



کد مقاله: ۲-۱۴۸

ارزیابی کمی میزان تاثیر پالس‌های کم دامنه سرعت حرکت زمین در حوزه نزدیک بر پاسخ دینامیکی سازه‌های قابی

سالار آرین مقدم^۱، محمدرضا سقراط^۲

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، s.arianmoghaddam@iiees.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

اهمیت تعیین دقیق پاسخ دینامیکی سازه‌ها، به ویژه در مورد سازه‌های بلند مرتبه، سازه‌های نامنظم و سازه‌های حساس همواره مورد توجه آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای بوده است. از سوی دیگر، انتخاب ورودی مناسب یک گام اساسی جهت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی خواهد بود. ماهیت متفاوت و پتانسیل ایجاد خرابی در رخدادهای لرزه‌ای نزدیک گسل در دو دهه گذشته موجب شده است که برای اطمینان از تخمین قابل اعتماد پاسخ سازه‌ها گروهی از شتابنگاشت‌های ثبت شده در حوزه نزدیک در کنار شتابنگاشت‌های حوزه دور به کار گرفته شود. از میان ویژگی‌های منحصر به فرد رکوردهای حوزه نزدیک مهمترین وجه تمایز از دیدگاه مهندسين سازه ماهیت پالس گونه آنها است. از این رو، تحقیقات گوناگونی جهت کمی سازی پالس گونگی و جداسازی پالس‌های ناشی از پدیده جهت‌داری در سالهای اخیر صورت پذیرفته است. یکی از مهمترین محدودیت‌ها در ارائه تفاسیر قابل اطمینان از رفتار دینامیکی سازه در حوزه نزدیک بحث کمبود تعداد رکوردهای پالس گونه در بانک داده‌های معتبر جهانی است که به نوبه خود ناشی از حذف رکوردهای با شدت دامنه کم (منسوب به رخدادهای لرزه‌ای ضعیف) می‌باشد. تغییر رویکرد طراحی به سمت مهندسی عملکردی و تخمین احتمالاتی پاسخ سازه‌ها، استفاده از روش‌های نوین محاسبه‌ی منحنی ظرفیت سازه را به دنبال داشته است. یکی از مهمترین روش‌های دستیابی به ظرفیت دینامیکی سازه استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده است. در این روش، شتابنگاشت‌های موردنظر پس از انتخاب و صرفنظر از تغییر محتمل در سایر مشخصات به طور پیاپی و با استفاده از ضرایب خطی مقیاس می‌گردند. بنابراین، شکل طیفی و محتوای فرکانسی سیگنال حفظ شده و دامنه آن در حوزه زمان افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، شدت اولیه دامنه سیگنال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار نیست. مطالعه حاضر در پی ارزیابی امکان استفاده از شتابنگاشت‌های پالس گونه اما کم دامنه برای تخمین ظرفیت دینامیکی سازه‌ها به روش تحلیل دینامیکی فزاینده است. نتایج امکان استفاده از برخی پالس‌های کم دامنه که دارای شباهت طیفی با الگوی پالس‌های جهت پذیری هستند را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: نزدیک گسل، پالس گونگی، تحلیل دینامیکی فزاینده

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر و به ویژه پس از وقوع رخداد‌های لرزه‌ای ویرانگر مانند زلزله نورث‌ریج، کوبه، چی چی و ... بحث شناخت ویژگی‌های رکوردهای زلزله ثبت شده در حوزه نزدیک مورد توجه محققان مهندسی زلزله واقع شده است. این تلاش‌های علمی گاهی معطوف به مطالعه خواص لرزه شناختی این زلزله‌ها [۱] و در برخی موارد مربوط به شناخت اثرات رکوردهای ثبت شده در حوزه نزدیک بر پاسخ دینامیکی سازه‌های مهندسی بوده است [۲].

به طور خلاصه، مهمترین تفاوت‌های رکوردهای حوزه نزدیک را می‌توان به شرح زیر بر شمرد [۳]:

- وجود بخش پالس گونه در رکورد سرعت حرکت زمین که منسوب به پدیده جهت داری است.
- وجود تغییر شکل ماندگار بر روی رکورد تغییر مکان حرکت زمین که منسوب پدیده لگد زدگی است.
- ثبت بیشینه شتاب قائم زمین با مقادیر نسبتاً بالاتر در قیاس با رکوردهای ثبت شده دور از گسل
- غنای بالای محتوای فرکانسی به دلیل درصد پایین‌تر کاهیدگی پس از انتشار موج ناشی از گسلش که بصورت قله‌های دو یا چندگانه در پاسخ طیفی رکوردهای حوزه نزدیک مشهود است [۴].

