

Evaluation of Settlement and Seismic Response of High-Rise Buildings Considering Soil–Structure Interaction Based on Static Loading Results and Continuum Modeling

Mozhgan Soleimani , Hossein Pahlavan * , Mohammad Shamkhi Amiri, Nima Dorrinia 

Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

ABSTRACT: High-rise buildings have always been important subjects for researchers and structural designers. While seismic analysis of these structures is critical in engineering, the effects of soil-structure interaction often receive less attention. However, considering soil-structure interaction in seismic analyses provides more accurate and realistic estimates of structural performance during earthquakes. This study investigates the impact of soil-structure interaction on the seismic behavior of high-rise buildings with mat and pile (deep) foundations. The main goal is to evaluate foundation settlement considering soil-structure interaction and compare it with the fixed-base condition, which ignores soil effects. A 33-story high-rise building with a core frame structural system was modeled, analyzed, and designed using ETABS software. For a more precise analysis of the soil-structure-pile-mat interaction, the continuum soil modeling software MIDAS GTS NX was used to calculate foundation settlement under continuum conditions. Comparing these results with those using the Winkler spring model in non-continuum software shows that foundation settlement considering soil-structure interaction is greater than that predicted by the Winkler model. Furthermore, accounting for soil effects reduces foundation settlement compared to the fixed-base condition. Additionally, including soil effects in seismic analysis increases inter-story displacement. These findings emphasize the critical importance of incorporating soil-structure interaction in the analysis and design of high-rise buildings.

Review History:

Received: Jul. 13, 2024
Revised: Jul. 23, 2025
Accepted: Sep. 16, 2025
Available Online: Oct. 02, 2025

Keywords:

Seismic Interaction of Pile Soil and Structure
Seismic Performance of Buildings
Continuous Environment Modeling
Finite Element
Tall Structure

1- Introduction

Attention to the seismic and wind resistance of tall buildings is one of the most important challenges in civil engineering, especially considering geotechnical hazards. Recent earthquakes have shown that many buildings suffer severe damage; therefore, revising standards and using new materials and construction methods are crucial. Studies indicate that soil-structure-pile-foundation interaction (SSI) has a significant impact on the seismic performance of buildings and must be considered in design and analysis. During an earthquake, the soil beneath the structure undergoes deformations, and its behavior affects the dynamic response of the building. Thus, the structure, foundation, and soil act together as a unified system.

Numerous studies, including research by Dorrinia et al. (2025) studied the seismic behavior of structures in two conditions: fixed-base and considering soil-structure interaction. Their research results indicated the necessity of including soil-structure interaction for realistic outcomes [1]. Other studies, such as those by Tahghighi and Mohammadi (2020), also emphasize the importance of SSI in the vulnerability of structures [2].

Advanced software like PLAXIS 3D and MIDAS have

facilitated more accurate modeling of soil-structure-pile-foundation interactions, enabling dynamic and seismic load analyses. These models, capable of simulating nonlinear soil and structural behavior, have been validated against static load testing results. Findings from these studies highlight the necessity of incorporating SSI effects in the seismic design of tall buildings to improve analysis accuracy as well as structural safety and performance. This innovative approach can be an effective step toward enhancing performance-based design methods for tall buildings.

2- Structural and Soil Properties

The studied building is a 33-story tall residential structure located in Babolsar city, which is classified as having a relatively high risk. The lateral load-resisting system consists of a core frame system. The height of the first floor is 4 meters, while the other floors have a height of 3.5 meters. The total height of the structure is 116 meters. Beams and columns are modeled using frame elements, although most seismic codes do not account for longitudinal slip of reinforcement in the plastic hinge region due to difficulties in interpretation. The thickness of the waffle concrete slab is 0.3 meters. The live load on residential floors is considered as 2200 kg/m²,

*Corresponding author's email: pahlavan@shahroodut.ac.ir

and an additional dead load of 160 kg/m^2 is applied to the slabs. Considering the building weight and soil strength, the use of a deep pile combined with a raft foundation (pile cap) with adequate stiffness for load distribution is necessary. Without considering settlement, the bearing capacity of this raft foundation is reported as 4.2 kg/cm^2 under gravity loads and 6.5 kg/cm^2 under seismic loading, with dimensions of 30 m by 46 m and a depth of 4 m. Also, without settlement considerations, the allowable soil bearing capacity beneath the raft exceeds the existing stress (3.75 kg/cm^2 seismic and 2.9 kg/cm^2 gravity). However, the existing settlements of the raft foundation—without accounting for piles exceed the allowable code limits, reaching approximately 40 cm. Therefore, this structure uses a combined raft foundation and piles, which has been incorporated in the modeling performed by MIDAS software. For geotechnical investigation, three boreholes reaching a depth of 60 m below the ground surface were drilled mechanically by a consulting company. During drilling, soil samples were taken at various depths for testing, and Standard Penetration Tests (SPT) were conducted according to ASTM-D1586. Near the surface, testing intervals were closer, increasing with depth. After stopping drilling, the SPT sampler was inserted to the desired depth and struck by a 63.5 kg hammer falling from a height of 76.2 cm. The number of blows required to penetrate 15 cm of soil was recorded, repeated three times for a total penetration of 45 cm. The blows counted for the last two 15 cm increments constitute the SPT value. In this study, borehole BH3 was used to determine soil parameters. Shear wave velocity and SPT data were used to calculate the soil elastic modulus E_s . These calculations were carried out down to a depth of 60 meters.

3- Numerical Modeling

The structure under study was first designed in ETABS software according to the Iranian Standard 2800 and the Ninth Chapter of the National Building Regulations. The structural system is a moment-resisting frame combined with a special shear wall. To model the soil-structure system and solve complex equations and boundary and geometric conditions, the finite element software MIDAS GTS NX was used. This software is employed for modeling the structure together with the soil and foundation to analyze interaction issues [3].

In the geotechnical MIDAS software, three soil layers with thicknesses of 12 m, 12 m, and 36 m were modeled over an area of $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Considering the construction site location, structural specifications, and consultant reports, the raft foundation alone did not provide sufficient bearing capacity; therefore, 100 piles were used in the design. The piles, with diameters of 1.2 m and lengths of 30 m and 25 m as per the construction drawings, were modeled accordingly. The soil is fine-grained at depths around 8 m and 17 m, coarse-grained at other depths, and the groundwater table is located at a depth of 5 m with relatively good bearing capacity.

The raft foundation has a settlement depth of 2.2 m below street level and dimensions of 30 m by 46 m. Figure 1. illustrates the modeled building and the soil layers.

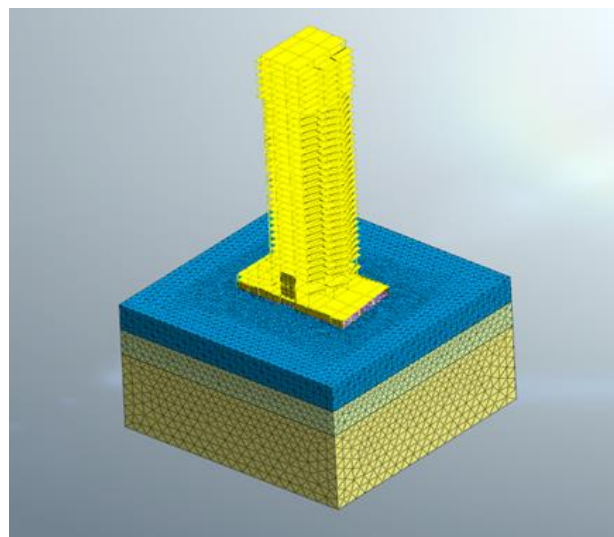


Fig. 1. Structure and soil layers modeled in MIDAS GTS NX software

4- Engineering Demand Components

For the selected structure and ground motion model, Engineering Demand Parameters (EDPs) were evaluated to quantify potential differences. Figure 2. shows the average calculated values of maximum inter-story drifts. These curves represent the average results from eight earthquakes for each hazard level, corresponding to return periods of 72 and 475 years. As seen in the figure, the average inter-story drifts for the fixed-base and SSI conditions at the 72-year return period show negligible differences. Therefore, according to the calculations in this study, soil effects on average inter-story drift can be disregarded.

On the other hand, the comparison at the 475-year return period, especially in the lower stories, is different. For the fixed-base condition, the average maximum inter-story drift is 0.65% (in stories 15 to 18), whereas in the SSI condition, it reaches 0.75% at stories 12 and 13. Earthquakes with a return period of 475 years or more cause such differences that increase the maximum inter-story drift. Hence, neglecting SSI can lead to unrealistic analysis results.

Regarding the base shear, according to FEMA P-2091, tall buildings in seismic zones exhibit spectral responses affected by soil-structure interaction (SSI), which alters the natural period by increasing it, resulting in a reduction of base shear. In this study, the base shear was calculated as 1713 tons for the fixed-base case and 1548 tons considering soil-structure interaction.

5- Results and Discussion

In this study, the settlement of the foundation of a tall concrete building with a core frame system was examined under two conditions: considering soil-structure interaction (SSI) and fixed base. To this end, the 33-story concrete

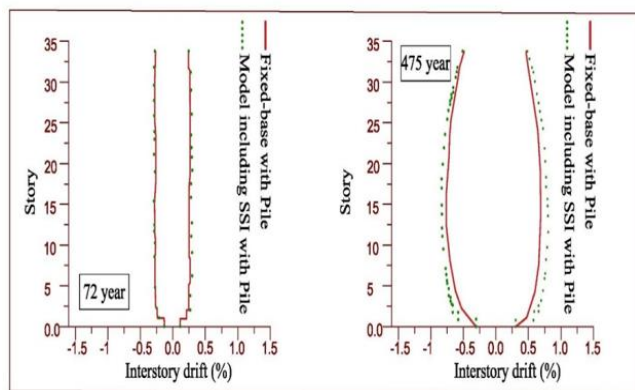


Fig. 2. Calculated seismic EDPs along the height for each hazard level: Maximum inter-story drifts

building and the surrounding soil were modeled using MIDAS software, which is based on a continuous environment. Then, the building model was analyzed in both the SSI and fixed base conditions, and the results were compared.

The analysis results showed that the foundation settlement in the presence of piles and considering soil-structure interaction differs significantly from the fixed base condition. For the building under study, the maximum settlement in the SSI condition was 14 cm, while it was 19 cm in the fixed base condition. Similarly, the minimum settlement was calculated as 3 cm for SSI and 5 cm for the fixed base. These differences emphasize the importance of accounting for soil-structure interaction effects in the analysis of tall buildings, as it leads to more accurate and realistic results.

Additionally, to investigate the seismic behavior of the structure under fixed base and SSI conditions, nonlinear dynamic analyses were performed. Two earthquake sets with return periods of 72 years and 475 years were applied to the structure. The results indicated that the maximum inter-story

drift under the 72-year return period earthquakes showed little difference between the fixed base and SSI conditions. However, for earthquakes with a 475-year return period, the results differed, with the inclusion of soil effects resulting in increased drift. Furthermore, the overall displacement of the building differed between the two conditions; the displacement under SSI was less than that under the fixed base. This difference increased with the building height, reaching a maximum of 20% at the 33rd floor.

6- Conclusions

Overall, the findings of this study indicate that considering soil-structure interaction has a significant impact on the foundation settlement of the building, and results from fixed base analysis may lead to unrealistic estimates. Additionally, soil effects influence the structural response during earthquakes, especially for earthquakes with a 475-year return period. Considering the type of structure (core frame system) and the soil investigated, it is recommended that similar studies be conducted for other structural systems and soil types to enable a more comprehensive comparison and the development of more optimized solutions.

References

- [1] Dorrinia, Nima, Hossein Pahlavan, Mohammad Shamekhi Amiri, and Mojtaba Sirjani. "Seismic Assessment of RC Tall Core-Frame Buildings Considering Soil Structure Interaction (SSI)." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* (2025): 1-20.
- [2] Tahghighi, Hossein, and Ali Mohammadi. "Numerical evaluation of soil-structure interaction effects on the seismic performance and vulnerability of reinforced concrete buildings." *International Journal of Geomechanics* 20, no. 6 (2020): 04020072.
- [3] Li, Hongjiang. "Structural assessment of concrete cable-stayed bridge after replacement of closure segment: The service stage." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 25, no. 3 (2020): 04020023.



