

چکیده

یکی از ویژگی‌های مهم رکوردهای نزدیک به گسل وجود پالس سرعت در این رکوردهاست که پالس جهت‌یافتگی نیز نامیده می‌شود. بررسی سازه‌های بلند تحت رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک با اثر پالس سرعت و بدون آن می‌تواند میزان تأثیر این ویژگی زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را بیشتر مشخص نماید. با مطالعه و بررسی یک ساختمان ۴۲ طبقه بتن مسلح تحت اثر زلزله‌های نزدیک به گسل مختلف اثر پالس سرعت در سازه بررسی شده است. ساختمان مورد نظر قبلاً در پروژه TBI مؤسسه تحقیقات لرزه‌ای آمریکا (PEER) مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل سازی و تحلیل سازه بر اساس اطلاعات مندرج در گزارش پروژه TBI با استفاده از نرم‌افزار ETABS انجام شده و با نتایج موجود در گزارش مذکور صحت سنجی شده است. روش تحلیل بدین شکل است که ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه تحت اثر رکوردهای اصلی انجام گرفته و سپس پالس انرژی رکوردها با استفاده از روش ابداعی بیکر حذف شده و مجدداً سازه مورد تحلیل قرار گرفته است تا میزان تأثیرگذاری پالس مشخص گردد. نتایج حاکی از آن است که پالس سرعت زلزله‌های نزدیک به گسل به طرز قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلندمرتبه اثر می‌گذارد.

واژگان کلیدی: ساختمان بلند، زلزله، پالس سرعت، هسته بتنی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

اثر پالس سرعت زلزله‌های نزدیک به گسل بر رفتار لرزه‌ای یک ساختمان بلندمرتبه

سهیل همتی

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

محمدعلی اصغری ورزنده

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

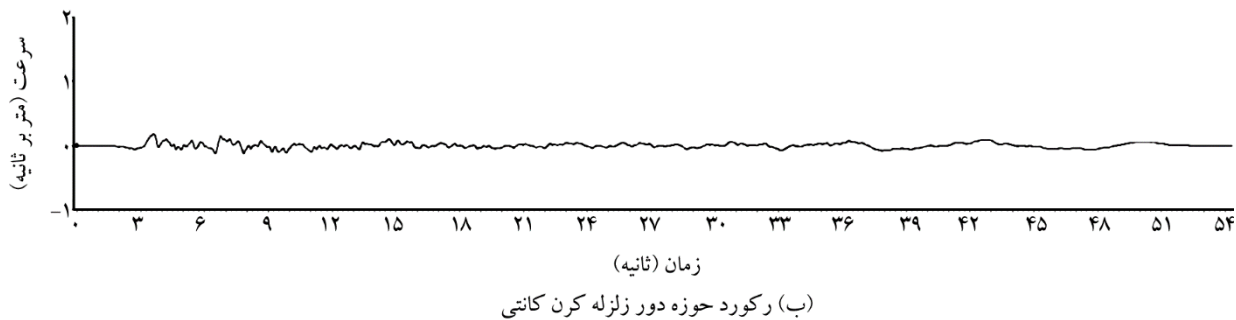
اکبر واتقی (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، vasseghi@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در زلزله‌های نزدیک به گسل، جهت گسلش نسبت به ساختگاه است [۱-۳]. هنگامی که گسلش به سمت ساختگاه انتشار می‌یابد، امواج ناشی از گسلش در جلوی جبهه امواج زلزله جمع می‌شوند و انرژی در جهت پیش‌رونده انباشته می‌شود. این انرژی باعث تشکیل یک پالس بزرگ با پیوند نسبتاً بلند در جهت عمود بر امتداد گسل می‌شود. این پدیده از مهم‌ترین خصوصیات زلزله‌های نزدیک گسل در جهت پیش‌رونده است که هم در گسل‌های امتدادلغز^۲ و هم در گسل‌های شیب‌لغز^۳ رخ می‌دهد. در گسل‌های شیب لغز، این پالس در قسمت فوقانی صفحه گسلش و در گسل‌های امتداد لغز در هر دو صفحه گسلش رخ می‌دهد [۲]. مطالعات انجام شده بر روی تعدادی از زلزله‌های نزدیک گسل مانند زلزله ۱۹۹۴

تجربه زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که جنبش زمین در نزدیکی گسل خصوصیات ویژه‌ای دارد که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. یکی از ویژگی‌های مهم رکوردهای نزدیک به گسل وجود پالس سرعت در این رکوردهاست که پالس جهت‌یافتگی^۱ نیز نامیده می‌شود. در شکل (۱) تاریخچه پاسخ سرعت رکورد زلزله حوزه نزدیک ۱۹۹۴ نورث‌ریج دارای پالس جهت‌یافتگی و رکورد زلزله حوزه دور ۱۹۵۲ کرن کانتی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که رکورد زلزله حوزه نزدیک دارای یک پالس سرعت کاملاً مشخص است که این پالس در رکورد حوزه دور وجود ندارد. در مطالعات انجام شده بر روی رکوردهایی که در مناطق نزدیک گسل ثبت شده‌اند، مشخص شده است که یکی از



شکل (۱): مقایسه تاریخچه پاسخ سرعت.

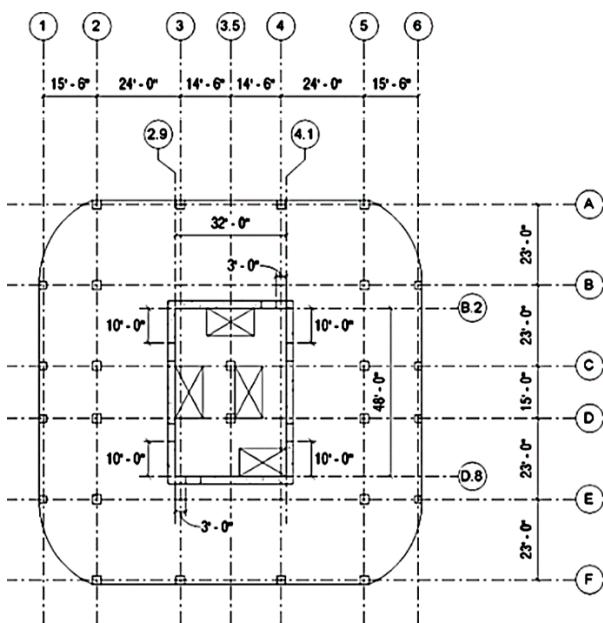
نزدیک استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که در ساختمان‌هایی که زمان تناوب مود اول بزرگ‌تر از پریود پالس است، نیروهای برشی در طبقات بالا نسبتاً زیاد می‌باشد. در این حالت، اگر مقاومت خمشی سازه زیاد باشد، نیروهای برشی در طبقات بالا باعث تسلیم زود هنگام در طبقه می‌شود و اگر مقاومت خمشی سازه زیاد نباشد، حداکثر تقاضای شکل‌پذیری در طبقه پایین ساختمان رخ می‌دهد. در ساختمان‌هایی که زمان تناوب مود اول کمتر از پریود پالس است، حداکثر تقاضای شکل‌پذیری صرف نظر از مقاومت خمشی ساختمان در طبقه پایین ساختمان رخ می‌دهد. در مطالعه دیگری [۸] پاسخ غیرخطی ساختمان‌های بلند دیوار برشی بتنی در زمین‌لرزه‌های پالس گونه بررسی شدند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پالس‌های قوی با پریود نزدیک به مود دوم سازه، مودهای اول و دوم سازه را تحریک می‌کنند و منجر به پاسخ غیرخطی بزرگ در پای دیوار می‌شود. همچنین مولیناهات و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ یک ساختمان ۴۰ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی را تحت اثر رکوردهای پالس گونه حوزه نزدیک تحلیل نمودند. این مطالعه نشان داد که جابه‌جایی نسبی و شتاب طبقات در زمین‌لرزه‌های پالس گونه بیشتر از حد متعارف است. کوهرنگی و همکاران [۱۰] در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۸ به