از میان موارد بالا و با تاکید بر دیدگاه مبتنی بر مهندسی سازه، مهمترین دلیل اثرات سازه‌ای رکوردهای نزدیک گسل پالس گونگی آن‌هاست [۲]. بر این اساس، تحقیقات انبوهی با محوریت جداسازی بخش پالس گونه رکورد، معادلسازی بخش پالس گونه با موجک‌های ساده و بررسی پاسخ سازه‌ها تحت پالس سرعت به انجام رسیده است.

در سال ۲۰۰۷، بیکر [۵] روشی هدفمند برای دسته بندی رکوردهای ثبت شده در حوزه نزدیک بر اساس کاربرد تبدیل موجک ابداع نمود. وی ۹۱ رکورد با خواص پالس گونگی مرتبط با جهت پذیری را از میان بیش از ۳۵۰۰ رکورد جدا و معرفی نمود. در سال ۲۰۱۰، یغمایی سابق [۶] الگوریتمی پیشنهادی بیکر در مورد رکوردهای ثبت شده در این به کار بست. در سال ۲۰۱۴ قدرتی امیری و آراین مقدم [۷] روش بیکر را تعمیم داده و بر دقت آن افزودند.

جداسازی پالس سرعت و تقسیم بندی رکوردها به پالس دار و بدون پالس گرچه کاربردهای موفقی در زمینه تحلیل خطر حوزه نزدیک و شبیه سازی شتابنگاشت نزدیک گسل داشته است، اما، مطالعات اخیر استفاده از پالسهای کم فرکانس ساده شده را در تخمین پاسخ غیرخطی سازه‌ها مورد تردید قرار می‌دهد [۸].

از سال ۲۰۰۰ و پس از معرفی روش نوین طراحی بر اساس عملکرد، بحث نگاه احتمالاتی به پاسخ دینامیکی سازه‌ها در فضای مهندسی زلزله مطرح گردید. بر این اساس، پیشنهاد روشهای جهت تخمین ظرفیت سازه در سطوح مختلف عملکردی به یکی از نیازهای مهم مهندسی زلزله بدل شد. معرفی روش پوش آور، پوش آور مودال و پوش آور مودال به هنگام شونده را می‌توان سرآغاز این تلاش‌ها دانست. در سال ۲۰۰۲ واموتسیکوس و کرنل [۹] تحلیل دینامیکی فزاینده را معرفی کردند. بطور خلاصه، این روش جدید سعی در تخمین ظرفیت دینامیکی سازه با استفاده از اعمال شتابنگاشت ثبت شده از حرکت زمین با سطوح گوناگون شدت خواهد داشت. بدین ترتیب، شتابنگاشت‌های مورد استفاده با حفظ محتوای فرکانسی و شکل ظاهری و صرفاً بر اساس مقیاس شدن به سطوح گوناگون شدت به عنوان نماینده بار جانبی تدریجی وارد شده به سازه معرفی شدند.

حفظ شکل ظاهری صرفنظر از مقادیر واقعی بیشینه شتاب و سرعت ثبت شده در رکورد، این امکان را فراهم می‌کند که برخی محدودیت‌های اعمال شده در زمینه دسته بندی رکوردهای پالس گونه در تحلیل دینامیکی فزاینده نادیده انگاشته شوند. به عنوان مثال، بیکر [۵] پالس‌های سرعت

را با مقدار حداکثر کمتر از ۳۰ سانتی متر بر ثانیه را غیر پالس گونه بر شمرده است. مطالعه جاری در پی صحت سنجی امکان استفاده از پالس‌های کم دامنه (حذف شده در روش بیکر [۵]) به عنوان ورودی تحلیل دینامیکی فزاینده است.

