

بررسی آثار مفید و مضر اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف خرابی

امین عمادی^۱، حمزه شکیب^{۲*}

۱- دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

shakib@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۹/۱۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۹/۱۳]

چکیده- پاسخ سیستم سازه با وجود آثار اندرکنش خاک و سازه تابعی از عوامل مانند ابعاد سازه، ویژگی‌های دینامیکی سازه، پروفیل خاک و ویژگی‌های زلزله اعمالی است. پاسخ سیستم‌های اندرکنشی تحت بارگذاری لرزه‌ای عموماً به صورت غیرخطی است و شامل حرکت گهواره‌ای، لغزش، همچنین بلندشدگی (برکنش) و تسلیم خواهد بود. اگر چه رفتار غیرخطی خاک و وجود برکنش، انرژی زیادی را در سطح مشترک بین خاک و سازه مستهلک می‌سازد و اثری مفید برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به شمار می‌آید، اما از طرفی ممکن است باعث تغییر شکل‌های ماندگار بیش از اندازه در سازه شود پس این اثر مخرب نیز باید به صورت هم‌زمان مدنظر قرار داده شود. در این مقاله به منظور بررسی آثار مفید و مخرب اندرکنش خاک و سازه در حوزه رفتار غیرخطی خاک و سازه، مقایسه طیف خرابی سیستم با پای انعطاف پذیر و سیستم با پای صلب بر اساس شاخص خرابی Park and Ang برای سیستم‌های یک درجه آزادی ارائه می‌شود. این سیستم‌های یک درجه آزادی دارای رفتار غیرخطی است که بر تیر با بستر غیر ارتجاعی وینکلر قرار دارند. طیف‌های خرابی برای چنین سیستم‌هایی با در نظر گرفتن سه زلزله ثبت شده بر خاک نرم و برای نسبت‌های مختلف لاغری در سازه، فرکانس بی‌بعد و شکل‌پذیری به دست می‌آیند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه در بسیاری از سازه‌ها اندرکنش خاک و سازه اثری مفید در کاهش نیاز لرزه‌ای اعمالی به سازه دارد، اما در برخی از حالات نسبت سختی سازه به خاک، اندرکنش خاک و سازه خسارت لرزه‌ای اعمالی را در سازه‌های با پریود کم و روی خاک نرم افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، شاخص خرابی، رفتار غیرخطی.

۱. مقدمه

افزایش پریود اصلی سازه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه است [۱]. به علت افزایش پریود سازه و با توجه به روش‌های مرسوم طراحی طیفی، چشم‌پوشی کردن از آثار اندرکنش خاک و سازه به عنوان یک راهکار محافظه‌کارانه در طراحی، در بسیاری از مراجع تاکید شده است [۲]. بر اساس چنین مطالعاتی که درستی را بر آثار مفید اندرکنش خاک و سازه گذشته‌اند، بعضی از دستورالعمل‌ها مانند NEHRP-97 [۳] حذف آثار اندرکنش را به عنوان یک روش ساده محافظه‌کارانه در تحلیل و طراحی سازه‌ها در نظر گرفته‌اند. اگرچه این فرض در بعضی موارد

تاثیر اندرکنش خاک و سازه در تغییرات نیاز لرزه‌ای سازه‌ها یکی از مسئله‌های چالش برانگیز است که با وجود پژوهش‌های فراوان از سال ۱۹۷۰ هنوز بسیاری از سوال‌ها در این زمینه بی‌پاسخ مانده‌اند. یکی از مهم‌ترین آثار اندرکنش خاک و سازه تغییر در ویژگی‌های دینامیکی سازه مانند پریود و شکل مودها است، که هنوز هم در حال مطالعه است. به منظور تعیین دقیق مود سازه‌ها با وجود اثر اندرکنش خاک و سازه در ادبیات فنی راه‌های مختلفی پیشنهاد شده است. آنچه در بیشتر مراجع تاکید شده است،

درست است، اما مطالعات زیادی نشان می‌دهند که در نظر گرفتن سازه با پای صلب می‌تواند باعث تخمین دست پایین نیازهای لرزه‌ای شود [۴]. Emadi et al. و همکاران [۵] فرمولاسیون جرم موثر لرزه‌ای را با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه ارائه دادند. در این پژوهش سه محدوده پریود در طیف انرژی پاسخ مشخص شد. نتایج نشان داد که با توجه به سه محدوده پیشنهادی و پریود اصلی زلزله می‌توان آثار مفید یا مضر اندرکنش خاک و سازه را شناسایی کرد. این پژوهشگران درستی مطالعه خود را با تحلیل موجک نشان دادند. در مطالعه‌ای که به وسیله‌ی Nakhaei and Ghannad [۶] انجام شده است تاثیر اندرکنش خاک و سازه روی شاخص خرابی سازه‌ها بررسی شده است. این مطالعه با فرض رفتار غیرخطی سازه و خطی خاک انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به طور خاص اندرکنش خاک و سازه، شاخص خرابی را در سازه‌های با پریود کم و روی خاک نرم افزایش می‌دهد. افزایش نسبت بعد(لاغری) سازه (به خاطر افزایش پریود سازه)، افزایش شاخص خرابی را شدت می‌دهد. حال آنکه بعد از پریود آستانه این موضوع عکس است.

هنگام زلزله وقوع عوامل غیرخطی هندسی مانند بلندشدگی فونداسیون (برکنش) یا عوامل غیرخطی مصالح مانند غیرخطی شدن خاک یا سازه نیز بسیار محتمل است. بیشتر پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که وجود برکنش در تراز شالوده باعث کاهش برش پایه در حین زلزله می‌شود. پس می‌توان یکی از روش‌های کاهش نیروهای اعمالی به سازه را اجازه برکنش محدود به شالوده دانست. متناهی رفتار روسازه و شالوده در حین برکنش نیاز به بررسی بیشتری دارد تا بتوان با اطمینان، از برکنش در کاهش نیروی وارد شده به سازه استفاده نمود. Masaeli et al. و همکاران [۸] به بررسی آثار مفید و مضر اندرکنش خاک و سازه با در نظر گرفتن زلزله‌های نزدیک به گسل پرداختند. آنها نشان دادند که مفید و مضر بودن اثر اندرکنش خاک و سازه به پریود اصلی پالس معادل زلزله نزدیک به گسل بستگی دارد. به طوری که در پالس با پریود کوچک، همواره اثر اندرکنش خاک و سازه مفید است حال

آنکه برای پالس با پریود بزرگ، اندرکنش خاک و سازه اثر مضر دارد. آنچه در پژوهش‌های غیرخطی آثار اندرکنش خاک و سازه، بیشتر خود را نشان می‌دهد، تعیین شاخص مناسب برای این ارزیابی است. توجه به سازوکار واقعی خرابی در سازه‌ها نشان می‌دهد که این پدیده، ترکیبی از تغییر مکان‌های اضافی و همچنین اثر تجمعی انرژی هیستریسیس تلف شده در سازه است. بر این اساس، پژوهشگران مدل‌های ترکیبی متعددی را ارائه داده‌اند، که از معروف‌ترین آنها می‌توان به مدل شاخص خرابی Park and Ang [۹] و Bozorgnia and Bertero [۱۰] اشاره نمود.

تاکنون طیف خرابی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هم زمان برای خاک و سازه ارائه نشده است. بدین منظور در این مقاله، مقایسه طیف خرابی سیستم با پای انعطاف پذیر و سیستم با پای صلب بر اساس شاخص خرابی Park and Ang برای سیستم‌های یک درجه آزادی ارائه می‌شود. طیف‌های خرابی برای چنین سیستم‌هایی با در نظر گرفتن سه زلزله ثبت شده بر خاک نرم و برای نسبت‌های مختلف لاغری در سازه، فرکانس بی‌بعد و شکل‌پذیری به دست می‌آیند. همچنین به منظور در نظر گرفتن آثار محلی سایت و افزایش دقت مطالعات، یک زلزله ثبت شده بر بستر صلب برای انواع مختلف سرعت موج برشی خاک کالیبره می‌شود. سپس طیف خسارت زلزله‌های کالیبره شده نیز به دست می‌آید و آثار مفید و مخرب اندرکنش خاک و سازه در این حالت نیز بررسی می‌شود.

