

اثر وابستگی فرکانس توابع امیدانس خاک بر شاخص خسارت لرزه‌ای سیستم‌های

خاک-سازه

هانیه زاهدی^۱، بهنود گنجوی^{۲*}، مجید برارنیا^۳

۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۳ دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

*b.ganjavi@umz.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۳/۰۴/۲۰]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۹/۲۲]

چکیده

در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های متعارف، خاک زیر پی عموماً صلب فرض شده و از انعطاف‌پذیری آن صرف‌نظر می‌گردد. با لحاظ نمودن انعطاف‌پذیری خاک زیر شالوده، انتظار می‌رود که پاسخ سازه تحت اثر اندرکنش دینامیکی سیستم خاک-سازه تغییر یابد. در این تحقیق با استفاده از یک تحلیل پارامتریک، اثر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک بر پارامتر شاخص خسارت لرزه‌ای در حالت شکل‌پذیری ثابت، با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، سیستم خاک-سازه به روش روسازه و خاک زیرسازه به عنوان یک نیم‌فضای الاستیک همگن در نظر گرفته شده و با استفاده از مفهوم مدل مخروطی مدل‌سازی شده است. سیستم‌های خاک-سازه با پی سطحی بر اساس پارامترهای کلیدی اندرکنشی مدل‌سازی شده و سپس تحت ۱۵ شتاب‌نگاشت قوی حرکت زمین-ثابت شده بر خاک‌های نرم-قرار گرفتند. نتایج این تحقیق بیانگر این است که، به طور میانگین، بیشترین اثر وابستگی فرکانس بر پارامتر شاخص خسارت مربوط به مدل‌های شدید اندرکنشی، سازه‌های لاغر و با رفتار غیرخطی کم خواهد بود که در بیشترین حالت که صرفاً در یک یا چند پیود خاص رخ خواهد داد، به میانگین ۱۳/۵۶٪ خواهد رسید که نمی‌تواند معیاری کاربردی باشد. بنابراین، برای داشتن یک معیار منطقی عملی، مقادیر میانگین در کل بازه پیودی در ۱۵ زلزله محاسبه شده که برابر با ۵/۷۶٪ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در سیستم‌های یک درجه آزاد خاک-سازه با پی سطحی، وابستگی توابع امیدانس خاک به فرکانس تحریک بر شاخص خسارت تحت اثر زمین‌لرزه تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و بنابراین می‌توان در کاربردهای عملی، برای تحلیل و طراحی سازه‌های اندرکنشی واقع بر پی سطحی، سختی دینامیکی خاک را مستقل از فرکانس تحریک زلزله در نظر گرفت. این نتیجه منجر به انتخاب یک مدل ساده‌تر با حجم محاسبات به مراتب کمتر خواهد شد که مدت‌ها مورد بحث و اختلاف میان پژوهشگران بوده و همچنان می‌باشد.

کلیدواژگان: شاخص خسارت لرزه‌ای، اندرکنش خاک-سازه، رفتار غیرخطی، سیستم‌های یک درجه آزاد، توابع امیدانس خاک، وابستگی فرکانس

تحریک.

را در نظر گرفته و نتیجه گرفتند که با استفاده از مدل بازگشتی در طراحی می‌توان پاسخ دینامیکی سیستم مذکور را وابسته به فرکانس تحریک فرض کرد. در مطالعه‌ای که توسط چای و همکاران⁴ [16] انجام شد، با استفاده از یک مدل عددی، الگوی جدیدی از رفتار غیرارتجاعی و مشخصه دینامیکی وابسته به فرکانس تحریک زلزله برای یک سیستم اندرکنشی ارائه شد. در تحقیقات ونگ و همکاران⁵ [17] که با هدف ارائه یک روش تحلیلی برای مطالعه روابط دینامیکی وابسته به فرکانس تحریک زلزله در پی‌های نواری انجام شد، سختی خاک وابسته به فرکانس تحریک در نظر گرفته شد. در نهایت کاربوناری و همکاران⁶ [18] یک مدل پارامتریک یکپارچه برای تخمین سختی دینامیکی وابسته به فرکانس با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه برای پی‌های واقع بر شمع پیشنهاد کردند.

اگرچه برخی از مطالعات فوق به نوعی سعی در بررسی اثر وابستگی سختی خاک به فرکانس تحریک در سیستم‌های خاک-سازه داشته است، اما در نتایج ارائه شده اثر این پدیده در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به وضوح دیده نمی‌شود. شاید تنها مطالعه پارامتریک انجام شده در زمینه بررسی اثر وابستگی سختی خاک به فرکانس تحریک در سازه‌های متعارف، مطالعه انجام شده توسط گنجوی و موسوی⁷ [19] باشد که در آن به بررسی اثر پارامترهای اندرکنشی بر پاسخ ارتجاعی و غیرارتجاعی سیستم‌های خاک-سازه در پی‌های سطحی مانند جرم و اینرسی دورانی سازه و پی، نسبت سختی سازه به خاک، نسبت ارتفاع به بعد سازه، نسبت جرم سازه به جرم خاک پرداخته شد. ایشان با انجام یک مطالعه پارامتریک به بررسی اثر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک زلزله بر ضریب برش پایه و ضریب اصلاح تغییرمکان در حالت ارتجاعی و غیرارتجاعی پرداختند و نتیجه گرفتند که در سیستم‌های یک درجه آزاد خاک-سازه، وابستگی سختی خاک به فرکانس تحریک و همچنین در نظر گرفتن پارامترهایی همچون جرم و اینرسی دورانی پی، ممان اینرسی سازه و اضافه جرم محبوس شده، تأثیر

فلسفه طراحی سازه‌ها در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای متعارف بر این است که تقریباً تمام سازه‌ها تحت زلزله طرح وارد ناحیه غیرارتجاعی خواهند شد. از طرفی مطالعات دینامیکی اینگونه سازه‌ها بیانگر این است که پاسخ سازه در ناحیه غیرارتجاعی به عوامل مختلفی مانند مشخصات دینامیکی سازه، شرایط ساختگاه، پارامترهای مربوط به مشخصات زلزله و اثر اندرکنش خاک-سازه وابسته است. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ ارتجاعی و همچنین غیرارتجاعی سیستم‌های یک درجه و چند درجه آزاد انجام شده است [9-1]. نتایج این مطالعات در برخی شرایط بیانگر لزوم و در برخی دیگر بیانگر عدم لزوم در نظر گرفتن اثر اندرکنش در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بوده است [10-12]. اما نکته حائز اهمیت اینکه، مطالعات انجام شده تاکنون فقط متمرکز بر بررسی اثر پارامترهای اندرکنشی بر تقاضای لرزه‌ای سازه‌های مختلف بوده است و اثر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک زلزله به طور مشخص مورد توجه قرار نگرفته است. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه لسگیدیس و همکاران¹ [13] اشاره کرد که آثار اندرکنش خاک-سازه در پل‌های با رفتار غیرارتجاعی را با فرض وابسته بودن سختی خاک به فرکانس تحریک، به کمک ارائه یک روش جدید مدل‌سازی بررسی نمودند. از طرفی تایلپ‌اوغلو و همکاران² [14] در زمینه بررسی وابستگی سختی به فرکانس، سختی دینامیکی و میرایی را در سازه‌های با پی‌های کم عمق تحت اثر ارتعاش اجباری ارزیابی نموده و نشان دادند که وابستگی سختی افقی خاک به فرکانس تحریک ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. این در حالی است که مقادیر حاصل از سختی در حرکت چرخشی کاهش قابل توجهی با تغییر فرکانس تحریک زلزله داشته است. لائودون و همکاران³ [15] در تحقیقات خود، به منظور بررسی پایداری روش تحلیل غیر خطی در حوزه زمان، یک سیستم خاک-پی وابسته به فرکانس تحریک