نورتریج کالیفرنیا، زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، زلزله ۱۹۹۹ دوزجه ترکیه و زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان نشان می‌دهد که طیف‌های پاسخ در زلزله‌های نزدیک گسل در محدوده زمان تناوب متوسط و بلند با مقادیر متناظر طیفی آنها در زلزله‌های دور از گسل متفاوت هستند [۴]. این تفاوت می‌تواند باعث خسارت به سازه‌ها با زمان‌های تناوب متوسط و بلند مانند ساختمان‌های بلندمرتبه شود. مطالعات گوناگونی در رابطه با رفتار ساختمان‌های بلندمرتبه تحت تأثیر زمین‌لرزه‌های پالس گونه انجام شده است. هال و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۵، یک ساختمان ۲۰ طبقه فولادی را تحت اثر یک رکورد زلزله پالس دار بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که در اثر این زلزله، دوران اتصالات تیر و ستون در طبقات میانی بیشتر از حد گسیختگی است. در مطالعه دیگری [۶]، یک ساختمان ۴۴ طبقه با هسته بتنی در راستای مؤلفه‌های نرمال (FN) و موازی (FP) رکورد زلزله تحلیل شده است. مؤلفه نرمال رکورد زلزله دارای یک پالس قوی با زمان تناوب $4/8$ ثانیه می‌باشد که از زمان تناوب مود اول سازه $(3/5)$ ثانیه بیشتر است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که پاسخ بحرانی سازه در راستای مؤلفه نرمال رخ می‌دهد. علوی و کراوینکلر [۷] در سال ۲۰۰۴ نیز برای تحلیل ساختمان‌های فولادی بلندمرتبه از رکوردهای پالس گونه حوزه

طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند شهر لس آنجلس (LATBSDC) [۱۳] انجام شده است.

- ساختمان C-1: طراحی بر اساس عملکرد بر مبنای آئین نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مؤسسه تحقیقات لرزه‌ای آمریکا (PEER) [۱۴] انجام شده است.

در این مقاله ساختمان C-1 که بر اساس آئین نامه PEER طراحی شده است برای بررسی اثر پالس سرعت بر رفتار لرزه‌ای ساختمان انتخاب شده است. در گزارش PEER این ساختمان تحت زلزله‌های با دوره بازگشت ۲۵، ۴۳، ۴۷۵، ۲۴۷۲ و ۴۹۷۵ مورد تحلیل قرار گرفته است. در این مقاله از نتایج تحلیل یکی از زلزله‌های سطح MCE (زلزله لوماپریتا) برای صحت‌سنجی مدل تحلیلی استفاده شده است. شکل (۲) پلان برج ساختمان را با ابعاد ۳۳×۳۲/۶۰ متر (۱۰۸×۱۰۷ فوت) نشان می‌دهد.



شکل (۲): پلان برج ساختمان [۱۱].

ابعاد دیوار برشی مرکزی همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ۱۴/۶۰×۹/۸۰ متر (۴۸×۳۲ فوت) است. پلان طبقه همکف و ۴ طبقه زیر همکف ساختمان که دارای کاربری پارکینگ می‌باشد در شکل (۳) نشان داده شده است. ابعاد این پلان که دارای فونداسیون محصور به دیوارهای حائل نیز می‌باشد، ۶۹/۵۰×۶۹ متر (۲۲۷×۲۲۸ فوت) است.

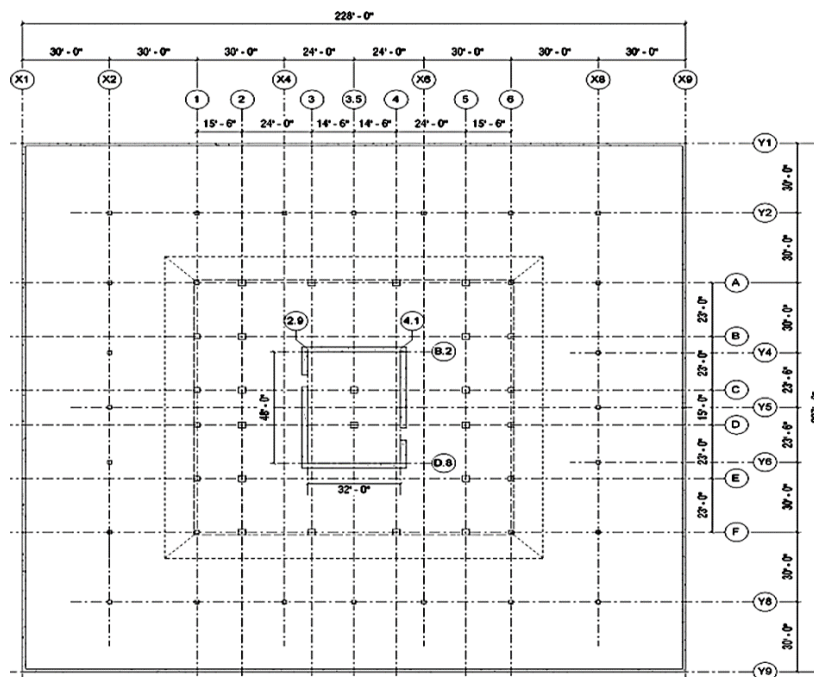
بررسی اثر رکوردهای حوزه نزدیک دارای پالس‌گونگی و رکوردهای حوزه دور که دارای شکل طیفی یکسانی هستند پرداختند. نتایج این مطالعه بر روی یک ساختمان ۲۰ طبقه قاب خمشی بتنی نشان‌دهنده آن است که تنها پالس‌گونگی رکوردها نمی‌تواند عامل ایجاد پاسخ‌های بزرگ‌تر در سازه گردد و مشخصه‌های ساختمان و نسبت فرکانس مود اول سازه به فرکانس پالس رکورد نیز در پاسخ تأثیرگذار خواهد بود.

بررسی سازه‌های بلند تحت رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک با اثر پالس سرعت و بدون آن می‌تواند میزان تأثیر این ویژگی زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را بیشتر مشخص نماید. در این مقاله رفتار یک سازه ۴۲ طبقه با هسته بتنی تحت اثر زلزله نزدیک به گسل با پیوندهای پالس متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. بدین صورت که ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه تحت اثر رکوردهای اصلی انجام گرفته و سپس پالس انرژی رکوردها حذف شد و مجدداً سازه مورد تحلیل قرار گرفته است تا میزان تأثیرگذاری پالس مشخص شود. نتایج نشان می‌دهد که وجود پالس سرعت، تقاضای لرزه‌ای در ساختمان‌های بلند را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، در صورتی که پیوند پالس سرعت نزدیک زمان تناوب مود اول ساختمان باشد، این افزایش تقاضای لرزه‌ای بسیار شدید می‌باشد.

۲- معرفی ساختمان

ساختمان در نظر گرفته شده قبلاً در پروژه TBI مؤسسه تحقیقات لرزه‌ای آمریکا (PEER) که در شهر لس آنجلس بنا گردیده است مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. ساختمان دارای ۴۲ طبقه با کاربری مسکونی است و دارای سیستم لرزه‌ای دیوار برشی مرکزی^۴ است. این ساختمان در گزارش‌های PEER به نام ساختمان ۱ شناخته می‌شود که سه طراحی مختلف برای ساختمان به شرح زیر انجام گرفته است:

- ساختمان A-1: بر اساس آئین نامه IBC سال ۲۰۰۶ [۱۲] بدون در نظر گرفتن محدودیت ارتفاع طراحی شده است.
- ساختمان B-1: طراحی بر اساس عملکرد بر مبنای آئین نامه



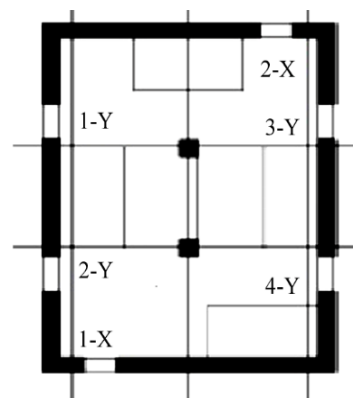
شکل (۲): ابعاد طبقات زیرزمین ساختمان [۱۱].

۳- مدل تحلیلی

در مدل سه بعدی ساختمان در شکل (۵)، دیوارهای برشی با المان wall از نوع پوسته‌ای^۵ که در محل بازشوها با تیرهای همبند (از نوع المان spandrel) به یکدیگر متصل شده‌اند، مدل‌سازی شده‌اند. همچنین تیرها و ستون‌ها با المان Frame و سقف‌ها با المان slab از نوع پوسته‌ای با فرض صلیب کامل^۶ مدل‌سازی شده‌اند. برای این ساختمان مصالح بتنی مختلفی تعریف گردیده است. در جدول (۱) مشخصات مصالح بتنی اعضا مورد استفاده و در جدول (۲) مشخصات میلگردهای فولادی ارائه شده‌اند. مدول الاستیسیته بتن بر اساس رابطه ۵-۱ آیین‌نامه ACI363 [۱۵] محاسبه شده است.