۱- مدل‌سازی سازه و خاک

به منظور مدل‌سازی سازه و انتخاب زلزله‌های مناسب از مطالعه نخعی و قناد [۸] استفاده شده است. در این پژوهش، از سازه‌های یک درجه آزادی که دارای بازه وسیع پریود از ۰/۱ ثانیه تا ۴ ثانیه است، استفاده می‌شود. از آنجا که در مطالعات غیرخطی عوامل زیادی در پاسخ سازه موثر است، از سه پارامتر بی‌بعد به منظور کنترل مدل‌سازی استفاده می‌شود. این پارامترها عبارتند از:

(I) نسبت لاغری سازه (ضریب لاغری سازه)

غیرخطی وینکلر (BNWF) که به عنوان نمونه پیشتر به وسیلهی Harden and Hutchinson [۱۱] برای یک سیستم دو بعدی استفاده، در نظر گرفته می‌شود. جزییات این مدل (BNWF) و درستی آن با نتایج آزمایشگاهی در گزارش‌های ۵۰۴ و ۷۰۴ دانشگاه برکلی تشریح شده است. [۱۱ و ۱۲]. در این مدل از المان‌های الاستیک تیرستون برای کنترل رفتار شالوده و المان‌های فنر با طول صفر برای مدل‌کردن رفتار پی - خاک استفاده شده است. برای مدلسازی خاک از المان - های فنر Qzsimple1، Pysimple1 و Tzsimple1 با طول صفر استفاده می‌شود. مدل رفتاری المان‌های بالا به وسیلهی بولنجر (۲۰۰۰) در کد اصلی نرم‌افزار OpenSees اصلاح شده است [۱۲]. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، المان‌های گفته شده به ترتیب رفتار عمودی بار-جابجایی، رفتار افقی بار-جابجایی غیرفعال (Passive) خاک و رفتار افقی برش-لغزش در پایه را شبیه‌سازی می‌کنند و البته با توزیع مناسب فنرهای عمودی بار-جابجایی در طول پی، رفتار لنگر-چرخش پی نیز کنترل می‌شود. که برای این منظور دو ناحیه انتهایی با نسبت سختی بزرگتر وجود دارد. طول این نواحی بر اساس دستورالعمل ATC40 [۲۰]، برابر $\frac{1}{6}$ کل طول و سختی آنها $\frac{9}{3}$ برابر سختی ناحیه میانی در نظر گرفته می‌شود. مدل رفتاری المان Qzsimple1 به صورت نمونه در شکل (۲) نمایش داده شده است.

شکل (۱) مدل تیر روی فونداسیون وینکلر به صورت شماتیک [۱۲]

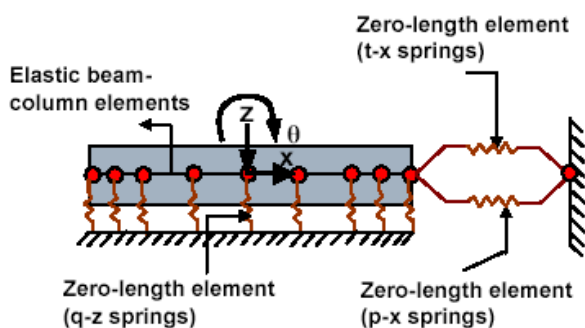


Fig. 1. schematic figure of beam on nonlinear Winkler foundation [12]

در مدل (BNWF) نسبت میرایی خاک و میرایی تشعشی

این پارامتر در واقع نماینده ابعاد سازه است و نسبت ارتفاع سازه h به شعاع پی دایره‌ای معادل r را نشان می‌دهد. مقدار بزرگ h/r نشان‌دهنده سازه لاغر و مقدار کوچک آن نشان‌دهنده سازه چاق است. در این پژوهش دو نسبت لاغری $h/r = 2$ ، $h/r = 4$ برای سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

(II) شاخص نسبت سختی سازه به خاک

یک بیان از نسبت سختی سازه به خاک، پارامتر فرکانس بی بعد a_0 است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$a_0 = \frac{\omega h}{V_s} \quad (1)$$

که ω فرکانس ارتعاش طبیعی سازه، h ارتفاع سازه و V_s سرعت موج برشی در خاک است. در این پژوهش سه مقدار $a_0 = 1, 2, 3$ در نظر گرفته می‌شود.

(III) نسبت شکل پذیری

برای برآورد رفتار غیرارتجاعی سازه، علاوه بر پریرود و میرایی، شکل‌پذیری تعبیه شده در سازه نیز به عنوان عامل تأثیرگذار در رفتار غیرارتجاعی آن لحاظ می‌شود. عمل تنظیم شکل‌پذیری تعبیه شده در سازه به مقدار ثابت، با سعی و خطا و تغییر مقاومت تسلیم، جرم و سختی سازه و با دقت ۲ درصد (در مقدار شکل‌پذیری تعبیه شده) در همه مدل‌های با پای صلب تحت هر کدام از زلزله‌ها انجام می‌شود. در این پژوهش دو مقدار شکل‌پذیری $\mu = 3, 6$ در سازه‌ها تعبیه شده است. توجه شود که ابتدا مقاومت تسلیم لازم برای رسیدن سازه با پای صلب به شکل‌پذیری هدف تحت زلزله مشخص محاسبه می‌شود. این مورد در واقع نماینده حالتی است که سازه براساس آیین‌نامه‌های متداول بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش طراحی می‌شود، اما در واقعیت به علت صلب نبودن بستر، سازه رفتاری متفاوت از آنچه برای آن طراحی شده خواهد داشت. سپس سازه با همین مقاومت تسلیم روی بسترانعطاف‌پذیر تحت رکورد زلزله قرار می‌گیرد.

مدل پی (خاک و شالوده) با الهام از مدل تیر بر بستر

جدول (۱) معرفی رکوردهای زلزله انتخاب شده

Earthquake	Date	station	PGA
IMPERIAL VALLEY	5/19/40	EL CENTRO ARRAY #9	0.313g
LOMA PRIETA	10/18/89	FOSTER CITY 355 MENHADEN	0.116g
SCT	9/19/85	MEXICO CITY	0.1724g

Table (1) earthquake ground motion list

اگر رفتار غیر خطی خاک در مدلسازی لحاظ نشده بود، نیاز به هم پایگی زلزله‌ها وجود نداشت [۸]. اما به دلیل وجود رفتار غیرخطی خاک متناظر با انرژی وارد شده، از مقدار بیشینه شتاب یکسان 0.3g استفاده شده است.

باید توجه داشت در انتخاب زلزله‌های معرفی شده، شرایط محلی سایت زلزله ثبت شده با مدل در نظر گرفته شده هماهنگی ندارد. به منظور افزایش دقت مطالعات، زلزله LomaPrieta که روی بستر صلب نیز ثبت شده در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳). همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد در مدل‌های سیستم خاک و سازه به منظور تدقیق پارامتر a_0 ، باید بیشینه سرعت موج برشی خاک تغییر یابد. پس با استفاده از نرم‌افزار NERA برای سرعت‌های مختلف موج برشی خاک این زلزله کالیبره می‌شود.

