ارزیابی اثرات اندرکنش خاک–سازه بر تقاضاهای لرزه‌ای ساختمانهای قاب خمشیِ کوتاه مرتبه

مهدی ربیعی
دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
Rabiee1.Mehdi@Gmail.com

حسین تحقیقی
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
Tahghighi@kashanu.ac.ir

کلید واژه‌ها: *اندرکنش غیر خطی خاک-سازه، بازتاب لرزه‌ای ساختمان، مدل وینکلر، اجزاء محدود*

چکیده

بررسی مکانیزم انتقال انرژی زلزله از تکیه‌گاه به ساختمان برای طراحی و یا مقاوم سازی لرزه‌ای سازه‌ها امری ضروری است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که پدیده اندرکنش خاک-سازه[1] ممکن است پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را در جهت غیر محافظه‌کارانه تقویت کند. با این وجود، در تحلیل دینامیکی سازه‌ها عموماً فرض می‌شود که خاک زیر شالوده صلب است و از اثر انعطاف‌پذیری شالوده و تراکم پذیری خاک زیرینچشم‌پوشی می‌شود. با لحاظ نمودن انعطاف‌پذیری خاک زیر شالوده انتظار می‌رود پاسخ سازه تحت تأثیر سیستم دینامیکیِ جدید خاک-شالوده -سازه تغییر کند. هدف مطالعه حاضر، تحلیل اثر اندرکنش خاک-سازه برتقاضاهای پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای کوتاه مرتبه با استفاده از روش فنر Δ میراگر معادلمی‌باشد. بدین منظور یک ساختمان چهار طبقه فولادی دارای سیستم قاب خمشی واقع بر دو نوع خاک نرم و سخت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از چهارده رکورد متفاوت زلزله برای تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی سیستم خاک و سازه استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در اثر اندرکنش،برش پایه، برش درون طبقات و مقدار تغییر مکان نسبی(به استثنای طبقه اول) کاهش یافته در حالی که دوره تناوب واقعی ساختمان و تغییر مکان مطلق طبقات افزایش می‌یابد. ضمناً این تغییرات با افزایش نسبت سختی سازه به خاک تشدید می‌شود. لذا بر اساس یافته‌های این مقاله، در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک Δ سازه در تحلیل لرزه‌ای سازه ضرورت داشته و اکتفا به نتایج حاصل از تحلیل های مبتنی بر ساختمان با پای ثابت می‌تواند منجر به طرح ناایمن سازه گردد.

مقدمه

رفتارلرزه‌ای سازه‌ها علاوه بر خواص دینامیکیِ خود سازه، تابع مشخصات تحریک وارد بر پای سازه است. امواج لرزه‌ای در مسیر حرکت از کانون زلزله تا سطح زمینبه طرز چشم گیری از مکانیزم شکست گسل، اثرات مسیر و خواص خاک ساختگاه تأثیر پذیرفته و فیلتر می‌شود. در تحلیل لرزه‌ایِ یک سازه مستقر بر بستر سنگی، حرکتی که توسط پی تجربه می‌شود مشابه همان حرکتی است که در آن نقطه و قبل از آنکه سازه ساخته شود اتفاق می‌افتد(Wolf,1985). به عبارتی سازه با زمین در محل پی کاملاً یکپارچه است و در ارتعاشِ زمین، عیناً حرکت زمین را بخود می‌گیرد؛ بنابراین محاسبات محدود به سازه تحریک شده توسط این حرکتِ خاص می‌گردد. اما در حالت سازه‌یِ بنا شده بر ساختگاه نرم، رفتار غیرخطیِ خاک باعث تغییر پاسخ لرزه‌ایِ سازه می‌شود. وجود حرکات انتقالی و دورانی پیِ سازهدر اثر ارتعاش سازه، حرکت خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد و سیستم دینامیکی را از شرایط پایه‌گیردار به شرایط پایه‌منعطف تغییر خواهد داد. با لحاظ نمودن انعطاف پذیری خاکزیر شالوده، پاسخ سازه تحت تاثیر سیستم جدیدِ خاک- سازه تحت عنوان اندرکنشِ خاک و سـازه قرار می‌گیرد. شواهد گذشته نشان می‌دهد که صرف نظر کردن از اثرات اندرکنش خاک و سازه، می‌تواند باعث تخمین غیر محافظه‌کارانه تقاضای لرزه‌ای ساختمانها گردیده و سبب فروریزش آنها شود. در این زمینه، می‌توان به تخریب پل (Bio Bio) درزلزله اخیر شیلی در سال ۲۰۱۰ بعنوان یکی از سازه‌های تخریب شده تحت اثر پدیده اندرکنش خاک-سازه اشاره نمود (Bhattacharya, 2012).