5 Wang et al.

6 Carbonari et al.

7 Ganjavi & Mousavi

1 Lesgidis et al.

2 Tileyliglu et al.

3 Laudon et al.

4 Chai et al.

$$DI_{PA} = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

که در آن نسبت بیشترین جابه‌جایی سازه تحت یک زلزله خاص به جابه‌جایی نهایی تحت بارگذاری یکنواخت تعریف می‌شود. Q_y مقاومت تسلیم، $\int dE$ انرژی هیستریزس جذب شده توسط عضو در طول زلزله و ضریب β پارامتر کنترل‌کننده کاهش مقاومت در المان سازه‌ای می‌باشد [22]. قسمت اول این رابطه تنها خرابی ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ را منظور کرده و قسمت دوم، خرابی‌های ناشی از سیکل‌های بارگذاری دینامیکی از طریق محاسبه سطح زیر حلقه‌های هیستریزس را دربردارد. با توجه به این شاخص، پژوهشگران و متخصصان قادرند نقاط ضعف و قوت سازه را بشناسند و به بهبود عملکرد سازه‌ها در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بپردازند.

۳- مدل‌سازی سیستم خاک-سازه

در این تحقیق به منظور اعمال اثر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ سیستم تحت رکورد زلزله، از مدل‌سازی بر اساس مفهوم مدل مخروطی به روش ولف [23]¹ مشابه شکل (۱) استفاده شده است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، سیستم اندرکنشی دارای چهار درجه آزادی که شامل سه درجه آزادی برای خاک و یک درجه آزادی برای روسازه خواهد بود [20].

شکل ۱. مدل خاک-سازه استفاده شده در این مطالعه برای پی‌های سطحی

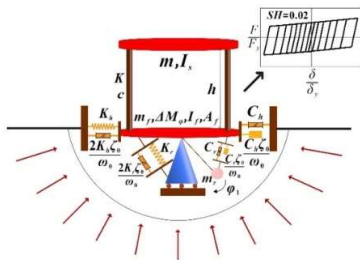


Fig. 1. Soil- Structure model used in this study

به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه از روش زیرسازه استفاده شده است. در این روش خاک به صورت جداگانه توسط تعدادی جرم، فنر و میراگر و سازه نیز با یک جرم و فنر دوخطی

چندانی بر ضریب اصلاح تغییر مکان و ضریب برش پایه نداشته پس می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

همانگونه که اشاره شد، اگرچه این تحقیق شاید اولین مطالعه پارامتریک در زمینه بررسی اثر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک بر پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های خاک-سازه می‌باشد، اما بیشتر متمرکز بر حالت مقاومت ثابت بوده است و تنها بخش نسبتاً ناچیزی از این مطالعه به حالت پیچیده‌تر شکل‌پذیری ثابت که رفتار غیرارتجاعی در آن ملموس‌تر است، پرداخته است. از طرفی این پژوهش تنها متمرکز بر پارامترهای ضریب برش پایه و ضریب اصلاح تغییر مکان بوده است. از این رو، در این مطالعه به بررسی جامع اثر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس زلزله در حالت شکل‌پذیری ثابت بر پارامتر شاخص خسارت سازه‌ای سیستم‌های خاک-سازه واقع بر پی‌های سطحی تحت اثر شتابنگاشت‌های قوی حرکت زمین پرداخته شده است.

۲- شاخص خسارت سازه‌ای استفاده شده در این مطالعه

شناسایی و بررسی انواع خرابی ناشی از زلزله یکی از مباحث مهم در مهندسی زلزله است. زیان‌های ناشی از زلزله را می‌توان به سه دسته خرابی‌های فیزیکی مستقیم، صدمات اجتماعی و زیان‌های اقتصادی تقسیم‌بندی کرد. به منظور بررسی میزان خسارت وارد شده به سازه ابتدا باید شاخص‌هایی تعریف نمود که به کمک آن‌ها بتوان خرابی‌ها را به مقادیر کمی تبدیل نمود. شاخص خسارت پارک و انگ [20] از جمله محبوب‌ترین شاخص‌های خسارت محلی و کلی مورد توجه پژوهشگران در مطالعات مربوط به تحلیل لرزه‌ای است که در آن به منظور برآورد کمی خرابی لرزه‌ای، از ترکیب خطی خسارت‌های ناشی از تغییر شکل‌های پیشینه و انرژی هیستریزس تجمعی تحت بارگذاری لرزه‌ای استفاده شده است [21]. این شاخص قابل گسترش به مقیاس طبقه و کل ساختمان است. شاخص خرابی طبقه، با جمع نمودن شاخص‌های اعضای آن طبقه به نسبت وزنی اعضای طبقه بدست می‌آید. مدل پیشنهادی شاخص خسارت برای یک سازه SDOF به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}, \quad \text{if } \nu < \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$V_p = V_s, \quad \text{if } \frac{1}{3} < \nu < \frac{1}{2} \quad (5)$$

این جرم اضافی به پی متصل بوده و به صورت صلب و همراه با پی حرکت می‌کند [25].

$$\Delta M_\phi = 0.3\pi \left(\nu - \frac{1}{3} \right) \rho r^5 \quad (6)$$

۴- زلزله‌های استفاده شده در این تحقیق

بر مبنای استاندارد لرزه‌ای ASCE-41 [26] به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، حداقل ۱۱ رکورد زلزله مورد نیاز است. بنابراین به منظور دسترسی به اهداف این پژوهش، ۱۵ رکورد ثبت شده از ۷ زلزله با بزرگای ۶/۵ تا ۷/۵، در فاصله ۱۳ تا ۲۸ کیلومتری زمین، از پایگاه داده‌های مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER) انتخاب شده است. رکوردهای انتخابی بر اساس آیین‌نامه IBC-2015 [27] در خاک نوع D ثبت شده اند و دارای بیشترین شتاب بزرگتر از 0.2g و حداکثر سرعت بیش از ۱۵ cm/Sec می‌باشند.