شکل (۳) رکورد زلزله LomaPrieta-Sanfran, Sierra pt بر بستر

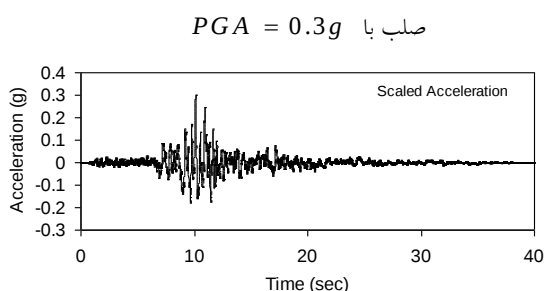


Fig. 3. LomaPrieta-Sanfran, Sierra pt earthquake record on bedrock with $PGA = 0.3g$

نمونه‌هایی از زلزله‌های کالیبره شده در شکل (۴) مشاهده می‌شود. زلزله ثبت شده بر بستر صلب با بیشینه شتاب 0.3g به خاک ۳۰ متری از خاک رسی، اعمال می‌شود. در شکل (۴-الف و ۴-ب). بیشینه شتاب زلزله‌ها به ترتیب

خاک برابر ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. همچنین از آنجا که برای تنظیم پارامتر a_0 نیاز به تغییر سرعت موج برشی خاک است، پارامتر $G = \rho V_s^2$ (مدول برشی خاک) نیز متناسب با سرعت موج برشی خاک تغییر می‌کند. توجه شود که این رابطه بیانگر بیشینه مدول برشی خاک است که بدیهی در مدل (BNWF) با تغییر کرنش برشی، سختی برشی نیز تغییر می‌کند.

شکل (۲) منحنی رفتاری المان Qzsimple1 [۱۲]

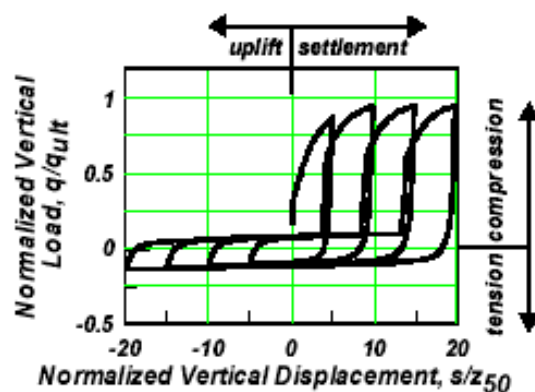


Fig. 2. nonlinear Qzsimple1 behavior

در این فنرها ظرفیت باربری افقی و قائم از روابط میرهف محاسبه می‌شود. همچنین برای محاسبه سختی فنرهای افقی و قائم خاک از روابط Gazetas که در ATC-40 پیشنهاد شده، استفاده می‌شود [۱۲].

$$K_x = \frac{GL}{2 - \nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] + \frac{GL}{0.75 - \nu} \left[0.1 \left(1 - \frac{B}{L} \right) \right] \quad (2)$$

$$K_z = \frac{GL}{1 - \nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right] \quad (3)$$

بدیهی است روابط فوق بیانگر مقدار سختی در ناحیه خطی فنرها است. به منظور دستیابی به جزییات بیشتر در مورد مدلسازی خاک می‌توان به مراجع ۱۱ و ۱۲ مراجعه کرد.

۲- زلزله‌های ورودی

به منظور انجام مطالعات عددی سه رکورد زلزله مطابق جدول زیر استفاده می‌شود.

برابر $0.16g, 0.359g$ است.

است که در این پژوهش برابر 0.2 در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. برای بیان رابطه نیرو- تغییر مکان سازه در این پژوهش، مدل دو خطی انتخاب شده است که سختی بعد از مرحله تسلیم به صورت ضریبی از سختی در مرحله الاستیک در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش این ضریب برابر 5 درصد در نظر گرفته می‌شود. سختی مرحله باربرداری نیز با سختی در مرحله الاستیک برابر است [۱۳]. پارامتر دیگری که در فرمول شاخص خرابی وجود دارد ظرفیت نهایی تغییر مکان سازه تحت بارگذاری مونوتونیک است. در این پژوهش، U_{umon} بر حسب ارتفاع سازه و بر اساس مطالعه برترو و برترو [۱۳] محاسبه می‌شود. این پارامتر بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$U_{umon} = \theta_{umon} \times h / 2 \quad (5)$$

پارامتر h ، ارتفاع سازه بر حسب متر است که با استفاده از رابطه پیشنهادی NEHRP برابر است با:

$$h = 32.7 \times T_{fix}^{1.33} \quad (6)$$

که T_{fix} پریود سازه با پای صلب بر حسب ثانیه است. در این پژوهش، ظرفیت چرخش کل سازه در رابطه 5 ، طبق مرجع [۱۳ و ۶] برابر 0.05 در نظر گرفته می‌شود.

۴- بحث در مورد نتایج

در این قسمت شاخص خرابی مدل‌های یک درجه آزادی با پای صلب و انعطاف‌پذیر، به صورت طیف خرابی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. یادآوری می‌شود طیف خرابی بر مبنای مقادیر پاسخ نرمالایز شده یک سری سیستم غیرخطی SDOF است. یک طیف خرابی برای یک زلزله بیانگر تغییرات شاخص (اندیس) خرابی (خسارت) در برابر پریود سازه، برای یک سری سازه یک درجه آزادی است. همان‌گونه که گفته شد دسته‌بندی مدل‌ها بر اساس پارامترهای فرکانس بی بعد a_0 ، نسبت لاغری h/r و شکل‌پذیری تعبیه شده در سازه صورت گرفته است. شکل ۵ نشان‌دهنده نتایج مربوط به زلزله SCT با پیشینه شتاب $PGA = 0.3g$ ، برای سازه‌های با شکل‌پذیری $\mu = 3$ است. در هر شکل، سیستم‌های

شکل (۴-الف) رکورد زلزله LomaPrieta پس از تحلیل ستون خاک با

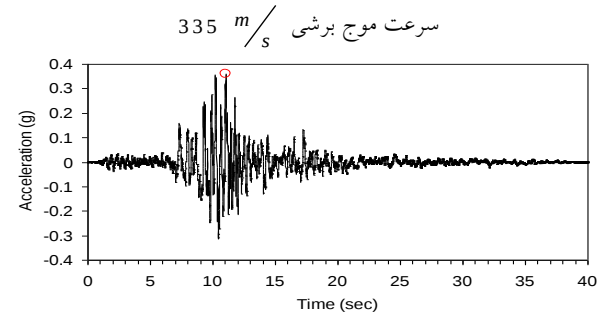


Fig. 4 (a) LomaPrieta earthquake record after the analysis of the soil column model with $V_s=335 \text{ m/s}$

شکل (۴-ب) رکورد زلزله LomaPrieta پس از تحلیل ستون خاک با

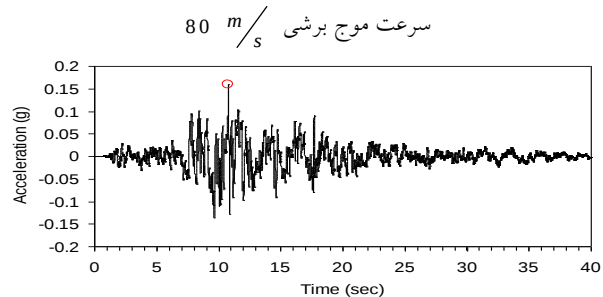


Fig. 4 (b) LomaPrieta earthquake record after the analysis of the soil column model with $V_s=80 \text{ m/s}$

۳- شاخص خرابی

همان‌طور که گفته شد در این پژوهش از شاخص خرابی پارک و انگ استفاده می‌شود. رابطه پارک و انگ به صورت معادله (۴) ارائه شده است.

$$D_{PA} = \frac{U_{max} - U_y}{U_{umon} - U_y} + \beta \frac{E_{hys}}{U_{umon} F_y} \quad (4)$$

در این رابطه U_{max} جابه‌جایی ماکزیمم مطلق سازه است و E_{hys} مجموع انرژی هیسترسیس تلف شده به وسیله تغییر مکان‌های پلاستیک است. این دو پارامتر به صورت مستقیم از نتایج تحلیل و با استفاده از حلقه‌های هیسترسیس حاصل از تحلیل به دست می‌آیند. U_y جابه‌جایی تسلیم سازه است که به صورت آشکار با داشتن سختی سازه و مقاومت تسلیم آن قابل محاسبه است. β پارامتر ثابت کالیبراسیون

اندرکنش خاک و سازه باعث کاهش مقدار خرابی در سازه می شود و بنابراین اثر مفید دارد. همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می شود با افزایش مقدار a_0 ، طیف های خرابی به سمت پریود کمتر و خرابی بیشتر متمایل می شوند. تغییر در پریود ماکزیمم خرابی به خاطر افزایش پریود سیستم اندرکنش خاک و سازه تحت افزایش a_0 است.

