

Investigating the Effect of Soil Structural Interaction on Concrete Structural System

*Ashkan KhodaBandehLou**

*Assistant Professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran
a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir*

Hadi Pouryan

Ph.D. Candidate of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

Abstract

Soil-structure interaction is one of the most important and influential factors on the seismic behavior of structures, especially reinforced concrete structures. In this study, the effect of soil-structure interaction on a 9-story reinforced concrete structure with a flexural frame system designed based on low-risk seismic requirements and for nonlinear analysis with OpenSees finite element software in two different modes with rigid base without considering the interaction and with a flexible base, has been modeled and evaluated. The results show that due to the interaction, the base shear (with 12.51 %), the shear within the floors (with 8.42 %) and the amount of relative displacement (with 12.83 %) are reduced, while the actual period of the building (with 15.14 %) and the absolute displacement of the floors (with 7.82 %) are increased.

Keywords: *Soil structure interaction, Dynamic response, Base shear, Fixed base, Flexible base*

بررسی تأثیر اندرکنش خاک - سازه در پاسخ لرزه‌های سیستم سازه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه

دریافت مقاله: ۱۳۹۹-۰۹-۱۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹-۱۲-۱۷

اشکان خدابنده لو*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران
a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

هادی پوریان

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

چکیده

اندرکنش خاک و سازه یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها به‌ویژه سازه‌های بتن آرمه است. در این تحقیق اثر اندرکنش خاک-سازه بر یک سازه ۹ طبقه بتن آرمه با سیستم قاب خمشی که بر اساس الزامات لرزه‌ای با سطح خطر پایین طراحی شده است و برای تحلیل غیرخطی با نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees در دو حالت مختلف با پایه صلب بدون در نظر گرفتن اندرکنش و با پایه منعطف با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه مدل‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در اثر اندرکنش، برش پایه به اندازه‌ی ۱۲/۵۱ درصد، برش درون طبقات به اندازه‌ی ۸/۴۲ درصد و مقدار تغییرمکان نسبی به اندازه‌ی ۱۲/۸۳ درصد کاهش یافته درحالی‌که دوره تناوب واقعی ساختمان به اندازه‌ی ۱۵/۱۴ درصد و تغییرمکان مطلق طبقات به اندازه‌ی ۷/۸۲ درصد افزایش می‌یابد. کلمات کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، رفتار لرزه‌ای، پاسخ دینامیکی، برش پایه، پایه صلب، پایه منعطف.

در دهه ۷۰ میلادی که اندر کنش سازه-خاک-سازه معرفی شده بود [۱]، بررسی اثرات این پدیده در پاسخ های تغییر شکل سازه، بخش مهمی از تحقیقات را در بر گرفت [۲ و ۳]. با توسعه روش های عددی نظیر اجزای محدود و اجزای مرزی، لین و همکاران [۴] در یک مطالعه پارامتریک به بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه بر پاسخ سازه با تمرکز بر روی دو مؤلفه فاصله و مدفون شدگی پرداختند. در ادامه، گوان و نوک [۵، ۶] و هم چنین کیان و بسکاس [۷] با استفاده از روش اجزای مرزی اقدام به بررسی پاسخ های سازه کردند. در پژوهش های اخیر، قنديل و بهنام فر [۸ و ۹] با استفاده از روش خطی معادل و اصلاح آن به بررسی اندرکنش سازه-خاک-سازه پرداختند. آنها با کاهش ثابت برشی و افزایش میرایی، این روش را برای تمامی سامانه ها کارآمد کردند. مطالعه آزمایشگاهی اندر کنش سازه-خاک-سازه، از دیگر زمینه های تحقیقاتی در مورد آن می باشد. کلویتو و همکاران [۱۰] با هدف بهبود بخشیدن روش ترکیبی اجزای محدود و اجزای مرزی برای استفاده در اندر کنش سازه-خاک-سازه و اندرکنش خاکسازه با استفاده از آزمایش های متعدد بر روی نمونه های واقعی و آزمایشگاهی، تحقیقات خود را انجام دادند. ترومبتا و همکاران [۱۱ و ۱۲] دو نوع سازه (یک سازه کوتاه با قاب ارتجاعی و یک سازه ساخته شده با دیوار برشی و ارتفاع متوسط) را برای مطالعه اندرکنش سازه-خاک-سازه، با دستگاه سانتریفیوژ آزمایش کردند.

خرابی های اتفاق افتاده در زلزله های پیشین از جمله زلزله ی کوبه نشان داد که رفتار لرزه ای ساختمان ها، علاوه بر ویژگی ها و ابزارهای به کار گرفته شده در فرا سازه مانند سامانه های مختلف باربر جانبی [۱۳ - ۱۷]، بهره جویی از مصالح هوشمند مانند آلیاژهای حافظه دار شکلی [۱۸]، کامپوزیت های پایه پلیمری [۱۹ و ۲۰] و کامپوزیت های پایه معدنی [۲۱ و ۲۲] به پاسخ پی و خاک زیر آن نیز وابسته است. هم اکنون آئین نامه های لرزه ای مدرن از جمله آئین نامه ی زلزله ی ژاپن ملزم می کند که مدل سازی سازه ها با در نظر گرفتن اثرات کامل فراسازه، پی و خاک زیر آن انجام گیرد. اکثر سازه ها دارای یک نوع المان سازه ای هستند که با زمین در ارتباط مستقیم است. وقتی نیروهایی چون تحریک های تکیه گاهی پدیدار می شوند و بر روی این سیستم ها اثر می کنند، تغییر مکان های مربوط به سازه و زمین مستقل از هم نخواهند بود [۲۳]. روندی که طی آن حرکت های خاک بر حرکت های سازه اثر می کند و در مقابل حرکت های سازه بر حرکت های خاک اثر می گذارد را اندرکنش خاک-سازه می نامند. پاسخ سازه در برابر زلزله تحت تأثیر سه سیستم درگیر باهم است که عبارت اند از: سازه، پی و خاک زیر پی (FEMAP695) [۲۴ و ۲۵]. تحلیل اندرکنش خاک-سازه، در واقع پاسخ مجموعه ای این سه سیستم در برابر شتاب های زمین است. این موضوع در ادبیات فنی بیشتر بانام های «اندرکنش خاک-سازه» و «اندرکنش خاک، پی و سازه» مورد اشاره قرار می گیرد.

فرض مرسوم در روند تحقیقات این است که سازه را بر روی تکیه گاه های صلب شبیه سازی کرده و مورد ارزیابی لرزه ای قرار می دهند، در حالی که این فرض فقط زمانی صحیح خواهد بود که سازه روی خاک بسیار سخت یا سنگ بنا شده باشد. تحقیقات نشان داده است که اگر خاک زیر پای سازه انعطاف پذیر باشد، پاسخ لرزه ای سازه ممکن است به شدت دستخوش تغییر شود [۲۶ و ۲۷]. همچنین نشان داده شده است که وقتی یک سازه بلندمرتبه روی یک خاک نرم در نظر گرفته می شود، حرکت میدان آزاد زمین و مشخصات دینامیکی ساختمان به شدت تغییر می کند و این موجب تغییر در پاسخ لرزه ای می شود [۲۸ و ۲۹]. معمولاً در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه موجب افزایش در پیوند ارتعاشی سازه و همچنین ظرفیت استهلاک انرژی می شود [۳۰ و ۳۱]. دو روش مرسوم جهت تحلیل اندرکنش خاک-سازه در دسترس است: روش مستقیم و روش زیرسازه. در روش مستقیم، خاک، پی و سازه به صورت یک سیستم واحد شبیه سازی و تحلیل می شوند [۳۲] در حالی که در روش زیرسازه، خاک-سازه به صورت دو سیستم مجزا شبیه سازی و تحلیل می شوند و اثرات اندرکنش خاک-سازه با استفاده از توابع امپدانس (Impedance function) در نظر گرفته می شود [۳۳]. با وجود اینکه مطالعات زیادی بر روی تأثیر دینامیکی خطی اندرکنش خاک-سازه روی پاسخ الاستیک و غیر الاستیک سازه ها انجام گرفته [۳۴-۳۷]، بررسی های معدودی بر روی تأثیر اندرکنش خاک-سازه و ساختگاه روی سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک صورت پذیرفته است [۳۸-۴۰]. باور عمومی بر این است که در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در تحلیل ها، موجب صرفه اقتصادی در طرح می شود. در حالی که تحقیقاتی که تا امروز صورت گرفته، به نتایجی متناقض با این باور رسیده اند و این تناقض زمانی که رفتار غیرخطی سازه مدنظر باشد، محسوس تر است [۴۱]. اثرات اندرکنش خاک-سازه موجب کاهش طلب

نیرو روی سازه می‌شوند. هرچند وقتی رفتار غیرخطی سازه مدنظر قرار می‌گیرد اثرات افزایشی انتقالی و دورانی ممکن است طلب تغییرمکان سازه را افزایش دهند [۴۲].

علاوه بر این، اندرکنش خاک-سازه و شرایط خاک که بر مطابقت رفتار پی با سازه تأثیر می‌گذارند، به‌طور کامل در چارچوب ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ای موردبررسی قرار نگرفته‌اند. با وجود اینکه برخی مطالعات با ارائه منحنی‌های شکنندگی ساختمان‌ها با شرایط مختلف خاک، سعی کرده‌اند اثرات محلی ساختگاه را در نظر بگیرند [۴۳]. تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر روی عملکرد مورد انتظار از سازه، توجه زیادی را به خود جلب نشده است. خلاصه‌ای از مطالعاتی که تأثیرات اندرکنش خاک-سازه را روی تحلیل شکنندگی ساختمان‌ها در نظر گرفته‌اند، در این قسمت ارائه می‌شود.

