه کوتاه‌مرتبه به دست آمده است. در بخش‌های بعدی، به مطالعه دو مثال دیگر از سازه‌های مرتفع‌تر پرداخته می‌شود.

۴-۲- ساختمان ۱۲ طبقه

دومین مثال سازه‌ای در پژوهش حاضر، نمونه‌ای از یک ساختمان میان‌مرتبه است. جزئیات هندسی به همراه نحوه بارگذاری و گروه‌بندی اعضا برای این ساختمان ۱۲ طبقه در شکل ۸ نشان داده شده است. اعضای برابر این قاب خمشی بتن‌آرمه توسط تاپائو و چیراروت [۲۱] با استفاده از الگوریتم ABC، بهینه‌سازی شده است. در پژوهش حاضر نیز با هدف صحت‌سنجی بهینه‌سازی انجام یافته، این قاب با همان الگوریتم و تحت همان قیود طراحی، مجدداً بهینه‌سازی شد. بهینه‌سازی مقاطع این سازه در پژوهش حاضر، دقیقاً به همان نتایج پژوهش تاپائو و چیراروت [۲۱] منتج شد. به عنوان نمونه، نسبت تنش ناشی از تاثیر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی در اعضای طرح بهینه‌ی این ساختمان در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود نسبت تنش در تمام اعضای

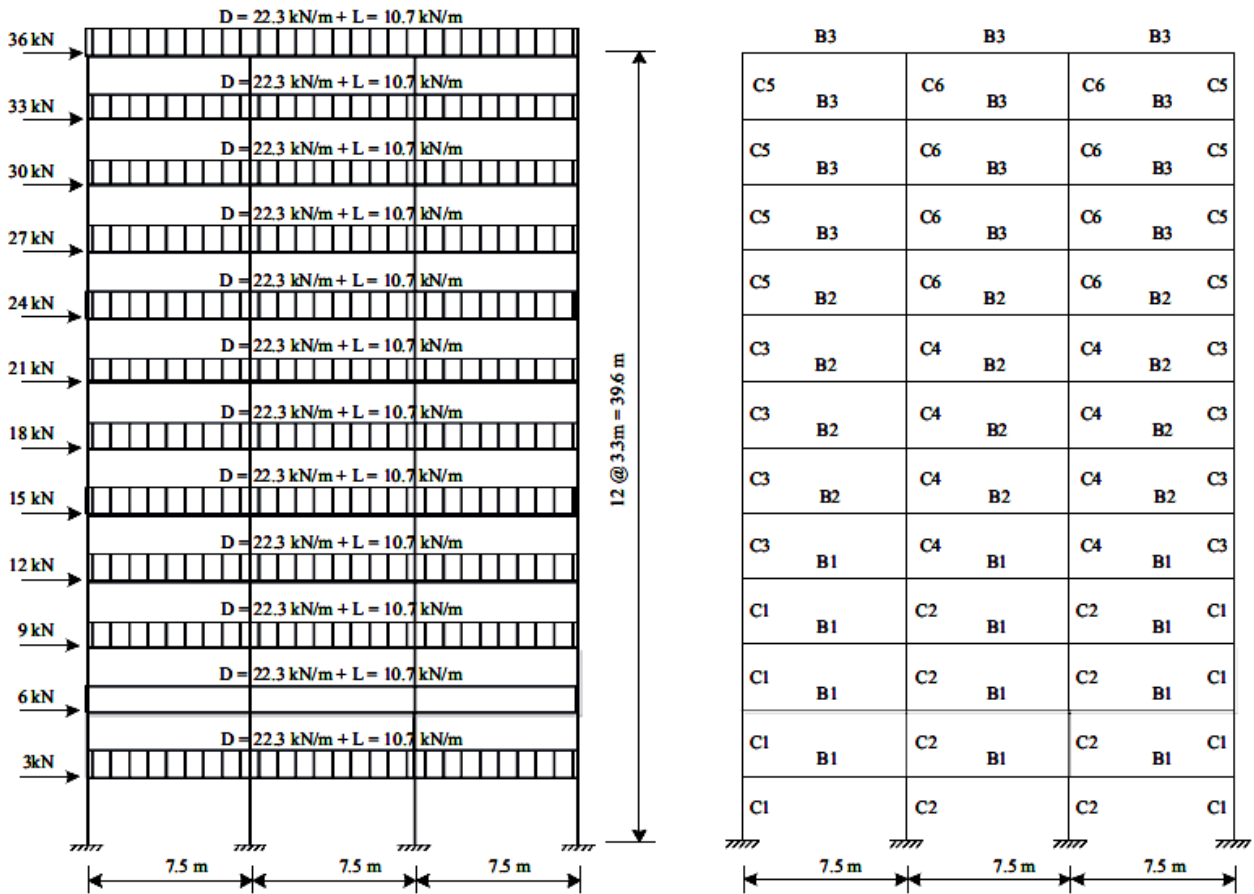
اساس، در فرآیند طراحی بهینه یک ساختمان بتن‌آرمه لازم است به اثرات اندرکنش خاک با سازه توجه ویژه شود تا بدین ترتیب بهینه‌سازی سازه منجر به طرحی نایمن نگردد.

در ادامه به بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر تغییر مکان جانبی نسبی طبقات در طرح بهینه سازه پرداخته می‌شود. با توجه به این که سیستم سازه‌ای این ساختمان ۴ طبقه از نوع قاب خمشی بتن‌آرمه ویژه می‌باشد [۲۱]، لذا بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۲۰] ضریب بزرگنمایی C_d برای آن برابر ۵/۵ بوده و بنابراین حد مجاز دررفت طبقات آن برابر است با

$$\frac{0.02}{C_d} = \frac{0.02}{5.5} = 0.0036 \quad (7)$$

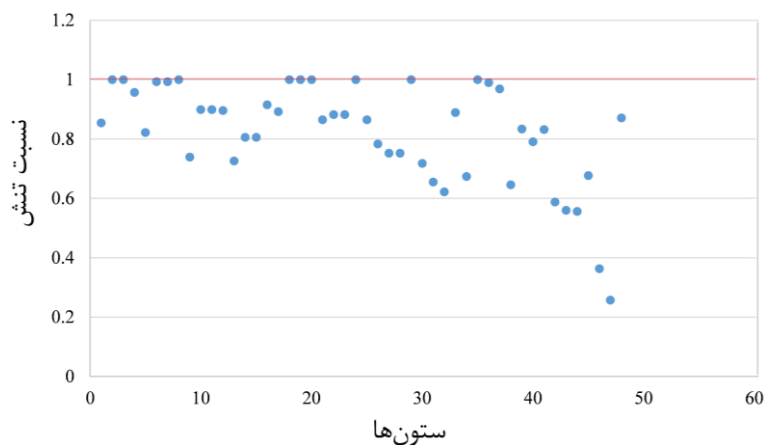
دررفت نسبی ایجاد شده در طبقات ساختمان ۴ طبقه، تحت دو شرایط سازه با بستر صلب و سازه با لحاظ اندرکنش خاک-سازه در جدول ۴ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود علی‌رغم این که در هر دو شرایط بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر دررفت نسبی تمام طبقات کمتر از حد مجاز ۰/۰۰۳۶ می‌باشد، با این حال، نسبت دررفت طبقات در حالتی که اثر اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته می‌شود از حالت سازه با بستر صلب بیشتر است، چنین افزایشی زمانی مشکل‌ساز خواهد شد که در طرح بهینه‌سازی شده سازه مقادیر دررفت نسبی به مقدار حداکثر مجاز خود نزدیک باشند، یا در اصطلاح فنی، قید تغییر مکان فعال باشد. در چنین طرح بهینه‌ای