همچنین شکل (۵) نشان می دهد که بعد از پریود آستانه خرابی به شدت کاهش می یابد و حتی ممکن است به میزان صفر برسد. در پریودهای کوتاه به منظور تنظیم پارامتر a_0 ، خاک با سرعت موج برشی بیشتری در نظر گرفته می شود. اما در پریودهای طولانی با وجود نرم تر شدن سازه خاک نیز سرعت موج برشی کمتری دارد. پس در پریودهای طولانی تر، خاک رفتار غیرخطی بیشتری (هندسی و مصالح) از خود نشان می دهد. این موضوع موجب استهلاک قابل توجه انرژی زلزله در خاک می شود.

شکل های (۶ و ۷) نشان دهنده نتایج مشابه شکل (۵) برای زلزله های LomaPrieta و Imperialvalley با بیشینه شتاب $PGA = 0.3g$ است. برای این زلزله ها نیز روند تغییرات مشابه حالت قبل، یعنی افزایش خرابی برای $a_0 = 2, 3$ تا قبل از پریود آستانه زلزله و کاهش آن بعد از پریود آستانه مشاهده می شود. همچنین سیستم ها با $a_0 = 1$ نشان دهنده آثار مفید در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه است. در زلزله LomaPrieta افزایش لاغری موجب می شود که سیستم ها با $a_0 = 1$ در مقایسه با سیستم با پای صلب، قبل از پریود آستانه نیز متحمل خرابی بیشتری شوند. هرچند این مقدار قابل توجه نیست. در زلزله Imperialvalley نیز فقط سیستم های با لاغری برابر ۲ و $a_0 = 3$ در مقایسه با سیستم با پای صلب، قبل از پریود آستانه متحمل خرابی بیشتری می شوند. این نتایج نشان دهنده تاثیر محتوای فرکانسی زلزله ها است که وابسته به میزان رفتار غیرخطی در خاک است که به نظر نمی رسد خدشهای به کلیت نتایج وارد کند. اما آنچه نقش محتوای فرکانسی زلزله را پررنگ تر می کند، میزان پریود آستانه و هموار بودن شکل طیف است. اگر محتوای فرکانسی زلزله، یک پریود اصلی واضح نشان دهد،

اندرکنشی با $a_0 = 1, 2, 3$ با نمودارهای مجزا مشخص می شود. همچنین نتایج برای h/r برابر ۲ و ۴، در ردیف های بالا و پایین ارائه می شود. در این شکل ها محور افقی نشان دهنده پریود اصلی سازه با پای صلب است.

شکل (۵) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف خرابی تحت زلزله SCT برای $\mu = 3$ ، $h/r = 2$ (بالا) و $h/r = 4$ (پایین)

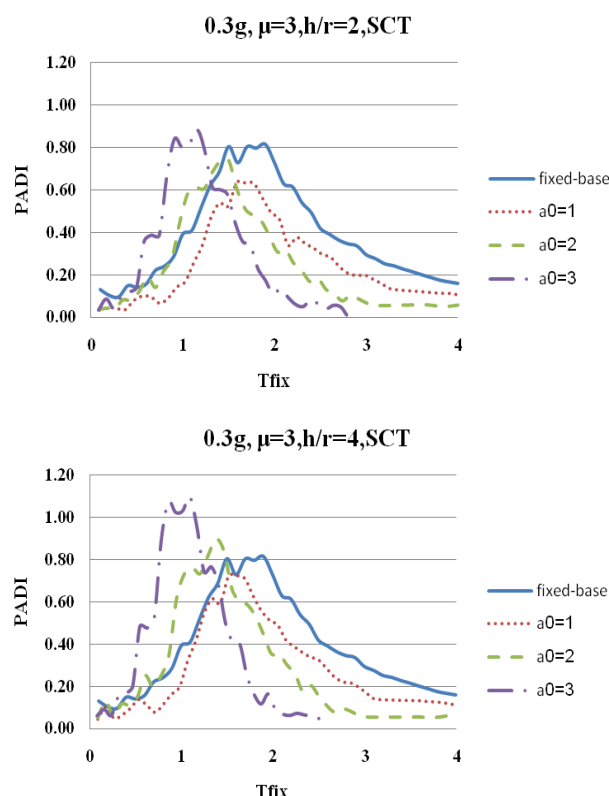


Fig. 5. Effect of SSI on PADI spectra under the SCT (Mexico City, 1985) earthquake for $\mu_{fix} = 3$, $h/r=2$ (top) and $h/r=4$ (bottom)

شکل (۵) نشان می دهد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای سازه های با $a_0 = 1$ ، اندرکنش خاک و سازه اثری مثبت در کاهش خرابی دارد پس در چنین حالتی اندرکنش اثر مفید دارد. اما برای حالت های $a_0 = 2, 3$ ، زمانی که یک سازه با پای صلب روی پایه انعطاف پذیر قرار می گیرد، مقدار خرابی که سازه قبل از پریود آستانه زلزله (حدود ۱/۵ ثانیه) متحمل می شود، در مقایسه با حالت پای صلب می تواند بیشتر باشد. یعنی قبل از پریود آستانه زلزله، اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش مقدار خرابی در سازه می شود پس اثر مخرب دارد. و بعد از پریود آستانه زلزله،

شکل (۷) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف خرابی تحت زلزله Imperialvalley برای $\mu = 3$ ، $h/r = 2$ (بالا) و $h/r = 4$ (پایین)

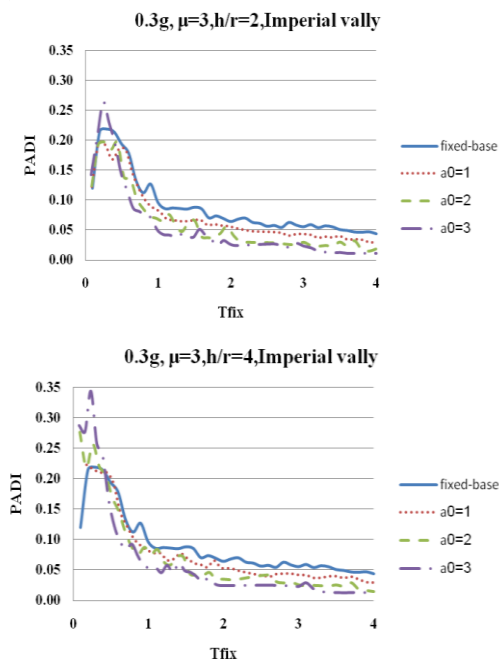


Fig. 7. Effect of SSI on PADI spectra under the Imperialvalley earthquake for $\mu_{fix}=3$, $h/r=2$ (top) and $h/r=4$ (bottom)

شکل (۸) تاثیر لاغری بر پارامترهای تشکیل دهنده شاخص خرابی تحت زلزله SCT برای سازه با $\mu = 3$ و $a_0 = 3$