شکل ۲. طیف پاسخ زلزله‌های انتخاب شده

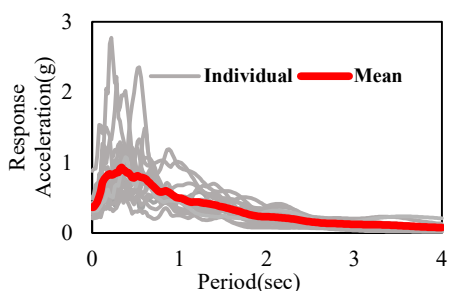


Fig. 2. Response spectrum of selected earthquakes

شکل (۲) طیف پاسخ رکوردهای انتخاب شده، به همراه طیف میانگین را نشان می‌دهد. برای تحلیل و بررسی داده‌های این پژوهش از طیف میانگین شاخص خسارت تحت زلزله‌های مقیاس شده به سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال عمر مفید سازه استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات اصلی رکوردهای انتخابی را نشان می‌دهد.

و میراگر مدل می‌شود. سپس با ترکیب این دو مدل، مدل خاک-سازه مشابه شکل (۱) ساخته می‌شود. استفاده از این روش، سرعت انجام آنالیز را افزایش داده و انجام مطالعات پارامتریک را ساده‌تر می‌سازد [24].

در این سیستم، روسازه دارای رفتار دوخطی و با کرنش سختی ۲٪ در نظر گرفته شده است و در بخش مدل‌سازی خاک، درجات آزادی دورانی و جانبی برای نمایش حرکت دورانی پی و حرکت انتقالی در راستای افقی تعریف شده‌اند، این در حالی است که از حرکات پیچشی و انتقالی در جهت عمودی چشم‌پوشی شده است. با توجه به اینکه کلیه ضرایب سختی خاک مستقل از فرکانس زلزله می‌باشند، بنابراین یک درجه آزادی داخلی ϕ_1 با جرم m_r تعریف شده تا وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک زلزله در تحلیل دینامیکی لحاظ شود [19]. این وابستگی، همان بخش اساسی مدل‌سازی مدنظر در این مطالعه می‌باشد. ضرایب فنر و میراگرهایی که بیانگر حرکات جانبی و چرخشی سیستم خاک-سازه می‌باشند، به شرح ذیل تعیین می‌شوند:

در این روابط پارامترهای K_r ، C_r ، K_h و C_h به ترتیب بیانگر سختی جانبی، سختی دورانی، میرایی جانبی و میرایی دورانی هستند. همچنین ν ، ρ و V_s به ترتیب معرف چگالی ویژه، ضریب پواسون، سرعت موج طولی و سرعت موج برشی خاک بستر می‌باشند. شعاع معادل و مساحت پی استوانه‌ای به ترتیب با r و A_f نمایش داده شده‌اند. رابطه میان سرعت موج طولی و برشی به صورت زیر نشان داده شده است:

$$K_h = \frac{8\rho V_s^2 r}{2-\nu}, \quad C_h = \rho V_s A_f \quad (2)$$

به منظور لحاظ نمودن حرکات عمودی و دورانی در خاک تراکم‌ناپذیر، یک جرم اضافی به عنوان ممان اینرسی جرمی دورانی اضافه می‌شود، که برابر است با:

$$K_r = \frac{8\rho V_s^2 r^3}{3(1-\nu)}, \quad C_r = \rho V_p I_f \quad (3)$$

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

Station Name	Event*	Mag.	Year	ClstD** [km]	Strong			Weak		
					A _g [g]	V _g [cm/s]	D _g [cm]	A _g [g]	V _g [cm/s]	D _g [cm]
LA - Hollywood Stor FF	1	6.61	1971	22.8	0.2	21.7	15.9	0.2	16.9	12.9
Delta	2	6.53	1979	22.0	0.3	33.0	20.2	0.2	26.3	14.7
Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	3	6.54	1987	23.85	0.2	36.21	28.68	0.18	31.67	22.27
Westmorland Fire Sta	3	6.54	1987	13.0	0.2	32.3	22.3	0.2	23.5	15.0
Capitola	4	6.93	1989	15.2	0.5	38.0	7.1	0.4	29.6	4.9
Hollister - South & Pine	4	6.93	1989	27.9	0.4	63.0	32.3	0.2	30.9	19.7
Hollister City Hall	4	6.93	1989	27.6	0.2	45.5	28.5	0.2	38.9	19.4
Hollister Differential Array	4	6.93	1989	24.8	0.3	44.2	19.7	0.3	35.8	14.6
Beverly Hills - 14145 Mulhol	5	6.69	1994	17.2	0.5	66.7	12.2	0.4	59.3	15.5
Canyon Country - W Lost Cany	5	6.69	1994	12.4	0.4	44.4	11.3	0.5	41.1	14.6
LA - Saturn St	5	6.69	1994	27.0	0.4	41.6	5.0	0.5	37.2	4.4
Santa Monica City Hall	5	6.69	1994	26.5	0.9	41.6	15.2	0.4	25.0	7.4
Shin-Osaka	6	6.90	1995	19.2	0.2	31.3	8.4	0.2	21.8	9.7
Duzce	7	7.51	1999	15.4	0.3	58.9	44.1	0.4	55.7	25.0

* (1) San Fernando; (2) Imperial Valley-06; (3) Superstition Hills-02; (4) Loma Prieta; (5) Northridge-01; (6) Kobe, Japan; (7) Kocaeli, Turkey.

**نزدیک ترین فاصله مابین ناحیه ثبت رکورد زلزله و محل گسیختگی گسل

Table 1. Characteristics of selected earthquakes

۵- پارامترهای کلیدی

در این رابطه ω_{fix} فرکانس طبیعی ارتعاشی سیستم پایه ثابت، H ارتفاع معادل سازه و V_s سرعت موج برشی خاک زیرسازه می‌باشد. α_0 میزان تاثیر اندرکنش خاک-سازه را نشان می‌دهد. -نسبت بعدی سازه که برابر است با نسبت ارتفاع سازه به شعاع پی دایره‌ای معادل آن: ($\frac{H}{r}$)

-ضریب شکل‌پذیری سازه که معادل نسبت تغییرمکان حداکثر به تغییرمکان تسلیم سازه می‌باشد: ($\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$)

هنگامی که سازه تحت یک رکورد زلزله مشخص قرار می‌گیرد، پاسخ دینامیکی سازه تحت تاثیر عوامل مختلفی همچون روسازه، خاک زیر آن و اثر متقابل خاک و سازه خواهد بود. پارامترهای موثر بر پاسخ دینامیکی سازه تحت اثر اندرکنش عبارت‌اند از:

-فرکانس بدون بعد، که نمایانگر نسبت سختی سازه به خاک زیرین آن است: ($\alpha_0 = \frac{\omega_{fix}H}{V_s}$)

نسبت جرم روسازه به خاک زیرین: ($\bar{m} = \frac{m_{str}}{\rho r^2 H}$) که در آن m_{str} و H به ترتیب بیانگر جرم و ارتفاع کل سازه می‌باشند.