ضخامت دیوارهای برشی در ارتفاع در جهت X، ۹۰ سانتی‌متر تا طبقه سیزدهم، ۶۰ سانتی‌متر تا طبقه سی و یکم و ۵۳ سانتی‌متر تا بام و در جهت Y، ۸۰ سانتی‌متر تا طبقه سیزدهم، ۶۰ سانتی‌متر تا طبقه سی و یکم و ۵۳ سانتی‌متر تا بام است. ضخامت دیوارهای پیرامونی زیرزمین ۴۰ سانتی‌متر است. همچنین ضخامت سقف‌های زیرزمین ۲۵ سانتی‌متر، سقف طبقه همکف ۳۰ سانتی‌متر، طبقات مسکونی ۲۰ سانتی‌متر و طبقه بام ۲۵ سانتی‌متر است. تیپ‌بندی ستون‌ها نیز در شکل (۶) نشان داده شده است.

ارتفاع طبقات ساختمان ۲/۹۵ متر است. ارتفاع طبقه همکف ۳/۸۰ متر و ارتفاع طبقات زیرزمین ۳/۰۵ متر است. ارتفاع کل ساختمان از روی تراز زمین برابر ۱۳۰ متر و با احتساب طبقات زیرزمین ارتفاع کل ساختمان ۱۴۳/۲۰ متر است. در شکل (۳) دیوارهای برشی هسته مرکزی و موقعیت بازشوها نمایش داده شده است. دیوارها در جهت شمالی جنوبی دارای یک تیپ و در جهت شرقی غربی دارای یک تیپ دیگر هستند. دیوارها با تیرهای کوبله در محل بازشوها تقویت شده‌اند. شکل (۴) همچنین نام گذاری تیرهای کوبله در دیوارها را نیز نشان می‌دهد. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۱] ارائه شده است.



شکل (۴): دیوارهای بتنی هسته مرکزی [۱۱].

گزارش PEER مدل‌سازی شده‌اند. در گزارش PEER دیوارهای برشی به صورت مجزا مدل گردیده‌اند و با تیرهای کوپله در محل باز شو به هم متصل شده‌اند؛ اما در این پروژه دیوارها با باز شو در نرم‌افزار معرفی گردیده‌اند و برای تیرهای همبند المان Spandrel در نظر گرفته شده است. در سقف‌های مسکونی اثر دال‌های outrigger با مدل‌سازی تیرهای کم عمق به ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر که متصل به دیوار برشی هستند، در نظر گرفته شده است. در گزارش PEER به ابعاد این تیرها اشاره نشده است. شکل (۷) نحوه قرارگیری تیرها در پلان را نشان می‌دهد.

سختی در نظر گرفته شده برای اعضا با توجه به ترک خوردگی بتن تغییر پیدا می‌کند. ضرایب کاهش سختی فرض شده برای اعضای بتنی مطابق جدول (۳) می‌باشد.

Column Mark	Levels	Size	Column Marks
D/3.5	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	21*21*	
	Level 12 - 22	25*25*	
	Fdn - Level 12	30*30*	
D/5	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	19*19*	
	Level 12 - 22	24*24*	
	Fdn - Level 12	29*29*	
D/6	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	18*18*	
	Level 12 - 22	18*18*	
	Fdn - Level 12	24*24*	
E/5	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	22*22*	
	Level 12 - 22	26*26*	
	Fdn - Level 12	33*33*	
E/6	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	18*18*	
	Level 12 - 22	19*19*	
	Fdn - Level 12	26*26*	
F/4	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	21*21*	
	Level 12 - 22	26*26*	
	Fdn - Level 12	34*34*	
F/5	Level 34 - Roof	18*18*	
	Level 22 - 34	18*18*	
	Level 12 - 22	21*21*	
	Fdn - Level 12	28*28*	

شکل (۶): تیپ‌بندی ستون‌ها [۱۱].

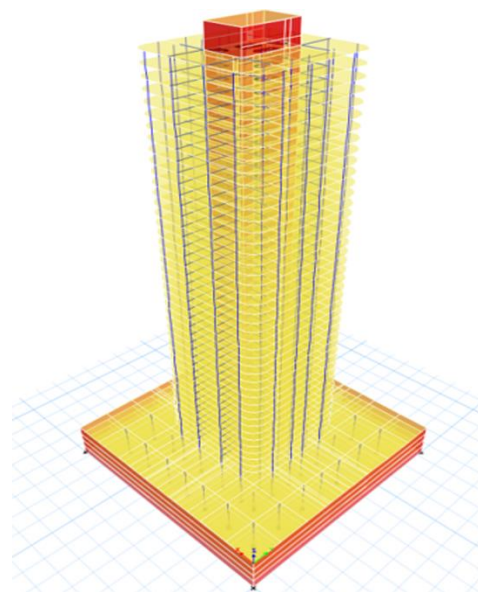
مدل‌سازی و تحلیل ساختمان به طور کامل با استفاده از نرم‌افزار ETABS 2016 انجام شده است. تمامی اعضا و المان‌ها همانند

جدول (۱): مشخصات بتن مورد استفاده.

E (Mpa)	F _c ' (Mpa)	اعضا
۲۹۱۴۰	۴۵	دیوارهای زیرزمین
۳۱۲۴۰	۵۴	فونداسیون گسترده
۳۰۳۱۰	۵۰	تیرها و دال‌ها
۳۰۳۱۰	۵۰	دال‌های پس‌تنیده
۳۵۰۰۰	۷۲	ستون‌ها
۳۵۰۰۰	۷۲	دیوارهای برشی

جدول (۲): مشخصات میلگرد مصرفی.

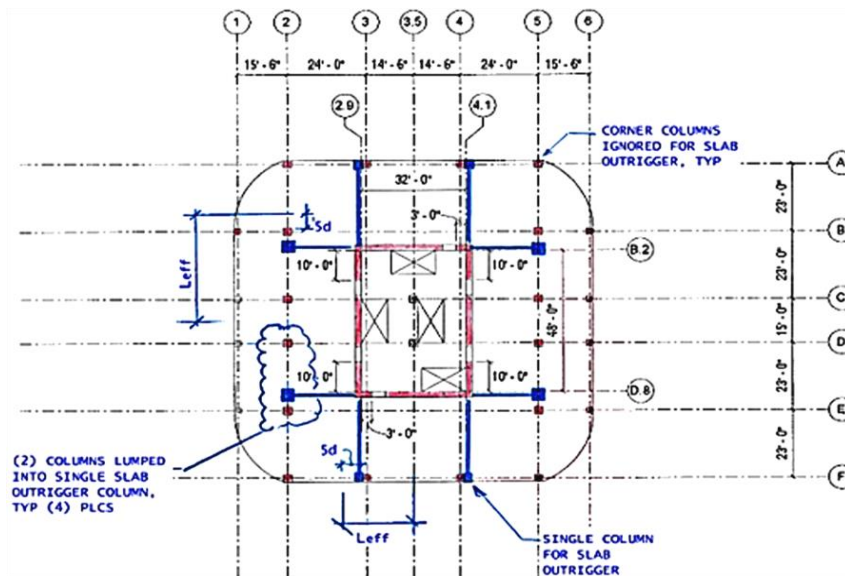
F _u (Mpa)	F _y (Mpa)	استاندارد
۷۲۴	۴۸۳	ASTM A615 Grade 60
۹۰۰	۵۸۵	ASTM A615 Grade 75



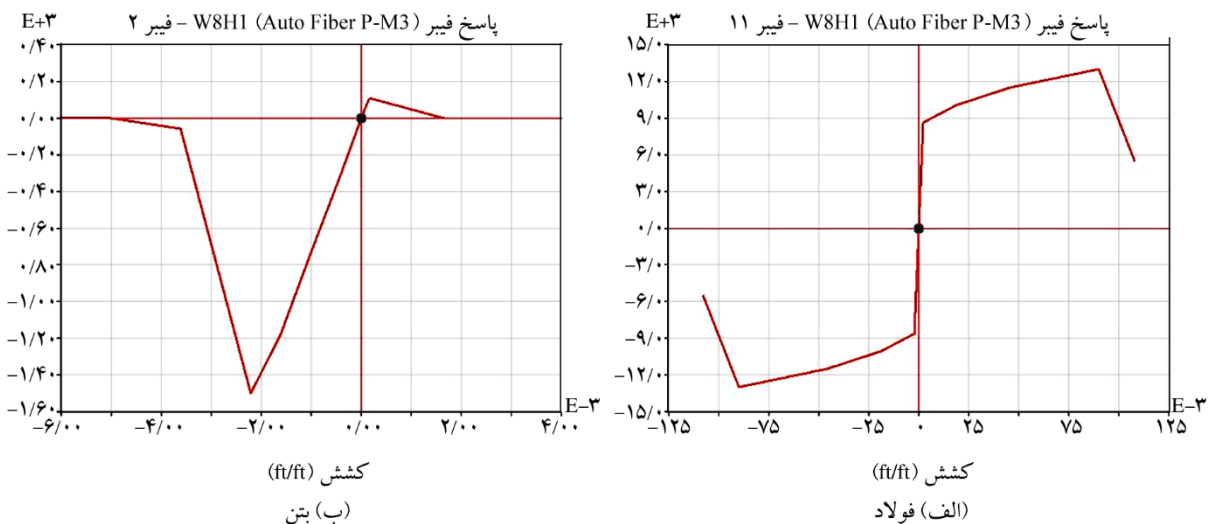
شکل (۵): مدل سه‌بعدی ساختمان.

