

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

مطالعه اندرکنش گودبرداری دائمی و ساختمان مجاور تحت زلزله (مطالعه موردی: رمپ قطار شهری و ساختمان همیاری شهرداری های کرمانشاه)

جهانگیر خزایی^{۱*}، افشین قبادیان^۲

۱- استایار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده

گودهای عمیق تأثیر مستقیمی بر تنش‌ها و کرنش‌های خاک اطراف دارند که همین پدیده عامل ایجاد تغییر در پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه‌های مجاور گود می‌شود. در این پژوهش اثر وجود گود عمیق بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان بلندمرتبه سازمان همیاری شهرداریهای کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تلاش شده است تأثیر وجود گود ناشی از رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه بر ساختمان همیاری شهرداری که از سیستم قاب خمشی فولادی بهره می‌برد، مورد بررسی قرار گیرد. در نظرگیری اندرکنش بین خاک و سازه دارای تأثیر فراوانی بر پاسخ سازه از جمله افزایش دامنه حرکت داخلی فونداسیون و طبقات، کاهش برش پایه و افزایش پیوند طبیعی سازه، است. در بررسی سه‌بعدی صورت گرفته برای مصالح خاک و فولاد رفتار غیرخطی و برای مرزهای ویسکوز از المان‌های نیمه بی‌نهایت استفاده شده است. استفاده از مرزهای بی‌نهایت عملکرد مطلوبی را در تحلیل لرزه‌ای محیط‌های خاکی نشان داد. قرارگیری ساختمان در مجاورت رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه ی مجاور گود باعث افزایش ۸,۹۸ درصدی پیوند اول ساختمان و کاهش ۱۹,۳۷ درصدی برش پایه وارد بر ساختمان نسبت به حالت تکیه‌گاه صلب و همچنین افزایش جابجایی جانبی طبقات بخصوص در طبقات بالاتر می‌شود که این میزان افزایش در طبقه بام ۸۲,۳۳ درصد نسبت به حالت پایه صلب و ۱۷,۶۳ درصد نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و گود برای ساختمان نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه بدون لحاظ شدن اثر گود، افزایش ۱,۰۹ درصدی پیوند اول سازه و کاهش ۱۰,۲۷ درصدی برش پایه و افزایش طیف پاسخ شتاب را در پی خواهد داشت.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، گود عمیق، پاسخ لرزه‌ای، برش پایه، پیوند مد اول، ساختمان مجاور گود

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2018.104878.1378	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/JSCE.2018.104878.1378	۱۳۹۶/۰۸/۱۶	۱۳۹۶/۱۲/۱۸	۱۳۹۷/۰۲/۰۸	۱۳۹۷/۰۲/۰۸	۱۳۹۸/۰۹/۰۱
			جهانگیر خزایی		*نویسنده مسئول:
			j.khazaie@ac.ir		پست الکترونیکی:

Permanent Excavation Interaction and Adjacent Building under Earthquake (Case study: Entrance Ramp of the City Train and Hamyari-Shahrdari Building)

J.Khazaei ^{1*}, A. Ghobadian ²

1- Assistant professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
2- Ph.D. Student in Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Deep excavation have a direct effect on stresses and strains of surrounding soil, and it leads to the change in static and dynamic response of adjacent structures of the excavation. In this study the effects of urban rail ramp permanent excavation on Hamyari response, has been investigated. Consideration of soil-structure-groove interaction has a great effect on the structure response, including increased range of internal motion of foundation and floors, reducing the base shear, and increasing the natural period of the structure. The three-dimensional study has considered a nonlinear behaviour for soil and steel materials and also, semi-infinite elements have been used for viscose boundaries. The use of semi-infinite boundaries has shown a desirable performance in seismic analysis of soil environments. Placement of the building near the entrance ramp of Kermanshah metro and consideration of soil-structure interaction near the excavation, lead to the 8.98% increasing in the first period of the structure, decreasing 19.37% base shear of the Structure against the rest rigid condition, and also increasing the lateral displacement of floors, especially higher floors, and this increment in the roof floor compared to the rigid base and soil-structure interaction are 89.89% and 14.25%, respectively. Also, consideration of soil-structure interaction adjust excavation for building compared to the case with soil-structure interaction and without the excavation effect, leads to the 1.09% increasing in the first period of the structure and 10.27% decreasing in base shear, and also increasing of acceleration response spectrum.

ARTICLE INFO

Received: 07/11/2017
Revised: 09/03/2018
Accepted: 28/04/2018

Keywords:

Soil-structure interaction,
Deep excavation,
Dynamic response,
Base shear,
Period of first mode,
Structure adjust excavation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.104878.1378

*Corresponding author: Jahangir Khazaei
Email address: j.khazaie@ac.ir

۱- مقدمه

زلزله را شاید بتوان مهم‌ترین پدیده‌ی طبیعی دانست که بشر همواره به دنبال مقابله با اثرات تخریبی آن بوده از این رو شناخت اثرات آن بر محیط اطراف و محل زندگی امری اجتناب‌ناپذیر است. با رشد و گسترش فعالیت‌های شهری شاهد احداث بسیاری از تأسیسات حیاتی نظیر سیستم‌های حمل و نقل همگانی نظیر مترو، پارکینگ‌ها و سازه‌های زیرزمینی هستیم. بسیاری از این ساخت‌وسازها نیازمند گودبرداری‌ها عمیق و وسیع که ممکن است یا دوره ساخت آنها سال‌ها به طول بیانجامد و یا بعنوان سازه دائمی مورد استفاده قرار گیرند لذا بررسی اثرات ناشی از احداث این قبیل سازه‌ها حین زلزله بر محیط پیرامون امری است حیاتی و ضرورتی انکارناپذیر است. اثرات اندرکنش خاک و سازه از انعطاف‌پذیری خاک زیر پی، ارتعاشات نسبی بین پی و سطح آزاد ناشی می‌شود. با منظور کردن این اثرات می‌توان نیروهای اینرسی و تغییر مکان‌های واقعی یک سیستم سازه - پی - خاک را تحت اثر حرکات لرزه‌ای سطح آزاد تعیین کرد [۲۰۱].

در طول سه دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای تعیین مشخصات مهندسی اثرات اندرکنش خاک-سازه به عمل آمده است. نتایج این تحقیقات در بسیاری از آیین‌نامه‌های زلزله نظیر NEHRP, UBC, ATC و... آمده است [۳-۵]. ولتسوس و میک (۱۹۷۴) نشان دادند که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه منجر به طولانی شدن زمان تناوب سازه و افزایش میرایی سیستم بعلاوه استهلاک انرژی در سطح تماس خاک و پی نسبت به حالت پایه ثابت می‌شود [۶]. کاراپترو و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه پرداختند و نشان دادند که روش رایج محاسبه شکنندگی ساختمان که در آن پایه سازه ثابت در نظر گرفته می‌شود به نتایج نامحافظه کارانه ای منجر می‌شود [۷].

