Journal of Structural and Construction Engineering, 8(9), 2021, pp. 254-276

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

The response of bridges shear key located on cohesionless soils under earthquakes with different frequency content

Hadi Dashti[1], Afshin Hefzi[1], Alireza Fiouz [2]

1- Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran
2- School of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

ABSTRACT

Bridges, as one of the most important structures, play a prominent role in the development of each country as vital vessels. In recent decades, several studies have been conducted on the seismic behavior of bridges under different earthquakes, in which the shear keys were considered as fuse-like elements to prevent collapsing of the deck on the substructure. However, an important issue that has not been addressed in these studies is the effect of site behavior on the stress response in the shear keys that is, the analysis at the earthquakes of varying frequency content is realistic and in three-dimensional terms and with the effect of soil, due to the impacts of the shear keys on the girder. In the present study, after validating a three-dimensional bridge with a valid research, and considering conditions close to reality with three-dimensional numerical modeling in ABAQUS finite element software, the response behavior in bridges and shear keys is evaluated by considering different frequency content earthquakes under conditions with and without considering soil-structure interaction.The results of this study show that the acceleration decrease in bridge structure with respect to soil-structure interaction in cohesionless soils. This rate is different for with different frequency content. Also taking into account the effects of soil-structure interaction in far field earthquakes, we see a greater reduction in stress values in shear keys than some earthquakes and structures located on bed rock. In other words, not assuming soil-structure interaction in the seismic analysis of bridges will lead to unrealistic results.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 May 2020
Revise Date: 08 October 2020
Accept Date: 16 October 2020

Keywords:
Shear Keys
Bridges
Frequency content
Numerical
Soil-Structural Interaction
Cohesionless soil

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.229461.2134

*Corresponding author: Hadi Dashti
Email address: hdashti1356@yahoo.com

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

پاسخ برشگیر پل‌های واقع بر خاک‌های غیرچسبنده تحت اثر زلزله‌های با محتوای فرکانسی متفاوت

افشین حفظی [۱]، هادی دشتی [۱*]، علیرضا فیوض [۲]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر، ایران

چکیده

پل‌ها به عنوان یکی از سازه‌های مهم نقش بارزی را در آبادانی به عنوان شاهرگ‌های حیاتی هر کشور بر عهده دارد. در چند دهه اخیر مطالعات متعددی در زمینه رفتار لرزه‌ای پل‌ها تحت زلزله‌های مختلف صورت گرفته است که در آن‌ها برشگیرها را به عنوان عناصر فیوز مانند جهت جلوگیری از دررفتگی عرشه پل از روی زیر سازه در نظر می‌گرفتند. اما موضوع مهمی که در این مطالعات به آن توجه چندانی نشده است، تأثیر رفتار ساخت گاه بر پاسخ تنش‌های ایجادشده در برشگیرها تحت اثر برخورد شاه‌تیرها به برشگیرها در زمان وقوع زلزله‌های با محتوای فرکانسی متفاوت به‌صورت واقع‌بینانه و در شرایط سه‌بعدی می‌باشد. در مطالعه حاضر پس از اعتبار سنجی مدل‌سازی یک پل به‌صورت سه‌بعدی با یک پژوهش معتبر، و در نظر گرفتن شرایط نزدیک به واقعیت با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، رفتارسنجی پاسخ‌ها در پل و برشگیرها به‌صورت جداگانه تحت اثر زلزله‌های با محتوای فرکانسی متفاوت در شرایط بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه و با در نظر گرفتن آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده کاهش شتاب در سازه پل در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه در خاک‌های غیرچسبنده می‌باشد. این میزان کاهش برای زلزله‌های با تاریخچه زمانی مختلف، متفاوت می‌باشد. مشاهده می‌گردد، با در نظر گرفتن اثرات خاک در برخی زلزله‌ها حوزه بیشتری در مقادیر تنش‌ها در برشگیر پل‌ها نسبت به زلزله‌های دیگر و سازه واقع بر بستر سنگی مشاهده شده است. به عبارتی عدم فرض اندرکنش خاک-سازه در تحلیل لرزه‌ای پل‌ها سبب ارائه نتایج غیرواقع‌بینانه و از اعتبار کمی برخوردار خواهد شد. لذا فرض لحاظ نمودن اندرکنش خاک-سازه به اقتصادی شدن طرح پل ها در برخی تحلیل های لرزه ای کمک شایانی خواهد نمود.

کلمات کلیدی: برشگیر پل‌ها، محتوای فرکانسی، عددی، اندرکنش خاک- سازه،خاک غیرچسبنده

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.229461.2134	doi:
۱۳۹۹/۰۲/۱۳	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۳۹۹/۰۷/۲۵	۱۳۹۹/۰۷/۲۵	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	10.22065/jsce.2020.229461.2134	

*نویسنده مسئول: هادی دشتی

پست الکترونیکی: hdashti1356@yahoo.com

۱- مقدمه

پل‌ها از سال‌های دور، به عنوان یکی از سازه‌های بسیار مهم و جزء عناصر بسیار شاخص در زیرساخت، آبادانی و شاهرگ حیاتی هر کشور شناخته‌شده است که خرابی آن‌ها در زمین‌لرزه‌ها، منجر به قطع سرویس‌دهی راه‌ها و مسیرهای مواصلاتی می‌گردد و به هنگام زمین‌لرزه، در دسترسی به نقاط زلزله‌زده و عملیات امداد و نجات نقش عمده‌ای را ایفا می‌کنند. با توجه به اینکه کشورمان جزء کشورهای زلزله‌خیز به شمار می‌آید، لزوم بررسی تأثیر برشگیرها بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها با دیدگاهی بسیار نزدیک به رفتار واقعی سازه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

اندرکنش خاک محل ساخت گاه و سازه پل نیز می‌تواند پاسخ‌های لرزه‌ای آن را تحت تأثیر قرارداد، عامل شکل‌پذیری خاک علاوه بر تغییر خصوصیات حرکت آزاد زمین در سطح، ممکن است به علت اندرکنش سازه تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در واکنش سازه در مقابل زلزله نیز ایجاد نماید. که می‌توان به تغییرات زمان تناوب به دلیل حرکت گهواره‌ای، تغییر مکان‌های جانبی، میرایی و برش پایه اشاره نمود. در یک دید کلی می‌توان گفت که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه باعث می‌شود تا رفتار سازه به رفتار واقعی‌اش نزدیک‌تر شود و اثر اندرکنش در محاسبات یا به اقتصادی‌تر شدن طرح کمک کرده و یا ضریب اطمینان آن را افزایش می‌دهد.

بررسی اثرات اندرکنش خاک در رفتار پل‌ها توسط محققان مختلفی از زوایای گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته است[۱-۱۲]. صالحی[۱]، روشی را برای محاسبه سختی دینامیکی کوله‌های پل‌ها ارائه کرد و اهمیت تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی پارامترهای دینامیکی پل‌های پس کشیده جعبه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. تأثیر انعطاف‌پذیری خاک بر روی شکل‌پذیری پایه‌های پل نیز از دیگر بخش‌هایی بود که در این مطالعه به آن پرداخته شد. نتایج مطالعه پارامتریک بر روی یک کوله نشیمن دار با ابعاد ثابت نشان دادند که ضرایب سختی و میرایی کوله به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای وابسته به شرایط خاک زیر پی‌ها و پشت دیوار کوله بود و ضمن آن‌که فرکانس تحریک نقش مهمی در مقادیر این پارامترها به‌خصوص میرایی سیستم کوله داشتند. واثقی و رستمیان [۲]، به بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده از برشگیر فولادی جاری شونده جهت بهبود رفتار لرزه‌ای پل‌ها پرداختند. در این طرح برشگیرهای فولادی جاری شونده با قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی زیاد جایگزین بلوک‌های برشی متداول در پل‌ها می‌گردند. در هنگام زلزله نیروی اینرسی تابلیه در داخل این برشگیرها مستهلک می‌شود و درنتیجه بارهای لرزه‌ای وارد بر زیرسازه پل به‌شدت کاهش می‌یابد. یحیی‌نسب[۳]، اندرکنش خاک- سازه در پل‌های یکپارچه را مورد بررسی قرار داد. هدف از این تحقیق ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی پل‌های یکپارچه می‌باشد تا علاوه بر مدل‌سازی پل‌های یکپارچه به‌صورت سه‌بعدی بتوان روش ساده‌تری برای مدل‌سازی این‌گونه پل‌ها ارائه کرد. در روش جدید ارائه‌شده به‌جای مدل‌سازی شمع‌ها و خاک اطراف شمع‌ها از فنرهای معادل شمع‌ها استفاده شد. در تحقیقی کالیستو و همکاران[۴]، به بررسی تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای پل مسینا پرداختند و نتایج نشان‌دهنده آن بود که با لحاظ نمودن خاک به‌جای بستر صلب، تغییرات مکانی دائمی تحت بارهای لرزه‌ای در پل ایجاد گردید که لزوم پیش‌بینی آن در محاسبات و تغییر روند پاسخ‌ها و تغییر در مقادیر نیروهای طراحی را نشان می‌دهد. محتشمی و شوشتری [۵]، پاسخ لرزه‌ای پل‌های یکپارچه را در حالت اندرکنش با خاک ساخت گاه و بدون اندرکنش مورد بررسی قرار دادند و نتایج عددی نشان داد که وارد کردن اندرکنش در محاسبات تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ تغییر مکانی سازه و کاهش برش پایه کل داشته و به‌منظور به دست آوردن برآورد واقعی از پاسخ لرزه‌ای پل‌های یکپارچه توصیه گردید که اثر اندرکنش خاک و سازه به‌دقت مدل‌سازی شده و در فرآیند تحلیل لرزه‌ای وارد گردد. در مطالعه‌ای شیرگیر و همکاران [۶]، به بررسی آثار اندرکنش خاک - سازه در رفتار دینامیکی پل‌های تک‌پایه پرداختند. به این منظور مدل تحلیلی جدیدی با الهام از پل‌های تک‌پایه همانند پل صدر که بر روی گروه شمع واقع شدند، ارائه گردید. با استفاده از روش‌های تحلیلی، آثار اندرکنش خاک- سازه در این نوع پل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک رابطه تحلیلی از مدل ارائه‌شده استخراج شد که به پیش‌بینی فرکانس ارتعاش آزاد یک پل تک‌پایه با دقت مناسبی می‌پردازد. نتایج حاصل از تحلیل اندرکنش خاک- پایه پل واقع بر گروه شمع حاکی از آن است که این پدیده موجب افزایش پریود ارتعاش سازه می‌گردد و با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع اثرات اندرکنش کاهش می‌یابد. محمدزاده[۷]، به تجزیه و تحلیل اندرکنش پی- خاک

و سازه در رفتار لرزه‌ای پل‌ها به روش المان محدود پرداخت. بررسی اثرات اندرکنش در یک مدل واقعی، پل کابلی تبریز به عنوان مدل اصلی این تحقیق انجام گردید و تمامی ویژگی‌های خاک و اجزای سازه طبق واقعیت محاسبه و اعمال گردید. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، جابجایی‌ها افزایش چشم‌گیری می‌یابند و عدم در نظر گرفتن این موضوع می‌تواند موجب بروز مشکلات جدی تا حد تخریب سازه در برابر زلزله طرح گردد.

