

اثر وابستگی فرکانس توابع امپدانس خاک بر شاخص خسارت لرزه‌ای سیستم‌های خاک‌سازه

هانیه زاهدی^۱، بهنود گنجوی^{۲*}، مجید بارانیا^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 لرزه‌های 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 خاک‌سازه 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 خاک‌سازه موردنرسی قرار گرفته است. بدین منظور، سیستم خاک‌سازه به روش روش روآزاره و خاک زیرسازه به عنوان یک نیم‌فضای الاستیک همگن در نظر گرفته شده و با استفاده از مفهوم مدل مخروطی مدل‌سازی شده است. سیستم‌های خاک‌سازه با پی سطحی بر اساس پارامترهای کلیدی اندرکنشی مدل‌سازی شده و سپس تحت شتابنگاشت قوی حرکت زمین-ثبت 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 پریود 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 پریودی در ۱۵ زلزله محاسبه شده که برابر با ۵/۷۶٪ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در سیستم‌های یک درجه آزاد خاک‌سازه با پی سطحی، وابستگی توابع امپدانس خاک به فرکانس تحریک بر شاخص خسارت تحت اثر زمین‌زلزه تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و بنابراین می‌توان در کابردی‌های 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 مرتب کمتر خواهد شد که مدت‌ها مورد بحث و اختلاف میان پژوهشگران بوده و همچنان می‌باشد.

کلیدواژگان: شاخص خسارت لرزه‌ای، اندرکنش خاک‌سازه، رفتار غیرخطی، سیستم‌های یک درجه آزاد، توابع امپدانس خاک، وابستگی فرکانس تحریک.

۱- مقدمه

هایه زاهدی و همکاران

را در نظر گرفته و نتیجه گرفتند که با استفاده از مدل بازگشته 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 غیراتجاعی و مشخصه دینامیکی وابسته به فرکانس تحریک زلزله برای یک سیستم اندرکن Shi 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. درنهایت کاربوناری و همکاران⁶ [18] یک مدل پارامتریک یکپارچه برای تخمین سختی دینامیکی وابسته به فرکانس با در نظر گرفتن اندرکن Shi خاک‌سازه 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 اندرکن Shi سازه در پی‌های سطحی مانند جرم و اینرسی سیستم‌های خاک-سازه در پی‌های سطحی مانند جرم و اینرسی دورانی سازه و پی، نسبت سختی سازه به خاک، نسبت ارتفاع به بُعد 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 ضربی برش پایه و ضربی اصلاح تغییر مکان در حالت ارتجاعی و غیراتجاعی 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 آینه‌های لرزه‌ای متعارف بر این است که تقریباً تمام سازه‌ها تحت زلزله طرح وارد ناحیه غیراتجاعی خواهند شد. از طرفی مطالعات دینامیکی اینگونه سازه‌ها بیانگر این است که پاسخ سازه در ناحیه غیراتجاعی به عوامل مختلفی مانند مشخصات دینامیکی سازه، شرایط ساختگاه، پارامترهای مربوط به مشخصات زلزله و اثر اندرکن Shi خاک-سازه وابسته است. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با بررسی اثر اندرکن Shi سازه بر پاسخ ارتجاعی و همچنین غیراتجاعی سیستم‌های یک درجه و چند درجه آزاد انجام شده است [1-9]. نتایج این مطالعات در برخی شرایط بیانگر لزوم و در برخی دیگر بیانگر عدم لزوم در نظر گرفتن اثر اندرکن Shi در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بوده است [10-12]. اما نکته حائز اهمیت اینکه، مطالعات انجام شده تاکنون فقط متوجه بر بررسی اثر پارامترهای اندرکن Shi 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 اندرکن Shi خاک-سازه در پل‌های با رفتار غیراتجاعی را با فرض وابسته بودن سختی خاک به فرکانس تحریک، به کمک ارائه یک روش جدید مدل‌سازی بررسی نمودند. از طرفی تایلی اوغلو 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. لاثدون 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 & Mousavi¹ Lesgidis et al.² Tileylioglu 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 $\frac{\delta_M}{\delta_u}$ نسبت بیشترین جابه‌جایی سازه تحت یک زلزله خاص به جابه‌جایی نهایی تحت بارگذاری یکنواخت تعریف می‌شود. Q_y مقاومت تسلیم، $\int dE$ انرژی هیسترزیس جذب شده توسط عضو در طول زلزله و ضریب β پارامتر کنترل کننده کاهش مقاومت در المان سازه‌ای می‌باشد [22]. قسمت اول این رابطه تنها خرابی ناشی از تغییرشکل‌های بزرگ را منظور کرده و قسمت دوم، خرابی‌های ناشی از سیکل‌های بارگذاری دینامیکی از طریق محاسبه سطح زیر حلقه‌های هیسترزیس را دربردارد. با توجه به این شاخص، پژوهشگران و متخصصان قادراند نقاط ضعف و قوت سازه را بشناسند و بهبود عملکرد سازه‌ها در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بپردازن.