اصلاح حکم آبدی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از آزمون میز لرزه اندرکنش دینامیکی خاک و سازه با فنداسیون شمعی و گسترده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش شامل این بود که حداکثر تغییر شکل جانبی سازه، با در نظر گرفتن اندرکنش تحت زلزله‌های مختلف مقادیر بیشتری نسبت به حالت پایه ثابت دارد. همچنین استفاده از فنداسیون‌های شمعدار نسبت به حالت فنداسیون گسترده باعث کاهش جابجایی‌های جانبی می‌شود [۸]. منگ کی لی و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی اندرکنش خاک و سازه به روش زیر سازه برای برج شانگهای چین بدین حقیقت دست یافتند که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه ظرفیت باربری برج نسبت به حالت بدون اندرکنش خاک-سازه، افزایش می‌یابد اما در مد نهایی شکست تاثیر چندانی ندارد. آن‌ها که در این تحقیق از روش زیرسازه و المان‌های ویسکوز بهره برده بودند همچنین دریافته‌اند که در نظر گیری اندرکنش بین خاک و سازه اثر کمی در مد تغییر شکل‌های انتقالی خواهد داشت [۹].

ترابی و ریحانی (۲۰۱۴) که به مطالعه سه بعدی اندرکنش خاک و سازه واقع در زمین نرم پرداخته بودند دریافته‌اند با افزایش سختی فنداسیون پیروود سازه افزایش پیدا می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن اندرکنش مقدار پاسخ شتاب کاهش می‌یابد [۱۰]. سائز و همکاران (۲۰۱۱) اثرات اندرکنش دینامیکی خاک و سازه در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که قابلیت شکل‌پذیری خاک و اندرکنش خاک و سازه، پاسخ و شکنندگی سازه‌ها را تغییر می‌دهد [۱۱]. مائو و یا-یونگ (۲۰۰۹) برای نشان دادن لزوم در نظر گیری اندرکنش خاک-سازه برای درک بهتر رفتار سازه‌های بلند خصوصا حین زلزله به مطالعه اثر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ ساختمان بلند واقع بر خاک نرم مورد پرداختند [۱۲]. پیژن لی و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقاتشان به نتایج مهمی دست یافتند از جمله اینکه در حالتی که اندرکنش خاک-سازه را در نظر می‌گیریم با افزایش مدول برشی، فرکانس طبیعی سیستم افزایش می‌یابد و با تغییر مدول برشی پاسخ دینامیکی سازه بسیار پیچیده می‌شود. با در نظر گرفتن اندرکنش و با افزایش مدول برشی خاک، جابجایی ماکزیمم سازه افزایش می‌یابد و همچنین در این حالت با افزایش سختی سازه، جابجایی ماکزیمم سازه افزایش می‌یابد [۱۳].

آنچه تاکنون بیان شد گوشه‌ای از تحقیقات گسترده در مورد اندرکنش خاک-سازه منفرد را حین زلزله بیان می‌کند اما باید دانست که در مورد اثرات متقابل شرایط محلی نظیر سازه‌های مجاور، تونل‌ها، گودهای دائم و موقت، ایستگاه‌های مترو و... دانش موجود، محدود می‌باشد. آیین‌نامه‌های زلزله این قبیل موارد را مورد بررسی قرار نداده‌اند لذا در پژوهش حاضر سعی بر آن شده است تا با بررسی مطالعه موردی اثر وجود گود ناشی از رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه بر ساختمان بلند مرتبه (همیاری شهرداری) تحت زلزله، اهمیت این موضوع بیش از پیش نمایان گردد.

احداث گود عمیق ناشی از رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه در منطقه‌ای با بافت ساختمانی متراکم و بلندمرتبه باعث به وجود آمدن این سؤال چالش برانگیز می‌شود که آیا احداث این قبیل گودهای عمیق در مناطق شهری و در مجاورت ساختمان‌های بلندمرتبه چه اثرات کوتاه مدت (استاتیکی) و بلندمدت (دینامیکی) بر ساختمان‌های واقع در این نواحی دارد. که توجه اساسی در پژوهش حاضر بر اثر وجود گود بر پاسخ لرزه ای ساختمان بلندمرتبه (همیاری شهرداریها) است. بررسی این پدیده مستلزم توجه به نکات زیر است:

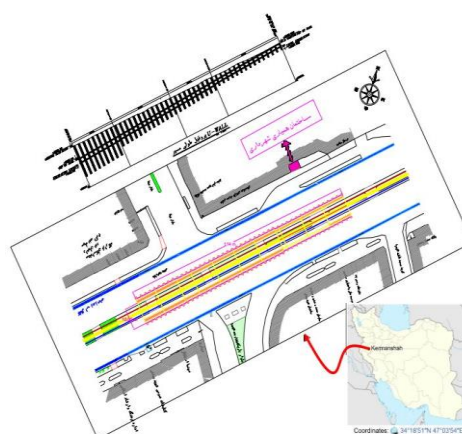
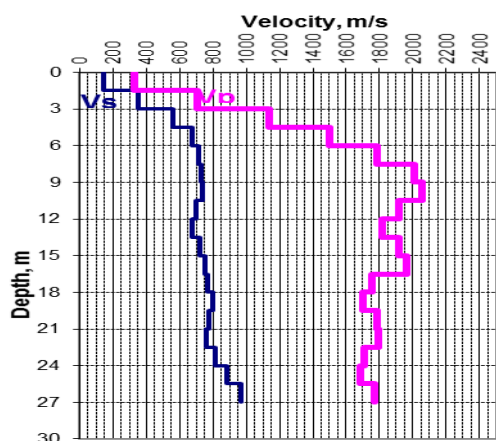
- انجام مطالعات ژئوتکنیکی خاک محل و بررسی گزارش‌ها مربوطه و ارائه مدل رفتاری مناسب برای خاک.
- بررسی هندسه گود ناشی از حفر رمپ ورودی قطار شهری و همچنین سیستم سازه نگهبان آن.
- بررسی سیستم سازه‌ای قاب خمشی فولادی ساختمان همیاری شهرداریها
- به منظور ارزیابی و بررسی اطمینان بخش از صحت روند بررسی مسئله گام‌های زیر توصیه شده است:
- بررسی نشست ساختمان قبل و بعد حفاری با انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی و توجه به اندرکنش خاک و سازه.
- انجام آنالیز فرکانسی برای سیستم خاک و سازه و به دست آوردن ضرایب میرایی رایله
- انجام آنالیز غیرخطی دینامیکی سیستم اندرکنش خاک و سازه قبل و بعد از حفاری با اعمال تحریک لرزه‌ای ورودی مناسب.
- ارزیابی پاسخ لرزه‌ای غیرخطی ساختمان همیاری شهرداریها