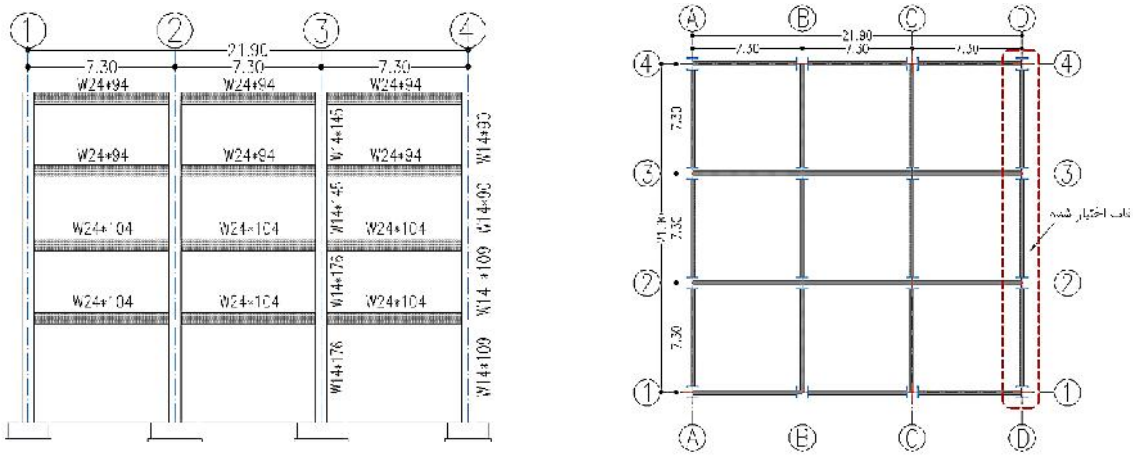
1.Soil-Structure Interaction (SSI)

در تحلیل و طراحی سازه‌ها، عموماً فرض می‌شود که خاک زیر شالوده صلب بوده و از انعطاف‌پذیری آن صرف‌نظر می‌شود. در این حالت پاسخ سازه متأثر از خواص دینامیکی خودِ سازه است و انعطاف پذیریِ خاک، تاثیری در پاسخ سازه ندارد. در حالیکه پدیده اندرکنش خاک و سازه منجر به تغییر حرکت لرزه‌ای در پایه می‌گردد. اندرکنش خاک- سازه به خواص دینامیکیِ خاک (شامل پریود طبیعی زمین، مدول برشی، سرعت موج برشی، خواص میرایی خاک شامل میرایی مصالح و میرایی تشعشعی) و خواص دینامیکیِ سازه (شامل پریود طبیعی سازه، سختی، جرم و میرایی سازه) بستگی دارد(Datta,2010). از طرف دیگر، انتخاب زمین‌لرزه‌یِ منطبق بر واقعیت در آنالیز اندرکنش خاک-سازه بسیار حائزاهمیت است. شتاب نگاشت انتخاب شده باید مشخصاتِ مورد نظر برای حرکت لرزه‌ایِ سنگ کف از جمله، شتابِ حداکثر زمین، محتوای فرکانسی، زمان تداوم لرزش، بزرگا، فاصله از مرکز زلزله و رژیم تکتونیکی منطقه را دارا باشد. پس از تعیین شتاب نگاشت ثبت شده در میدان آزاد[1]، نوبت به تحلیل دینامیکی برهم‌کنش سیستم سازه- خاک می‌رسد، که شامل اندرکنش جنبشی[2](سینماتیکی) ناشی از سختی خمشیِ پی و سختیِ سازه و اندرکنش اینرسی[3] (لختی) ناشی از ارتعاشِ جرم سازه می‌باشد(Tahghighi and Konagai, 2007).

هدف این مقاله ارزیابی اثر اندرکنش خاک-سازه بر تقاضاهای پاسخ لرزه‌ای یک ساختمان چهارطبقه فولادی دارای سیستم قاب خمشی متکی بر شالوده سطحی می‌باشد. اندرکنش خاک-سازه به روش فنر-میراگر معادل (مدل وینکلر)در نظر گرفته می‌شود. سپس سیستم خاک-سازه با استفاده از روش تاریخچه زمانی غیر خطی و با در نظر گرفتن چهارده رکورد حرکت زمین مربوط به چندین زلزله مهم در دو حالت شامل مدل با اندرکنش و نیز مدل با پایه گیردار مورد تحلیل قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که، با فرض صلبیت شالوده نسبت به خاک، از اثر اندرکنش سینماتیکی در تحلیل صرف‌نظر می‌شود. پارامترهای مورد بحث و بررسی در تحلیل نتایج مقاله شامل دوره تناوب ارتعاش ساختمان، برش درون طبقه، جابه‌جایی طبقات و دریفت درون طبقه می‌باشند.