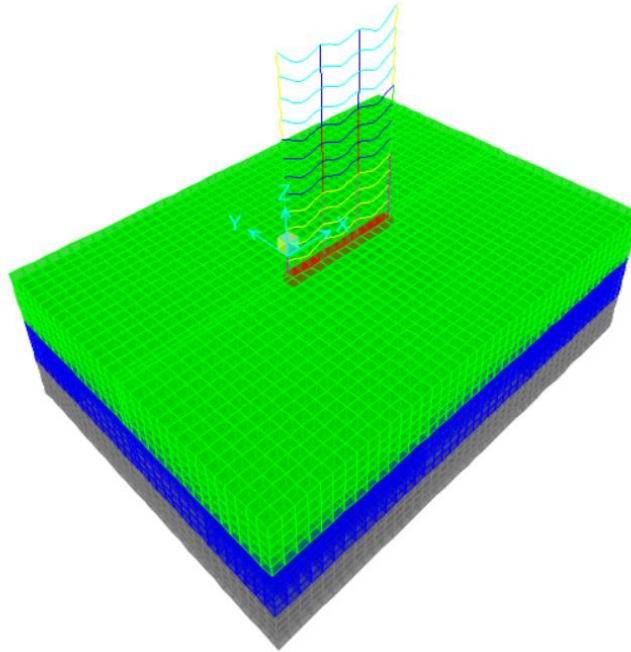
شکل ۸. هندسه، بارگذاری و گروه‌بندی اعضای ساختمان ۱۲ طبقه [۲۱]

Fig. 8. Geometry, loading and member grouping for 12-story building [21]



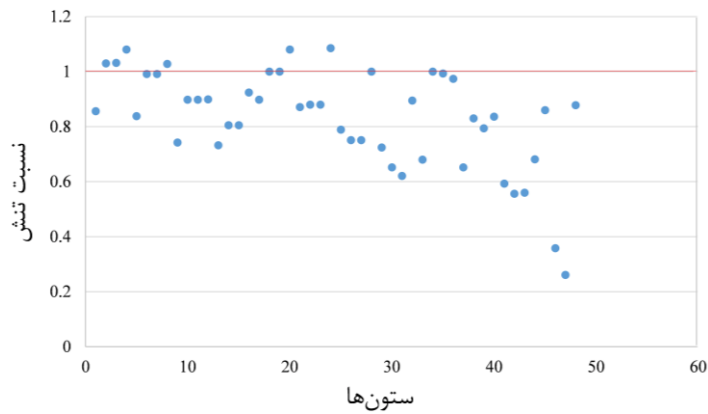
شکل ۹. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۱۲ طبقه (بستر صلب)

Fig. 9. DCRs in columns of 12-story building (fixed-base)



شکل ۱۰. مدل ساختمان ۱۲ طبقه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه

Fig. 10. 12-story building model considering soil-structure interaction



شکل ۱۱. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۱۲ طبقه (با لحاظ اندرکنش خاک-سازه)

Fig. 11. DCRs in columns of 12-story building (flexible-base)

این سازه را گزارش می‌دهد، می‌توان به بررسی و مقایسه تاثیر اندرکنش خاک-سازه بر تنش اعضا، در دو شرایط بستر صلب (بدون اندرکنش) و با لحاظ اثرات اندرکنش (بستر انعطاف‌پذیر)، پرداخت. همچنین، نمودار شکل ۱۱ نسبت تنش اعضای این سازه را در شرایطی که اثر اندرکنش خاک-سازه لحاظ شده باشد، به صورت گرافیکی نشان می‌دهد. نتایج گرافیکی در شرایط

این سازه کمتر از حد مجاز تعیین شده در قید تنش مساله بهینه‌سازی است. بنابراین، از این طریق می‌توان از صحت بهینه بودن مقاطع در طرح بهینه‌ی این سازه‌ی معیار، اطمینان حاصل کرد.

شکل ۱۰ مدل عددی این ساختمان را همراه با شالوده و لایه‌های خاک زیرین نمایش می‌دهد. بر اساس جدول ۵، که نسبت تنش در اعضای

جدول ۵. نسبت تنش اعضای سازه ۱۲ طبقه در دو شرایط با بستر صلب و با لحاظ اندرکنش خاک-سازه

Table 5. DCRs in columns of 12-story building; fixed-base and flexible-base

نسبت تنش در اعضا		شماره عضو	نسبت تنش در اعضا		شماره عضو
با لحاظ اندرکنش خاک-سازه	بستر صلب		با لحاظ اندرکنش خاک-سازه	بستر صلب	
۰/۷۸۹	۰/۸۶۵	۲۵	۰/۸۵۶	۰/۸۵۴	۱
۰/۷۵۱	۰/۷۸۳	۲۶	۱/۰۳	۱	۲
۰/۷۵۱	۰/۷۵۲	۲۷	۱/۰۳۲	۱	۳
۱	۰/۷۵۲	۲۸	۱/۰۸	۰/۹۵۷	۴
۰/۷۲۴	۱	۲۹	۰/۸۳۸	۰/۸۲۲	۵
۰/۶۵۲	۰/۷۱۸	۳۰	۰/۹۹۱	۰/۹۹۳	۶
۰/۶۲۱	۰/۶۵۵	۳۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۳	۷
۰/۸۹۵	۰/۶۲۲	۳۲	۱/۰۲۸	۱	۸
۰/۶۸	۰/۸۸۹	۳۳	۰/۷۴۲	۰/۷۳۹	۹
۱	۰/۶۷۴	۳۴	۰/۸۹۸	۰/۸۹۹	۱۰
۰/۹۹۳	۱	۳۵	۰/۸۹۸	۰/۸۹۹	۱۱
۰/۹۷۴	۰/۹۹	۳۶	۰/۸۹۹	۰/۸۹۶	۱۲
۰/۶۵۲	۰/۹۶۹	۳۷	۰/۷۳۲	۰/۷۲۶	۱۳
۰/۸۳	۰/۶۴۶	۳۸	۰/۸۰۵	۰/۸۰۶	۱۴
۰/۷۹۴	۰/۸۳۴	۳۹	۰/۸۰۵	۰/۸۰۶	۱۵
۰/۸۳۶	۰/۷۹۱	۴۰	۰/۹۲۴	۰/۹۱۵	۱۶
۰/۵۹۳	۰/۸۳۲	۴۱	۰/۸۹۸	۰/۸۹۲	۱۷
۰/۵۵۶	۰/۵۸۸	۴۲	۱	۱	۱۸
۰/۵۶	۰/۵۶	۴۳	۱	۱	۱۹
۰/۶۸۱	۰/۵۵۶	۴۴	۱/۰۸	۱	۲۰
۰/۸۶	۰/۶۷۷	۴۵	۰/۸۷۱	۰/۸۶۵	۲۱
۰/۳۵۸	۰/۳۶۳	۴۶	۰/۸۸	۰/۸۸۲	۲۲
۰/۲۶۱	۰/۲۵۷	۴۷	۰/۸۸	۰/۸۸۲	۲۳
۰/۸۷۸	۰/۸۷۱	۴۸	۱/۰۸۵	۱	۲۴