ضریب پواسون خاک که بیانگر میزان سختی خاک زیرسازه می‌باشد: (ν)

چگالی خاک زیرسازه که معرف سطح متراکم بودن خاک زیرسازه می‌باشد: (ρ)

میرایی مصالح سازه ζ_s و میرایی مصالح خاک ζ_0

دو پارامتر α_0 و ($\frac{H}{r}$) به عنوان پارامترهای کلیدی در اندرکنش خاک-سازه مطرح هستند و پارامتر μ نشان‌دهنده میزان غیرخطی بودن رفتار سازه می‌باشد. سایر پارامترها به عنوان پارامترهایی برای نمایش سیستم‌هایی با مشخصات متفاوت می‌باشند. در این مطالعه، سیستم خاک-سازه مدل‌سازی شده دارای نسبت جرمی 0.05 ، ضریب پواسون 0.4 ، چگالی 1800 kg/m^3 و میرایی مصالح خاک و سازه 5% در نظر گرفته شد.

۶- روش انجام تحقیق

برای دستیابی به اهداف پژوهش، مدل خاک-سازه معرفی شده در بخش مدل‌سازی، در حوزه زمان تحلیل دینامیکی شده و تحت بارگذاری لرزه‌ای دینامیکی قرار می‌گیرد. در این راستا، مدل اندرکنشی براساس پارامترهای مختلف تحت زلزله‌های گوناگون تحلیل و بررسی می‌شود. سازه‌های مدل شده دارای 39 دوره تناوب از 0.1 تا 5 ثانیه (0.1 تا 0.5 ثانیه با فاصله زمانی 0.05 ، از 0.5 تا 2 ثانیه با فاصله زمانی 0.1 ، از 2 تا 5 ثانیه با فاصله زمانی 0.2)، نسبت بعدی ($\frac{H}{r}$) 1 ، 3 و 6 (که به ترتیب بیانگر سازه‌های چاق، متوسط و لاغر می‌باشند)، نسبت فرکانس بی‌بعد (α_0) 1 ، 2 ، 3 و 4 (که به ترتیب بیانگر شرایط ضعیف اندرکنشی، شرایط متوسط، شرایط شدید و بسیار شدید اندرکنشی می‌باشند) و شکل‌پذیری (μ) $1/5$ ، 2 ، 4 ، 8 و 12 که بیانگر شدت رفتار غیرخطی سازه می‌باشند. به منظور انجام تحلیل خطی و غیرخطی در این مطالعه از نرم‌افزار OpenSees [28] و برنامه توسعه یافته توسط مولفان این مطالعه [7] برای تحلیل پارامتریک سیستم‌های اندرکنشی استفاده شده است.

۷- بررسی و تحلیل نتایج

در این بخش از پژوهش، ابتدا مقادیر شاخص خسارت سازه‌ای برای 39 دوره تناوب، 4 فرکانس بی‌بعد (1 ، 2 ، 3 ، 4) نسبت بعدی (1 ، 3 ، 6) و 6 ضریب شکل‌پذیری (12 ، 8 ، 6 ، 4 ، 2 ، $1/5$) برای دو حالت: (الف) وابسته به فرکانس تحریک و (ب) مستقل از فرکانس تحریک تحت اثر 15 زلزله انتخابی محاسبه شده‌اند و سپس درصد اختلاف قدرمطلق این دو حالت مطابق رابطه (۷) برای طیف‌های میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار ترسیم و نتایج مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. در این مطالعه پارامتریک، مجموعاً 5616 سیستم خاک-سازه مدل شده‌اند و هر کدام تحت اثر 15 زلزله انتخابی مطابق جدول (۱) قرار گرفته‌اند. به منظور نشان دادن میزان اثر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک، پارامتر λ به صورت زیر تعریف شده است، که در این رابطه DI_{dip} و DI_{indip} بیانگر مقادیر میانگین شاخص خسارت سازه‌ای حاصل از 15 زلزله به ترتیب در دو حالت: (الف) وابسته به فرکانس تحریک و (ب) مستقل از فرکانس تحریک می‌باشند:

$$\lambda = ABS\left(\frac{DI_{dip} - DI_{indip}}{DI_{indip}}\right) \times 100 \quad (7)$$

۷-۱- اثر فرکانس بی‌بعد بر وابستگی فرکانس تحریک

شکل (۳) اثر فرکانس بی‌بعد، به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای اندرکنشی بر وابستگی فرکانس تحریک (λ) به ازای مقادیر مختلف نسبت بعدی و شکل‌پذیری را به صورت میانگین طیفی در 15 زلزله نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، در سازه‌های چاق و یا با نسبت بعدی کم ($H/r = 1$)، تغییرات λ نسبتاً ناچیز است، به شکلی که در بحرانی‌ترین حالت به مقدار 4% در شکل‌پذیری پایین ($\mu = 2$) آن هم فقط در یک دوره خاص خواهد رسید. و به طور میانگین چشم‌پوشی از مقدار شکل‌پذیری مقادیری کمتر از 2% را تجربه خواهد کرد. اما در سازه‌هایی با نسبت بعدی متوسط و بالا (سازه‌های خیلی لاغر) و یا به عبارتی با لاغر شدن سازه‌ها ($\frac{H}{r} = 6$)، این روند تغییر کرده، به طوری که تا قبل از یک پرپود آستانه ($T > 3.5 \text{ sec}$)، با افزایش شدت اندرکنش یعنی فرکانس بی‌بعد، اثر وابستگی فرکانس تحریک بر میانگین شاخص خسارت تا حدی افزایش

می‌یابد و بعد از آن، روندی نزولی خواهد داشت. همچنین افزایش شکل‌پذیری و یا افزایش رفتار غیرخطی سازه‌ها، از میزان تاثیر وابستگی فرکانس بر شاخص خسارت در تمام محدوده‌های اندرکنشی کم می‌کند.

اگرچه بیشترین اثر وابستگی فرکانس بر پارامتر شاخص خسارت مربوط به مدل‌های شدید اندرکنشی، سازه‌های لاغر و رفتار غیرخطی کم خواهد بود که در بیشترین حالت به میانگین ۱۳/۵۶٪ در ۱۵ زلزله خواهد رسید، اما همان‌طور که در شکل قابل ملاحظه است، این مقدار حداکثر تنها در یک یا چند پیوند اتفاق خواهد افتاد، پس از لحاظ آماری نمی‌تواند مورد استناد قرار گیرد. بدین منظور مقادیر میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار در کل بازه پیودی ۰/۱ تا ۵ ثانیه، در بحرانی‌ترین حالت که همان فرکانس بی‌بعد ۳، نسبت بعدی ۶ و شکل‌پذیری ۲ می‌باشد، محاسبه شده است تا معیاری برای اثر وابستگی فرکانس تحریک بر شاخص خسارت سازه‌ای باشد. محاسبات

بیانگر این است که طیف حداکثر، به ترتیب دارای میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار ۵/۷۶ و ۸/۶۰٪ می‌باشد که این مقادیر نشان‌دهنده تاثیر نسبتاً کم و قابل چشم‌پوشی اثر وابستگی فرکانس تحریک بر شاخص خسارت می‌باشد.