معرفی سازه، شالوده و خاک

مطابق شکل۴ یک ساختمان چهار طبقه فولادی با سیستم باربرجانبیِ قاب خمشی برای این مطالعه در نظر گرفته شده است (Raychowdhury,2011).پلان ساختمان به ابعاد (متر۲۱.۹×۲۱.۹)، دارای سه دهانه در هر دو جهت عمود بر همِ افقی به فاصله (۷.۳متر) دارای یک توزیع جرم یکنواخت و یک توزیع سختی غیریکنواخت در ارتفاع است. این ساختمان مطابق آیین‌نامه(1994) UBCو برای زمین نوع IIدر منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد و با توجه به فلسفه ستون قوی تیرضعیف طراحی شده است.ضریب اطمینان برابر سه برای طراحی شالوده سطحی ساختمان در نظر گرفته شده است.



(a) (b)

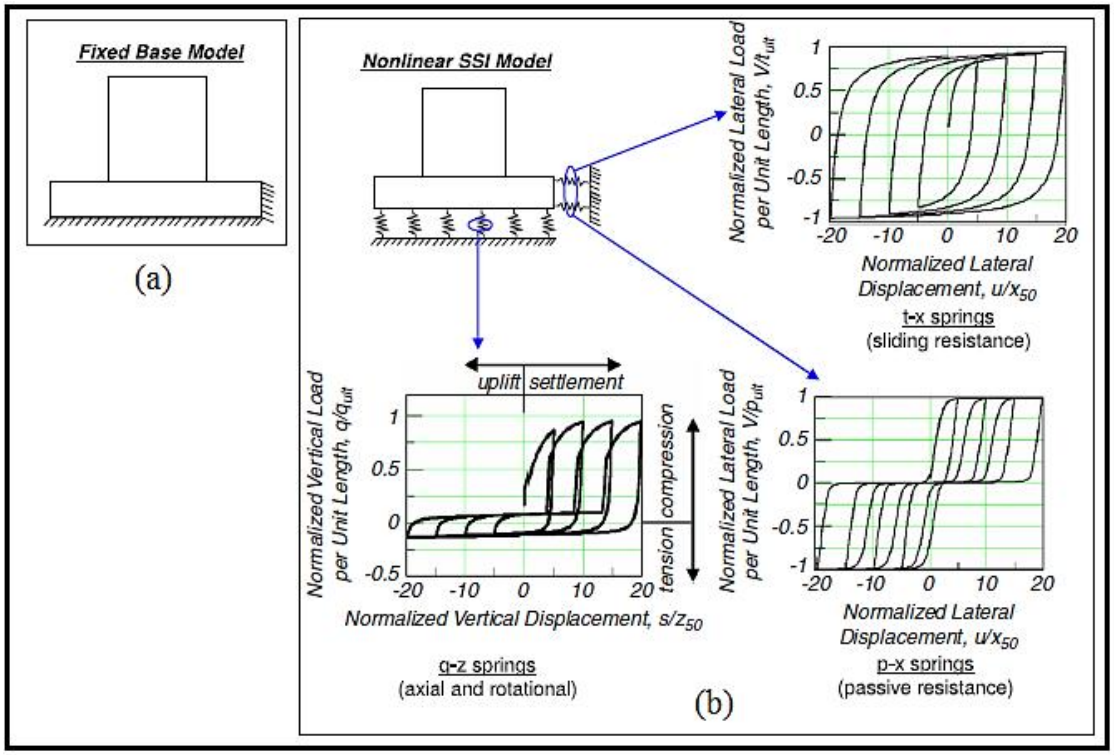
شکل ۱: ساختمان مورد مطالعه a) پلان ساختمان b) قاب اختیار برای مطالعه

مدل تیر بر روی شالوده غیر خطی

به منظور تحلیل اثر اندرکنش خاک و سازه، از نرم‌افزار OpenSeesبرای مدل‌سازی ساختمان فولادی معرفی شده در بخش پیشین استفاده می‌شود(OpenSees,2013). تیرها و ستونها بوسیله المانهای تیرΔستون غیر خطی با توزیع پلاستیسیته گسترده در طول عضو مدل

1. Free-Field
2. Kinematic Interaction
3. Inertial Interaction

شده‌اند.برای ارزیابی اثر اندرکنش بر روی پاسخ ساختمان، دو حالت مختلف در نظرگرفته شده است. حالت اول، سازه با پایه‌گیردار(بدون در نظر گرفتن اندرکنش)، که در این حالت شالوده دربرابر همهٔ حرکات ثابت فرض می‌شود (شکل۲.a). حالتدوم، سازه با پایه منعطف(با در نظر گرفتن اندرکنش غیر خطی خاک) است، که در این حالت سطح مشترک خاک-شالوده به وسیلهٔ یک مجموعه از فنرهای غیر خطی وینکلر مدل می‌شود(شکل۲.b). این روش تحت عنوان تیر بر روی شالوده غیرخطی(BNWF[1])نیز نامگذاری نامیده می‌شود. مطابق شکل ۲، در مدل وینکلر، از فنرهای (q-z)برای در نظرگرفتن مقاومت در راستای قائم و دورانی پیسطحی استفاده شده است، درحالیکه دو فنردیگر به نام‌های(p-x)و(t-x) برای‌نیروی‌هایافقی مقاوم(Passive)و لغزشی(Sliding)پیمد نظر قرارگرفته‌اند. شایان ذکر است که مدل وینکلر رفتاری فنرهایمذکوردر شکل۲از تعمیم مدل‌های مشابه در پی عمیق و پس از انجام مجموعه‌ای از آزمایشات برای شالوده سطحی ارائه شده است(Harden and Hutchinson, 2009). فنرهای غیر خطی در مدل BNWFپیشنهادی، توانایی خوبی در تخمین نتایج آزمایشگاهیاین محققیناز خود نشان داده‌اند.