۲- روش پیشنهادی

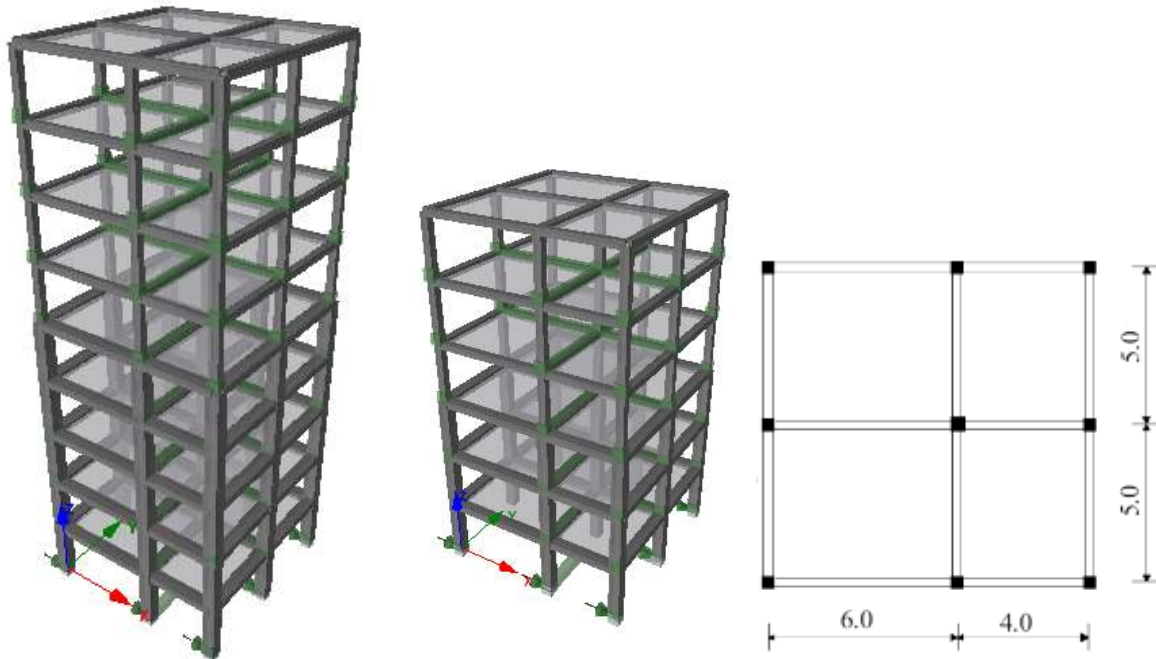
به منظور ارزیابی کمی امکان استفاده از پالس‌های کم دامنه در قیاس با رکوردهای پالس گونه با دامنه بالا به عنوان ورودی تحلیل دینامیکی فزاینده، دو مجموعه هر یک شامل ۸ شتابنگاشت انتخاب شده است. مجموعه اول به عنوان رکوردهای کم دامنه از بین رکوردهای بانک داده‌های NGA که توسط بیکر [۵] و به یکی از دلایل زیر غیر پالس گونه شناخته شده‌اند، انتخاب شده است:

- شاخص پالس گونگی به حد کافی بالاست اما زمان رسیدن پالس دارای تاخیر است.
 - شاخص پالس گونگی به حد کافی بالاست اما بیشینه سرعت حرکت زمین کمتر از ۳۰ سانتی متر بر ثانیه است.
- مجموعه دوم از میان ۹۱ رکورد پالس گونه معرفی شده در [۵] به گونه‌ای انتخاب شده است که بیشینه سرعت حرکت زمین بیش از ۴۰ سانتی متر بر ثانیه داشته و گستره معقولی از پریود پالس را شامل شود. نشان داده شده است که نسبت نزدیک پریود طبیعی ارتعاش سازه و پریود پالس از عوامل موثر بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها تحت رکوردهای پالس گونه است [۴].
- مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات رکوردهای انتخاب شده برای انجام تحلیل دینامیکی فزاینده

Type	نام	رویداد	سال	پریود پالس	بیشینه سرعت (cm/sec)	شاخص پالس گونگی
High Amplitude	HA1	San Fernando	1971	1.1	116.5	0.97
	HA2	Imperial Valley-06	1979	0.5	41.1	0.92
	HA3	Morgan Hill	1984	0.7	62.3	0.99
	HA4	Loma Prieta	1989	2.2	32.2	1.00
	HA5	Loma Prieta	1989	0.6	49.2	1.00
	HA6	Erzican, Turkey	1992	2.2	95.4	1.00
	HA7	Landers	1992	1.4	53.2	1.00
	HA8	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	0.7	59.4	1.00
Low Amplitude	LA1	Oroville-02	1975	1.44	2.84	1.00
	LA2	Oroville-04	1975	0.67	2.66	0.99
	LA3	Santa Barbara	1978	2.27	3.34	0.98
	LA4	Whittier Narrows-01	1987	0.84	5.84	0.99
	LA5	Landers	1992	1.96	3.88	0.92
	LA6	Northridge-06	1994	0.52	2.70	0.91
	LA7	Northridge-06	1994	0.38	1.87	0.99
	LA8	Big Bear-02	2001	0.45	0.87	0.99

به منظور مقایسه توانایی دو مجموعه رکورد انتخابی در تخمین ظرفیت دینامیکی سازه‌ها، دو سازه بتنی با سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط و با استفاده آیین نامه لرزه‌ای ACI-05 و استاندارد ۲۸۰۰ (خاک نوع ۳ و شدت خطر لرزه‌ای متوسط) به صورت سه بعدی طراحی شده است. پلان معماری و نمایی از مدل‌های ساخته شده در نرم افزار اجرا محدود Seismostruct در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. جدول ۲، خلاصه‌ای از مشخصات هندسی و دینامیکی سازه‌های مورد استفاده را ارائه می‌کند.