جدول (۳): سختی فرض شده برای اعضا.

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی	تحلیل بار سرویس و باد	اعضا
خمش 0.5I _g	خمش 0.9I _g - برش 1.0A	دیوارهای برشی
خمش 0.8I _g - برش 0.8A	خمش 0.9I _g - برش 1.0A	دیوارهای زیرزمین
خمش 0.25I _g - برش 0.25A	خمش 0.5I _g - برش 0.8A	دیافراگم طبقه همکف
خمش 0.25I _g - برش 0.25A	خمش 0.5I _g - برش 0.8A	دیافراگم طبقات زیرزمین
خمش 0.35I _g - برش 1.0A	خمش 0.35I _g - برش 1.0A	دیافراگم طبقات دارای outrigger
خمش 0.40I _g - برش 0.5A - نیرو محوری 0.10A	خمش 1.0I _g - برش 1.0A - نیرو محوری 1.0A	ستون بتنی



شکل (۷): محل قرارگیری outrigger [۱۱].



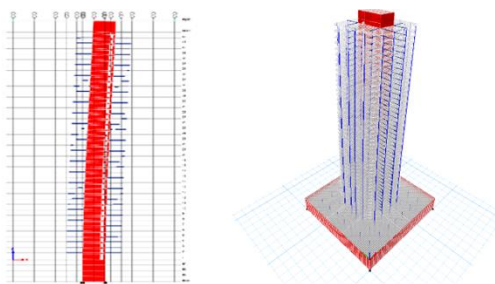
شکل (۸): منحنی رفتاری اعضای غیرخطی.

مرکزی با استفاده از المان Fiber و منحنی رفتاری فولاد و بتن (شکل ۸) به صورت خودکار محاسبه می شود. جدول (۴) نشانگر بارهای در نظر گرفته شده برای ساختمان به همراه وزن خود سازه است. بار گذاری بر اساس آئین نامه ASCE7 [۱۶] انجام و کاهش سربار نیز مطابق همین آئین نامه در نظر گرفته شده است. علاوه بر بار سقف دال، بار دیوارهای پیرامونی که غیرسازه ای هستند نیز برای ساختمان در نظر گرفته شده است. مقدار این بار که تحت عنوان Cladding شناخته می شود، ۷۵ کیلوگرم بر مترمربع بر اساس مساحت دیوارهای محیطی است.

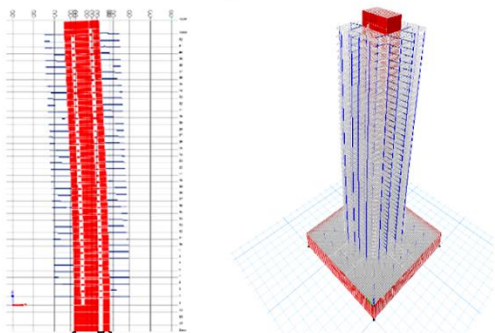
اتصال تمامی اعضا صلب بوده و پای تمامی ستون ها و دیوارها گیردار می باشد. در تمامی تحلیل های خطی و غیرخطی از اثر اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است. برای تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی از روش تحلیل غیرخطی سریع (FNA)^۷ استفاده شده است. در این تحلیل، رفتار خمشی دیوار برشی مرکزی، تیرهای همبند و تیرهای outrigger به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده اند. رفتار برشی دیوار، دیافراگم سقف ها، ستون ها و دیوارهای زیرزمین در تحلیل غیرخطی در مرحله الاستیک باقی می ماند. مقاومت و رفتار خمشی دیوار بتنی هسته

جدول (۴): بارگذاری ثقلی.

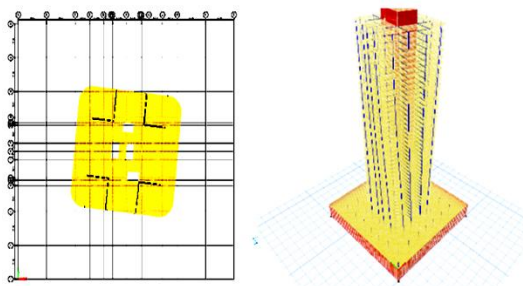
کاربری	بار زنده (کیلوگرم بر مترمربع)	بار مرده کف‌سازی (کیلوگرم بر مترمربع)
پارکینگ	۲۰۰ (بدون کاهش سربار)	۱۵
طبقه همکف (در قسمت برج)	۴۹۰ (بدون کاهش سربار)	۵۴۰
طبقه همکف (در قسمت خارج برج)	۴۹۰ (بدون کاهش سربار)	۱۷۰۰
منطقه خروج (فضای داخل هسته مرکزی)	۴۹۰ (بدون کاهش سربار)	۱۴۰
طبقات مسکونی (خارج از هسته مرکزی)	۲۰۰	۱۴۰
بام	۱۲۰	۱۴۰
تأسیسات مکانیکی و برقی		۱۰۰ کیلوگرم در طبقه بام



(الف) مود اول



(ب) مود دوم



(پ) مود سوم

شکل (۹): شکل مودی ۳ مود اول ساختمان.

در گزارش PEER مقدار حداکثر دررفت تحت تحلیل غیرخطی در جهت x، ۱/۶۵ درصد و در جهت y، ۱/۲ درصد گزارش شده است. در تحلیل تاریخچه زمانی، مقادیر حداکثر دررفت برای زلزله لوماپریتا در جهت x، ۱/۵۱ درصد

در صورتی که این بار تبدیل به بار ثقلی قابل اعمال در سقف شود، مقدار آن برابر ۲۵ کیلوگرم بر مترمربع برای هر سقف می‌باشد. درصد مشارکت بارها نیز برای بار مرده و Cladding، ۱۰۰ درصد و برای بار زنده ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. اثر ثانویه بار ثقلی (P-Δ) نیز برای اعضای سازه‌ای در نظر گرفته شده است.