شکل۲: شرایط مختلف پایه در نظر گرفته شده در این مطالعه: (a) پایه گیردار (b) مدل بااندرکنش غیرخطی(Raychowdhury,2011)

انتخاب نوع خاک و حرکت زمین

در این مطالعه، به منظور مقایسه تأثیر سختی خاک بر تقاضاهای لرزه‌ای سازه، دو نوعزمینII و IVبه ترتیب به نمایندگی از خاک سخت و خاک نرم بر اساس طبقه بندی آیین نامه ۲۸۰۰ ایران فرض می‌شود (ویرایش سوم آیین نامه ۲۸۰۰ ایران). بر این اساس سرعت موج برشی خاک در زیر سازه طوری انتخاب شده است که با این آیین نامه مطابقت داشته باشد. سایر مشخصات خاک مطابق جدول۱ می‌باشد.

به منظور شبیه‌سازی، در مجموع چهارده رکورد حرکتقوی زمین از رویدادهای مختلف، از بانک اطلاعاتی مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه برکلیاستخراج شده است(PEER,2012). این رکوردها مربوط به رویدادهای با بزرگای گشتاوری $M \geq 6$و در کوتاهترین فاصله از گسل، $D \geq 12$ Kmو ضمناً در دو گروه (هر گروه دارای ۷ رکورد) مربوط به خاک نوع IIو IV ثبت شده‌اند. اطلاعات بیشتر در مورد رکوردهای انتخاب شده در جدول ۲ فهرست شده‌اند. بعلاوه، اشکال۳و۴ طیف پاسخ شبه شتاب با میرایی ۵ ٪ را برای رکوردهای جدول۲ (نرمال شده بر PGA) و نیز مقدار متوسط آنها را به‌ترتیب برای زمین نوع II و IV نشان می‌دهند.

جدول۱: مشخصات خاک بر اساس آیین نامه۲۸۰۰

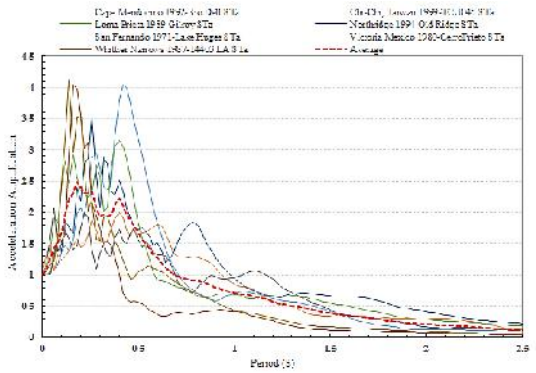
تیپ خاک	Ø (degree)	C (kg/cm^2)	E (kg/cm^2)	υ	γ (kg/cm^3)	G (kg/cm^2)	V_S (cm/sec)
II	۳۰	۰.۱۵	۱۸۱۱۰	۰.۳۵	۰.۰۰۲۱	۶۷۰۷	۵۶۰۰۰
IV	۱۵	۰.۰۳	۱۱۳۰	۰.۴۵	۰.۰۰۱۷	۳۸۹	۱۵۰۰۰