۲- مواد و روش ها :

۲-۱- مطالعه موردی

گود مورد بررسی بخشی از پروژه قطار شهری می‌باشد که در شهر کرمانشاه (ایران) در حال احداث می‌باشد. با نزدیک شدن خط قطار به منطقه شهری با تراکم بالا و ساختمان‌های بلند، خط قطار ادامه‌ی مسیر خود را بجای حرکت در ارتفاع چند متری از سطح زمین با تغییر ارتفاع در زیر سطح زمین ادامه می‌دهد که در محل این تغییر ارتفاع، گودبرداری مد نظر این مقاله احداث شده است. از ویژگی‌های اصلی این حفاری می‌توان به مساحت مستطیل شکل به طول ۱۱۴ متر و عرض ۱۰ متر در پلان، عمق حفاری ۰٫۵ متر در ابتدای رمپ ورودی تا ۸ متر در انتهای رمپ و سیستم سازه نگهبان شمع بتنی با شاتکریت که همگی به‌طور خلاصه در شکل (۱) آورده شده است اشاره کرد. مطالعات ژئوتکنیک انجام شده روی خاک اطراف محل گود شامل عملیات حفاری، آزمایش‌های صحرایی (نظیر برش مستقیم، تحکیم، مقاومت فشاری، تک محوری و...) و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

جهت شناسایی نوع تپ زمین مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای تحلیل لرزه‌ای، آزمایش‌های لرزه‌نگاری به روش سطح به عمق توسط دستگاه ۲۴ ABEM RAS انجام شده است. شکل (۲) پروفیل سرعت امواج تراکمی (P) و برشی (S) را در عمق خاک نشان می‌دهد که سرعت متوسط موج برشی برای گمانه حفر شده در نزدیکی محل مورد نظر حدود ۵۹۴ متر بر ثانیه به دست آمده است. بنابراین مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ خاک محل از نوع تپ دو می‌باشد. همچنین مطابق آیین‌نامه NEHRP محدوده مورد مطالعه در رده خاک‌های خیلی متراکم قرار می‌گیرد. جدول (۱) مشخصات لایه‌بندی خاک که از انجام آزمایش‌های صحرایی به دست آمده است و جدول (۲) مشخصات مصالح فولاد و بتن، را نشان می‌دهد.



شکل ۱: سایت پلان محل احداث رمپ ورودی قطار شهری و ساختمان همیاری شهرداری شکل ۲: منحنی تغییرات سرعت امواج تراکمی و برشی با عمق

جدول ۱: مشخصات خاک محل

شماره لایه	1	2
ضخامت (متر)	17	13
ρ (kg/m ³)	1920	1930
E(Mpa)	60	98
ν	0.35	0.35
C(kpa)	1	35
ϕ	30	33

جدول ۲: مشخصات فولاد و بتن

نوع مصالح	بتن	فولاد
ρ (kg/m ³)	2500	7850
E (Mpa)	2.74e4	2.1e5
ν	0.15	0.25
f_c (Mpa)	30	-
f_y (Mpa)	-	240
f_u (Mpa)	-	370

۲-۲- مدل ترکیبی نیم فضا و المان محدود برای اندر کنش خاک و سازه

استفاده از مرزهای مناسب برای محیط خاکی در سال‌های اخیر همواره مورد توجه پژوهشگران قرار داشته است، استفاده از مرزهای گذرا به خصوص در بارگذاری‌های دینامیکی برای جلوگیری از برگشت موج به داخل محیط و از بین بردن اثر جعبه‌ای امری اجتناب‌ناپذیر است [۱۴-۱۹]. این روش، از امتیازات هر دو المان محدود و روش نیم بینهایت برخوردار است و حداقل معایب آن‌ها را وارد حل مسئله می‌کند. این مدل بوسیله تقسیم کردن کل سیستم خاک سازه به یک میدان نزدیک و میدان دور با یک لایه میانی بدست می‌آید. میدان نزدیک شامل سازه و یک ناحیه خاک اطراف آن می‌باشد که بوسیله عناصر محدود مدل شده است. میدان دور نیم بینهایت است و با توابع امپدانس توزیع شده در لایه میانی مدل می‌شود. برحسب نظریه دانشمندان این مدل برای آنالیزهای اندکنش خاک و سازه‌ی دو و سه بعدی و برای سازه‌های سطحی و مدفون شده به واقعیت نزدیک‌تر و با صرفه‌تر است.

مقاله حاضر از المان‌های نیمه بی‌نهایت که روش جدیدتری است و امکان مدل‌سازی آن در نرم‌افزار آباکوس فراهم است، استفاده کرده است [۲۰-۲۵]. پاسخ دینامیکی المان‌های نامحدود بر مبنای موج صفحه‌ای است که بصورت عمودی سمت مرزها حرکت می‌کند، با فرض اینکه پاسخ در نزدیکی مرزها دارای دامنه به اندازه‌ی کافی کوچک‌ست می‌توان رفتار محیط را الاستیک خطی دانست [۲۶]. در نتیجه معادله تعادل بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$-P\ddot{u} + \frac{\partial}{\partial x}\sigma = 0 \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، P دانسیته ماده، \ddot{u} شتاب ذرات ماده، σ تنش و x مکان می‌باشد [۲۶]. با در نظر گرفتن ماده بصورت ایزوتروپ با رفتار الاستیک خطی داریم:

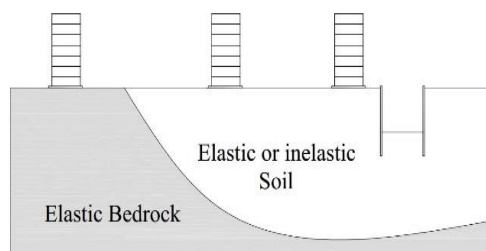
$$\sigma = \lambda \pi \varepsilon + 2G\varepsilon \quad (2)$$

که در آن ε کرنش، λ ضریب لامه، G مدول برشی هستند.

۳- تحلیل نتایج

شکل (۳) تصویر شماتیک روش‌های آنالیز دینامیکی ساختمان که در مقاله مورد استفاده قرار گرفته را نشان می‌دهد. سری اول آنالیزها که به عنوان پایه صلب شناخته می‌شود حالتی است که ساختمان بر روی سنگ بستر قرار گرفته است و همانند این است که شتاب زلزله مستقیماً به فونداسیون اعمال می‌شود. سری دوم حالتی است که خاک روی بستر سنگی قرار دارد و سازه روی خاک بنا شده است. در این حالت شاهد رخ دادن اندرکنش بین خاک و سازه خواهیم بود. سری سوم بیانگر حالتی است که خاک و سازه در اندرکنش باهم قرار دارند و در مجاورت آن‌ها گود وجود دارد که بر پاسخها تأثیرگذار است. در این مقاله هر سه حالت بررسی می‌شود.