نکته قابل ملاحظه اینکه سازه‌های چاق با پیوندهای بلند و سازه‌های لاغر با پیوندهای کوتاه به ندرت یافت می‌شوند، و نمودارهای ارائه شده برای این محدوده فقط آثار کیفی نسبت لاغری سازه را بر میزان تاثیر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک در پارامتر شاخص خسارت نشان می‌دهند. سازه‌های با نسبت لاغری ۱ به ندرت می‌توانند دارای پیودی بزرگ‌تر از ۳ ثانیه باشند، با این حال، این موضوع خدشه‌ای به نتایج کلی بدست آمده از نمودارها وارد نمی‌کند و نتایج فقط به منظور بررسی اثر پارامتریک موضوع مورد مطالعه ارائه شده است، هرچند ممکن است که جنبه کاربردی و عملی نداشته باشد.

شکل ۳. اثر فرکانس بی بعد بر پارامتر λ در سیستم‌های خاک-سازه با نسبت بعدی و شکل پذیری مختلف (میانگین ۱۵ زلزله)

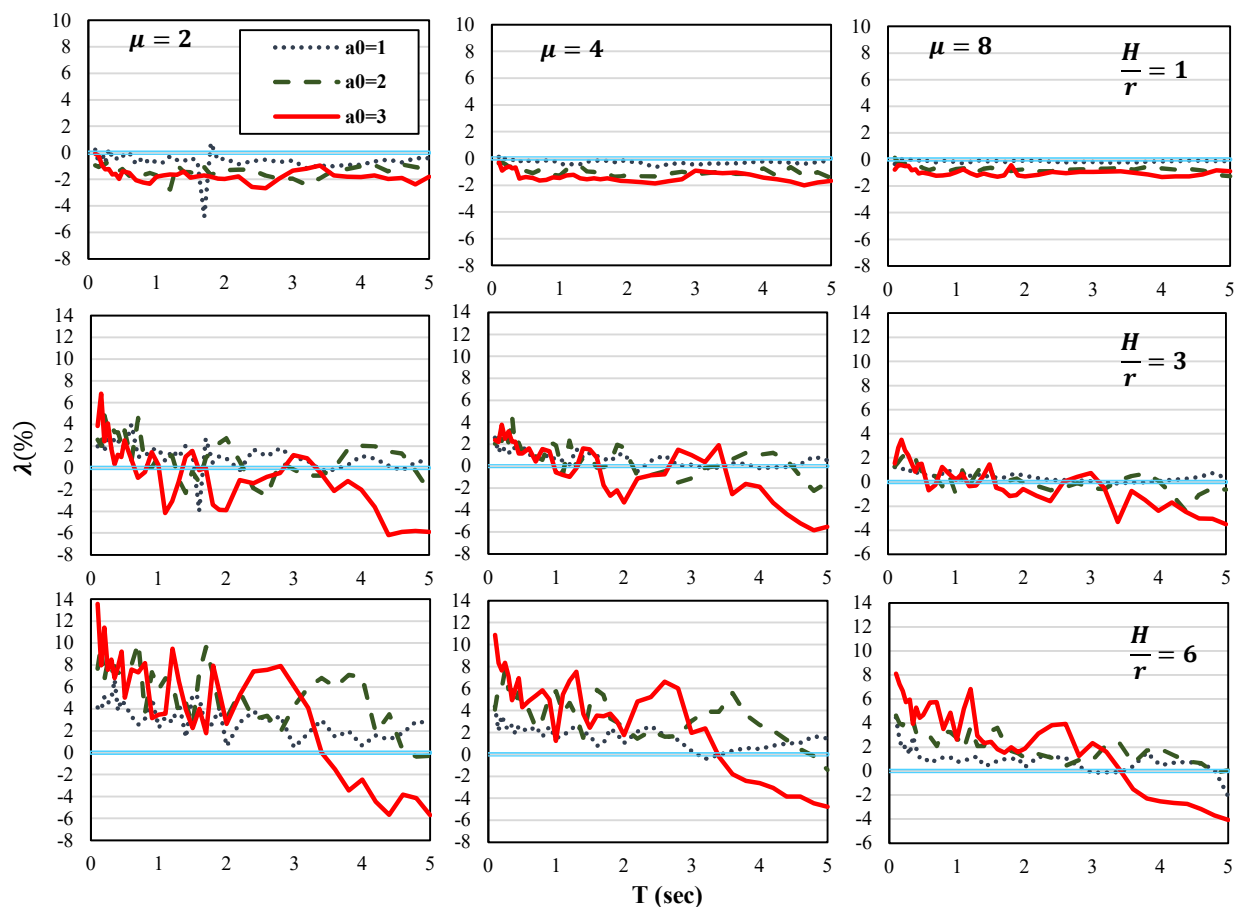


Fig. 3. Effect of dimensionless frequency on λ parameter in soil-structure systems with different ductility and aspect ratios (average of 15 earthquakes)

۷-۲- اثر نسبت بعدی بر وابستگی فرکانس تحریک

به منظور بررسی اثر جداگانه نسبت بعدی بر وابستگی فرکانس تحریک، تغییرات طیف میانگین پارامتر λ به دست آمده از دو حالت شاخص خسارت سازه‌ای یعنی با و بدون درجه آزادی داخلی در شکل (۴) ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش نسبت بعدی سازه‌ها، افزایش نسبتاً قابل ملاحظه‌ای بر اثر وابستگی فرکانس به ویژه در فرکانس بی بعد ۳ خواهد داشت، که این افزایش با کاهش رفتار غیرخطی سازه مشهودتر می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش شدت اندرکنش، افزایش اثر نسبت بعدی بر وابستگی فرکانس را به همراه خواهد داشت. شدت این اثر در سازه‌های با رفتار غیرخطی کم بسیار بیشتر است و با افزایش رفتار غیرخطی از تاثیر لاغری سازه‌ها

بر وابستگی فرکانس کاسته می‌شود. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، در شرایط شدید اندرکنشی، تا قبل از یک پرلود آستانه، افزایش نسبت بعدی سبب افزایش اثر وابستگی فرکانس و بعد از آن موجب کاهش این اثر خواهد شد. نکته قابل مشاهده دیگر، انتقال پرلود آستانه به سمت چپ، به ازای افزایش شدت اندرکنش می‌باشد. دلیل این امر آن است که پرلود سیستم خاک-سازه به دلیل سختی کمتر (انعطاف‌پذیری بیشتر) بزرگتر از پرلود سیستم صلب می‌باشد و در صورتی که نمودارها مانند آنچه مشاهده می‌شود، در برابر پرلود سیستم پایه صلب ترسیم گردند، با افزایش شدت اندرکنش، پرلود سیستم به سمت چپ متمایل خواهد شد.