1. Beam-on-Nonlinear-Winkler-Foundation

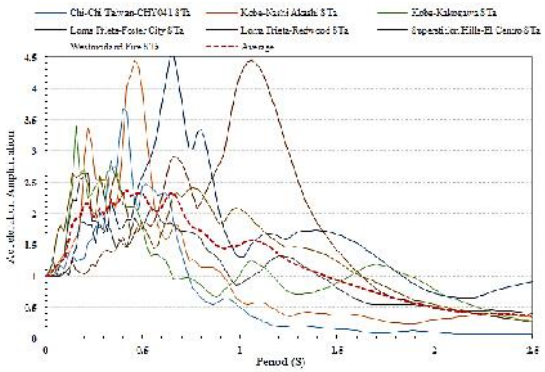
جدول۲: مشخصات رکوردهای زلزله انتخاب شده

ردیف	زلزله	سال وقوع	ایستگاه	بزرگا	نوع زمین	D (km)	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)
۱	Northridge, USA	۱۹۹۴	Old Ridge Route	۶.۷	II	۲۲.۶	۰.۵۷	۵۲.۱	۴.۲
۲	Cape, Mendocino	۱۹۹۲	Rio Dell Overpss	۷.۱	II	۱۸.۵	۰.۵۵	۴۲.۱	۱۸.۶
۳	Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	Tcu045	۷.۶	II	۲۴	۰.۵۱	۳۹	۱۴.۳
۴	LomaPrieta,USA	۱۹۸۹	Gilroy	۶.۹	II	۱۲	۰.۳۶	۲۸.۶	۶.۳
۵	San Fernando USA	۱۹۷۱	Lake Hogus	۶.۶	II	۲۰.۳	۰.۳۷	۱۷	۱.۶
۶	Victoria, Mexico	۱۹۸۰	Cero Prito	۶.۱	II	۱۷	۰.۶۲	۳۱.۶	۱۳.۲
۷	Whittier Narrows UAS	۱۹۸۷	LA-116TH ST School	۶	II	۲۲.۵	۰.۳۹	۲۱	۱.۸
۸	Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	CHY0414	۷.۶	IV	۲۶	۰.۶۴	۳۹.۵	۱۱.۲
۹	Kobe, Japan	۱۹۹۵	Nishi-Akashi	۶.۹	IV	۱۲	۰.۵۱	۳۷.۳	۹.۵
۱۰	Kobe, Japan	۱۹۹۵	Kakogawa	۶/۹	IV	۲۶.۴	۰.۳۴	۲۷.۶	۹.۶
۱۱	Loma Prieta, USA	۱۹۸۹	RedWood City	۶.۹	IV	۴۸	۰.۲۸	۵۳.۶	۱۲.۷
۱۲	Loma Prieta, USA	۱۹۸۹	Foster City	۶.۹۳	IV	۴۳	۰.۳	۳۷.۲	۱۲
۱۳	Superstition Hills	۱۹۸۷	EL Centro Imp	۶.۵۴	IV	۱۸.۲	۰.۳۶	۴۵	۱۸.۱
۱۴	Westmorland	۱۹۸۱	Westmorland Fire	۵.۹	IV	۱۱	۰.۳۷	۴۱	۱۱

PGA, PGV and PGD: Peak Ground Acceleration, Velocity and Displacement respectively.
D: کوتاهترین فاصله تا گسل



شکل۳: طیف بازتاب شتاب مقیاس شده به ازای میرایی ۵ درصد برای رکوردهای انتخاب شده خاک نوع II



شکل۴: طیف بازتاب شتاب مقیاس شده به ازای میرایی ۵ درصد برای رکوردهای انتخاب شده خاک نوع IV