در مطالعه‌ای ویلسون و تن [۸]، مدلی برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی با کوله‌های واقع بر خاک‌ریز را مورد بررسی قرار دادند و به نتایج بسیار مشابهی با تحلیل‌های پیچیده و دقیق و نیز تحلیل اجزا محدود برای سیستم خاک و کوله دست یافتند. در پژوهشی اسپیراکوس و ولاسیس [۹]، اثر اندرکنش خاک- سازه در پاسخ پایه‌های پل با جداساز لرزه‌ای را ارزیابی نمودند و روشی ساده برای ملاحظه‌ی این اثر در طراحی اولیه پل ارائه دادند. همچنین، راه‌هایی به‌منظور به‌کارگیری مزیت‌های اندرکنش خاک - سازه برای ارتقاء سطح ایمنی و کاهش هزینه‌های طراحی پیشنهاد نمودند. از آنجایی که بسته شدن درزهای انقطاع و ایجاد ضربه در پل‌ها متأثر از جابجایی کلی عرشه در هر یک از قاب‌ها می‌باشد، درنتیجه، ملاحظه‌ی این اثر در تحلیل‌های دینامیک می‌تواند نتایج دقیق‌تری برای مطالعه پدیده‌ی ضربه ارائه نماید. صادق وزیری و همکاران [۱۰]، به بررسی اثرات خاک زیر فونداسیون بر پاسخ لرزه‌ای سازه پل‌ها پرداختند و نتایج نشان‌دهنده آن بود که اندرکنش خاک و سازه تقاضای چرخش پلاستیک را متأثر نموده و به‌طور قابل‌توجهی پاسخ طولی پل را تحت تأثیر قرار داده که این اثر در کوله‌ها به نسبت ستون‌ها بیشتر می‌باشد. در پژوهشی دزی و همکاران [۱۱]، مطالعه رفتار لرزه‌ای پای پل‌های شمع‌دار با در نظرگیری اندرکنش خاک سازه را مدنظر قرار دادند . برای بررسی اندرکنش نوع خاک و شکل هندسی مقطع را مرحله به مرحله تغییر داده و با مقایسه پاسخ‌های به‌دست‌آمده از پایه پل قرار گرفته بر خاک صلب اثر خاک بر پایه پل را لحاظ نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در نظرگیری اندرکنش خاک سازه برای پایه‌های چاق و پایه‌های قرار گرفته بر خاک نرم الزامی است. دریر [۱۲]، تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی رفتار سازه‌ای ستون‌های پل‌های یکپارچه را بررسی نمود و نتیجه گرفت ستون بلند حساسیت کمتری به جابجایی تحمیلی نسبت به ستون کوتاه دارد.

به هنگام وقوع زمین‌لرزه عناصر اصلی سازه (عرشه، شاه‌تیر) تحت اثر حرکت زمین دچار جابجایی‌های جانبی و جانبی– پیچشی در عرشه و تغییر مکان جانبی در شاه‌تیرها می‌گردد که در طول ماکزیمم زلزله طرح امکان صدمه به اعضای اصلی سازه و احتمال دررفتگی شاه‌تیرها را افزایش می‌دهد. در پل‌های با تکیه‌گاه‌های نئوپرین معمولاً برشگیرها در کوله و سرستون جهت جلوگیری از جابجایی جانبی بیش از حد موردنظر طراحی اعضای اصلی سازه، دررفتگی شاه‌تیرها از روی نئوپرن‌ها و انتقال نیروی اینرسی به عناصر زیر سازه و استهلاک انرژی زلزله با رفتار غیرخطی خود به هنگام زمین‌لرزه‌ها طراحی می‌شوند، همچنین تحت اثر زمین‌لرزه نیروهای ضربه‌ای و کوبشی میان اعضای روبنای سازه و برشگیرها به دلیل پاسخ عرضی شاه‌تیرها و جانبی – پیچشی عرشه به وقوع می‌پیوندد و این نیروهای ضربه‌ای می‌تواند پاسخ لرزه‌ای پل و نیروهای داخلی پایه را متأثر نماید.

تحقیقات کمی در خصوص اثر برشگیر پل‌ها تحت اثرات بارهای دینامیکی پرداخته‌شده است[۱۳-۱۷]. مگالی و همکاران [۱۳]، در تحقیقی با انجام آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس مدل غیرخطی برای برشگیرهای داخلی و خارجی موجود بر روی کوله‌ها را ارزیابی کردند. نتایج به‌دست‌آمده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای برای ارزیابی ظرفیت و عملکرد برشگیرها پس از وقوع بارهای چرخه‌ای مؤثر واقع شدند. بزرگ‌زاده و همکاران [۱۴]، آرایش آرماتورهای طولی و عرضی برشگیر خارجی کوله را مورد بررسی قراردادند. نتایج به‌دست‌آمده برای ارزیابی ظرفیت و عملکرد الاستیک برشگیرها مؤثر واقع شدند. ژوئل و چوپر [۱۵]، با مدل کردن پل در سه حالت برشگیر با رفتار خطی، برشگیر با رفتار غیرخطی و بدون برشگیر، تأثیر برشگیر بر رفتار لرزه‌ای پل واقع بر گسل را مورد بررسی قراردادند. نتایج بیانگر آن بود که پاسخ لرزه‌ای پل با برشگیرهای غیرخطی می‌تواند با پاسخ لرزه‌ای پل با برشگیرهای خطی و حالت بدون برشگیر تقریب زده شود. با این حال نادیده گرفتن برشگیرها، ارزیابی‌های محافظه‌کارانه‌ای از پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌های در معرض تحرکات یکنواخت زمین خواهد داشت. سالوسن و فییل [۱۶]، اثر برشگیر با رفتارهای خطی و غیرخطی بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل خطی به‌طور شگفت‌انگیزی

مشابه حالت غیرخطی ولی محافظه‌کارانه‌تر از رفتار غیرخطی بود. در تحقیقی بی و هائو [۱۷]، مدل کردن برشگیر پل‌ها تحت بارهای لرزه‌ای تأثیر برشگیرها در رفتار لرزه‌ای پل‌ها را مورد بررسی قرار دادند و نتایج بیانگر آن بود که برشگیرها پاسخ پیچشی- جانبی پل را کاهش داده و این امر باعث اعمال نیروهای ضربه‌ای کوچک‌تر و خسارت کم‌تر به سازه پل می‌گردد. همچنین برشگیرها احتمال دررفتگی شاه‌تیرها از روی نئوپرن را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و عدم لحاظ نمودن برشگیرها در تحلیل و طراحی، باعث نتایج نادرست از پاسخ پل به تحریکات لرزه‌ای می‌گردد. یانگ وهمکاران [۱۸]، به بررسی اندرکنش ضربه گیرهای لاستیکی و برشگیرهای فلزی بصورت تجربی و عددی پرداخته اند و ملاحظه نمودند ضربات بین برشگیر و بالشتک پاسخ های لرزه ای فرکانس بالا را افزایش می دهد. برخی محققان تأثیر برشگیرها و تکیه گاههای لاستیکی در پل ها را بصورت موردی، بررسی و اهمیت آنها را در کنترل و کاهش زلزله های بزرگ نشان داده اند[۱۹] .در برخی منابع نیز پارامترهای موثر بر رفتار برشگیر بصورت تجربی و تحلیلی مقایسه و صحت عملکرد مدلهای تحلیلی برای پیش بینی پاسخ برشگیرها مورد تأیید قرار گرفته است[۲۰].

موضوع مهم دیگر اثرات محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار پل‌ها می‌باشد که توسط پژوهشگران مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است[۲۱-۲۴]. از طرفی دیگر، مطالعه شتاب‌نگاشت‌ها نشان داده که با افزایش فاصله از منبع تولید امواج، مشخصات امواج لرزها دچار تغییر می‌گردد که بر این اساس زلزله‌ها به دو دسته کلی حوزه نزدیک و حوزه دور تقسیم می‌گردند. مطابق یکی از متداول‌ترین تعاریف، به زلزله‌هایی که فاصله ایستگاه ثبت از تصویر گسل روی سطح زمین کمتر از ۱۵ کیلومتر باشد زلزله‌های حوزه نزدیک اطلاق می‌گردد(البته این مقدار فاصله در منابع مختلف متفاوت می‌باشد). مشخصه اصلی زلزله‌های حوزه نزدیک وجود پالس‌های قوی در رکوردهای سرعت آن‌ها می‌باشد که باعث ورود ناگهانی مقدار زیادی انرژی به سازه و خرابی آن‌ها می‌گردد. همچنین به دلیل فیلتر نشدن فرکانس‌های بالا در زلزله‌های حوزه نزدیک، این زلزله‌ها دارای محتوای فرکانسی بالاتری می‌باشند. از دیگر مشخصات این نوع زلزله ، می‌توان به اثر جهت پذیری و جابجایی ماندگار اشاره کرد که این آثار موجب تشکیل پالس‌هایی در رکوردهای سرعت و جابجایی می‌شوند.در مقابل زلزله‌های حوزه دور دارای توزیع یکنواخت‌تر انرژی در طول مدت زلزله را دارا می‌باشند[۲۱].عباسی و همکاران [۲۲]، اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و زلزله‌های حوزه دور بر سیستم خاک – شمع – سازه را مورد بررسی قراردادند. بر این اساس یک سیستم خاک،گروه شمع و سازه با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی گردید و امکان رفتار غیرخطی برای سازه لحاظ شد.۵ رکورد زلزله حوزه نزدیک و ۵ رکورد زلزله حوزه دور به مدل اعمال شدند.نتایج نشان دادند که با عبور موج زلزله از خاک ، زمان تناوب اصلی خاک در اثر تغییر شکل‌های غیرخطی افزایش می‌یابد.همچنین در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل حرکات پالس – شکل زمین ،یک پالس تغییرمکان در شمع ایجاد می‌شود.درصورتی‌که در زلزله‌های حوزه دور به دلیل توزیع یکنواخت انرژی در طول مدت زلزله،ماهیت پاسخ تغییر مکان شمع متفاوت است. شاه‌محمدی و طباطبایی [۲۳]، در پژوهشی اثر زلزله حوزه دور و نزدیک در پاسخ یک پایه پل در حالت جهت‌گیری پیش‌رونده با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه به کمک نرم‌افزار Opensees مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور یک نمونه پایه پل در محیط‌های خاک نرم و ماسه مدل‌سازی گردید. این مدل‌ها تحت زلزله‌ای در دو ایستگاه حوزه دور و نزدیک مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد، رفتار سازه در حوزه نزدیک و دور زلزله‌ها متفاوت بوده و رفتار خاک و نوع زلزله در محل شکست پایه پل، تأثیرگذار خواهد بود. در مطالعه‌ای حسین‌زاده و پورزینلی [۲۱]، با مدل‌سازی سه پل سه دهانه، با دوره‌های تناوب مختلف، اثر پدیده‌ی ضربه که در محل درز انقطاع بین دو بخش از عرشه و یا عرشه و پایه‌های کناری (کوله) رخ می‌دهد بر پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌ها تحت شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک را بررسی کردند. همچنین، اثر مشخصات دینامیک پل و اندرکنش خاک - سازه بر پدیده‌ی ضربه با محاسبه پارامترهای بیشینه نیروی ضربه و تعداد برخورد موردمطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌سازی اثر ضربه، به علت محدود کردن حرکات عرشه، موجب کاهش بیشینه جابجایی آن می‌گردد. از سوی دیگر، ملاحظه‌ی اثر اندرکنش خاک- سازه، حداکثر موجب افزایش ۴۰ و ۴۵ درصدی به ترتیب در مقادیر بیشینه جابجایی و بیشینه نیروی ضربه در پل‌های موردمطالعه (نسبت به حالت بستر صلب) می‌گردد. همچنین، بررسی پاسخ‌ها از منظر نوع زلزله نشان داد که زلزله‌های حوزه نزدیک موجب ایجاد پاسخ‌های لرزه‌ای بزرگ‌تری نسبت به زلزله‌های حوزه دور در پل‌ها می‌گردند.