ارزیابی نشست و پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با لحاظ اندرکنش خاک-سازه مبتنی بر نتایج بارگذاری استاتیکی و مدل‌سازی محیط پیوسته

مژگان سلیمانی^{۱b}، حسین پهلوان^{۲*}، محمد شامخی امیری^۳، نیما دری‌نیا^{۴b}

گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰

کلمات کلیدی:

اندرکنش لرزه‌ای خاک

شمع و سازه

عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها

مدلسازی محیط پیوسته

المان محدود

سازه بلند

خلاصه: ساختمان‌های بلند همواره مورد توجه پژوهشگران و طراحان سازه بوده‌اند. اگرچه تحلیل لرزه‌ای این سازه‌ها در مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد، اثرات اندرکنش خاک و سازه معمولاً کمتر مورد توجه قرار گرفته است. درواقع، لحاظ کردن اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل‌های لرزه‌ای، تخمین‌هایی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر از عملکرد سازه در زمان زلزله ارائه می‌دهد. در این پژوهش، تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با تکیه‌گاه پی گسترده و شمع (پی عمیق) بررسی شده است. هدف اصلی ارزیابی میزان نشست پی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و مقایسه آن با حالت پایه ثابت (عدم لحاظ اثرات خاک) است. برای این منظور، یک ساختمان ۳۳ طبقه با سیستم سازه‌ای قاب هسته‌ای در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی، تحلیل و طراحی شد. جهت تحلیل دقیق‌تر اثر اندرکنش سازه-خاک-شمع-پی، از نرم‌افزار مدل‌سازی محیط پیوسته خاک MIDAS GTS NX استفاده و نشست پی در شرایط محیط پیوسته محاسبه گردید. مقایسه نتایج این تحقیق با تحلیل‌های مبتنی بر مدل فنر وینکلر در نرم‌افزارهای غیر پیوسته نشان داد نشست پی در تحلیل با اندرکنش خاک و سازه بیشتر از مقادیر مدل فنر وینکلر است. همچنین، لحاظ اثرات خاک در تحلیل موجب کاهش نشست پی نسبت به حالت پایه ثابت می‌شود. علاوه بر این، در نظر گرفتن اثرات خاک منجر به افزایش جابجایی بین طبقه‌ای در تحلیل لرزه‌ای سازه گردید. این نتایج اهمیت بالای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در تحلیل و طراحی ساختمان‌های بلند را به‌وضوح نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

SSI برای طراحی و ارزیابی ساختمان‌ها ضروری می‌باشد. در نظر گرفتن SSI در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها باعث می‌شود که حرکت زمین در سطح پی تحت تأثیر خواص خاک، مسیر موج، اثرات سایت و هندسه خاک قرار گیرد. در تحلیل سازه‌ها، اغلب اثرات اندرکنش خاک و سازه نادیده گرفته می‌شود، و پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به گونه‌ای ارزیابی می‌شود که گویی شالوده آن‌ها صلب است. با این حال، در هنگام وقوع زلزله‌ها، خاک زیرین سازه دچار تغییر شکل‌هایی می‌شود که تحت تأثیر بارهای وارده از شالوده سازه است. این تغییرات در خاک، به نوبه خود، بر پاسخ دینامیکی سازه تأثیر می‌گذارند. در واقع، رفتار متقابل بین سازه و خاک زیرین و اطراف آن در زمان زلزله، مفهوم اندرکنش خاک و سازه را مطرح می‌کند. [۴۰]

در تحلیل‌های لرزه‌ای سازه، تمرکز اصلی بر روی میزان و زمان توانایی سیستم‌های مقاوم جانبی در پاسخ به نیروهای زلزله و شکل‌پذیری آن‌ها است؛ اما اغلب، تأثیر رفتار خاک زیرین بر پاسخ لرزه‌ای سازه کمتر در نظر گرفته می‌شود. در هنگام وقوع زلزله، پاسخ سازه (نیروها و تغییر مکان‌ها) و

توجه به استحکام ساختمان‌های بلندمرتبه در برابر زلزله‌ها و بادهای شدید از دغدغه‌های اصلی مهندسان عمران در طراحی و اجرای این نوع سازه‌ها است، به خصوص با در نظر گرفتن خطرات ژئوتکنیکی. در سال‌های اخیر، چندین زلزله مخرب رخ داده که در آن‌ها بسیاری از ساختمان‌ها به شدت آسیب دیده‌اند. بنابراین، بازنگری و به‌روزرسانی مستمر استانداردهای مربوطه و همچنین تحقیق و توسعه در زمینه مواد و روش‌های جدید ساخت، می‌تواند یکی از مهم‌ترین گام‌ها در جهت بهبود طراحی و اجرای ساختمان‌های بلندمرتبه و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر بلایای طبیعی باشد. مشاهدات آسیب و تحلیل‌های دقیق سازه‌ای نشان داده است که در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه (SSI) می‌تواند به طور قابل توجهی ظرفیت و پارامترهای سازه‌ای مربوط به تقاضا (مانند دوره ارتعاش، ظرفیت رانش و غیره) و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای را تغییر دهد. بنابراین در نظر گیری اثرات

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: pahlavan@shahroodut.ac.ir



پاسخ زمین (جابجایی و شتاب حرکت) به یکدیگر وابسته هستند. بارهای انتقالی از سازه به پی، نه تنها بر شالوده بتنی تأثیر می‌گذارند، بلکه بر خاک زیر و اطراف شالوده نیز تأثیر می‌گذارند و تنش‌ها و تغییرشکل‌هایی در آنها ایجاد می‌کنند. به طوری که حتی وجود یک سازه می‌تواند نحوه ارتعاش زمین اطراف خود را نسبت به حالتی که سازه‌ای روی خاک قرار ندارد (یعنی حالت میدان آزاد) تغییر دهد. از سوی دیگر، تغییرشکل‌های شالوده و خاک می‌توانند به نوبه خود خصوصیات و پاسخ دینامیکی سازه را تغییر دهند. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که سازه، شالوده و خاک (زیر و اطراف شالوده) جمعاً به عنوان یک سیستم واحد رفتار می‌کنند که ویژگی‌های هریک بر دیگری نیز تأثیر گذاشته و در اصطلاح روی همدیگر اثر متقابل یا اندرکنش دارند. بنابراین، این موضوع اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش را بیش از پیش نمایان می‌سازد. [۲-۳].

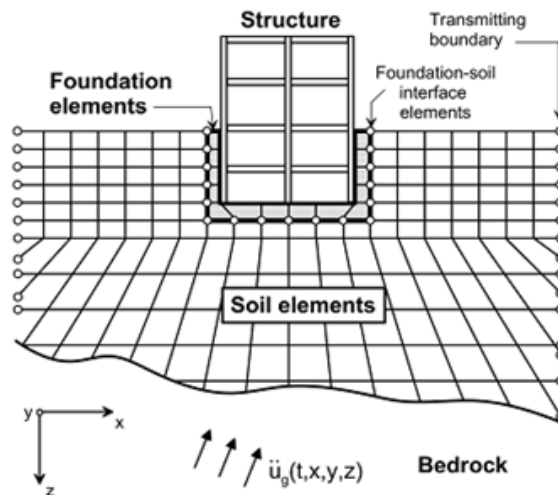
وایت من و همکاران (۱۹۶۷) روش‌های عملی برای تحلیل پی‌های تحت بارگذاری دینامیکی مورد بحث قرار دادند و روش‌های طراحی پیشنهاد کردند. این روش‌ها از سیستمی از جرم‌های متمرکز، فنرها و ضربه‌گیرها استفاده می‌کنند که تقریباً معادل سیستم خاک واقعی پی است. مرحله کلیدی ارزیابی پارامترهای متمرکز سیستم از نظریه‌های پی‌های مستقر بر روی اجسام الاستیک نیمه نامتناهی بدست آمد. [۵].

لوئیزجی و همکاران (۲۰۲۰) اثرات غیرخطی SSI و عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که شرایط گیرداری همیشه محافظه کارانه نیستند و اثرات SSI در ساختمان‌های بلند بر توزیع محاسبه شده تقاضای مهندسی در طول ارتفاع سازه تأثیر می‌گذارد. از جمله جلوه‌های حرکت زمین دو طرفه در ساختمان‌های بلند با افزایش SSI پارامترهای تقاضای مهندسی زمانی که با مفروضات پایه گیردار مقایسه می‌شود که می‌تواند منجر به محاسبه واقعی‌تر تقاضاهای لرزه‌ای در عملکرد سازه ای یا ژئوتکنیکی فعلی شود. [۶]

حسین تحقیقی و علی محمدی (۲۰۲۰) مطالعه‌ای باهدف اینکه آیا عملکرد لرزه‌ای و آسیب پذیری سازه‌های بتن مسلح RC که تحت تأثیر اندرکنش خاک و سازه SSI قرار دارند، وجود دارد یا نه انجام داد. نتایج عددی نشان داد که SSI بر روی شکنندگی و عملکرد پی صلب سازه‌ها نقش قابل توجهی دارد. [۷] جیم مرکادو و همکاران در سال ۲۰۲۱ ویژگی‌های خاک و سازه را ارزیابی کردند و نتایج نشان داد که سرعت موج برشی و نسبت ابعاد ساختمان در طولانی شدن دوره در ساختمان‌های بلند

تأثیر می‌گذارد. آنها شبیه‌سازی‌های عددی را با استفاده از اپنسیس توسعه دادند. قلمرو خاک با استفاده از کرنش چهار ضلعی نه گره ای مدل‌سازی شد عناصری که قادر به شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی هستند. [۸] همچنین لویاوو (۲۰۲۳) به پیشبینی نشست پی ساختمان‌ها در شهر هوشمند پرداخت. [۹] دری نیا و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه در دوحالت پایه ثابت و حالت درنظرگیری اندرکنش خاک-سازه پرداختند، نتایج تحقیق آنها بر ضرورت لحاظ اندرکنش خاک-سازه بر نتایج منطبق بر واقعیت دلالت داشت. [۱۰] مارتیروسیان و همکارانش (۲۰۲۳) به بررسی نشست پی بر بستر ماسه‌ای غیر اشباع پرداختند. [۱۱] تحقیقات اخیر نشان دهنده ضرورت لحاظ اندرکنش خاک - سازه می‌باشد. همچنین نوآوری اصلی این تحقیق در ترکیب مدل‌سازی پیشرفته محیط پیوسته خاک با تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه و ارزیابی دقیق اثرات اندرکنش خاک-سازه-شمع-پی است که منجر به ارائه نتایج واقعی‌تر و کاربردی‌تر برای طراحی مقاوم در برابر زلزله می‌شود. این رویکرد می‌تواند به بهبود ایمنی و عملکرد سازه‌های بلند در برابر زلزله کمک شایانی نماید.

با وجود مطالعات گسترده‌ای که تاکنون پیرامون تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند انجام شده است، بررسی‌های اندکی به ارزیابی اثر این اندرکنش بر پارامترهایی نظیر نشست، تنش‌های وارده بر خاک زیر پی و نیروهای منتقل شده به شمع‌ها و همچنین تأثیر لحاظ اندرکنش خاک-سازه در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های بلند پرداخته‌اند. در این پژوهش، از مدل‌سازی دقیق محیط پیوسته زیرسازه در نرم‌افزار Midas که قابلیت مدل‌سازی محیط پیوسته خاک و همچنین امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر اندرکنش خاک-سازه-شمع-پی را دارد استفاده شد. نرم‌افزار Midas به طور ویژه برای تحلیل‌های دینامیکی، از جمله بررسی اثر بارگذاری لرزه‌ای و اندرکنش خاک و سازه، توسعه یافته است و می‌تواند رفتار غیرخطی خاک و سازه را به خوبی شبیه‌سازی کند. [۱۰] علاوه بر این صحت‌سنجی مدل با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع‌ها، تأثیر اندرکنش خاک و سازه هم بر پاسخ لرزه‌ای سازه و هم بر عملکرد ژئوتکنیکی زیرسازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که لحاظ کردن اثرات واقعی اندرکنش خاک و سازه در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، نقش بسیار مؤثری در افزایش دقت تحلیل‌ها و ایمنی سازه ایفا می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان گامی مؤثر در جهت بهبود روش‌های طراحی عملکردمحور ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱. تصویر شماتیک اثرات اندرکنش لرزه ای بین خاک-سازه

Fig. 1. Schematic diagram of the effects of seismic soil-structure interaction

۲- اندرکنش خاک و سازه

و اثرات ارتعاش سازه و پی به طور مستقیم در معادلات تعادل دینامیکی مشاهده می‌شوند. بنابراین، تحریک ورودی در مرز پایین مدل اعمال می‌شود و امواج آن پس از عبور از لایه‌های خاک وارد سازه می‌شوند. سپس، سازه به ارتعاش در می‌آید و امواج لرزه‌ای جدید از سازه به سمت پی انتشار می‌یابند، که به آن مدل محیط پیوسته نیز اشاره می‌شود. در این تحقیق، از این روش بهره برده شده است. [۹ و ۱۰]