پایه صلب معرف حالتی است که ساختمان روی سنگ بستر قرار دارد..... Fixed base
 اندرکنش خاک - سازه SSI
 اندرکنش خاک - سازه‌ی مجاور گود..... SSI - adjust excavation
 ضروری است قبل از تحلیل و بررسی هر کدام از موارد بالا، ابتدا خاک محیط را مورد ارزیابی قرار داد.



شکل ۳: تصویر شماتیک روش‌های آنالیز دینامیکی مورد استفاده

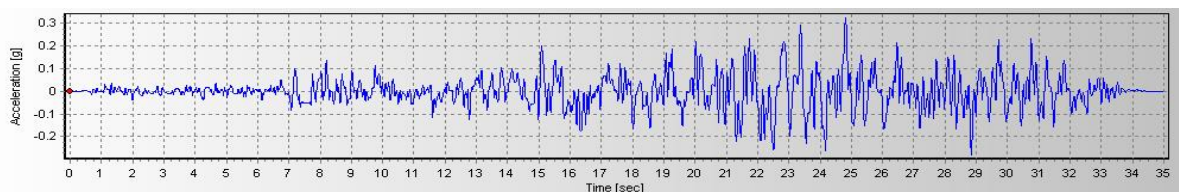
۳-۱- آنالیز فرکانسی و میدان آزاد خاک

برای به دست آوردن خصوصیات میرایی خاک آنالیز فرکانسی انجام شد تا ضرایب میرایی رایلی بدست آید [۲۰]. حدس ضرایب α و β رایلی از طریق بدست آوردن فرکانس مد اول و مد دوم محیط بدست می‌آید. آنالیز فرکانسی از طریق اعمال موج‌های هارمونیک و دریافت پاسخها بدست می‌آید. با فرض میرایی ثابت ۵٪ برای محیطهای خاکی، فرکانس ده مد اول محیط خاک در مجاورت محل ساختمان همیاری شهرداری استخراج گردید که ضرایب میرایی رایلی بدست آمده برابرند با:

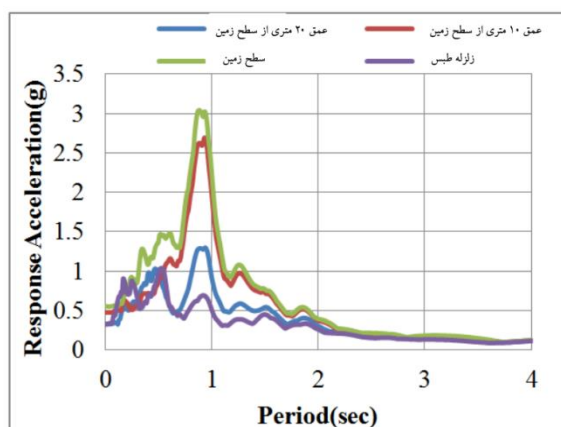
$$\alpha = 0.18678 \quad \beta = 0.013385$$

درگام بعدی برای اطمینان از صحت عملکرد مرزهای بی‌نهایت لازم است که تحلیل تاریخیچه زمانی شتاب مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ صورت گیرد. بدین منظور خاک محل تحت رکورد زلزله طیس (شکل ۴) که مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ به مقیاس آمده است، قرار گرفت. در شکل (۵) کانتور پخش شتاب در محیط خاک نشان داده شده است که مقدار شتاب صفر را در مرزها نشان می‌دهد. همین صحت عملکرد مرزهای بی‌نهایت را نشان می‌دهد. ثبت طیف پاسخ شتاب شکل (۶) در ترازهای مختلف پروفیل ارتفاعی خاک و تاریخیچه زمانی شتاب آن

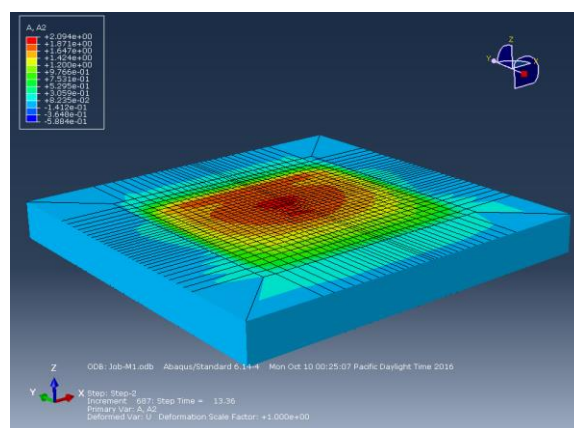
ها در شکل (۷) نشان از افزایش مقادیر دامنه شتاب و افزایش طیف پاسخ شتاب با حرکت از بستر سنگی به سطح زمین است. مطابق تحلیل صورت گرفته ضریب بزرگنمایی بدست آمده برای خاک شهر کرمانشاه در محدوده ی مورد مطالعه مقدار ۱٫۷ را نشان می دهد.



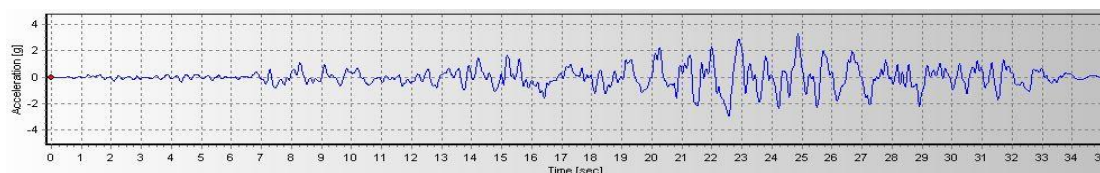
شکل ۴: تاریخچه زمانی شتاب زلزله طبس



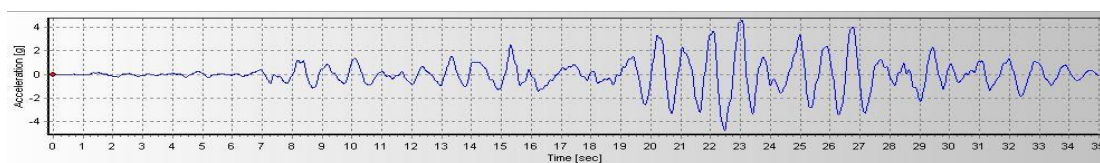
شکل ۶: طیف پاسخ شتاب برای نقاط ارتفاعی مختلف



