Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir
Online ISSN : 3060-7620
Razi University

Evaluation and study of the effects of inhomogeneous earthquakes on the response of cable-stayed bridges in terms of soil-structure interaction effects

Edris Ghorbani[1], Hamid Reza Ahmadi[2]✉

1.Deputy of Engineering and Construction, General Directorate of Roads and Urban Development of Ilam Province, Ilam, Iran. E-mail: Edris.ghorbany@gmail.com.
2.Corresponding Author, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail: ahmadi@maragheh.ac.ir.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2024-09-06
Received in revised form
2024-11-11
Accepted
2024-12-17
Available online
2024-12-29

Keywords:
cable-stayed bridges,
earthquake,
time history,
non-uniform,
soil-structure interaction

ABSTRACT

In this study, the behavior of long-span cable-stayed bridges with seismic isolators was analyzed under the effects of non-uniform earthquakes and soil-structure interaction. For this purpose, a three-span cable-stayed bridge with a total length of 1060 meters, including a 600-meter main span, 230-meter side spans, and two 120-meter-high towers, was evaluated.

The earthquake records used in this study were from the bedrock and near-field region, within a maximum distance of 10 kilometers. For bridges, assuming the same soil type on either side of the piers, seismic wave reception at each pier occurs with a time delay relative to the other pier, which is more pronounced at lower surface wave propagation velocities.

According to the computational results, considering the effects of non-uniform excitations and soil-structure interaction leads to a significant increase in the stresses generated within the structure and the displacement at a single point compared to the uniform excitation scenario.

Cite this article: Ghorbani, Edris., & Ahmadi, Hamidreza. (2024). Evaluation and study of the effects of inhomogeneous earthquakes on the response of cable-stayed bridges in terms of soil-structure interaction effects. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), 107-130. DOI: 10.22126/amcen.2024.11279.1024

© The Author(s).
Publisher: Razi University
DOI: 10.22126/amcen.2024.11279.1024

Introduction

The performance of bridges as simple structural systems has always been a critical focus due to their significance in vital transportation networks, particularly during emergencies such as earthquakes. Recent earthquakes in various countries, notably Northridge (USA), El Centro (USA), and Kobe (Japan), revealed that many bridges designed according to existing seismic codes suffered extensive damage, even though seismic reports indicated that the intensities of these earthquakes were lower than the design values specified in the codes. A more precise consideration of ground motion inputs in seismic behavior studies of structures has been a subject of ongoing interest among researchers. Topics such as soil-structure interaction, incorporating oblique input seismic waves instead of parallel and vertical waves, are among the newer areas of investigation. Currently, a key focus is the unrealistic assumption of uniform ground motion excitation, especially in long structures like bridges and dams, which has traditionally been used in the dynamic analysis of all structures.

Observations since the late 1970s from closely spaced seismic monitoring networks have shown that accelerograms recorded at different locations during an earthquake exhibit significant differences. These differences are observed in amplitude, frequency content, and vibration phase and become more pronounced with increasing distance between the recording stations. This prompted extensive research from the 1980s onward to model spatial variations in ground motion inputs. Subsequently, studies began to assess the impact of these variations on the seismic response of long structures like bridges, pipelines, and dams, comparing the effects of non-uniform excitations with uniform ground motion excitation. These studies demonstrated that non-uniform ground motion input could generate higher internal stresses in the structure compared to uniform input, potentially compromising the safety of the structure. Soil-structure interaction (SSI) is a crucial consideration, especially for heavy and rigid structures constructed on flexible soil. SSI significantly alters the structural responses and must therefore be accounted for in the dynamic analysis of structures. During an earthquake, the behavior of the soil beneath the structure plays a pivotal role in its response. In most cases, the soil is not modeled, and its critical effects are overlooked. Due to the infinite nature of the soil medium, modeling soil is inherently more complex than modeling the structure itself. In structures subjected to earthquakes, in addition to the dynamic forces and stresses induced within the structure, the ground and soil parameters, particularly the mutual interaction between soil and structure, play an undeniable role in the system's behavior. This interaction has a significant impact on the response of the system, making it a major area of focus in recent years.

Given the widespread use of cable systems in the construction of existing and upcoming bridges, this study investigates the effects of non-uniform ground motion and soil-structure interaction on the responses of large cable-stayed bridges equipped with seismic isolators. The research focuses on comparing the impacts of applying non-uniform excitation versus uniform excitation, as well as examining the influence of soil-structure interaction on the responses of long cable-stayed bridges.

Method

This study investigates the behavior of large-span cable-stayed bridges with seismic isolation under the effects of non-uniform earthquakes and soil-structure interaction. For this

purpose, a three-span cable-stayed bridge with a total length of 1060 meters—comprising a 600-meter central span, two 230-meter side spans, and two 120-meter towers—was evaluated. A two-dimensional computer model simulated in the finite element software Abaqus was employed, using a direct solution method.

In the transverse direction, due to the bridge's narrow width and the minimal impact of non-uniform vibration, earthquake waves were considered uniform across all piers. However, in the longitudinal direction, the wave propagation effect was studied. A time-history analysis was performed using seven accelerograms to determine the structural response, with records specific to bedrock and near-fault zones within a maximum distance of 10 kilometers. To account for soil-structure interaction, a two-dimensional soil model with semi-infinite boundary elements was used along the soil boundaries.

Assuming uniform earthquake excitation across all supports does not always yield the most critical response. Soil-structure interaction and spatial variability of ground motions are significant factors in the seismic analysis of bridges. In bridges, assuming consistent soil type beneath the piers, seismic waves reach each pier with a time lag, which becomes more pronounced at lower surface wave propagation speeds. Additionally, seismic waves undergo multiple refractions and reflections during propagation, causing the received waves at different locations to vary. This phenomenon results in non-uniform seismic excitation across the bridge piers. Furthermore, differences in soil type beneath each pier increase this non-uniformity, significantly amplifying stresses and displacements in the structure compared to uniform excitation conditions.

Results

To investigate the effect of soil-structure interaction on the responses of long-span cable-stayed bridges, models were developed for four types of soil based on the Iranian Standard 2800 and evaluated. For this purpose, the structural responses under the influence of seven near-field acceleration records were examined for the four soil types defined in the Iranian Standard 2800. This study compares the structural responses with and without soil-structure interaction.

To better understand the behavior of the bridge under the influence of soil-structure interaction, the bridge is divided into three sections based on its geometry: the initial span (closer to the earthquake epicenter), the middle span, and the end span (farther from the earthquake epicenter). The vertical displacement of the deck, the deck bending moment, the horizontal displacement of the tower, and the axial force of the tower were evaluated in this section.

Conclusions

In this study, the seismic analysis of a 1060-meter-long cable-stayed bridge was conducted. The modeling was performed using the finite element software Abaqus, examining the effects of non-uniform ground motion excitation and soil-structure interaction under seven near-field earthquake accelerograms and four soil types defined in the Iranian Standard 2800. The longitudinal response of the structure was evaluated, including vertical displacement of the deck, horizontal displacement of the tower, positive bending moment of the deck, and axial force of the tower under various conditions. The results indicated that

vertical displacement of the deck increased under non-uniform excitation compared to uniform excitation. The maximum vertical displacement occurred at the mid-span and on soil type 4, the softest soil with the lowest seismic wave propagation velocity. Horizontal displacement of the tower was higher under non-uniform excitation than uniform excitation, with maximum displacements observed on soil type 4 at the tower's base. For other soil types, increased soil softness significantly amplified the tower displacement at both the base and top levels. The positive bending moment of the deck was greater under non-uniform excitation, with the maximum moment at the mid-span and on soil type 4. Similarly, the axial force in the tower increased under non-uniform excitation, with maximum values on soil type 4 at the base level. Soil-structure interaction significantly increased the horizontal displacement of the tower, with maximum displacements occurring on soil type 4 at the top level of the tower. In scenarios without soil-structure interaction, maximum displacements were observed at the tower's base, whereas with interaction, they were observed at the tower's top. Positive bending moments of the deck increased for all soil types when considering soil-structure interaction, with maximum values occurring at the mid-span for soil types 2, 3, and 4. Axial forces in the tower also showed significant increases under soil-structure interaction, with the highest values for soil type 4 at the base.

A comparison of the results for soil-structure interaction and non-uniform excitation highlighted that soil-structure interaction presents more critical conditions. Under non-uniform excitation, maximum displacements occurred at the tower's base, while under soil-structure interaction, they were at the tower's top. The axial force in the tower under soil-structure interaction exceeded that under non-uniform excitation, although the maximum axial force at the tower's top was higher under non-uniform excitation. Positive bending moments in the mid-span were nearly identical for soil-structure interaction and non-uniform excitation, but in the side spans, they were higher with soil-structure interaction. Given the significant differences across various soil types and the effects of non-uniform excitation, precise estimation of wave propagation velocity and soil properties at the construction site is essential for designing long-span cable-stayed bridges. The availability of advanced hardware and software underscores the necessity of employing professional methods for detailed assessments and designing these large-scale structures. Additionally, considering the effects of soil-structure interaction—specifically for the bridge's foundation—the placement of bridge piers should minimize these effects. For river bridges, where soil near the riverbanks is denser than the softer alluvial soil at the riverbed, positioning piers on denser soils near the banks instead of the loose riverbed soil is recommended.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران
وبگاه نشریه : https://amcen.razi.ac.ir
شاپا الکترونیکی : ۳۰۶۰-۷۶۲۰
دانشگاه رازی

ارزیابی و مطالعه اثرات زلزله‌های ناهمسان نزدیک گسل بر روی پاسخ پل‌های کابلی با لحاظ اثرات اندرکنش خاک–سازه

ادریس قربانی[۱]، حمیدرضا احمدی[۲]✉

۱. مهندسی سازه، معاونت مهندسی و ساخت، اداره کل راه و شهرسازی استان ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: Edris.ghorbany@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: ahmadi@maragheh.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۶/۱۶

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۱۰/۰۹

کلیدواژه‌ها:
پل‌های کابلی،
زلزله،
تاریخچه زمانی،
ناهمسانی،
اندرکنش خاک – سازه

چکیده

در این تحقیق، رفتار پل‌های بزرگ دهانه کابلی ترکه‌ای با جداساز لرزه‌ای تحت اثر زلزله‌های ناهمسان و اندرکنش خاک سازه بررسی شده است. برای این منظور یک پل کابلی سه دهانه به طول ۱۰۶۰ متر که دارای دهانه میانی به طول ۶۰۰ متر و دهانه های کناری به طول ۲۳۰ متر و دو دکل به ارتفاع ۱۲۰ متر است، ارزیابی گردیده است. رکوردهای زلزله مورد استفاده در این تحقیق، مخصوص سنگ بستر و حوزه نزدیک و در فاصله حداکثر ۱۰ کیلومتر می‌باشند. در پل‌ها با فرض ثابت بودن نوع خاک در طرفین پایه پل، دریافت امواج زلزله در هر پایه نسبت به پایه دیگر با تاخیر زمانی صورت می‌گیرد که این مسئله در سرعت‌های پایین انتشار امواج سطحی، بیشتر مورد انتظار است. بر اساس نتایج بدست آمده، با لحاظ اثرات تحریکات غیر یکنواخت و اندرکنش خاک–سازه، میزان تنش ایجاد شده در سازه و تغییر مکان در یک نقطه واحد نسبت به حالت یکنواخت، افزایش قابل توجهی خواهد داشت.

استناد: قربانی، ادریس؛ و احمدی، حمیدرضا. (۱۴۰۳). ارزیابی و مطالعه اثرات زلزله‌های ناهمسان نزدیک گسل بر روی پاسخ پل‌های کابلی با لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۲)، ۱۳۰-۱۰۷. DOI: 10.22126/amcen.2024.11279.1024

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.
CC BY NC

۱. مقدمه

عملکرد پل‌ها به عنوان یک سیستم سازه‌ای ساده، به علت اهمیت در شریان‌های حیاتی حمل ونقل به ویژه در شرایط اضطراری مانند وقوع زلزله، همواره مورد توجه بوده است. زلزله‌های اخیر در کشورهای مختلف و بخصوص زلزله های نورثریج ، السنتروی آمریکا و کوبه ژاپن نشان دادند، بسیاری از پلهای طراحی شده براساس ضوابط آیین نامه‌های موجود زلزله، دچار خرابی های زیادی شدند. درحالی که گزارشهای لرزه‌نگاری نشان می‌دادند، شدت این زلزله‌ها کمتر از مقادیر نظیر در آیین‌نامه‌های طراحی بوده است [۱]. در نظر گرفتن دقیقتر محرک ورودی زمین‌لرزه در مطالعات رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در زمرهٔ موضوعاتی است که همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مقوله مباحثی همچون اندرکنش خاک و سازه، در نظر گرفتن امواج ورودی مورب به جای امواج تابیده موازی و قائم از مباحث جدید به شمار می‌آیند. موضوع مورد توجه محققین در حال حاضر، فرض ناصحیح تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی بویژه در سازه‌های طویل مانند پل‌ها و سدها می‌باشند که تاکنون به صورت معمول در تحلیل دینامیکی کلیه سازه‌ها استفاده شده است[۲]. مشاهداتی که از اواخر دهه هفتاد میلادی بر روی شبکه های لرزه نگاری واقع در فواصل نزدیک به هم انجام گردید، نشان داد که شتابنگاشت‌های ثبت شده در زمان وقوع زلزله در مکان‌های مختلف، با یکدیگر تفاوت‌های عمده‌ای دارند. این تفاوت‌ها در دامنه، محتوای فرکانسی و فاز ارتعاشات ثبت شده، دیده می‌شوند و با افزایش فاصله بین دو ایستگاه، بیشتر می‌شوند. این موضوع موجب تحقیقات وسیعی از دهه هشتاد به بعد برای مدل کردن تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین‌لرزه گردید و سپس به منظور مشخص کردن تأثیر تغییرات فضایی حرکت‌های زمین بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های طویل مانند پلها، خطوط لوله، سدها، بررسی تأثیر محرک‌های مذکور بر رفتار لرزه‌ای سازه و مقایسه با تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی آغاز شد. این مطالعات نشان داد که تحریک ورودی غیر یکنواخت می‌تواند تنش‌های داخلی بیشتری در سازه نسبت به حالت تحریک ورودی یکنواخت ایجاد کند و ایمنی سازه را به مخاطره اندازد [۳].