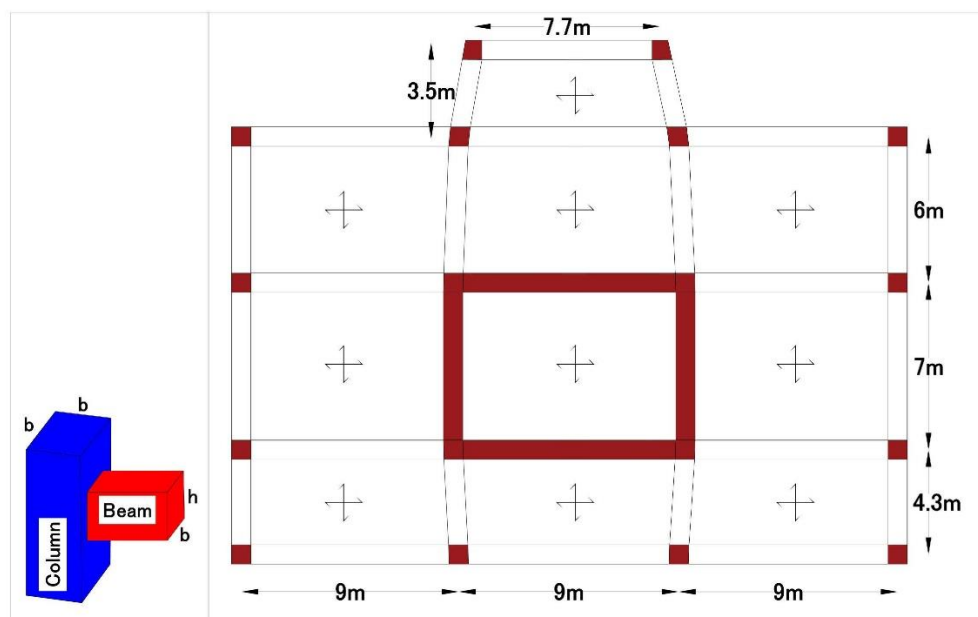
۴- مشخصات سازه و خاک

ساختمان مورد مطالعه یک سازه بلند مرتبه‌ی ۳۳ طبقه با کاربری مسکونی ساخته شده در شهر بابلسر که با خطر نسبی زیاد قرار دارد. می‌باشد. سیستم مهار جانبی از یک سیستم قاب هسته استفاده گردید. ارتفاع طبقه اول ۴ m و سایر طبقات ۳/۵ m است. همچنین ارتفاع کل سازه ۱۱۶ m می‌باشد. تیرها و ستون‌ها با استفاده از عنصر قاب مدل‌سازی شده‌اند، هرچند روش‌های مدل‌سازی به لغزش طولی میلگرد در ناحیه مفصل پلاستیک نمی‌پردازند، در اغلب آیین نامه‌های لرزه‌ای هم به علت تفسیر دشوار آن در نظر گرفته نمی‌شود. ضخامت دال بتنی و افل ۳/۰ m می‌باشد. سر بار زنده طبقات مسکونی ۲۰۰ kg/m² و بار مرده اضافی دال‌های طبقات ۱۶۰ kg/m² لحاظ شده است. با توجه به وزن ساختمان و مقاومت خاک بکارگیری از یک شمع عمیق و یک پی گسترده (سرشمع) با صلبیت مناسب برای پخش بارها بین آن الزامی است. البته بدون ملاحظات مربوط به نشست ظرفیت باربری این پی گسترده به ابعاد ۳۰ m در ۴۶ m و عمق ۴ m در حالت ثقلی

در سال‌های اخیر، توجه به اثر خاک در تحلیل‌های لرزه‌ای به طور فزاینده‌ای افزایش یافته و این موضوع در دهه اخیر در آیین‌نامه‌های بین‌المللی نیز مورد تأکید قرار گرفته است. بر این اساس، طراحان سازه‌های مهندسی، چه بزرگ و چه متوسط، به دانش عمیقی از اندرکنش خاک و سازه نیاز دارند. با توجه به تعامل بین سازه و خاک اطراف، تحلیل لرزه‌ای مستقل از سازه نمی‌تواند نتایج دقیق و واقع‌بینانه‌ای ارائه دهد. سازه‌های بلند، به عنوان اولین دسته‌ای که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای آن‌ها حیاتی است، مطرح می‌شوند. [۱]

۳- تئوری و روش حل مسئله

در تحلیل اندرکنش خاک و سازه، دو روش شایع وجود دارد: روش زیرسازه و روش مستقیم. در روش زیرسازه، معمولاً خاک، پی و سازه به طور جداگانه و به عنوان یک زیرسازه مدل می‌شوند. به عبارت دیگر، در این روش، سازه و زمین به صورت مستقل تحلیل می‌شوند و ارتباط بین آن‌ها توسط نیروهای اندرکنشی برقرار می‌شود. این روش از اصل جمع آثار قوا استفاده می‌کند و بنابراین، به طور عمده برای تحلیل رفتارهای خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ تصویر شماتیکی از اثرات لرزه‌ای اندرکنش خاک و سازه را نشان می‌دهد. روش مستقیم یکی از روش‌های رایج در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه است. در این روش، اندرکنش سینماتیک و اندرکنش اینرسی‌دار از هم جدا نمی‌شوند



شکل ۲. پلان ستون گذاری سازه

Fig. 2. Structural column layout plan

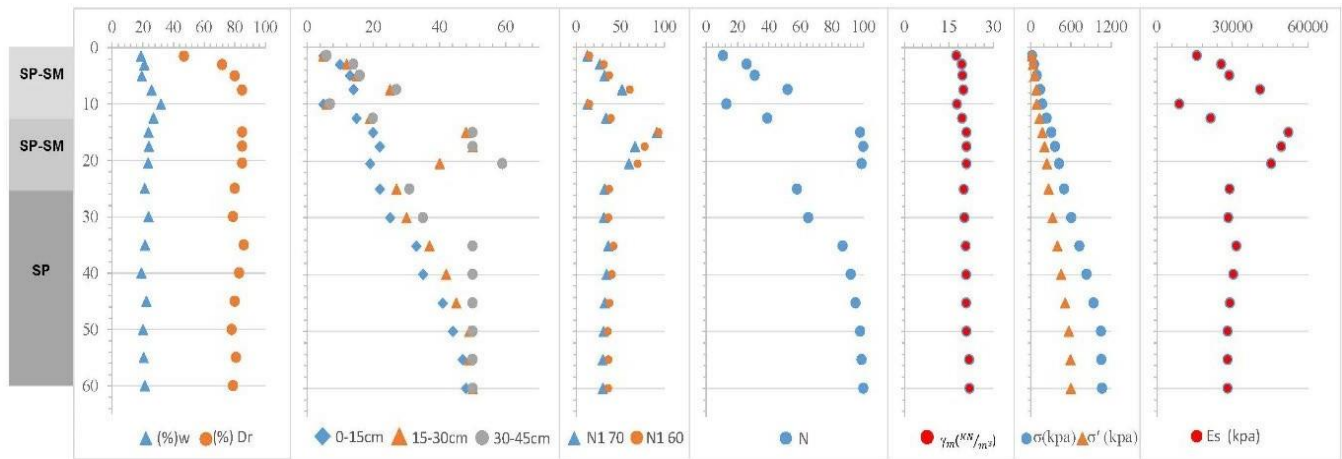
جدول ۱. ابعاد تیر و ستون های طبقات سازه

Table 1. Dimensions of beams and columns in building floors

تیر (b*h) (cm)	ستون (b*b) (cm)	طبقه
۸۵*۹۰	۹۰*۹۰	۱-۹
۸۵*۶۵	۸۰*۸۰	۳۳-۱۰

از ارتفاع ۷۶/۲ cm سقوط می کند، ضرباتی نواخته شد تا در خاک کف گمانه فرو رود به ازاء ۱۵ cm نفوذ تعداد ضربات یادداشت گردید و اینکار برای سه تا ۱۵ cm انجام شد. تعداد ضربات مربوط به دو مرحله ۱۵ cm آخر به عنوان عدد SPT محسوب می شود. در این مطالعه از گمانه BH3 جهت تعیین پارامترهای خاک مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات سرعت موج برشی و داده های تست نفوذ استاندارد (SPT) برای محاسبه Es (مدول الاستیسیته خاک) اتخاذ شد. این محاسبات تا عمق ۶۰ m لحاظ گردید.

$4/2 \text{ kg/cm}^2$ و در حالت لرزه ای $5/6 \text{ kg/cm}^2$ گزارش شده است. همچنین بدون ملاحظات نشست مجاز، ظرفیت باربری مجاز خاک زیر پی گسترده این سازه بیشتر از تنش موجود می باشد. (تنش موجود زیر خاک پی در حالت لرزه ای $3/75 \text{ kg/cm}^2$ و در حالت ثقلی برابر $2/9 \text{ kg/cm}^2$ می باشد) ولی نشست های موجود پی گسترده این سازه بدون در نظر گرفتن شمع ها بیشتر از نشست مجاز آیین نامه ها و در حدود ۴۰ cm می باشد. بنابراین در این سازه از پی گسترده به همراه شمع استفاده شده است و در مدل سازی آن که توسط نرم افزار MIDAS انجام شده، لحاظ گردید. در شکل ۲ پلان ستون گذاری سازه مورد مطالعه قابل مشاهده است. همچنین ابعاد ستون ها و تیرهای طبقات مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. جهت بررسی شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه سه عدد گمانه به عمق ۶۰ m از سطح زمین حفاری شده است، گمانه ها به صورت ماشینی توسط شرکت مشاور حفاری شده اند. در حین حفاری در اعماق مختلف نمونه هایی جهت آزمایش تهیه و همچنین اقدام به آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) طبق استاندارد ASTM-D1586 گردیده است و در نزدیکی سطح زمین فاصله انجام آزمایش ها کمتر و با افزایش عمق این فاصله افزایش یافته است. پس از توقف حفاری، نمونه گیر آزمایش SPT به عمق مورد نظر فرستاده شد و به آن وزنه ۶۳/۵ km که



شکل ۳. خلاصه شرایط زیرسطحی مربوط به شهر بابلسر

Fig. 3. Summary of subsurface conditions in Babolsar city

موقعیت ساختمان و مشخصات سازه و همچنین گزارش شرکت مشاور پی گسترده به تنهایی کفایت لازم را جهت ظرفیت باربری نداشته لذا در طراحی از ۱۰۰ عدد شمع استفاده شده است. شمع‌ها به قطر ۱/۲ m و طول ۳۰ m و ۲۵ m مطابق نقشه اجرا شده مدل سازی شد. خاک مورد مطالعه دارای سه لایه می‌باشد. مشخصات لایه‌های خاک در جدول ۲ گزارش شده است. خاک این زمین در اعماق حدود ۸ m و حدود ۱۷ m ریزدانه و در بقیه اعماق درشت دانه و سطح آب زیرزمینی نیز در عمق ۵ m و از ظرفیت باربری نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد. پی گسترده با عمق استقرار ۲/۲ m نسبت به تراز خیابان و ابعاد ۳۰ m در ۴۶ m در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نمایی از مدل سازی ساختمان و لایه های خاک نشان می‌دهد.

۵-۲- المان های خاک و سازه و شرایط مرزی

به منظور شبیه سازی رفتار المان های سازه الاستیک و رفتار غیرخطی محیط خاک موهر - کولمب به کار گرفته شده است. پارامترهای مدول الاستیسیته، وزن مخصوص، زاویه اصطکاک داخلی برای هر لایه خاک به طور جداگانه در نظر گرفته شد.

المان ها باید به گونه ای انتخاب شوند که از حذف بخش های با فرکانس بالای تحریک جلوگیری شود. بنابراین، با توجه به بالاترین فرکانس های ممکن تحریک ورودی و سرعت موج برشی خاک، ابعاد عناصر در بازه ای بین ۱/۵ تا ۱/۸ طول موج اولیه تحریک تعیین شدند و این طول موج با ضریبی مطابق با پیشنهاد رزیتانو و همکاران (۲۰۱۴) در نظر گرفته شد. [۱۳] در این

شکل ۳ اعداد نفوذ استاندارد در اعماق مختلف، درصد رطوبت (w)، چگالی نسبی (D_R)، عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده برای خاک های درشت دانه و ریزدانه (N_{170} ، N_{160})، وزن مخصوص مرطوب (m)، تنش عمودی کل (σ) و تنش عمودی مؤثر (σ') و مدول الاستیسیته خاک را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج ارائه شده در گزارش ژئوتکنیک محل ساخت و نتایج آزمایش دانه بندی، نوع خاک طبق سیستم طبقه بندی یکپارچه تا عمق ۱۲ متر SP-SM و SP است. از عمق ۱۲ تا ۲۴ متر، شامل خاک ریزدانه در گروه SP-SM است. نوع خاک از عمق ۲۴ تا ۶۰ متر SP است.