جدول ۶. دریفت نسبی ایجاد شده در طبقات ساختمان ۱۲ طبقه

Table 6. Drift ratios of stories of 12-story building

طبقه	نسبت دریفت	
	بستر صلب	اندرکنش خاک-سازه
طبقه ۱۲	۰/۰۰۰۶۹۵	۰/۰۰۰۷۰۵
طبقه ۱۱	۰/۰۰۱۲۱۱	۰/۰۰۱۲۲۱
طبقه ۱۰	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۱۷
طبقه ۹	۰/۰۰۲۰۲۳	۰/۰۰۲۰۳۳
طبقه ۸	۰/۰۰۱۵۴۴	۰/۰۰۱۵۵۴
طبقه ۷	۰/۰۰۱۷۴۶	۰/۰۰۱۷۵۶
طبقه ۶	۰/۰۰۱۹۰۲	۰/۰۰۱۹۱۲
طبقه ۵	۰/۰۰۱۹۵۳	۰/۰۰۱۹۶۷
طبقه ۴	۰/۰۰۱۵۷۴	۰/۰۰۱۶۰۵
طبقه ۳	۰/۰۰۱۵۸۵	۰/۰۰۱۶۹۳
طبقه ۲	۰/۰۰۱۴۸۳	۰/۰۰۱۹۶۹
طبقه ۱	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۳۱۶۷
پی	.	۰/۰۰۰۰۰۸۵۴

نتایج جدول ۶ حاکی است، مشابه با مثال قبلی، در این مثال نیز علی‌رغم این‌که در هر دو شرایط سازه با بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر، دریفت نسبی تمام طبقات کمتر از حد مجاز است؛ با این وجود، نسبت دریفت طبقات در حالتی که اثر اندرکنش خاک-سازه ملحوظ می‌گردد، در مقایسه با حالت سازه با بستر صلب، بیشتر است. این افزایش دریفت در مواردی که قیود تغییرمکان در مساله طراحی بهینه سازه، فعال باشد، بسیار نگران‌کننده خواهد بود و می‌تواند موجب تجاوز مقدار دریفت سازه از حد مجاز آیین‌نامه‌ی طراحی گردد. لذا، به منظور جلوگیری از طراحی نامناسب و غیرقابل قبول^۱ سازه، لحاظ این اثر اندرکنشی در تحلیل‌های فرآیند بهینه‌سازی سازه، امری لازم و ضروری است. همچنین، مقایسه نتایج دریفت سازه در دو ساختمان ۱۲ طبقه و ۴ طبقه (جداول ۳ و ۵) نشان می‌دهد، زمانی که اثر اندرکنش خاک-سازه لحاظ می‌گردد، احتمال نقض قید تغییرمکان در طبقه اول سازه در مقایسه با سایر طبقات، بیشتر است.

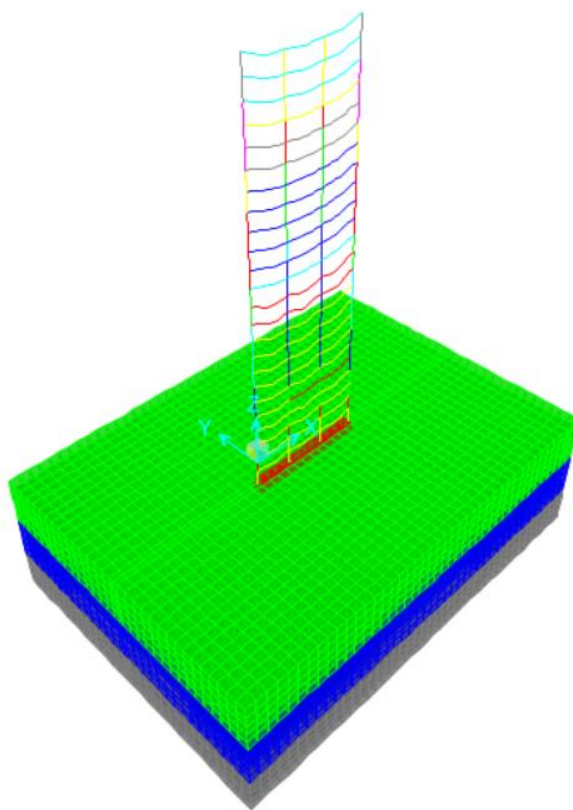
همچنین، مشابه مثال قبل، نتایج این مثال نیز حاکی است، در حالت بستر انعطاف‌پذیر، فقط به دلیل نقض قید تنش، طرح بهینه حالت بستر صلب،

بستر صلب نیز در شکل ۹ نمایش داده شده بود. به طریقی مشابه با مثال قبلی، می‌توان با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۱، تاثیر وضعیت خاک و پی بر تنش اعضا را به صورت گرافیکی مشاهده و مقایسه نمود.

با بررسی نتایج حاصل شده مشاهده می‌شود در این سازه ۱۲ طبقه، در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه هر چند موجب کاهش جزئی در مقدار تنش در برخی از اعضا می‌شود و در برخی دیگر از اعضا نیز تغییری در نسبت تنش ایجاد نمی‌شود؛ اما، در نظر گرفتن این اثر اندرکنشی، سبب افزایش تنش در بعضی از اعضای این سازه با طرح مقطع بهینه می‌شود. این افزایش به حدی بوده است که باعث شده است نسبت تنش در چندین ستون از سازه، از مقدار حداکثر مجاز تعیین شده در قیود طراحی بهینه فراتر رود. در واقع، بدین طریق این افزایش تنش موجب نقض قید تنش در مساله طراحی بهینه‌ی سازه شده و حصول طرحی ناپایمن را در پی داشته است. به همین دلیل ضروری است در طراحی بهینه‌ی یک ساختمان بتن‌آرمه، اثرات اندرکنش خاک-سازه حتماً در تحلیل سازه در نظر گرفته شود تا از حصول طرحی ناپایمن در فرآیند بهینه‌سازی سازه پیشگیری گردد.

مقایسه‌ی نتایج این مثال با نتایج مثال قبلی (ساختمان ۴ طبقه) نیز نشان می‌دهد، شدت افزایش تنش و تعداد اعضایی که در آنها به دلیل لحاظ اثر اندرکنشی قید تنش نقض شده است، در مقایسه با مثال قبلی بیشتر است. همچنین، نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر درباره تغییرات تنش‌ها در اعضای سازه در هر دو مثال ۴ و ۱۲ طبقه بتن‌آرمه، با نتایج پژوهش [۲۳] درباره سازه‌های فولادی، همخوانی دارد.

علاوه بر تشدید تنش در اعضا، در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک-سازه موجب تغییر در مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات سازه، در مقایسه با حالت سازه با بستر صلب، می‌شود. به منظور بررسی اثر اندرکنش بر دریفت طبقات سازه با طرح بهینه و نیز کنترل کردن نقض یا عدم نقض قیود جابجایی گرهی در این سازه، مشابه با مثال قبل عمل می‌کنیم. از آنجایی که سیستم سازه‌ای این ساختمان ۱۲ طبقه، همانند مثال قبلی، از نوع قاب خمشی بتن‌آرمه ویژه است [۲۱]، لذا طبق استاندارد ۲۸۰۰ [۲۰] ضریب C_d برای آن ۵/۵ بوده و حد مجاز دریفت طبقات آن از رابطه (۷) و برابر با ۰,۰۰۳۶ به دست می‌آید. دریفت نسبی ایجاد شده در طبقات ساختمان ۱۲ طبقه، تحت دو شرایط سازه با بستر صلب و سازه با لحاظ اندرکنش خاک-سازه در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۲. مدل ساختمان ۲۴ طبقه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه

Fig. 12. 24-story building model considering soil-structure interaction

همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی در اعضای طرح بهینه‌ی این ساختمان با بستر صلب را نشان می‌دهد. طبق این شکل، مشاهده می‌شود نسبت تنش در تمام اعضای سازه کمتر از حد مجاز قید تنش مساله بهینه‌سازی بوده و این صحت بهینه بودن مقاطع در طرح بهینه‌ی حاصل را تأیید می‌کند.