اندرکنش خاک و سازه مسئله بسیار مهمی است خصوصاً برای سازه‌های سنگین و سخت که بر زمین‌های انعطاف پذیر ساخته شده‌اند. این مسئله پاسخ‌های سازه را تا حد قابل توجهی تغییر می‌دهد. بنابراین تأثیرات این اندرکنش باید در پاسخ‌های دینامیکی سازه در نظر گرفته شود [۴]. در هنگام وقوع زلزله رفتار خاک زیر سازه نقش مهمی در پاسخ سازه ایفا می‌کند. در اغلب موارد، خاک مدل نمی‌شود و از تأثیرات مهم آن صرف نظر می‌شود. به علت نامحدود بودن محیط خاک، مدل‌سازی آن پیچیدگی بیشتری نسبت به مدل سازی سازه دارد.

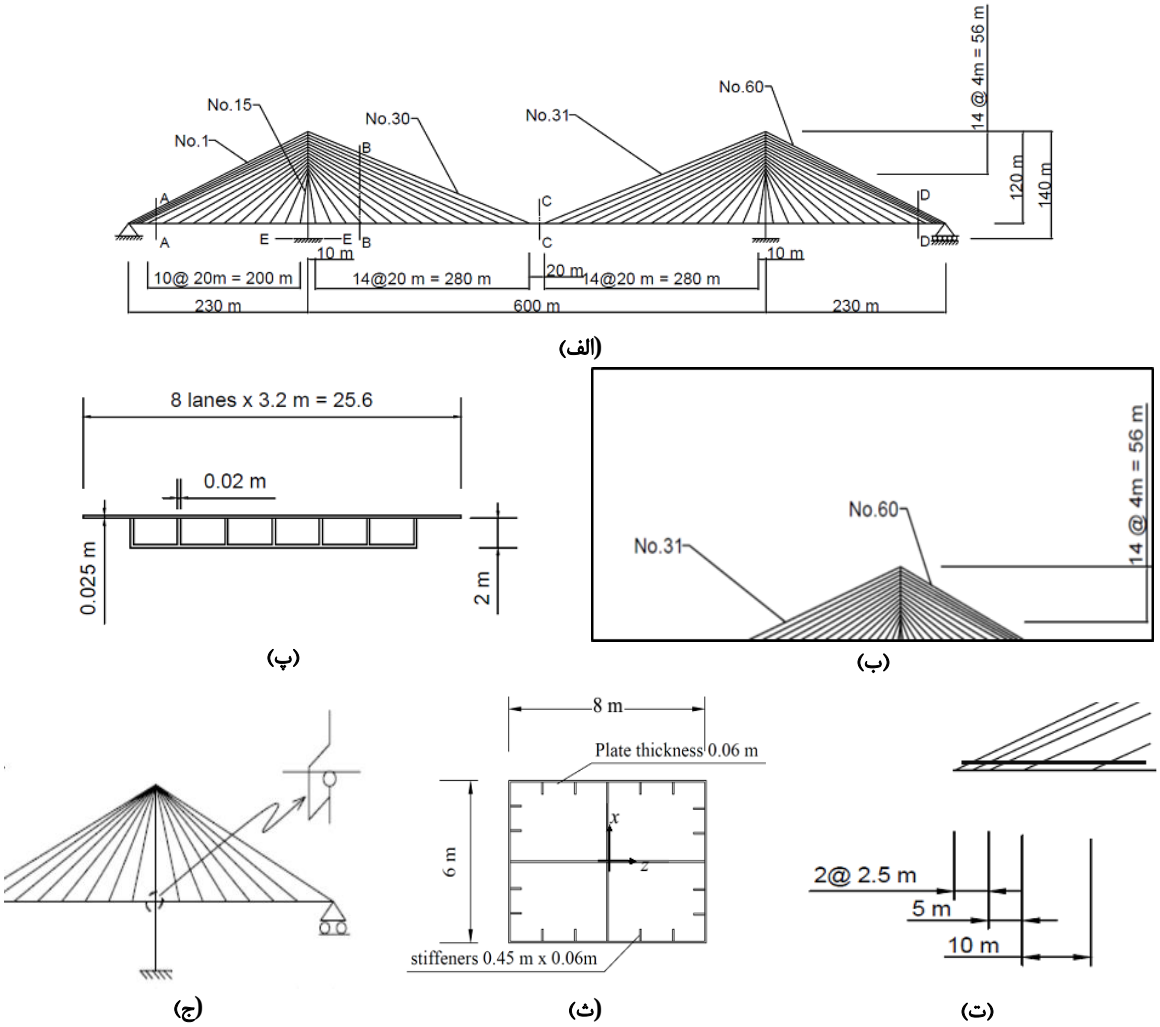
در سازه‌هایی که تحت تأثیر زلزله قرار گرفته‌اند، علاوه بر نیروهای دینامیکی وارد و تنش‌های ناشی از آن در سازه، پارامتر زمین و خاک به عبارت بهتر رفتار متقابل خاک و سازه، نقش انکارناپذیری بر عهده دارد و رفتار سیستم را به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر باعث گردیده که این موضوع در سالهای اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گیرد. در سال ۱۹۶۷ میلادی، وایتمن و ریچارد نیم فضای الاستیک زیر سازه را به صورت یک جرم متمرکز و فنر مدل کردند و در این مدل، فنرها و میراگرهای در نظر گرفته شده، مستقل از محتوای فرکانسی بار بودند [۵]. در سال ۱۹۷۵ میلادی، کاسل و روزتروشی بر پایه المان محدود بود را بیان کردند [۶]. این روش در سال ۱۹۷۵ میلادی، توسط سید و لایسمر مورد مطالعه بیشتر قرار گرفت و المان‌های مرزی مختلفی برای این روش بیان کردند [۷]. در سال ۲۰۰۰ میلادی، رودریگوز و مونتز با تعیین پارامترهای موجود در سیستم یک درجه آزادی ارائه شده در آیین نامه‌ی ATC3-06 برای سازه‌های متداول در مکزیک و با در نظر گرفتن شرایط خاک منطقه، اثر اندرکنش را بر رفتار غیر خطی سازه بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که با اصلاح پریود سازه می‌توان اثرات اندرکنش خاک-سازه را در نظر گرفت[۸]. در سال ۲۰۰۷ میلادی، هونگ و همکارانش در ادامه تحقیقات در زمینه مدل‌های المان محدود به منظور مدل کردن ناحیه دور خاک از المان‌های ویسکوز استفاده کردند و تلاش کردند تا خصوصیات غیر خطی خاک را در مدل خود اعمال کنند [۹]. مطالعات در زمینه المان‌های مرزی در روش المانهای محدود مورد توجه محققان بسیاری می‌باشد. در سال ۲۰۰۱ میلادی، یرلی و تانریکولو روش مختلط المان‌های محدود و المان‌های نامحدود و روش المان‌های مرزی را ارائه کردند که در این تحقیق برای بررسی دقت مدل خاک پیشنهادی بکار رفته است. در سال ۲۰۰۴

ولف مدل مخروطی[1] را برای مدل کردن خاک زیر سازه استفاده کرد. در سال ۲۰۰۴ میلادی، حسین‌زاده و ناطقی مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر مدل آزمایشگاهی خود انجام دادند که در این تحقیق سعی شده است از نتایج و پارامترهای به کار گرفته شده در آن استفاده شود [۱۰]. در سال ۲۰۰۹ میلادی، ناصر مطالعات خود را در زمینه تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر قاب‌های بتن آرمه انجام داده است[۱۱]. در این مطالعه سعی شده تا با استفاده از المان‌های فنر و میراگر وایتمن و ریچارد که به صورت یک جرم متمرکز و فنر در زیر سازه مدل می‌شود و با استفاده از روش المان‌های محدود که مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد، مدل ترکیبی اصلاح شده‌ای برای بررسی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه ارائه شود.

تحلیل تعینی پل‌های بزرگ دهانه برای تحریک چند تکیه-گاهی اثرات عبور امواج لرزه‌ای به وسیله محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعات بیان کننده ملزومات و ملاحظات در نظر گرفته شده جهت تحلیل سازه‌های بلند با در نظر گرفتن اثرات ناهمسانی بود[۱۲]. یکی از اولین کارها در زمینه در نظر گرفتن ارتعاشات تصادفی برای تحلیل پل‌های بزرگ تحت اثر زلزله های ناهمسان به وسیله عبدالغفار و رابین [۱۲] انجام گرفت. همچنین این مطالعه لزوم در نظر گرفتن اثرات ناهمسان بر روی پاسخ های لرزه‌ای پل‌های بزرگ را آشکار ساخت. در طول یک دهه گذشته اثرات تغییرات فضایی حرکتهای زمین بر روی پاسخهای ارتعاش تصادفی پل‌های بزرگ به صورت کلی با استفاده از روش تحلیل طیفی انجام می‌گرفت. زورا پاسخ های دو پل دو دهانه و سه دهانه به تحریکات ناهمسان لرزه‌ای به تحریکات ناهمسان لرزه‌ای را بررسی و اعتبار فرض‌های موجود در این زمینه را تایید کرد. در این مطالعه با در نظر گرفتن تیر های ۲ و ۳ دهانه با طول‌های متفاوت (کوتاه، بلند و متوسط) در معرض تنها اثر ناپیوستگی با درجات متفاوت همبستگی را با یک سیستم کاملا همبسته مقایسه کرد. نتایج نشان دهنده این موضوع بود که حرکت‌های کاملا همبسته می‌تواند پاسخ‌های کمتر و یا بیشتری، بسته به خصوصیات دینامیکی سازه، نسبت به حالت غیرهمبسته داشته باشند[۱۳]. زورا بعدها به بررسی در نظر گرفتن دو عامل نبود پیوستگی و تفاوت فاز حرکت‌ها در تکیه‌گاه‌ها پرداخت [۱۴]. هاریچاندرال و همکارانش با مطالعه پل گلدن گیت در ایالات متحده امریکا تحت اثر تحریکات فضایی حرکت‌های زمین و با صرف نظر از اثرات محلی ثابت کردند که استفاده از تحریک همسان به صورت کلی برای چنین سازه‌هایی غیر قابل قبول است [۱۵]. زمپاتی، یک مطالعه عددی روی اثرات در محل بر روی یک پل چهار دهانه به انجام رساند. این مطالعه تحلیل پاسخ‌های پلی با پایه‌های قرار گرفته شده در انواع مختلف خاک انجام گرفت [۱۶]. عالم و داتا یک روش تحلیل طیفی دامنه فرکانسی برای تحلیل لرزه‌ای پل‌های کابلی در معرض ارتعاش تصادفی زمین لرزه ارائه کردند و حرکت‌های زمین به وسیله تابع چگالی طیف توان و تابع همبستگی بیان گردید [۱۷]. دومانگلو و سویلوک، پاسخ‌های ارتعاش تصادفی پل کابلی در معرض تغییرات فضایی حرکت‌های زمین بر اساس مدل توسعه یافته نوینی را بررسی کردند. اهمیت اثرات پاسخ‌های سایت به صورت به خصوص مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه با استفاده از روش تحلیل طیفی بر اساس ارتعاشات تصادفی به صورت کلی لزوم در نظر گرفتن تغییرات فضایی حرکت های زمین درتحلیل لزره‌ای سازه-های طویل را آشکار ساخت [۱۸]. خصوصیات دینامیکی پل‌های بزرگ دهانه به صورت آزمایشگاهی نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. چانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با مدل‌سازی پل کابلی و با استفاده از میز لرزش به بررسی اثرات تحریکات ناهمسان پرداختند. در این مطالعه یک پل با دهانه اصلی ۴۳۰ متر و دهانه‌های کناری در مقیاس ۱:۲۰ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تایید کننده لزوم در نظر گرفتن تحریکات ناهمسان بر روی پاسخ‌های پل‌های بزرگ بود[۱۹]. در یک مطالعه آقای گارسلی و همکارانش یک مدل کوچک از پل جیندو طراحی، ساخت و مورد آزمایش قرار دادند. در مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی، اعتبار مدل ریاضی مورد تایید قرار گرفت و هم‌خوانی مناسب میان نتایج آزمایش تئوری و عملی بدست آمد [۲۰]. در سال ۲۰۱۰، عالم در مقاله‌ای با عنوان تحریک چند تکیه‌گاهی قابهای باز با روش اغتشاش سفید و اندکنش خاک سازه به بررسی اثر توامان اندرکنش خاک سازه و اثرات تغییرات فضایی حرکت‌های زمین پرداخت.