شکل ۵: بخش شتاب در محیط خاک



الف



ب



ج

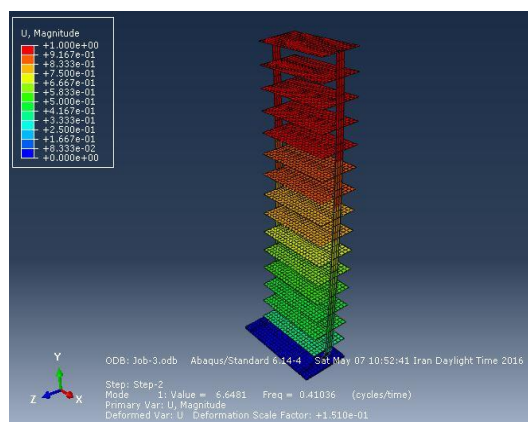
شکل ۷: تاریخچه زمانی شتاب برای نقاط ارتفاعی مختلف (الف عمق ۲۰ متری ب) عمق ۱۰ متری ج) سطح زمین

۳-۲- صحت سنجی

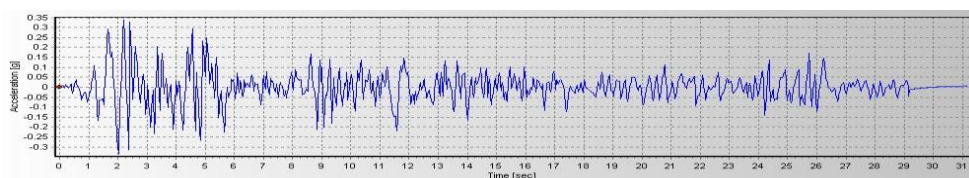
بمنظور صحت سنجی در پژوهش حاضر با تکیه بر نتایج مدل های آزمایشگاهی حکم آبادی و همکاران در دانشگاه UTS استرالیا سال ۲۰۱۵ مسئله در دو حالت صحت سنجی شده است: (۱) سازه با پای گیردار (۲) سازه با فنداسیون گسترده [27]. آزمایشات حکم آبادی و همکاران با رویکردی خاص از مدل سازی سازه های ۵، ۱۰، و ۱۵ طبقه به صورت چند درجه آزادی و با ویژگی های قابل قبول که در جهت حصول نتایج قابل اعتماد انجام شده است. علاوه بر بحث مدلسازی صحیح سازه ها یک محفظه پیشرفته با مرزهای خاص که بتواند شرایط میدان آزاد را برای محیط خاک فراهم کند در نظر گرفته شده است. این مدل های آزمایشگاهی با استفاده از میز لرزان ۳*۳ متر بوده که توان بارگذاری ۹ برابر وزن و لنگر واژگونی 100KN.m را دارا بوده است. برای مدل سازی سه بعدی در آزمایشگاه از صفحات فلزی افقی به عنوان سقف ها و چهار ستون فلزی استفاده شده است. صفحات فلزی دارای حداقل تنش تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال و حداقل مقاومت کششی ۴۱۰ مگاپاسکال بوده که مطابق آیین نامه استرالیا انتخاب شده است (steel grade 250). ضخامت این صفحات فلزی بعد از چندین چرخه سعی و خطا به میزان مطلوب مورد انتظار با فرکانس طبیعی سازه ها بدست آمده است. به منظور دستیابی به فرکانس طبیعی مدل ها آزمایش میز لرزان با یک بار سینوسی با فرکانس های متفاوت اعمال شده و در نهایت فرکانس طبیعی سیستم بدست آمد. مقدار فرکانس طبیعی مد اول سازه در شرایط آزمایشگاهی ۰,۳۹۹۸۴ دور بر ثانیه بدست آمد که این مقدار در مدلسازی صورت گرفته عدد ۰,۴۱۰۳۶ دور بر ثانیه را نشان میدهد. [27]

شکل ۸ نمایش فرکانس طبیعی مد اول بدست آمده از سازه های آزمایشگاهی مدل شده در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS سازه ۱۵ طبقه را نشان می دهد.

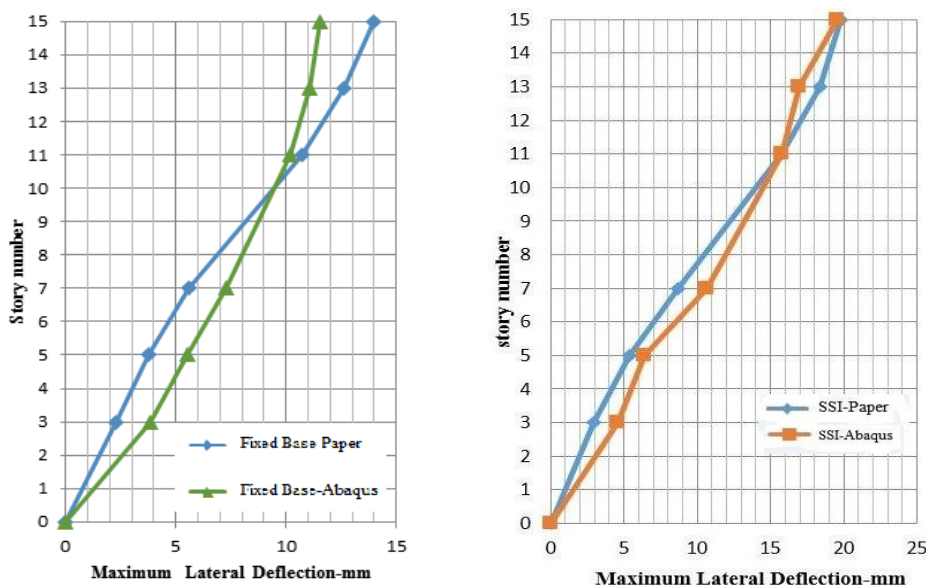
شکل ۹ نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله ال سنترو را نمایش می دهد و شکل ۱۰ مقادیر حداکثر جابجایی جانبی ثبت شده در اثر اعمال رکورد زلزله برای هر دو حالت بالا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مقاله مرجع (مقاله حکم آبادی و همکاران) آورده شده است.



شکل ۸: نمایش مد اول فرکانس طبیعی سیستم



شکل ۹: تاریخچه زمانی شتاب زلزله ال سنترو



شکل ۱۰: مقایسه جابجایی سازه ۱۵ طبقه در نرم افزار ABAQUS و مدل آزمایشگاهی

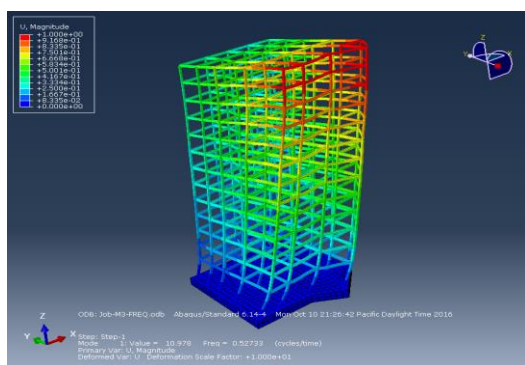
مقایسه نتایج آزمایشگاهی حکم آبدی و همکاران (۲۰۱۵) و مدلسازی های ABAQUS اختلافی کمتر از ۱۰ درصد را نشان می دهد که این میزان خطا مربوط به پارامترهای مدلسازی و خطای آزمایش ها می باشد که حاکی از رضایت بخش بودن صحت سنجی را نشان می دهد.