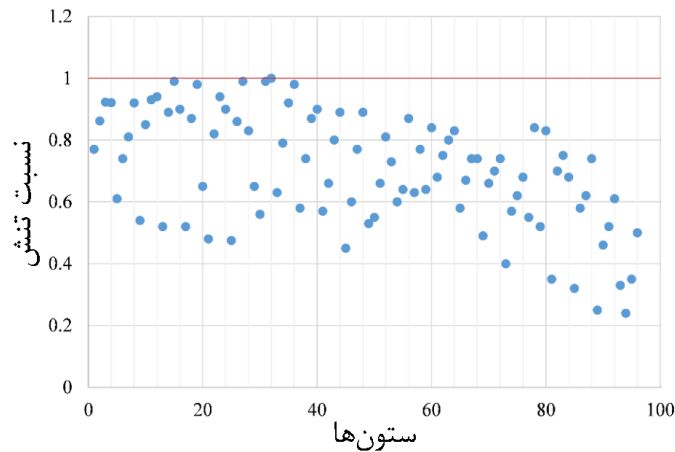
به منظور بررسی تأثیر تغییرات سختی لایه‌های خاک زیر سازه، سازه ۲۴ طبقه در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این صورت که، در حالت ۱ لایه وسطی سخت‌تر از لایه بالایی است و در حالت ۲ لایه بالایی سخت‌تر از لایه وسطی در نظر گرفته می‌شود. مشخصات لایه‌های خاک در حالت ۱ مطابق جدول ۲ و در حالت ۲ مطابق جدول ۷ می‌باشد.

نسبت تنش در اعضای این سازه در جدول ۸ گزارش شده است. بر اساس این جدول، می‌توان به بررسی و مقایسه نتایج تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر نسبت تنش اعضا، در دو شرایط مختلف بستر تحت دو حالت مختلف

نالایمن شده و به همین دلیل بایستی در طرح سازه بازنگری شود و مقاطع مناسب‌تر به کار روند. این در حالی است که قید دریفت، در تمام طبقات و حالات، رعایت شده است. این نتیجه درباره یک سازه میان‌مرتبه با نتایج مثال کوتاه‌مرتبه قبلی همخوانی دارد.

۳-۴- ساختمان ۲۴ طبقه

آخرین مثال سازه‌ای در تحقیق حاضر، یک ساختمان بلندمرتبه ۲۴ طبقه است. شکل ۱۲ مدل نرم افزاری این ساختمان را همراه با پی و لایه‌های خاک زیر سازه نمایش می‌دهد. توپولوژی، ابعاد هندسی، نحوه‌ی بارگذاری و گروه‌بندی اعضای این ساختمان بسیار شبیه به ساختمان ۱۲ طبقه بخش ۲-۴ (شکل ۸) است. اعضای باربر این قاب خمشی بتن‌آرمه نیز به شیوه‌ای مشابه با دو مثال قبلی، بهینه‌سازی شدند. شکل ۱۳ نسبت تنش ناشی از تأثیر



شکل ۱۳. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۲۴ طبقه (بستر صلب)

Fig. 13. DCRs in columns of 24-story building (fixed-base)

جدول ۷. مشخصات لایه‌های خاک در حالت ۲

Table 7. Properties of soil layers in Case 2

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	سرعت موج برشی (V_s) (m/s)	لایه خاک
۳۷/۵	۳۷۵	لایه اول (پایینی)
۳۲/۵	۲۰۰	لایه دوم (وسط)
۳۷/۵	۳۰۰	لایه سوم (بالایی)

همانند سازه ۱۲ طبقه، در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه در تحلیل سازه، عموماً افزایش تنش‌های ایجاد شده در مقاطع سازه را موجب می‌شود. اما شدت این افزایش تنش در مقایسه با سازه ۱۲ طبقه کمی بیشتر است. از سوی دیگر، در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه در دو حالت (حالت ۱ زمانی است که سرعت موج برشی و زاویه اصطکاک داخلی لایه وسطی بیشتر از لایه بالایی باشد و حالت ۲ نیز برعکس حالت ۱ است)، تأثیر چشم‌گیری در تنش‌های ایجاد شده نداشته و در هر دو حالت تقریباً تنش‌ها یکسان می‌باشند. این نکته را شاید بتوان چنین تعبیر کرد که تأثیر میزان سختی یک لایه خاک بر تنش مقاطع، بیشتر از تأثیر عمق قرارگیری آن لایه می‌باشد.

مشخصات لایه‌ها، پرداخت. شکل ۱۳ نتایج نسبت تنش مربوط به تحلیل این سازه با بستر صلب را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. نتایج گرافیکی نسبت‌های تنش، در شرایطی که اثرات اندرکنش خاک-سازه در تحلیل‌ها لحاظ شده باشد، در دو حالت مختلف تغییر مشخصات لایه‌های خاک مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ است. شکل ۱۴ این نتایج را در حالت ۱ (حالتی که سرعت موج برشی و زاویه اصطکاک داخلی خاک لایه بالایی بیشتر از مقادیر متناظر برای خاک لایه وسطی باشد)، نشان می‌دهد. شکل ۱۵ نیز نتایج را در حالت ۲ (حالتی که سرعت موج برشی و زاویه اصطکاک داخلی خاک لایه وسطی بیشتر از مقادیر متناظر برای خاک لایه بالایی باشد) ارائه می‌دهد. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می‌گردد، در سازه ۲۴ طبقه نیز،

جدول ۸. نسبت تنش اعضای سازه ۲۴ طبقه در دو شرایط بستر صلب و انعطاف پذیر تحت دو حالت مختلف لایه خاک (ادامه دارد)

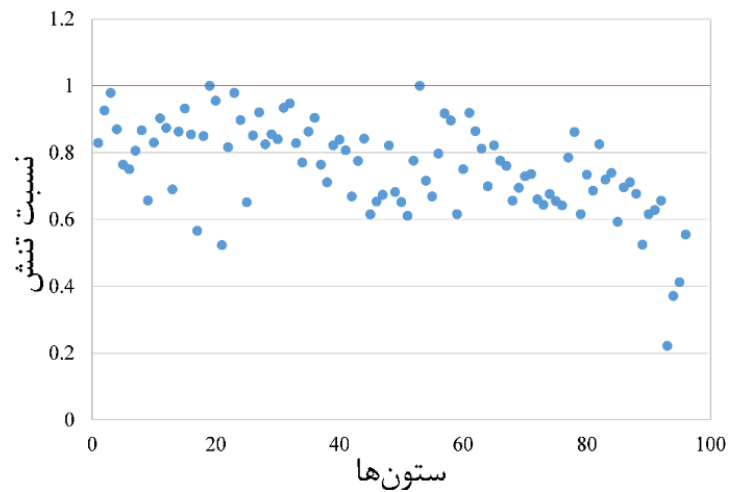
Table 8. DCRs in columns of 24-story building; fixed-base and flexible-base in Cases 1 and 2(Continued)