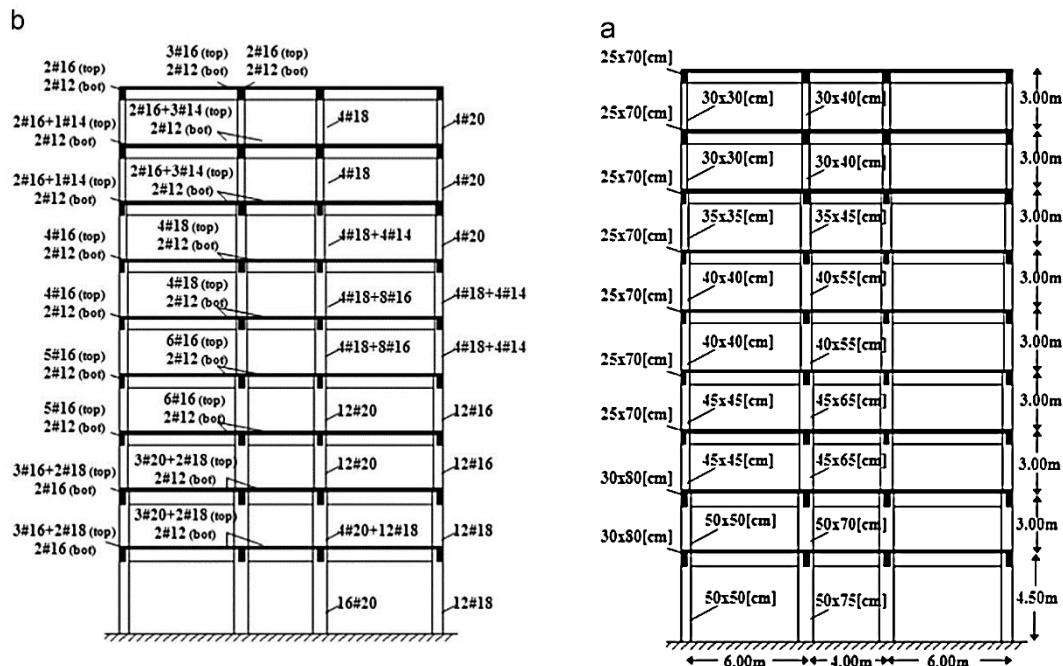
سائز و همکاران، تأثیر اندرکنش خاک-سازه دینامیکی غیرخطی روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها را با استفاده از یک تحلیل دینامیکی مقایسه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه آن‌ها یک سیستم سازه-خاک غیرخطی کامل که تمام اثرات غیرخطی اعم از خاک، سازه و سطح تماس آن‌ها را در نظر می‌گرفت، با یک مدل‌سازی دومرحله‌ای که از اثرات میرایی انتشاری صرف‌نظر می‌شد، ولی رفتار غیرخطی خاک را با تغییر در مشخصات ارتعاش پایه و اعمال آن در تکیه‌گاه‌های صلب در نظر می‌گرفت، مورد مقایسه قرار گرفتند. آن‌ها مشاهده کردند که با در نظرگیری انعطاف‌پذیری خاک و پدیده اندرکنش خاک-سازه می‌توانند به نتایج مطلوب و بعضاً نامطلوب در رفتار سازه دست یابند و این وابسته به مشخصات دینامیکی خاک، سازه و همچنین مشخصات زمین‌لرزه از جمله محتوای فرکانسی، دامنه و مدت زمان آن است [۴۴]. راجیوف-تسمه‌میرام تأثیر اندرکنش خاک-سازه روی شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه غیر شکل‌پذیر را با تأکید بر عدم قطعیت‌های موجود در مشخصات خاک، پارامترهای هندسی پی و مشخصات زمین‌لرزه ورودی، مورد ارزیابی قرار دادند. برای شبیه‌سازی اندرکنش بین پی سطحی و سطح خاک در آن مطالعه، از مدل تیر بر روی پی غیرخطی وینکلر استفاده شد که قادر است اثرات گهواره‌ای و لغزشی، همچنین نشست دائمی پی بر روی خاک خطی و غیرخطی را در نظر بگیرد. نشان داده شد که منحنی‌های شکنندگی مدل‌هایی که در آن‌ها اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته شده، با منحنی‌های مربوط به مدل‌های بدون اندرکنش خاک-سازه متفاوت است. همچنین پارامتر عدم قطعیت حاکم بر نتایج، پارامتر عدم قطعیت مربوط به زمین‌لرزه ورودی بود [۴۵]. پیتیلایس و همکاران، توابع شکنندگی وابسته به زمان برای قاب‌های بتن‌آرمه که بر اساس آئین‌نامه‌های مختلف طرح‌شده‌اند را ارائه شده‌اند که در آن‌ها اثرات اندرکنش خاک-سازه نیز در نظر گرفته شده است [۴۶]. اثرات اندرکنش خاک-سازه دو ساختمان مجاور تحت اثر تحریک‌های تکیه‌گاهی توسط ماهوتیان صورت گرفت. نتایج وی نشان داد که پدیده اندرکنش خاک-سازه باعث افزایش زمان تناوب گردیده و در نظر گرفتن این پدیده عموماً باعث افزایش برش پایه و تغییرمکان افقی می‌گردد. این افزایش بستگی به فاصله بین دو ساختمان داشته و پدیده اندرکنش خاک-سازه ممکن است برش پایه ماکزیمم را تا دو برابر برش پایه ماکزیمم ساختمان تک افزایش دهد [۴۷]. مشاهده شد که محققین نشان داده‌اند که در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه موجب تغییر در عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار سازه می‌شود و پتانسیل خرابی را افزایش می‌دهد و لازم است در مطالعاتی که با اهداف ارزیابی لرزه‌ای انجام می‌شوند، اثرات اندرکنش خاک-سازه دیده شود.

این پژوهش با نگرش به پژوهش‌های پیشین، به‌منظور درک بهتر در زمینه‌ی اثرات اندرکنش خاک-سازه بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه، انجام گرفته است. در این مطالعه، اثرات اندرکنش خاک-سازه با استفاده از روش مستقیم تک‌مرحله‌ای انجام شده است. برای این منظور، رفتار خطی و غیرخطی خاک و اثرات محلی ساختگاه در ایجاد مدل‌ها در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی سهم اثرات هرکدام از پدیده‌های اندرکنش خاک-سازه و اثرات محلی ساختگاه، یک روش دومرحله‌ای غیرهمبسته نیز در نظر گرفته شده است که اثرات محلی ساختگاه را روی سازه با تکیه‌گاه‌های صلب مورد ارزیابی قرار می‌دهد و از اثر اندرکنش خاک-سازه صرف‌نظر می‌نماید. یک سازه ۹ طبقه بتن‌آرمه با سیستم قاب خمشی که بر اساس الزامات لرزه‌ای با سطح خطر پایین طراحی شده است، به‌عنوان نمونه مرجع انتخاب شده است. منحنی‌های شکنندگی به‌صورت تابعی از حداکثر شتاب زمین‌بر روی بستر سنگی PGA برای مدل‌های با تکیه‌گاه صلب (که در دو حالت اثرات محلی ساختگاه را در نظر می‌گیرد و صرف‌نظر می‌کند)

و مدل‌های اندرکنش خاک-سازه بر اساس استخراج احتمالاتی نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی سازه فرضی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees به دست آمده‌اند.

۲- مدل‌سازی

ساختمان مورد مطالعه، یک ساختمان بتن‌آرمه با سیستم قاب خمشی MRF دارای ۹ طبقه و ۳ دهانه است که به‌عنوان یک سازه میان‌مرتبه به حساب می‌آید. این سازه بر اساس فرض شکل‌پذیری پایین و با سطح خطر لرزه‌ای پایین طراحی شده است. شکل ۱ نمای شماتیک از این سازه را بر روی تکیه‌گاه صلب به نمایش گذاشته است [۴۵]. در جدول ۱ مشخصات اصلی آن که عبارت‌اند از جرم و سختی طبقه‌ها، پیروید اصلی ارتعاشی و مقاومت بتن و فولاد نشان داده شده‌اند.



شکل ۱ نمایش شماتیک مشخصات هندسی و سازه‌ای سازه‌ی MRF مرجع مورد استفاده برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، (الف) سطح مقاطع و (ب) جزئیات آرماتور گذاری [۴۵]

جدول ۱ مشخصات اصلی سازه مرجع

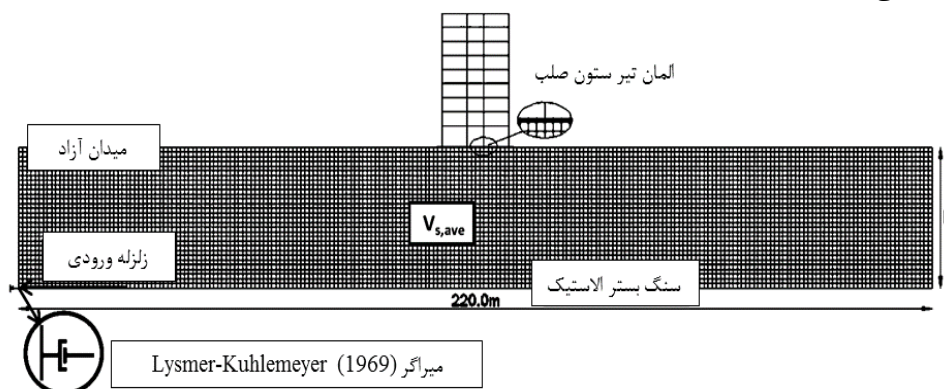
f_y (Pa)	f_c (Pa)	پیروید مودهای سازه (sec)			جرم طبقه‌های سازه (Ton)								
					اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم
				مود اول	مود دوم	مود سوم	۳۸	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
					سختی طبقه‌های سازه ($\text{Tonf/m} \times 10^5$)								
					اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم
۴۰۰	۱۴	۰/۸۹	۱/۲۳	۱/۹۸	۴۱	۴۱	۲۹	۲۹	۲۳	۲۳	۱۷	۱۷	۱۷