شکل ۴. اثر نسبت بعدی بر پارامتر λ در سیستم‌های خاک-سازه با فرکانس بی بعد و شکل پذیری مختلف (میانگین ۱۵ زلزله)

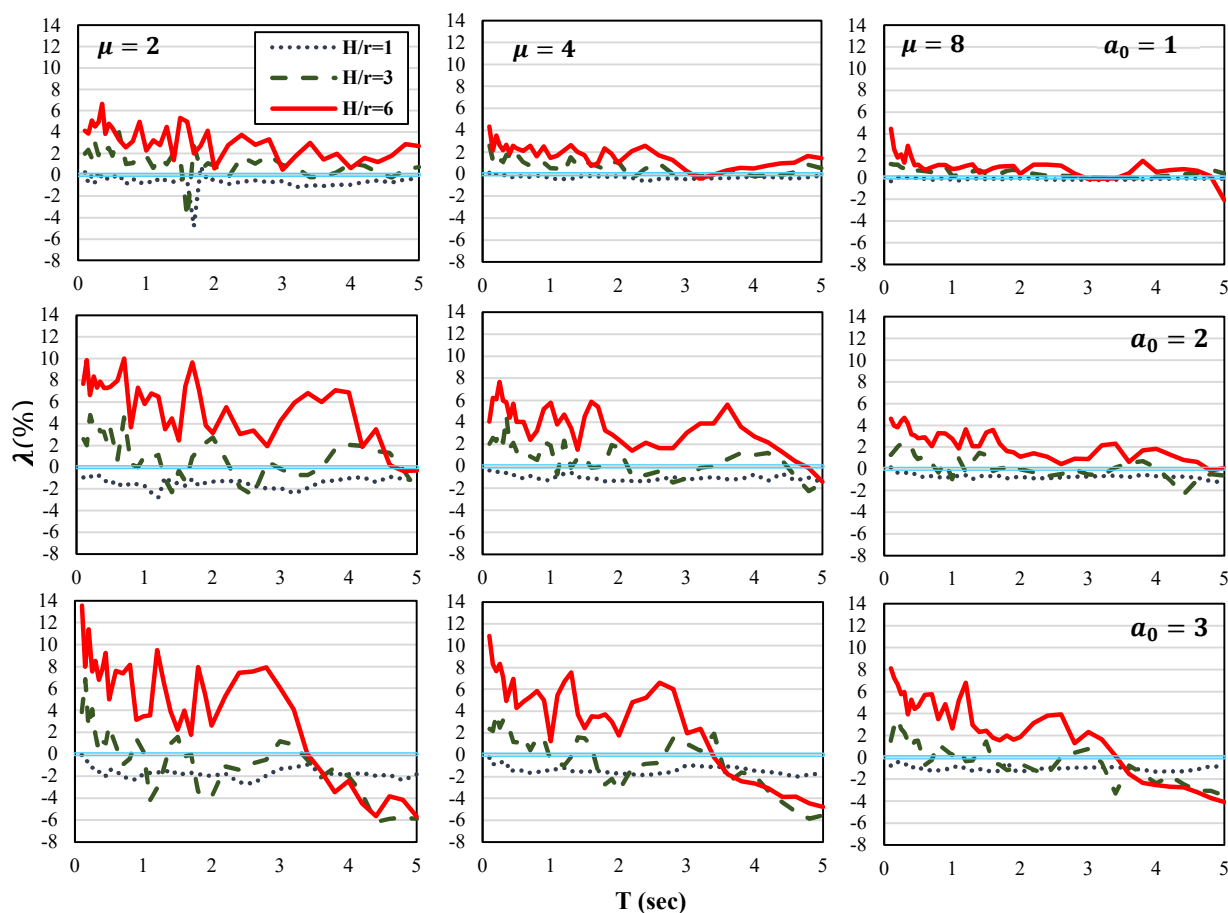


Fig. 4. Effect of aspect ratio (H/r) on λ parameter in soil-structure systems with different ductility and dimensionless frequency values (average of 15 earthquakes)

۳-۷- بررسی دقیق‌تر پارامتر λ

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر پارامتریک وابستگی فرکانس تحریک بر شاخص خسارت سازه‌ای نسبت به تغییرات شکل‌پذیری و شدت اندرکنش و ارتباط میان آن‌ها، طیف‌های میانگین λ در شکل‌پذیری‌های ۱/۵، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۲ و در فرکانس‌های بی‌بعد ۱، ۲، ۳ و ۴ و نسبت‌های بعدی ۱، ۳ و ۶ در شکل‌های (۵ و ۶) ترسیم شده‌اند.

شکل ۶. اثر تغییر پارامترهای کلیدی اندرکنشی بر وابستگی فرکانس تحریک شاخص خسارت در سیستم خاک-سازه مختلف (میانگین ۱۵ زلزله)

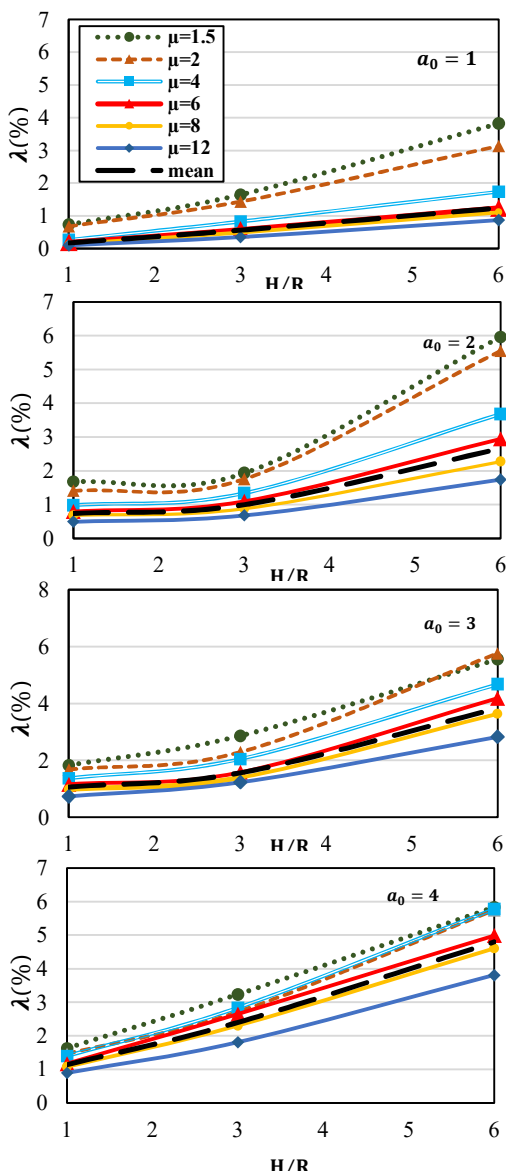


Fig. 6. Effect of key interaction parameters on λ in various soil-structure systems (average of 15 earthquakes)