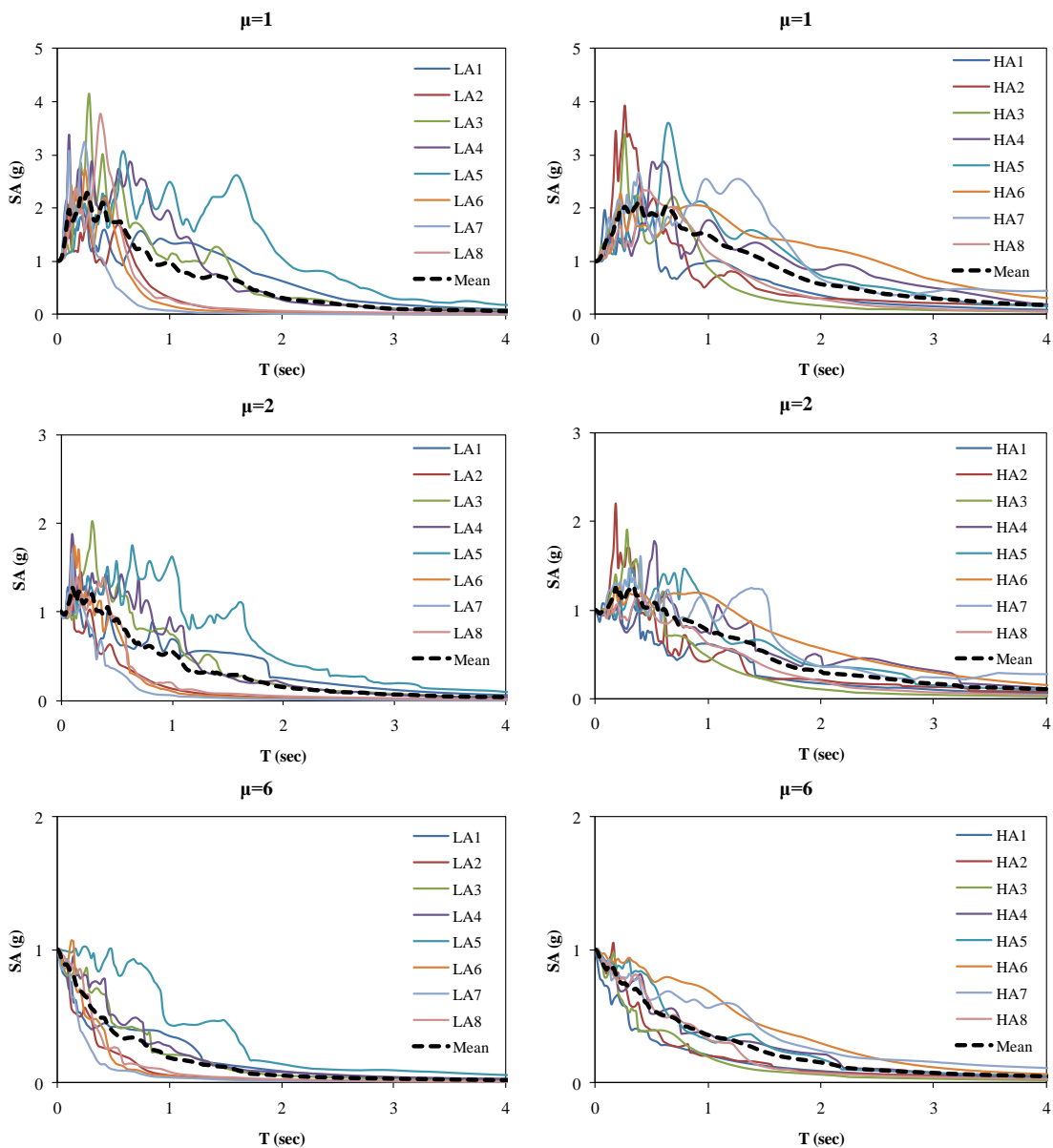


شکل ۱: نمایی از قابهای سه بعدی مدلسازی شده به همراه پلان سازه

جدول ۲: مشخصات سازه‌های سه بعدی مورد بررسی

تعداد طبقه	مشخصات مودی				ارتفاع (m)	وزن (ton)
	پریود مود اول در راستای X	پریود مود دوم در راستای X	پریود مود سوم در راستای X	پریود مود اول پیچشی		
6	0.77	0.28	0.14	0.63	19.2	744
9	1.12	0.44	0.22	0.9	28.8	1116