۳- مدل‌سازی سیستم خاک‌سازه

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 ولف¹ [23] 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

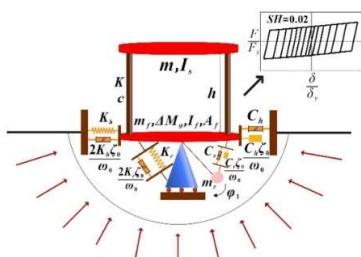


Fig. 1. Soil- Structure model used in this study

به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک‌سازه 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 اوین 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 غیر ارجاعی 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
شناخت 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، خدمات 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 برآوردن کمی خرابی لرزه‌ای، از ترکیب خطی خسارت‌های ناشی از تغییر‌شکل‌های بیشینه و انرژی هیسترزیس 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 پرای یک سازه SDOF به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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

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

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

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 $\frac{6}{5}$ تا $\frac{7}{5}$ 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 حداقل سرعت بیش از 15 cm/sec می‌باشند.

شکل ۲. طیف پاسخ زلزله‌های انتخاب شده

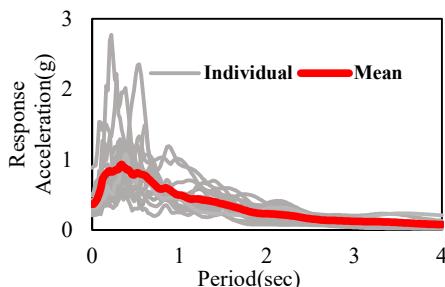


Fig. 2. Response spectrum of selected earthquakes

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.

اثر وابستگی فرکانس توابع امپدانس خاک بر شاخص خسارت لرزه‌ای ... 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 لحظه 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_h ، C_h و C_r به ترتیب بیانگر سختی جانبی، سختی دورانی، میرایی جانبی و میرایی دورانی هستند. همچنین ρ ، v و V_s به ترتیب معرف چگالی ویژه، ضریب پوآسون، 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:

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

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:

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

جدول ۱. مشخصات زلزله‌ای 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

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: $(\frac{H}{r})^{\alpha_0}$

- ضریب شکل پذیری سازه که معادل نسبت تغییر مکان حداقل به تغییر مکان تسلیم سازه می‌باشد: $(\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y})$

5- پارامترهای کلیدی

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 عبارت اند 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 \bar{m} و H به ترتیب بیانگر جرم و ارتفاع کل سازه می‌باشند.

- ضریب پوآسون خاک که بیانگر میزان سختی خاک زیرسازه می‌باشد: (v)

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

- میرایی صالح سازه (ζ) و میرایی صالح خاک (η) 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 ۰/۵، ضریب پوآسون ۰/۴، چگالی 1800 kg/m^3 و میرایی صالح خاک و سازه ۵٪ 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 ۳۹ گوناگون تحلیل و بررسی می‌شود. سازه‌های مدل شده دارای دوره تناوب از ۰/۱ تا ۵ ثانیه (۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه با فاصله زمانی ۰/۰۵، از ۰/۰۵ تا ۰/۲ ثانیه با فاصله زمانی ۰/۱، از ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه با فاصله زمانی ۰/۰۲)، نسبت بعدی ($\frac{H}{r}$)، ۱، ۳ و ۶ (که به ترتیب فاصله زمانی ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۷)، نسبت فرکانس بی‌بعد (α_0)، ۱، ۲ و ۴ (که به ترتیب بیانگر سازه‌های چاق، متوسط و لاگر می‌باشند)، نسبت فرکانس اندرکنشی، شرایط متوسط، شرایط شدید و بسیار شدید اندرکنشی می‌باشند) و شکل‌پذیری (μ)، ۰/۱، ۱/۵، ۲، ۴، ۸ و ۱۲ 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 ۳۹ دوره تناوب، ۴ فرکانس بی بعد (۱، ۲، ۳، ۴) نسبت بعدی (۱، ۲، ۳، ۶) و ۶ ضریب شکل پذیری (۱۲، ۲۴، ۶، ۸، ۲، ۱) برای دو حالت: (الف) وابسته به فرکانس تحریک و (ب) مستقل از فرکانس تحریک تحت اثر ۱۵ زلزله انتخابی محاسبه شده‌اند و سپس درصد اختلاف قدر مطلق 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 ۵۶۱۶ سیستم خاک-سازه مدل شده‌اند و هر کدام تحت اثر ۱۵ 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 D_{Dip} و D_{Indip} مقادیر میانگین شاخص خسارت سازه‌ای حاصل از ۱۵ زلزله به ترتیب در دو حالت: (الف) وابسته به فرکانس تحریک و (ب) مستقل از فرکانس تحریک می‌باشند:

$$\lambda = ABS\left(\frac{(D_{Dip} - D_{Indip})}{D_{Indip}}\right) \times 100 \quad (7)$$

۷-۱- اثر فرکانس بی بعد بر وابستگی فرکانس تحریک

شکل (۳) اثر فرکانس بی بعد، به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای اندرکنشی بر وابستگی فرکانس تحریک (λ) به ازای مقادیر مختلف نسبت بعدی و شکل پذیری را به صورت میانگین طیفی در ۱۵ 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 ۴٪ 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 ۲٪ را تجربه خواهد کرد. اما در سازه‌هایی با نسبت بعدی متوسط و بالا (سازه‌های خیلی لاگر) و یا به عبارتی با لاگر شدن سازه‌ها ($H/r = 6$)، این روند تغییر کرده، به طوری که تا قبل از یک پریود آستانه ($T > 3.5 \text{ sec}$)، با افزایش شدت اندرکنش یعنی فرکانس بی بعد، اثر وابستگی فرکانس تحریک بر میانگین شاخص خسارت تا حدی افزایش

بيانگر اين است که طيف حداکثر، به ترتيب داراي ميانگين و ميانگين به علاوه انحراف معيار ۵/۷۶ و ۸/۶۰٪ مي باشد که اين مقادير نشاندهنه تاثير نسبتاً کم و قابل چشمپوشی اثر وابستگي فركانس تحريک بر شاخص خسارت مي باشد.

نکته قابل ملاحظه اينکه سازه‌های چاق با پريودهای بلند و سازه‌های لاغر با پريودهای کوتاه به ندرت يافت می‌شوند، و نمودارهای ارائه شده برای اين محدوده فقط آثار کيفي نسبت لاغری سازه را بر ميزان تاثير وابستگي سختی ديناميكی خاک به فركانس تحريک در پaramتر شاخص خسارت نشان می‌دهند. سازه‌های با نسبت لاغری ۱ به ندرت می‌توانند داراي پريودي بزرگ‌تر از ۳ ثانية باشند، با اين حال، اين موضوع خدشه‌اي به نتایج کلي بدست آمده از نمودارها وارد نمي‌کند و نتایج فقط به منظور بررسی اثر پarametric موضع مورد مطالعه ارائه شده است، هرچند ممکن است که جنبه کاربردي و عملی نداشته باشد.

مي‌يابد و بعد از آن، روندي نزولي خواهد داشت. همچنين افزایش شكل‌پذيری و يا افرايش رفتار غيرخطي سازه‌ها، از ميزان تاثير وابستگي فركانس بر شاخص خسارت در تمام محدودهای اندرکنشی کم می‌كند.

اگرچه بيشترین اثر وابستگي فركانس بر پaramتر شاخص خسارت مربوط به مدل‌های شدید اندرکنشی، سازه‌های لاغر و رفتار غيرخطي کم خواهد بود که در بيشترین حالت به ميانگين ۵/۱۳٪ در ۱۵ زلزله خواهد رسيد، اما همان‌طور که در شكل قابل ملاحظه است، اين مقدار حداکثر تنها در يك يا چند پريود اتفاق خواهد افتاد، پس از لحظه آماري نمي‌تواند مورد استناد قرار گيرد. بدین منظور مقادير ميانگين و ميانگين به علاوه انحراف معيار در كل بازه پريودي ۰/۱ تا ۵ ثانية، در بحراني ترين حالت که همان فركانس بي بعد ۳، نسبت بعدی ۶ و شكل پذيری ۲ مي‌باشد، محاسبه شده است تا معياري برای اثر وابستگي فركانس تحريک بر شاخص خسارت سازه‌ای باشد. محاسبات