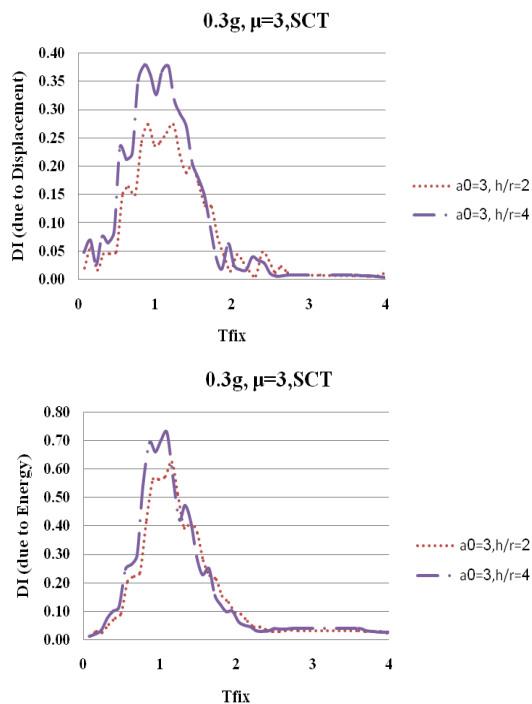


Fig. 8. Effect of aspect ratio on DI parameters under the SCT earthquake for $\mu_{fix}=3$, $a_0=3$

آن پریود می تواند به صورت یک جداکننده ناحیه با آثار مفید و مخرب اندرکنش خاک و سازه عمل کند. زلزله SCT پریود اصلی حدود ۲ ثانیه دارد. بنابراین پریود آستانه و جداکننده ناحیه مفید و مخرب آثار اندرکنش خاک و سازه، به خوبی قابل مشاهده است. اما زلزله LomaPrieta یک پریود اصلی مشخص ندارد. پس نمودار آن شکل نوسانی دارد. هرچند در این نمودارها نیز بعد از گذر از پریود بین ۰/۷ تا ۱/۱ ثانیه، آثار مفید اندرکنش خاک و سازه قابل مشاهده است. در زلزله Imperialvalley پریود جداکننده در حدود ۰/۵ ثانیه اتفاق می افتد. آنچه باعث شده که در زلزله Imperialvalley در لاغری برابر ۲ فقط سیستم با $a_0 = 3$ مخرب باشد، وجود رفتار غیرخطی خاک و کم بودن محتوای انرژی این زلزله است. مقایسه طیف های خرابی این سه زلزله نشان می دهد که زلزله SCT موجب ایجاد خرابی بیشتری در سازه می شود. این موضوع به خاطر ویژگی های یکتای محتوای انرژی این زلزله است [۶].

شکل (۶) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف خرابی تحت زلزله Lomapieta برای $\mu = 3$ ، $h/r = 2$ (بالا) و $h/r = 4$ (پایین)

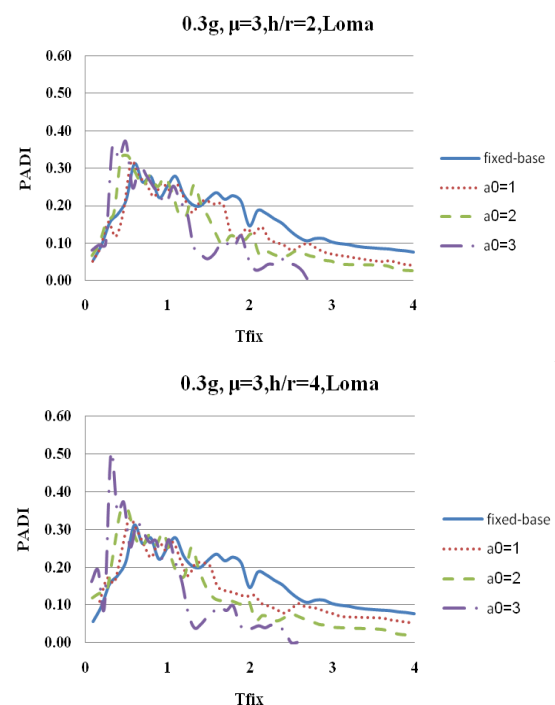


Fig. 6. Effect of SSI on PADI spectra under the Lomapieta earthquake for $\mu_{fix}=3$, $h/r=2$ (top) and $h/r=4$ (bottom)

تغییرات نمودارها مشابه شکل (۳) است. نکته قابل توجه این است که اولاً دامنه خرابی در این حالت بالاتر از شکل پذیری ۳ است و ثانیاً تفاوت بین نمودارها با تغییر نسبت a_0 شدیدتر است. باید توجه داشت با تعبیه شکل پذیری بیشتر در سازه، انرژی بیشتری در آن مستهلک می‌شود. شکل (۱۰) نشان دهنده میزان رشد خرابی ناشی از تغییر مکان و انرژی با تغییر مقدار شکل پذیری از ۳ به ۶ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان این رشد در بخش انرژی بیشتر از بخش تغییر مکان است.

شکل (۱۰) تاثیر شکل پذیری بر پارامترهای تشکیل دهنده شاخص خرابی

تحت زلزله SCT برای سازه با $h/r = 2$ و $a_0 = 1, 3$

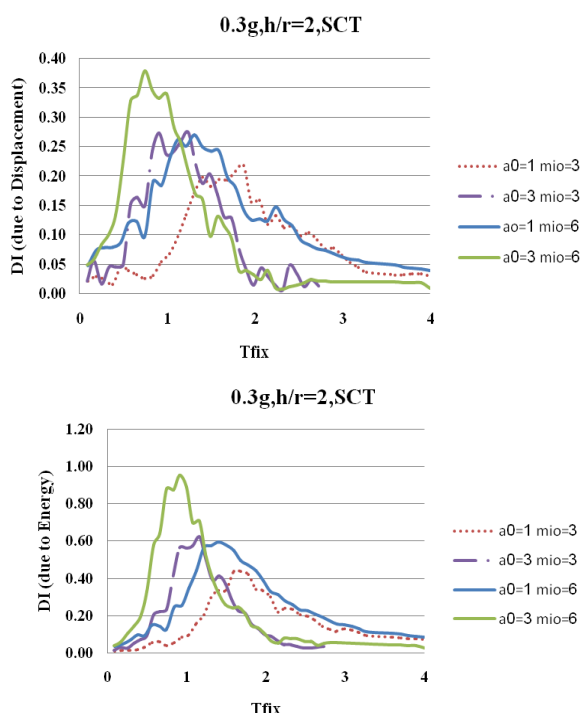


Fig. 10. Effect of μ on DI parameters under the SCT earthquake for $h/r=2$, $a_0 = 1, 3$

شکل (۱۱) نشان دهنده نتایج نهایی خرابی مربوط به زلزله SCT با بیشینه شتاب $PGA = 0.6 g$ و برای سازه‌های با شکل پذیری $\mu = 3$ است. به شکل مشابه مشاهده می‌شود روند تغییرات نمودارها مانند قبل است. نکته قابل توجه این است که رشد دامنه خرابی ماکزیمم با دو برابر شدن مقدار PGA در سازه با پای صلب حدود ۱/۵ برابر است که این موضوع برای سیستم با $a_0 = 1$ در همین حدود است. حال

مقایسه طیف‌ها در ردیف بالا و پایین شکل‌های (۵ تا ۷) نیز نشان دهنده اثر میزان لاغری بر خرابی وارد بر سازه است. مشاهده می‌شود که در اثر افزایش میزان لاغری نه تنها میزان ماکزیمم خرابی بیشتر می‌شود، بلکه محل آن نیز تمایل بیشتری به حرکت به سمت پریود کمتر دارد. حرکت به سمت پریود کمتر به خاطر افزایش بیشتر پریود در اندرکنش در سازه‌های لاغرتر است. افزایش مقدار خرابی در سازه‌های لاغرتر به خاطر افزایش تغییر مکان ایجاد شده در سازه در اثر بلندشدگی است. در شکل (۸) رشد هریک از پارامترهای تشکیل دهنده شاخص خرابی در اثر افزایش لاغری برای نسبت $a_0 = 3$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان لاغری سهم تغییر مکان در خرابی سازه رشد بیشتری دارد.