۴- صحت‌سنجی مدل تحلیلی

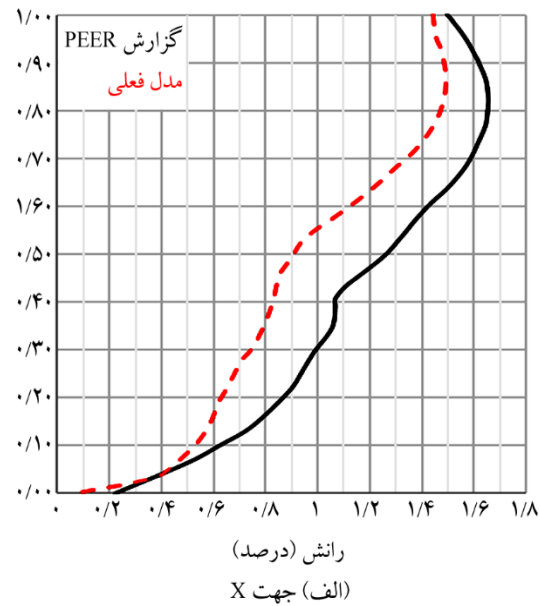
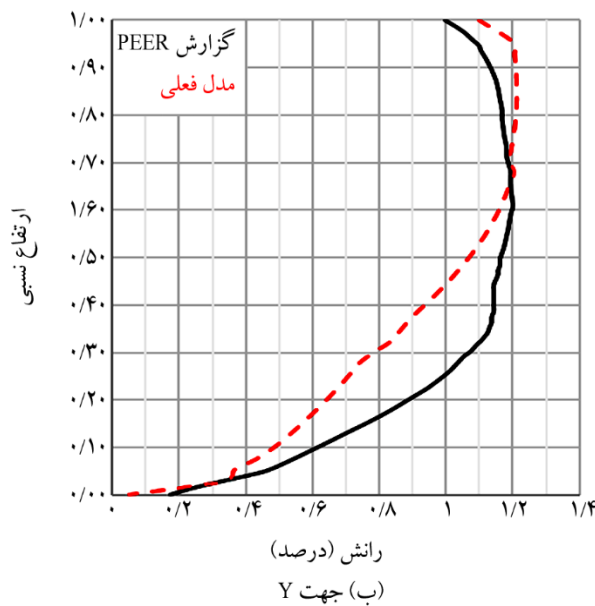
صحت‌سنجی مدل تحلیلی ابتدا با انجام تحلیل مودال و مقایسه زمان‌های تناوب طبیعی سه مود اول با نتایج گزارش PEER و سپس با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و مقایسه نتایج تحلیل با گزارش مذکور انجام شد. پیوندهای طبیعی سه مود اول مدل تحلیلی و مقادیر گزارش PEER در جدول (۵) ارائه شده است و شکل (۹) این سه مود را نمایش می‌دهد. نتایج تحلیل مودال سازه نشان می‌دهد که سه مود اول سازه تطابق خوبی با نتایج گزارش PEER دارند. از رکوردهای لرزه‌ای انتخابی توسط PEER، زلزله لوماپریتا^۸ (۱۹۸۹) با بزرگای ۶/۹۳ جهت بررسی و صحت‌سنجی مدل غیرخطی انتخاب شد.

جدول (۵): نتایج تحلیل مودال ساختمان شماره ۱.

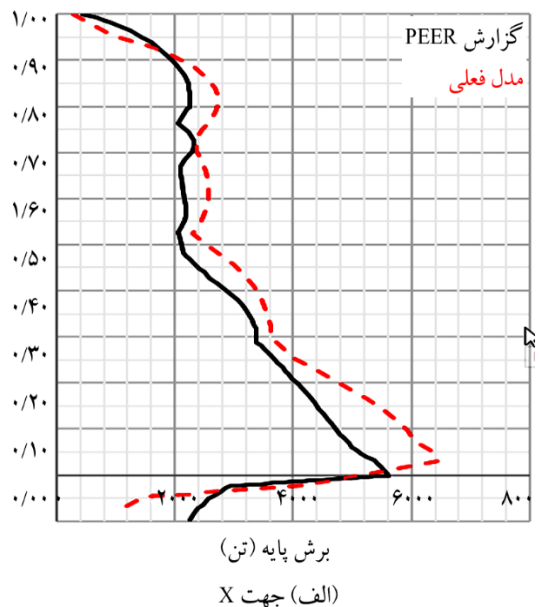
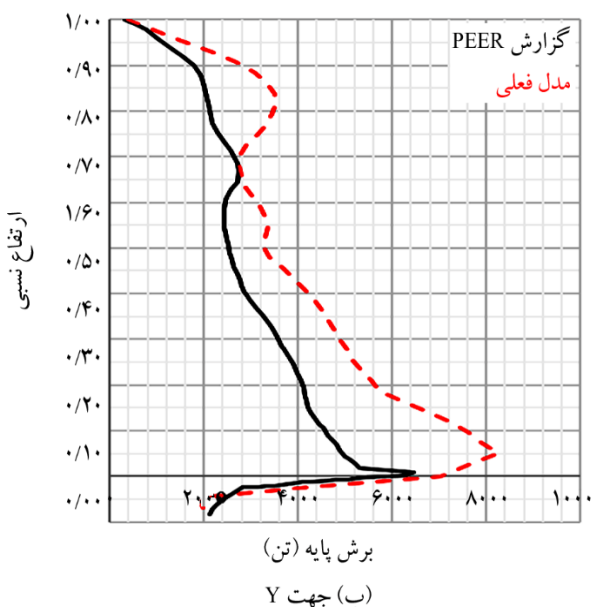
Mode	Period (Sec) مدل تحلیلی	Period (Sec) گزارش PEER
۱	۴/۱۳	۴/۰۰
۲	۳/۰۴	۳/۰۰
۳	۱/۳۶	۱/۵۰

میانگین برابر ۵ درصد و در جهت Y به طور میانگین برابر ۱۷/۷ درصد می باشد. با عنایت به اینکه در مدل سازی سازه برای تیرهای همبند المان Spandrel به جای تیر کوپله تعریف شده و ارتفاع در نظر گرفته شده برای تیرهای outrigger به صورت فرضی می باشد، مقایسه نتایج و بررسی شکل ها نشان می دهند که پاسخ سازه در هر دو جهت تطابق خوبی با نتایج گزارش PEER دارد.

و برای جهت Y، ۱/۲ درصد به دست آمده است که تطابق خوبی با نتایج گزارش PEER دارد. مقایسه دریافت و برش طبقات به ترتیب در شکل های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده اند. اختلاف بین دریافت مدل تحلیلی و گزارش PEER در جهت X به طور میانگین برابر ۱۳/۸ درصد و در جهت Y به طور میانگین برابر ۸/۷ درصد می باشد. همچنین اختلاف بین برش پایه مدل تحلیلی و گزارش PEER در جهت X به طور



شکل (۱۰): مقایسه مقادیر Drift تحت زلزله لوما پریتا در گزارش PEER و مدل مورد نظر.



شکل (۱۱): مقایسه مقادیر برش طبقات تحت زلزله لوما پریتا در گزارش PEER و مدل مورد نظر.

۵- بررسی اثر پالس بر رفتار سازه

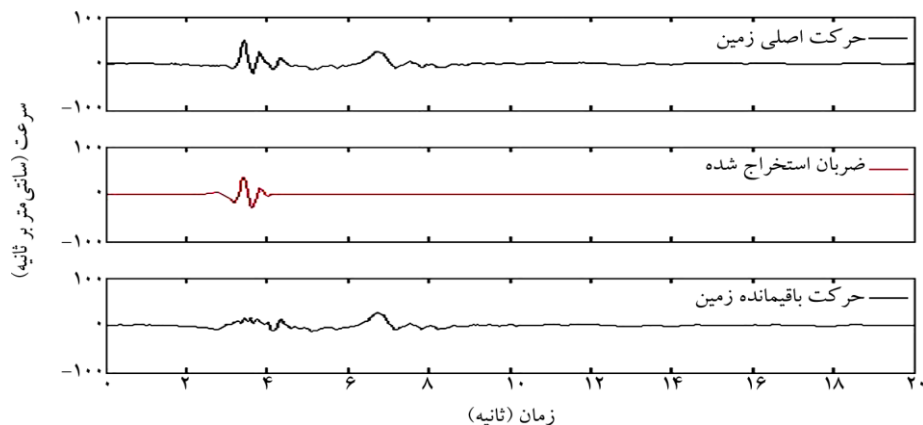
با انتخاب سه رکورد حوزه نزدیک اثر این رکوردها بر روی سازه در دو حالت با پالس و بدون پالس مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات این رکوردها در جدول (۶) ارائه شده است. حذف پالس رکورد زلزله بر اساس روش ارائه شده توسط بیکر [۱۷] انجام شد. روند حذف پالس در این روش به این صورت است که ابتدا رکوردهای زلزله در هر دو راستا با استفاده از کد متلب^۹ فراخوانی می‌شوند و راستای دارای پالس شناسایی می‌گردد. سپس با تحلیل wavelet، پالس رکورد حذف و رکورد بدون پالس به دست می‌آید. کدهای متلب در این رابطه در مرجع [۱۷] ارائه شده‌اند.