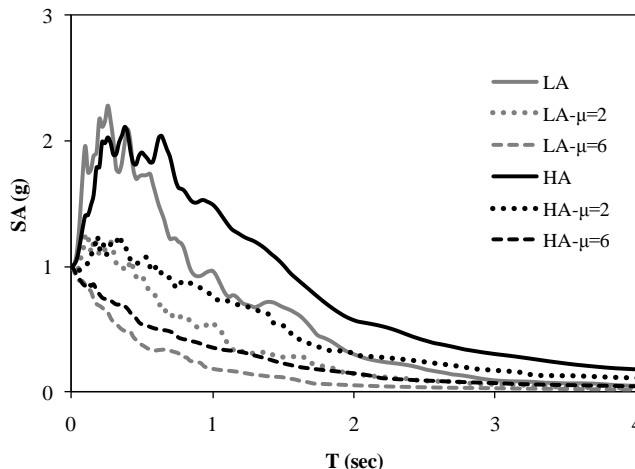
مدل‌های سازه‌ای با روش دینامیکی فزاینده و با گام‌های ۰/۱ برای ضریب مقیاس مورد تحلیل واقع شده‌اند و این فرایند تا ثبت جابجایی نسبی کلی برابر با ۰/۰۵ برای هر سازه ادامه پیدا کرده است. به منظور درک بهتر از پتانسیل مجموعه رکوردها جهت ایجاد پاسخ‌های دینامیکی، پیش از تحلیل دینامیکی فزاینده، اقدام محاسبه طیف پاسخ شتاب در سه سطح شکل پذیری نموده‌ایم که در شکل ۲ به نمایش در آمده است.



شکل ۲: مقایسه پاسخ های طیفی رکوردهای پالس دار با دامنه کوتاه و بلند در سطوح مخلف شکل پذیری

مقادیر میانگین پاسخ‌های طیفی برای دو مجموعه رکورد و در سطوح شکل پذیری مختلف در شکل ۳ مقایسه شده است. با دقت در شکل ۳ در می‌یابیم که پاسخ دینامیکی رکوردهای کم دامنه عموماً در سطح پایین‌تری قرار دارند که این اختلاف با افزایش شکل پذیری کاهش می‌یابد. بعلاوه،

رکوردهای با دامنه بالا در نواحی گسترده‌تری از طیف فعالیت دارند که به نوعی بیانگر غنای بیشتر محتوای فرکانسی آنهاست (به عنوان نمونه نگاه کنید به طیف رکورد HA6 و HA7 در شکل ۲).

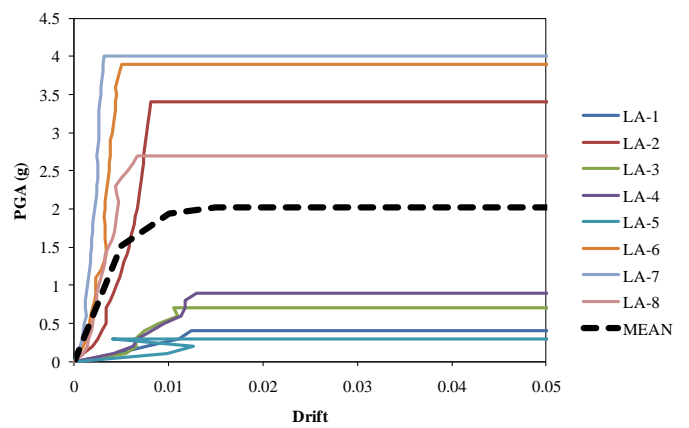
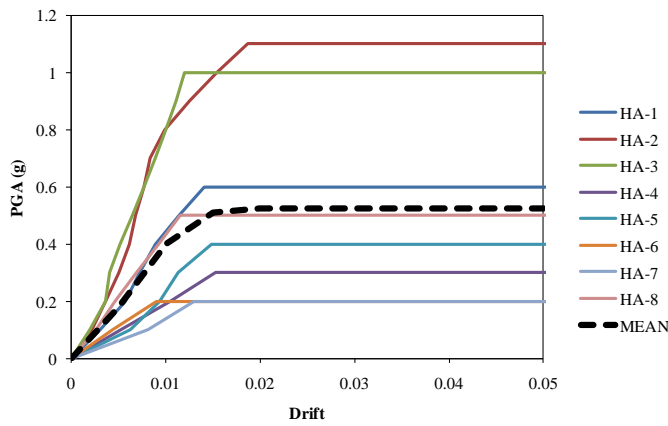
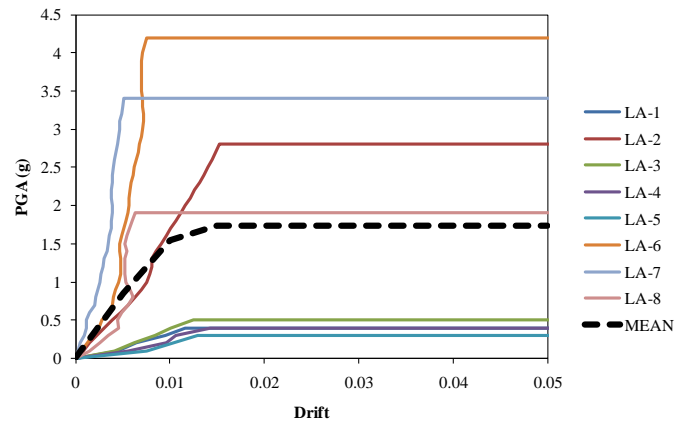
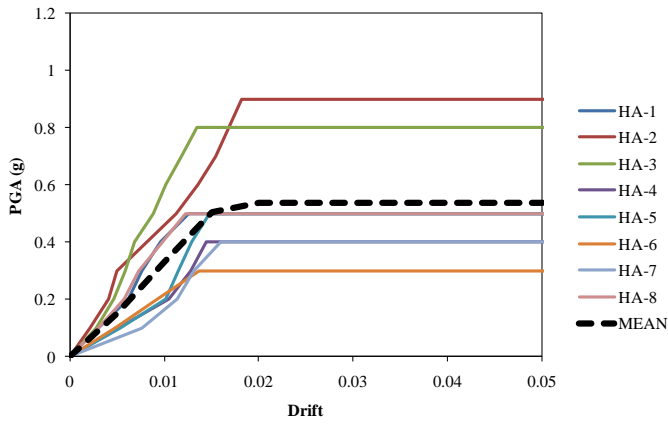