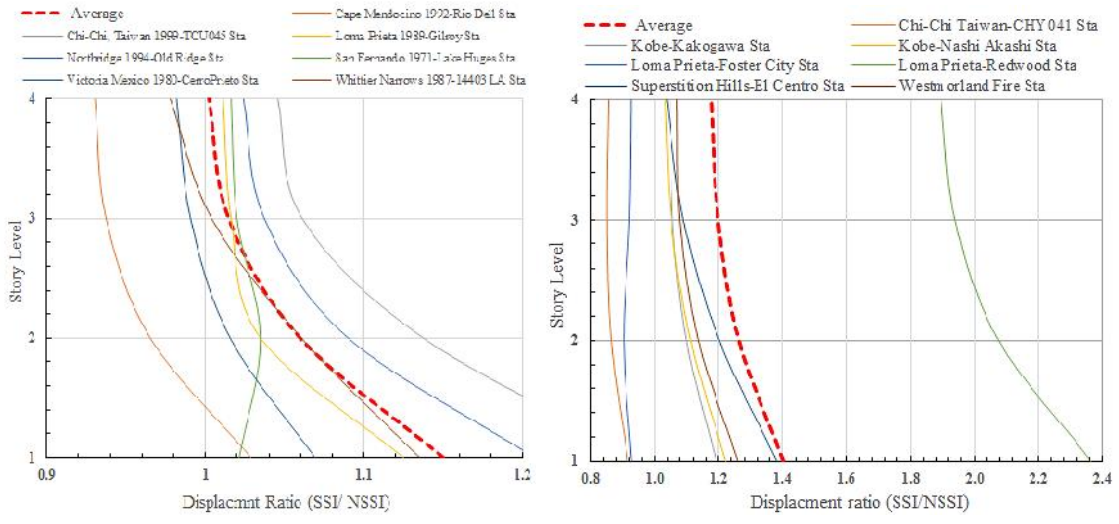
نتایج تحلیل و بحث

در این بخش، ابتدا مدل ساختمان معرفی شده در بخشهای قبلی با توجه به نوع زمین زیر پی تحت تأثیر رکوردهای زلزله جدول۲ با شتاب زمین بیشینه مقیاس شده برابر 0.5gتحلیل می‌شود. به‌منظور قضاوت و نتیجه گیری مناسب‌تر، میانگین نتایجتحلیلمربوط به رکوردهای هر دو تیپ خاک نیز محاسبه می‌شود.پارامترهای بازتاب مورد بررسی شامل دوره تناوب ارتعاش ساختمان، برش‌درون طبقه، جابه‌جایی طبقات و دریفت درون طبقه می‌باشند. پارامترهای مذکور در دو حالت مدل با اندرکنش (SSI) و نیز مدل پایه گیردار (NSSI)،بحث می‌شود. تغییر دوره تناوب ذاتی سازه در اثر اندرکنش با خاک یکی از مهمترین اثرات این پدیده است. با توجه به در نظرگرفتن خاک به صورت یک محیط انعطاف پذیر، سختی کل سیستم کاهش یافته و فرکانس ارتعاش واقعی سازه کاهش می‌یابد. افزایش دوره تناوب اصلی سازه، چنانچه از اثرات محتوای فرکانسی لرزشحرکت زمین در پدیده تشدید صرف نظر شود،کاهش بازتاب‌های سازه را به دنبال خواهد داشت. جدول۳ مقادیر دوره تناوب سازه برای سه مد اول سازه و نیز درصد افزایش آنها را در هر دو نوع خاک فرض شده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل مقادیر ویژه مطابق جدول۳، سازه واقع بر خاک تیپIV(خاک نرم) دارای دوره تناوب بزرگتری می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که هرچه نسبت سختی سازه به خاک بیشتر شود و یا به عبارتی سازه واقع بر خاک نرم‌تر میزان ازدیاد پریود بیشتری خواهد داشت. همچنین تأثیر اندرکنش خاک-سازه در سازه‌های منظم در پلان و ارتفاع در مد اول قابل توجه بوده و بر مدهای پایین تر اثر کمتری دارد.البته برای سازه‌های نامنظم در پلان و ارتفاع،اثر پذیری مدهای سازه ناشی از انعطاف پذیری پی را باید با توجه به یک تحلیل سه بعدی بررسی کرد.

جدول۳: مقادیر دور تناوب سازه و درصد افزایش آن با توجه به نوع خاک در ۳ مد اول سازه

حالت پایه	مد اول	مد دوم	مد سوم	درصد افزایش دوره تناوب مد اول	درصد افزایش دوره تناوب مد دوم	درصد افزایش دوره تناوب مدسوم
گیردار	۰.۷۲۷	۰.۲۲۶	۰.۱۱۹۴	۰	۰	۰
II	۰.۸۸۹	۰.۲۴۶۳	۰.۱۲۲۴	۲۲.۳۳	۸.۷۴	۲.۵۱۲
IV	۱.۱۱۳	۰.۲۸۹	۰.۱۲۴۵	۵۳.۱	۲۷.۹۹	۴.۲۷

شکل۵ مقادیر نسبت جابه‌جایی در طبقات سازه در مدل با اندرکنش (SSI) به حالت پایه گیردار (NLSSI) را برای دو تیپ خاک نوع II و نوعIVنشانمی‌دهد. نتایج نشان داده شده به تفکیک برای رکوردهای مفروض و همچنین مقادیر میانگین آنها در هر تیپ خاک می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود اندرکنش سازه با خاک به طور کلی باعث افزایش جابه جایی سازه مورد مطالعه شده است و این افزایش برای خاک تیپ IV بیشتر از خاک تیپ II می‌باشد. با توجه به شکل ۵.aمقدار متوسط افزایش جابه‌جایی در تراز سقف اول در حالت اندرکنش سازه با خاک تیپ II،۱.۱۵ برابر حالت پایه‌گیردار است. این نسبت با یک نرخ کاهشی در سقف چهارم معادل عدد واحد و متوسط جابه‌جایی در مدل با اندرکنش با مقدار نظیر در مدل بدون اندرکنش می‌باشد. در حالیکه مطابق شکل ۵.b (خاک تیپ IV)، متوسط نسبت جابه‌جایی در تراز سقف اول معادل ۱.۴ برابر و در سقف آخر با یک سیر نزولی به مقدار ۱.۲ برابر رسیده است. لازم به ذکر است که افزایش جابه‌جایی طبقات ساختمان لزوم رعایت بند ۱-۶-۳ آیین نامه ۲۸۰۰ ایران را در خصوص ایجاد درز انقطاع برای جلوگیری از برخورد دو ساختمان مجاور هم که تحت عنوان خرابیهای ضربه‌ای (Pounding Damage) از آنها یاد می‌شود بخصوص برای ساختمانهای واقع بر خاک نرم بیش از پیش ضروری می‌کند.