مدل‌سازی عددی سازه با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود OpenSees انجام گرفته است [۴۸]. برای شبیه‌سازی المان‌های تیر-ستون، از فرمول‌بندی نیرویی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی سطح مقطع، از پلاستیسیته مصالح گسترده در طول المان استفاده شده که بر اساس روش تار (Fiber) میسر گردیده است. برای بیان رفتار تارهای بتن، از مدل اسکات-پارک اصلاح‌شده بهره گرفته شده است [۴۹]. جهت در نظرگیری اثرات محصورشدگی، بتن هسته و بتن پوشش با پارامترهای مصالح متفاوت از هم در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس کار

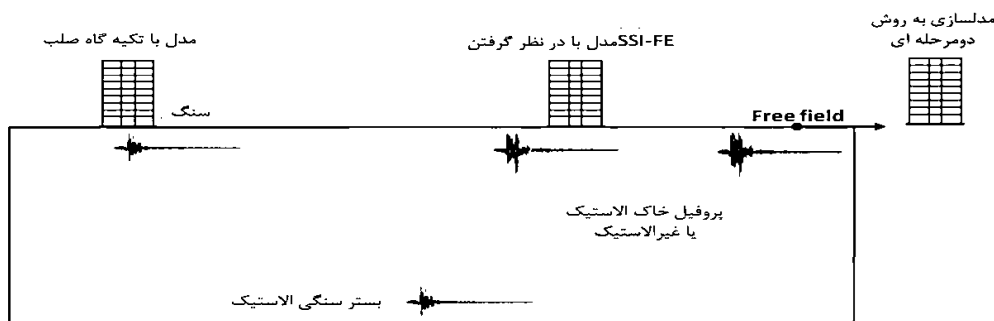
تحقیقاتی کارسن-جیرسا [۵۰]، از مصالح تک‌محوری برای ساخت مصالح تک‌محوری بتن اسکات-پارک استفاده شده که دارای زوال سختی بارگذاری-باربرداری خطی است و مقاومت کششی آن صفر است. آرماتورهای فولادی با استفاده از مصالح تک‌محوری شبیه‌سازی شده که یک مصالح دوخطی تک‌محوری فولادی است و در آن سخت شدگی سینماتیک در نظر گرفته می‌شود.

اثرات اندرکنش خاک-سازه با روش یک مرحله‌ای مستقیم در نظر گرفته شده است که هم‌زمان اثرات اینرسی و اندرکنش سینماتیک را در نظر می‌گیرد [۲۳]. شکل ۲ به صورت شماتیک، مدل اجزاء محدود اندرکنش خاک-سازه ساخته شده در تحقیق حاضر را به نمایش می‌گذارد. خاک به صورت دوبعدی با دو درجه آزادی در هر گره شبیه‌سازی گردید و جهت ساخت مدل آن، از المان ایزوپارامتریک چهارضلعی با فرمول‌بندی کرنش صفحه‌ای استفاده شد. جهت در نظر گرفتن سختی نیم فضای زیرسازه، از میراگر لیسمر-کوهلمایر [۵۱] در زیر پروفیل خاک استفاده شد. در این پژوهش به منظور دستیابی به دقت بالاتر و بهره‌جویی دوچندان از توانایی‌های نرم‌افزار اجزاء محدود OpenSees، از مدل‌های کلاسیک فنر و کمک فنر معادل برای خاک استفاده نشده است. سرعت موج برشی در سنگ بستر الاستیک، برابر با ۹۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. قابل توجه است که به علت اینکه یک نیم فضای الاستیک در مدل وارد شده است، می‌توان زلزله ثبت‌شده بر روی بستر سنگی را در پای سازه اعمال شد [۵۲]. شبکه مورد نظر در تحلیل‌ها، دارای طول ۲۲۰ متر با عمق متغیر H است. هندسه مش‌بندی اجازه می‌دهد که تعداد المان کافی در طول موج برشی انتخابی جای بگیرد. با در نظر گرفتن فرکانس حداکثر برابر با ۱۰ هرتز، یک گسسته سازی متراکم برای المان بندی با ابعاد ۱ متر در ۱ متر در نظر گرفته شد. یک پی پیوسته با صلبیت بالا جهت اتصال خاک و سازه در نظر گرفته شد.

شکل ۳ به صورت شماتیک روش‌های شبیه‌سازی مورد استفاده را نشان می‌دهد. اولین مجموعه از تحلیل‌ها بر روی سازه با تکیه‌گاه‌های صلب که روی سنگ در نظر گرفته شده بود، با اعمال زمین‌لرزه ثبت‌شده بر روی سنگ‌بستر، انجام گرفتند. تأثیر اندرکنش خاک-سازه و اثرات محلی ساختگاه روی پاسخ لرزه‌ای و شکنندگی ساختمان برای هر دو حالت رفتار خاک خطی و غیرخطی با در نظر گرفتن عمق ۳۰ متر برای خاک مورد ارزیابی قرار گرفتند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه موجب افزایش دوره تناوب سازه نسبت به حالت با تکیه‌گاه صلب شد و سیستم، انعطاف‌پذیرتر گردید. بخصوص، پی‌یود اصلی کرنش‌های کم سیستم اندرکنش خاک-سازه، از ۰/۸۹ ثانیه (جدول ۱) که نظیر پی‌یود اصلی مدل با تکیه‌گاه‌های صلب است، به ۱/۴۶ ثانیه افزایش می‌یابد. علاوه بر این، یک روش دو مرحله‌ای غیرهمبسته نیز توسط OpenSees در نظر گرفته شد که در آن، یک تحلیل پاسخ لرزه‌ای یک‌بعدی یک پروفیل خاک مفروض انجام شد و زمین‌لرزه میدان آزاد به دست آمده، به عنوان ورودی در پای سازه با تکیه‌گاه صلب اعمال گردید. در این روش، اثرات محلی ساختگاه وارد می‌شوند، ولی از اثرات اندرکنش خاک-سازه صرف نظر می‌گردد. در نتیجه می‌توان درکی از میزان سهم اثرات محلی ساختگاه و اندرکنش خاک-سازه روی تحلیل شکنندگی به دست آورد.

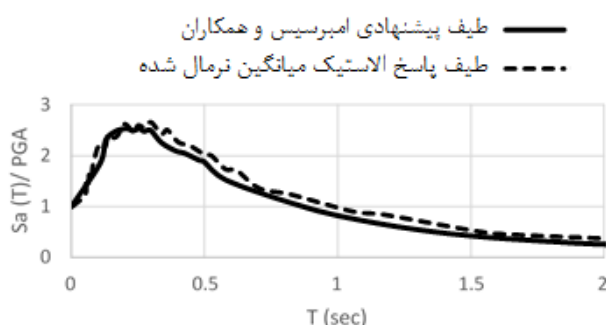


شکل ۲ مدل اجزاء محدود سیستم خاک-سازه در نرم‌افزار OpenSees [۴۸]



شکل ۳ نمایش شماتیک روش‌های مدل‌سازی تأثیر اندرکنش خاک-سازه و اثرات ساختگاه با رفتار خاک خطی یا غیرخطی [۵۳]