[1] Cone model

نتایج نشان داد که در مورد قاب‌های نسبتاً کوتاه اثر عبور موج قابل صرف نظر نیست [۲۱].

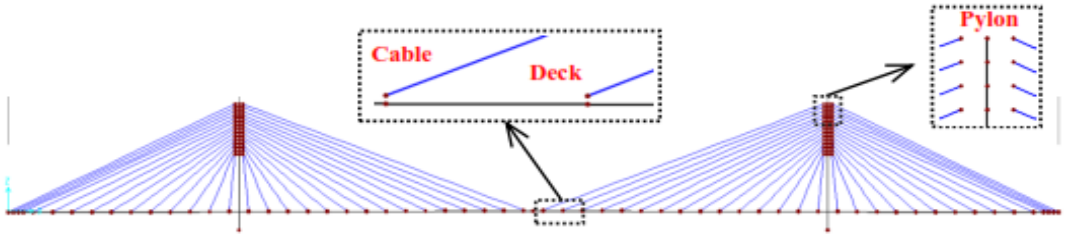


(الف) (ب) (پ) (ت) (ث) (ج)

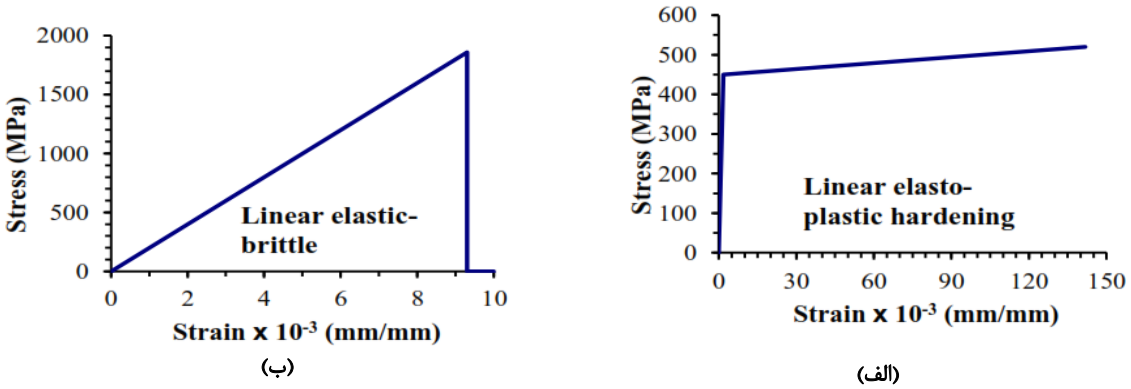
شکل ۱. الف) هندسه پل ب) قرار گیری کابل بر روی دکل پ) مقطع تیر ت) قرار گیری کابل بر روی عرشه مقطع دکل ث) مقطع دکل ج)اتصال دکل به عرشه

جدول ۱. مشخصات مقاطع و مصالح پل

	نوع المان	E (GPa)	A (m2)	I (m4)	V y (MPa)	Yield Moment My* (MN.m)	Yield Force Ny* (MN)
	تیر	۲۰۰	۱.۴۳	۱.۲۱	۴۵۰	۴۷۰	۳۶۳.۹
	دکل	۲۰۰	۴.۷۵	۷و۴۵	۴۵۰	۱۴۷۵	-
شماره کابل	۱-۵, ۲۶-۳۵, ۵۶-۶۰	۲۰۰	۰.۰۳۲۷	-	۱۸۶۰	-	۶۰.۸
	۶-۱۰,۲۱-۲۵, ۳۶-۴۰, ۵۱-۵۵	۲۰۰	۰.۰۱۸۳	-	۱۸۶۰	-	۳۴
	۱۱-۲۰, ۴۱-۵۰	۲۰۰	۰.۰۱۶۵	-	۱۸۶۰	-	۳۰.۷



شکل ۲. مدل دو بعدی بکار رفته جهت تحلیل سازه پل کابلی



شکل ۳. محنی تنش کرنش پذیرفته شده برای الف) فولاد عرشه و دکل، ب) کابل‌ها

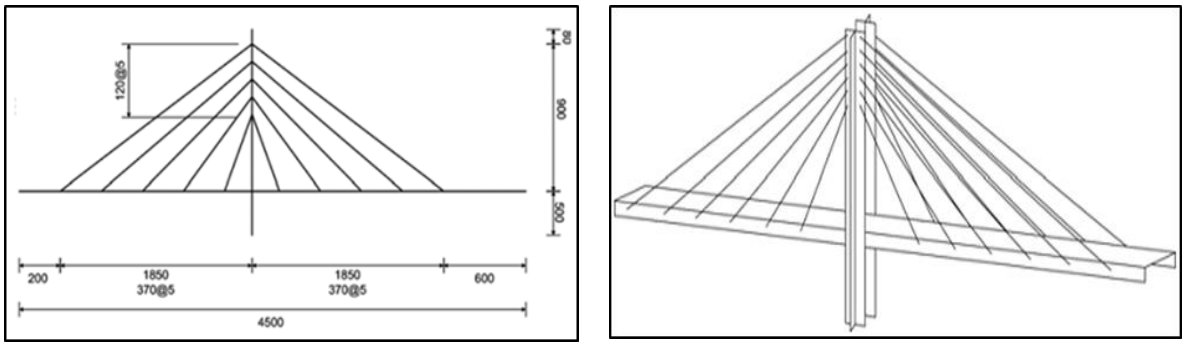
در سال ۲۰۱۱، سویلوک و آوانوگلو به مطالعه درباره اثرات اندرکنش خاک-سازه پل‌های بزرگ در معرض تغییرات فضایی حرکت‌های زمین پرداختند. در این مطالعه به منظور بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه و تغییرات فضایی، حرکت‌های زمین بر روی پاسخ‌های دینامیکی پل‌های کابلی، تاریخچه زمانی حرکت‌های زمین برای تحلیل ناهمسان لرزه‌ای پل بر اساس سه پارامتر اصلی تاثیرگذار مدل‌سازی شد. به منظور بررسی اندرکنش خاک-سازه از روش ساب استراکچر که کل سیستم خاک–سازه را به صورت دو زیر سیستم سازه و خاک در نظر می‌گیرد استفاده گردید. نتایج نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در تحلیل لرزه‌ای با در نظر گرفتن اثرات ناهمسان لرزه‌ای بود [۲۲].

به عنوان یک مطالعه با توجه به گستردگی استفاده از سیستم‌های کابلی در ساختار پل‌های ساخته شده و یا در دست احداث، اثرات زلزله‌های ناهمسان و اندرکنش خاک-سازه بر روی پاسخهای پلهای بزرگ کابلی دارای جداگر لرزه ای مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقاله به بررسی اثرات اعمال تحریک ناهمسان نسبت به تحریک همسان و همچنین بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر روی پاسخ‌های پل‌های طویل کابلی پرداخته شده است.

۲. مشخصات پل مورد مطالعه

به منظور مطالعه اثرات زلزله‌های ناهمسان و اندرکنش خاک–سازه بر روی پاسخ پل‌های بزرگ تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک از مدل پل کابلی ترکه‌ای استفاده شد. مدل مورد استفاده توسط ولی پور و همکاران [۲۳] بر اساس حداقل پارامترهای آیین‌نامه استرالیا (AS510) طراحی شده است. ابعاد و مشخصات پل در شکل (۱) نمایش داده شده است. پل کابلی متقارن با دهانه وسط به طول ۶۰۰ متر که توسط دو دکل به ارتفاع ۱۴۰ متر نگه داشته

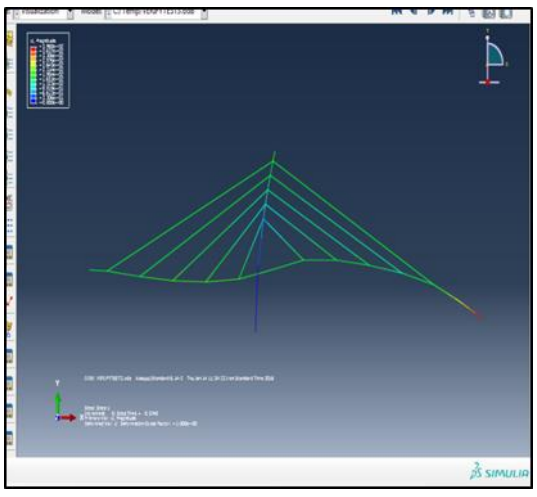
شده است. این پل دارای ۶۰ جفت کابل می‌باشد. تمامی کابل‌ها بجز چهار کابل اول و آخر (کابل‌های شماره ۴-۱ و کابل‌های شماره ۵۷-۶۰) در فواصل مساوی ۲۰ متر از همدیگر قرار دارند. عرض عرشه پل ۲۵/۶ متر و ارتفاع آن ۲ متر است که از تیرهای باکسی فلزی مطابق شکل۱-ج ساخته شده است. عرشه پل به کمک یک تکیه‌گاه غلطکی در منتها علیه سمت راست و یک تکیه‌گاه مفصلی در منتها علیه سمت چپ مطابق شکل ۱-چ نگهداری شده و هیچ اتصال مستقیمی بین عرشه و دکل وجود ندارد.



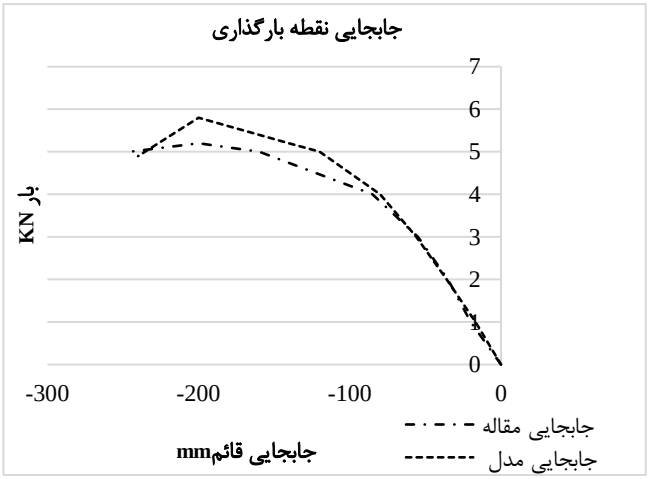
شکل ۴. مشخصات مدل صحت سنجی شده

جدول ۲. مشخصات تیر و دکل مدل صحت سنجی شده

	A	I_X	I_Y	P_Y	M_{PX}	M_{PY}
GIRDER	$655mm^2$	$33404mm^2$	$475574mm^2$	262KN	1173.47KN. mm	**5310. 37KN. mm**
TOWER	$1095mm^2$	$161000mm^2$	$669000mm^2$	438KN. mm	6570KN. mm	**13140KN. mm**



(الف)



(ب)

شکل ۵. الف) مدل اجزا محدود ساخته شده در نرم افزار آباکوس ب)نتایج صحت سنجی

مقطع مدول الاستیسیته، تنش تسلیم فولاد، خصوصیات هندسی عرشه شامل ممان دوم مقطع و مساحت سطح در جدول (۱) نشان داده شده است. سه سایز متفاوت کابل‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. ضمناً جهت اتصال کابل‌ها به عرشه و دکل از المان joint استفاده شده است. این المان‌ها قادر هستند که جابجایی متناظر کابل‌ها و دکل و عرشه را یکسان نمایند. عرشه و دکل پل با استفاه از المان تیر و کابل‌ها با استفاده از المان truss مدل‌سازی شده که در شکل (۲) قابل مشاهده است. همچنین منحنی تنش – کرنش پذیرفته شده برای مصالح عرشه و دکل و کابل در شکل (۳) نمایش داده شده است.

۲-۱. صحت سنجی مدل مورد استفاده

به منظور صحت سنجی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده توسط لی و همکاران[۲۴] که در شکل (۴) نشان داده شده، استفاده شده است. مشخصات تیر و ستون مدل ساخته شده در نرم‌افزار بر اساس مرجع در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل (۵) مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس قابل مشاهده است.