نسبت تنش در اعضا			شماره عضو	نسبت تنش در اعضا			شماره عضو
با لحاظ اندرکنش خاک-سازه		بستر صلب		با لحاظ اندرکنش خاک-سازه		بستر صلب	
(حالت ۲)	(حالت ۱)			(حالت ۲)	(حالت ۱)		
۰/۱۶۸۲	۰/۱۶۷۹	۰/۱۵۳	۴۹	۰/۱۸۲۹	۰/۱۸۲۱	۰/۱۷۷	۱
۰/۱۶۵۲	۰/۱۶۴۸	۰/۱۵۵	۵۰	۰/۱۹۲۶	۰/۱۹۱۶	۰/۱۸۶۲	۲
۰/۱۶۱۱	۰/۱۶۱۵	۰/۱۶۶	۵۱	۰/۱۹۷۹	۰/۱۹۷۳	۰/۱۹۲۳	۳
۰/۱۷۷۶	۰/۱۷۸۲	۰/۱۸۱	۵۲	۰/۱۸۷	۰/۱۸۹	۰/۱۹۲۱	۴
۱	۱	۰/۱۷۳	۵۳	۰/۱۷۶۴	۰/۱۷۶۲	۰/۱۶۱	۵
۰/۱۷۱۶	۰/۱۷۱۳	۰/۱۶	۵۴	۰/۱۷۵	۰/۱۷۴۹	۰/۱۷۴	۶
۰/۱۶۶۹	۰/۱۶۷۲	۰/۱۶۴	۵۵	۰/۱۸۰۶	۰/۱۸۰۳	۰/۱۸۱	۷
۰/۱۷۹۷	۰/۱۸۰۹	۰/۱۸۷	۵۶	۰/۱۸۶۷	۰/۱۸۷۲	۰/۱۹۲	۸
۰/۱۹۱۷	۰/۱۹۱	۰/۱۶۳	۵۷	۰/۱۶۵۷	۰/۱۶۵۴	۰/۱۵۴	۹
۰/۱۸۹۶	۰/۱۸۹	۰/۱۷۷	۵۸	۰/۱۸۳	۰/۱۸۲۶	۰/۱۸۵	۱۰
۰/۱۶۱۶	۰/۱۶۱۹	۰/۱۶۴	۵۹	۰/۱۹۰۳	۰/۱۹	۰/۱۹۳	۱۱
۰/۱۷۵	۰/۱۷۵۶	۰/۱۸۴	۶۰	۰/۱۸۷۴	۰/۱۸۸۲	۰/۱۹۴	۱۲
۰/۱۹۱۹	۰/۱۹۱۷	۰/۱۶۸	۶۱	۰/۱۶۹	۰/۱۶۸۶	۰/۱۵۲	۱۳
۰/۱۸۶۴	۰/۱۸۶	۰/۱۷۵	۶۲	۰/۱۸۶۳	۰/۱۸۵۹	۰/۱۸۹	۱۴
۰/۱۸۱۲	۰/۱۸۱۹	۰/۱۸	۶۳	۰/۱۹۳۲	۰/۱۹۲۸	۰/۱۹۹	۱۵
۰/۱۶۹۹	۰/۱۷۰۵	۰/۱۸۳	۶۴	۰/۱۸۵۴	۰/۱۸۶۱	۰/۱۹	۱۶
۰/۱۸۲۲	۰/۱۸۱۹	۰/۱۵۸	۶۵	۰/۱۵۶۶	۰/۱۵۶۳	۰/۱۵۲	۱۷
۰/۱۷۷۶	۰/۱۷۷۲	۰/۱۶۷	۶۶	۰/۱۸۴۹	۰/۱۸۴۴	۰/۱۸۷	۱۸
۰/۱۷۶	۰/۱۷۶۳	۰/۱۷۴	۶۷	۱	۱	۰/۱۹۸	۱۹
۰/۱۶۵۶	۰/۱۶۶۱	۰/۱۷۴	۶۸	۰/۱۹۵۵	۰/۱۹۶۴	۰/۱۶۵	۲۰
۰/۱۶۹۵	۰/۱۶۹۳	۰/۱۴۹	۶۹	۰/۱۵۲۳	۰/۱۵۲	۰/۱۴۸	۲۱
۰/۱۷۲۹	۰/۱۷۲۶	۰/۱۶۶	۷۰	۰/۱۸۱۶	۰/۱۸۱۱	۰/۱۸۲	۲۲
۰/۱۷۳۶	۰/۱۷۳۹	۰/۱۷	۷۱	۰/۱۹۷۹	۰/۱۹۷۸	۰/۱۹۴	۲۳
۰/۱۶۶	۰/۱۶۶۶	۰/۱۷۴	۷۲	۰/۱۸۹۷	۰/۱۹۰۷	۰/۱۹	۲۴
۰/۱۶۴۴	۰/۱۶۴۲	۰/۱۴	۷۳	۰/۱۶۵۱	۰/۱۶۴۸	۰/۱۴۷۵	۲۵
۰/۱۶۷۶	۰/۱۶۷۳	۰/۱۵۷	۷۴	۰/۱۸۵۱	۰/۱۸۴۷	۰/۱۸۶	۲۶
۰/۱۶۵۵	۰/۱۶۵۷	۰/۱۶۲	۷۵	۰/۱۹۲	۰/۱۹۱۸	۰/۱۹۹	۲۷
۰/۱۶۴۲	۰/۱۶۴۸	۰/۱۶۸	۷۶	۰/۱۸۲۹	۰/۱۸۳۲	۰/۱۸۳	۲۸
۰/۱۷۸۵	۰/۱۷۸۳	۰/۱۵۵	۷۷	۰/۱۸۵۵	۰/۱۸۵۱	۰/۱۶۵	۲۹
۰/۱۸۶۲	۰/۱۸۵۸	۰/۱۸۴	۷۸	۰/۱۸۴	۰/۱۸۳۵	۰/۱۵۶	۳۰
۰/۱۶۱۶	۰/۱۶۱۷	۰/۱۵۲	۷۹	۰/۱۹۳۴	۰/۱۹۳۳	۰/۱۹۹	۳۱
۰/۱۷۳۴	۰/۱۷۴۱	۰/۱۸۳	۸۰	۰/۱۹۴۷	۰/۱۹۵۶	۱	۳۲
۰/۱۶۸۶	۰/۱۶۸۴	۰/۱۳۵	۸۱	۰/۱۸۲۸	۰/۱۸۲۴	۰/۱۶۳	۳۳
۰/۱۸۲۵	۰/۱۸۲۱	۰/۱۷	۸۲	۰/۱۷۷۱	۰/۱۷۶۷	۰/۱۷۹	۳۴
۰/۱۷۱۹	۰/۱۷۲۱	۰/۱۷۵	۸۳	۰/۱۸۶۳	۰/۱۸۶۲	۰/۱۹۲	۳۵
۰/۱۷۳۹	۰/۱۷۴۶	۰/۱۶۸	۸۴	۰/۱۹۰۴	۰/۱۹۱۳	۰/۱۹۸	۳۶

جدول ۸. نسبت تنش اعضای سازه ۲۴ طبقه در دو شرایط بستر صلب و انعطاف‌پذیر تحت دو حالت مختلف لایه خاک

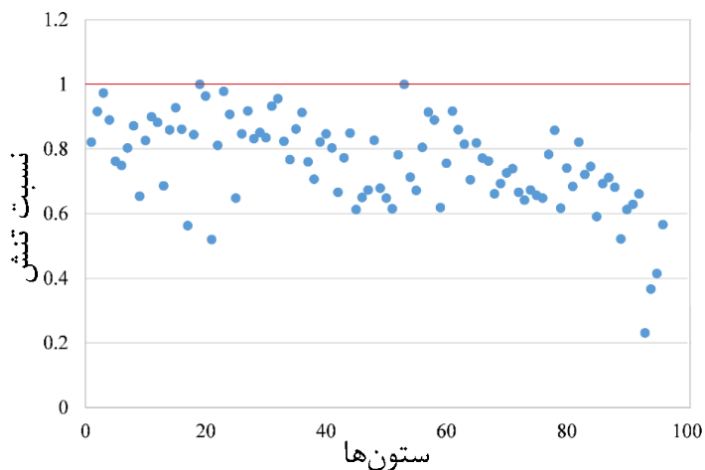
Table 8. DCRs in columns of 24-story building; fixed-base and flexible-base in Cases 1 and 2