۵-۱- مدل سازی عددی

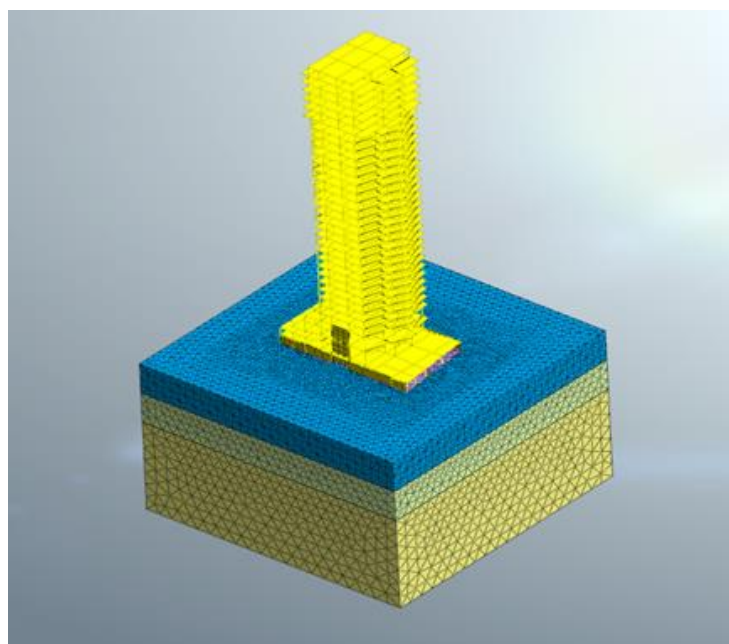
ابتدا سازه مورد نظر در نرم افزار ETABS و مطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده است. سیستم سازه مورد مطالعه از نوع قاب خمشی به همراه دیوار برشی ویژه می‌باشد. به منظور مدل سازی سیستم خاک-سازه و حل معادلات پیچیده و شرایط مرزی و هندسی، نرم افزار المان محدود MIDAS GTS NX بکار گرفته شده است. این نرم افزار برای مدل سازی سازه به همراه خاک و پی جهت تحلیل مسائل اندرکنش استفاده می‌شود. (لی ۲۰۲۰) [۱۰]

در نرم افزار ژئوتکنیکی MIDAS سه لایه خاک به ضخامت های ۱۲ m، ۳۶ m و ۱۲۰ m با ابعاد ۱۰۰ m × ۱۰۰ m مدل شده است. با توجه به

جدول ۲. مشخصات و لایه‌های خاک مورد مطالعه

Table 2. Soil properties and layers under study

شماره لایه	ضخامت لایه m	مدول الاستیسیته kg/cm ²	زاویه اصطکاک داخلی deg	وزن مخصوص kg/m ³	نوع خاک
لایه اول	۱۲-۰	۱۶۰	۳۵	۱۹۰۰	SP-SM
لایه دوم	۱۲-۲۴	۴۵۰	۳۷	۲۰۰۰	SP-SM
لایه سوم	۲۴-۶۰	۹۲۰	۴۰	۲۱۰۰	SP



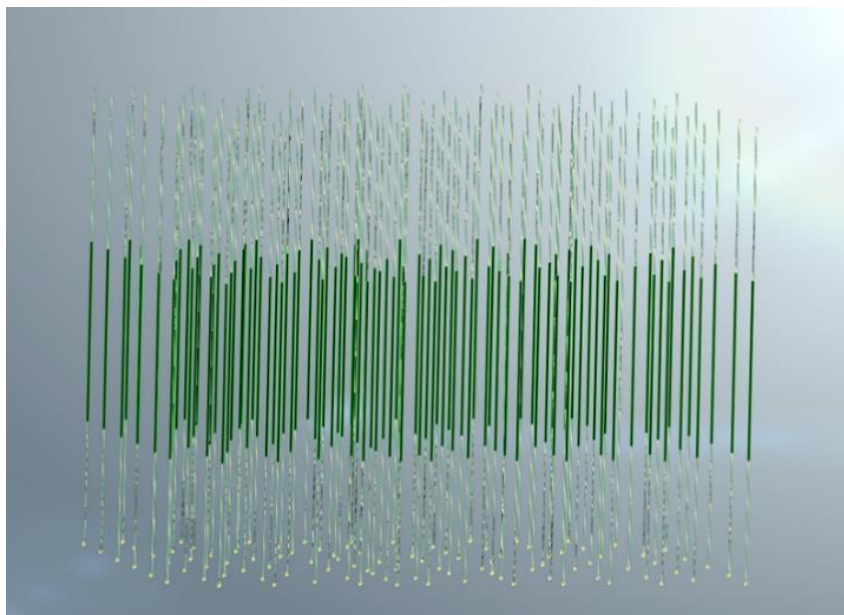
شکل ۴. سازه و لایه‌های خاک مدل شده در نرم افزار MIDAS gts nx

Fig. 4. Structure and soil layers modeled in MIDAS GTS NX software

در این راستا، ضریب کاهش مقاومت (Rinter) در چارچوب معیار شکست موهر-کولمب، در معادلات لحاظ شد.

برای شبیه‌سازی رفتار مرزی بین مصالح مشابه یا مصالح متفاوت از یکدیگر و تعریف اندرکنش بین مصالح مدل رفتاری سطح مشترک بکار گرفته شده است. مدول سختی برشی نشان‌دهنده مقاومت المان سطح مشترک در برابر لغزش و تغییر شکل‌های برشی است. انتخاب این پارامتر برابر با مدول الاستیسیته مصالح اطراف، به منظور ساده‌سازی مدل و تضمین انتقال نیروهای برشی در سطح تماس صورت گرفته است. این فرض کمک می‌کند تا رفتار لغزشی به صورت الاستیک اولیه شبیه‌سازی شود و در صورت

مطالعه، مرز بی‌نهایت با استفاده از میدان آزاد شبیه‌سازی شد و مدل برای دستیابی به شرایط بهینه و جلوگیری از بازتاب موج در محدوده مرزی، در میدان آزاد اجرا گردید. مرزهای افقی مدل توسط مرزهای جانبی تعریف و این مرزها از طریق دمپ‌های ویسکوز به فضای باز متصل شدند. مقادیر ضرایب دمپ‌های ویسکوز با توجه به موج‌های P و S به صورت خودکار توسط نرم‌افزار MIDAS GTS NX ارزیابی شدند. بستر سنجی با شرایط مرزی سخت مدل‌سازی گردید و تحلیل‌های SSI انجام شد. تحریک مستقیم به گره‌های پایین‌ترین سطح مدل مطابق با مطالعه ریخانی و نجار ۲۰۰۸ اعمال گردید. [۱۴] مدل‌سازی رفتار رابط پی و خاک مجاور ضروری است و



شکل ۵. المان سطح مشترک بین شمع ها در نرم افزار MIDAS gts nx

Fig. 5. Interface element between piles in MIDAS GTS NX software

می‌کند که رفتار نسبی بین المان زمین و گره شمع را نشان می‌دهد. برای تعریف رفتار، مواد و ویژگی‌های یک المان شمع را می‌توان بر اساس داده‌های آزمایشی، مانند تست بار وارد کرد. برای محاسبه مدول سختی نرمال ابتدا با استفاده از نمودار آزمایش بارگذاری الاستیکی شمع، نیروی نهایی گسیختگی شمع و جابجایی شمع استخراج گردید و سپس محاسبات مربوط به مدول سختی نرمال با استفاده از روابط شماره ۹ تا ۱۱ مربوط به نرم افزار MIDAS GTS NX بدست آورده شد. نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۳ برای هر لایه خاک به طور جداگانه آورده شده است.

$$vow_w = a_1 \times 10^{-1} + a_2 \times 10^{-2} + a_n \times 10^{-n} \quad (1)$$

$$UltimateShearForce = \frac{P_u}{L_p \times t} \quad (2)$$

$$K_n = \frac{E_{oedi}}{t_v} \quad (3)$$

رسیدن به حد تسلیم، مدل غیرخطی سطح مشترک فعال گردد. این مدل مبتنی بر قانون اصطکاک کولمب (۱۷۸۵) میلادی بوده و از این فرض پیروی می‌کند که نیروی اصطکاک المان سطح مشترک بخشی از ضریب اصطکاک و نیروهای محصورکننده وابسته به جهت نرمال عمل‌کننده بر سطح مشترک است. المان‌های سطح مشترک برای جابه‌جایی نسبی در امتداد برشی و نرمال بکار گرفته می‌شود که رفتار صفحه - صفحه و خط - خط را شبیه‌سازی می‌کند. شکل ۵ المان سطح مشترک بین شمع‌ها در نرم افزار را نمایش می‌دهد. پارامترهای غیرخطی اصلی مدل سطح مشترک شامل مدول سختی نرمال و مدول سختی برشی می‌باشند. پارامتر مدول سختی نرمال همان پارامتر مدول الاستیسیته برای تعریف رفتار پیوند و عدم پیوند در جهت نرمال (عمود) بر المان‌های سطح مشترک است و پارامتر مدول سختی برشی مدول الاستیسیته برای رفتار لغزشی در جهت نرمال بر المان سطح مشترک می‌باشد.

رفتار المان شمع را می‌توان به یک رفتار عادی و یک رفتار مماسی تقسیم کرد. رفتار نرمال بین شمع و زمین اطراف آن ثابت و صلب در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که رفتار مماسی یک رفتار الاستیک غیرخطی است. رفتار الاستیک غیرخطی به نیروی تسلیم و تابع تسلیم اختصاص داده شده تقسیم می‌شود. المان نوک شمع به‌عنوان سطح مشترک نقطه جامد عمل

جدول ۳. محاسبات مربوط به مدول سختی شمع

Table 3. Calculations related to the pile stiffness modulus

شماره لایه	Kn (kn/m2)	Eoed,i (kn/m2)	Gi (kn/m2)
لایه اول	21539	21539	6154
لایه دوم	60578	60578	17308
لایه سوم	123848	123848	35385

است که در این پژوهش با توجه به نوع خاک مقدار آن ۱ در نظر گرفته شده است. [۱۵]

$$K_t = \frac{G_i}{t_v} \quad (۴)$$

۵-۳- آزمایش بارگذاری شمع و صحت صنجی

در سازه مورد بحث تعداد ۴ شمع مورد آزمایش قرار گرفت، که دو نمونه از آنها با نرم افزار MIDAS مورد صحت سنجی قرار گرفته است. بدین منظور جهت آزمایش نیروی مورد نیاز توسط یک جک هیدرولیکی به شمع اعمال شد. در طول آزمایش بارگذاری شمع میزان بار وارده به شمع و همچنین تغییر شکل سر شمع تحت بارهای وارده اندازه گیری شد. بار مورد نظر توسط جک هیدرولیکی به شمع وارد گردید، که این جک جهت اندازه گیری بار وارد شده مجهز به یک اندازه گیر عقربه ای متصل به خود می باشد.

$$\phi_i = \tan^{-1} R \tan(\phi_{soil}) \quad (۵)$$

$$E_{oedi} = \frac{2G_i(1 - v_i)}{1 - 2Xv_i} \quad (۶)$$

$$G_i = RG_{soil} \quad (۷)$$

$$G_{soil} = \frac{E}{2(1 + v_{soil})} \quad (۸)$$

$$R_{inter} * (K_n u_n + K_t u_t \tan(\phi) - C) = 0 \quad (۹)$$

جهت بارگذاری استاتیکی از روش بارگذاری ارائه شده در مشخصات فنی و استاندارد ASTM استفاده شده است. شکل ۶ نشان دهنده اتصال اندازه گیر عقربه ای برای اندازه گیری تغییر مکان (نشست) شمع می باشد. اندازه گیرهای عقربه ای وظیفه ثبت نشست شمع مورد نظر تحت بارگذاری مرحله ای را دارند. که این بارگذاری از صفر تا حدود ۷۵۰ ton تا ۹۰۰ ton (با توجه به موقعیت هر شمع) لحاظ شد، و به تدریج پس از اعمال نیروی حداکثری مورد نظر روی هر شمع به تدریج کم شده است. در تمامی این فرایند نشست توسط اندازه گیر عقربه ای ثبت گردید، که این نتایج یعنی ظرفیت باربری (نمودار بار- تغییر مکان) مربوط به هر چهار شمع آزمایشی در شکل ۷ قابل مشاهده است.