۲-۲. زلزله‌های اعمال شده

تحلیل دینامیکی خطی و غیر خطی سازه‌ها با استفاده از شتاب نگاشت‌های زلزله، روشی مرسوم در تحقیق‌های مهندسی زلزله و نیز طراحی سازه‌های مهم است. امروز بر اساس آیین‌نامه‌های زلزله، لازم است در وهله اول شتاب‌نگاشت‌ها سازگار باشند، سپس به مقیاس در آیند. به منظور سازگاری شتاب‌نگاشت‌ها، معیارهایی مانند مشابهت ساز و کار کانونی و بزرگا، فاصله‌های مشابه از مرکز زلزله، و بالاخره یکسان بودن نوع خاک محل زلزله عنوان شده است. یک شتابنگاشت مناسب علاوه بر سازگاری با ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه، باید بتواند بیشترین تاثیر را بر سازه مورد نظر داشته باشد. در غیر اینصورت ممکن است تصویر نادرستی از واکنش‌های سازه ارائه دهد و یا اصولا منجر به واکنش مهمی در سازه نشود. از سوی دیگر شتاب‌نگاشت یک نوع بارگذاری است که در گذشته به وقوع پیوسته و هرگز عینا تکرار نخواهد شد. بنابراین، استفاده از یک شتابنگاشت به تنهایی برای تحلیل دینامیکی منطقی نبوده و برآیندی (میانگین، فوق میانگین و غیره) از نتایج تحلیل تحت چند شتابنگاشت باید مورد توجه قرار گیرد [۲۳]. آیین‌نامه‌های زلزله معیارهایی برای انتخاب زلزله‌های مناسب را ارائه می‌دهند. به عنوان نمونه استاندارد ۲۸۰۰ [۲۳] یا آیین نامه ASCE7 10 [۲۵] بیان می‌کنند که شتاب-نگاشت‌های زلزله باید از لحاظ خاک محل، فاصله کانونی، بزرگا و سازکار گسلی مشابه باشند. در این تحقیق ضمن در نظر گرفتن شرایط ذکر شده از شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده است که بیشترین استفاده را در امور تحقیقاتی داشته‌اند و با توجه به ماهیت سازه‌ای پل، جز حرکت‌های قوی زمین محسوب می‌گردند. به دلیل اینکه زلزله‌های بزرگ سبب می‌شوند سازه‌ها وارد ناحیه غیر خطی شوند، استفاده از روش‌هایی مانند تحلیل‌های استاتیکی و یا طیفی نمی‌تواند بیان‌گر رفتار دقیق سازه باشد. دقیق‌ترین روش تحلیلی موجود در شرایط حاضر، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از شتاب-نگاشت‌های زلزله است که شامل محاسبه لحظه به لحظه بازتاب‌های سازه تحت تاثیر شتاب‌نگاشت‌های واقعی یک زلزله است. معمولاً برای تحلیل سازه به روش تاریخچه زمانی از شتاب‌نگاشت‌های طبیعی استفاده می‌شود. شتاب نگاشت طبیعی به شتاب‌نگاشتی گفته می‌شود که قبلا در محلی اتفاق افتاده باشد و اطلاعات آن از طریق دستگاه‌های مربوط ضبط شده باشد. نگاشت‌های انتخابی در این پژوهش نگاشت‌های حوزه نزدیک در فاصله حداکثر ۱۰ کیلومتر است. از رکوردهای زلزله مخصوص خاک بسیار سخت یا سنگ برای واردکردن به مرز زیرین مدل خاک استفاده شده است. به منظور تحلیل پل از تعداد ۷ رکورد شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک بر اساس جدول(۴) استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از نرم‌افزار Seismo Signal پردازش و مقیاس شده‌اند. در شکل ۶، طیف بازتاب رکوردها که مربوط به زلزله‌های نزدیک به گسل می-باشند، رسم گردیده است.

۲-۳. مدل‌سازی خاک

مشخصات خاک‌های مورد استفاده جهت بررسی اثر اندرکنش خاک–سازه بر اساس آیین نامه ایران در جدول (۵) خلاصه گردیده است. با توجه به بینهایت بودن خاک در محیط طبیعی لازم است مدل استفاده شده جهت خاک تطبیق لازم را با خصوصیات واقعی محیط خاک داشته باشد. از این رو انرژی وارد شده به مدل باید از طریق مرزهای آن خارج گردد (میرایی هندسی). چوپرا و همکارانش شرایط مرزی فیکس را برای جهت عمودی خاک و شرایط

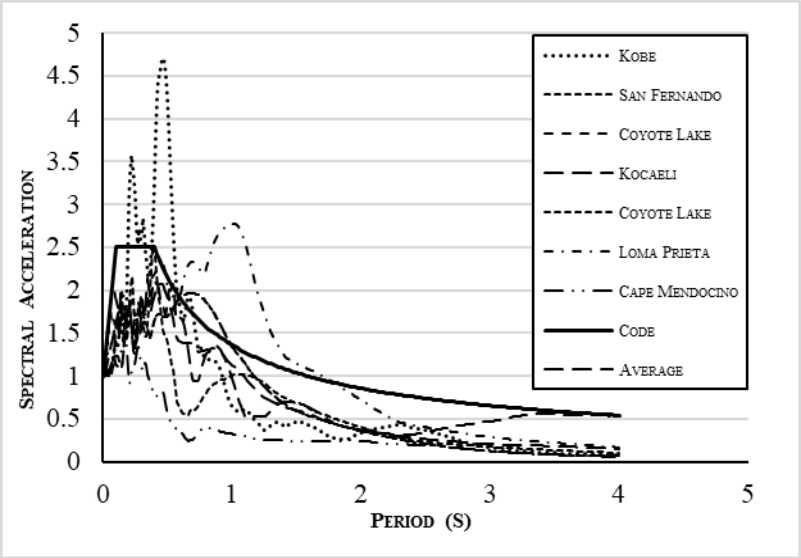
مرزی آزاد را برای جهت افقی خاک پیشنهاد داده‌اند . این روش به عنوان روش مرزهای اولیه شناخته می‌شود. مرزهای ابتدائی می‌تواند در فواصل اندکی از مرکز سازه نتایج واقع گرایانه‌ای ارائه دهد. با این حال در تحلیل‌های دینامیکی ممکن است قسمتی از انرژی از طرق مرزهای خاک برگشت داده شود که این موضوع صحت نتایج را دچار تردید می‌نماید. از این رو، روزت و همکارانش بعد از مطالعات جامع در خصوص مرزهای خاک برای تحلیل‌های دینامیکی به منظور حل این موضوع مرز های ساکن (ویسکوز) را معرفی کردند. روشهای متعددی در گذشته برای محدود نمودن شبکه اجزاء محدود ابداع شده که منجمله می‌توان به المان‌های مرزی گذرا و یا جاذب انرژی اشاره نمود. اما تکنیک قوی‌تری که در سال‌های اخیر معرفی شده استفاده از المان‌های نامحدود است. این المان‌های را می‌توان در صورت داشتن انطباق درجات آزادی به المان‌های معمولی کوپل نمود و با این کار نیازی به گسترش خیلی زیاد شبکه اجزا محدود نیست. المان‌های نامحدود در ابتدا برای مسائل استاتیک ارائه شدند اما پژوهشگران دیگر نظیر والیاپان و ژائو و چاو راه‌حلی برای فرمول-بندی المان‌های نامحدود دینامیکی ارائه کردند که به خوبی می‌تواند در کوچک نمودن شبکه اجزا محدود دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد. درتحقیق حاضر از المان‌های نوع اخیر با قابلیت کوپل شدن به المان‌های دو بعدی جهت تعیین حرکت میدان آزاد استفاده شده است. برای فرمول‌بندی المان‌های نامحدود بایستی انواع مختلف توابع درون‌یابی جهت ترسیم شکل المان و درون‌یابی کمیت‌های میدانی استفاده شود. به عبارتی دیگر تنها تفاوت بین المان‌های محدود مرسوم و المانهای نامحدود در توابع شکل یا تابع انتقال بکار رفته است. برای استفاده از المان‌های نامحدود به عنوان بخشی از برنامه المان محدود معمولی، مسئله اصلی برقراری یک سری توابع انتقال مختصات و توابع درون‌یابی متناسب است که می‌توان به آسانی با تطبیق درون‌یابی المان محدود معمولی و انتگرال‌گیری عددی به دست آورد. توابع درون‌یابی برای یک المان نامحدود بایستی با تابع درون‌یابی المان محدود روی اضلاع مشترک المان‌ها کوپل شوند. المان‌های بی‌نهایت در مسائل مقدار مرزی تعریف شده درمحیط‌های بدون مرز یا مسائلی که در آن‌ها اندازه منطقه مورد نظر در مقایسه با محیط اطراف کوچک است، استفاده می‌شوند. این المان‌ها معمولا همراه با المان‌های محدود به کار می‌روند و تنها دارای رفتار خطی می‌باشند. آن‌ها در تحلیلهای استاتیکی محیط‌های پیوسته، تولید سختی می‌کنند و در تحلیلهای دینامیکی، سبب تولید مرزهای ساکن (ویسکوز) در مدل المان محدود می‌شوند. از سطح مقطع جامد برای تعریف مشخصات مقطع آن‌ها استفاده می‌شود. در تحلیل‌های دینامیکی ضمنی و صریح با انتگرال‌گیری عددی مستقیم، المان‌های بی‌نهایت از طریق اثر یک ماتریس میرایی، تولید مرزهای خاموش برای مدل المان محدود می‌کنند. این المان‌ها در مودهای ویژه سیستم شرکت نمی‌کنند. در طی مراحل دینامیکی، المان‌های بی‌نهایت، تنش‌های اضافی برشی و نرمال در مرزهای المان‌های محدود تولید می‌کنند که متناسب با مولفه‌های برشی و نرمال سرعت مرز می‌باشند. این‌ها به عنوان ثابت‌های میرایی مرز انتخاب می‌شوند تا بازتابش انرژی امواج فشاری و برشی به داخل محدوده المان‌های محدود را کمینه کنند. این فرمولاسیون، ارسال کامل انرژی به خارج از محدوده مش را به غیر از حالت امواج بدنه‌ای صفحه‌ای که به شکل عمود به مرز در یک محیط همسانگرد برخورد می‌کنند، فراهم نمی‌کند. هرچند که معمولاً مدل‌سازی قابل قبولی برای اغلب مسائل عملی ایجاد می‌کند. در نتیجه در مسائل دینامیکی، اگر مرز بین المان‌های محدود و بی‌نهایت به حد کافی به جهتی که امواج به مرز برخورد می‌کنند عمود باشد، توانایی المان‌های بی‌نهایت برای انتقال انرژی به خارج از محدوده مش المان محدود بدون گیر انداختن و یا بازتابش آن به داخل سیستم، بهینه می‌شود. در این تحقیق از المان‌های نامحدود برای محیط بینهایت خاک بهره برده شده است. در آباکوس مشخصات مصالح اختصاص داده شده به مصالح بینهایت باید با مشخصات مصالح المان‌های محدود مجاور، در محدوده خطی یکی باشد. لذا برای خاک تنها ویژگی‌های (مدول یانگ و نسبت پواسون) و چگالی با توجه به چهار نوع خاک مختلف در آیین نامه ایران تعریف شد (جدول ۵). در جدول ۵، منظور از Earthquake، Station و Magnitude به ترتیب نام زلزله، ایستگاه محل ثبت و بزرگای زلزله مورد نظر می‌باشند. ضمنا Distance، Type، PGA و Record Type به ترتیب بیانگر فاصله محل ثبت از مرکز زلزله، نوع رکوردها که در این تحقیق همگی نزدیک به گسل می‌باشند، ماکزیمم شتاب زمین و نوع ثبت می‌باشند. در شکل ۷، نمایی از مدل ساخته شده، قابل مشاهده می-باشد.

۴-۲. انتخاب سنگ بستر

سنگ کف لرزه‌ای، مبدأ حرکات وارد به لایه خاک است که جهت تحلیل واکنش سایت در برابر زلزله انتخاب می‌شود. سنگ کف، به حد کافی سخت بوده و در حین زلزله، شدت حرکات موجود در آن برای نقاط مختلف، یکسان است. در مورد انتخاب صحیح کف لرزه‌ای، نظرات مختلفی وجود دارد. سنگ کف لرزه‌ای، متفاوت با سنگ کف زمین شناسی است. در زمین شناسی، به سنگ‌هایی از نوع آذرین یا دگرگونی و در صورت رسوبی بودن، سنگی که مراحل سنگ شدگی را سپری کرده باشد، سنگ کف اطلاق می‌شود. ولی در بررسی تاثیرات ساختگاهی، سنگ کف، لایه‌هایی از زمین است که دارای صلبیت بالایی بوده و تاثیرات ساختگاهی چندانی نداشته باشند. عامل اصلی جهت انتخاب لایه‌ای از زمین به عنوان سنگ کف لرزه‌ای، سرعت موج برش آن است. عموماً قسمت‌هایی از زمین که دارای سرعت موج برشی بالاتر از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشند، به عنوان سنگ کف لرزه‌ای برگزیده می‌شوند.