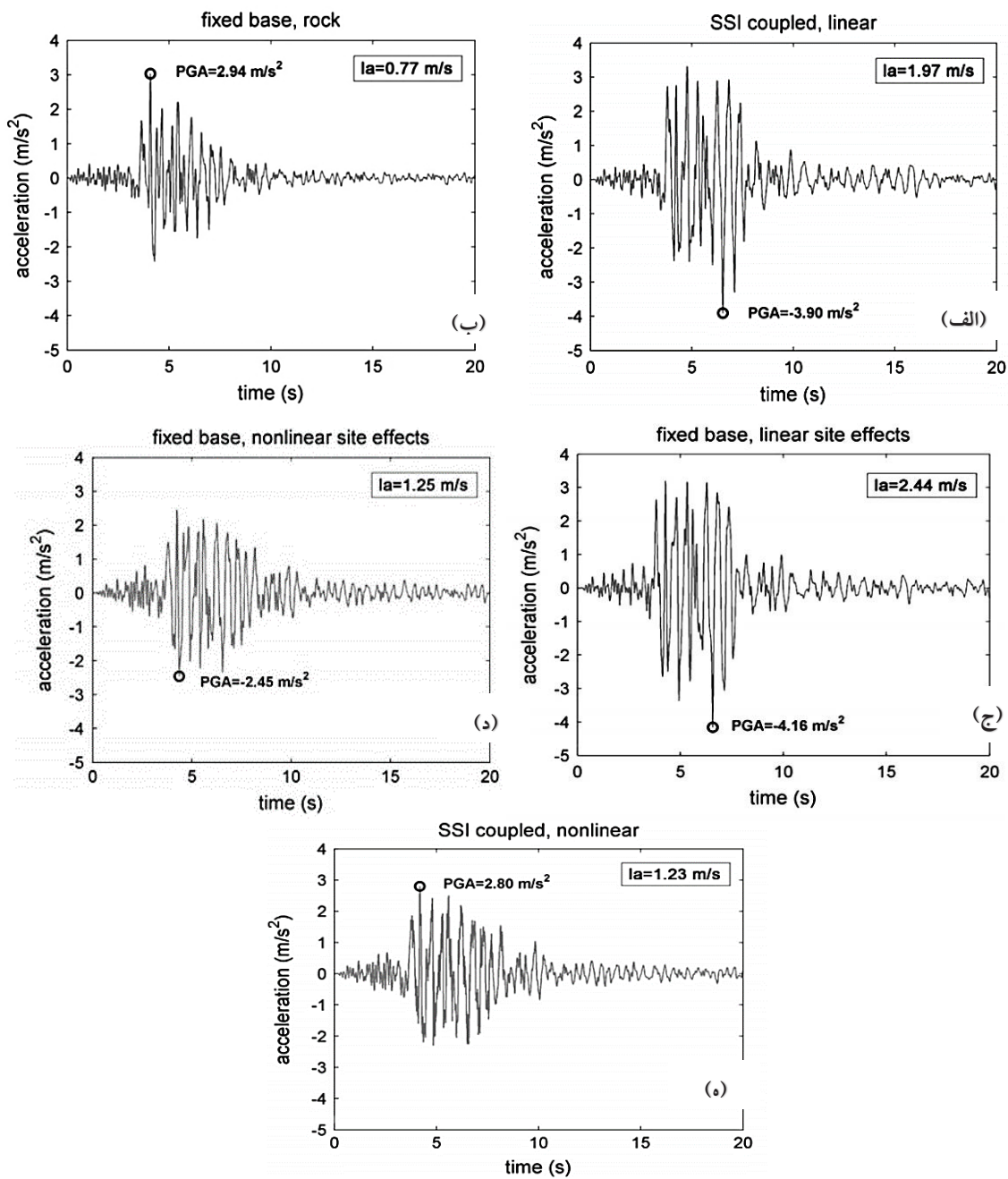
مجموعه‌ای شامل ۱۵ رکورد ثبت‌شده بر روی سنگ بستر از بانک اطلاعاتی زمین‌لرزه اروپا (<http://www.isesd.hi.is>) بر روی سنگ‌بستر انتخاب شدند تا از هرگونه عدم قطعیت‌های مربوط به اثرات خاک اجتناب شود. معیار اصلی در انتخاب، میانگین شتاب طیفی مجموعه است که باید در محدوده $0.2 < T < 0.4$ ثانیه نسبت به طیف هدف تعریف‌شده بر اساس رابطه کاهندگی ارائه‌شده توسط امبرسیس و همکاران [۵۳] حداقل باشد.



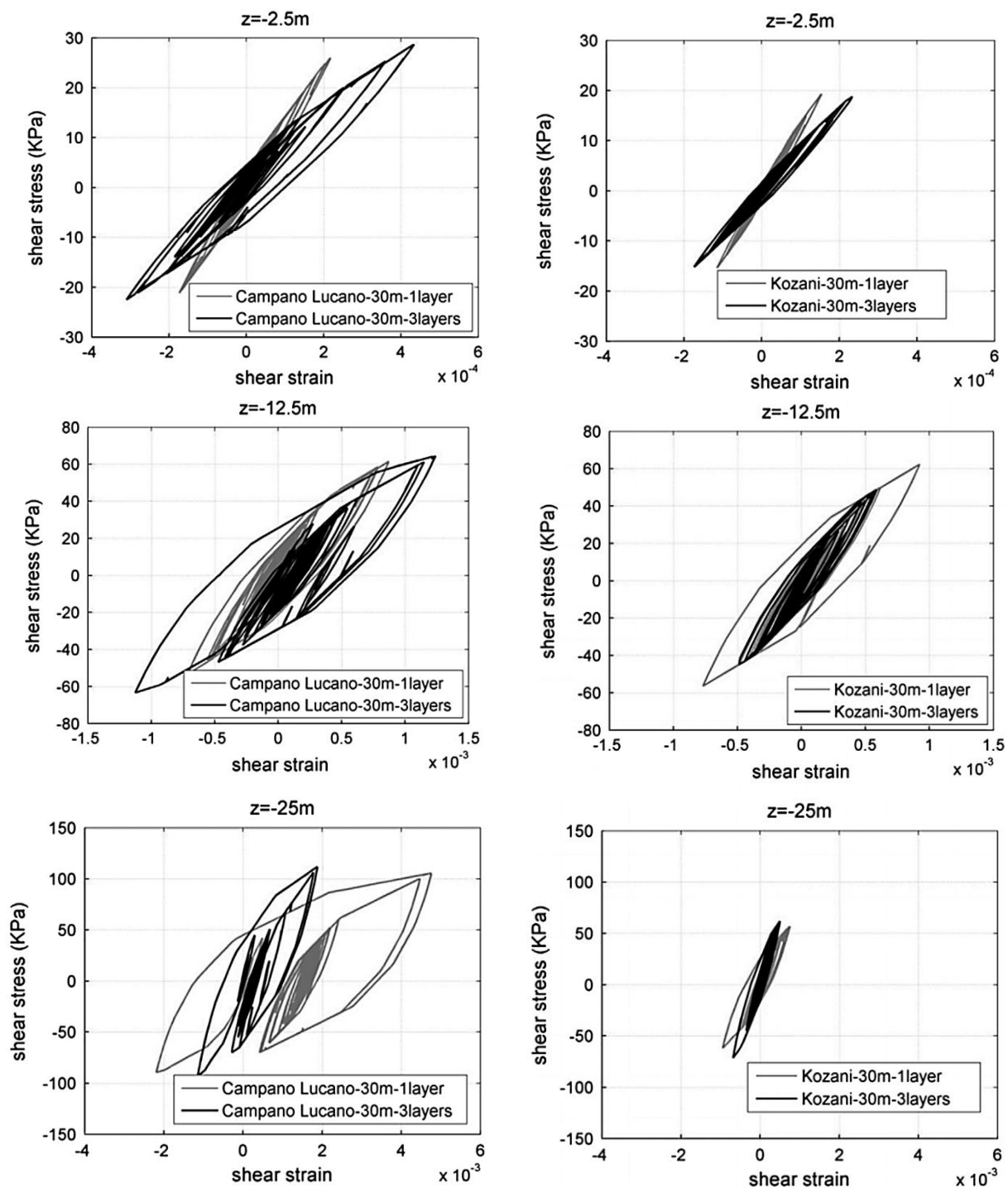
شکل ۴ طیف پاسخ الاستیک میانگین نرمال شده داده‌های زلزله استفاده‌شده در مقایسه با طیف پیشنهادی امبرسیس و همکاران [۵۳]

۳- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی

با استفاده از یک شتاب‌نگاشت آزمایشی، یک تحلیل دینامیکی مقایسه‌ای با مدل‌های مختلف (اندرکنش خاک-سازه همبسته و مدل با تکیه‌گاه‌های گیردار با اثرات ساختگاه که در آن خاک در دو حالت خطی و غیرخطی در نظر گرفته شد) انجام گرفت تا تأثیر نسبی اندرکنش خاک-سازه و اثرات ساختگاه روی پاسخ لرزه‌ای با شرایط خاک خطی و غیرخطی نشان داده شود. در این تحلیل، شتاب‌نگاشت زلزله فریولی [۴۲] که به بیشینه شتاب زمین PGA برابر با $0.3g$ مقیاس گردیده بود، مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۵ نتایج به صورت تاریخچه زمانی شتاب در پایه سازه برای حالت‌های مختلف تحلیل، همراه با تاریخچه میدان آزاد شتاب زمین نشان داده شده‌اند. در هر یک از گراف‌ها، شدت آریاس (I_a) نیز نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که دامنه شتاب در مدل‌هایی که سیستم خاک-سازه را با خاک، خطی در نظر گرفته‌اند، نسبت به حالت حرکت میدان آزاد افزایش یافته است. این افزایش دامنه در مدلی با پای صلب که اثرات ساختگاه را در نظر گرفته، شدیدتر است. در مقابل، وقتی اثرات غیرخطی خاک در نظر گرفته شده است، پاسخ لرزه‌ای در پای سازه نسبت به حرکت میدان آزاد، کاهش یافته است. می‌توان انتظار داشت که علت این موضوع، میرایی هسترزیس در سیستم‌های غیرخطی است که معمولاً تمایل دارند مقادیر شتاب را در سطح زمین به نسبت افزایش کرنش برشی، کاهش دهند. وقتی اثرات اندرکنش خاک-سازه همراه با خاک غیرخطی در نظر گرفته شده است، کاهش دامنه نسبت به مدل با پایه صلب و اثرات ساختگاه، کاهش دامنه شتاب بیشتر مشاهده می‌شود که علت آن بروز یک میرایی اضافی در سطح تماس خاک - پی است. شکل ۶ نیز حلقه‌های هسترزیس تنش-کرنش برای عمق‌های مختلف در پروفیل‌های همگن و لایه‌ای ۳۰ متری را نشان می‌دهد.