۵-۱- مقایسه رکوردها

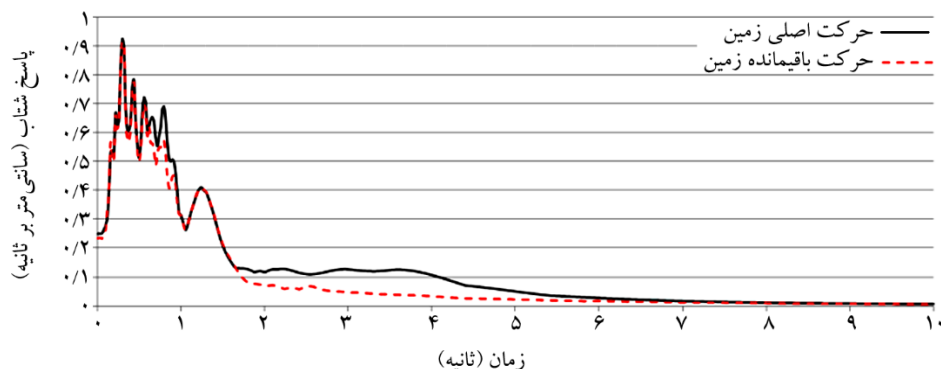
شکل (۱۲) نمودار تاریخچه زمانی سرعت رکورد زلزله نورتریج را نشان می‌دهد. در این شکل پالس سرعت و رکورد بدون پالس که با استفاده از روش بیکر به دست آمده است نیز نشان داده شده است. شکل (۱۳) نمودار طیف شتاب رکورد اصلی و رکورد بدون پالس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر نیروی پالس در زلزله اصلی بسیار زیاد است و زلزله بدون پالس با افت انرژی محسوسی مواجه می‌شود. در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) نمودار تاریخچه زمانی سرعت و طیف شتاب برای دیگر رکوردهای انتخابی نمایش داده شده است.

جدول (۶): رکوردهای نزدیک به گسل انتخابی.

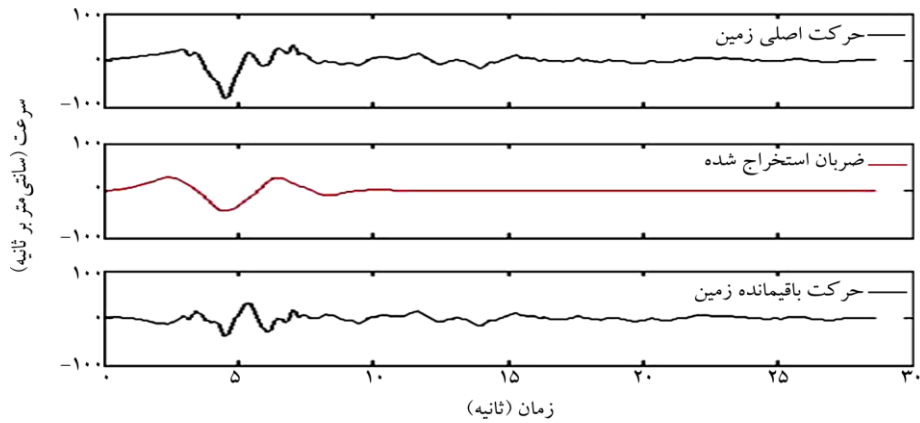
V _{s30} (m/s)	Rupture (km)	R _{jb} (km)	Mag	Station	Year	Event	D5-95(s)	D5-75(s)	T _p (s)	Result ID
۲۰۱۶/۱۳	۷/۰۱	۴/۹۲	۶/۶۹	Pacoima Dam (down str)	۱۹۹۴	نورتریج-۰۱	۴/۳	۲	۰/۵۸۸	۱
۵۶۶/۴۲	۱۲/۲۴	۸/۴۹	۷/۰۱	Bunker Hill FAA	۱۹۹۲	کیپ مندوسینو	۱۳/۴	۳/۶	۵/۳۶۲	۲
۳۸۳/۴۳	۱۱/۹۴	۹/۴۳	۶/۸	Joetsu Kakizakiku Kakizaki	۲۰۰۷	چوتسواوکی، ژاپن	۲۰/۳	۷/۳	۱/۴	۳



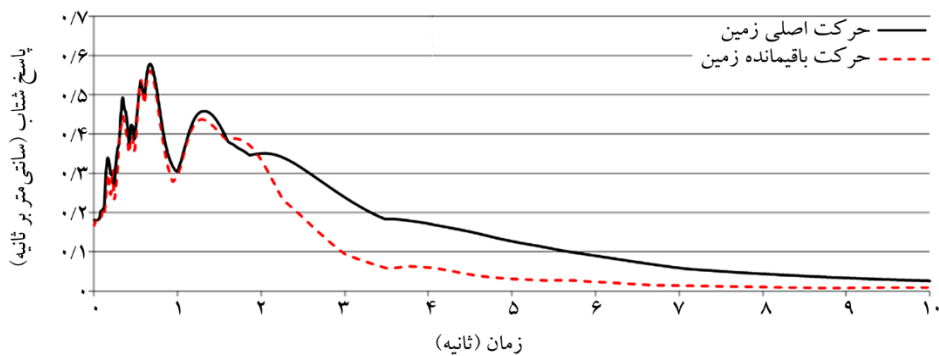
شکل (۱۲): نمودار تاریخچه زمانی سرعت برای زلزله نورتریج.



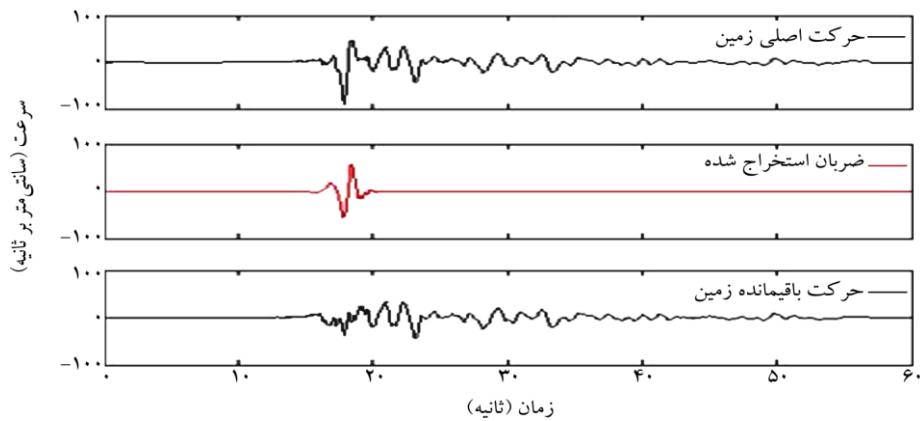
شکل (۱۳): نمودار طیف شتاب برای زلزله نورتریج در دو حالت با پالس و بدون پالس.



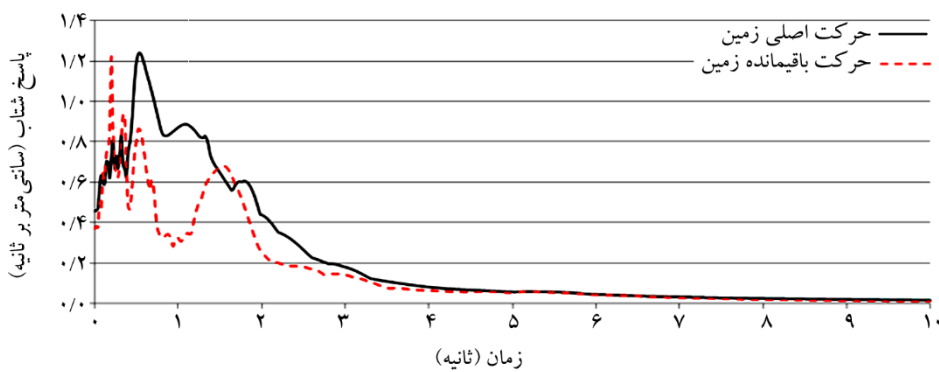
شکل (۱۴): نمودار تاریخچه زمانی سرعت برای زلزله کیپ مندوسینو.



شکل (۱۵): نمودار طیف شتاب برای زلزله کیپ مندوسینو در دو حالت با پالس و بدون پالس.



شکل (۱۶): نمودار تاریخچه زمانی سرعت برای زلزله چووتسو اوکی.