جدول۴. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی

Earthquake	Station	Magnitude	Distance	Type	PGA (g)	Record Type
Northridge	Pacoima Dam	6.7	4.92	Near Field	1.285	Bedrock Record
San Fernando	Pacoima Dam	6.6	1.81	Near Field	1.219	Bedrock Record
Loma Prieta	Los Gotoz	6.9	3.22	Near Field	0.443	Bedrock Record
Kobe	Nishi-Akashi	6.9	7.08	Near Field	0.483	Bedrock Record
Kocaeli	Gebze	7.51	7.57	Near Field	0.261	Bedrock Record
Cape Mendocino	Cape Mendocino	7.01	0	Near Field	1.039	Bedrock Record
Coyote Lake	Gilroy Array	5.7	3.1	Near Field	0.422	Bedrock Record



شکل ۶. طیف بازتاب رکوردهای شتاب حوزه نزدیک

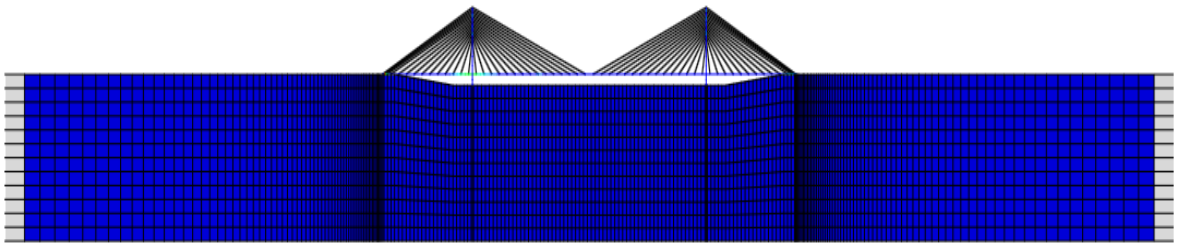
جدول۵. مشخصات خاک‌های مورد استفاده

خاک	Vs (m/s)	توصیف آیین نامه	ν	$G(N/m^2)$	$\gamma(Kg/m^3)$	$E(\frac{N}{m^2})$
I	۸۰۰	سنگ‌های رسوبی سخت و متراکم، سنگ‌های آذرین	/۳	۴۳۱۲	۲۲۰۰	۱/۱۲۱
II	۶۰۰	سنگ‌های آذرین سست، سنگهای سست رسوبی و سنگ‌های دگرگون متورق	/۳۵	۷۹۲	۲۲۰۰	۲/۱۸۴
III	۳۰۰	سنگ‌های متلاشی شده بر اثر هوازدگی، خاک‌های با تراکم متوسط	/۳۵	۱۹۸	۲۲۰۰	۵/۳۴۶
IV	۱۵۰	نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد	/۴	۴۹/۵	۲۲۰۰	۱/۳۸۶

کواسی و همکارانش به خوبی نشان داده‌اند که شرایط مرزی صلب بهترین و واقعی‌ترین فرض برای مدل‌سازی سنگ بستر در تحلیل‌های دینامیکی است. همچنین داتا و همکارانش در نقدی بر فرضیات اندرکنش خاک و سازه این فرض را تایید نمودند. با توجه به مطالعات ذکر شده، شرایط مرزی صلب برای سنگ بستر برای مدل‌سازی عددی اندرکنش خاک–سازه مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این با توجه به اینکه در این پژوهش، رکوردهای ثبت شده در سنگ بستر مورد استفاده قرار گرفته، رکوردهای زلزله به صورت مستقیم به نقاط مرزی شبکه مش‌بندی اعمال گردید.

۲-۵. مدل‌سازی در اباکوس

برای مش‌بندی ناحیه محدود خاک که دارای ۳۰۰۰ متر پهنا و ۵۰۰ متر عمق است از المان‌های کرنش مسطح جامد CPE4R استفاده شد و از المان‌های نامحدود CINPE4 جهت شبیه‌سازی ناحیه نامحدود خاک استفاده گردید. همچنین صحت مدل ساخته شده خاک با اعمال بار ضربه‌ای به سازه و بررسی پاسخ‌های سازه کنترل شد.



شکل ۷. شبیه سازی شرایط مرزی جانبی برای اندرکنش خاک و سازه

۳. تحلیل لرزه‌ای پل

۳-۱. تحریک ناهمسان تکیه گاهی (MSE)

به عنوان یکی از خصوصیت‌های اصلی امواج لرزه‌ای، سرعت ظاهری امواج لرزه‌ای اثر زیادی بر روی پاسخ‌های سازه‌های طویل دارد. درک این تاثیر برای طراحی سازه‌های مهندسی ضروری است. موضوع تحریک چند تکیه‌گاهی (MSE) برای سازه‌های عظیم مهندسی عمدتا به علت اثر عبور موج، اثر ناپیوستگی و اثرات ساختگاه است[۲۶]. روش دینامیکی قطعی در حوزه فرکانس و حوزه زمان و روش ارتعاشات تصادفی دو روش پذیرفته شده برای تحلیل مسائل تحریک چند تکیه گاهی می باشند. روش‌های دینامیکی مرسوم به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، با این حال توانایی در نظر گرفتن خصوصیات تصادفی حرکت‌های زمین را ندارند. همچنین در روش ارتعاشات تصادفی فاکتورهای زیادی در

تحلیل سازه تاثیر دارند. اثر سرعت ظاهری عبور امواج لرزه‌ای به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار بر تحریک چند تکیه‌گاهی، هنگامی که طول سازه زیاد می‌شود از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای سازه‌هایی مانند پل‌های معلق کابلی اثر عبور موج می‌تواند باعث تحمیل نیروهای بیشتری به سازه گردد. از این رو باید در طراحی سازه در نظر گرفته شود [۲۶].

از میان روش‌های ذکر شده، تحلیل دینامیکی قطعی در حوزه زمان می‌تواند پاسخ‌های کل سازه را در حوزه زمان تحت اثر یک زلزله مشخص فراهم نماید. از این رو از این روش می‌توان به منظور بررسی اثرات سرعت ظاهری امواج بر پاسخهای سازه‌های طویل استفاده نمود.

تفاوت‌های مشاهده شده در دامنه، محتوای فرکانسی و فاز محرک ورودی زمین لرزه در سازه‌های طویل را در حالت کلی می‌توان به اثر عبور موج، اثر عدم انسجام و اثر شرایط محلی ساختگاه نسبت داد. در ادامه، عوامل مذکور به اختصار شرح و سپس با بیان روش مدل‌سازی، روابط هر یک از این عوامل بیان شده است.

۳-۱-۱. عوامل موثر در تحریک ناهمسان تکیه‌گاهی

اثر عبور موج[۲]

به دلیل تفاوت موقعیت مکانی، نقاط تکیه‌گاهی و همچنین سرعت محدود امواج لرزه‌ای سطحی، امواج لرزه‌ای با اختلاف زمانی به نقاط مذکور می‌رسند. این مورد، سبب تأخیر زمانی حرکت در ایستگاه‌های مختلف می‌شود.

اثر عدم انسجام[۳]

در حالت کلی، مقدار طیف انسجام دو نگاشت ثبت شده در یک محیط، نشان‌دهنده مقدار همبستگی بین هارمونیک‌های آن دو نگاشت در فرکانس مورد نظر می‌باشد. در دو نقطه تکیه‌گاهی از یک سازه طویل نیز کاهش مقدار طیف انسجام دو نگاشت ثبت‌شده در یک زمین لرزه، می‌تواند به علت انعکاس و انکسار امواج به هنگام عبور از میان لایه‌های خاک ناهمگن به وجود آید. به عبارت دیگر امواج لرزه‌ای در حین عبور از لایه‌های مختلف خاک، بارها تحت اثر انکسار یا شکست و انعکاس یا بازتاب قرار می‌گیرند. لذا امواج دریافت شده در فواصل مختلف نزدیک به هم، الزاماً یکسان نیستند و کاهیدگی در آن‌ها مشاهده می‌گردد که به این اثر، اثر ناهماهنگی یا عدم انسجام امواج لرزه ای گفته می‌شود.

اثر شرایط محلی ساختگاه[۴]

تفاوت‌های موجود در شرایط خاک محل در هر ایستگاه ممکن است دامنه و محتوای فرکانسی حرکات سنگ بستر را به طور متفاوتی تغییر دهد.

۳-۲. معادله سیستم‌های چند درجه آزادی تحت تاثیر حرکت‌های ناهماهنگ نقاط تکیه‌گاهی

معادله دینامیکی سیستم‌های تحت تحریک غیریکسان و مستقل تکیه‌گاهی متفاوت از معادله‌های دینامیکی سیستم‌های تحت تحریک یکسان تکیه‌گاه‌ها است . با حرکت متفاوت تکیه‌گاهی سازه از یکدیگر، تنش‌های شبه استاتیکی در سازه ایجاد می‌شوند که باید علاوه بر اثرات پاسخهای دینامیکی ناشی از نیروهای اینرسی، در نظر گرفته شوند. برای تحلیل چنین سیستم‌هایی، روابط باید علاوه بر درجات آزادی پاسخRDOF شامل درجات آزادی زمین در تکیه‌گاه‌ها (GDOF) که تاریخچه زمانی ورودی را دریافت می‌کنند نیز باشند(شکل ۸). برای توضیح معادله یک سازه چند درجه آزادی خطی تحت تاثیر حرکت‌های ناهماهنگ تکیه‌گاهی با N نقطه تکیه‌گاهی یک سازه مطابق شکل زیر در نظر گرفته می‌شود[۲۷].

در روش ساب استراکچر سیستم کلی سازه‌ای خاک و سازه به دو زیر سیستم خاک و زیر سیستم سازه تجزیه می شود. معادلات تعادل به صورت مجزا برای دو زیر سیستم تشکیل می‌گردد. معادلات تعادل برای سازه فوقانی (روسازه) با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه به صورت نیروی اندر کنش که با استفاده از ماتریس تاثیر بدست می‌آید، حل می‌گردد. معادله حرکت سیستم n درجه آزادی با احتساب m حرکت تکیه‌گاهی بر حسب درجات آزادی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه به صورت زیر است:

[2] Wave Passage Effect
[3] Incoherence Effect
[4] Local Site Effect

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^t \\ \dot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_b \end{Bmatrix}$$

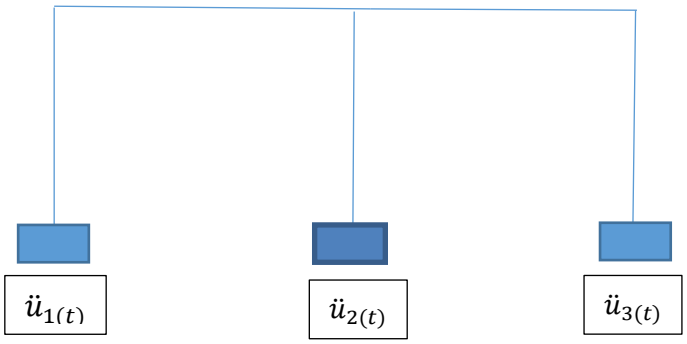
که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، $\{\ddot{u}\}$، $\{\dot{u}\}$ و$\{u\}$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی، $\{p_b\}$ بردار نیروی اندرکنش است. زیرنویس‌های ss ، bb و sb به ترتیب بیان کننده درجات آزادی سازه، درجات آزادی تکیه‌گاه و درجات آزادی ترکیبی می‌باشند. زیر نویس های s و b به ترتیب بیان کننده سازه و تکیه گاه می‌باشند[۲۷].

به منظور حل معادله بالا، روش مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش حل مستقیم همانگونه که از اسم این روش پیداست، روش حل مستقیم معادلات را در فضای مختصات مطلق سازه با استفاده از گام‌های زمانی حل می‌کند. نتایج نسبت به روش‌های دیگر بسیار دقیق‌تر می‌باشند. علاوه بر این، این روش را می‌توان به منظور بررسی رفتارهای خطی و غیر خطی سازه ها بکار برد. این روش دارای دقت زیاد اما زمان محاسبات بیشتر است.