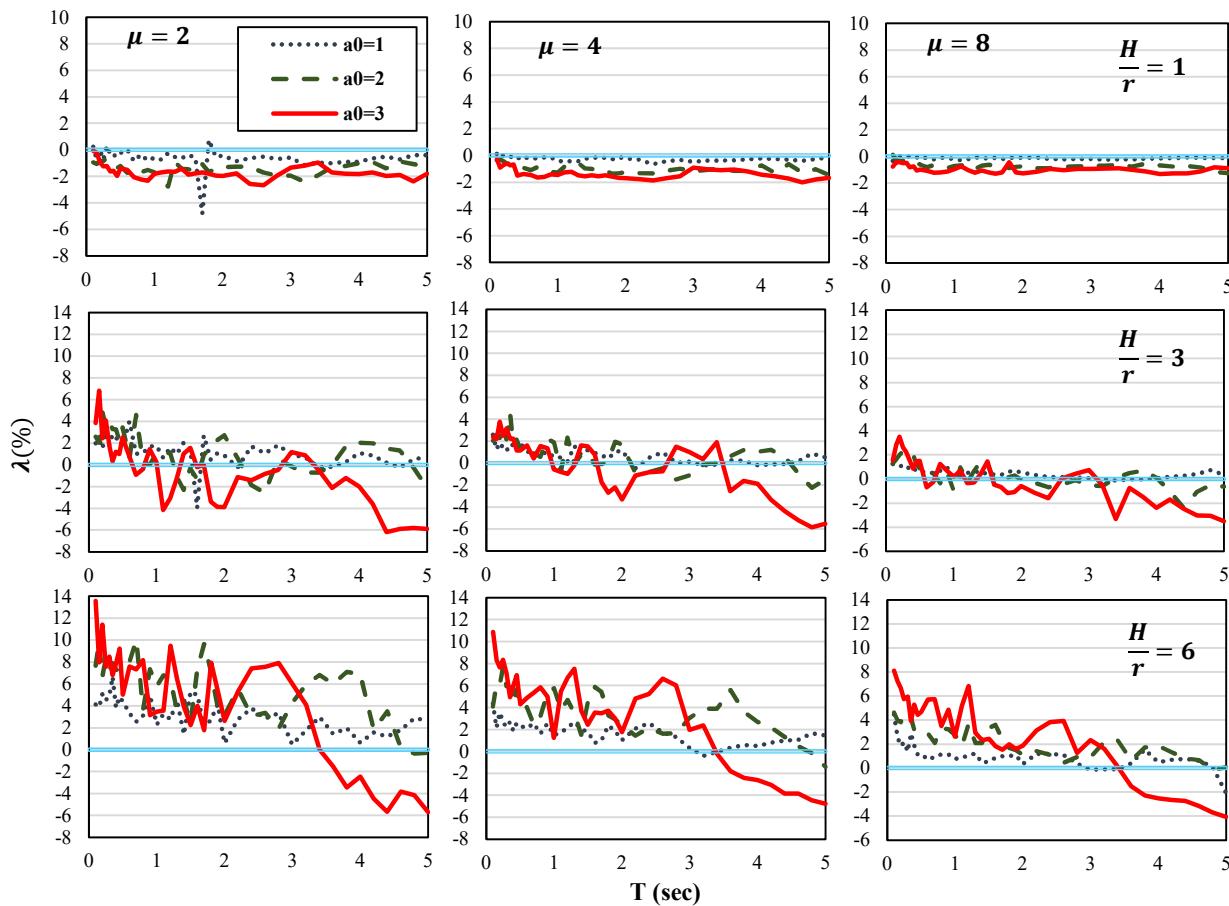
شکل ۳. اثر فرکانس بی بعد پارامتر λ در سیستم‌های خاک‌سازه با نسبت بعدی و شکل پذیری مختلف (میانگین ۱۵ زلزله)

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

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

۷-۲- اثر نسبت بعدی بر وابستگی فرکانس تحریک به منظور بررسی اثر جدگانه 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 تأثیر لاغری سازه‌ها