از طرفی همان‌طور که در شکل (۶) به وضوح قابل ملاحظه است، با افزایش نسبت بعدی یا به تعبیری لاغر شدن سازه‌ها و همچنین افزایش شدت اندرکنش، بر میزان تاثیر شکل‌پذیری بر اثر وابستگی فرکانس تحریک افزوده می‌شود. این امر بدین معنی است که اگرچه در شرایط شدید اندرکنشی، رفتار غیرخطی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار خواهد بود، اما همچنان اثر

شکل ۵. اثر رفتار غیرخطی سازه بر وابستگی فرکانس تحریک شاخص خسارت برای سیستم‌های خاک-سازه با نسبت‌های بعدی ۱، ۳ و ۶ (میانگین ۱۵ زلزله)

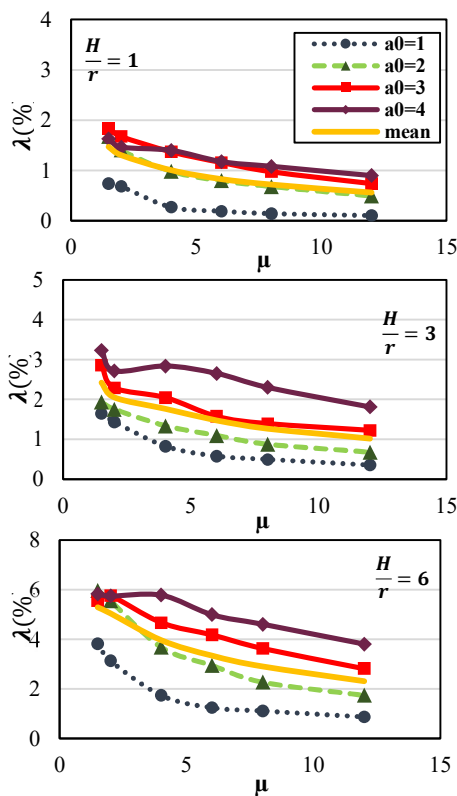


Fig. 5. Effect of structural inelastic behavior on frequency dependency of damage index for soil-structure systems with aspect ratios of 1, 3, 6 (average of 15 earthquakes)

از مقایسه نمودارهای شکل‌های (۵ و ۶) چنین برداشت می‌شود که بیشترین اثر وابستگی فرکانس در سازه‌های با رفتار غیرخطی کم و نزدیک به حالت ارتجاعی دیده می‌شود (۵/۸۳٪) و همان‌طور که در بخش‌های پیشین ذکر شد، تقریباً در تمام شرایط اندرکنشی، افزایش ضریب شکل‌پذیری و یا به عبارتی افزایش رفتار غیرخطی، کاهش اثر وابستگی فرکانس را بر شاخص خسارت سیستم خاک-سازه به دنبال خواهد داشت.

شاخص خسارت لرزه‌ای باشد؛ پس منطقی است که مقادیر میانگین در کل بازه پیرودی و در بحرانی‌ترین حالت که همان فرکانس بی بعد ۳، نسبت بعدی ۶ و شکل پذیری ۲ هست مدنظر قرار گیرد، تا بتوان معیاری برای اثر وابستگی فرکانس تحریک بر شاخص خسارت سازه‌ای ارائه کرد. نظر به اینکه بیشترین مقدار میانگین پارامتر λ در ۱۵ زلزله انتخابی و در کل بازه پیرودی ۵/۷۶٪ خواهد بود؛ پس می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در سیستم‌های یک درجه‌آزاد خاک-سازه، وابستگی تابع امیدانس خاک به فرکانس تحریک بر شاخص خسارت تحت اثر زمین‌لرزه تاثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و بنابراین می‌توان در کاربردهای عملی، برای تحلیل و طراحی سازه‌های واقع پی سطحی، سختی دینامیکی خاک را مستقل از فرکانس تحریک زلزله در نظر گرفت.

۹-مراجع

- [1] Nakhaei M, Ghannad MA. The effect of soil-structure interaction on damage index of buildings. *Engineering Structures*. 2008 Jun 1;30(6):1491-9.
- [2] Moghaddasi M, Cubrinovski M, Chase JG, Pampanin S, Carr A. Probabilistic evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic structural response. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2011 Feb;40(2):135-54.
- [3] Ganjavi B, Hao H. Strength reduction factor for MDOF soil-structure systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2014 Feb 25;23(3):161-80.
- [4] Ahmadi E, Khoshnoudian F. Near-fault effects on strength reduction factors of soil-MDOF structure systems. *Soils and Foundations*. 2015 Aug 1;55(4):841-56.
- [5] Mirzaie F, Mahsuli M, Ghannad MA. Probabilistic analysis of soil-structure interaction effects on the seismic performance of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2017 Apr 10;46(4):641-60.
- [6] Khosravikia F, Mahsuli M, Ghannad MA. The effect of soil-structure interaction on the seismic risk to buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018 Sep;16:3653-73.
- [7] Bararnia M, Hassani N, Ganjavi B, Amiri GG. Estimation of inelastic displacement ratios for soil-structure systems with embedded foundation considering

این مولفه بر شاخص خسارت، حتی در شرایط بحرانی اندرکنشی نیز نسبتاً کم و در کاربردهای عملی قابل چشم‌پوشی است.

۸- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی پارامتریک اثر وابستگی فرکانس تحریک بر شاخص خسارت سازه‌ای سیستم‌های خاک-سازه واقع بر پی سطحی بوده است. برای دستیابی به این مقصود، بیش از ۵۶۰۰ سیستم خاک-سازه که دارای محدوده وسیعی از پارامترهای دینامیکی سازه و همچنین پارامترهای اندرکنشی شامل ۳۹ دوره تناوب ارتعاشی، ۴ فرکانس بی‌بعد (۱،۲،۳،۴) نسبت بعدی (۱،۳،۶) و ۶ ضریب شکل پذیری (۱۲، ۸، ۶، ۴، ۲، ۱/۵) برای دو حالت: (الف) وابسته به فرکانس تحریک و (ب) مستقل از فرکانس تحریک تحت اثر ۱۵ زلزله انتخابی تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی شده‌اند. سپس میانگین درصد اختلاف قدر مطلق این دو حالت مطابق تعریف شده توسط پارامتر λ - معیار تفسیر نتایج قرار گرفته‌اند. نتایج به شرح ذیل قابل بیان است:

۱- به طور کلی افزایش رفتار غیرخطی روسازه، منجر به کاهش اثر وابستگی فرکانس تحریک بر پارامتر شاخص خسارت شده که این کاهش در سازه‌های لاغر با اندرکنش شدید بیشتر و مشهودتر است.