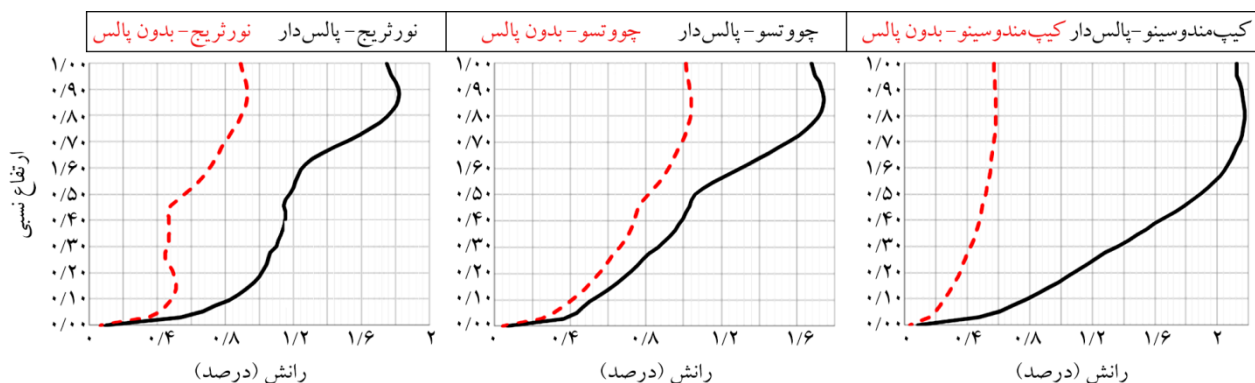
شکل (۱۷): نمودار طیف شتاب برای زلزله چووتسو اوکی در دو حالت با پالس و بدون پالس.

۵-۲- ارزیابی نتایج

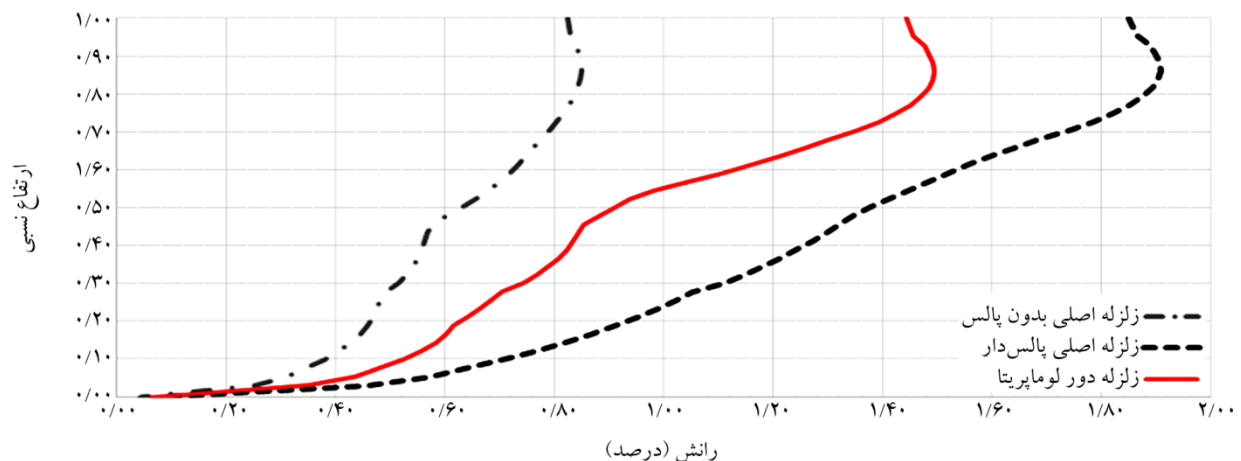
اثر پالس باعث کاهش تغییر مکان نسبی حتی کمتر از زلزله لوماپریتا می‌شود. در زلزله‌های دارای پالس حداکثر تغییر مکان نسبی برابر ۱/۹ درصد و در زلزله‌های بدون پالس حداکثر تغییر مکان نسبی با ۵۵ درصد کاهش به ۰/۸۵ درصد رسیده است. در حالی که حداکثر تغییر مکان نسبی در زلزله لوماپریتا نسبت به زلزله‌های پالس دار ۲۱ درصد کمتر دارد.

شکل (۲۰) نمودار برش طبقات را برای رکوردهای پالس دار و بدون پالس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است برش طبقات برای زلزله‌های بدون پالس کمتر از زلزله‌های پالس دار است. اختلاف برش پایه در دو حالت برای زلزله‌های نورث‌ریج، کیپ‌مندوسینو و چوتسو به ترتیب ۵، ۵۵ و ۶۰ درصد است. در شکل (۲۱) مقادیر متوسط برش طبقات در زلزله‌های پالس دار و بدون پالس با زلزله لوماپریتا که در مرحله قبل تحلیل گردید مقایسه شده است.

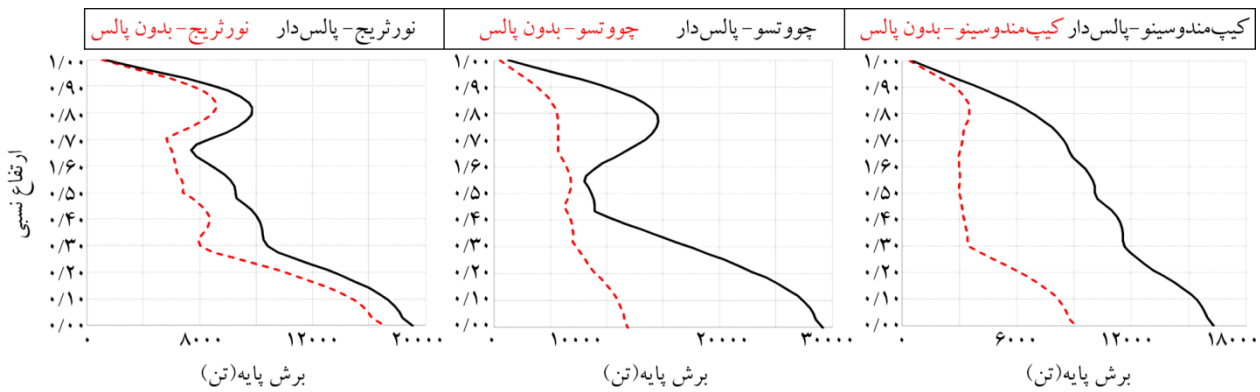
نتایج تحلیل برای هر کدام از زمین‌لرزه‌ها به‌طور مجزا در هر دو حالت پالس دار و بدون پالس بررسی گردید. این نتایج شامل تغییر مکان نسبی، برش طبقات و چرخش مفصل پلاستیک تیرهای همبند می‌باشد. شکل (۱۸) نمودار تغییر مکان نسبی را برای رکوردهای پالس دار و بدون پالس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ماکزیمم تغییر مکان نسبی که در طبقات فوقانی رخ می‌دهد، برای زلزله‌های بدون پالس تقریباً ۵۰ درصد کمتر از زلزله‌های پالس دار است (زلزله نورث‌ریج ۴۹ درصد، زلزله چوتسو ۴۰ درصد و زلزله کیپ‌مندوسینو ۳۳ درصد). در طبقات پایین‌تر این اختلاف کاهش می‌یابد و به حدود ۷ درصد می‌رسد. در شکل (۱۹) مقادیر متوسط تغییر مکان نسبی زلزله‌های پالس دار و بدون پالس با تغییر مکان نسبی زلزله لوماپریتا که در مرحله قبل تحلیل گردید مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که خارج کردن



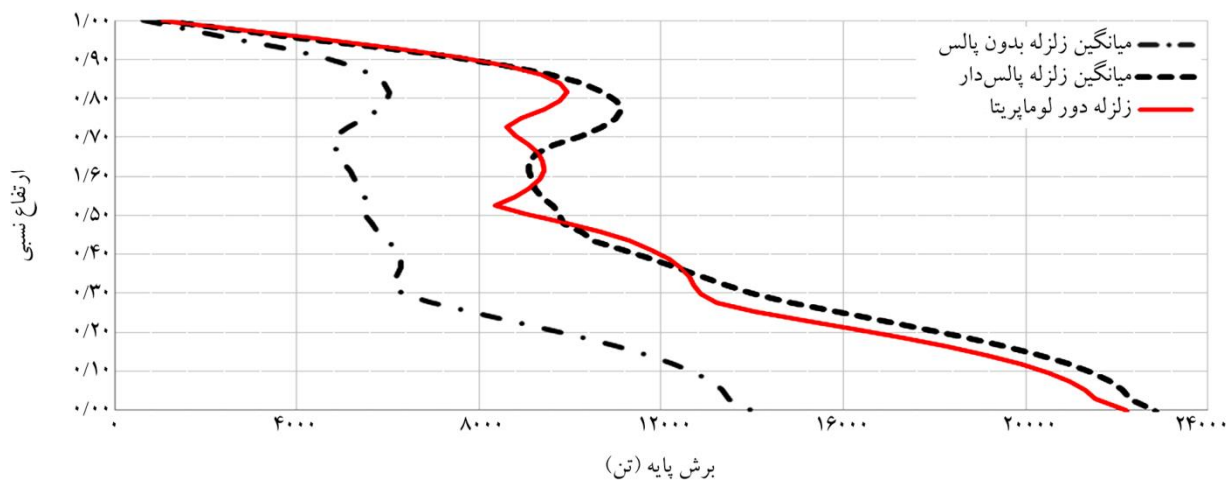
شکل (۱۸): نمودار تغییر مکان نسبی تحت زلزله‌های مورد بررسی در دو حالت پالس دار و بدون پالس.