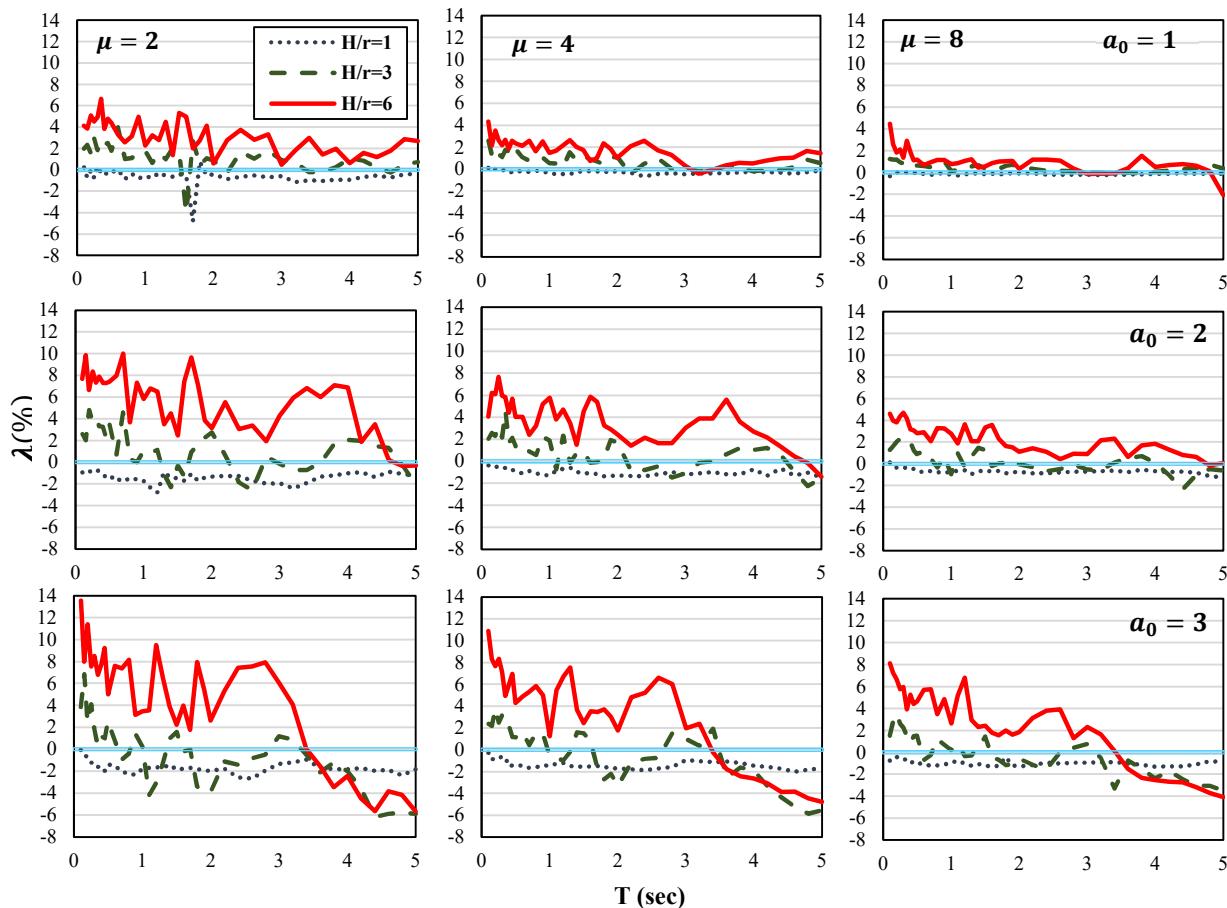
شکل ۴. اثر نسبت بعدی بر پارامتر λ در سیستم‌های خاک-سازه با فرکانس بی بعد و شکل پذیری مختلف (میانگین ۱۵ زلزله)

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 $1/5, 2, 4, 6, 8, 12$ و در فرکانس‌های بی‌بعد $1, 2, 3$ و 4 و نسبت‌های بعدی $1, 3$ و 6 در شکل‌های (۵ و ۶) ترسیم شده‌اند.