۳-۳. اندرکنش خاک و سازه

تحلیل عکس‌العمل دینامیکی سازه‌هایی که تحت بارهای بالقوه زلزله در پایه خود قرار دارند، یکی از وظایف اصلی مهندسی زلزله است. در حالت کلی سازه با خاک اطراف خود در حال برهم کنش است. در سازه‌های متکی بر زمین صلب، حرکت پایه سازه در اثر زلزله، برابر همان حرکت میدان آزاد است. برای سازه های متکی بر خاک انعطاف‌پذیر، حرکت پی معمولا با حرکت میدان آزاد اختلاف دارد. این اختلاف ممکن است شامل یک مؤلفه گهواره‌ای مهم، به علاوه یک مؤلفه جانبی یا انتقالی نسبت به زمین باشد. مؤلفه حرکت گهواره‌ای به ویژه می‌تواند برای سازه‌های بلند، مهم باشد.

یک سازه با تکیه‌گاه انعطاف پذیر، با یک سازه با تکیه گاه صلب، از این لحاظ نیز اختلاف دارد که ممکن است یک قسمت اساسی از انرژی ارتعاشی به وسیله تشعشع امواج و نیز به وسیله عمل هیستریک در خاک در تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر تلف و مستهلک شود. اهمیت فاکتور دوم با افزایش شدت لرزش زمین افزایش می‌یابد. تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر همچنین باعث تغییر شکل مودها و فرکانس‌های ارتعاشی سازه می‌شود. اثرات اندرکنش خاک و سازه اختلافات پاسخ سازه در حالتی که این پاسخ با فرض برابر بودن حرکت پی سازه با حرکت میدان آزاد زمین محاسبه شده را نسبت به پاسخ سازه با در نظر گرفتن حرکت اصلاح شده یا واقعی پی، نشان می‌دهد و این اختلافات به مشخصه‌های حرکت میدان آزاد زمین بعلاوه خواص سازه و تکیه گاه انعطاف پذیر (خاک مجاور و زیر پی) بستگی دارد. اثرات اندرکنش خاک و سازه نباید با اثرات سایت اشتباه شود. اثرات سایت به این حقیقت اشاره می‌کند که مشخصه‌های حرکت میدان آزاد زمین ایجاد شده در یک واقعه دینامیکی در یک سایت معین، توابعی از خواص و کیفیت زمین-شناسی آن سایت (خاک و سنگ زیر سطح) می‌باشند. لیکن اثرات اندرکنش خاک و سازه به این حقیقت اشاره می‌کند که پاسخ دینامیکی یک سازه ساخته شده بر روی سایت، به رابطه بین مشخصه‌های سازه‌ای و خواص لایه‌های خاک زیرین موضعی و نیز مشخصه‌های حرکت میدان آزاد زمین بستگی دارد. اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌تواند عکس‌العمل سازه را افزایش و یا کاهش دهد که این امر به مشخصه‌ها و خواص سازه خاک و حرکت زمین مورد نظر بستگی دارد. بنابراین اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌تواند طرح لرزه‌ای را از حاشیه اطمینان خارج و یا غیراقتصادی نماید. به همین خاطر ضرورت در نظر گرفتن این اثرات، در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها احساس می‌شود. در سال‌های اخیر، کارهای زیادی روی برهم کنش دینامیکی سازه‌ها انجام شده است. بویژه برای سازه‌های حجیم و سنگین، مثل نیروگاه‌های اتمی، سدها، سکوهای ساحلی، پل‌ها و سازه‌های بلند که بر روی خاک نرم بنا شده‌اند، برهمکنش بین سازه و پی بسیار مهم می‌باشد. از این رو بعضی از آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مانند NEHRP اقدام به ارائه الگوریتمی برای روش بار جانبی معادل (تحلیل معادل استاتیکی) و تحلیل دینامیکی طیفی نموده‌اند که در آن‌ها به گونه‌ای سعی در لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه صورت گرفته است.



شکل ۸. معادله سازه چند درجه آزادی تحت اثر تحریک غیر همسان

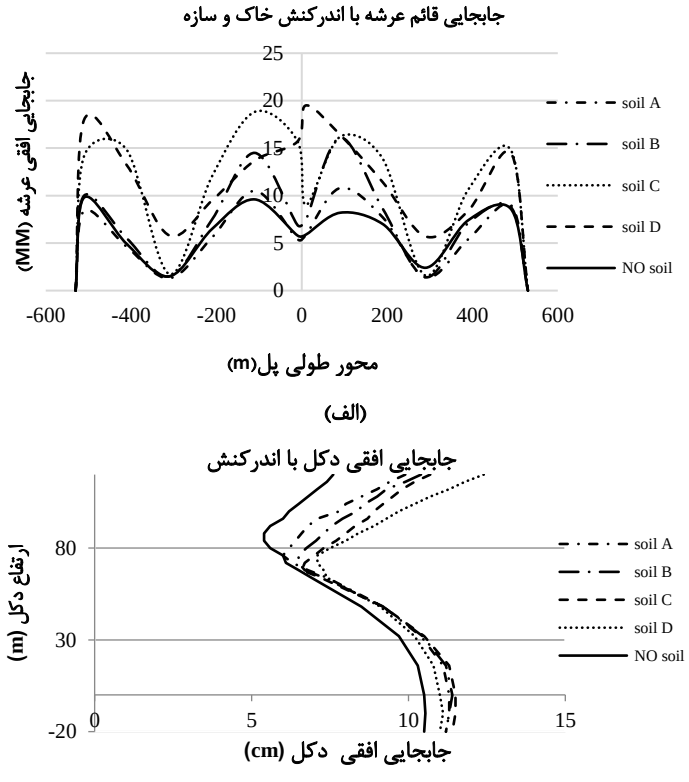
۴. نتایج تحلیل‌های عددی

۴-۱. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ‌های پل کابلی با جداساز

به منظور بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی پاسخ‌های پل‌های بزرگ دهانه کابلی، مدل‌هایی برای ۴ نوع خاک بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور پاسخ سازه تحت اثر هفت شتابنگاشت حوزه نزدیک بر روی چهار خاک آیین نامه ۲۸۰۰ ایران بررسی شد. در این تحقیق به مقایسه پاسخ‌های سازه در حالت اندرکنش خاک و سازه پرداخته می‌شود. به منظور درک بهتر از رفتار پل تحت اثر اندرکنش خاک - سازه ، پل بر اساس هندسه به سه بخش دهانه ابتدایی (دهانه نزدیکتر به مرکز زلزله) ، دهانه میانی و دهانه انتهایی(دهانه دورتر از مرکز زلزله) تقسیم‌بندی می شود. شکل‌های مربوط به جابجایی قائم عرشه، لنگر عرشه، جابجایی افقی دکل، نیروی محوری دکل در این بخش مورد ارزیابی قرار گرفته شد.

۴-۱-۱. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی بیشینه جابجایی‌های اعضای پل

در شکل (۹) بیشینه جابجایی مطلق قائم تیر اصلی (الف) و بیشینه جابجایی مطلق افقی دکل(ب) پل تحت اثر شتابنگاشت زلزله نمایش داده شده است.



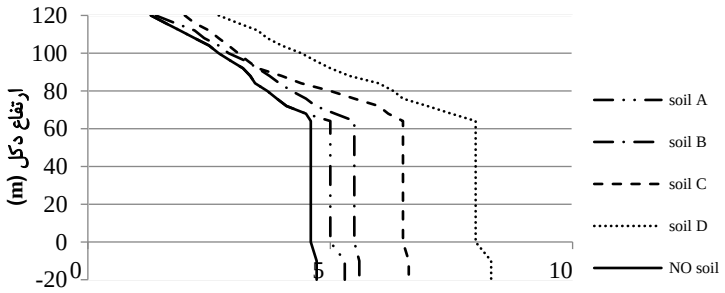
شکل ۹. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر الف) جابجایی قائم عرشه ب) جابجایی افقی دکل

با توجه به شکل ۹ (الف) جابجایی قائم عرشه در وسط دهانه میانی و وسط دهانه‌های کناری پل بیشترین مقدار را داراست. این مقادیر در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها کاهش می یابد. جابجایی بیشینه در وسط دهانه در محلی که بیشترین فاصله از تکیه‌گاه‌ها را دارد اتفاق می‌افتد. به دلیل تقارن پل، جابجایی‌ها در نقطه تقارن نسبت به اطراف کاهش می‌یابد. مقادیر بیشینه جابجایی در خاک نوع ۴ و در مجاورت وسط دهانه است. مقادیر افزایش برای خاک نوع ۴ در وسط دهانه میانی و به میزان ۱۹۶ درصد و در دهانه‌های سمت راست و چپ به ترتیب ۶۸ و ۲۶۹ درصد است با نرمتر شدن خاک میزان جابجایی‌ها بیشتر می شود. این جابجایی‌ها برای خاک نوع ۱ برای دهانه سمت راست ۶ درصد افزایش، دهانه سمت چپ ۶ درصد کاهش و در دهانه میانی ۳۱ درصد افزایش نسبت به حالت بدون اندرکنش دارد. میزان افزایش خاک‌های ۱ و ۲ مشابه و نزدیکتر به حالت بدون اندرکنش و خاک‌های ۳ و ۴ مشابه و مقادیر نظیر آن‌ها مقادیر بیشینه است. این امر به دلیل نزدیکتر شدن زمان تناوب خاک‌های نرم به زمان تناوب پل مورد بررسی است. پاسخ‌های ناشی از تحریک همسان پایه‌ها بیشترین نزدیکی را با خاک نوع ۱ و ۲ دارند. در نقاطی که دارای مقادیر جابجایی بیشتری می‌باشند امکان شکل‌گیری مفاصل پلاستیک وجود دارد. برای دهانه‌های ابتدایی و میانی، مقادیر جابجایی قائم عرشه برای خاک نوع ۴ بیشینه است. این امر نشان می‌دهد با افزایش دهانه در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه برای سازه‌های واقع بر روی خاک نوع ۴ بسیار مهم است.

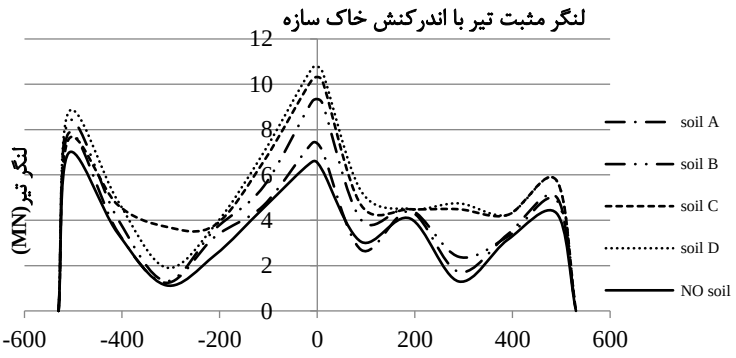
با توجه به شکل (۹-ب) میزان جابجایی در راس و تراز در تمام حالت‌ها بیشترین مقدار است. برای خاک نوع ۴ میزان جابجایی راس دکل بیشترین مقدار و برای سایر خاک‌ها میزان جابجایی تراز عرشه بیشترین مقدار را داراست. در نقاط میانی دکل و محل اتصال کابل‌ها به دکل به دلیل وجود نیروهای کششی کابل‌ها در جهت‌های مخالف میزان جابجایی ها کمتر است. راس دکل در حالت بدون خاک کمترین جابجایی و در حالت با خاک نوع ۴ بیشترین جابجایی را داراست. بیشترین درصد افزایش جابجایی برای خاک نوع ۴ و در راس دکل به میزان ۶۳ درصد است. این افزایش برای خاک نوع ۳، ۴۰ درصد و خاک‌های نوع ۱ و ۲، ۳۰ درصد است. همچنین بیشترین میزان افزایش جابجایی افقی در پایه دکل برای خاک نوع ۳ و به میزان ۸ درصد است. این افزایش برای خاک نوع ۴ ، ۵ درصد و خاک‌های نوع ۱ و ۲، ۷ درصد است. مقدار افزایش جابجایی‌ها برای خاک‌های مختلف در راس دکل نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در طراحی پل‌های کابلی است. این تفاوت به دلیل تشدید پاسخ‌ها ناشی از نرمتر شدن خاک است. در نقاط میانی دکل افزایش جابجایی‌ها نسبت به تراز پایه بیشتر است اما میزان تفاوت جابجایی‌ها در خاک‌های مختلف نزدیک به هم است.