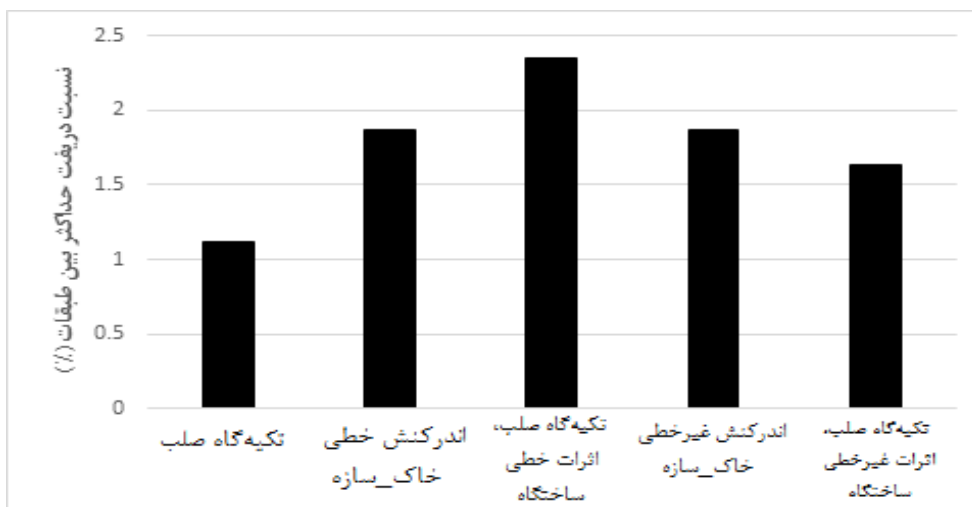
شکل ۵ تاریخچه‌های زمانی شتاب پای سازه برای مدل‌های مختلف تحلیل شده با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، اثرات ساختگاه و اثرات غیرخطی خاک برای زلزله فریولی



شکل ۶ حلقه های هسترزیس تنش-کرنش برای عمقهای مختلف در پروفیل‌های همگن و لایه ای ۳۰ متری

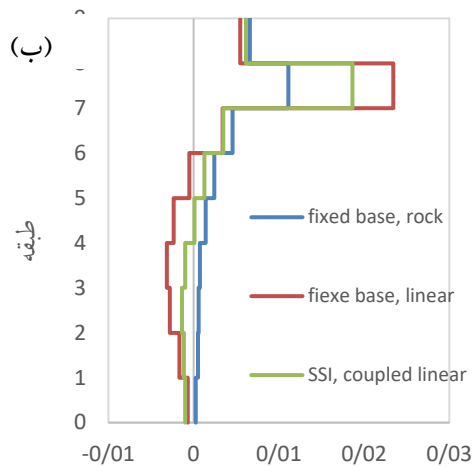
شکل ۶ حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات برای مدل‌های مختلف تحت زلزله فریولی نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر تغییرمکان نسبی در مورد مدل خطی با تکیه‌گاه صلب و اثرات ساختگاه مشاهده می‌شود، درحالی‌که کمترین مقادیر در مورد سازه با تکیه‌گاه صلب و بدون اثرات ساختگاه ظاهر شده است. به نظر می‌رسد که برای حالت غیرخطی طلب تغییرمکان نسبی به‌دست آمده به نسبت افزایش مقادیر شتاب افزوده نمی‌شود. با وجود اینکه دامنه تاریخچه شتاب‌نگاشت‌ها برای سیستم‌های غیرخطی نسبت به حرکت میدان آزاد زمین کاهش یافته است، مقادیر تغییرمکان

نسبی طبقات نظیر در این مدل‌ها بیشتر است. این موضوع با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه نسبت به حالت با تکیه‌گاه صلب و اثرات ساختگاه، شدیدتر می‌شود که می‌تواند ناشی از طلب تغییر مکان افزایشی اعمال شده در فصل مشترک خاک-پی است. وقتی I_a به‌عنوان یک مقیاس از شدت زمین‌لرزه در نظر گرفته می‌شود، همبستگی بین داده‌های مربوط به طلب تغییر مکان نسبی طبقات، بهتر می‌شود. این موضوع معقول به نظر می‌رسد چرا که I_a علاوه بر مشخص کردن شدت زمین‌لرزه (به‌عنوان حداکثر شتاب زمین PGA)، محتوای انرژی آن را نیز مدنظر قرار می‌دهد.

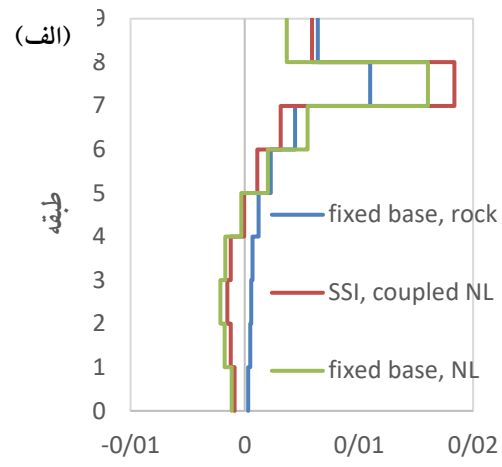


شکل ۷ نسبت دریفت حداکثر بین طبقات (%) برای حالت‌های مختلف تحلیل شده با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک_سازه، اثرات ساختگاه و اثرات غیرخطی خاک برای زلزله فریولی

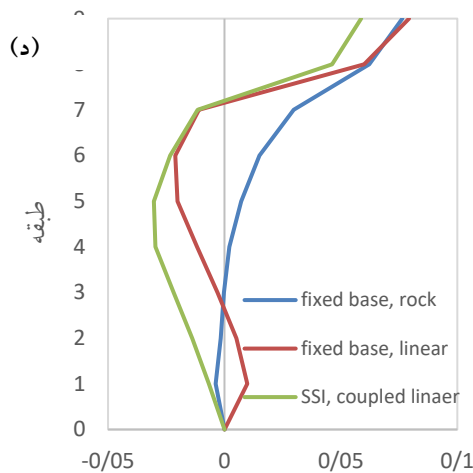
در شکل ۸ توزیع تغییر مکان‌های طبقات و تغییر مکان‌های نسبی طبقات در ارتفاع سازه در زمان وقوع حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقات، نشان داده شده تا رفتار لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای مختلف بیشتر مورد مطالعه قرار بگیرد. در تمام سیستم‌ها، مکانسیم حرکت جانبی پلاستیک کلی رخ می‌دهد و حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه در طبقه هشتم از ساختمان رخ می‌دهد. بر اساس شکل ۸ برای سیستم دارای تکیه‌گاه صلب که روی بستر سنگی قرار داده شده است، مدهای بالا نقش مهمی ندارند. هرچند برای سیستم خاک-سازه و سیستم با تکیه‌گاه صلب که اثرات ساختگاه را لحاظ شده است، مود دوم در طبقات فوقانی نقش بازی کرده و در نتیجه به مقادیر بیشتر تغییر مکان نسبی طبقات نسبت به حالت مدل با تکیه‌گاه صلب بر روی بستر سنگی می‌انجامد.



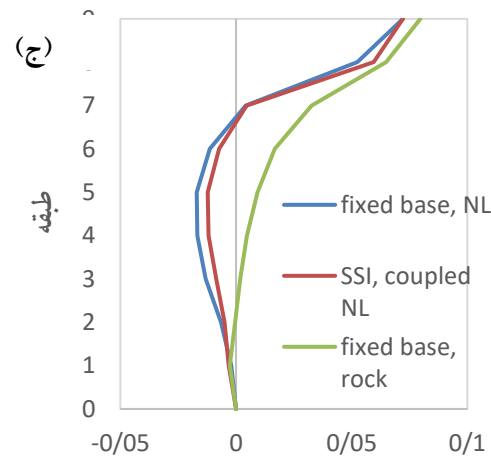
دریفت درون طبقه در زمان وقوع بیشترین مقادیر تغییر مکان نسبی



دریفت درون طبقه در زمان وقوع بیشترین مقادیر تغییر مکان نسبی



تغییر مکان در زمان وقوع بیشترین مقادیر تغییر مکان نسبی



تغییر مکان در زمان وقوع بیشترین مقادیر تغییر مکان نسبی

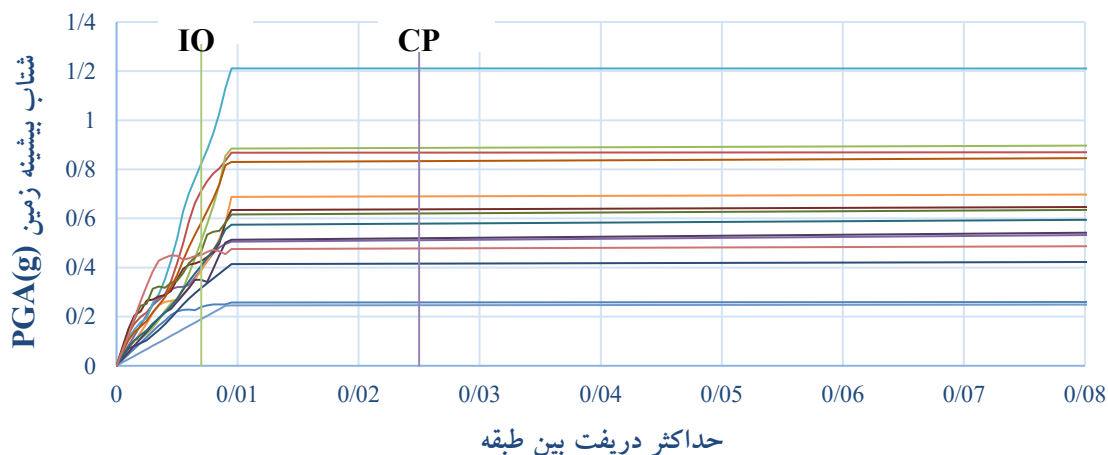
شکل ۸ دریفت طبقات ((الف) و (ب)) و تغییر مکان ((ج) و (د)) طبقات در زمان وقوع بیشترین مقادیر تغییر مکان نسبی برای رفتار خاک خطی (linear) و غیرخطی (NL) در زلزله فریولی با حداکثر شتاب $0.1g$.