شکل ۳: میانگین پاسخ‌های طیفی رکوردهای پالس دار با دامنه کوتاه و بلند در سطوح مخلف شکل پذیری

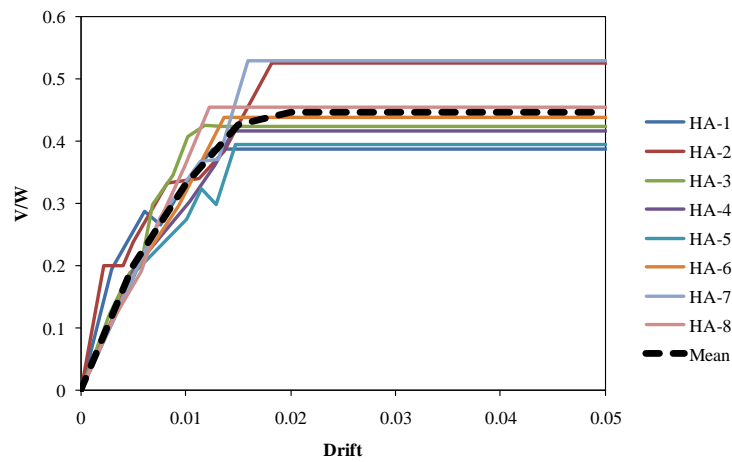
۳- نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده

پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی با گام‌ها و جزئیات ارائه شده در بخش قبل منحنی‌های ظرفیت دینامیکی مربوط به هر رکورد و برای دو مدل سه بعدی ۶ و ۹ طبقه در شکل ۴ ارائه شده است. منحنی خط چین تیره رنگ بیانگر میانگین ظرفیت دینامیکی در هر مورد بر حسب بیشینه شتاب متناظر است. می‌دانیم بیشینه شتاب پارامتر مناسبی برای ارزیابی کمی مقاومت تمامی سازه‌ها نیست. از این رو، برای بررسی کمی تغییرات در ظرفیت سازه به محاسبه برش پایه نظیر هر ضریب مقیاس و ترسیم آن در مقابل جابجایی نسبی کلی ثبت شده در هر گام می‌پردازیم. شکل ۵ نمونه‌ای از این محاسبات را برای تحلیل دینامیکی فزاینده سازه ۶ طبقه تحت مجموعه رکوردهای با دامنه بالا نمایش می‌دهد.

با نگاهی به شکل ۴، به خوبی متوجه پراکندگی نسبتاً زیاد نتایج به خصوص در مورد رکوردهای کم دامنه خواهیم شد. این امر، گرچه می‌تواند منسوب به تعداد رکوردهای مورد استفاده و ناکافی بودن آنها برای پوشش حداکثری عدم قطعیت‌های موجود در رخدادهای لرزه‌ای نزدیک گسل باشد، اما، در مقام مقایسه می‌تواند موید تفاوت‌های ذاتی رکوردهای کم دامنه و دامنه بالا باشد. این امر در تطابق با میزان پراکندگی مشاهده شده در پاسخ‌های طیفی نیز می‌باشد (به شکل ۲ مراجعه شود).