شکل (۹) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف

خرابی تحت زلزله SCT برای $\mu = 6$ ، $h/r = 2$ (بالا) و $h/r = 4$ (پایین)

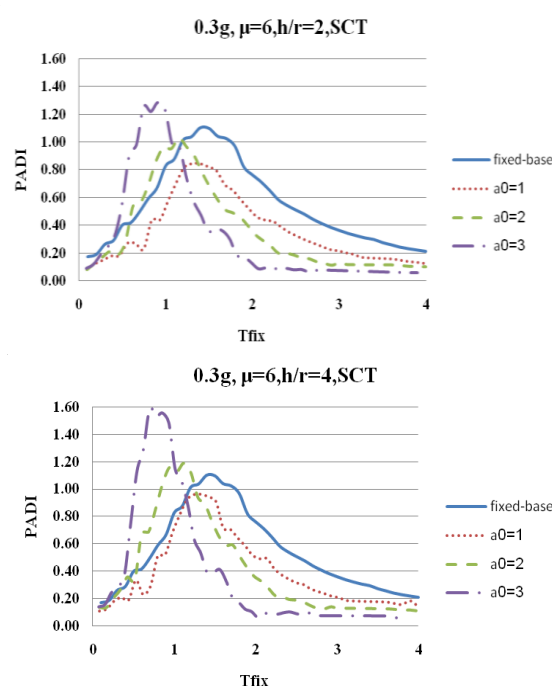


Fig. 9. Effect of SSI on PADI spectra under the SCT (Mexico City, 1985) earthquake for $\mu_{fix}=6$, $h/r=2$ (top) and $h/r=4$ (bottom)

شکل (۹) نشان دهنده نتایج مربوط به زلزله SCT با بیشینه شتاب $PGA = 0.3 g$ برای سازه‌های با شکل پذیری $\mu = 6$ است. با دقت در شکل (۹) مشاهده می‌شود روند

که موجب حاکم شدن رفتار غیر خطی مصالح می شود. همان گونه که در جدول (۲) مشاهده می شود با افزایش میزان نسبت سختی سازه با خاک a_0 ، طول بلندشدگی کمتر می شود. در واقع با کاهش سرعت موج برشی خاک رفتار غیر خطی خاک بیشتر می شود و طول بلندشدگی کمتر خواهد بود. توجه شود که اگرچه طول بلندشدگی با افزایش a_0 کمتر شده است اما میزان چرخش شالوده بیشتر می شود. همچنین در جدول (۲) مشاهده می شود که با افزایش نسبت لاغری، طول بلندشدگی بیشتر می شود. این موضوع به خاطر افزایش لنگر واژگونی ناشی از افزایش ارتفاع سازه، همچنین افزایش سرعت موج برشی ناشی خاک به خاطر تنظیم پارامتر a_0 است. همچنین به طور آشکار مشاهده می شود که با افزایش بیشینه شتاب زلزله درصد بلندشدگی نیز افزایش می یابد. قابل توجه است که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک، موجب شده که میزان افزایش درصد بلندشدگی کمتر از نسبت افزایش مقدار حداکثر شتاب زلزله باشد. در این پژوهش میزان نشست نیز تا ۱۰ سانتی متر در بدترین حالت مشاهده شده است. که این مقدار برای فونداسیون های گسترده قابل قبول است چرا که آنچه در طراحی سازه حائز اهمیت است، میزان نشست افتراقی است.

جدول (۲) مقایسه طول بلندشدگی شالوده در سیستم های مختلف سازه ای

PERIOD	$T_{fix} = 0.5$			
N.D.FERQ.	$a_0 = 1$		$a_0 = 3$	
ASPECT RATIO	$h/r = 2$	$h/r = 4$	$h/r = 2$	$h/r = 4$
UPLIFT LENGTH (%) FOR SCT AND $PGA = 0.3g$	30%	54%	21%	36%
UPLIFT LENGTH (%) FOR SCT AND $PGA = 0.6g$	48%	78%	33%	51%

Table (2) the comparison of uplift length for different structural system

نتایج این مقاله با نتایج مرجع [۸] به طور کلی هم خوانی

آنکه برای سیستم با $a_0 = 3$ این رشد حدود ۱/۲۷ برابر است که نشان از اثر مثبت رفتار غیرخطی خاک دارد. توجه شود که در این حالت تنها عامل کنترل کننده خاک مقاومت خاک بوده است و محدودیتی برای طول بلندشدگی در نظر گرفته نشده است.

شکل (۱۱) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استاندارد به طیف خرابی تحت زلزله SCT برای $\mu = 3$ ، $h/r = 2$ (بالا) و $h/r = 4$ (پایین)

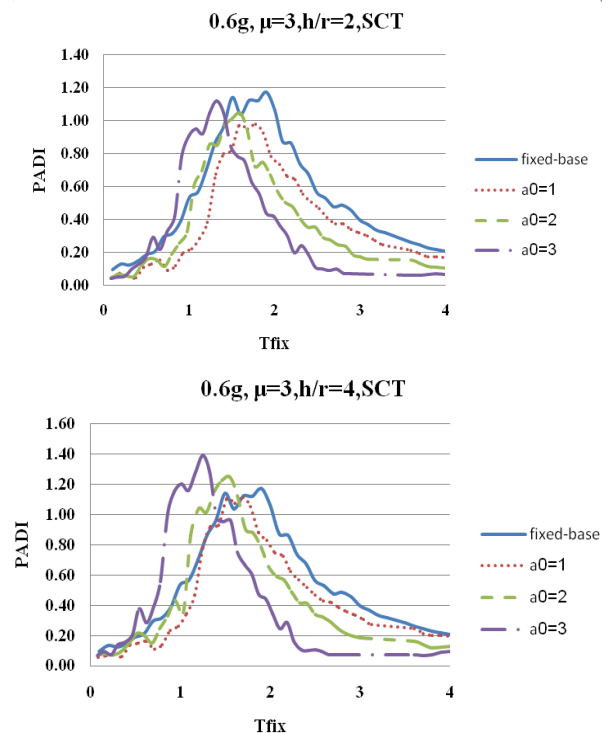


Fig. 11. Effect of SSI on PADI spectra under the SCT (Mexico City, 1985) earthquake for $\mu_{fix} = 3$, $h/r = 2$ (top) and $h/r = 4$ (bottom)

در جدول (۲) میزان بلندشدگی شالوده در سازه ها با ویژگی های مختلف ارائه شده است. در سازه ها با پریرود کوچکتر بلندشدگی شالوده اثر مهمتری در رفتار سیستم دارد و در سازه های با پریرود طولانی ممکن است بلندشدگی شالوده اتفاق نیافتد. به طور نمونه در سازه با پریرود ۳/۸ هیچ بلندشدگی در فونداسیون دیده نشده است. این موضوع به چگونگی مدلسازی خاک مربوط است. در پریرودهای طولانی به منظور تنظیم نسبت سختی سازه به خاک، از خاک با سرعت موج برشی کمتر استفاده شده است

مناسبتی دارد. در این مرجع نیز نشان داده شد که اثر مفید یا مضر اندرکنش خاک و سازه، بستگی به موقعیت پریود سازه و پریود اصلی زلزله نسبت به یکدیگر دارد. یعنی در سازه‌هایی با پریود بزرگتر از پریود زلزله اندرکنش خاک و سازه اثری مفید دارد، در حالی که در سازه‌هایی با پریود کوچکتر از پریود زلزله اندرکنش خاک و سازه اثری مخرب دارد. در مقایسه نتایج این مقاله با نتایج مرجع [۶] که در حوزه رفتار خطی خاک انجام شده است، نیز هم‌خوانی مناسبی مشاهده می‌شود. در این مرجع نشان داده شده است که اندرکنش خاک و سازه در همه نسبت‌های سختی سازه به خاک، قبل از پریود آستانه موجب افزایش شاخص خرابی می‌شود. حال آنکه در این مقاله این موضوع برای سازه‌ها با $a_0 = 1$ مشاهده نشده است. نکته قابل توجه این است که میزان رشد خرابی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، در مقایسه با حالت پای صلب در این مقاله کمتر از مرجع [۸] مشاهده شده است. این دو موضوع به خوبی آثار مثبت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در پای سازه را نشان می‌دهد.