۳-۳- آنالیز فرکانسی ساختمان همیاری شهرداری ها

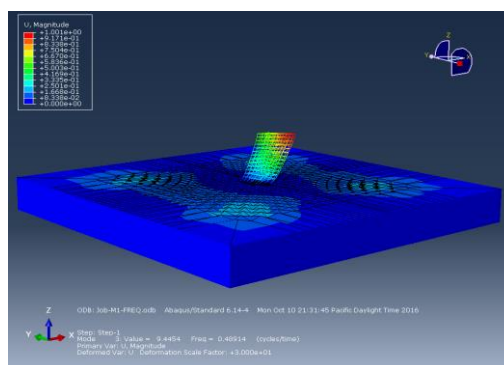
در این پژوهش آنالیز مودال در هر سه حالت-سازه با تکیه گاه صلب-اندرکنش خاک و سازه-اندرکنش خاک و سازه ی مجاور گود برای بدست آوردن زمان تناوب سازه انجام شده است. شکل ۱۱ مد تغییر شکل سازه را در هر سه حالت مدنظر نمایش می دهد. مطابق شکل ۱۲ در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه زمان تناوب سازه را حدوداً ۷,۸ درصد نسبت به حالت سازه با تکیه گاه صلب افزایش می دهد که با لحاظ کردن اثر وجود گود ناشی از رمپ ورودی این افزایش در زمان تناوب مقدار ۸,۹۸ درصد را نشان می دهد.

۳-۴- آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی

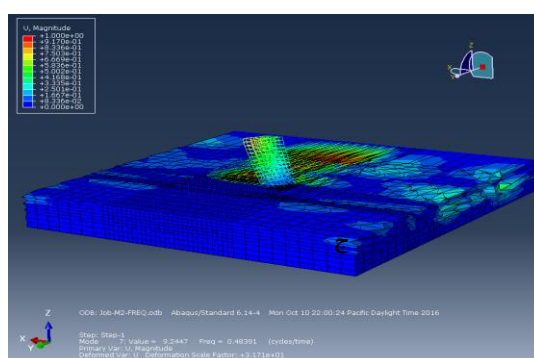
آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت رکورد زلزله طیس که به مقیاس درآمده مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ روی سازه همیاری شهرداری در هر سه حالت مدنظر انجام گرفته است. رفتار غیرخطی برای مصالح خاک و فولاد در نظر گرفته شده است. شکل ۱۳ کانتور های پخش شتاب و تغییر شکل را در سه حالت تکیه گاه صلب، اندرکنش خاک-سازه و اندرکنش خاک - سازه ی مجاور گود نشان می دهد. انتظار می رود با حرکت از سمت فنداسیون به سمت طبقه بام شاهد افزایش دامنه شتاب و جابجایی برای طبقات باشیم که شکل (۱۴) صحت این نظر را برای طبقات ۳ و ۱۳ در حالت اندرکنش خاک و سازه نشان می دهد.



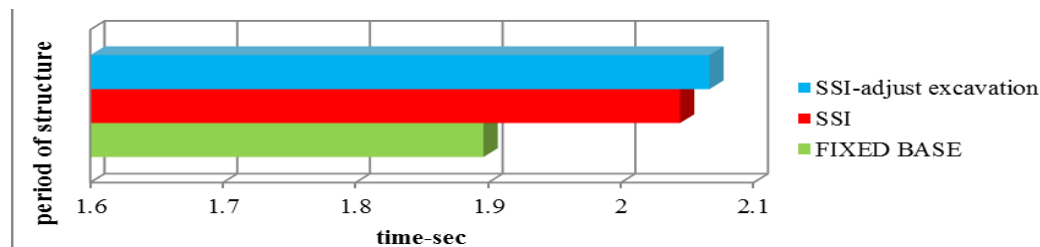
ب



الف



شکل ۱۱: مد تغییر شکل سازه الف: fixed base ب: SSI ج: SSI-adjust excavation



شکل ۱۲: مقایسه پریود سازه در سه حالت

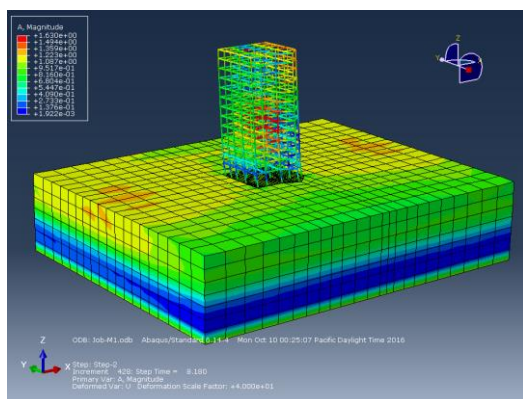
۳-۵- حداکثر جابجایی جانبی طبقات

شکل ۱۵ حداکثر جابجایی جانبی طبقات سازه را حین زلزله در هر سه حالت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه باعث افزایش جانبی طبقات می‌شود و این مسئله در مجاورت گود تشدید می‌شود. البته این میزان افزایش در طبقات بالاتر مشهودتر است.

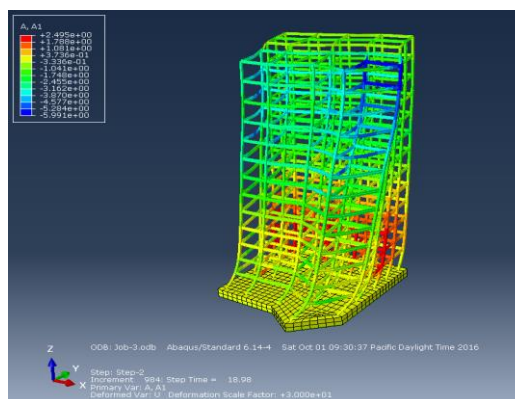
۳-۶- برش پایه وارد بر ساختمان

برآورد مقدار نیروی وارد بر ساختمان حین زلزله مسئله‌ی حیاتی در طراحی سازه‌ها به شمار می‌رود از این رو برآورد دقیق واقعی‌تر این مقدار نیرو می‌تواند نقش اساسی در طراحی‌های مهندسی سازه‌ها ایفا کند. شکل ۱۶ مقدار نیروی برش پایه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نظریه‌ی اندرکنش سازه همیاری شهرداری با خاک مقدار نیروی

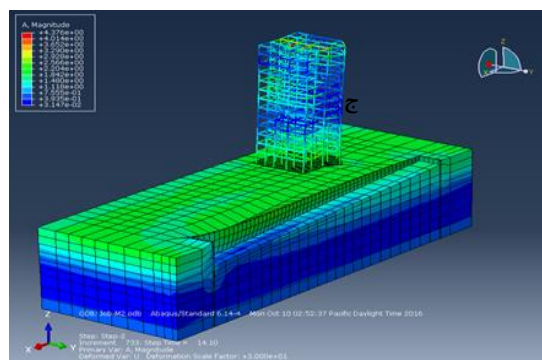
برش پایه وارد بر ساختمان را نسبت به حالت تکیه‌گاه صلب ۱۰،۱۴ در صد کاهش می‌دهد. تأثیر در نظریه گود ناشی از رمپ ورودی خط قطار شهری بر کاهش برش پایه عدد ۱۹،۳۷ در صد نسبت به حالت تکیه‌گاه صلب را نمایش می‌دهد که نسبت به حالت اندرکنش خاک - سازه ۱۰،۲۷ درصد کاهش داشته است.