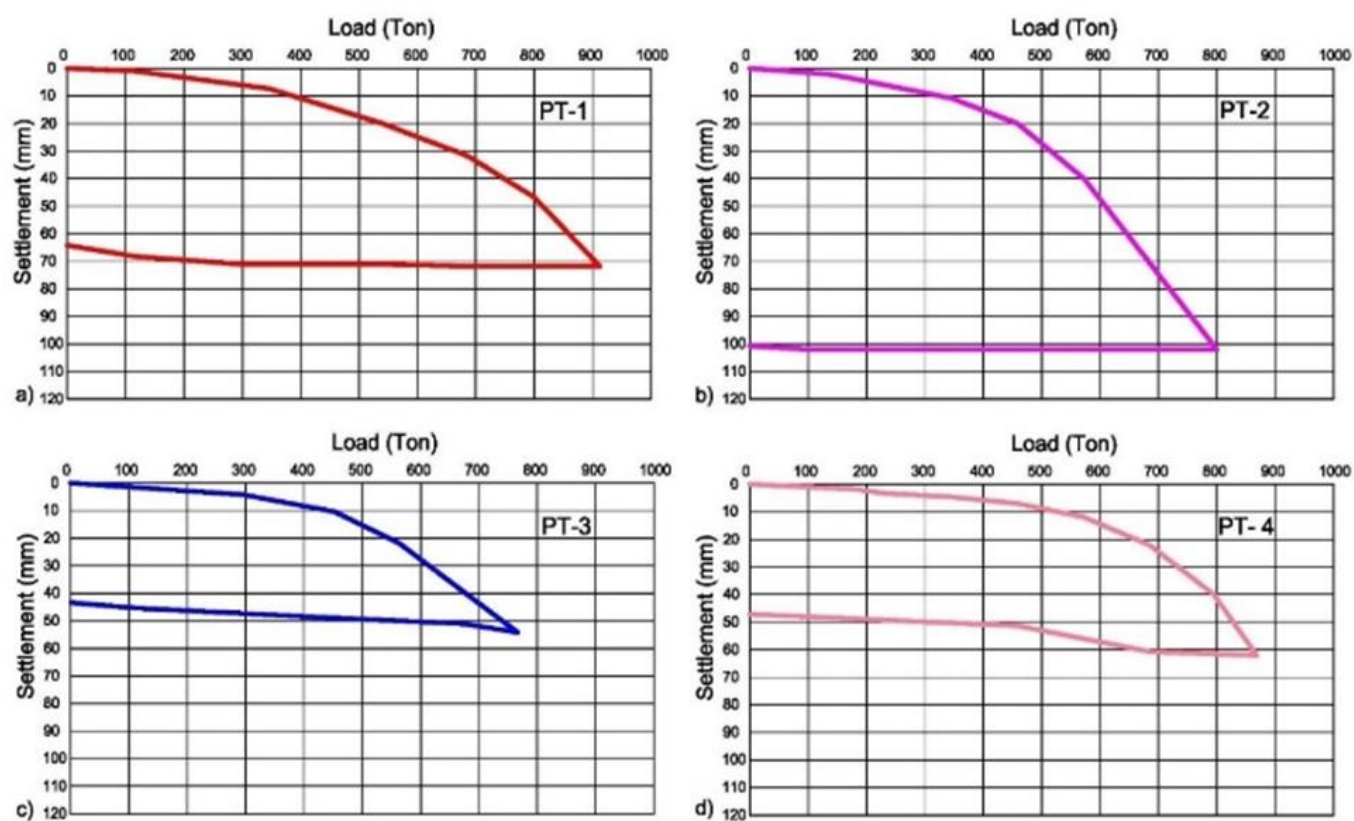
در این معادلات، u_n و u_t نشان دهنده جابجایی های نسبی عمودی و افقی بین سطوح مشترک هستند. A' مساحت سطح مشترک خاک-پی، t_v ضخامت مجازی سطح مشترک $[0.1 \text{ } t_v^{1/4}]$ ، همانطور که توسط مانا و بردیا (۲۰۰۹) توصیه شده است، $E_{oed,i}$ مدول مقایسه سطح مشترک، G_{ur} مدول برشی متوسط باربرداری-بارگذاری مجدد، و K_t و K_n سختی سطح مشترک هستند. با استفاده از این معادلات، سختی سطح مشترک بین دو قسمت با استفاده از فنرهای خطی نرمال و برشی مدل سازی شد. مقاومت واقعی سطح مشترک به پارامترهایی مانند نوع ماده (خاک، بتن و غیره) و مساحت فونداسیون بستگی دارد. این مقدار معمولاً در محدوده بین ۰/۱ تا ۱

روش های متفاوتی برای آزمایش بارگذاری شمع وجود دارد که برای تعیین منطقی ترین مقدار نیروی گسیختگی از روی نمودار بار نشست، توجه به مشخصات شمع، نوع خاک، روش انجام آزمایش، رفتار سیستم شمع- خاک در مقابل بار وارده، مقدار تغییر مکان، شیب خط تغییر مکان در پله های



شکل ۶. اندازه گیر عقب‌ریزه‌ای نشست شمع‌ها

Fig. 5. Dial gauge for pile settlement



شکل ۷. نمودار بار تغییر مکان (نشست) چهار شمع

Fig. 7. Load-displacement (settlement) curve of four piles

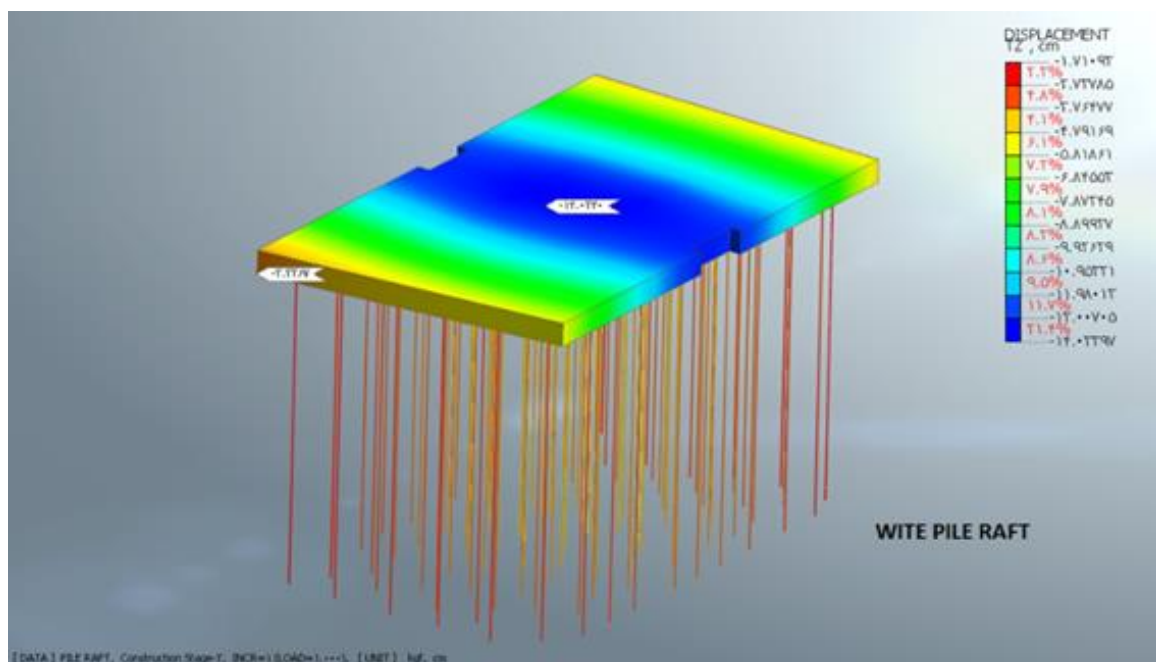
جدول ۴. نتایج تفسیر ظرفیت باربری شمع های مورد آزمایش بارگذاری استاتیکی

Table 4. Results of interpretation of the bearing capacity of piles tested by static load testing.

Pile Name	Pile Specifications							Proposed Ultimate load (Ton)	Corresponding Settlement(mm)	Allowable Capacity (Ton) SF=2.2
	Length (m)	Diameter (cm)	Butler & Hoy	2 - Line	Davison	Chin-Kondner	Brinch-Hansen			
PT-1	25	100	880	640	560			690	36	315
PT-2	30	100	760	500	520			640	46	290
PT-3	25	100	720	500	550	909	884	635	31	288
PT-4	30	100	820	700	680	1000	837	750	32	340
Average 25 m			800	545	555	909	884	662	-	300
Average 30 m			790	590	580	1000	837	695	-	315

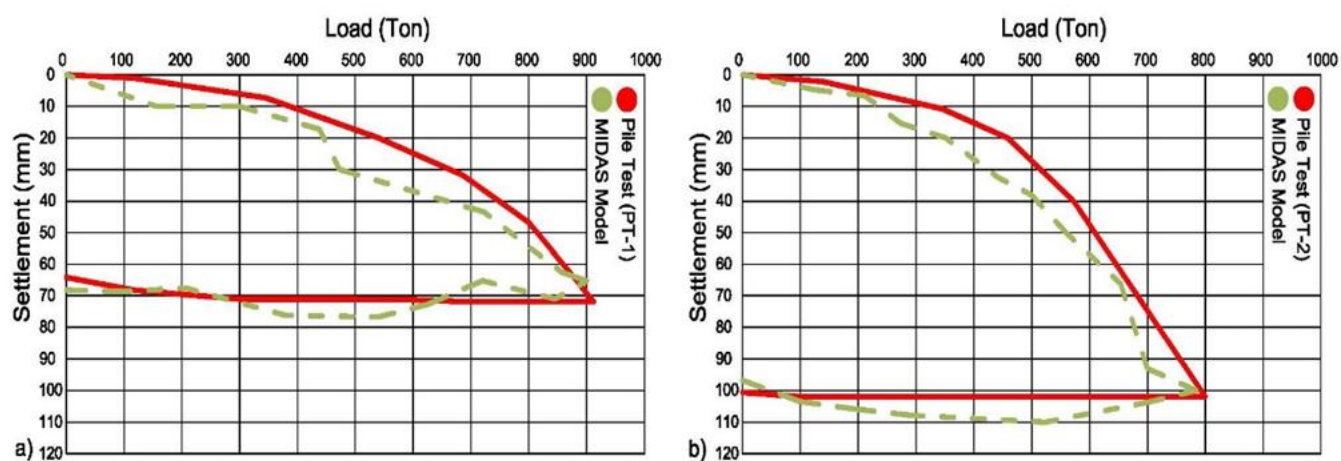
شده است. در آزمایش بر روی شمع PT-3 به طول ۲۵ m با افزایش بار و رساندن به بار ۷۶۵ ton به اندازه بیش از ۵۰ mm نشست کرده و با برداری و رساندن به بار صفر، مقدار نشست حدود ۴۲ mm شده است. در آزمایش بر روی شمع PT-4 به طول ۳۰ m مقدار نشست در بار ۸۶۳ ton برابر ۶۱ mm بوده است و با برداری و رساندن به بار صفر مقدار نشست شمع در حدود ۴۶ mm شده است. آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع ها قبل از اجرای پی و برای چهار شمع توسط شرکت مشاور انجام گردیده بود. سپس در این تحقیق برای صحت سنجی مدلسازی شمع و خاک اطراف آن، دو شمع از چهار شمع مورد آزمایش (شمع های PT-1 و PT-2) در نرم افزار MIDAS مدلسازی گردید و مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۸ مدل سازی شمع ها را نشان میدهد. برای اطمینان از صحت مدل در MIDAS چندین نقطه مطابق نمودار بار-تغییر مکان آزمایش شمع اعمال گردید که این نقاط نشان دهنده بار ورودی به شمع بود. سپس مقدار تغییر مکان متناظر با هر بار توسط مدل خروجی گرفته شد. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، نمودار بار تغییر مکان دو شمع PT-1 و PT-2 با دو شمع مدل شده توسط نرم افزار تطابق نسبتاً خوبی (اختلاف کمتر از ۱۰ درصد) دارد. مقدار نشست محاسبه شده در نرم افزار برای شمع PT-1 با بارگذاری ۹۰۰ ton، ۹۰۰ mm و ۶۵ و برای شمع PT-2 با بارگذاری ۸۰۰ ton، ۸۰۰ mm محاسبه شد. که