شیراوند وهمکاران[۲۴] تأثیر نحوه اعمال زلزله‌های یکنواخت و غیریکنواخت را با توجه به فاصله و طول پل‌ها مورد ارزیابی قرار داده و به تفاوت پاسخ‌ها در این شرایط و تأثیر خاک در این شرایط اشاره می‌نماید. صمدیان و همکاران [۲۵]، اثر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سازه‌ها را موضوع اصلی پژوهش خود قرار دادند. بر این اساس سازه‌های با یک درجه آزادی بر روی خاکی که با طبقه‌بندی چهارگانه زمین در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مطابقت دارد انتخاب و مدل مناسب نیم فضا و المان محدود برای احتساب اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شد. سپس طیف پاسخ سازه با پایه گیردار و با احتساب اندرکنش خاک و سازه در مقابل زلزله‌های طبس، ناغان و السنترو به کمک نرم‌افزار عددی ANSYS محاسبه شد. متعاقباً طیف‌های محاسبه‌شده با همدیگر و با طیف بازتاب آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۲۶]، مقایسه گردید. که بر مبنای محاسبات انجام‌شده می‌توان گفت که لحاظ کردن انعطاف‌پذیری خاک زیر شالوده در پاسخ دینامیکی سازه‌ها تأثیر داشته و این تأثیر، متأثر از نوع خاک و زمان تناوب سازه است.

در تحقیق حاضر، مسأله تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر پاسخ برشگیر پل‌ها با لحاظ انعطاف‌پذیری خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل عددی ساخته‌شده بر اساس مطالعات پیشین در ابتدا مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و درنهایت تأثیر زلزله‌های گوناگون در پاسخ پل و برشگیر پل‌ها با وجود خاک و بدون آن مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-روش تحقیق

۲-۱-مقدمه

برای حل مسائل مختلف در حوزه مهندسی روش‌های مختلفی ازجمله روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی وجود دارد. دراین‌بین، روش‌های عددی بسیار موردتوجه هستند چرا که نسبت به روش‌های تحلیلی جذاب‌تر بوده و اینکه اکثر مسائل پیچیده قابل‌حل با روابط تحلیلی نیستند و همچنین سختی، پرهزینگی و زمان‌بری روش‌های تجربی را ندارند و برای شبیه‌سازی با شرایط واقعی راحت‌تر هستند. مثلاً نیاز به ابزارهای خاصی جهت نگه‌داشتن مدل‌های مورد تست ندارند. روش‌های عددی بر مبنای شبیه‌سازی مسئله موردنظر با معادلات ریاضی حاکم بر مسئله می‌باشند. امروزه اکثر مسائل مهندسی قابل‌حل با روش‌های عددی هستند. این درحالیست که توسعه روش‌های عددی با این دید که در آینده بتوانند جایگزین روش‌های تجربی شوند با شتاب بالایی در حال انجام است.

مهم‌ترین هدف مطالعه حاضر بررسی اثر خاک بر پاسخ برشگیر پل‌ها تحت بارهای لرزه‌ای می‌باشد. برای این منظور متغیرهای مورد بررسی به ترتیب شامل نوع رفتار سازه (با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه)، نوع خاک (سنگ‌بستر، و غیرچسبنده)، نوع زلزله (شماره ۱، شماره ۲ و شماره ۳) می‌باشد. بدین ترتیب تعداد ۶ مدل اجزاء محدود پل مطابق با جدول ۱ با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS [۲۷]شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین مشخصات خاک غیر چسبنده بر اساس مطالعه رابطی مقدم و بازیار [۲۸] با مدول الاستیسیته ۹۵ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و وزن مخصوص ۱/۶۷ کیلونیوتن بر متر مکعب درنظر گرفته شده است. (جدول ۲)

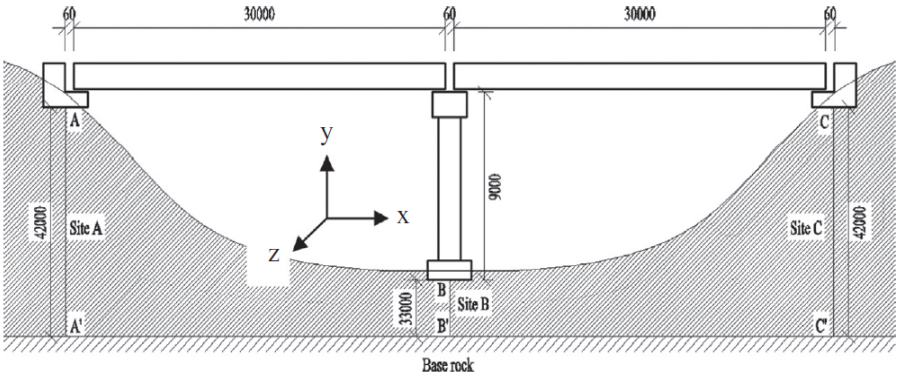
جدول ۱-معرفی حالات و مشخصات مصالح خاک و بتن مورد بررسی

حالت	نوع اندرکنش خاک - سازه	نوع خاک	نوع زلزله
۱	بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه	سنگ‌بستر	شماره ۱
۲			شماره ۲
۳			شماره ۳
۴	با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه	غیر چسبنده	شماره ۱
۵			شماره ۲
۶			شماره ۳

جدول ۲:معرفی حالات و مشخصات مصالح خاک و بتن مورد بررسی

نوع خاک	$\gamma(kg/m^3)$	E(MPa)	ν	C(Pa)	φ
غیرچسبنده [۲۸]	۱۶۷۲	۹۵۰۰۰۰۰۰	۰/۳۰	۰	۳۰
مشخصات بتن					
وزن مخصوص (kg/cm^3)	۲۴۰۰	مدول الاستیسیته (Pa)		۳۵۳۵۵۳۳۹۰۶۰۰	
v		(K_c)		**(e)**	
۰/۰۰۱		۰/۶۶۶		۰/۱۰	
D.Angle		ضریب پوآسون		f_{bo}/f_{co}	
°۳۰/۵		۰/۲۰		۱/۱۶	

مشخصات هندسی و مکانیکی پایه پل‌ها و خاک اطراف آن با توجه به مطالعه بی و هائو [۱۷] در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ مشخصات هندسی مدل مورد بررسی نشان داده شده است.

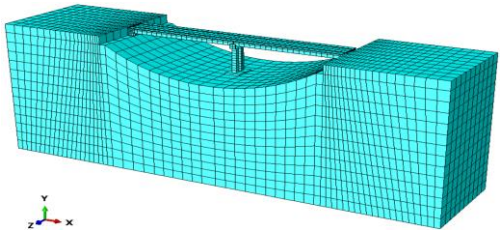


شکل۱-مشخصات هندسی مدل مورد بررسی [۱۷]

در تحلیل اجزای محدود این مطالعه ابتدا مدل‌ها را با المان‌های درشت (تعداد کم المان‌ها) تحلیل کرده و یکی از کمیت‌های خروجی مثلاً مقدار بیشینه تنش ایجادشده در یک نقطه دلخواه از مدل یادداشت می‌شود. سپس المان‌ها ریزتر شده و مسئله مجدداً تحلیل می‌شود. فرایند ریزتر کردن المان‌ها را تا جایی ادامه داده شده است که اختلاف میان نتایج بسیار کم شود. افزایش تعداد اجزاء سبب افزایش زمان آنالیز شده و در هر صورت ابعاد مش باید به گونه ای باشد که مسأله انتقال امواج لرزه ای مقدور باشد.

در مطالعه‌ی حاضر، المان‌های خاک و سازه پل از نوع C3D8R انتخاب شد که المان‌های مکعب مستطیلی هشت گرهی خطی شکننده، با روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته می‌باشند. این المان‌ها، در هر گره سه درجه آزادی در راستاهای سه‌گانه دارند که درمجموع ۲۴ درجه آزادی برای هر المان تعریف می‌شود و از لحاظ کارایی و دقت، دارای کاربرد بوده و مورداطمینان هستند.

برای استفاده از تکنیک ساخت‌یافته، ابتدا می‌باید مدل موردنظر، با استفاده از پارتیشن‌بندی به نواحی ساده‌تری تقسیم‌بندی شود. درمجموع پارتیشن‌بندی مدل‌های مذکور به دو دلیل عمده صورت گرفت. نخست، به‌منظور دستیابی به شبکه‌بندی ساخت‌یافته، که دارای بهترین کیفیت شبکه می‌باشد. علاوه بر این به کمک پارتیشن‌بندی می‌توان کنترل بیشتری بر شبکه‌بندی مدل داشت. به عبارت دیگر، پارتیشن‌بندی این امکان را فراهم می‌آورد که در نقاط حساس مدل، ازجمله نواحی اتصالات سازه‌ای، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شود. در خصوص مش بندی خاک، در حالت کلی، به خاطر انتشار امواج لرزه‌ای در کل محیط خاکی از یک مش‌بندی یکنواخت در مدل‌ها استفاده شد(شکل ۲). مش‌بندی یکنواخت باعث می‌شود که پاسخ بارگذاری لرزه‌ای در کل سطح مدل خاکی یکنواخت باشد و از جابجایی‌های نسبی جزئی به خاطر دقت کم آن جلوگیری می‌کند.

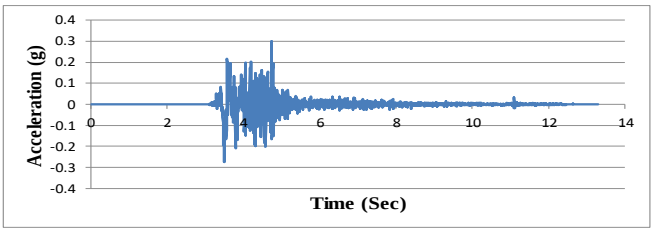


شکل۲- نمایش مش‌بندی یکی از مدل‌های مورد بررسی

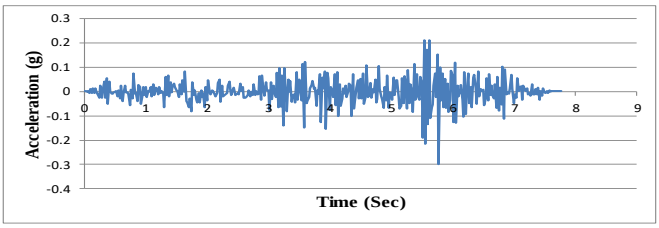
در این بخش مشخصات مصالح، ایجاد مقاطع موردنظر و اختصاص مصالح ایجاد شده به مقاطع موردنظر انجام می‌شود. به عبارتی خواص قطعات ترسیم شده در این قسمت وارد نرم‌افزار می‌شود. این خواص شامل خواص مکانیکی مانند مدول یانگ، چگالی و منحنی تنش- کرنش، خواص حرارتی مانند ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد. رفتار مکانیکی بخش خطی خاک به‌صورت الاستیک و با در نظر گرفتن یک نوع خاک شبیه‌سازی گردید. مشخصات پل و خاک در جدول۳ ارائه‌شده است.