۳-۱- تحلیل دینامیکی افزایشی

برای به دست آوردن عملکرد لرزه‌ای و ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه مفروض با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه و اثرات ساختگاه، از تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده شده است. تحلیل دینامیکی افزایشی (Incremental Dynamic Analysis) یک روش تحلیل قدرتمند است، که شامل مجموعه‌ای از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با مجموعه‌ای از رکوردهای زمین‌لرزه مقیاس شده با ضریب است، به طوری که شدت این زلزله‌ها باید به صورت مناسبی مقیاس شوند تا تمام محدوده رفتاری الاستیک تا ناپایداری دینامیکی کلی سازه را پوشش دهند [۵۴ و ۵۵]. با درون‌یابی نقاط گسسته پارامتر آسیب مهندسی (Engineering demand parameters) و یک واحد شدت مقیاس‌پذیر (Intensity Measure)، منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی مربوط به پاسخ سازه به دست می‌آیند که

رابطه بین تقاضا و آسیب را بیان می‌کنند. در این مطالعه، حداکثر دررفت بین طبقات به صورت پارامتر آسیب در نظر گرفته شده است که به خوبی با ناپایداری دینامیکی و آسیب سازه‌ای در ارتباط است. شتاب بیشینه ثبت شده زمین بر روی بستر سنگی و نه بر روی میدان آزاد با در نظر گرفتن اثرات ساختگاه به عنوان واحد شدت انتخاب شد. برای مدل‌های مختلف مورد مطالعه، تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از ۱۵ رکورد زلزله انجام گرفت. برای مدل با تکیه‌گاه‌های صلب روی سنگ‌بستر، از یک الگوریتم پیشرفته به نام *hunt and fill* استفاده شد [۵۴-۵۶].

با درون‌یابی زوج مرتب‌های شتاب بیشینه زمین و حداکثر دررفت بین طبقه، برای هر رکورد، ۱۵ منحنی پیوسته تحلیل دینامیکی افزایشی برای هر مدل سازه‌ای به دست آمد. دو حالت حدی قالب در حداکثر نسبت دررفت بین طبقات، مربوط به استفاده بی‌وقفه (IO) و آستانه فروریزش (CP) انتخاب شدند. حالت حدی اول بر اساس آئین‌نامه HAZUS برای ساختمان‌های بتن‌آرمه که با الزامات لرزه‌ای مربوط به خطر پایین لرزه‌ای طراحی شده، برابر با ۰/۰۰۵ انتخاب گردید [۴۳]. حالت حدی دوم بر اساس منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی میانه تعریف شد که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. اساس این ایده این است که حد فروریزش در نقطه‌ای قرار بگیرد که منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی در حال نرم شدن به سمت خط افقی است، ولی از نظر مقادیر حداکثر دررفت بین طبقه به قدری پایین باشد که هنوز بتوان به مدل سازه‌ای اعتماد کرد. بر این اساس، حد فروریزش برابر با ۰/۰۲۲۵ برای منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی سازه با تکیه‌گاه‌های صلب در نظر گرفته شد. برای حالت‌هایی که اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته شده بود نیز، جهت قابل مقایسه بودن، همین مقدار در نظر گرفته شد.

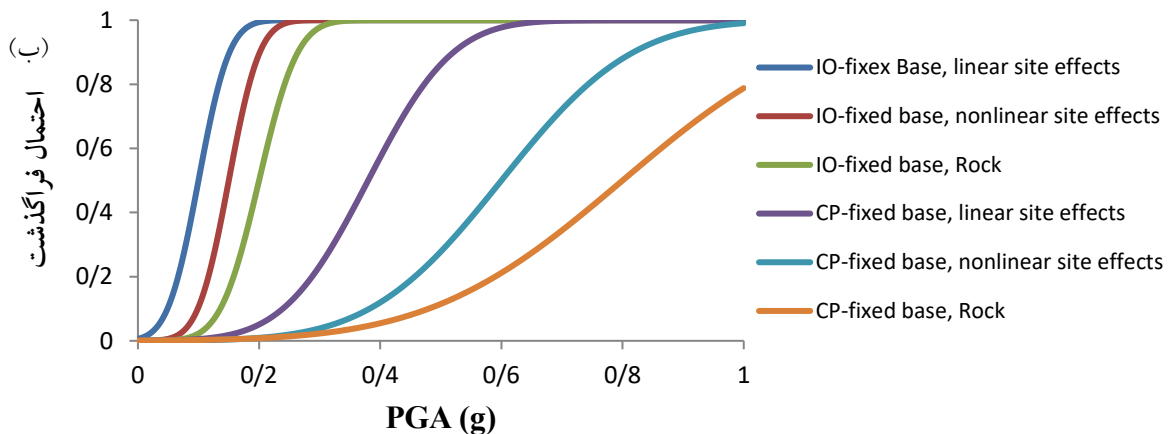
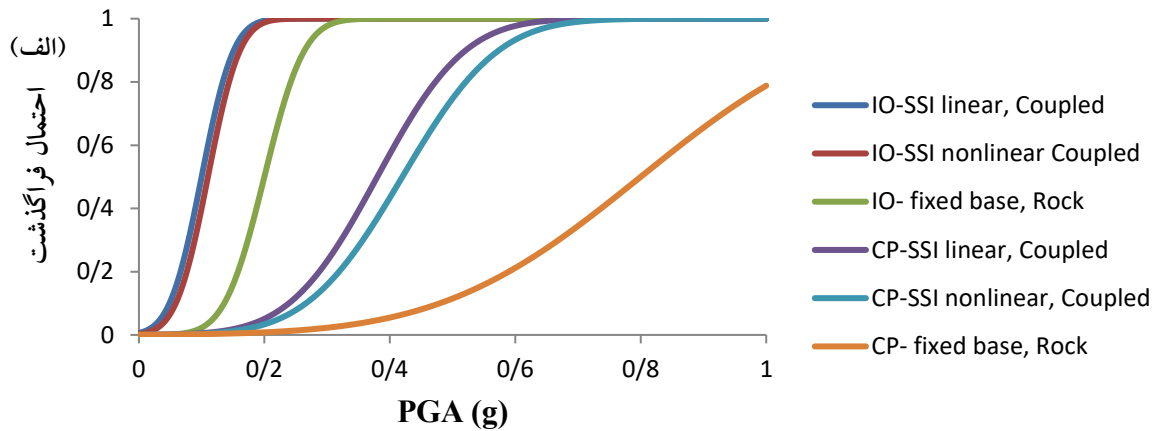


شکل ۹ منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی برای نمونه سازه بر روی بستر سنگی

۳-۲-۳ منحنی شکنندگی

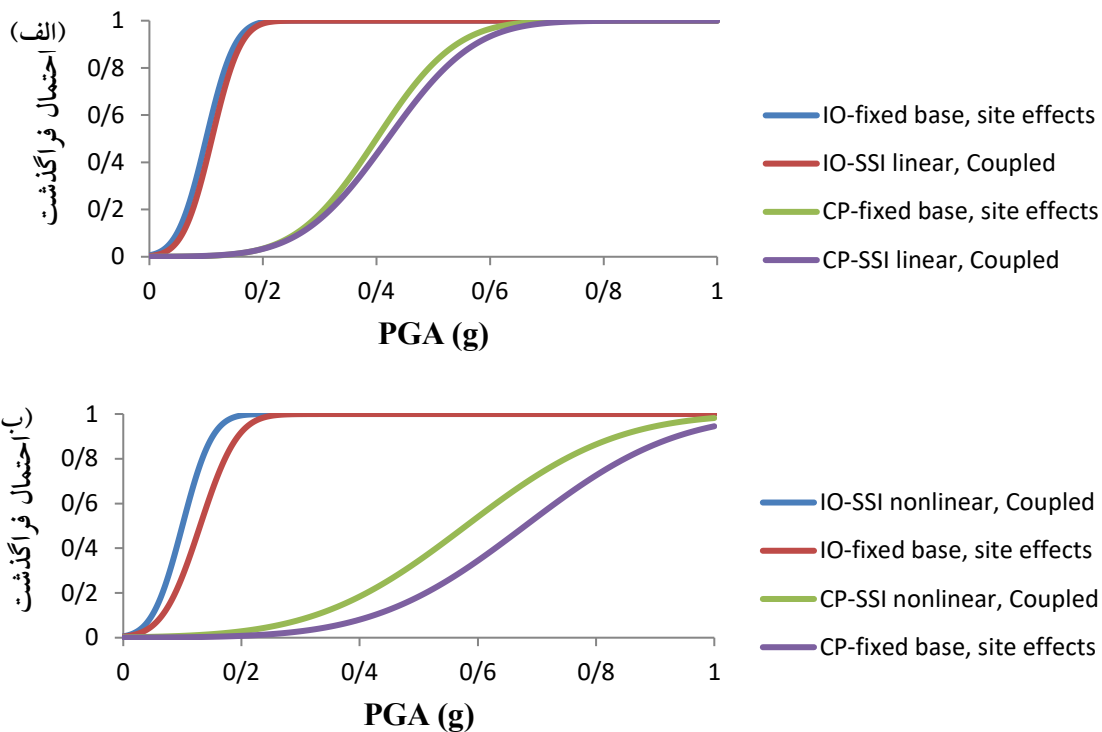
یک منحنی شکنندگی، یک نمایش شماتیک از رابطه بین احتمال فراگذشت از یک شدت خرابی مشخص (مثل IO یا CP) و شدت زمین‌لرزه است.

شکل ۱۰ دیاگرام‌های مقایسه‌ای شتاب بیشینه زمین و حداکثر دررفت بین طبقه مربوط به مدل‌های دربرگیرنده اندرکنش خاک-سازه و مدل با تکیه‌گاه‌های صلب با شرایط خاک خطی و غیرخطی را نشان می‌دهد. لازم به توجه است که وقتی خاک با رفتار الاستیک مدل شده است، در ترازهای شتاب بیشینه زمین کمتر از حدود ۰/۵g، سازه با تکیه‌گاه صلب دارای دررفت‌های بزرگ‌تری نسبت به مدل اندرکنش خاک-سازه است. با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی خاک، نتایج برعکس می‌شود و مدل دارای اندرکنش خاک-سازه، برای تمام محدوده شتاب بیشینه زمین، دررفت‌های بزرگ‌تر به دست می‌دهد. در این مقاله، برای تعیین منحنی‌های شکنندگی، حدود خرابی بر اساس دستورالعمل HAZUS و مقادیر پیشنهادی آن تعیین شده است.