۴-۱-۲. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی بیشینه نیروهای داخلی اعضای پل

در شکل ۱۰ نمودار بیشینه مطلق نیروی محوری دکل (الف) و لنگر تیر اصلی (ب) تحت اثر شتاب نگاشت اعمالی به سازه ترسیم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. بیشینه لنگر مثبت تیر با اندرکنش خاک و سازه

با توجه به شکل (۱۰-الف) مقادیر نیروی محوری دکل از راس به سمت پایه افزایش می‌یابد. این افزایش در محل اتصال هر کابل به دلیل انتقال نیروی کابل‌ها به دکل اتفاق می افتد. در قسمت‌های پایینتر از تراز قرارگیری آخرین کابل تغییری در مقدار نیروی محوری مشاهده نمی‌گردد. شکل ۱۰ (الف) نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه نیروی محوری در حالت اندرکنش خاک و سازه در خاک نوع ۴ و به میزان ۱۰۸ درصد برای راس دکل و ۷۶ درصد برای تراز پایه است. این تفاوت به علت تشدید امواج لرزه‌ای در خاک نوع ۴ است. همچنین پاسخ سازه در حالت خاک‌های نوع ۱ و ۲ تقریبا مشابه است. در نقاط پایینتر از عرشه (تراز منفی) به علت اعمال نیروی محوری ناشی از عرشه مقادیر نیروی محوری دکل بیشتر می‌شود. برای خاکهای نوع ۱ ،۲ و ۳ مقادیر نیروی محوری در راس دکل کاهش یافته و به مقادیر در حالت بدون اندرکنش نزدیک می‌شود. با این حال درصد افزایش نیروی محوری برای خاک‌های ۲ و ۳ به ترتیب ۷۶و ۵۳ درصد است. با توجه به امکان به وجود آمدن نیروهای محوری زیاد در این چنین سازه‌هایی نباید از اثر اندرکنش خاک و سازه صرف نظر کرد.

با توجه به شکل ۱۰-ب لنگر مثبت تیر در وسط دهانه میانی برای خاک‌های نوع ۲، ۳ و ۴ بیشترین مقدار را داراست. مقادیر بیشینه برای خاک نوع ۱ و بدون اندرکنش خاک و سازه در دهانه سمت چپ است. مقادیر لنگر مطلق عرشه درحالت بدون اندرکنش خاک-سازه کمترین میزان را داراست. با نرمتر شدن خاک مقادیر لنگر مطلق عرشه افزایش می‌یابد. برای خاک نوع ۱ مقدار افزایش برای دهانه کناری در جهت عبور موج از سمت چپ به سمت راست افزایش می‌یابد. این افزایش برای دهانه سمت چپ (نزدیک تر به کانون زلزله) ۱۲ درصد و برای دهانه سمت راست ۱۶ درصد است و همچنین برای دهانه وسط ۱۴ درصد است. برای خاک نوع ۲ مقادیر افزایش برای دهانه‌های سمت چپ، وسط و راست به ترتیب ۲۰ ، ۴۰ و ۱۳ درصد است. برای خاک نوع ۳ مقادیر افزایش جابجایی دهانه وسط ۶۳ درصد و دهانه های کناری ۳۵ درصد است . برای خاک نوع ۴ مقدار جابجایی دهانه‌های سمت راست و چپ به ترتیب ۳۵ و ۴۰ درصد و دهانه وسط ۷۰ درصد است. با توجه به نتایج بدست آمده خاک نوع ۴ در دهانه وسط بیشترین مقدار جابجایی را داراست. مقادیر بیشینه و همچنین مقادیر افزایش نسبت به حالت بدون اندرکنش با نرمتر شدن خاک افزایش می‌یابد.

۴-۱-۳. تاثیر تحریک ناهمسان لرزه ای بر روی بیشینه جابجایی قائم تیر اصلی

در شکل (۱۱-الف) نمودار تغییر مکان افقی نقاط دکل نشان داده شده است. میزان جابجایی در راس و تراز در تمام حالت‌ها بیشترین مقدار است. در تمامی حالت‌ها جابجایی پایه دکل بیشترین مقدار را داراست. در خاک‌های نوع ۱ و ۲ و تحریک همسان جابجایی راس دکل از پایه به میزان قابل توجهی کمتر است. در نقاط میانی دکل و محل اتصال کابل‌ها به دکل به دلیل وجود نیروهای

کششی کابل‌ها در جهت‌های مخالف میزان جابجایی‌ها کمتر است. راس دکل در حالت بدون خاک کمترین جابجایی و در حالت برای خاک نوع ۱ مقادیر افزایش در تراز پایه کمتر از ۱ درصد و در تراز راس دکل ۱۳ درصد است. مقادیر افزایش برای خاک نوع ۴ در راس دکل ۴۰ درصد است که بیشترین مقدار افزایش مربوط به همین خاک است. این خاک به علت نرم بودن سرعت عبور موج را محدود می‌کند. این امر باعث برانگیخته شدن مودهای نامتقارن می‌شود. همچنین بیشترین مقدار افزایش مربوط به تراز پایه در خاک نوع ۴ و برابر ۹ درصد است. برای خاک‌های نوع ۲ و ۳ مقدار افزایش برای راس دکل ۲۷ درصد و برای تراز پایه ۴ درصد است. با توجه به شکل رفتار خاک‌های نوع ۲ و ۳ تقریبا یکسان است. مقادیر اختلاف جابجایی‌ها مربوط به خاک‌های مختلف در طول دکل تغییر می‌کند. این اختلاف تا تراز عرشه حفظ می شود و از تراز عرشه تا تراز نقطه اتصال کابلها به دکل نتایج برای چهار سرعت متفاوت عبور موج به هم نزدیک می‌شود. بیشینه اختلاف در تراز راس دکل و برای سرعت عبور موج ۱۵۰ متر بر ثانیه (خاک نوع ۴) است. این اختلاف نشان‌دهنده افزایش ۴۰ درصدی نسبت به حالت تحریک همسان است. با افزایش سختی خاک‌ها این مقدار اختلاف کم شده و برای خاک‌های نوع ۱ و تحریک همسان نتایج تقریبا روی همدیگر منطبق می‌شود. با افزایش سرعت عبور امواج خاک‌های نوع ۳ و ۴ مقادیر جابجایی، خصوصا جابجایی راس دکل افزایش می‌یابد. با این حال، نتایج مربوط به خاک‌های نوع ۳ و ۴ بر هم منطبق می‌باشند. با توجه به تغییر مکان‌های زیاد عرشه و دکل امکان تشکیل مفاصل پلاستیک در شرایط خاص وجود دارد هر چند با در نظر گرفتن جداساز لرزه‌ای تشکیل مفاصل باعث تخریب سازه نمی‌شود.

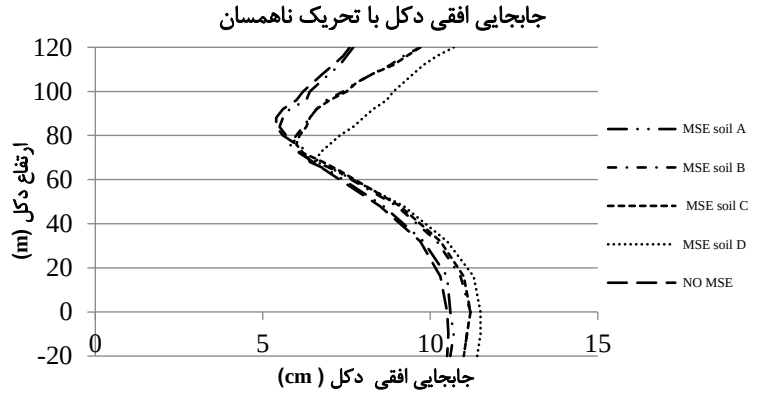
۴-۱-۴. تاثیر تحریک ناهمسان لرزه‌ای بر روی بیشینه نیروهای داخلی اعضای پل

در شکل (۱۲) نمودار بیشینه مطلق لنگر تیر اصلی (الف) و بیشینه نیروی محور دکل (ب) تحت اثر شتاب نگاشت اعمالی به سازه ترسیم شده است.

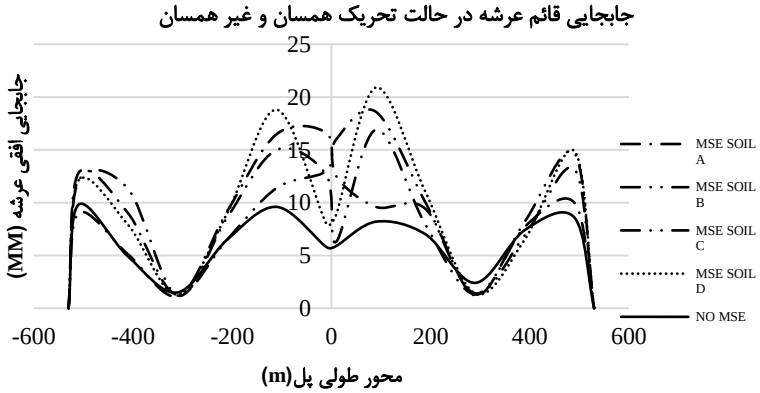
به توجه به شکل (۱۲-الف) بیشینه لنگر مثبت تیر برای خاک‌های ۲، ۳ و ۴ در وسط دهانه و برای خاک نوع ۱ و تحریک همسان در دهانه سمت چپ است. همچنین بیشینه لنگر در خاک نوع ۳ با خاک نوع ۴ بیشترین جابجایی را داراست.

بیشترین مقدار افزایش لنگر مثبت در دهانه میانی مربوط به خاک نوع ۳ و به میزان ۵۷ درصد است. این مقدار تقریبا با مقادیر مربوط به خاک نوع ۴ به میزان ۵۵ درصد یکسان است. با وجود برابری میزان افزایش جابجایی‌ها در خاک نوع ۳ و ۴ در دهانه میانی و دهانه سمت راست، در دهانه سمت چپ مقادیر افزایش برای خاک نوع ۴، ۴۱ درصد و برای خاک نوع ۳، ۳۴ درصد است. برای خاک نوع ۲ مقادیر برای دهانه‌های سمت چپ، میانی و راست به ترتیب ۳۶ ، ۱۳ و ۳۰ درصد است. برای خاک نوع ۱ در دهانه میانی ۸ درصد و در دهانه‌های سمت راست و چپ به ترتیب ۲۴ و ۱۶ درصد تفاوت با مقادیر مربوط به تحریک همسان وجود دارد. تحریک ناهمسان برای خاک نوع ۱ بیشترین انطباق را با حالت تحریک یکنواخت دارد. در تکیه‌گاه‌های میانی به علت انتقال قسمتی از لنگر دکل‌ها به تیر توسط الاستومرها لنگر صفر نمی‌شود. بیشینه لنگر مثبت تیر در نزدیکی تکیه‌گاه‌های کناری و وسط دهانه به دلیل وجود نیروهای داخلی زیاد اتفاق می‌افتد. با مقایسه لنگر وسط دهانه اصلی پل، خاک نوع ۱ و حالت بدون اندرکنش کمترین میزان لنگر و خاک نوع ۴ بیشترین میزان لنگر را دارا می‌باشند. برای سرعت عبور موج ۱۵۰ متر بر ثانیه (خاک نوع ۱) در دهانه ابتدایی مقادیر کمتر از حالت تحریک همسان است. این مقادیر برای وسط دهانه اصلی پل منطبق بر نتایج تحریک همسان و برای دهانه آخر کمتر از نتایج تحریک همسان است. برای سرعت عبور موج ۳۰۰ متر بر ثانیه (خاک نوع ۲) مقادیر در دهانه اصلی بیشتر از خاک نوع ۱ و تحریک همسان و کمتر از خاک نوع سه و چهار است.

در دهانه‌های کناری نمودار مربوط به خاک نوع دو انطباق خوبی با نتایج خاک نوع ۱ و حالت تحریک همسان دارد. برای سرعت عبور موج ۶۰۰ و ۸۰۰ که به ترتیب به خاک‌های نوع ۳ و ۴ مربوط می‌شوند نتایج در دهانه های میانی و انتهایی انطباق خوبی دارند هر چند در دهانه ابتدایی مقادیر مربوط به خاک نوع ۴ بیشتر است. با توجه به موارد ذکر شده می توان نتیجه گرفت با افزایش سرعت عبور امواج، مقادیر لنگر مربوط به دهانه وسط افزایش بیشتری دارد.