شکل ۴: منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده محاسبه شده برای سازه ۶ طبقه (ردیف بالا) و سازه ۹ طبقه (ردیف پایینی)

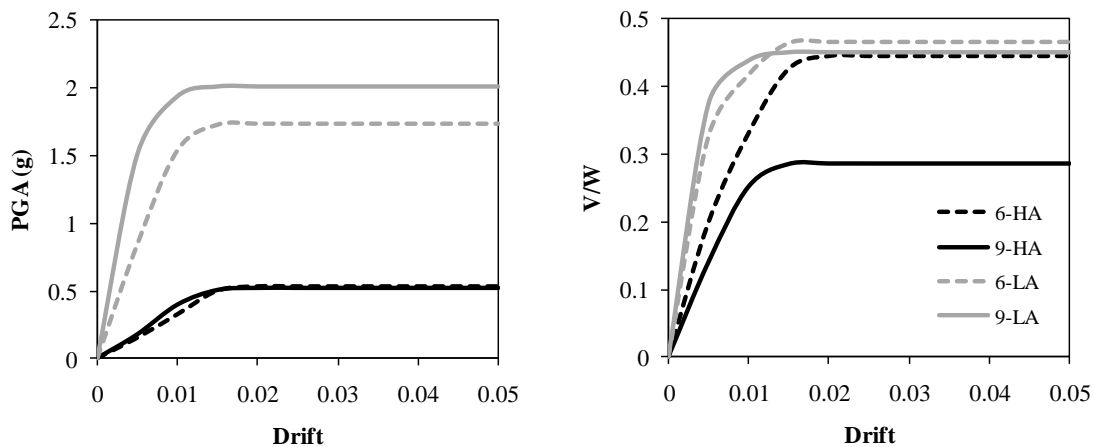


شکل ۵: ظرفیت دینامیکی محاسبه شده بر حسب برش پای‌نرمال شده به وزن سازه برای سازه ۶ طبقه تحت رکوردهای بادامنه بالا

۴- تفسیر نتایج

برای درک صحیح‌تر و تفسیر تغییرات ایجاد شده در پاسخ دینامیکی سازه‌ها به سراغ مقایسه منحنی‌های میانگین تحلیل دینامیکی فزاینده خواهیم رفت. همانطور که بیشتر اشاره شد ارتباط منطقی‌تری بین برش پایه ثبت شده در هر گام تحلیل و جابجایی نسبی متناظر وجود دارد. از این رو شکل ۶ به مقایسه جامع بین منحنی‌های ظرفیت دینامیکی می‌پردازد. با نگاهی به شکل مذکور مشاهدات زیر قابل استخراج است:

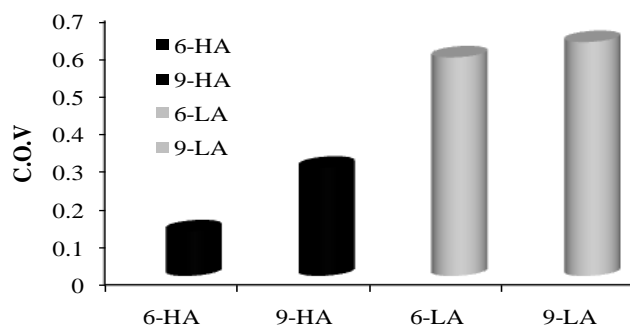
- تفاوت محسوسی در شیب اولیه نمودار ظرفیت ملاحظه می‌شود که با توجه به ماهیت تحلیل تاریخچه زمانی می‌تواند منسوب به پتانسیل فعال شدن مکانسیم‌های فروریزش متفاوت سازه‌ها تحت شتابنگاشت ورودی باشد. این امر منطبق با شواهد موجود در ادبیات فنی مبنی بر اهمیت مودهای بالاتر سازه تحت زلزله‌های نزدیک گسل است [۲].
- علاوه بر بحث مودهای بالاتر می‌دانیم استفاده از پارامترهای بیشینه شتاب بطور ذاتی پراکندگی نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده را افزایش داده و از قابلیت اطمینان مقادیر سختی محاسبه شده می‌کاهد. از اینرو، استفاده از ضرایب مقیاس مرتبط با پاسخ‌های طیفی در ادبیات فنی توصیه شده است [۹].
- با استفاده از پارامتر برش پایه مقدار تغییر در سختی اولیه کاهش می‌یابد. همچنین، اختلاف مقادیر ظرفیت برای دو مجموعه از رکوردها کمتر می‌شود.
- استفاده از رکوردهای با دامنه بالا که عموماً ثبت شده از رخداد‌های لرزه‌ای شدیدتر هستند منجر به تخمین دست پایین ظرفیت سازه خواهد شد. این امر با توجه به محتوای فرکانسی متفاوت و عموماً غنی‌تر این رکوردها، زمان تداوم جنبش نیرومند زمین عموماً بیشتر این رکوردها و پتانسیل بیشتر آن‌ها برای اعمال انرژی به سازه، قابل توجیه است.