شکل ۱۰ مقایسه منحنی‌های شکنندگی برای (الف) سازه با تکیه‌گاه‌های صلب روی سنگ با مدل سازه اندرکنش خاک-سازه با رفتار خطی و غیرخطی خاک و (ب) با سازه‌های نظیر با تکیه‌گاه‌های صلب که اثرات ساختگاه را در نظر می‌گیرد.

بر اساس شکل ۱۰، تفاوت بسیار مهمی بین حالت‌های الاستیک و غیرالاستیک وجود دارد. وقتی رفتار خاک بصورت الاستیک در نظر گرفته شده است، حالتی که SSI و اثرات ساختگاه را مستقیماً در نظر گرفته اند، با حالتی که دارای تکیه گاه‌های صلب بوده و اثرات ساختگاه را بصورت غیرمستقیم وارد نموده، تفاوتی ندارد. از طرفی، وقتی خاک با رفتار غیرخطی شبیه سازی شده است، حالتی که SSI و اثرات ساختگاه را مستقیماً در نظر گرفته، شدیداً آسیب پذیرتر از حالت با تکیه گاه‌های صلب و اثرات ساختگاه غیرمستقیم است. در نتیجه، با وجود اینکه هر دوی مدل‌های غیرخطی SSI و تکیه گاه صلب دارای کاهندگی بیشتر اند و کرنش‌های بیشتری شده اند، در مدل SSI، انتقالها و دورانهای اضافی در سطح مشترک خاک و سازه بوجود می‌آید و موجب افزایش تقاضای تغییرمکان در سازه می‌شود.



شکل ۱۱ منحنی‌های شکنندگی برای سازه با تکیه‌گاه‌های صلب با در نظر گرفتن اثرات ساختگاه اندرکنش خاک-سازه با الف) رفتار خاک خطی و ب) رفتار خاک غیرخطی

شکل ۱۱ منحنی‌های شکنندگی مدل‌های مختلف اندرکنش خاک-سازه اعم از خطی و غیرخطی و سازه با تکیه‌گاه صلب را که اثرات ساختگاه خطی و غیرخطی در نظر گرفته شده است را مورد مقایسه قرار می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای هر دو حالت عمق زیاد و کم، در نظر گرفتن اثرات ساختگاه موجب تشدید اثرات غیرخطی سیستم خاک سازه شده و آسیب پذیری را افزایش می‌دهد. این موضوع قابل پیش بینی بود چرا که در قسمتهای قبل نشان داده شد که پروفیل‌های خاک لایه لایه موجب تشدید بیشتر نسبت به حالت خاک همگن می‌شدند. افزایش در شکنندگی در اثر در نظر گرفتن اثرات ساختگاه، در حالت حدی CP برای هر دو حالت عمق خاک، شدیدتر می‌شود، ولی در مورد خاک عمیقتر، شدت آن بیشتر است. با در نظر گرفتن اثرات عمق خاک و مقایسه مقادیر میانه، به نظر می‌رسد که خاک عمیق (هم لایه ای و هم همگن) نسبت به خاک کم عمق، آسیب پذیری سازه را کاهش می‌دهد. رفتار عمومی به این شکل است که افزایش عمق خاک موجب کاهش پاسخ و در نتیجه شکنندگی سازه در هر دو حالت خاک همگن و لایه ای است. این محتملا ناشی از افزایش کاهندگی خاک در اثر افزایش عمق آن است که موجب کاهش پاسخ لرزه ای در پای سازه می‌شود و عموماً موجب کاهش تقاضای دررفت در مقایسه با پروفیل‌های کم عمق می‌باشد. آن‌طور که مشخص است، مدل اندرکنش خاک-سازه که در آن اثرات غیرخطی خاک وارد شده است، آسیب‌پذیری کمتری در مقایسه با سیستم اندرکنش خاک-سازه که خاک را به صورت خطی مدل شده است دارد. این مشاهده برای حالت حدی آستانه فروریزش (CP) محسوس‌تر است. این اثرات در سازه با تکیه‌گاه‌های صلب که اثرات ساختگاه را در نظر گرفته است، شدیدتر می‌شود. یک افزایش کلی و زیاد در شکنندگی ساختمان مربوط به مدل با تکیه‌گاه صلب روی سنگ‌بستر در تمام حالت‌ها مشهود است. در نتیجه اثرات اندرکنش خاک-سازه و ساختگاه، نقش مهمی در خرابی سازه‌ای مورد انتظار بازی می‌کنند و لازم است در بررسی‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای، در نظر گرفته شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، آسیب‌پذیری لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه با شکل‌پذیری پایین با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای مدل‌های با تکیه‌گاه‌های صلب (با و بدون در نظر گرفتن اثرات ساختگاه) و سیستم خاک-سازه با رفتار خاک خطی و غیرخطی، با استفاده از رکوردهای زلزله انتخاب‌شده در تحقیق، تحلیل‌های دینامیکی مقایسه‌ای انجام گرفت و اثرات اندرکنش خاک-سازه و ساختگاه روی پاسخ لرزه‌ای و آسیب‌پذیری سازه مشخص شد. برای تمام مدل‌ها، تحلیل دینامیکی افزایشی انجام گرفت. سپس توابع شکنندگی احتمالاتی در قابل شتاب بیشینه زمین برای حالت‌های حدی IO و CP به دست آمدند. نتایج حاکی از این است که:

۱. در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه و اثرات ساختگاه با هر دو رفتار خطی و غیرخطی خاک، می‌تواند اثرات مهمی روی عملکرد سازه داشته و به‌طور چشمگیری آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن را نسبت به حالت با تکیه‌گاه‌های صلب که اثرات اندرکنش خاک-سازه و ساختگاه مشاهده نشده، افزایش دهد.

۲. با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی خاک، عموماً انتظار می‌رود که تأثیر روی شکنندگی سازه در ترازهای بزرگ‌تر بارگذاری لرزه‌ای، کمتر باشد. منحنی‌های شکنندگی سازه برای دو حالت مدل خاک-سازه با خاک خطی و مدل سازه صلب با در نظر گرفتن اثرات ساختگاه تفاوتی با یکدیگر نداشته‌اند.

۳. از طرفی، اندرکنش خاک-سازه غیرخطی موجب افزایش در آسیب‌پذیری سازه در مقایسه با مدل با تکیه‌گاه‌های صلب می‌شود. به نظر می‌رسد که علت این موضوع این است که وقتی اندرکنش خاک-سازه و خاک غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند، رفتار غیرخطی و پیچیده خاک موجب اعمال اثرات انتقالی و دورانی بیشتر به سازه و در نتیجه افزایش تقاضای تغییرمکان نسبی در طبقات می‌شود. به‌طور نسبی، بین تمام مدل‌های تحلیل‌شده، مدل سازه با تکیه‌گاه‌های صلب که اثرات ساختگاه به‌صورت خطی شبیه‌سازی شده‌اند، بیشترین آسیب‌پذیری به زلزله را نشان داده است. در نتیجه، استفاده از این مدل‌ها، می‌تواند بدون صرف هزینه محاسباتی بالا در اثر اندرکنش خاک-سازه و اثر رفتار غیرخطی خاک، نتایج محافظه‌کارانه‌ای را به دست دهد. البته لازم به توجه است که این موضوع فقط برای مدل‌های مورد مطالعه قابل بیان است و نمی‌تواند یک نتیجه‌گیری عمومی باشد.

۴. تحقیق حاضر، نشان داد که فرض سنتی موجود بین مهندسی که در نظر گرفتن اثرات اندرکنش همواره موجب کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای می‌شود، بسیار غیر محافظه‌کارانه است. نتایج ارائه‌شده در این تحقیق، نگرشی به تأثیر اندرکنش خاک-سازه و اثرات ساختگاه روی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن‌آرمه بلندمرتبه با سطح شکل‌پذیری پایین است. در این مطالعه، خاک هم به‌صورت خطی و هم به‌صورت غیرخطی شبیه‌سازی عددی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، جهت افزایش قابلیت اعتماد روی نتایج مطالعات آسیب‌پذیری لرزه‌ای، برای تولید توابع شکنندگی عمومی برای پیکربندی‌های مختلف قاب‌های خمشی بتن‌آرمه و دیگر سیستم‌های سازه‌ای، که قابلیت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه و مشخصات مختلف خاک هستند، تحقیقات بیشتری لازم است.