۲-۲- بارگذاری

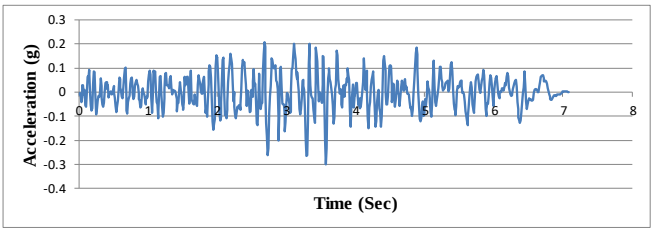
همچنین به‌منظور اعمال موج زلزله از تاریخچه شتاب زلزله‌های شماره ۱ تا ۳ با سه محتوای فرکانسی مختلف استفاده شد و به مدل اجزای محدود موردمطالعه اعمال گردید(شکل ۳).



(الف) زلزله شماره ۱



(ب) زلزله شماره ۲



(ج) زلزله شماره ۳

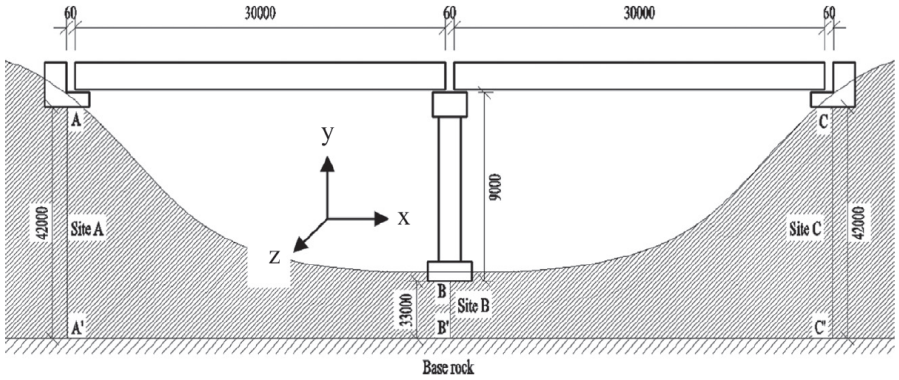
شکل۳- تاریخچه شتاب زلزله های با محتوای فرکانسی متفاوت

الف- زلزله شماره ۱ب-زلزله شماره ۲ج-زلزله شماره ۳

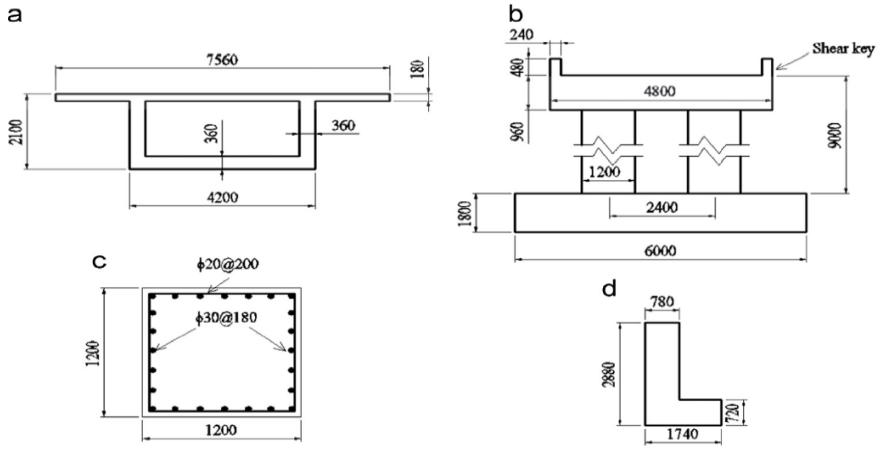
۲-۳- اعتبار سنجی روش اجزاء محدود مورد استفاده

با توجه به اینکه در مطالعه‌ی حاضر از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای به کمک نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده گردیده است، می‌بایست اعتبارسنجی لازم صورت پذیرد. برای اعتبارسنجی، می‌بایست داده‌های حل عددی معتبر را با داده‌های موجود از تست‌های تجربی یا داده‌های حل عددی انجام‌شده مرتبط با موضوع کاری مقایسه کنیم. در صورت تطابق داده‌ها می‌توان ادعا کرد که روش عددی اتخاذ شده مناسب می‌باشد. پس از ارائه‌ی توضیحات لازم پیرامون روش اجزای محدود مورد استفاده در شبیه‌سازی مدل‌های مورد بررسی، در این بخش به بررسی صحت آن پرداخته‌شده است.

در این مطالعه از نتایج تحقیق بی و هائو [۱۷]، به‌منظور اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد به‌کاربرده شده، استفاده گردید. در مطالعه اشاره شده به ارزیابی محاسباتی برشگیر پل تحت بار لرزه‌ای بدون اثر اندرکنش خاک- سازه پرداخته شد. همچنین اجزای پل بکار رفته شده شامل شاه‌تیر، اسکله، کوله‌ها، تکیه‌گاه، برشگیر و میلگردها می‌باشد.



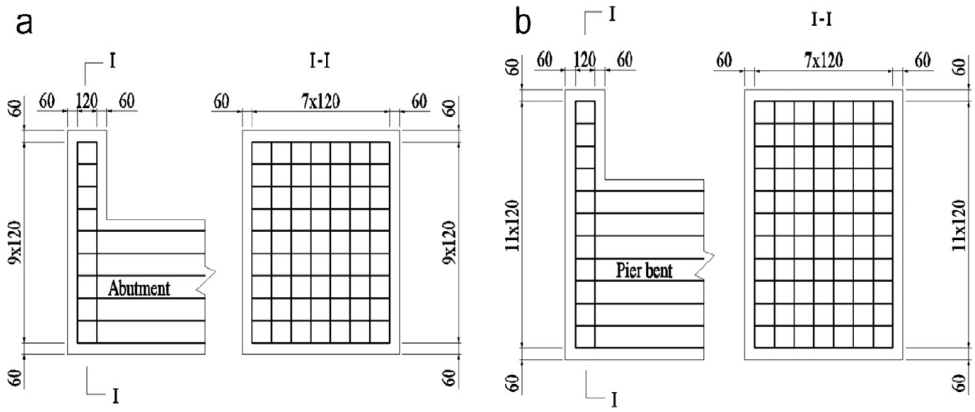
شکل۴شکل هندسی مدل پل مورد بررسی در مطالعه بی و هائو [۱۷]



شکل۵- مقاطع پل (a) مقطع شاه‌تیر، (b) مقطع اسکله مرکزی، (c) مقطع ستون پل (d) مقطع کوله‌ها [۱۷]

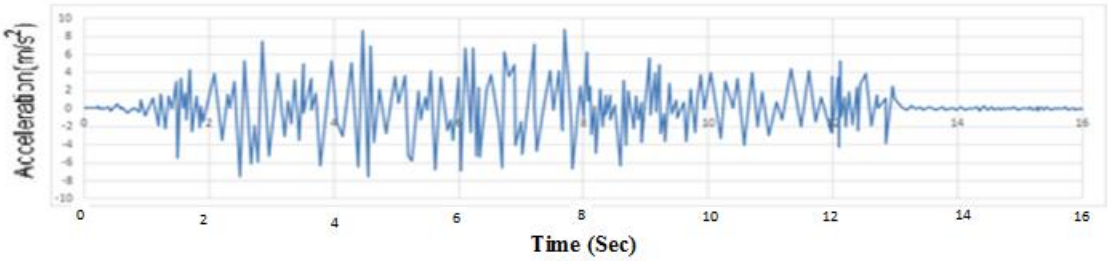
لازم به توضیح است که ارتفاع برشگیرها برابر ۰/۴۸ متر، ضخامت آن برابر ۰/۲۴ متر و عرض آن برابر ۰/۹۶ و ۱/۵۶ متر می‌باشد. قطر میلگردهای بکار رفته ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر با فواصل ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد(شکل ۵). ابعاد مش‌بندی در این مطالعه برابر ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. اعضای سازه‌ای بتن مسلح با استفاده از المان دو گره‌ای الاستیک پلاستیک کامل مدل‌سازی شد. رفتار بتن مسلح از نوع الاستیک خطی بوده و به‌صورت رفتار فشاری و کششی تعریف شده است. سه مدل رفتاری در ABAQUS برای آنالیز بتن تحت‌فشار پیشنهادشده است که عبارتند از مدل ترک پوششی ، مدل ترک‌خوردگی ترد و مدل بتن با حالت پلاستسیته آسیب‌دیده. با توجه خصوصیات بتن در کشش و فشار برپایه آسیب دیدگی همسان مدل بتن با پلاستسیته آسیب‌دیده موردنظر این مطالعه می‌باشد.

در شکل ۶ نحوه‌ی میلگرد گذاری در برشگیرها، کوله‌ها (پایه‌های کناری) و ستون پل و مشخصات مصالح بتن و فولاد در جدول ۳ ارائه‌شده است.



شکل۶ مسلح‌سازی برشگیرها توسط میلگرد (a) کوله‌ها، (b) ستون پل [۱۷]

ساخت گاه پل دره‌ای مطابق شکل ۴ می‌باشد که ارتفاع خاک محل ساخت گاه پل در پایه میانی و نشیمنگاه کوله‌ها به ترتیب ۳۳ متر و ۴۲ متر لحاظ گردید. مطابق فرضیات تحقیق بی و هائو [۱۷]، به دلیل صرف‌نظر از اعمال اندرکنش خاک و سازه،خاک محل ساخت گاه پل، فقط بستر سنگی در زیر پل در نظر گرفته شد که مشخصات سنگ‌بستر مورد بررسی در جدول ۴ ارائه‌شده است. بارگذاری مدل مورد بررسی به‌صورت بار زلزله می‌باشد و بارگذاری از قسمت تحتانی سنگ‌بستر (نیم فضا) در جهت طولی سازه پل به مدل اعمال گردید. مطابق فرضیات تحقیق بی و هائو[۱۷]، از مؤلفه عمودی زلزله صرف‌نظر گردید. زمان اعمال شتاب برابر ۱۶ ثانیه و مقدار PGA برابر ۰/۵ g در نظر گرفته شد(شکل ۷).