بارگذاری و همچنین مقدار تغییر شکل پلاستیک باقی مانده در سیستم خاک-شمع لازم می باشد. نتایج نمودار چهار آزمایش انجام گرفته با استفاده از روش های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. در انتخاب مقدار بار نهایی پیشنهادی، توجه بیشتری به مقدار برآورد شده با استفاده از روش دیویسون و روش باتلر و هوی شده است. برای تعیین بار مجاز روی شمع، ظرفیت شمع معمولاً بر ضریب اطمینان تقسیم می شود. مقدار ضریب اطمینان به میزان پذیرش عوامل مربوط به گسیختگی و همچنین آگاهی و کنترل جنبه های موثر در تغییرات ظرفیت باربری در سایت بستگی دارد. در مواردی که آزمایش در شرایط نهایی انجام گرفته و شمع ها نیز مشابه شرایط عملکرد واقعی در پروژه اجرا می گردد، می توان ضریب اطمینان را از ۲/۵ به ۲/۲ کاهش داد. که در این مطالعه مورد ذکر شده اعمال گردیده است. همچنین در جدول ۴ نشست متناظر با بار گسیختگی با مقدار ضریب اطمینان ۲/۲، مقدار بار مجاز شمع تعیین شده بر اساس روش های مختلف قابل مشاهده است. در آزمایش بروی شمع PT-1 به طول ۲۵ m مقدار نشست در بار ۹۱۰ ton برابر ۷۰ mm بوده است و با باربرداری و رساندن به بار صفر مقدار نشست شمع حدود ۶۳ mm شده است. در آزمایش بروی شمع PT-2 به طول ۳۰ m مقدار نشست در بار ۷۹۶ ton برابر با ۱۰۰ mm بوده است و با بار برداری و رساندن به بار صفر مقدار نشست شمع حدود ۹۹ mm



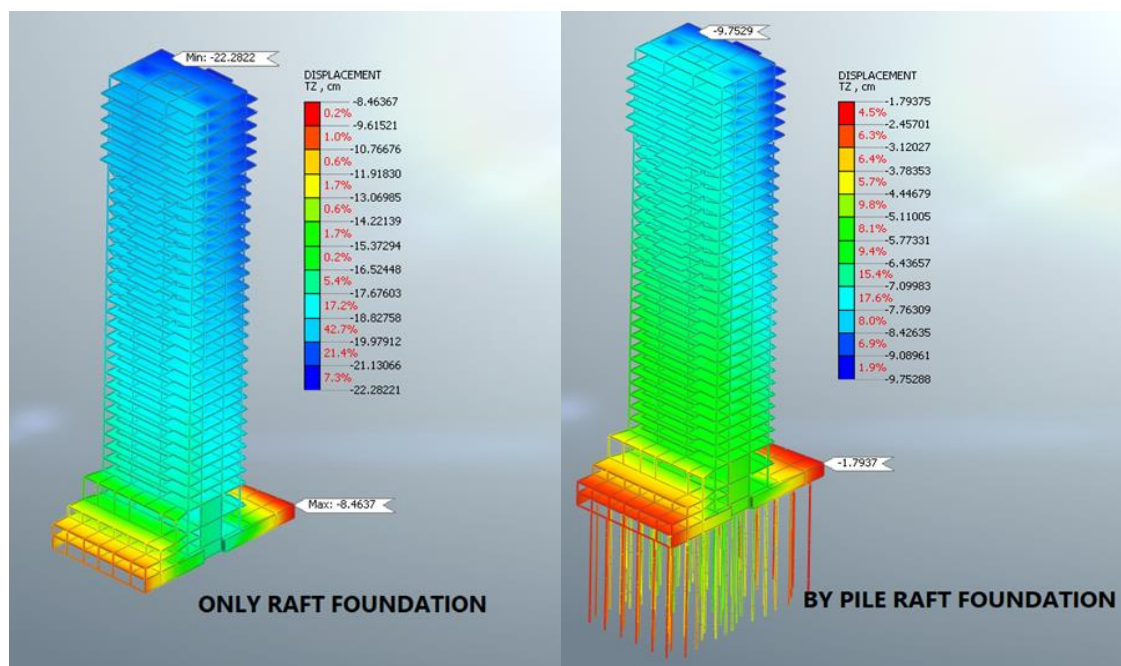
شکل ۸. حداکثر و حداقل نشست پی با حضور شمع‌ها در نرم‌افزار MIDAS gts nx

Fig. 8. Maximum and minimum foundation settlement with the presence of piles in MIDAS GTS NX software



شکل ۹. مقایسه نشست آزمایش بارگذاری استاتیکی و نشست در نرم افزار MIDAS

Fig. 9. Comparison of settlement from static load testing and settlement in MIDAS



شکل ۱۰. نشست طبقات در حالت بدون حضور شمع و با حضور شمع ها در MIDAS gts nx

Fig. 10. Settlement of floors in the absence and presence of piles in MIDAS GTS NX

کاهش می‌یابد. در یک دید کلی می‌توان گفت که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه باعث می‌شود تا رفتار سازه به رفتار واقعی‌اش نزدیکتر شود. همچنین در جدول ۶ مقایسه‌ای بین دو مدل اندرکنش خاک-سازه و مدل فنر وینکلر قابل مشاهده است. نتایج دو مقایسه نشست پی در نرم افزار، نشان می‌دهد که در نظریه اندرکنش خاک و سازه در تحلیل ها نتایج دقیق تر و به واقعیت نزدیکتر است.

همانطور که در جدول مشاهده می‌گردد، با حضوری شمع مقدار این نشست بیشتر شده است، به طوری که در حالت حداکثر نشست با حضور شمع عدد ۱۴ cm و برای حالت بدون حضور شمع ۱۰ cm محاسبه گردید.

۶-۲- نشست خاک زیر پی

همانطور که عنوان شد فونداسیون ساختمان ۳۳ طبقه از نوع پی گسترده با ضخامت بالا می‌باشد. از سویی دیگر سازه آن نیز قاب خمشی به همراه دیوار برشی بتن آرمه می‌باشد که دارای سختی و صلبیت بالاست. در این صورت میتوان مقادیر بزرگتری برای نشست‌های کل و تفاضلی مجاز در نظر گرفت. هرچند مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ویرایش سال ۹۲ بند ۱-۴-۴ و در جدول ۲-۴-۷ برای پی‌های گسترده بر روی خاک ماسه‌ای نشست مجاز کل ۵ cm و نشست تفاضلی ۲ cm را بعنوان مقادیر اولیه

این مقادیر نشان دهنده صحت مدل‌سازی است.

۶-۱- نشست طبقات

مطالعه صورت گرفته بر روی عملکرد لرزه‌ای ساختمان بلندمرتبه می‌باشد که با در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه، با سه لایه خاک و تعداد ۱۰۰ عدد شمع تحلیل و بررسی شد. شکل ۱۰ مدل‌سازی ساختمان مورد مطالعه را در دو حالت با حضور شمع‌ها و بدون حضور شمع‌ها پس از تحلیل در نرم افزار MIDAS را نشان می‌دهد.

پس از تحلیل و بررسی مدل‌سازی انجام شده، مشخص شد در نظریه شمع‌ها در پی ساختمان باعث کاهش نشست طبقات و همچنین کاهش نشست پی می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی در جدول ۵ ارائه شده است. به عنوان مثال حداکثر نشست پی با حضور شمع (حالت در نظر گیری SSI) ۱۴ cm و در حالت بدون حضور شمع به مقدار ۱۹ cm میرسد. همچنین حداقل نشست پی در دو حالت مذکور یعنی حالت با حضور شمع و بدون حضور شمع به ترتیب مقادیر ۳ cm و ۵ cm محاسبه گردید. با توجه به مقادیر بدست آمده مشخص شد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه نشست طبقات و نشست پی به طور قابل توجهی

جدول ۵. مقایسه نتایج نشست پی با حضور شمع ها و بدون حضور شمع ها در نرم افزار MIDAS GTS NX software (cm).

Table 5. Comparison of foundation settlement results with and without piles in MIDAS GTS NX software (cm)

نشست پی (cm)	با حضور شمع ها (حالت SSI)	بدون حضور شمع ها (حالت Fixed Base)
حداکثر	۱۴	۱۹
حداقل	۳	۵

جدول ۶. مقایسه نتایج نشست پی در دو مدل اندرکنش خاک و سازه و مدل فنر وینکلر (cm)

Table 6. Comparison of foundation settlement results in two models: soil-structure interaction and Winkler spring model (cm)

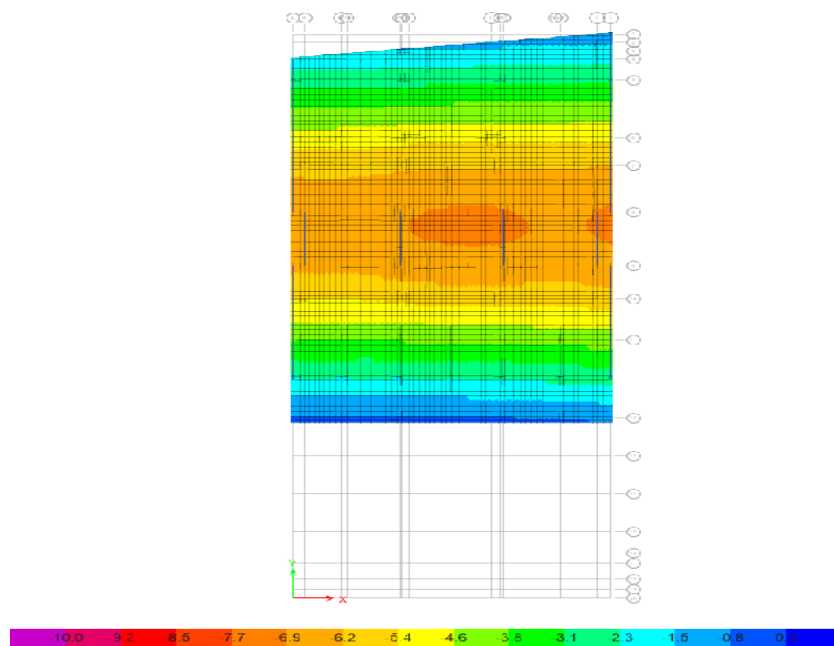
نشست پی (cm)	با حضور شمع ها (حالت SSI)	بدون حضور شمع ها (حالت Fixed Base)
حداکثر	۱۴	۱۰
حداقل	۳	۰/۸

۶-۳- نیروی شمع ها

در تحقیق حاضر به محاسبه نیروی شمع ها در دو حالت پایه ثابت و حالت اندرکنش خاک-سازه نیز پرداخته شده است. شکل ۱۳ نمایی از نرم افزار که حاوی اطلاعات نیروی شمع ها با لحاظ اثرات خاک می باشد را نشان می دهد. نیروی شمع ها تحت بارهای ثقلی و لرزه ای در مدل فنر وینکلر (حالت پایه ثابت) بیشتر از مدل اندرکنشی شده است. جدول ۸ و جدول ۹ مقادیر نیروی شمع ها را در دو حالت ثقلی و لرزه ای نشان می دهد. به عنوان مثال نیروی حداکثر شمع در حالت لرزه ای و در حالت بدون لحاظ اندرکنش (محاسبه شده با نرم افزار SAFE) ۴۳۰ ton و همین پارامتر با لحاظ اندرکنش خاک - سازه (محاسبه شده با نرم افزار MIDAS) ۳۹۴ ton محاسبه گردید. که این مسئله اهمیت لحاظ کردن اثرات خاک در محاسبات را نشان داده است. از طرف دیگر نیروی حداکثر شمع در حالت ثقلی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه ۳۳۷ ton و بدون در نظرگیری اثرات خاک ۴۰۰ ton محاسبه گردید. به طور کلی نتایج نشان می دهد نیروی شمع ها با لحاظ اثرات خاک در تحلیل ها برای بارهای لرزه ای حدود ۱۰ درصد کمتر از حالت پایه ثابت می باشد. و در بارهای ثقلی میزان این اختلاف

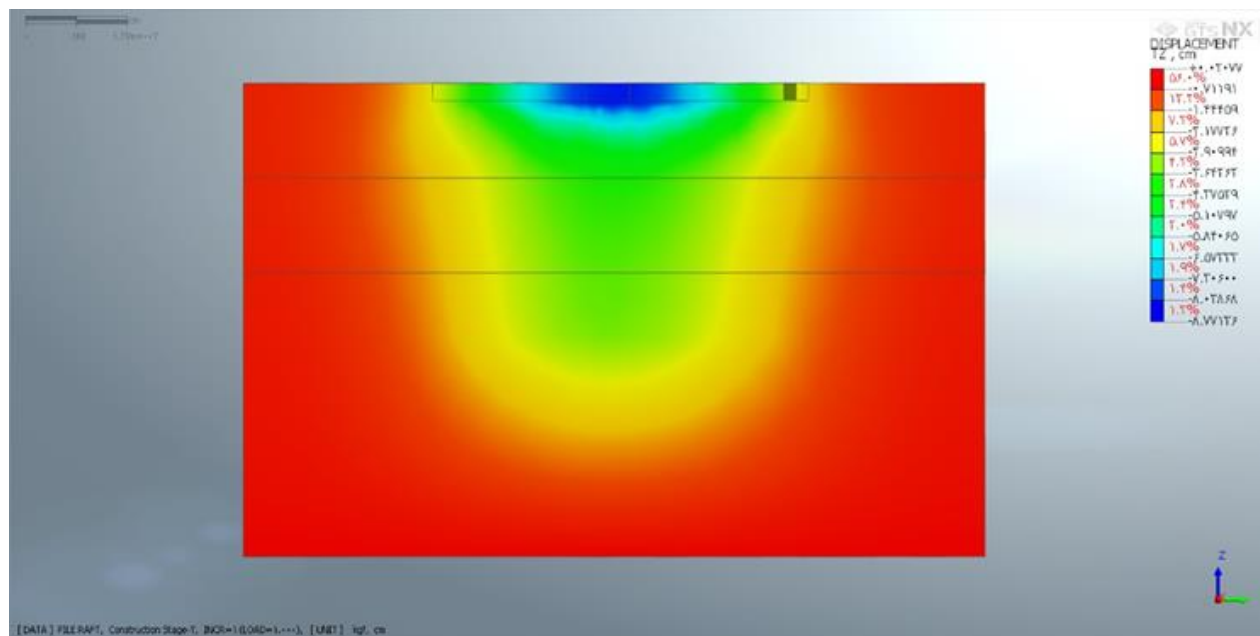
پیشنهاد کرده است، اما شایان ذکر است این مقادیر وقتی صحیح هستند که پی و سازه صلبیت چندانی ندارند. اگر صلبیت پی و سازه زیاد باشد مقادیر نشستهای مجاز را می توان بیشتر در نظر گرفت. در ساختمان مورد بحث با توجه به وجود صلبیت بالای سازه و پی در طراحی فونداسیون نشست مجاز کل بصورت بسیار محافظه کارانه عدد ۱۰ cm و نشست تفاضلی مجاز نیز ۴ cm در نظر گرفته شده است. که این میزان نشست از مقدار مجاز آیین نامه مذکور عبور نکرده است.