۵. مراجع

- [1]. Lou, M. Wang, H. Chen, X. and Zhai, Y. "Structure-soil-structure interaction: Literature review." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 1724-1731. (2011)
- [2]. Warburton, G. B. Richardson, J. D. and Webster, J. J.. "Harmonic Response of Masses on an Elastic Half Space." *Journal of Engineering for Industry*, vol. 94, pp. 193-200. (1972)
- [3]. Kobori, T. Minal, R. and Kusakabe, K. "Dynamical Characteristics of Soil-Structure Cross-Interaction System". (1973).
- [4]. Lin, H. T. Roesset, J. and Tassoulas, J. "Dynamic interaction between adjacent foundations. *Earthquake engineering & structural dynamics*", vol. 15, pp. 323-343. (1987)

- [5]. Guan, F. and Novak, M. "Transient Response of Multiple Rigid Foundations on an Elastic", *Homogeneous HalfSpace. Journal of Applied Mechanics*, vol. 61, pp. 656-663. (1994)
- [6]. Guan, F. and Novak, M. "Transient Response of an Elastic Homogeneous Half-Space to Suddenly Applied Rectangular Loading". *Journal of Applied Mechanics*, vol. 61, pp. 256-263. (1994).
- [7]. Qian, J. and Beskos, D. E.. "Harmonic wave response of two 3-D rigid surface foundations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 15, pp. 95-110. (1996).
- [8]. Ghandil, M. and Behnamfar, F. "The near-field method for dynamic analysis of structures on soft soils including inelastic soil-structure interaction.", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 75, pp. 1-17. (2015).
- [9]. Ghandil, M. Behnamfar, F. and Vafaeian, M. "Dynamic responses of structure-soil-structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling.", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 80, pp. 149-162. (2016).
- [10]. Clouteau, D. Broc, D. Devésá, G. Guyonvarh, V. and Massin, P. "Calculation methods of Structure-Soil-Structure Interaction (3SI) for embedded buildings: Application to NUPEC tests." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 32, pp. 129-142. (2012).
- [11]. Trombetta, N. W. Mason, H. B. Hutchinson, T. C. Zupan, J. D. Bray, J. D. and Kutter, B. L. "Nonlinear Soil-Foundation-Structure and Structure-Soil-Structure Interaction: Centrifuge Test Observations". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140. (2014).
- [12]. Trombetta, N. W. Mason, H. B. Hutchinson, T. C. Zupan, J. D. Bray, J. D. and Kutter, B. L., "Nonlinear Soil-Foundation-Structure and Structure-Soil-Structure Interaction: Engineering Demands", *Journal of Structural Engineering*, vol. 141. (2015).
- [13]. Talebi, A., Jahangir, H., "Effect of Geometrical Parameters Evaluation on behavior of Knee Braces (In Persian)", *4th International Conference on Advanced Technology in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Tehran, Iran. (2017)*
- [14]. Hosseini, M.H., Khatibinia, M., Jahangir, H., "Behavior Investigation of Perforated Buckling Restrained Brace (In Persian)" *3rd International Conference on Recent Innovations in Civil Engineering, Architecture & Urban Planning, Tehran, Iran. (2016)*
- [15]. Khandan, B., Khatibinia, M., Jahangir, H., "Inclination Angle Optimization of Buckling Restrained Knee Braced Truss Moment Frame (In Persian)" *3rd International Conference on Recent Innovations in Civil Engineering, Architecture & Urban Planning, Tehran, Iran. (2016)*
- [16]. Jahangir, H., Bagheri, M. and Delavari, S.M.J., "Cyclic Behavior Assessment of Steel Bar Hysteretic Dampers Using Multiple Nonlinear Regression Approach." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering: 1-25. (2020) DOI: 10.1007/s40996-020-00497-4.*
- [17]. Taherian, I., Ghalehnovi, M., Jahangir, H., "Analytical Study on Composite Steel Plate Walls Using a Modified Strip Model" *7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran. (2015)*
- [18]. Jahangir, H., Bagheri, M. "Evaluation of Seismic Response of Concrete Structures Reinforced by Shape Memory Alloys" *International Journal of Engineering: 33(3): 410-418. (2020) DOI: 10.5829/IJE.2020.33.03C.05.*
- [19]. Bagheri, M., Chahkandi, A., and Jahangir, H., "Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers" *International Journal of Civil Engineering, 17: 1785-1797. (2019) DOI: 10.1007/s40999-019-00438-x.*
- [20]. Jahangir, H., and Rezazadeh Eidgahee, D. "A New and Robust Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm-ANN Model for FRP-Concrete Bond Strength Evaluation." *Composite Structures, (2020) DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113160.*
- [21]. Santandrea, M., Imohamed Ali Omar Imohamed, I.A.O., Jahangir, H., Carloni, C., Mazzotti, C., De Miranda, S., Ubertini, F., Savoia, M., Casadei, P., "An Investigation of the Debonding Mechanism in Steel FRP and FRCM Concrete Joints" *The New Boundaries of Structural Concrete, Capri Island, Italy. (2016)*

- [22]. Jahangir, H., Esfahani, M. R. "Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour" *Steel and Composite Structures*, 34(6): 877-889. (2020) DOI: 10.12989/scs.2020.34.6.877.
- [23]. Ghanbari, A., Hosseini, S.S., "Fundamentals of soil-structure interaction" (In Perisan), Kharazmi University, ISBN. 6008587022. (2016)
- [24]. Hassani, N. Bararnia, M. Amiri, G., "Effect of soil-structure interaction on inelastic displacement ratios of degrading structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 75-87. (2018)
- [25]. Karatzetzou, A. Pitilakis, D., "Modification of Dynamic Foundation Response Due to Soil-Structure Interaction". *Journal of Earthquake Engineering*, 22(5), 861-880. (2018).
- [26]. Zhang, C. Wolf, J. P., "Dynamic soil-structure interaction: current research in China and Switzerland" (Vol. 83): Elsevier. (1998).
- [27]. Pitilakis, K. Crowley, H. Kaynia, A. M. SYNER-G, "Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk: buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities", (Vol. 27). Springer Science & Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6>. (2014).
- [28]. Clough, R. W., "On the importance of higher modes of vibration in the earthquake response of a tall building", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 45(4), 289-301. (1955).
- [29]. Bolisetti, C. Whittaker, A. S. Coleman, J. L., "Linear and nonlinear soil-structure interaction analysis of buildings and safety-related nuclear structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 218-233. (2018).
- [30]. Mylonakis, G. Gazetas, G., "Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental", *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3), 277-301. (2000).
- [31]. Forcellini, D., "Seismic assessment of a benchmark based isolated ordinary building with soil structure interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*", 16(5), 2021-2042. (2018).
- [32]. Stewart, J. P. Fenves, G. L. Seed, R. B., "Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), 26-37. (1999).
- [33]. Veletsos, A. S. Meek, J. W., "Dynamic behaviour of building-foundation systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(2), 121-138. (1974).
- [34]. Gazetas, G., "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations", *Journal of geotechnical engineering*, 117(9), 1363-1381. (1991).
- [35]. Ciampoli, M. Pinto, P. E., "Effects of soil-structure interaction on inelastic seismic response of bridge piers", *Journal of structural engineering*, 121(5), 806-814. (1995).
- [36]. Rodriguez, M. E. Montes, R., "Seismic response and damage analysis of buildings supported on flexible soils", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(5), 647-665. (2000).
- [37]. Gazetas, G. Mylonakis, G., "Soil-structure interaction effects on elastic and inelastic structures", *Proceedings of the 4th international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. San Diego.CA. paper no. SOAP – 2*. (2001).
- [38]. Avilés, J., & Pérez-Rocha, L. E., "Soil-structure interaction in yielding systems", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(11), 1749-1771. (2003).
- [39]. Iida, M. "Three-dimensional non-linear soil-building interaction analysis in the lakebed zone of Mexico City during the hypothetical Guerrero earthquake", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(12), 1483-1502. (1998).
- [40]. Saez ER, "Dynamic nonlinear soil-structure interaction", *Ecole Centrale Paris*. (2009).
- [41]. Sáez, E., Lopez-Caballero, F. Modaressi-Farahmand-Razavi, A. "Inelastic dynamic soil-structure interaction effects on moment-resisting frame buildings", *Engineering structures*, 51, 166-1. (2013).
- [42]. Moghaddasi, M. Cubrinovski, M. Chase, J. G. Pampanin, S. Carr, A., "Probabilistic evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic structural response", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(2), 135-154. (2011).

- [43]. National Institute of Building Sciences, "Direct physical damage – general building stock. HAZUS-MH Technical manual", Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency. chapter 5. (2004).
- [44]. Sáez, E. Lopez-Caballero, F. Modaressi-Farahmand-Razavi, A, "Effect of the inelastic dynamic soil–structure interaction on the seismic vulnerability assessment", *Structural Safety*, 33(1), 51-63. (2011).
- [45]. Rajeev, P. Tesfamariam, S, "Seismic fragilities of non-ductile reinforced concrete frames with consideration of soil structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 40, 78-86. (2012).
- [46]. Pitilakis, K. Karapetrou, S. Fotopoulou, S, "Consideration of aging and SSI effects on seismic vulnerability assessment of RC buildings. *Bulletin of Earthquake engineering*", 12(4), 1755-1776. (2014).
- [47]. Mahoutian, M, "Soil structure interaction between two adjacent buildings under earthquake load", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), 121-125. (2008).
- [48]. Mazzoni, S. McKenna, F. Scott, M. H. Fenves, G. L, "The open system for earthquake engineering simulation (OpenSees) user command-language manual", Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2006).
- [49]. Scott, B. Park, R. Priestley, M, "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain ratio Rates", *Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden*. (1989).
- [50]. Karsan, I. D. Jirsa, J. O, "Behavior of concrete under compressive loadings", *Journal of the Structural Division*. (1969).
- [51]. Lysmer, J. Kuhlemeyer, R. L, "Finite dynamic model for infinite media". (1969).
- [52]. Kwok, A. O., Stewart, J. P., Hashash, Y. M., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., et al, "Use of exact solutions of wave propagation problems to guide implementation of nonlinear seismic ground response analysis procedures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(11), 1385-1398. (2007).
- [53]. Ambraseys, N. N. Simpson, K. u. Bommer, J. J, "Prediction of horizontal response spectra in Europe", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(4), 371-400. (1996).
- [54]. Vamvatsikos, D. Cornell, C. A, "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514. (2002).
- [55]. Jahangir, H., Karamodin, A., "Structural Behavior Investigation Based on Adaptive Pushover Procedure" 10th International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (2015)
- [56]. Vamvatsikos, D. Cornell, C. A, "Applied incremental dynamic analysis", *Earthquake Spectra*, 20(2), 523-553. (2004).