شکل ۶: مقایسه منحنی‌های میانگین تحلیل دینامیکی فزاینده بر اساس ضریب مقیاس (سمت چپ) و برش پایه نرمال شده به وزن سازه (سمت راست)

- با توجه به اهمیت نگاه احتمالاتی به تخمین پاسخ سازه‌ها در طراحی به روش عملکردی نه تنها تخمین درست مقادیر ظرفیت از اهمیت برخوردار است بلکه استفاده از روش‌های گوناگون به منظور کاهش پراکندگی آماری در نتایج مورد تاکید قرار دارد. در مطالعه جاری، شاهد پراکندگی زیاد در پاسخ‌های محاسبه شده تحت مجموعه رکوردهای کم دامنه هستیم. شکل ۷ متوسط ضریب پراکندگی آماری را

در حالات گوناگون مورد بررسی به تصویر کشیده است. پر واضح است که در مورد سازه‌های ۶ و ۹ طبقه استفاده از رکوردهای کم دامنه پراکندگی آماری را به شدت افزایش می‌دهد. بررسی پاسخ‌های رکوردهای کم دامنه در شکل ۴، بیانگر این مطلب است که شکاف معنی داری میان پاسخ‌های دینامیکی این مجموعه وجود دارد بطوریکه ۴ رکورد الگویی شبیه به رکوردهای با دامنه بالا داشته و ۴ رکورد دیگر روند متفاوتی را دارند. بنابراین می‌توان امیدوار بود با محاسبه مشخصات مربوط به رکوردها و مقایسه آن‌ها در کنر پارامتر دامنه سرعت از میان رکوردهای کم دامنه به گونه‌ای انتخاب بهینه صورت گیرد که پراکندگی آماری نتایج کاهش یابد.



شکل ۷: میانگین ضریب پراکندگی آماری برای منحنی تحلیل دینامیکی فزاینده بر اساس برش پای‌نرمال شده به وزن سازه

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی کمی امکان استفاده از رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس کم دامنه سرعت در فرایند تحلیل دینامیکی فزاینده پرداخته‌ایم. دو مجموعه ۸ تایی از رکوردهای دارای پالس با دامنه کم و زیاد انتخاب شده است. دو سازه بتنی دارای سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. با مروری بر نتایج در می‌یابیم که استفاده بی چون و چرا از رکوردهای کم دامنه خالی از اشکال نخواهد بود. این امر در مجموع موجب تخمین دست پایین ظرفیت سازه و افزایش پراکندگی آماری در نتایج می‌گردد. گرچه، با استفاده از کنترل اولیه سایر مشخصات مربوط به شتابنگاشت مانند زمان تداوم جنبش نیرومند زمین، محتوای فرکانسی، پاسخ‌های طیفی و می‌توان به انتخاب بهینه و کم دامنه از میان این رکوردهای کم دامنه امیدوار بود.

مراجع

- [1] Somerville, P. G. "Development of an improved representation of near fault ground motions." SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data. Vol. 15. (1998).
- [2] Alavi, B., Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures." John A. Blume Earthquake Engineering Center (2001).
- [3] Rupakhety, R., Sigurdsson, S. U., Papageorgiou, A. S., & Sigbjörnsson, R. "Quantification of ground-motion parameters and response spectra in the near-fault region." Bulletin of Earthquake Engineering, **9**, No. 4 (2011) 893-930.
- [4] Farid Ghahari, S., Jahankhah, H., & Ghannad, M. A. "Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition." Soil dynamics and earthquake engineering, **30**, No. 7 (2010) 536-546.
- [5] Baker, Jack W. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis." Bulletin of the Seismological Society of America **97**, No. 5 (2007) 1486-1501.
- [6] Yaghmaei-Sabegh, S. "Detection of pulse-like ground motions based on continues wavelet transform." Journal of seismology **14**, No. 4 (2010) 715-726.
- [7] Amiri, G. G., & Moghaddam, S. A. "Extraction of forward-directivity velocity pulses using S-Transform-based signal decomposition technique." Bulletin of Earthquake Engineering (2014)

- [8] Rupakhety, R., & Sigbjörnsson, R. “*Can Simple Pulses Adequately Represent Near-Fault Ground Motions?*” *Journal of Earthquake Engineering*, **15**, No. 8 (2011) 1260-1272.
- [9] Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. “*Incremental dynamic analysis.*” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**, No. 3 (2002) 491-514.