شکل۷- زلزله اعمالی در مدل بی و هائو [۱۷] **و مدل اجزای محدود شبیه‌سازی شده**

جدول ۳ مشخصات مصالح پل مورد بررسی در مطالعه بی و هائو [۱۷]

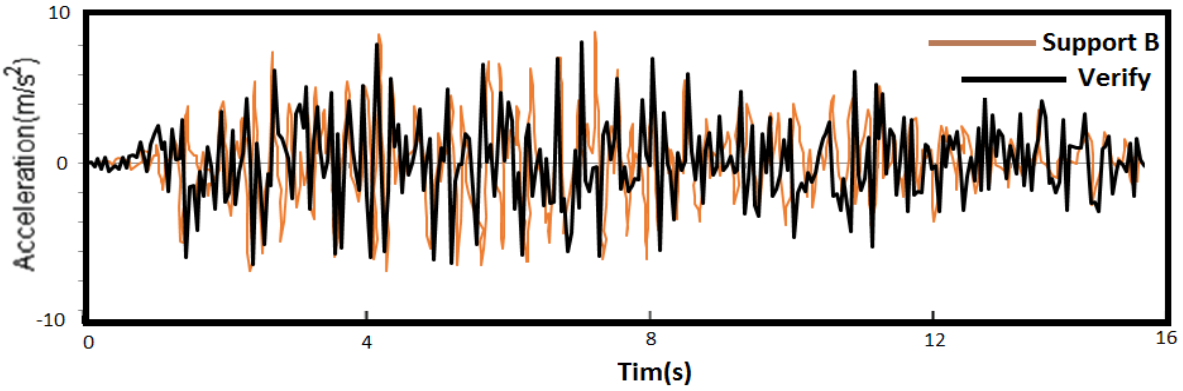
مصالح	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مدول یانگ(مگاپاسکال)	ضریب پواسون
بتن	۲۵۰۰	۵۰	۳۵۳۵۵	۰/۲
فولاد	۷۸۵۰	---	۲۰۰×۱۰۶	۰/۳

جدول۴- معرفی خصوصیات سنگ‌بستر در مطالعه بی و هائو [۱۷]

نوع خاک	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول برشی (مگاپاسکال)	ضریب میرایی	ضریب پواسون
سنگ‌بستر	۳۰۰۰	۱۸۰۰	۰/۰۵	۰/۳۳

پس از شبیه‌سازی اجزای محدود مدل اشاره شده، خروجی به‌دست‌آمده در این مطالعه نمودار شتاب - زمان در پایه میانی پل (support B) می‌باشد،که ارائه می‌گردد.

در نمودار شکل (۸) به مقایسه نتایج حاصل از مطالعه‌ی بی و هائو [۱۷] و مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از روش اجزای محدود بکار رفته در مطالعه‌ی حاضر پرداخته‌شده است. مشاهده می‌شود که روند شتاب‌ها به نحو مناسبی با یکدیگر همراه می‌باشند، ضمن آنکه ماکزیمم مقادیر شتاب در نمودار استخراج شده از نرم‌افزار ABAQUS در پایه میانی پل (support B) نزدیک به ماکزیمم مقادیر متناظر آن در نمودار مطاله بی و هائو [۱۷]می‌باشد بطوریکه بیشترین مقدار آن ۸/۹۱ متر بر مجذور ثانیه و ماکزیمم مقدار شتاب استخراج شده از نرم‌افزار آباکوس جهت اعتبار سنجی ۸/۲۶ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد ،درنتیجه می‌توان بیان نمود که روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده در این مطالعه، از انحراف معیار حدود ۷/۳ درصد برخوردار بوده و دارای دقت مناسبی می‌باشد.



شکل ۸- مقایسه مقادیر شتاب ایجادشده در مدل بی و هائو [۱۷] و مدل اجزای محدود شبیه‌سازی شده

در نمودار شکل (۸) به مقایسه نتایج حاصل از مطالعه‌ی بی و هائو [۱۷] و مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از روش اجزای محدود بکار رفته در مطالعه‌ی حاضر پرداخته‌شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم مقادیر شتاب در نمودار استخراج شده از نرم‌افزار ABAQUS در پایه میانی پل (support B) نزدیک به ماکزیمم مقادیر متناظر آن در نمودار مطاله بی و هائو [۱۷]می‌باشد بطوریکه بیشترین مقدار آن ۸/۹۱ متر بر مجذور ثانیه و ماکزیمم مقدار شتاب استخراج شده از نرم‌افزار آباکوس جهت اعتبار سنجی ۸/۲۶ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد، درنتیجه می‌توان بیان نمود که روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده در این مطالعه، از انحراف معیار حدود ۷/۳ درصد برخوردار بوده و دارای دقت مناسبی می‌باشد.

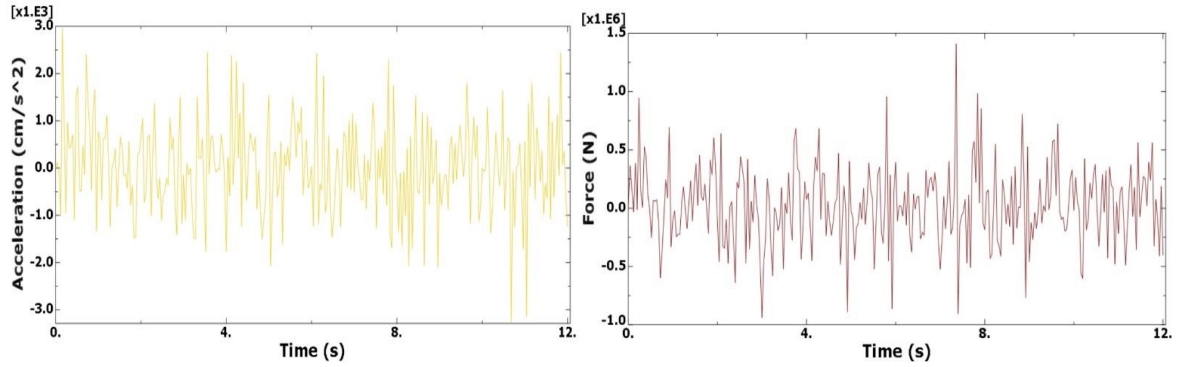
۳- نتایج و بحث

پس از اعتبار سنجی مدل و اطمینان از صحت عملکرد آن در این بخش به آنالیز و بررسی شرایط مختلف حالت‌های شش‌گانه (جدول۱) پرداخته می‌شود. در این بخش نمودارهای برش پایه و شتاب مربوط به پایین ستون میانی پل می‌باشد و اثرات تنش‌های ایجادشده در برشگیر تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با اثر اندرکنش خاک و بدون اثر آن بررسی می‌گردد.

۳-۱- نتایج تحلیل در پل

۳-۱-۱- حالت ۱ (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر، زلزله شماره ۱)

در شکل (۹) ، نمودار تاریخچه‌ی نیروی برش پایه و شتاب برای حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر و زلزله شماره ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده برابر ۱۳۹۰ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجادشده برابر ۳۲ متر بر مجذور ثانیه شده است.

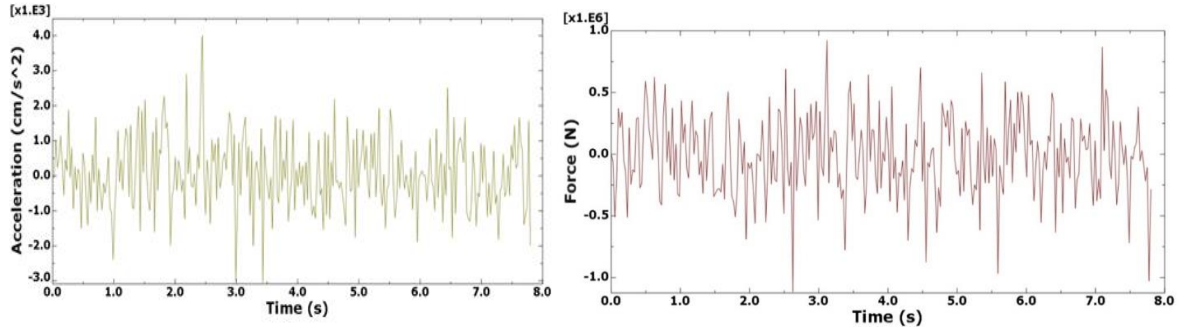


ب الف

شکل ۹- خروجی‌های مربوط به حالت ۱ (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر، زلزله شماره ۱) الف: نمودار نیروی برش پایه ب:نمودار شتاب

۳-۱-۲- حالت۲ (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر، زلزله شماره ۲)

در شکل (۱۰) ، نمودار تاریخچه‌ی نیروی برش پایه و شتاب برای حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر و زلزله شماره ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده برابر ۱۱۲۵ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجادشده برابر ۳۸ متر بر مجذور ثانیه شده است.

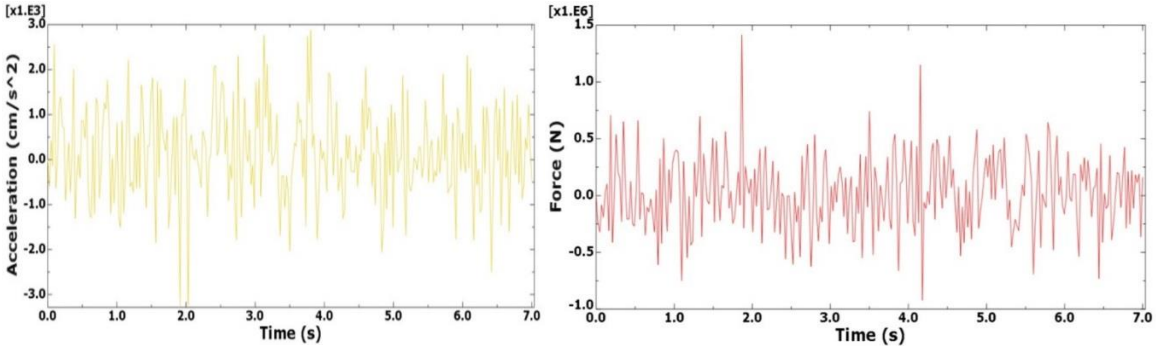


ب الف

شکل ۱۰- خروجی‌های مربوط به حالت ۲ (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر، زلزله شماره ۲) الف: نمودار نیروی برش پایه ب:نمودار شتاب

۳-۱-۳- حالت ۳ (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر، زلزله شماره ۳)

در شکل (۱۱) ، نمودار تاریخچه‌ی نیرو و شتاب برای حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر و زلزله شماره ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده برابر ۱۳۵۵ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجادشده برابر ۳۲/۵ متر بر مجذور ثانیه شده است.

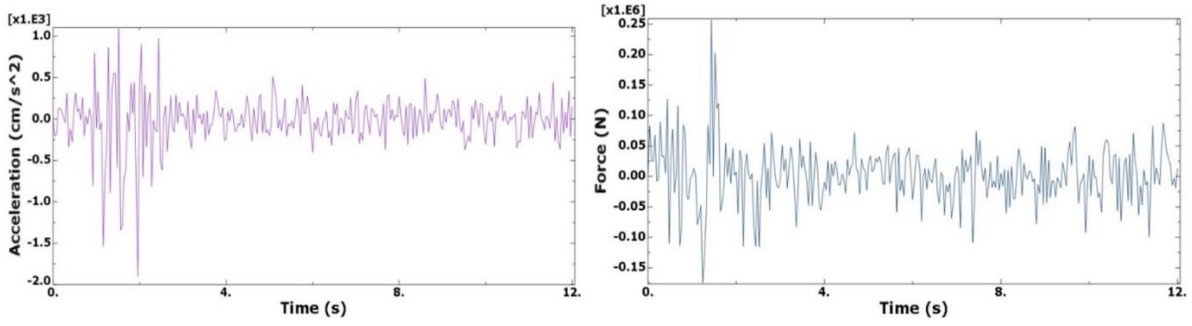


ب الف

شکل۱۱- خروجی‌های مربوط به حالت ۳ (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، سنگ‌بستر، زلزله شماره۳) الف: نمودار نیروی برش پایه ب:نمودار شتاب

۳-۱-۴- حالت ۴ (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده، زلزله شماره ۱)

در شکل (۱۲) ، نمودار تاریخچه‌ی نیرو و شتاب برای حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده و زلزله شماره ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده برابر ۲۶۲/۳ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجادشده برابر ۱۹ متر بر مجذور ثانیه شده است.