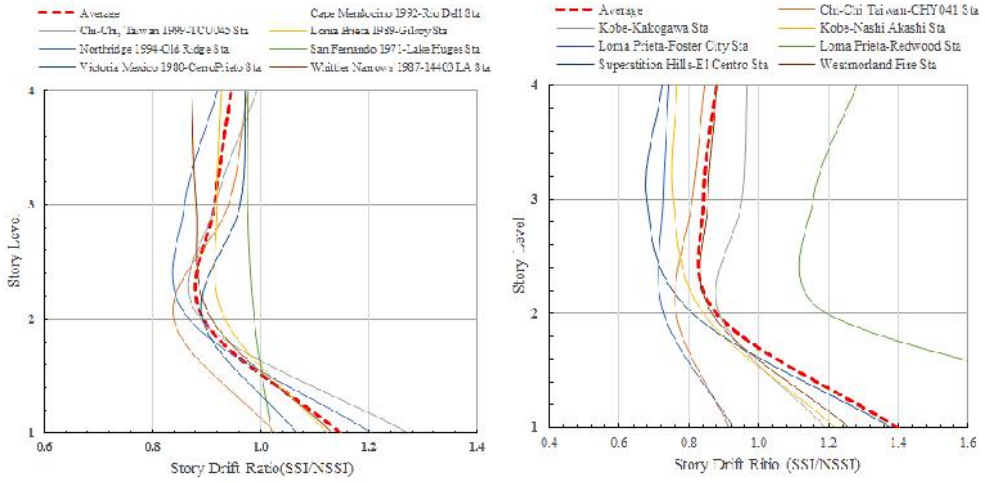


(a) (b)

شکل۵ : تغییر مکان جانبی طبقات در مدل با اندرکنش به مقدار نظیرآن در مدل بدون اندرکنش برای رکوردهای a)خاک IIb)خاک IV

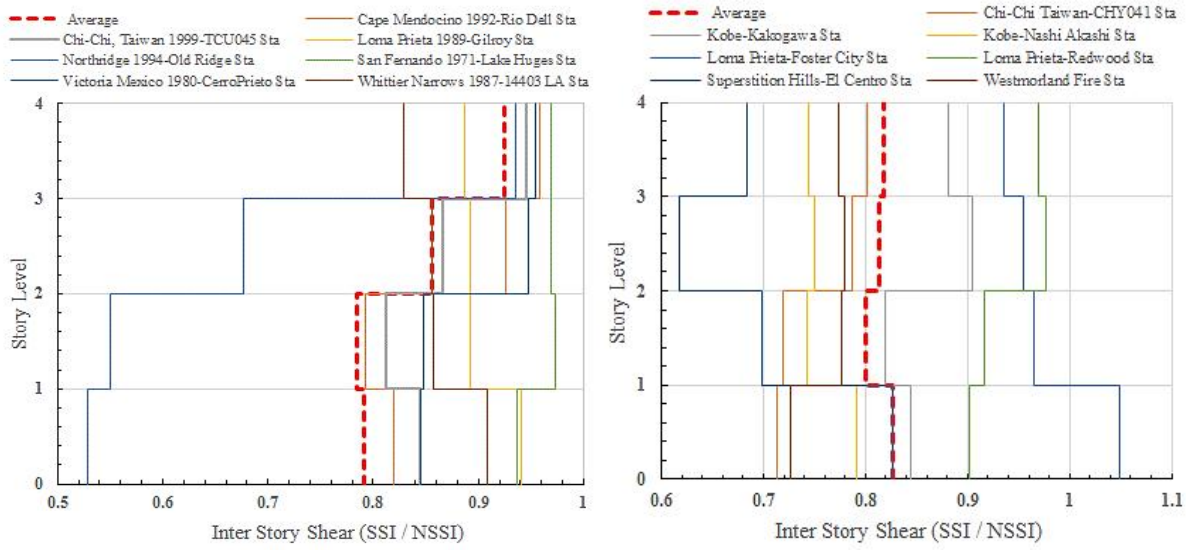
شکل۶نتایج مربوط به دریفت طبقات را به تفکیک رکوردهای در نظر گرفته شده و همچنین مقادیر میانگین آنها را نشان می‌دهد. شکل ۶.a و ۶.bنسبت دریفت طبقات برای مدل ساختمان با اندرکنش به مقادیر نظیر در حالت پایه گیردار را بترتیب برای خاک تیپ II و خاک تیپ IVنشان می‌دهد. اندرکنش خاک و سازه، دریفت طبقات را در حالت کلی برای تراز سقف اول افزایش و برای طبقات بالا کاهش می‌دهد. مقدار متوسط دریفت برای تراز سقف اول سازه روی خاک تیپ II ، ۱.۱۵ برابر نسبت به مدل پایه گیردار افزایش یافته و برای طبقات بالاتر با یک نرخ کاهشی، متوسط نسبت ۰.۹۵ برای سقف چهارم رسیده است. به همین ترتیب، متوسط نسبت دریفت برای سازه در اندرکنش با خاک تیپ IV برای تراز سقف اول معادل ۱.۴، و این نسبت با یک نرخ کاهشی به مقدار ۰.۸۸ برای سقف چهارم رسیده است. افزایش تغییر مکان نسبی، طراح را بر آن می‌دارد که اثر نامساعد افزایش لنگرهای ثانویه $(P-\Delta)$ در اثر افزایش دریفت طبقه اول را کنترل کند.