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب نشست خاک زیر پی تحت بارهای لرزه ای در نرم افزار SAFE و نشست خاک زیر پی تحت بارهای ثقلی در نرم افزار MIDAS را نشان می دهد. در جدول ۷ مقایسه ای بین نشست تحت بار ثقلی و بار لرزه ای انجام شد. همانطور که مشخص است مقدار نشست تحت بارهای لرزه ای بیشتر از بار ثقلی می باشد. به عنوان مثال در حالت لرزه ای با نرم افزار MIDAS مقدار نشست حداکثر ۷/۸ cm می باشد، در صورتی که مقدار این نشست برای بار ثقلی ۶/۵ cm محاسبه شده است. هرچند میزان این اختلاف ناچیز است، اما با تغییر جنس خاک احتمال افزایش این اختلاف بیشتر می گردد.



شکل ۱۱. نشست خاک زیر پی تحت بارهای لرزه‌ای در نرم‌افزار SAFE

Fig. 11. Soil settlement beneath the foundation under seismic loads in SAFE software



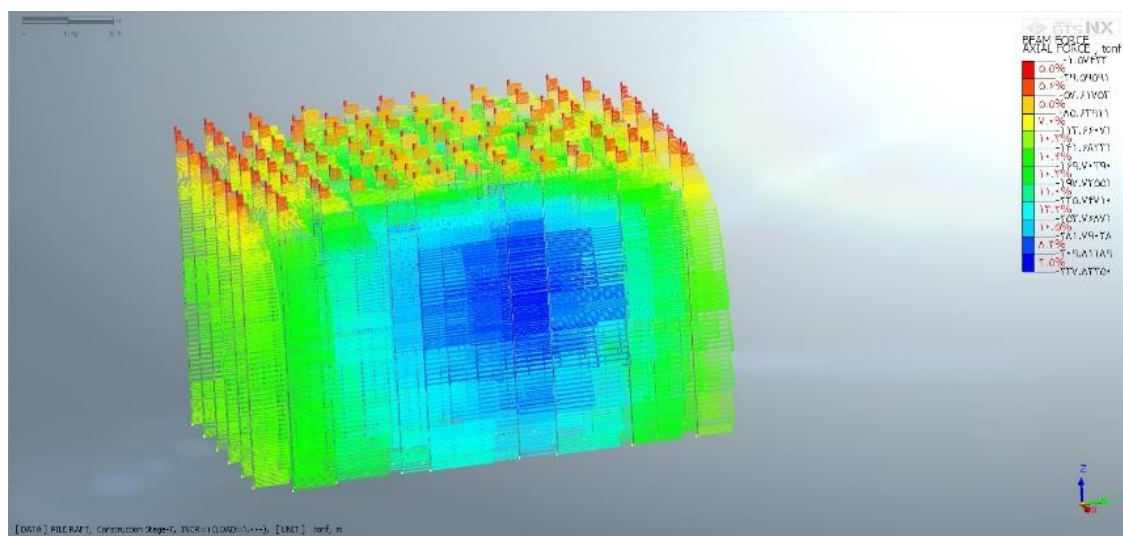
شکل ۱۲. نشست لایه‌های خاک زیر پی تحت بارهای ثقلی در نرم‌افزار MIDAS GTS NX

Fig. 9. Settlement of soil layers beneath the foundation under vertical loads in MIDAS GTS NX software

جدول ۷. مقایسه نتایج نشست خاک زیر پی در دو مدل اندرکنش خاک و سازه و مدل فنر وینکلر

Table 7. Comparison of soil settlement results beneath the foundation in two models: soil-structure interaction model and Winkler spring model

	بار لرزه ای		بار ثقلی	
	Max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Min (cm)
SAFE	۷/۱	۳/۵	۵/۹	۲/۳
MIDAS GTS NX	۷/۸	۳/۹	۶/۵	۲/۷



شکل ۱۳. نمایش کانتور نیروی شمع‌ها در نرم‌افزار MIDAS GTS NX.

Fig. 13. Display of pile force contours in MIDAS GTS NX software.

جدول ۸. مقایسه نیروی شمع‌ها تحت بار لرزه‌ای در نرم‌افزار MIDAS & SAFE

Table 8. Comparison of pile forces under seismic loads in MIDAS and SAFE software

	نیروی شمع‌ها تحت بار لرزه‌ای (ton)	
	حداکثر	حداقل
MIDAS GTS NX	۳۹۴	۱/۹
SAFE	۴۳۰	۲/۲

جدول ۹. مقایسه نیروی شمع‌ها تحت بار ثقیل در نرم‌افزار MIDAS & SAFE

Table 9. Comparison of pile forces under vertical loads in MIDAS and SAFE software

	نیروی شمع‌ها تحت بار ثقیل (ton)	
	حداکثر	حداقل
MIDAS GTS NX	۳۳۷	۲۹
SAFE	۴۰۰	۷۴

جدول ۱۰. تاریخچه زمانی شتاب زلزله افقی منتخب از پایگاه داده حرکات زمین PEER

Table 10. Time history of selected horizontal earthquake acceleration from the PEER ground motion database

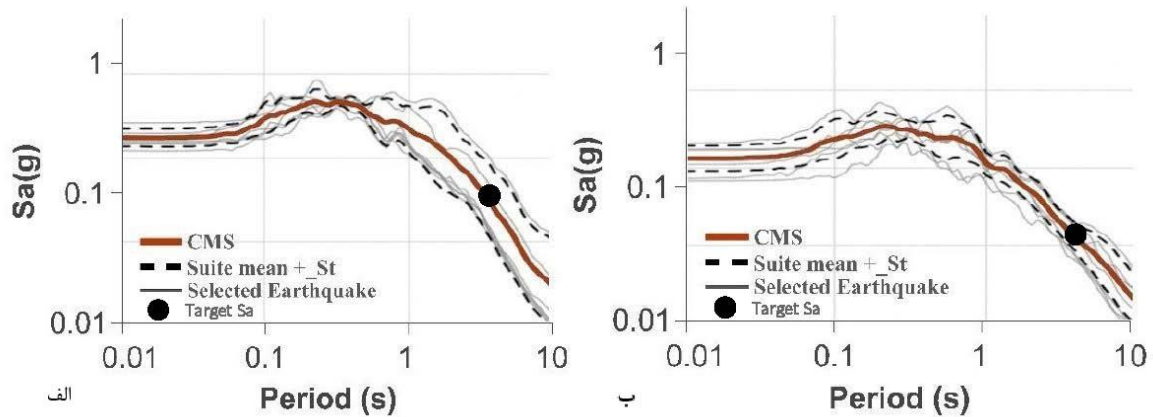
Return		NGA		Scale factor		R		PGA		PGV		Frequency	
Period	No	Earthquake	Year	record	Based on CMS	M	(KM)	Mechanism	(g)	(m/s)		(Hz)	
72	1	Superstition	1987	718	1.31	6.22	17.5	Strike slip	0.15	0.17		7.69	
	2	Hector Mine	1999	1,776	2.05	7.13	56.4	Strike slip	0.14	0.15		3.34	
	3	Hector Mine	1999	1,836	3.39	7.13	42	Strike slip	0.22	0.24		6.93	
	4	San Fernando	1971	68	0.69	6.61	22.7	Reverse	0.16	0.15		5.40	
	5	Duzce Turkey	1999	1,613	1.87	7.14	25.7	Strike slip	0.1	0.11		5.74	
	6	Chalfant Valley	1986	549	1.03	6.19	16.3	Strike slip	0.26	0.22		3.94	
	7	chi-chi Taiwan	1999	1,476	1.93	7.62	28.4	Reverse	0.3	0.29		4.72	
	8	Landers	1992	850	1.75	7.28	21.8	Strike slip	0.3	0.34		5.47	
475	1	Kobe Japan	1995	1,100	2.08	6.9	24.8	Strike slip	0.46	0.44		2.56	
	2	Chi- Chi Taiwan	1999	2,746	3.31	6.2	33	Strike slip	0.17	0.37		4.2	
	3	Hector Mine	1999	1,762	1.62	7.13	41.8	Reverse	0.29	0.45		7.83	
	4	Chi-Chi Taiwan	1999	2,746	3.31	6.2	33	Strike slip	0.17	0.36		4.21	
	5	Denali Alaska	2002	2,113	2.37	7.9	53	Strike slip	0.13	0.27		12.21	
	6	Kobe Japan	1995	1,121	3.08	6.9	27.7	Strike slip	0.49	0.44		2.25	
	7	Chi- Chi Taiwan	1999	2,639	3.31	6.2	37	Reverse	0.33	0.29		2.73	
	8	Superstition Hills	1987	729	1.31	6.54	23.8	Strike slip	0.23	0.29		7.83	

حرکت زمین تقریباً با طیف پاسخ یکسان بود. با توجه به نوع خاک (نوع III) و حداقل مدت زمان حرکت زلزله قوی (D5-D95)، ۱۰ تا ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین، سرعت موج برشی Vs بین ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه لحظ گردید. دو سطح خطر زلزله، ۵۰ و احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال، در نظر گرفته شد که منجر به دوره بازگشت متوسط ۷۲ و ۴۷۵ سال شد. EDP در نظر گرفته شده در این تحقیق، حداکثر جابجایی نسبی بین طبقات بود. جدول ۱۰ تاریخچه زمانی شتابنگاشت‌های انتخاب شده را برای هر دو حالت دوره بازگشت نشان می‌دهد. جدول ۱۰ تاریخچه زمانی شتاب نگاشت‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۴ حرکات زمین انتخاب

به حدود ۲۰ درصد میرسد. بنابراین با لحاظ اثرات خاک نتایج منطبق با واقعیت در تحلیل سازه‌های بلند میسر خواهد گردید.

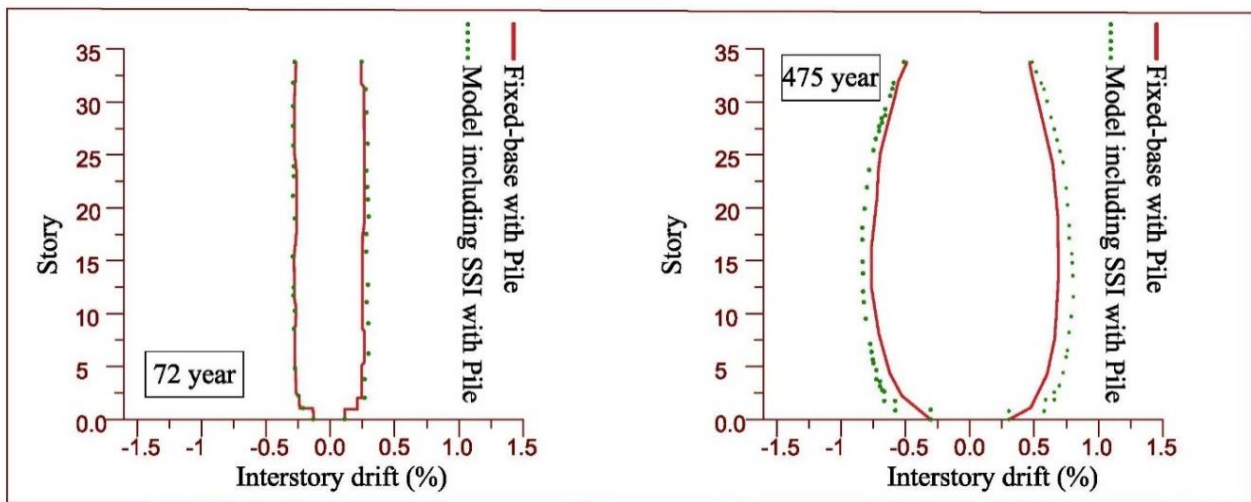
۴-۶- ثبت حرکات زمین و اندازه‌گیری شدت

جهت ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه در دو حالت پایه ثابت و حالت اندرکنش خاک - سازه تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شد. برای این منظور، هشت رکورد حرکت زمین بر اساس طیف پاسخ مناسب مقیاس‌بندی شدند. بزرگی زلزله بین ۵/۵ تا ۷/۵ بود و بسته به موقعیت سازه، به رکوردهای میدان دور در خاک نوع III محدود شد. میانگین طیف پاسخ الاستیک از رکوردهای



شکل ۱۴. حرکات زمین انتخاب شده و مقیاس شده را برای دو دوره بازگشت الف) ۴۷۵ سال و ب) ۷۲ سال.