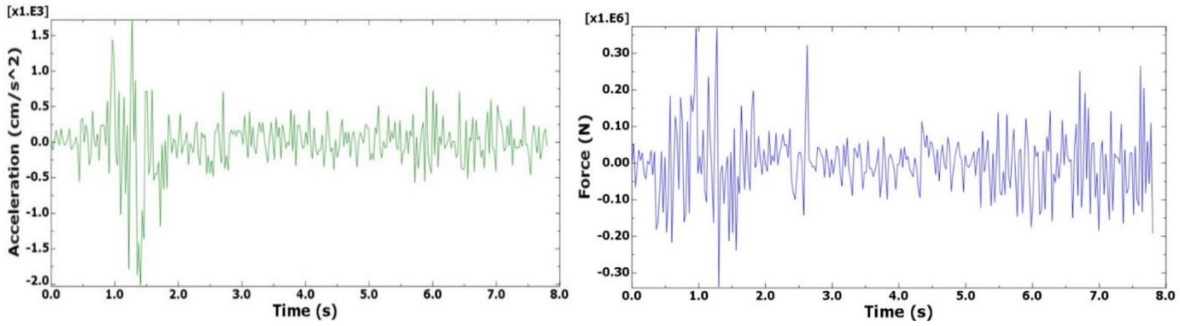


ب الف

شکل ۱۲- خروجی‌های مربوط به حالت ۴ (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده، زلزله بم- حوزه نزدیک) الف: نمودار نیروی برش پایه ب:نمودار شتاب

۳-۱-۵- حالت ۵ (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده، زلزله شماره ۲)

در شکل (۱۳) ، نمودار تاریخچه‌ی نیرو و شتاب برای حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده و زلزله شماره ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده برابر ۳۷۰ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجادشده برابر ۲۰ متر بر مجذور ثانیه شده است.

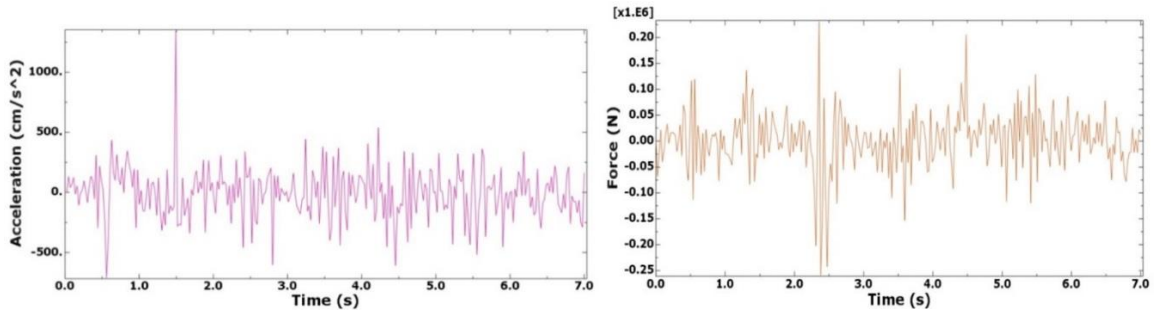


ب الف

شکل۱۳- خروجی‌های مربوط به حالت ۵ (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده، زلزله شماره ۲) الف: نمودار نیروی برش پایه ب:نمودار شتاب

۳-۱-۶- حالت ۶ (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده، زلزله شماره ۳)

در شکل (۱۴) ، نمودار تاریخچه‌ی نیروی برش پایه و شتاب برای حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده و زلزله شماره ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده برابر ۲۵۵ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجادشده برابر ۱۸/۴ متر بر مجذور ثانیه شده است.



ب الف

شکل ۱۴- خروجی‌های مربوط به حالت ۶ (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، خاک غیرچسبنده، زلزله شماره ۳) الف: نمودار نیروی برش پایه ب:نمودار شتاب

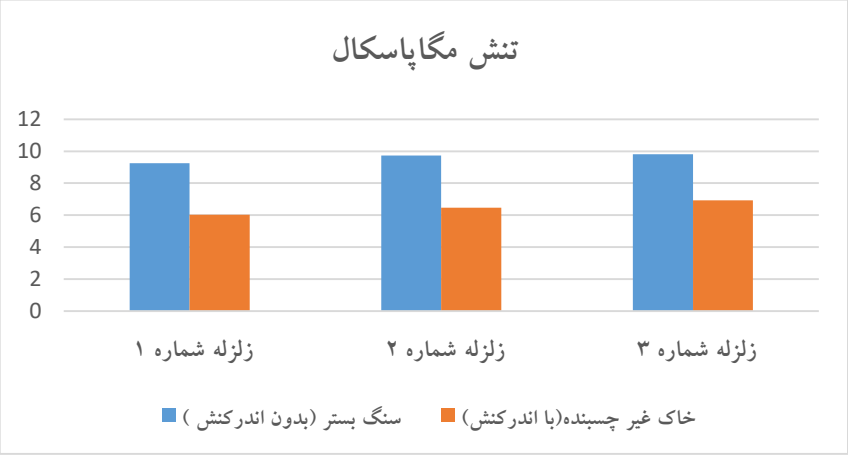
۳-۱-۷- تفسیر نتایج در پل

۳-۱-۷-۱- مقایسه‌ی مقادیر تنش

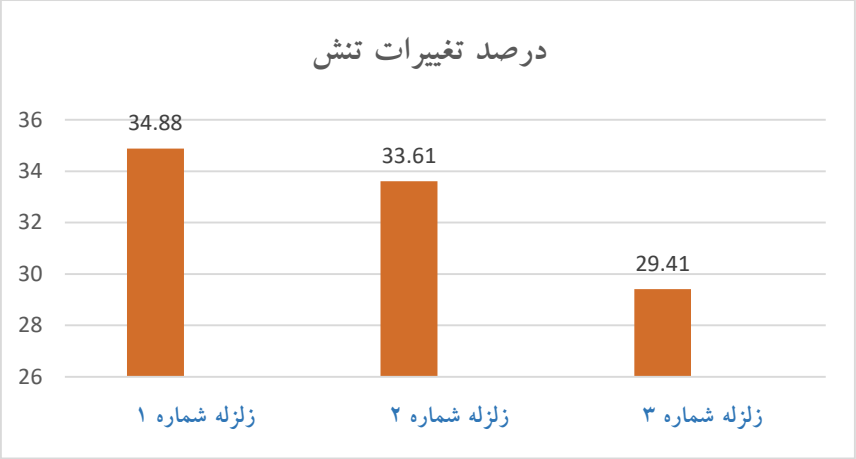
در این بخش به مقایسه‌ی بیشینه مقادیر تنش ایجادشده در مدل پل مورد بررسی با هدف اثرگذاری اندرکنش خاک- سازه بر عملکرد کلی پل برای هر یک از موج زلزله ورودی پرداخته‌شده است. این مقادیر با توجه به توزیع تنش ارائه‌شده در حالت‌های مختلف حاصل شده است.

در نمودار شکل (۱۵) بیشینه تنش ایجادشده در پل برای سه نوع زلزله شماره ۱ تا ۳ ارائه‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه (سنگ‌بستر) میزان تنش‌ها افزایش‌یافته است، این در حالی است که در حالت در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه برای خاک غیرچسبنده این مقدار کاهش‌یافته است. دلیل این موضوع رفتار واقع‌گرایانه سیستم خاک و سازه در اثر اعمال اندرکنش خاک و سازه است که سبب شده است، امواج زلزله در داخل خاک مستهلک شوند و به سازه پل برسد.

از سوی دیگر در نمودار شکل (۱۶) درصد کاهش تنش ایجادشده در پل‌های تحت بار لرزه‌ای سه زلزله که در آن‌ها از خاک غیرچسبنده استفاده شده است نسبت به سنگ‌بستر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در حالت اعمال زلزله شماره ۱مقدار درصد کاهش تنش برای خاک غیرچسبنده نسبت به سنگ‌بستر به ترتیب به میزان ۳۴/۸۸ درصد، در حالت اعمال زلزله شماره ۲ به میزان ۳۳/۶۱ درصد و در حالت اعمال زلزله شماره ۳برابر ۲۹/۴۱ درصد می‌باشد. بنابراین در تمام حالت‌های اعمال زلزله خاک‌های غیرچسبنده میزان درصد کاهش تنش‌ها بیشتر شده است. از مطالب بیان‌شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اعمال اندرکنش خاک و سازه موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و اقتصادی‌تر شدن طرح می‌شود.



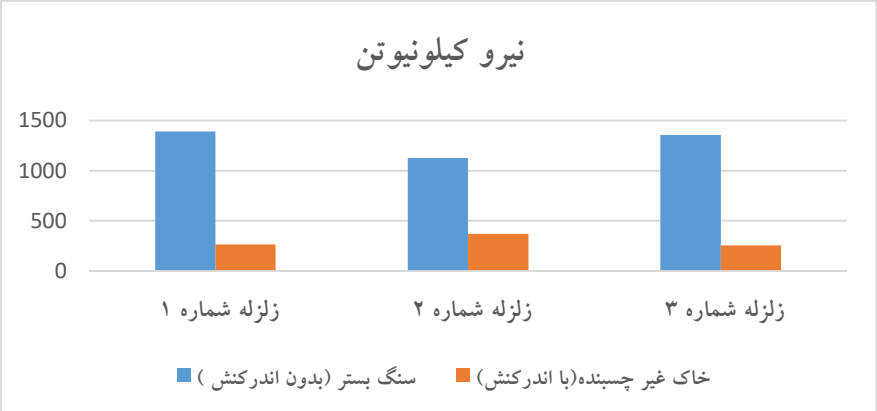
شکل ۱۵-مقایسه بیشینه تنش ایجادشده در پل



شکل ۱۶- درصد تغییرات تنش ایجادشده در پل

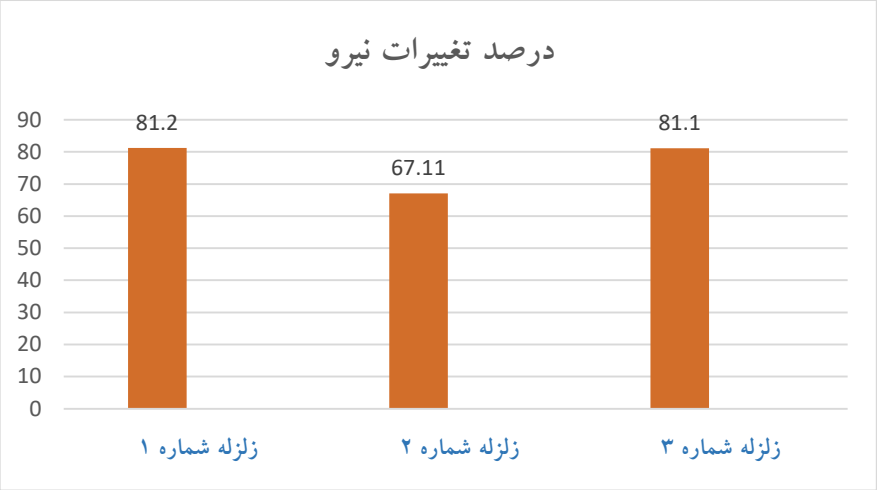
۳-۱-۷-۲- مقایسه‌ی مقادیر نیروی برش پایه

در شکل (۱۷) به مقایسه بیشینه نیروی برش پایه پل به‌منظور بررسی اثر با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه برای خاک‌های سنگ‌بستر و غیرچسبنده پرداخته‌شده است. با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌گردد، که در حالت بدون درنظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه با سنگ‌بستر مقادیر برش پایه در تمامی حالات اعمال زلزله بیشتر شده است از این موضوع می‌توان به این نتیجه دست یافت که هر چقدر بستر صلب‌تر باشد نیروی برش پایه ناشی از بارهای دینامیکی زلزله وارد بر پل‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین سختی بستر پل می‌تواند عملکرد سازه‌ی پل را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۱۷- مقایسه بیشینه نیروی برش پایه ایجادشده در پل