شکل (۱۳) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف خرابی تحت زلزله‌های Lomapieta متناسب با شرایط محلی سایت برای $h/r = 4$ ، $\mu = 3$

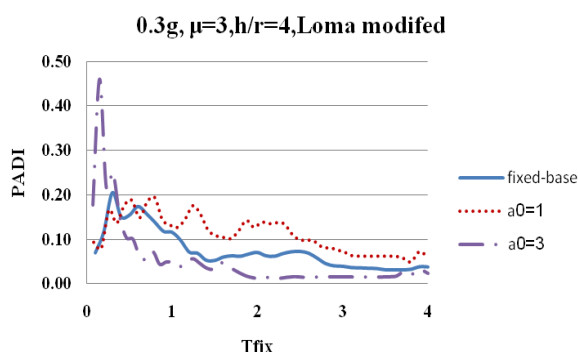


Fig. 13. Effect of SSI on PADI spectra under the Lomapieta earthquake generated for the site for $\mu_{fix}=3$, $h/r=4$

همانگونه که مشاهده می‌شود برای سیستم‌ها با $a_0 = 3$ ، اندرکنش خاک و سازه قبل از پریود آستانه دارای آثار مخرب و بعد از آن دارای آثار مفید است. توجه شود که به علت تقویت زلزله در پریودهای کم ناشی از آثار محلی سایت، میزان خرابی ناشی از اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالتی که آثار سایت مدنظر نباشد، به شدت زیاده‌تر است. اما نکته جالب توجه این است که به علت آثار محلی سایت در سیستم‌ها با $a_0 = 1$ ، بعد از پریود آستانه دیگر اندرکنش خاک و سازه اثر مفید نخواهد داشت بلکه چنین سیستم‌هایی خرابی بالاتری نسبت به سازه با پای صلب متحمل می‌شوند. در بیشتر این سیستم‌ها خاک زیر سازه موجب تقویت زلزله شده است. توجه شود این مقایسه با یک زلزله مبنا بر بستر

شکل (۱۲) روند تغییرات آثار اندرکنش خاک و سازه با استناد به طیف خرابی تحت زلزله Lomapieta ثبت شده بر بستر سنگی برای

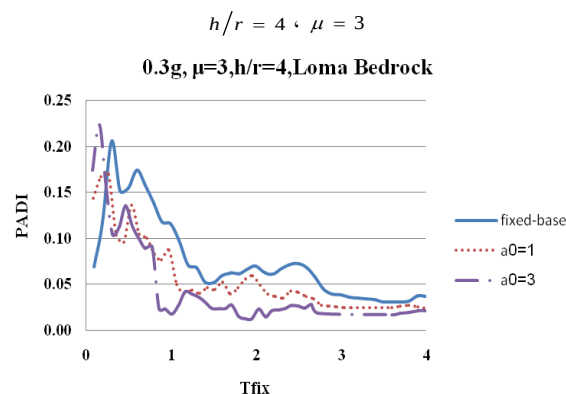


FIGURE (12) Effect of SSI on PADI spectra under the Lomapieta earthquake recorded on bedrock for $\mu_{fix}=3$, $h/r=4$

به منظور تعیین آثار محلی سایت بر طیف خرابی سیستم‌های یک درجه آزادی متناسب با زلزله LomaPrieta که بر بستر سنگی ثبت شده است، تولید می‌شود. شکل (۱۲) نشان‌دهنده نتایج نهایی خرابی مربوط به این زلزله با بیشینه شتاب

صلب انجام شده است.

۵- نتیجه گیری

به منظور بررسی آثار مفید و مخرب اندرکنش خاک و سازه در حوزه رفتار غیرخطی خاک و سازه، معیار مناسبی مورد نیاز است که بتوان احتمال خرابی در سازه هنگام وقوع زلزله را به وسیله آن بیان کرد. توجه به سازوکار واقعی خرابی در سازه‌ها نشان می‌دهد که این پدیده در واقع ترکیبی از تغییر مکان و همچنین اثر تجمعی انرژی هیستریسیس تلف شده در سازه، تحت بارگذاری رفت و برگشتی است. در این مقاله طیف‌های خرابی سیستم با پای انعطاف‌پذیر و سیستم با پای ثابت، با یکدیگر مقایسه شده است. طیف‌های خرابی بر مبنای شاخص Park and Ang برای سیستم‌های یک درجه آزادی با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه ارائه شده است. این سیستم‌های یک درجه آزادی غیر خطی که در واقع معادل قاب‌های برشی است، بر تیر بر بستر غیر ارتجاعی وینکلر که قادر به در نظر گرفتن آثار غیر خطی مصالح خاک و آثار بلندشدگی است، قرار گرفته‌اند. طیف‌های خرابی برای چنین سیستم‌هایی با در نظر گرفتن سه زلزله ثبت شده بر خاک نرم و برای نسبت‌های مختلف لاغری در سازه $h/r = 2, 4$ ، فرکانس بی بعد $a_0 = 1, 2, 3$ و شکل پذیری تعبیه شده در سازه $\mu = 3, 6$ ، به دست آمده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای سازه‌های با $a_0 = 1$ ، اندرکنش خاک و سازه اثری مثبت در کاهش خرابی دارد پس در چنین حالتی اندرکنش اثر مفید دارد. اما برای حالت‌های $a_0 = 2, 3$ ، زمانی که یک سازه با پای صلب روی پایه انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرد، مقدار خرابی که سازه قبل از پیوند آستانه زلزله متحمل می‌شود، در مقایسه با حالت پای صلب بیشتر است. با افزایش مقدار a_0 ، طیف‌های خرابی به سمت پیوند کمتر و خرابی بیشتر متمایل می‌شوند. تغییر در پیوند ماکزیمم خرابی به خاطر افزایش پیوند سیستم اندرکنش خاک و سازه تحت افزایش a_0 است. بعد از پیوند آستانه خرابی به شدت کاهش می‌یابد و حتی ممکن است به میزان