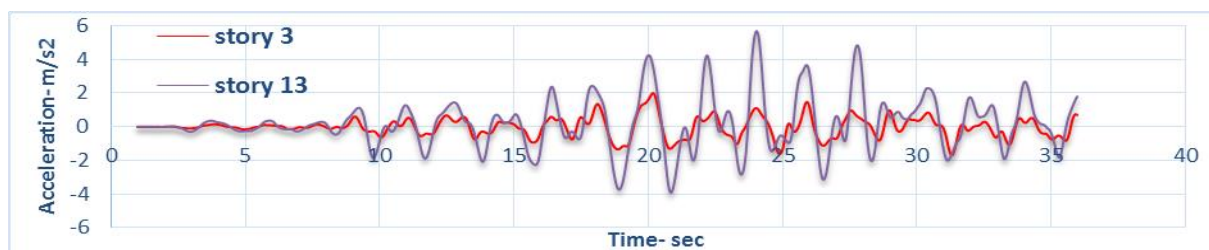
ب



الف



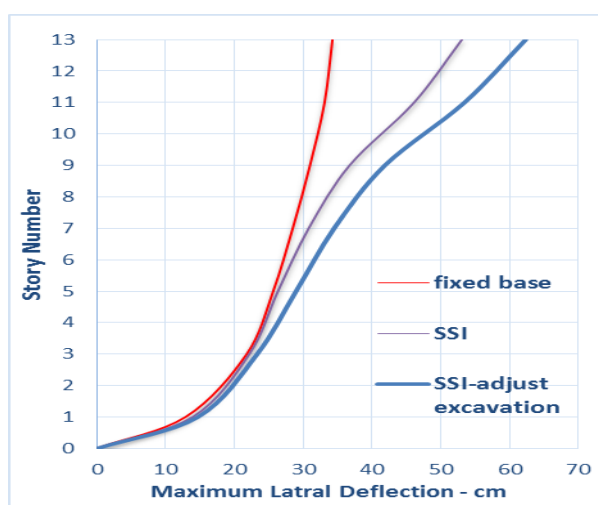
شکل ۱۳: پخش شتاب در فرم تغییر شکل یافته الف: fixed base ب: SSI ج: SSI-adjust excavation



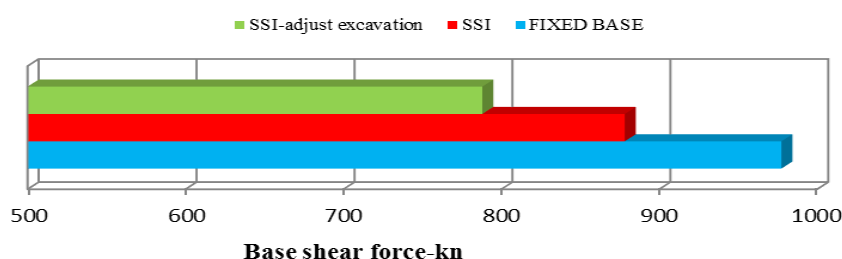
شکل ۱۴: تاریخچه زمانی شتاب طبقات ۳ و ۱۳ در حالت اندرکنش خاک و سازه

۳-۷- طیف پاسخ شتاب

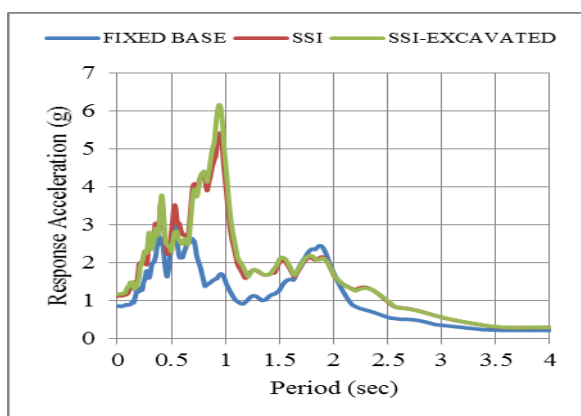
در شکل های ۱۷ و ۱۸ طیف پاسخ شتاب برای فونداسیون و طبقه سیزدهم ساختمان همیاری شهرداری کرمانشاه نشان داده شده است. مقدار حداکثر پاسخ شتاب برای حالت در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه مجاور گود بیشتر از حالت اندرکنش خاک و سازه و حداکثر پاسخ شتاب برای حالت اندرکنش خاک و سازه بیشتر از حالت تکیه‌گاه صلب است.



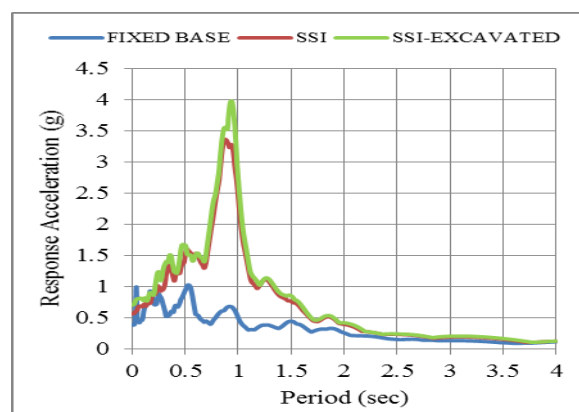
شکل ۱۵: حداکثر تغییر شکل جانبی سازه



شکل ۱۶: حداکثر نیروی برش پایه



شکل ۱۸: طیف پاسخ شتاب طبقه سیزدهم



شکل ۱۷: طیف پاسخ شتاب فونداسیون

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

مقاله حاضر به تحلیل دینامیکی غیرخطی اندرکنش گودبرداری دائمی و ساختمان مجاور آن تحت زلزله می پردازد. تحلیل های انجام شده بر روی یک نمونه واقعی و با تاکید بر ساختمان همیاری شهرداری ها در مجاورت رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه صورت پذیرفته است. ایده اصلی حاکم بر تحقیق نشان دادن اثر وجود گود ناشی از رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه بر عملکرد لرزه ای ساختمان همیاری شهرداری کرمانشاه حین زلزله می باشد. از مهم ترین نتایج بدست آمده از این تحقیق می توان موارد زیر را یادآور شد:

- ۱- استفاده از مرزهای بی‌نهایت عملکرد مطلوبی را در تحلیل لرزه‌های محیط‌های خاکی نشان داد.
- ۲- قرارگیری ساختمان همیاری شهرداری های کرمانشاه در ابتدای مسیر رمپ ورودی قطار شهری کرمانشاه و در نظر گرفتن اندرکنش گود ناشی از رمپ ورودی و سازه نگهبان آن با خاک و ساختمان (اندرکنش خاک-سازه مجاور گود) باعث افزایش ۸,۹۸ درصدی پیروید اول ساختمان و کاهش ۱۹,۳۷ درصدی برش پایه وارد بر ساختمان همیاری شهرداری ها نسبت به حالت تکیه‌گاه صلب می‌شود.
- ۳- در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و گود برای ساختمان همیاری شهرداری های کرمانشاه نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه بدون لحاظ شدن اثر گود، افزایش ۱,۰۹ درصدی پیروید اول سازه و کاهش ۱۰,۲۷ درصدی برش پایه را در پی دارد.
- ۴- در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه‌ی مجاور گود برای ساختمان همیاری شهرداری های کرمانشاه، افزایش جابجایی جانبی طبقات را بخصوص در طبقات بالاتر در پی دارد که این میزان افزایش در طبقه بام ۸۹,۸۹ درصد نسبت به حالت پایه صلب و ۱۴,۲۵ درصد نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه است.
- ۵- در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و گود برای ساختمان همیاری شهرداری های کرمانشاه نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه بدون لحاظ شدن اثر گود، افزایش طیف پاسخ شتاب را در پی خواهد داشت.

مراجع

- [1] Stewart, J. P. Seed, R.B. and Fenved , G. L " *Empirical Evaluation of Internal Soil – Structure Interaction effects* , " PEER – 98107. 1998.
- [2] Wirgin A. and P – Y Bard , " *Effects of Building on the Duration and Amplitude of Ground Motion in Mexico City* , " Bull. Of Seismological Society of America. Vol. 86, No 32, PP 914 – 920, 1996.
- [3] Building Seismic Safety Council (BSSC), " *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, Part 1. Provisions and part 2. Commentary* , "Rep. No. FEMA 222A. 1996
- [4] "Uniform Building (UBC)," International Conference of Building Officials, 1997
- [5] Applied Technology Council (ATC) , " *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations* , " Rep. No ATC 3-06, 1978.
- [6] Veletsos, Anestis S., and Jethro W. Meek. " *Dynamic behaviour of building-foundation systems*." Earthquake Engineering & Structural Dynamics 3.2 (1974): 121-138.
- [7] Karapetrou, S. T., S. D. Fotopoulou, and K. D. Ptilakis. " *Seismic vulnerability assessment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil–structure interaction effects*." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 73 (2015): 42-57.
- [8] Hokmabadi, Aslan S., Behzad Fatahi, and Bijan Samali. " *Assessment of soil–pile–structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations*." Computers and Geotechnics 55 (2014): 172-186
- [9] Li, Mengke, et al. " *Influence of soil–structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings*." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6.5 (2014): 477-485.
- [10] Torabi, Hooman, and Mohammad T. Rayhani. " *Three dimensional Finite Element modeling of seismic soil–structure interaction in soft soil*." Computers and Geotechnics 60 (2014): 9-19.
- [11] Sáez, Esteban, Fernando Lopez-Caballero, and Arézoú Modaresi-Farahmand-Razavi. " *Effect of the inelastic dynamic soil–structure interaction on the seismic vulnerability assessment*." Structural Safety 33.1 (2011): 51-63.
- [12] Yue, Mao-guang, and Ya-yong Wang. " *Soil-Structure Interaction of High-rise Building Resting on Soft Soil*." The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, ejge (2009)
- [13] Li, Peizhen, et al. " *Computer simulation on dynamic soil-structure interaction system*." 13th World Conference on Earthquake Engineering. No. 3233. 2004
- [14] Bielak, Jacobo, and Paul Christiano. " *On the effective seismic input for non-linear soil-structure interaction systems*." Earthquake engineering & structural dynamics 12.1 (1984): 107-119.
- [15] Hatzigeorgiou, George D., and Dimitri E. Beskos. " *Soil–structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels*." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30.9 (2010): 851-861.
- [16] Akiyoshi, T., et al. " *A NON-LINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD FOR SATURATED SOIL–STRUCTURE SYSTEM WITH ABSORBING BOUNDARY*." International journal for numerical and analytical methods in geomechanics 20.5 (1996): 307-329.
- [17] Yazdchi, M., N. Khalili, and S. Valliappan. " *Dynamic soil–structure interaction analysis via coupled finite-element–boundary-element method*." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18.7 (1999): 499-517.
- [18] Ptilakis, Dimitris, et al. " *Numerical simulation of dynamic soil–structure interaction in shaking table testing*." Soil dynamics and earthquake Engineering 28.6 (2008): 453-467.

- [19] Hall, William S., and Giuseppe Oliveto, eds. Boundary element methods for soil-structure interaction. Springer Science & Business Media, 2003.
- [20] Cipolla, J. L., and M. J. Butler. "Infinite elements in the time domain using a prolate spheroidal multipole expansion." International journal for numerical methods in engineering 43.5 (1998): 889-908.
- [21] Liu, D. S., and D. Y. Chiou. "2-D infinite element modeling for elastostatic problems with geometric singularity and unbounded domain." Computers & structures 83.25 (2005): 2086-2099.
- [22] Kim, Doo-Kie, and Chung-Bang Yun. "Time-domain soil-structure interaction analysis in two-dimensional medium based on analytical frequency-dependent infinite elements." International Journal for Numerical Methods in Engineering 47.7 (2000): 1241-1261.
- [23] Yun, C. B., et al. "Dynamic infinite elements for soil-structure interaction analysis in a layered soil medium." International Journal of Structural Stability and Dynamics 7.04 (2007): 693-713.
- [24] Seo, Choon-Gyo, Chung-Bang Yun, and Jae-Min Kim. "Three-dimensional frequency-dependent infinite elements for soil-structure interaction." Engineering Structures 29.11 (2007): 3106-3120.
- [25] Su, Jincheng, and Youqing Wang. "Equivalent dynamic infinite element for soil-structure interaction." Finite Elements in Analysis and Design 63 (2013): 1-7.
- [26] ABAQUS Inc, ABAQUS V.6.11 user's manual. Providence, Rhode Island, USA, 2011
- [27] Hokmabadi, A. S., Fatahi, B., & Samali, B. (2014). Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations. *Computers and Geotechnics*, 55, 172-186.