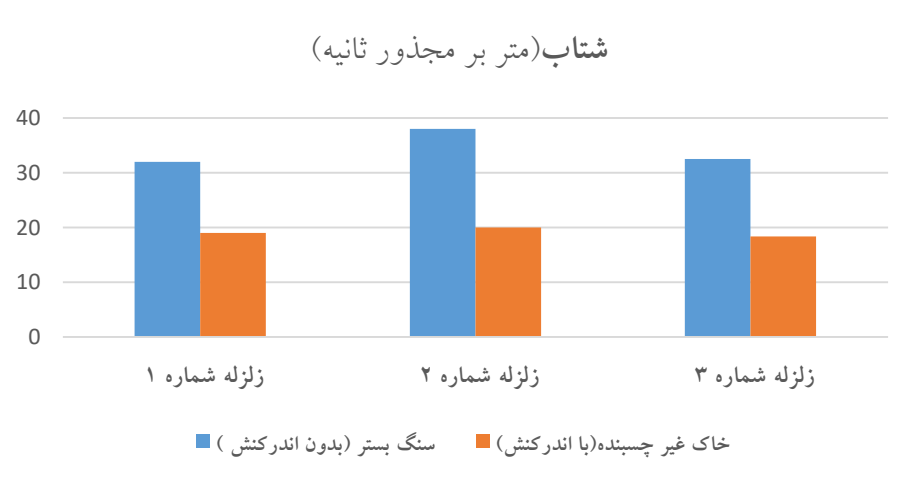
به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثرات نوع خاک بستر و در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه بر سازه‌ی پل، مقادیر تغییرات این پارامتر بر حسب درصد در شکل (۱۸) ارائه‌شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه موجب کاهش نیروی برش پایه در پل تحت نیروی زلزله شده است؛ به‌طوری‌که در کمترین حالت به میزان ۶۷/۱ درصد برای زلزله شماره۲ و در بیشترین حالت به میزان ۸۱/۲ درصد برای حالت زلزله شماره۱، مقدار نیروی برش پایه کاهش‌یافته است.



شکل ۱۸- درصد تغییرات نیروی برش پایه ایجادشده در پل

۳-۱-۷-۳- مقایسه‌ی مقادیر شتاب

در نمودار شکل (۱۹) به مقایسه مقادیر شتاب ایجادشده در پل‌های شبیه‌سازی شده با هدف بررسی اثر با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه برای خاک‌های سنگ‌بستر و غیرچسبنده با شتاب زلزله‌های مختلف پرداخته‌شده است. با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌گردد، در خاک غیرچسبنده مقدار بیشینه شتاب وارده نسبت به سنگ‌بستر کمتر شده است. بطوریکه مقدار شتاب در زلزله‌ی شماره۱، خاک غیرچسبنده ۴۰/۶ درصد ، در زلزله‌ی شماره۲، ۴۷/۴ درصد و در زلزله‌ی شماره۳ خاک غیرچسبنده ۴۳/۴ درصد نسبت به سنگ‌بستر کاهش داشته است. از این موضوع می‌توان به این نتیجه دست یافت هنگامی‌که پل در سنگ‌بستر قرار می‌گیرد متحمل شتاب بیشتری نسبت به خاک‌های غیرچسبنده می‌شود دلیل این موضوع آن است که خاک در اثر زلزله، تحت ارتعاش بیشتری قرار می‌گیرد و خصوصیات و پارامترهای آن دچار تغییر می‌شوند و بدین ترتیب شتاب اعمال شده در سنگ‌بستر بیشتر می‌شود.



شکل ۱۹- مقایسه بیشینه شتاب ایجادشده در پل

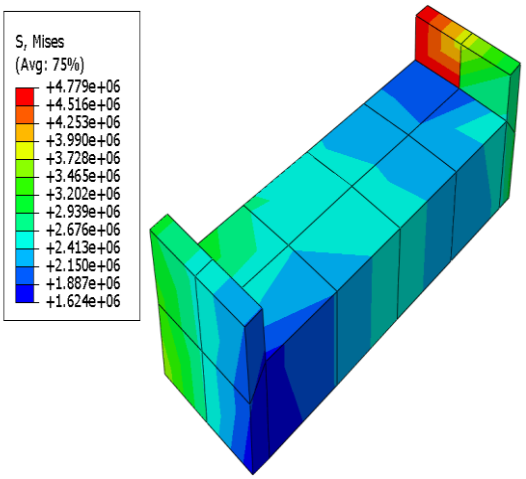
مطالعاتی مشابه در خصوص جابجایی در سیستم پل انجام گرفت و ملاحظه گردید بیشینه جابجای در شرایط با اندرکنش خاک- سازه و در زلزله شماره ۱ اتفاق افتاده است. این موضوع نیز به خوبی تأثیر انعطاف پذیری خاک در جابجایی کل را نشان می دهد.

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های اجزای محدود پل مورد بررسی تحت اثر زلزله‌های با محتوای فرکانسی مختلف، نشان می‌دهد که شتاب ایجادشده ناشی از بارگذاری لرزه‌ای بسته به محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله می‌تواند متفاوت باشد. از این موضوع می‌توان به این نتیجه دست یافت که در طراحی پل‌ها می‌بایست اثر رکوردهای حاصل از زلزله دور و نزدیک زلزله‌های محتمل، مورد بررسی قرار گیرد تا بدین ترتیب بتوان به صحت نتایج حاصل از تحلیل اطمینان بیشتری داشت.با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که اندرکنش خاک و سازه در تحلیل و برآورد لرزه‌ای پل‌ها نقش موثری ایفا می‌کند و می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها تأثیر مؤثر بگذارد. به دلیل اثرهای کم و گاهی متفاوتی که این اندرکنش در پاسخ‌های مختلف تغییر مکانی و نیرویی پل می‌گذارد، باید اثر این اندرکنش را در مدل‌سازی پل‌ها مدنظر قرارداد و در فرآیند برآورد و ارزیابی لرزه‌ای آن‌ها وارد نمود.

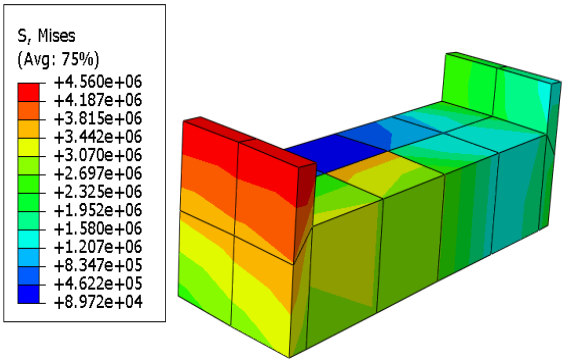
۳-۲- نتایج تحلیل و تفسیر در برشگیر پل

۳-۲-۱- بررسی تأثیر اندرکنش خاک- سازه بر پاسخ برشگیر پل‌ها

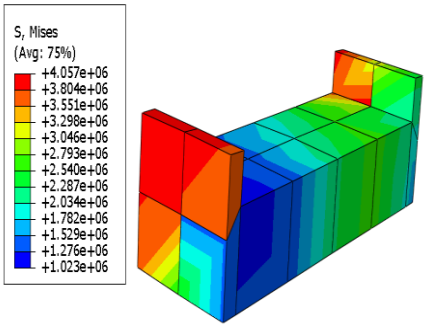
در این بخش به بررسی تأثیر **اندرکنش خاک- سازه** بر پاسخ برشگیر پل‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور تنش‌های ایجادشده در برشگیر در حالت‌های مختلف مطابق شکل (۲۰) نشان داده می‌شود. این مقادیر با توجه به توزیع تنش ارائه‌شده در حالت‌های مختلف حاصل شده است.