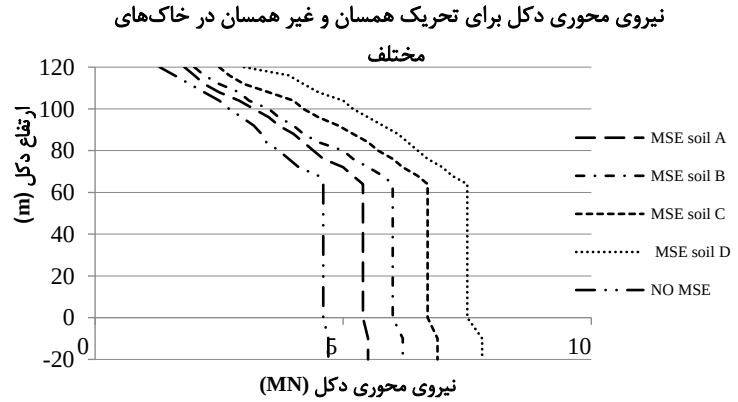


(الف)

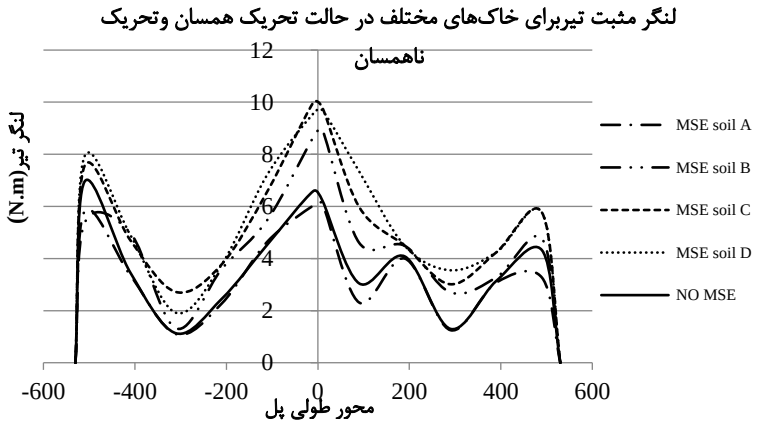


(ب)

شکل ۱۱. الف) جابجایی افقی دکل (ب) جابجایی قائم عرشه در حالت تحریک همسان و غیر همسان برای خاک‌های مختلف



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. (الف) نیروی محوری دکل (ب) لنگر مثبت تیر با تحریک ناهمسان

با بررسی شکل (۱۲-ب) کمترین مقدار نیروی محوری در راس دکل و بیشترین در تراز پایه است. برای حالت‌های مختلف تحریک همسان و غیر همسان مقادیر نیروی محوری دکل با فاصله از راس دکل به سمت تراز پایه افزایش می‌یابد. این افزایش تا تراز کابل‌ها به دلیل اضافه شدن تدریجی نیروی هر کابل افزایش دارد و از تراز پایین‌ترین کابل تا تراز عرشه تقریبا ثابت می‌ماند و در تراز عرشه با وارد شدن نیروی ناشی از عرشه افزایش یافته، سپس تا تراز پی ثابت باقی می‌ماند. با مقایسه حالت‌های تحریک همسان و غیر همسان می‌توان نتیجه گرفت با نرم‌تر شدن خاک میزان نیروی محوری وارد بر دکل افزایش می‌یابد. خاک نوع ۴ کمترین سختی و بیشترین مقادیر نیروی محوری و خاک نوع ۱ و حالت بدون تحریک ناهمسان کمترین میزان نیروی محوری را نشان می‌دهند. مقادیر افزایش برای خاک نوع ۴ در راس دکل نسبت به حالت تحریک همسان برای راس دکل ۱۳۱ درصد و برای تراز پایه دکل ۶۶ درصد است. این مقادیر افزایش برای خاک نوع ۱ و در راس دکل افزایش ۳۸ درصدی و در تراز پایه افزایش ۱۷ درصدی را نشان می‌دهد. برای خاک‌های نوع ۲ و ۳ برای به ترتیب برای راس دکل افزایش ۵۴ و ۹۲ درصدی و برای تراز پایه افزایش ۳۰ و ۴۶ درصدی را نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده تفاوت بیشتر در راس تیر است که با کاهش ارتفاع از راس تیر به سمت تراز پایه اختلاف‌ها کم می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل لرزه‌ای پل کابلی به طول ۱۰۶۰ متر انجام شد. مدل‌سازی در نرم افزار اجراء محدود آباکوس انجام و اثرات تحریک تکیه‌گاهی ناهمسان و اندرکنش خاک و سازه تحت اثر هفت شتابنگاشت حوزه نزدیک زلزله و ۴ نوع خاک آیین نامه ۲۸۰۰ ایران در جهت طولی سازه بررسی شد و مقادیر جابجایی قائم عرشه، جابجایی افقی دکل، لنگر مثبت عرشه و نیروی محوری دکل برای حالت‌های مختلف با هم مقایسه شدند.

نتایج نشان‌دهنده افزایش جابجایی قائم عرشه در حالت تحریک ناهمسان نسبت به تحریک همسان است. بیشینه جابجایی قائم عرشه در وسط دهانه و در خاک نوع ۴ که نرمترین نوع خاک و دارای کمترین سرعت عبور امواج لرزه‌ای در آن کم است اتفاق می افتد.

جابجایی افقی دکل در حالت تحریک ناهمسان در مقایسه با تحریک همسان بیشتر است. بیشینه جابجایی‌ها در خاک نوع ۴ و در تراز پایه دکل اتفاق می‌افتد. برای سایر خاکها با افزایش نرمی خاک مقدار جابجایی دکل در ترازهای راس دکل و تراز پایه افزایش قابل توجهی می‌یابد. لنگر مثبت عرشه در حالت تحریک ناهمسان نسبت به تحریک همسان بیشتر است. بیشینه لنگر مثبت در وسط دهانه و در خاک نوع ۴ اتفاق می‌افتد. نیروی محوری دکل در حالت تحریک

ناهمسان در مقایسه با تحریک همسان بیشتر است. مقادیر بیشینه نیروی محوری دکل در خاک نوع ۴ و در تراز پایه اتفاق می‌افتد. اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش جابجای افقی دکل به میزان قابل توجهی می‌شود. بیشینه جابجایی‌ها در خاک نوع ۴ و در تراز راس دکل اتفاق می‌افتد. در حالت بدون اندرکنش، جابجایی تراز پایه و در حالت اندرکنش خاک-سازه جابجایی راس دکل بیشینه است. لنگر مثبت عرشه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای کلیه خاکها افزایش می‌یابد. مقادیر بیشینه مربوط به خاک‌های نوع ۲، ۳ و ۴ در وسط دهانه است. نیروی محوری دکل با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بیشینه افزایش در خاک نوع ۴ و در تراز پایه دکل می‌باشد. مقایسه نتایج جابجایی در حالت اندرکنش خاک–سازه و تحریک ناهمسان نشان دهنده بحرانی‌تر بودن حالت اندرکنش خاک و سازه است. در تحریک ناهمسان بیشینه جابجایی‌ها در تراز پایه دکل و در اندرکنش خاک و سازه در تراز راس دکل است. بیشینه نیروی محوری دکل در حالت اندرکنش خاک–سازه بیشتر از تحریک ناهمسان است. اگر چه بیشینه نیروی محوری در راس دکل در حالت تحریک ناهمسان بیشتر است. لنگر مثبت عرشه در دهانه میانی برای اندرکنش خاک–سازه و تحریک ناهمسان تقریبا یکسان ولی در دهانه‌های کناری اندرکنش خاک و سازه بیشینه است.

با توجه به تفاوت‌های قابل ملاحظه در حالت‌های مختلف خاک و اثر تحریک ناهمسان لازم است به منظور دستیابی به یک طرح مناسب در تحلیل سازه‌های طویل مانند پل‌های کابلی دهانه بلند، تخمین دقیقی از سرعت انتشار موج در خاک محل سازه و همچنین جنس خاک محل سازه مورد نیاز است. با وجود سخت‌افزار و نرم‌افزار لازم و در دسترس، لزوم استفاده از روش‌های حرفه‌ای جهت ارزیابی‌های پیشرفته و با جزییات در طراحی این چنین سازه‌های بزرگی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به اثر اندرکنش خاک و سازه در مورد پی پل، جانمایی محل پایه‌های پل باید به صورتی باشد که این اثر حداقل شود. این امر در پل‌های رودخانه‌ای که شرایط خاک اطراف متراکمتر از شرایط خاک وسط رودخانه (قسمت‌های آبرفتی) است با در نظر گرفتن محل پایه‌ها در خاک‌های متراکم‌تر کنار رودخانه‌ها به جای در نظر گرفتن پایه در خاک سست بستر رودخانه‌ها امکان‌پذیر است.

REFERENCE

[1] Y.H. Zhang, Q.S. Li, J.H. Lin and F.W. Williams, "Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 29, no 4, pp.620-629, 2009.

[2] R. S. Harichandran, "Spatial variation of earthquake ground motion, what is it, how do we model it, and what are its engineering implications," Department of Civil and Enviromental Engineering, Michigan State Univ, East Lansing, Mich, USA, 1999.

[3] M. Shinozuka, V. Saxena, and G. Deodatis, "Effect of spatial variation of ground motion on highway structures," 2000.

[4] P. Komodromos, "Simulation of the earthquake-induced pounding of seismically isolated buildings," Computers & Structures, vol. 86, no. 7-8, pp.618-626, 2008.

[5] P.C. Polycarpou, and P. Komodromos, "Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures," Engineering Structures, vol. 32, no. 7, pp.1937-1951, 2010.

[6] G. Jia, and Z. Shi, "A new seismic isolation system and its feasibility study," Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol. 9, no. 1, pp.75-82, 2010.

[7] O. E. Ozbulut, M. Bitaraf, and S. Hurlebaus, "Adaptive control of base-isolated structures against near-field earthquakes using variable friction dampers," Engineering Structures, vol. 33, no. 12, 3143-3154, 2011.

[8] L.Y. Lu, G.L. Lin, and M.H. Shih, "An experimental study on a generalized Maxwell model for nonlinear viscoelastic dampers used in seismic isolation," Engineering Structures, vol. 34, pp.111-123, 2012.

[9] M. Garevski, I. Gjorgiev, K. Edip, V. Sesov and J. Cvetanovska, "Effects of soil medium on response of base isolated multistory frame structures," In 15th World conference on earthquake engineering, 2012, pp. 24-28.

[10] S. Mahmoud, P.E. Austrell and R. Jankowski, "Simulation of the response of base-isolated buildings under earthquake excitations considering

soil flexibility," Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol. 11, pp.359-374, 2012.
[11] C.S. Tsai and H.C. Su, Investigation of Soil-"Structure Interaction and Higher-Mode Effects on Dynamic Response of Base-Isolated Structure Founded on Half Space," In Pressure Vessels and Piping Conference, 2013, vol. 55744, p. V008T08A009.
[12] A.M. Abdel-Ghaffar and L.I. Rubin, "Suspension bridge response to multiple-support excitations," Journal of the engineering mechanics division, vol. 108, no. 2, pp.419-435, 1982.
[13] A. Zerva, "Response of multi-span beams to spatially incoherent seismic ground motions," Earthquake engineering & structural dynamics, vol. 19, no. 6, pp.819-832, 1990.
[14] A. Zerva, "Effect of spatial variability and propagation of seismic ground motions on the response of multiply supported structures," Probabilistic engineering mechanics, vol. 6, no. 3-4, pp.212-221, 1991.
[15] R.S. Harichandran, A. Hawwari and B.N. Sweidan, "Response of long-span bridges to spatially varying ground motion," Journal of Structural Engineering, vol. 122, no.5, pp.476-484, 1996.
[16] Z. Zembaty and A. Rutenberg, "On the sensitivity of bridge seismic response with local soil amplification," Earthquake engineering & structural dynamics, vol. 27, no. 10, pp.1095-1099, 1998.
[17] S.M. Allam and T.K. Datta, "Seismic behaviour of cable-stayed bridges under multi-component random ground motion," Engineering Structures, vol. 21, no. 1, pp.62-74, 1999.
[18] A.A. Dumanogluid and K.U. Soyluk, "A stochastic analysis of long span structures subjected to spatially varying ground motions including the site-response effect," Engineering Structures, vol. 25, no. 10, pp.1301-1310, 2003.
[19] C.Y. Yang and M.M. Cheung, "Shake table test of cable-stayed bridge subjected to non-uniform excitation," Procedia Engineering, vol. 14, pp. 931-938, 2011.
[20] M.A. Garevski, J.M.W. Brownjohn, A. Blakeborough and R.T. Severn, "Resonance-search tests on a small-scale model of a cable-stayed bridge," Engineering Structures, vol. 13, no. 1, pp. 59-66, 1991.
[21] M.M. Allam, "Multiple support excitations of open-plane frames by a filtered white noise and soil–structure interaction," Journal of Sound and Vibration, vol. 329, no. 20, pp.4212-4226, 2010.
[22] K. Soyluk and E.A. Sicacik, "Soil–structure interaction analysis of cable-stayed bridges for spatially varying ground motion components," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 35, pp. 80-90, 2012.
[23] Y. Aoki, H. Valipour, B. Samali and A. Saleh, "A study on potential progressive collapse responses of cable-stayed bridges," Advances in Structural Engineering, vol. 16, no. 4, pp. 689-706, 2013.
[24] K. Lee, S. Kim, J. Choi and Y. Kang, "Ultimate behavior of cable stayed bridges under construction: Experimental and analytical study," International Journal of Steel Structures, vol. 15, pp. 311-318, 2015.
[25] T. Isakovic and M. Fischinger, "Seismic Analysis and Design of Bridges with an Emphasis to Eurocode Standards," Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, vol. 1, pp.195-225, 2014.
[26] H. Wang, J. Li, T. Tao, C. Wang and A. Li, "Influence of apparent wave velocity on seismic performance of a super-long-span triple-tower suspension bridge," Advances in mechanical engineering, vol. 7, no. 6, p.1687814015589464, 2015.
[27] H. Hao, "Effects of spatial variation of ground motions on large multiple supported structures," University of California, Berkeley, USA, 1989.