صفر برسد چرا که در پیوندهای کوتاه به منظور تنظیم پارامتر a_0 ، خاک با سرعت موج برشی بیشتری، در نظر گرفته می‌شود. اما در پیوندهای طولانی با وجود نرم‌تر شدن سازه، خاک نیز سرعت موج برشی کمتری دارد. بنابراین در پیوندهای طولانی‌تر خاک رفتار غیرخطی بیشتری (هندسی و مصالح) از خود نشان می‌دهد. این موضوع موجب استهلاک قابل توجه انرژی زلزله در خاک می‌شود. در اثر افزایش میزان لاغری سازه نه تنها میزان ماکزیمم خرابی بیشتر می‌شود، بلکه محل آن نیز تمایل بیشتری به حرکت به سمت پیوندهای کمتر دارد. افزایش مقدار خرابی در سازه‌های لاغرتر نیز به خاطر افزایش تغییر مکان ایجاد شده در سازه در اثر بلند شدگی است. با افزایش میزان لاغری سهم تغییر مکان در خرابی سازه، رشد بیشتری دارد. با افزایش میزان شکل پذیری تعبیه شده در سازه $\mu = 6$ ، روند تغییرات مشابه حالت شکل پذیری $\mu = 3$ است، با این تفاوت که اولاً دامنه خرابی بیشتر می‌شود و ثانیاً تفاوت بین نمودارها با تغییر نسبت a_0 شدیدتر است. در این حالت میزان رشد خرابی در بخش انرژی بیشتر از بخش تغییر مکان است. با افزایش بیشینه شتاب زلزله ورودی $PGA = 0.6g$ ، نیز روند تغییرات نمودارها مانند حالتی است که بیشینه شتاب زلزله برابر $PGA = 0.3g$ است. نکته قابل توجه این است رشد دامنه خرابی ماکزیمم با دو برابر شدن مقدار PGA در سازه با پای صلب حدود ۱/۵ برابر است، که این موضوع برای سیستم با $a_0 = 1$ در همین حدود است. حال آنکه برای سیستم با $a_0 = 3$ این رشد حدود ۱/۲۷ برابر است، که نشان از اثر مثبت رفتار غیرخطی خاک دارد. همچنین در این مقاله مشخص شده است که در سازه‌ها با پیوند کوچکتر بلندشدگی شالوده اثر مهمتری در رفتار سیستم دارد و در سازه‌های با پیوند طولانی ممکن است بلندشدگی شالوده اتفاق نیافتد. همچنین با افزایش میزان نسبت سختی سازه با خاک a_0 ، طول بلندشدگی کمتر می‌شود. در واقع با کاهش سرعت موج برشی خاک رفتار غیر خطی خاک بیشتر می‌شود و طول بلندشدگی کمتر خواهد بود. توجه شود که اگرچه طول بلندشدگی با افزایش a_0 کمتر شده است اما میزان چرخش شالوده بیشتر می‌شود. با افزایش نسبت

References

۶- مراجع

- [1] Enrique Luco, J. "Bounds for natural frequencies, Dunkerley's formula and application to soil-structure interaction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (47), 2013, 32-37.
- [2] Elnashai, S. A., and MCCLURE, C. D. "Effect of modelling assumptions and input motion characteristics on seismic design parameters of RC bridge piers", Wiley, Chichester, ROYAUME-UNI. 1996.
- [3] Zeller, E. "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures: Commentary", DIANE Publishing Company, 2001.
- [4] Moghaddasi, et al., "Soil-Foundation-Structure Interaction Effects on Nonlinear Seismic Demands of Structures", *NZSEE Conference*, 2010, New Zealand.
- [5] Emadi, A., Shakib, H., and Shadlou, M. "Investigation of beneficial and detrimental effects of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of shear buildings." *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), (2014), 253-263.
- [6] Nakhaei M., Ghannad M.A., "The effect of Soil-Structure interaction on damage index of buildings", *Engineering Structures*, (30), 2008, 1491-1499.
- [7] Datta, T. K. 2010. *Seismic analysis of structures*. John Wiley & Sons
- [8] Masaeli, H., Khoshnoudian, F., Ziaei, R. 2014. Rocking soil-structure systems subjected to near-fault pulses. *Journal of Earthquake Engineering*, (accepted).
- [9] Park Y.j., Ang A.H-s., Wen Y.K. "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", *Journal of Structural Engineering*, (111), 1985, 740-757.
- [10] Bozorgnia Y., Bertero VV. "improved shaking damage parameters for postearthquake applications", *proceeding of the SMIP01 seminar on utilization of strong motion data*, 2001, Los Angeles, California. 1-22.
- [11] Harden, CH., Hutchinson, T., 2005. Numerical Modeling of the Nonlinear Cyclic Response of Shallow Foundations. Report No. 504, Earthquake Research Center, University of California, Berkeley, California
- [12] Gajan, S., 2007. Numerical Models for Analysis and Performance-Based Design of Shallow Foundations Subjected to Seismic Loading. Report No. 704, Earthquake Research Center, University of California, Berkeley, California
- [13] Bertero, R. D. and Bertero, V. V. "Performance-based seismic engineering: the need for a reliable conceptual comprehensive approach". *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, (31), 2002, 627-652.

لاغری، طول بلندشدگی بیشتر می‌شود. همچنین به طور بدیهی مشاهده می‌شود که با افزایش بیشینه شتاب زلزله درصد بلندشدگی نیز افزایش می‌یابد. قابل توجه است که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک، موجب شده که میزان افزایش درصد بلندشدگی کمتر از نسبت افزایش مقدار بیشینه شتاب زلزله باشد. با بررسی آثار محلی سایت، مشخص شد که برای سیستم‌ها با $a_0 = 3$ اندرکنش خاک و سازه قبل از پریرود آستانه دارای آثار مخرب و بعد از آن دارای آثار مفید است. توجه شود که به علت تقویت زلزله در پریرودهای کم میزان خرابی ناشی از اندرکنش خاک و سازه، نسبت به حالتی که آثار سایت مدنظر نباشد، به شدت زیاده‌تر است. اما نکته جالب توجه این است که به علت آثار محلی سایت در سیستم‌ها با $a_0 = 1$ بعد از پریرود آستانه دیگر اندرکنش خاک و سازه اثر مفید نخواهد داشت؛ بلکه چنین سیستم‌هایی خرابی بالاتری نسبت به سازه با پای صلب متحمل می‌شوند چراکه در بیشتر این سیستم‌ها خاک زیر سازه موجب تقویت زلزله شده است.

Beneficial and detrimental effects of soil-structure interaction according to damage spectrum

A. Emadi¹, H. Shakib^{2*}

1- Ph. D. student, Earthquake Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Professor, Earthquake Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

Shakib@modares.ac.ir

Abstract:

In spite of extensive studies since 1970 on Soil Structure Interaction (SSI), there is still controversy regarding the seismic performance of the structures rested on soft soil. SSI is known as a phenomenon influencing beneficial and sometimes detrimental effects on the response of structures. The response of soil-structure system depends basically on the size of the structure, its dynamic properties, and the soil profile as well as the applied excitation. The response of soil-structure system is nonlinear under strong shaking and a combination of different types of nonlinearity as well as sliding, uplift and soil yielding will occur. Although foundation uplift in conjunction with soil yielding may dissipate energy during earthquakes, they may also lead to excessive permanent deformations in the structures.

In such case, soil- structure interaction (SSI) is not only beneficial, but also detrimental to the seismic response of the structures. In order to investigate such effects of SSI on the nonlinear response of building, damage spectra for the SDOF models are provided on the basis of Park and Ang damage Index, considering and neglecting the SSI effects. The bilinear SDOF models are also supported by Beam on Nonlinear Winkler Foundation. Two non-dimensional parameters are used to control the modeling: (I) non-dimensional frequency (a_0) which is a statement of the structure-to-soil stiffness ratio and (II) the aspect ratio of the structure (h/r). The systems are subjected to three earthquake ground motions recorded on soft soil. For each period, first the yield strength demand of the structure is calculated in an iterative process where the specified target ductility is to be reached within 2% of accuracy for a fixed-base model when subjected to the ground motions. The dissipated amount of hysteretic energy in the structure is also calculated accordingly. Then, the ductility and the hysteretic energy demands are calculated for several soil-structure systems with different values of a_0 and h/r which subjected to the same ground motion to provide the same yield strength for the structure. Consequently, the damage index is calculated for the structure in the fixed-base state as well as for the structure when located on soil. The results show that for most of structures with long period, SSI decreases the damage index. However it is observed that in some cases of structure to soil stiffness, SSI increases the damage index before a threshold period which is closely related to the predominant period of the ground motion. It means that the conventional fixed-base model underestimates the damages sustained by buildings having periods less than this threshold period. In particular, the SSI substantially increases the damage index of short-period buildings located on soft soils. It is also observed that increasing the aspect ratio of the structure increases this effect. However, the trend is reversed after the threshold period. It is observed that the increase in the slenderness ratio and ductility ratio of structures leads to increase in the maximum damage.

Keywords: Soil structure interaction, Damage index, Nonlinear behavior.