۰/۵۹۳	۰/۵۹۱	۰/۳۲	۸۵	۰/۷۶۴	۰/۷۶	۰/۵۸	۳۷
۰/۶۹۶	۰/۶۹۳	۰/۵۸	۸۶	۰/۷۱۱	۰/۷۰۷	۰/۷۴	۳۸
۰/۷۱۱	۰/۷۱۲	۰/۶۲	۸۷	۰/۸۲۲	۰/۸۲۲	۰/۸۷	۳۹
۰/۶۷۷	۰/۶۸۲	۰/۷۴	۸۸	۰/۸۳۹	۰/۸۴۷	۰/۹	۴۰
۰/۵۲۴	۰/۵۲۲	۰/۲۵	۸۹	۰/۸۰۷	۰/۸۰۳	۰/۵۷	۴۱
۰/۶۱۶	۰/۶۱۳	۰/۴۶	۹۰	۰/۶۶۹	۰/۶۶۶	۰/۶۶	۴۲
۰/۶۲۸	۰/۶۲۹	۰/۵۲	۹۱	۰/۷۷۵	۰/۷۷۳	۰/۸	۴۳
۰/۶۵۶	۰/۶۶۱	۰/۶۱	۹۲	۰/۸۴۲	۰/۸۴۹	۰/۸۹	۴۴
۰/۲۲۲	۰/۲۳۱	۰/۳۳	۹۳	۰/۶۱۵	۰/۶۱۳	۰/۴۵	۴۵
۰/۳۷۱	۰/۳۶۷	۰/۲۴	۹۴	۰/۶۵۴	۰/۶۵	۰/۶	۴۶
۰/۴۱۲	۰/۴۱۵	۰/۳۵	۹۵	۰/۶۷۴	۰/۶۷۳	۰/۷۷	۴۷
۰/۵۵۵	۰/۵۶۶	۰/۵	۹۶	۰/۸۲۱	۰/۸۲۷	۰/۸۹	۴۸



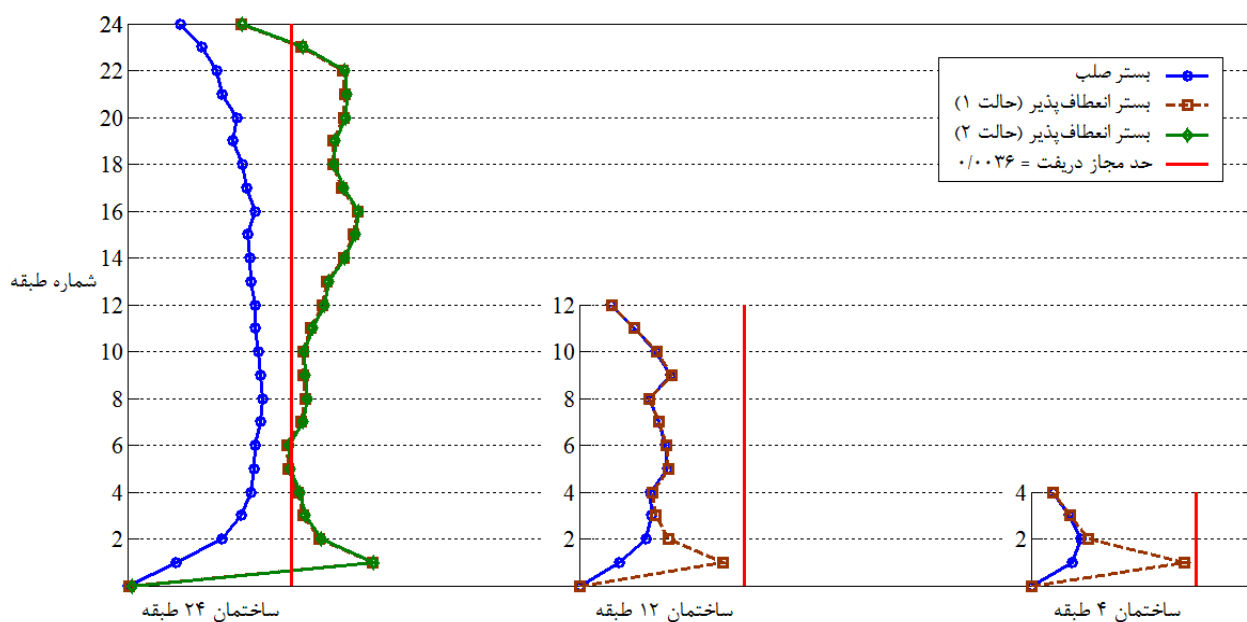
شکل ۱۴. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۲۴ طبقه (با لحاظ اندرکنش خاک-سازه، حالت ۱)

Fig. 14. DCRs in columns of 24-story building (flexible-base, Case 1)



شکل ۱۵. نسبت تنش ایجاد شده در ستون‌های ساختمان ۲۴ طبقه (با لحاظ اندرکنش خاک-سازه، حالت ۲)

Fig. 15.DCRs in columns of 24-story building (flexible-base, Case 2)



شکل ۱۶. نسبت دریفت ایجاد شده در طبقات ساختمان‌های مورد مطالعه

Fig. 16.Drift ratios of stories of studied buildings

حالت ۱ و ۲ فوق‌الذکر، در جدول ۹ قابل مشاهده است. همان‌طور که نتایج جدول ۹ و شکل ۱۶ نشان می‌دهد، در شرایطی که سازه دارای بستر صلب می‌باشد، نسبت دریفت طبقات در حد مجاز بوده ولی زمانی که اثرات اندرکنش خاک-سازه نیز در نظر گرفته می‌شود، نسبت دریفت طبقات در هر دو حالت ۱ و ۲، در اغلب طبقات بیشتر از حد مجاز آیین‌نامه شده است. همچنین با دقت در مقادیر دریفت‌ها مشاهده می‌شود،

در انتها، برای بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات، مشابه مثال قبلی عمل می‌شود. با توجه به این که سیستم سازه‌ای این ساختمان نیز از نوع قاب خمشی بتن‌آرمه ویژه است، لذا همانند مثال‌های قبلی ضریب بزرگنمایی برای آن ۵/۵ بوده و حد دریفت مجاز طبقات آن ۰/۰۰۳۶ می‌باشد (رابطه ۷). دریفت ایجاد شده در طبقات ساختمان ۲۴ طبقه، در دو شرایط با بستر صلب و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه تحت دو