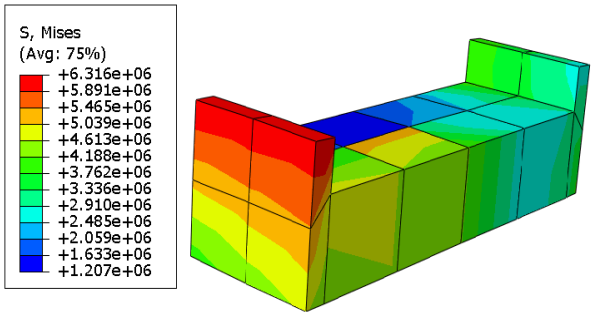
الف) سنگ‌بستر- زلزله شماره۱



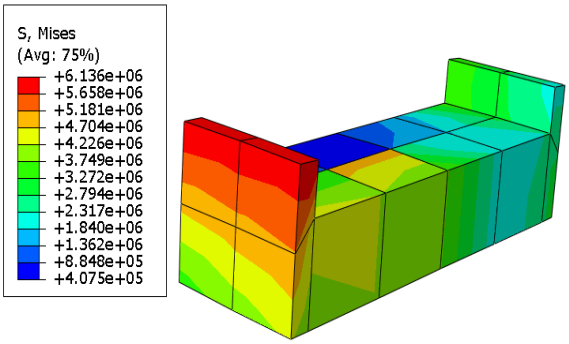
ب) سنگ‌بستر- زلزله شماره۲



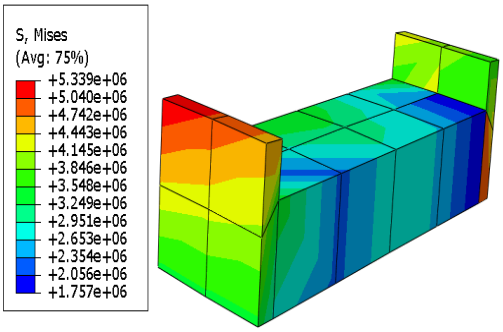
ج) سنگ‌بستر- زلزله شماره۳



د) خاک غیرچسبنده- زلزله شماره۱

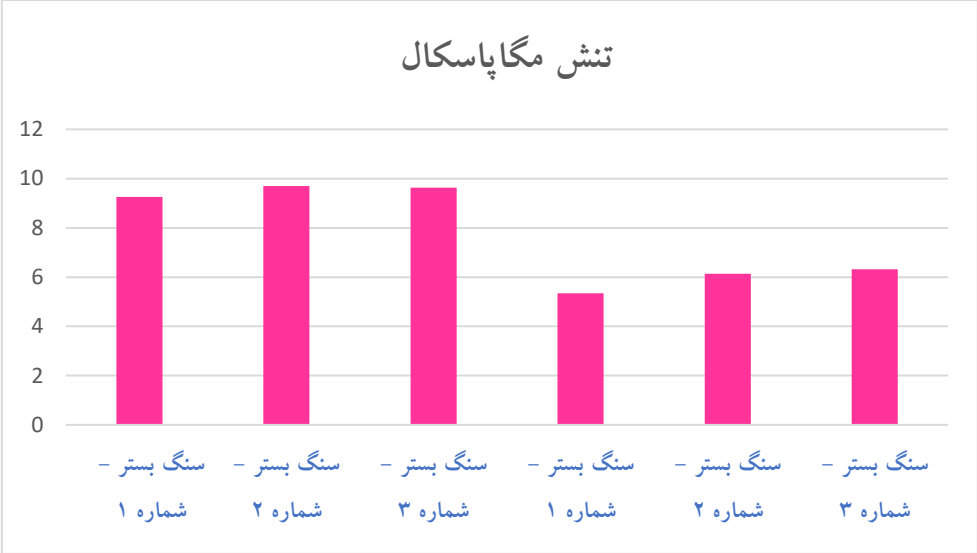


ه) خاک غیرچسبنده- زلزله شماره۲



و) خاک غیرچسبنده- زلزله شماره۳

شکل۲۰- بیشینه تنش ایجادشده در برشگیرها



شکل۲۱- مقایسه بیشینه تنش ایجادشده در برشگیرها در زلزله های مختلف

همانطورکه از شکل (۲۱) مشاهده می‌گردد، در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه مقادیر پاسخ‌ها نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه، پاسخ‌ها را ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

۴-نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر خاک بر پاسخ پل‌ها و برشگیر آن‌ها تحت بارهای لرزه‌ای برای حالت‌های مختلف پرداخته شد. متغیرهای مورد بررسی به ترتیب شامل تحلیل با سنگ‌بستر(بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه)و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه و نوع زلزله ازلحاظ محتوای فرکانسی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق را به‌صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

- در حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه (سنگ‌بستر) میزان تنش‌ها افزایش‌یافته است، این در حالی است که در حالت در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه برای خاک غیرچسبنده این مقدار کاهش‌یافته است.پس لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه می‌تواند به اقتصادی‌تر شدن طرح مفید واقع شود.

- در حالت اعمال زلزله شماره ۱ مقدار درصد کاهش تنش برای خاک غیرچسبنده نسبت به سنگ‌بستر به میزان ۳۴/۸۸ درصد، در حالت اعمال زلزله شماره ۲ به میزان ۳۳/۶۱ درصد و در حالت اعمال زلزله شماره ۳، ۲۹/۴۱ درصد می‌باشد. بنابراین در تمام حالت‌های اعمال زلزله خاک‌های غیرچسبنده میزان درصد کاهش تنش‌ها بیشتر شده است که این بیان‌گر عملکرد بهتر سازه پل در خاک‌های غیرچسبنده(اعمال اندرکنش خاک و سازه) می‌باشد.

- در حالت بدون درنظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه با سنگ‌بستر مقادیر برش پایه در تمامی حالات اعمال زلزله بیشتر شده است از این موضوع می‌توان به این نتیجه دست یافت که هر چقدر بستر صلب‌تر باشد نیروی برش پایه ناشی از بارهای دینامیکی زلزله وارد بر پل‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین سختی بستر پل می‌تواند عملکرد سازه‌ی پل را تحت تأثیر قرار دهد.

- در تمامی حالات، در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه موجب کاهش نیروی برش پایه در پل تحت نیروی زلزله شده است؛ به‌طوری‌که در کمترین حالت به میزان ۶۷/۱ درصد برای زلزله شماره ۲ و در بیشترین حالت به میزان ۸۱/۲ درصد برای حالت زلزله شماره۱، مقدار نیروی برش پایه کاهش‌یافته است. پس می‌توان نتیجه گرفت که اعمال اندرکنش خاک و سازه موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت طرح می‌گردد.

- هنگامی‌که پل بر روی سنگ‌بستر قرار می‌گیرد متحمل شتاب بیشتری نسبت به خاک‌های غیرچسبنده می‌شود دلیل این موضوع آن است که خاک در اثر زلزله، تحت ارتعاش بیشتری قرار می‌گیرد و خصوصیات و پارامترهای آن دچار تغییر می‌شوند و بدین ترتیب شتاب اعمال شده در سنگ‌بستر بیشتر می‌شود.

-با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه در زلزله‌های شماره ۲ و۳ کاهش بیشتری در مقادیر تنش‌ها در برشگیر پل‌ها مشاهده شده است. این میزان کاهش در زلزله‌های شماره ۲ و ۳ نسبت به زلزله شماره ۱بیشتر است.

درمجموع بررسی‌ها در پل و برشگیرها ، اثرات محتوای فرکانسی و خاک در پاسخ‌ها به‌خوبی مشهود است و لزوم تحلیل‌های دقیق را در این خصوص با توجه به اهمیت موضوع ضروری می‌نماید.

با توجه به اهمیت موضوع اندرکنش خاک-سازه بررسی رفتار پل با خاک‌های چسبنده و خاک‌های نرم در شرایط لرزه‌ای در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

[۱] Salehi, A. (2005), *Nonlinear seismic analysis of boxed Post-tensioned bridges with consideration of soil - structure interactions*. Master's Thesis, Isfahan University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

[۲] Vasaghi, A. Rostamian, H. (2008), *Analytical and Experimental Investigation of the Application of Yielding Steel Shear Keys in on the Bridges of Beam and Slab With Neoprene Supports*, Seismology and Earthquake Engineering , Journal of Seismology and Earthquake Engineering,10(4).263-270.

[۳] Yahyanasab, A. (2011). *Investigation Soil-Structure Interaction in Integral Bridges*. Master's Thesis, Tabriz University, Faculty of Civil Engineering.

[۴] Callisto, L., Rampello, S. And Viggiani, G. M.. (2013). *Soil–structure interaction for the seismic design of the Messina strait bridge*. Soil dynamics and earthquake engineering, 52, 103-115 .

[۵] Mohtashimi, A. Shooshtari, A (2014). *Investigating the effect of soil and structure interaction on seismic behavior of integral bridges*. Eighth National Congress of Civil Engineering. Faculty of Civil Engineering, Babol, Babol Noshirvani University of Technology.

[۶] Shirgir, v. (2014). *analytical model of seismic behavior of bridges based on the effects of soil-structure interaction*. Master's Thesis, Kharazmi University University - Tehran, Faculty of Engineering.

[۷] Mohammadzadeh, Y. (2016). *Analysis of Foundation-Soil and Structure Interaction in Seismic Behavior of Bridges by Finite Element Method (Case Study)*. Master's Thesis, Tabriz University, Faculty of Civil Engineering.

[۸]Wilson, J. C. and Tan, B. (1990) *Bridge abutments: Formulation of simple model for earthquake response analysis*. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), Vol.116, No.8, pp.1828–1837.

[۹]Spyrakos, C. C. and Vlassis, A. G. (2002). *Effect of soil-structure interaction on seismically isolated bridges*. Journal of Earthquake Engineering, 6(3): 391-429.

[۱۰]Saadeghvaziri, M. A., Yazdani motlagh, A. R. And Rashidi, S. (2000). *Effects of soil-structure interaction on longitudinal seismic response of MSSS bridges*". Soil dynamics and earthquake engineering, 20, 231-242.

[۱۱]Dezi F; Carbonari S; Tombari A; Leoni G. (2012). *Soil-structure interaction in the seismic response of an isolated three span motorway overcrossing founded on piles*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,32(1), 151-163.

[۱۲] Dreier, D. (2008). *Influence of soil-structure interaction on structural behavior of integral bridge piers*. 7th fib PhD Symposium in Stuttgart, Germany.

[۱۳]Megally, S. H., Silva, P. F. And Seible, F. (2002). *Seismic response sacrificial shear keys in bridge abutments*.The university of California,1-198.

[۱۴]Bozorgzade, A., Megally, S., Restrepo, J. I. And Ashford, S. A. (2006). *Capacity evaluation of exterior sacrificial Shear keys of bridge abutments*. Bridge engineering, 11(5), 555-565.

[۱۵]Goel, R. K. And Chopra, A. K. (2008). *Role of Shear keys in seismic behavior of bridges crossing fault-rupture zones*. Bridge Engineering, 13(4), 398-408.

[۱۶]Salveson, M. W. And Fell, B. V. (2011). *Effect of abutment shear keys on the seismic response of bridges*. Structures Congress, 265-275.

[۱۷]Bi, Kaiming And Hao, Hong (2015). *Modelling of shear keys in bridge structures under seismic loads*. Soil dynamics and earthquake engineering, 74, 56-68.

[۱۸] Yang M., Meng D, Gao Q., Zhu Y. (2019), Experimental study on transverse pounding reduction of a high-speed railway simply-supported girder bridge using rubber bumpers subjected to earthquake excitations. Engineering Structures, N0. 196, PP. 1-14.

[19] Xiang, N.; Li, J., (2018). Effect of exterior concrete shear keys on the seismic performance of laminated rubber bearing-supported highway bridges in China . Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No112, pp.185-197.

[۲۰] Han Q., Zhou Y., Qu Y., Du X. (2017), Seismic behavior of reinforced concrete sacrificial exterior shear keys of highway bridges, N0. 139, PP. 50-70.

[۲۱] Hosseinzadeh, M. Pourzinli, S., (2016), *Study of the effect of impact on seismic response of bridges with consideration of the effect of soil-structure interaction*. Transportation Infrastructure Engineering, No. 3, pp. 95-114.

[۲۲] Samadian, B. Jalalizadeh, A. Vasghi, J, (2004). *Including Soil - Structure Interaction in Dynamic Analysis of Structures*. First National Congress of Civil Engineering, Sharif University ,Tehran.

[۲۳] Abbas Krashfani, S. Ardakani, A. Yakhchalian, M., (2015). *Comparison of the effects of near field earthquakes and far field earthquake on the soil - pile - structure system response*. Journal of Structural and Construction Engineering, No. 4, pp. 117-130.

[۲۴] Shahmohammadi Mehrjardi, M. Tabatabaei Aghda, S. T. (2015). *Effect of Near and Far Field Earthquake on Soil and Bridge Interaction*. Second International Conference on Geotechnical Engineering and Urban Seismic Engineering, Tabriz.

[۲۵] Shiravand, M. R., Parvaneh P. , Bagheri S. (2017). *Investigation of the Effect of Multi Support Excitation on the Seismic Response of Brick Bridges*. Journal of Structural and Construction Engineering, Special Issue 1, pp. 69-58.

[۲۶] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, 2rd edition, Road, Housing and Urban Development Research Center., Tehran, Iran, (2005).

[۲۷] ABAQUS theory manual. Pawtucket, (2016). R.I: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.; Version 6.11.

[۲۸] RabetiMoghadam M., Baziar M. H., (2016). *Seismic groundmotion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation*. Soil dynamics and earthquake engineering, 83, 81-97.