شکل۷.aو۷.bنسبت بازتاب مربوط به برش درون طبقه را در مدل با اندرکنش به مقادیر متناظر آنها در حالت پایه گیردار بترتیب برای خاک تیپ II و IV نشان می‌دهد. این نتایج به تفکیک رکوردهای در نظر گرفته شده و همچنین مقادیر میانگین آنها می‌باشد. چنان‌که مشاهده می‌شود در حالت کلی موضوع اندرکنش سازه با خاک برش پایه و برش درون طبقات را کاهش می‌دهد. مقدار متوسط کاهش برش درون طبقه برای سازه در اندرکنش با خاک تیپ II بین ۲۰ درصد در تراز پایه تا مقدار ۱۰ درصد در تراز آخرین طبقه می‌باشد. اما، مقدار متوسط کاهش برش درون طبقه برای سازه در اندرکنش با خاک تیپ IV در تراز سقف تمام طبقات تقریباً برابر و معادل۲۰ درصد می‌باشد. شایان ذکر است که نتایج بدست آمده بیانگر توافق مناسبی با ضوابط پیشنهادی آیین نامه‌های معتبر دنیا همچون ASCE (2010)، که حداکثر کاهش برش پایه را به مقدار ۳۰ درصد محدود کرده است را دارد.



(a) (b)

شکل ۶: دریفت نسبی طبقات در مدل با اندرکنش به مقدار نظیرآن در مدل بدون اندرکنش برای رکوردهای a) خاک IIb) خاک IV



(a) (b)

شکل ۷: نیروی برشی طبقات در مدل با اندرکنش به مقدار نظیر در مدل بدون اندرکنش برای رکوردهای a) خاک IIb) خاک IV

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر مسأله اندرکنش خاک- سازه بر تقاضاهایلرزه‌ای یک ساختمان خمشی فولادیکوتاه مرتبه پرداخت. نتایج مقاله حاضر حاکی از افزایش دوره تناوب طبیعی ساختمان بویژه بر روی خاک نرم نسبت به حالت پایه‌گیردار می‌باشد. هر چه نسبت سختی سازه به خاک بیشتر شود و یا به عبارتی هر چه سرعت موج برشی در خاک کمتر شود، میزان افزایش دوره تناوب بیشتر می‌شود. بطوریکه، نرخ افزایش دوره‌یِ تناوب در مد اول قابل توجه و در مدهای بالاتر کمتر می‌باشد. همچنین، لحاظ کردن اندرکنش خاک Δ سازه باعث افزایش جابه‌جایی طبقات ساختمان مورد مطالعه گردید. این افزایش جابه‌جایی برای سازه واقع بر خاک تیپ IV نسبت به خاک تیپ II قابل توجه می‌باشد. بعلاوه، اندرکنش سازه با خاک موجب افزایش دریفت در تراز سقف اول و کاهش دریفت در تراز سقف‌های بالاتر را نشان می‌دهد.

در نهایت، اندرکنش خاک Δ سازه برش پایه و برش درون طبقات را کاهش می‌دهد. اگرچه متوسط کاهش برش پایه برای هر دو مدل ساختمان بر روی خاک تیپ II و IV تقریباً برابر و معادل ۰.۸ برش پایه در مدل پایه گیردار بدست آمد، ولی بر اساس نتایج بدست آمده کاهش برش درون طبقات برای ساختمان واقع بر خاک تیپ چهار بیشتر از خاک تیپ دو می‌باشد.

مراجع

آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۸۴) مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، ایران

ASCE (2010) MinimumDesign Loads for Buildings, Structural Engineering Institute (SEI) and American Society of Civil Engineers, ASCE-10, Reston, VA, USA

Bhattacharya S(2012) Model container design for Soil-Structure Interaction Studies in (ed.) Role of Seismic Testing Facilities in Performance-Based Earthquake Engineering Springer Netherlands: 135-158

Datta T K (2010) Seismic Analysis of Structures John Wiley & Sons, Asi*a*

Harden CW and Hutchinson TC (2009) Beam-on-nonlinear-Winkler-foundation modeling of shallow rocking-dominated footings, *Earthquake Spectra*, 25(2): 277-300

OpenSees (2013) Open System for earthquake engineering simulation, Pacific earthquake engineering researchcenter PEER Richmond, CA, USA,http://opensees.berkeley.edu/

PEER (2012) PEER strong motion database,http://peer.berkeley.edu/ Accessed 10 Jan 2015

RaychowdhuryP (2011)Seismic Response of low-rise steel moment-resisting frame(SMRF)buildings incorporating nonlinear soil–structure interaction (SSI), *Engineering Structure*, 33: 958-967

Tahghighi H and Konagai K (2007) Numerical analysis of nonlinear soil–pile group interaction underlateral loads *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: 463-474

UBC (1994) Uniform Building Code*International Conference of Building Officials*, Whittier, CA, USA

Wolf JP (1985)Dynamic Soil-Structure InteractionPrentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