جدول ۹. دریفت نسبی ایجاد شده در طبقات ساختمان ۲۴ طبقه

Table 9. Drift ratios of stories of 24-story building

نسبت دریفت			طبقه
بستر انعطاف پذیر (حالت ۲)	بستر انعطاف پذیر (حالت ۱)	بستر صلب	
۰/۰۰۲۵۴۶	۰/۰۰۲۵۰۵	۰/۰۰۱۱۶۱	طبقه ۲۴
۰/۰۰۳۸۸۱	۰/۰۰۳۸۳۹	۰/۰۰۱۶۵۳	طبقه ۲۳
۰/۰۰۴۸۰۴	۰/۰۰۴۷۶۲	۰/۰۰۱۹۸۱	طبقه ۲۲
۰/۰۰۴۸۵	۰/۰۰۴۸۰۸	۰/۰۰۲۱۰۳	طبقه ۲۱
۰/۰۰۴۸۳۲	۰/۰۰۴۷۹	۰/۰۰۲۴۲۳	طبقه ۲۰
۰/۰۰۴۵۹۸	۰/۰۰۴۵۵۶	۰/۰۰۲۳۲۴	طبقه ۱۹
۰/۰۰۴۵۸	۰/۰۰۴۵۳۸	۰/۰۰۲۵۴۸	طبقه ۱۸
۰/۰۰۴۷۸۹	۰/۰۰۴۷۴۶	۰/۰۰۲۶۳۵	طبقه ۱۷
۰/۰۰۵۱۲۴	۰/۰۰۵۰۸۲	۰/۰۰۲۸۱۴	طبقه ۱۶
۰/۰۰۵۰۴۶	۰/۰۰۵۰۰۴	۰/۰۰۲۶۷	طبقه ۱۵
۰/۰۰۴۸۲	۰/۰۰۴۷۷۸	۰/۰۰۲۷۱۲	طبقه ۱۴
۰/۰۰۴۴۵۵	۰/۰۰۴۴۱۲	۰/۰۰۲۷۳۲	طبقه ۱۳
۰/۰۰۴۳۶۵	۰/۰۰۴۳۲۳	۰/۰۰۲۸۲۴	طبقه ۱۲
۰/۰۰۴۰۹۸	۰/۰۰۴۰۵۵	۰/۰۰۲۸۲۷	طبقه ۱۱
۰/۰۰۳۹۱۹	۰/۰۰۳۸۷۶	۰/۰۰۲۸۹۴	طبقه ۱۰
۰/۰۰۳۹۳۸	۰/۰۰۳۸۹۴	۰/۰۰۲۹۴۴	طبقه ۹
۰/۰۰۳۹۷۸	۰/۰۰۳۹۳۴	۰/۰۰۲۹۸۴	طبقه ۸
۰/۰۰۳۸۹۱	۰/۰۰۳۸۴۷	۰/۰۰۲۹۳۴	طبقه ۷
۰/۰۰۳۵۷۶	۰/۰۰۳۵۳۳	۰/۰۰۲۸۱۸	طبقه ۶
۰/۰۰۳۶۰۵	۰/۰۰۳۵۶۲	۰/۰۰۲۸۰۸	طبقه ۵
۰/۰۰۳۸۲۴	۰/۰۰۳۷۸	۰/۰۰۲۷۲	طبقه ۴
۰/۰۰۳۹۴	۰/۰۰۳۸۹۶	۰/۰۰۲۵۱۸	طبقه ۳
۰/۰۰۴۲۸۹	۰/۰۰۴۲۴۵	۰/۰۰۲۰۸۷	طبقه ۲
۰/۰۰۵۴۳۶	۰/۰۰۵۴۱۵	۰/۰۰۱۰۷۵	طبقه ۱
۰/۰۰۰۰۹۵۹	۰/۰۰۰۰۴۳۵	۰	پی

اعضا نسبت تنش در حالت ۱ بیشتر از حالت ۲ است و در برخی اعضای دیگر برعکس. اما در مورد نسبت دریفت وضعیت متفاوت است و در تمامی طبقات، دریفت حالت ۲ از حالت ۱ بیشتر است، هر چند که اختلاف کم است. به علاوه، اختلاف کم بین نتایج حالات ۱ و ۲، را می توان چنین تفسیر کرد که اهمیت خصوصیات مکانیکی خاک در لایه های زیرین، کم از اهمیت لایه های فوقانی نزدیک به پی نیست. بنابراین منطقی خواهد بود که در طراحی یک سازه، به مطالعه خصوصیات لایه های مختلف خاک ساختگاه

اختلاف نسبت دریفت طبقات در حالات ۱ و ۲ از همدیگر، در مقایسه با اختلاف آنها از دریفت های وضعیت بستر صلب بسیار کمتر است. این نکته می تواند بدین معنی باشد که تاثیر خاک و انعطاف پذیری پی در مقادیر دریفت های سازه، بسیار بیشتر از تاثیر تغییرات سختی لایه های خاک و عمق قرارگیری یک لایه بخصوص می باشد.

با این حال، اگر فقط بخواهیم حالات ۱ و ۲ را به لحاظ تنش اعضا و دریفت طبقات، با همدیگر مقایسه کنیم، مشاهده می گردد که در برخی از

پرداخته شود.

همچنین، مقایسه نتایج این مثال بلندمرتبه با نتایج دو مثال کوتاه و میان مرتبه قبلی نشان می‌دهد، برخلاف دو ساختمان ۴ و ۱۲ طبقه، در ساختمان ۲۴ طبقه، در حالت بستر انعطاف‌پذیر، صرفاً به دلیل نقض قید دریفت (نه قید تنش)، طرح بهینه حالت بستر صلب، نایمن شده و به این خاطر برای کاهش دریفت طبقات (نه کاهش تنش اعضا) بایستی در طرح سازه بازنگری شود. این در حالی است که قید تنش، در تمام اعضا و حالات، رعایت شده است. این نتیجه درباره یک سازه بلند مرتبه، بر خلاف نتایج حاصل شده برای سازه‌های میان و کوتاه مرتبه قبلی است. در کل، تاثیر اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد سازه‌های بلندمرتبه بتن‌آرمه متمایز از تاثیر آن بر سازه‌های کوتاه و میان مرتبه است. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز درباره پژوهش‌های پیشین ذکر شد نتایج مشابهی درباره سازه‌های بنایی ([۶])، سازه‌های کنترل شده ([۸] و [۹])، سازه‌های فولادی ([۱۰]) و سازه‌های مجاور با گودبرداری عمیق ([۱۳]) حاصل شده است. افزون بر این، در خصوص بهینه‌سازی سازه‌های فولادی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه نیز پژوهش‌های ازگان و همکاران [۲۴] و دال‌اغلو و همکاران [۲۵] بر چنین وجه تمایزی تاکید دارند.

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های عددی انجام یافته بر روی مثال‌های سازه‌ای، نتایج زیر قابل برداشت می‌باشند:

- به طور کلی، بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های هر سه سازه مشاهده شد که در نظر نگرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه در طراحی بهینه سازه می‌تواند منجر به حصول طرحی نه تنها غیربهینه بلکه نایمن شود، زیرا مقاطعی که بدون لحاظ اندرکنش طراحی شده بودند، با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه دیگر جواب‌گو نبودند و باید در مقاطع آن‌ها بازنگری می‌شد.

- نتایج مثال‌های سازه‌ای نشان داد، تاثیرات در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه بر نتایج تحلیل و طراحی سازه و به ویژه بر بهینه‌سازی آن، اغماض‌ناپذیر به نظر می‌رسد. زیرا علاوه بر این که لحاظ این اندرکنش نسبت به شرایطی که بستر سازه صلب فرض شود، تنش‌های بزرگتری (به طور میانگین، برای اعضای هر کدام از ساختمان‌های کوتاه، میان و بلندمرتبه، به ترتیب، ۳/۷، ۸/۱ و ۱۲/۶ درصد افزایش تنش) را ایجاد می‌کند، باعث دریفت بیش از حد مجاز آیین‌نامه در طبقات سازه نیز می‌شود که این

موضوع چالشی بسیار مهم در ایمنی سازه و آسایش ساکنین است که باید نسبت به کنترل و کاهش اثرات سوء آن اقدام گردد.