۲- افزایش نسبت بعدی سازه‌ها، افزایش نسبتاً قابل ملاحظه‌ای بر اثر وابستگی فرکانس تحریک به ویژه در فرکانس بی‌بعد ۳ خواهد داشت، که این افزایش با کاهش رفتار غیرخطی سازه شدت می‌یابد.

۳- در حالت کلی بیشترین اثر وابستگی فرکانس بر پارامتر شاخص خسارت مربوط به مدل‌های شدید اندرکنشی، سازه‌های لاغر و رفتار غیرخطی کم خواهد بود که در بیشترین حالت به میانگین ۱۳/۵۶٪ در ۱۵ زلزله خواهد رسید، اما نکته حائز اهمیت این است که این مقدار فقط در یک یا چند پیرودی خاص رخ خواهد داد که نمی‌تواند معیاری بر نقش واقعی این اثر بر

representation in time domain. *Applied Mathematical Modelling*. 2015 Jun 1;39(10-11):2861-81.

[18] Carbonari S, Morici M, Dezi F, Leoni G. A lumped parameter model for time-domain inertial soil-structure interaction analysis of structures on pile foundations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2018 Sep;47(11):2147-71.

[19] Ganjavi B, Mousavi SR. Influence of frequency-dependent dynamic soil stiffness and interacting parameters on elastic and inelastic response of soil-structure systems. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2019 Feb 20;5(4):57-75.

[20] Park YJ, Ang AH. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of structural engineering*. 1985 Apr;111(4):722-39.

[21] Jiang H, Fu B, Lu X, Chen L. Seismic damage assessment of RC members by a modified Park-Ang model. *Advances in Structural Engineering*. 2015 Mar;18(3):353-64.

[22] Diaz SA, Pujades LG, Barbat AH, Vargas YF, Hidalgo-Leiva DA. Energy damage index based on capacity and response spectra. *Engineering Structures*. 2017 Dec 1;152:424-36.

[23] Meek JW, Wolf JP. Cone models for homogeneous soil. I. *Journal of geotechnical engineering*. 1992 May;118(5):667-85.

[24] Mahsuli M, Ghannad MA. The effect of foundation embedment on inelastic response of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009 Apr 10;38(4):423-37.

[25] Ghodrati Amiri G, Ganjavi B, Gholamrezatabar A. Evaluation of Drift Distribution in Steel Moment Frames Designed Based on Performance-Based Plastic design Approach Considering Soil-Structure Interaction Effects. *Modares Civil Engineering journal*. 2018 Sep 10;18(3):221-36.

[26] Pekelnicky R, Engineers SD, Chris Poland SE, Engineers ND. ASCE 41-13: Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings. *Proceedings of the SEAOC*. 2012 Sep.

[27] IBC Code, International Building Code, USA, 2015.

[28] OpenSees. Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Calif. 2016.

kinematic and inertial interaction effects. *Engineering Structures*. 2018 Mar 15;159:252-64.

[8] Ganjavi B, Gholamrezatabar A, Hajirasouliha I. Effects of soil-structure interaction and lateral design load pattern on performance-based plastic design of steel moment resisting frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2019 Aug 10;28(11):e1624.

[9] Ahmadi E. On the structural energy distribution and cumulative damage in soil-embedded foundation-structure interaction systems. *Engineering Structures*. 2019 Mar 1;182:487-500.

[10] Eser M, Aydemir C, Ekiz I. Inelastic displacement ratios for structures with foundation flexibility. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2012 Jan;16(1):155-62.

[11] Lu Y, Hajirasouliha I, Marshall AM. Performance-based seismic design of flexible-base multi-storey buildings considering soil-structure interaction. *Engineering Structures*. 2016 Feb 1;108:90-103.

[12] Moghaddasi M, Cubrinovski M, Chase JG, Pampanin S, Carr A. Probabilistic evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic structural response. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2011 Feb;40(2):135-54.

[13] Lesgidis N, Kwon OS, Sextos A. A time-domain seismic SSI analysis method for inelastic bridge structures through the use of a frequency-dependent lumped parameter model. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015 Oct 25;44(13):2137-56.

[14] Tileylioglu S, Stewart JP, Nigbor RL. Dynamic stiffness and damping of a shallow foundation from forced vibration of a field test structure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011 Apr 1;137(4):344-53.

[15] Duarte Laudon A, Kwon OS, Ghaemmaghami AR. Stability of the time-domain analysis method including a frequency-dependent soil-foundation system. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015 Dec;44(15):2737-54.

[16] hyeon Chai S, Ghaemmaghami AR, Kwon OS. Numerical modelling method for inelastic and frequency-dependent behavior of shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017 Jan 1;92:377-87.

[17] Wang J, Lo SH, Zhou D, Xu BQ. Frequency-dependent impedance of a strip foundation group and its

Effect of frequency dependency of impedance functions on seismic damage index of soil-structure systems

Hanieh Zahedi¹, Behnoud Ganjavi^{2*}, Majid Bararnia³

1M.Sc, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

2Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

3PhD, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*b.ganjavi@umz.ac.ir

Abstract:

In seismic analysis and design of conventional structures, it is generally assumed that the soil beneath the foundation is rigid and, thus, its flexibility is not taken into account. Soil flexibility can affect the response of structures through complex phenomenon of dynamics soil-structure interaction (SSI) effect. It is believed that effective soil and structural parameters could in some case significantly influence seismic response of structures in different manners and conditions. In this study, through an intensive parametric study, the effect of frequency dependency of impedance functions on constant-ductility damage index parameter of soil-structure SDOF systems subjected to ordinary strong ground motions were investigated. To this end, the soil-structure system was modeled by sub-structure method and the foundation was modeled as a homogeneous elastic half-space using the concept of the cone model. The soil-structure systems with shallow foundation were modeled based on various SSI key parameters, and were then analyzed under 15 earthquake ground motions recorded on soft soils. Results of this study show that, in average, the maximum effect of excitation frequency dependency on seismic damage index is referred to the intensive SSI models, slender structures and with low level of inelastic behavior, which, in critical case, will occur in one or limited values of fundamental period. The maximum mean value is about 13.56% which cannot be considered as a criterion for practical application. Therefore, to have a logical criterion for practical purpose, the average values of entire periodic region in 15 earthquake ground motions were computed and, then, the maximum value, i.e., 5.76, was considered to make a decision. Overall, the results indicate that for soil-structure SDOF systems with shallow foundation, frequency dependency of impedance functions on damage index of structures subjected to earthquake ground motions would not have a remarkable effect and thus can be practically ignored in seismic analysis and design of soil-structures systems with shallow foundations. This finding being debated by researchers can lead to using a simple soil-structure system with less computational time and effort.

Keywords: Seismic damage index, Soil-Structure interaction, Inelastic behavior, SDOF systems, Impedance functions, Excitation frequency dependency.