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

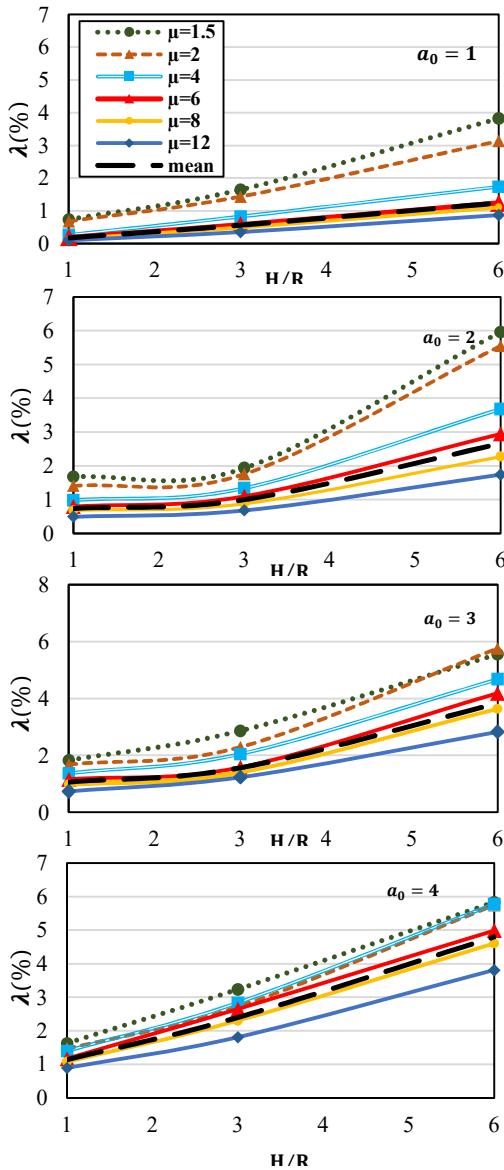


Fig. 6. Effect of key interaction parameters on λ in various soil-structure systems (average of 15 earthquakes)

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 واپستگی 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 واپستگی فرکانس تحریک شاخص خسارت برای سیستم‌های خاک-سازه با نسبت‌های بعدی ۱، ۳ و ۶ (میانگین ۱۵ زلزله)

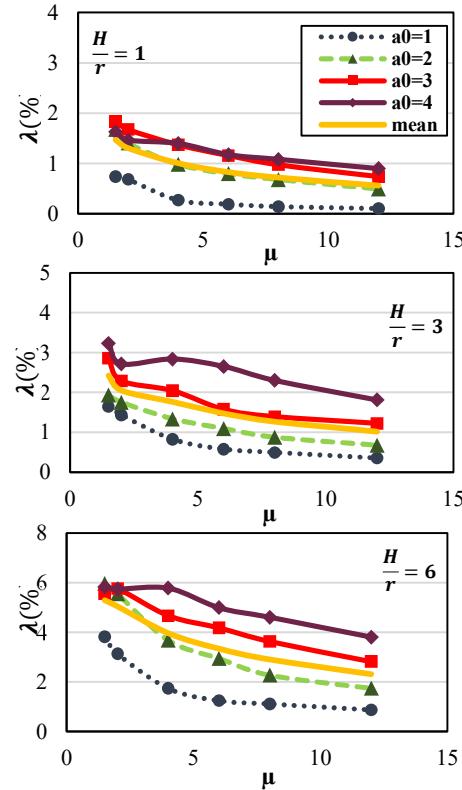


Fig. 5. Effect of structural inelastic behavior on frequency dependency of damage index for soil-structure systems with aspect ratios of 1, 3, 6 (average of 15 earthquakes)

از مقایسه نمودارهای شکل‌های (۵) و (۶) چنین برداشت می‌شود که بیشترین اثر واپستگی 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 واپستگی فرکانس را بر شاخص خسارت سیستم خاک-سازه به دنبال خواهد داشت.

شاخص خسارت لزهای باشد؛ پس منطقی است که مقادیر میانگین در کل بازه پریودی و در بحرانی ترین حالت که همان فرکانس بی بعد، 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 پریودی $5/76\%$ خواهد بود؛ پس می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در سیستم‌های یک درجه آزاد خاک-سازه، وابستگی تابع امپدانس خاک به فرکانس تحریک بر شاخص خسارت تحت اثر زمین‌لرزه تاثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و بنابراین می‌توان در کابردهای 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 5600 سیستم خاک-سازه که دارای محدوده وسیعی از پارامترهای دینامیکی سازه و همچنین پارامترهای اندرکنشی شامل 39 دوره تناوب ارتعاشی، 4 فرکانس بی بعد ($1, 2, 3, 4$)، 3 نسبت بعدی ($1, 3, 6$) و 6 ضربی شکل پذیری ($12, 1, 2, 4, 6, 8$) برای دو حالت: (الف) وابسته به فرکانس تحریک و (ب) مستقل از فرکانس تحریک تحت اثر 15 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 اندرکش شدید بیشتر و مشهور‌تر است.

۲- افزایش نسبت بعدی سازه‌ها، افزایش نسبتاً قابل ملاحظه‌ای بر اثر وابستگی فرکانس تحریک به ویژه در فرکانس بی بعد 3 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 $13/56\%$ در 15 زلزله خواهد رسید، اما نکته حائز اهمیت این است که این مقدار فقط در یک یا چند پریود 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.