- مقایسه نتایج به دست آمده برای ساختمان بلندمرتبه (۲۴ طبقه) با نتایج حاصله برای سازه با تعداد طبقات متوسط (۱۲ طبقه) نشان داد، تاثیر در نظر گرفته شدن اثرات اندرکنش خاک-سازه بر مقادیر تنش اعضا و دریفت طبقات، با افزایش تعداد طبقات سازه بیشتر می‌شود. این نکته حاکی از آن است که در سازه‌های بلندمرتبه اهمیت در نظر گرفته شدن این اثرات اندرکنشی بیشتر از سایر سازه‌ها است.

- در تمامی مثال‌های بررسی شده مشاهده شد که لحاظ کردن اندرکنش خاک-سازه به طور میانگین موجب افزایش تنش اعضا و دریفت طبقات سازه بهینه می‌شود. این نتایج، بر ضرورت در نظرگیری اثرات اندرکنشی، در بهینه‌سازی سازه، تاکید می‌کند. زیرا در یک طرح بهینه معمولاً مقادیر تنش و دریفت سازه بسیار نزدیک به حد مجاز آیین‌نامه‌ای است و لذا افزایش حتی اندک این مقادیر می‌تواند باعث تجاوز آن‌ها از حدود مجاز آیین‌نامه‌ای شود.

- نتایج تحلیل‌های ساختمان ۲۴ طبقه، در دو حالت از لایه‌های خاک با مشخصات و سختی‌های متفاوت نشان داد، اختلاف نسبت دریفت طبقات در این حالات از همدیگر، در مقایسه با اختلاف آن‌ها از دریفت‌های وضعیت بستر صلب بسیار کمتر است. این نکته می‌تواند بدین معنی باشد که تاثیر خاک و انعطاف‌پذیری پی در مقادیر دریفت‌های سازه، بسیار بیشتر از تاثیر تغییرات سختی لایه‌های خاک و عمق قرارگیری یک لایه بخصوص است. چنین نتیجه‌ای درباره نسبت تنش‌ها نیز حاصل شد، به گونه‌ای که، می‌توان نتیجه گرفت تاثیر میزان سختی یک لایه خاک بر تنش مقاطع، بیشتر از تاثیر عمق قرارگیری آن لایه می‌باشد. به عبارت دیگر، اهمیت خصوصیات مکانیکی خاک در لایه‌های زیرین، کم از اهمیت لایه‌های فوقانی مجاور پی نیست. بنابراین منطقی خواهد بود که در طراحی یک سازه، به مطالعه خصوصیات لایه‌های مختلف خاک ساخت‌گاه تا عمق کافی پرداخته شود.

منابع

- [1] M. Khatibinia, E. Salajegheh, J. Salajegheh, M. Fadaee, Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel, Engineering Optimization, 45(10)

- structure interaction, *International Journal of structural stability and dynamics*, 16(8) (2016) 1550043.
- [12] S. Karapetrou, S. Fotopoulou, K. Pitilakis, Seismic vulnerability assessment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil–structure interaction effects, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 73 (2015) 42-57.
- [13] N. Yeganeh, J.B. Bazaz, A. Akhtarpour, Seismic analysis of the soil–structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 79 (2015) 149-170.
- [14] H.-G. Kwak, J. Kim, An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of RC frames, *Computer-Aided Design*, 41(7) (2009) 490-500.
- [15] A.R. Shooli, A. Vosoughi, M.R. Banan, A mixed GA-PSO-based approach for performance-based design optimization of 2D reinforced concrete special moment-resisting frames, *Applied Soft Computing*, 85 (2019) 105843.
- [16] L.-H. Xu, X.-T. Yan, Z.-X. Li, Development of BP-based seismic behavior optimization of RC and steel frame structures, *Engineering Structures*, 164 (2018) 214-229.
- [17] B. Madani, F. Behnamfar, H.T. Riahi, Dynamic response of structures subjected to pounding and structure–soil–structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78 (2015) 46-60.
- [18] H. Aldaikh, N.A. Alexander, E. Ibraim, J. Knappett, Shake table testing of the dynamic interaction between two and three adjacent buildings (SSSI), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89 (2016) 219-232.
- [19] A. Fatollahpour, S.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 Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 605-630. (in Persian).
- [20] Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. (2014) Iranian Code of Practice for Seismic Resistant design of (2013) 1147-1165.
- [2] A.T. Daloglu, M. Artar, K. Özgan, A.İ. Karakas, Optimum design of steel space frames including soil-structure interaction, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54 (2016) 117-131.
- [3] AISC, Manual of steel construction: load & resistance factor design, American Institute of Steel Construction, 2001.
- [4] M. Akhoondi, F. Behnamfar, Seismic fragility curves of steel structures including soil-structure interaction and variation of soil parameters, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143 (2021) 106609.
- [5] M. Rachedi, M. Matallah, P. Kotronis, Seismic behavior & risk assessment of an existing bridge considering soil-structure interaction using artificial neural networks, *Engineering structures*, 232 (2021) 111800.
- [6] G. Wang, E.D.R. Castillo, L. Wotherspoon, J.M. Ingham, Performance-based seismic assessment of an historic high-rise masonry building considering soil-structure interaction, *Structures*, 32 (2021) 38-53.
- [7] O.C. Marques, L.A. Feitosa, K.V. Bicalho, E.C. Alves, Analysis of constructive effect and soil-structure interaction in tall building projects with shallow foundations on sandy soils, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14 (2020) e14103.
- [8] S. Radkia, R. Rahnavard, H. Tuwair, F.A. Gandomkar, R. Napolitano, Investigating the effects of seismic isolators on steel asymmetric structures considering soil-structure interaction, *Structures*, 27 (2020), 1029-1040.
- [9] E. Nazarimofrad, S.M. Zahrai, Seismic control of irregular multistory buildings using active tendons considering soil–structure interaction effect, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89 (2016) 100-115.
- [10] C.C. Mitropoulou, C. Kostopanagiotis, M. Kopanos, D. Ioakim, N.D. Lagaros, Influence of soil–structure interaction on fragility assessment of building structures, *Structures*, 6 (2016), 85-98.
- [11] A.S. Hokmabadi, B. Fatahi, Influence of foundation type on seismic performance of buildings considering soil–

- on Applied Researches in Structural Engineering & Construction Management, Sharif University of Technology, 2019.
- [24] K. Ozgan, S. Kılıçer, A.T. Daloglu, Soil-structure interaction effect on the resistance of a steel frame against progressive collapse using linear static and nonlinear dynamic procedures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 37(1) (2023) 04022070.
- [25] A.T. Daloglu, M. Artar, K. Ozgan, A.I. Karakas, Optimum design of braced steel space frames including soil-structure interaction via teaching-learning-based optimization and harmony search algorithms, *Advances in civil engineering*, 2018 (2018) 1-16.
- Buildings (Standard Number. 2800), 4th Edition., Road, Housing and Urban Development Research Center. (in Persian).
- [21] A. Tapao, R. Cheerarot, Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames, *Engineering Structures*, 151 (2017) 802-820.
- [22] D. Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical report-tr06, Erciyes University, engineering faculty, computer department, (2005).
- [23] A. Rafiee, On the effect of foundation and soil conditions on the optimum design of steel space frames, in: *Proceedings of the Third International Conference*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Jafari, A. Rafiee, *Soil-Structure Interaction Effect on the Optimal Design of Low-, Mid- and High-Rise Reinforced Concrete Frames*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(10) (2024) 1981-2002.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20872.7555