Fig. 14. Selected and scaled ground motions for two return periods: a) 475 years and b) 72 years.



شکل ۱۵. EDP های لرزه‌ای محاسبه‌شده در امتداد ارتفاع برای هر سطح خطر: حداکثر جابجایی‌های بین طبقه‌ای

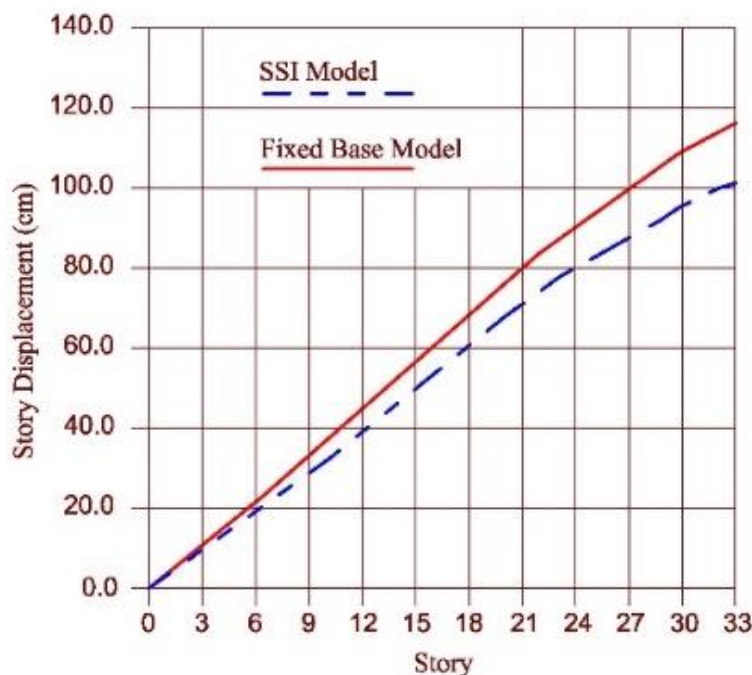
Fig. 15. Seismic EDPs calculated along the height for each hazard level: maximum inter-story drifts

یعنی دوره‌های بازگشت ۷۲ و ۴۷۵ ساله، نشان می‌دهند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، میانگین جابجایی‌های بین طبقه‌ای در حالت پایه ثابت و حالت SSI برای دوره بازگشت ۷۲ سال اختلاف ناچیزی دارند. بنابراین، طبق محاسبات انجام شده در این مطالعه، می‌توان اثرات خاک را بر میانگین جابجایی بین طبقات نادیده گرفت. از سوی دیگر، مقایسه ذکر شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله، به ویژه در طبقات پایین سازه، متفاوت است. به طوری که، در مورد حالت پایه ثابت، میانگین حداکثر جابجایی بین طبقه‌ای ۰.۶۵٪ (در طبقات ۱۵ تا ۱۸) است. این میزان در حالت SSI در

شده و مقیاس شده را برای دو دوره بازگشت ۷۲ و ۴۷۵ سال قابل مشاهده است.

۶-۵- اجزای تقاضای مهندسی

برای مدل سازه مورد مطالعه و حرکت زمین انتخاب شده، EDPها برای تعیین کمیت تفاوت‌های احتمالی ارزیابی شدند. شکل ۱۵ مقادیر میانگین محاسبه‌شده حداکثر جابجایی‌های بین طبقه‌ای را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها مقادیر میانگین محاسبه‌شده ۸ زلزله را برای هر سطح خطر،



شکل ۱۶. مقایسه جابجایی‌ها بین دو مدل

Fig. 16. Comparison of displacements between two models

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، میزان نشست پی یک ساختمان بلندمرتبه بتنی با سیستم قاب هسته‌ای، در دو حالت لحاظ اندرکنش خاک-سازه و پایه ثابت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا مدل‌سازی ساختمان ۳۳ طبقه بتنی و خاک اطراف پی در نرم‌افزار MIDAS، که یک نرم‌افزار مبتنی بر محیط پیوسته است، انجام شد. سپس مدل ساختمان در دو حالت اندرکنش خاک-سازه (SSI) و پایه ثابت (Fixed Base) تحلیل و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید.

نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داد که میزان نشست پی در حضور سمع‌ها و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، نسبت به حالت پایه ثابت تفاوت قابل توجهی دارد؛ به‌طوری‌که برای ساختمان مورد تحقیق مقدار نشست حداکثر در حالت SSI برابر با ۱۴ cm و در حالت Fixed Base معادل ۱۹ cm به دست آمد. همچنین، مقدار نشست حداقل در حالت SSI برابر با ۳ cm و در حالت Fixed Base برابر با ۵ cm محاسبه گردید. این اختلافات بیانگر اهمیت لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه در تحلیل ساختمان‌های بلندمرتبه است، چرا که منجر به نتایج دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت می‌شود. همچنین جهت بررسی رفتار لرزه‌ای سازه تحت دو حالت پایه ثابت و حالت SSI، تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام شد. دو گروه زلزله با دوره‌های

طبقات ۱۲ و ۱۳ به ۰.۷۵٪ می‌رسد. در زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال یا بیشتر، چنین تفاوت‌هایی حداکثر رانش بین طبقه‌ای را افزایش می‌دهند. بنابراین، عدم در نظر گرفتن SSI می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی در تحلیل شود. در مورد برش پایه، طبق FEMA P-2091، ساختمان‌های بلندمرتبه در منطقه لرزه‌خیز به دلیل اندرکنش خاک و سازه (SSI) دارای پاسخ طیفی در نظر گرفته می‌شوند که باعث تغییر دوره تناوب می‌شود، به این معنی که دوره تناوب را افزایش می‌دهد. بنابراین، کاهش برش پایه رخ می‌دهد. در این مطالعه، برش پایه در حالت پایه ثابت ۱۷۱۳ ton و در حالت لحاظ اندرکنش خاک - سازه ۱۵۴۸ ton محاسبه شد.

شکل ۱۶ جابجایی طبقه را در دو حالت پایه ثابت و SSI نشان می‌دهد. اختلاف جابجایی برای این دو حالت، در طبقات پایین کم است و به تدریج در طبقات بالا افزایش می‌یابد. مطابق شکل میزان این اختلاف جابجایی تا طبقه چهارم ناچیز می‌باشد. و با افزایش ارتفاع میزان اختلاف بیشتر به چشم می‌خورد. بیشترین اختلاف در طبقه آخر قابل مشاهده است. جابجایی در طبقه ۳۳ در حالت پایه ثابت حدود ۱۱۸ cm است، در حالی که جابجایی در همان طبقه برای حالت SSI حدود ۱۰۰ cm محاسبه گردیده است. این موضوع نشان می‌دهد که با لحاظ اثرات خاک در تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، میزان جابجایی سازه به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

- [6]. Arboleda-Monsalve, L. G., J. A. Mercado, and K. R. Mackie. "Bidirectional ground motion effects in tall buildings using 3D soil-structure interaction models." In 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan. 2020.
- [7]. Tahghighi, Hossein, and Ali Mohammadi. "Numerical evaluation of soil-structure interaction effects on the seismic performance and vulnerability of reinforced concrete buildings." *International Journal of Geomechanics* 20, no. 6 (2020): 04020072.
- [8]. Mercado, Jaime. "Seismic Soil-Structure Interaction Effects in Tall Buildings Considering Nonlinear-Inelastic Behaviors." (2021).
- [9]. Wei, Luyao. "Research on Settlement Prediction of Building Foundation in Smart City Based on BP Network." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 14, no. 6 (2023).
- [10]. Dorrinia, Nima, Hossein Pahlavan, Mohammad Shamekhi Amiri, and Mojtaba Sirjani. "Seismic Assessment of RC Tall Core-Frame Buildings Considering Soil Structure Interaction (SSI)." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* (2025): 1-20.
- [11]. Ter-Martirosyan, Armen Z., Alexander N. Shebunayev, and Evgeny S. Sobolev. "Settlement of a foundation on an unsaturated sandy base taking vibrocreep into account." *Axioms* 12, no. 6 (2023): 594.
- [12]. Li, Hongjiang. "Structural assessment of concrete cable-stayed bridge after replacement of closure segment: The service stage." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 25, no. 3 (2020): 04020023.
- [13]. Rizzitano, Samuela, Ernesto Cascone, and Giovanni Biondi. "Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 67 (2014): 66-84.
- [14]. Rayhani, M. H., and M. Hesham El Naggar. "Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil." *International Journal of Geomechanics* 8, no. 6

بازگشت ۷۲ سال و ۴۷۵ سال به سازه اعمال شد. نتایج نشان داد حداکثر جابجایی بین طبقه‌ای در زلزله‌های با دور بازگشت ۷۲ سال برای هر دو حالت پایه ثابت و حالت SSI تفاوت چندانی ندارد. اما این مسئله برای زلزله‌های با دوره بازگشت ۴۷۵ سال باهم متفاوت است و با لحاظ اثرات خاک در تحلیل‌ها میزان این جابجایی افزایش می‌یابد. همچنین میزان جابجایی کلی ساختمان برای هر دو حالت متفاوت بود. به طوری که میزان جابجایی سازه در حالت SSI کمتر از حالت پایه ثابت بدست آمد. این اختلاف با افزایش ارتفاع ساختمان بیشتر بود و بیشترین اختلاف به میزان ۲۰ درصد در طبقه ۳۳ مشاهده شد.

به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان نشست پی ساختمان دارد و نتایج حاصل از تحلیل پایه ثابت ممکن است منجر به برآوردهای غیرواقعی گردد. همچنین اثرات خاک تأثیرگذار در پاسخ رفتار سازه هنگام زلزله بخصوص زلزله‌های با دوره بازگشت ۴۷۵ سال دارد. همچنین با توجه به نوع سازه (سیستم قاب هسته‌ای) و نوع خاک مورد بررسی، پیشنهاد می‌شود مطالعات مشابه برای سایر سیستم‌های سازه‌ای و انواع خاک نیز انجام گیرد تا امکان مقایسه جامع‌تر و ارائه راهکارهای بهینه‌تر فراهم شود.

منابع

- [1] Basics of Soil and Structure Measurement - Author: Dr. Ali Ghanbari (Professor of Khwarazmi University - (Shima Al-Sadat Hosseini) (in Persian)
- [2] Shakib, H., and G. R. Atefatdoost. "Effect of soil-structure interaction on torsional response of asymmetric wall type systems." *Procedia Engineering* 14 (2011): 1729-1736.
- [3] Eser, M., C. Aydemir, and I. Ekiz. "Effects of soil structure interaction on strength reduction factors." *Procedia Engineering* 14 (2011): 1696-1704.
- [4] Lou, Menglin, Huaifeng Wang, Xi Chen, and Yongmei Zhai. "Structure-soil-structure interaction: Literature review." *Soil dynamics and earthquake engineering* 31, no. 12 (2011): 1724-1731.
- [5] Whitman, Robert V., and F. E. Richart Jr. "Design procedures for dynamically loaded foundations." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93, no. 6 (1967): 169-193.

(2008): 336-346.

- [15] Manna, B., and D. K. Baidya. "Vertical vibration of full-scale pile—analytical and experimental study." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 135, no. 10 (2009): 1452-1461.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Soleimani, H. Pahlavan , M. Shamkhi Amiri, N. Dorrinia, *Evaluation of Settlement and Seismic Response of High-Rise Buildings Considering Soil–Structure Interaction Based on Static Loading Results and Continuum Modeling* , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(7) (2025) 1221-1244.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23821.8221](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23821.8221)