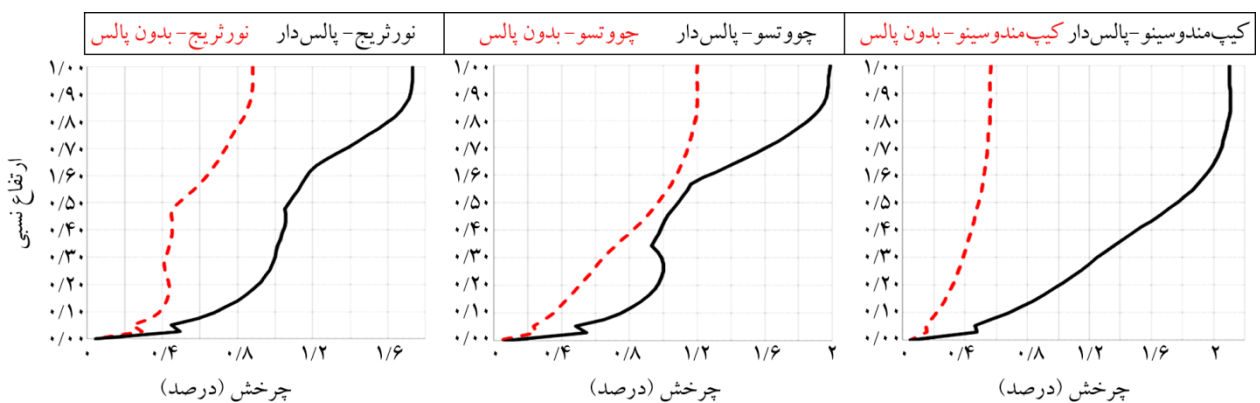
شکل (۱۹): نمودار مقایسه تغییر مکان نسبی برای متوسط زلزله‌های بدون پالس و پالس دار و زلزله لوماپریتا.



شکل (۲۰): نمودار برش طبقات تحت زلزله‌های مورد بررسی در دو حالت پالس دار و بدون پالس.



شکل (۲۱): نمودار مقایسه برش طبقات برای متوسط زلزله‌های بدون پالس و پالس دار و زلزله لوماپریتا.

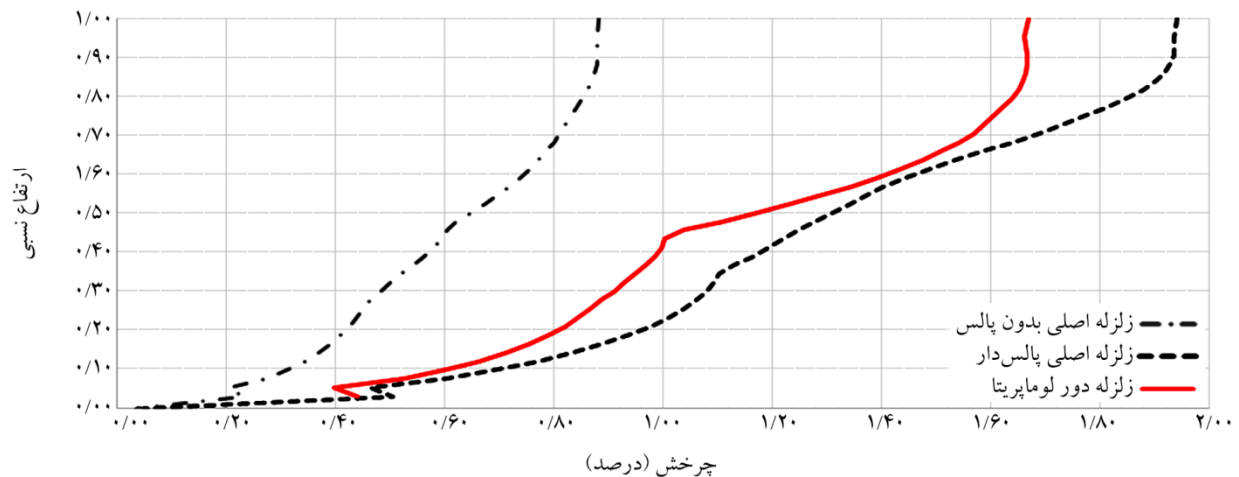


شکل (۲۲): چرخش تیر همبند I-X تحت اثر زلزله مورد بررسی در دو حالت پالس دار و بدون پالس.

همچنین نشان می‌دهد که متوسط برش طبقات در زلزله‌های بدون پالس حدود ۴۰ درصد کمتر از متوسط برش طبقات در زلزله‌های پالس دار است و با خارج کردن اثر پالس متوسط نیروی برش پایه از مقدار ۲۳۰۰۰ تن به ۱۴۰۰۰ تن کاهش می‌یابد.

شکل (۲۲) مقادیر چرخش تیرهای همبند تحت بارهای لرزه‌ای

شکل (۲۱) نشان می‌دهد که متوسط برش طبقات در زلزله‌های پالس دار با مقادیر به دست آمده از تحلیل سازه برای زلزله لوماپریتا تطابق خوبی دارد. می‌توان نتیجه گرفت که زلزله‌های دور از گسل و نزدیک به گسل از لحاظ نیروی لرزه‌ای همسان عمل می‌کنند و اختلاف چندانی در نیروی برش پایه ندارند. این شکل



شکل (۲۳): نمودار مقایسه چرخش تیر همبند X-1 برای متوسط زلزله‌های بدون پالس و پالس دار و زلزله دور از گسل لوماپریتا.

استفاده از الگوریتم بیکر حذف گردیده و مجدداً سازه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که پالس سرعت زلزله‌های نزدیک به گسل به میزان قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای ساختمان اثر می‌گذارد. مقدار تغییر مکان نسبی و چرخش تیرهای همبند با خارج شدن اثر پالس به ترتیب حدود ۵۰ درصد و ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نیروهای ایجاد شده در سازه (برش و لنگر) با خارج کردن اثر پالس حدوداً ۴۰ درصد کاهش می‌یابند. تأثیر قابل ملاحظه پالس سرعت بر پاسخ لرزه‌ای سازه ناشی از انرژی نسبتاً زیاد زلزله‌های دارای پالس در محدوده فرکانسی پالس سرعت می‌باشد. هرچند با توجه به متفاوت بودن محتوای فرکانسی هر یک از رکوردها، نمی‌توان تأثیر پیروی پالس را به‌طور دقیق ارزیابی نمود. از این رو بررسی سازه‌هایی با سیستم باربر جانبی یکسان و پیروی متفاوت (با ارتفاع‌های گوناگون) می‌تواند به‌عنوان روشی جهت ارزیابی اثر پیروی پالس رکوردها مطرح شود.

مراجع

1. Somerville, P.G. (1998) Development of an improved representation of near fault ground motions. *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, 15.
2. Ambraseys, N.N. and Douglas, J. (2003) Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(1), 1-18.

را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که چرخش تیرهای همبند در زلزله‌های بدون پالس به مقدار قابل توجهی کمتر از زلزله‌های پالس دار است. ماکزیمم چرخش در طبقات فوقانی اتفاق می‌افتد که در حالت بدون پالس به میزان ۴۹ درصد برای زلزله نورتریج، ۴۰ درصد برای زلزله چووتسو و ۷۳ درصد برای زلزله کیپ‌مندوسینو کمتر از حالت پالس دار است. در شکل (۲۳) مقادیر متوسط چرخش تیرهای همبند در زلزله‌های پالس دار و بدون پالس با زلزله لوماپریتا مقایسه گردیده است. این شکل نشان می‌دهد که متوسط چرخش تیرهای همبند در زلزله‌های پالس دار ۲ درصد الی ۲۰ درصد بیشتر از مقادیر به دست آمده از تحلیل سازه برای زلزله لوماپریتا است. همچنین متوسط چرخش تیرهای همبند در زلزله‌های بدون پالس حدود ۶۰ درصد کمتر از مقادیر متناظر در زلزله‌های پالس دار است.

۶- جمع‌بندی نتایج

تأثیر حرکات پالس گونه زلزله در ساختمان‌ها به‌خصوص در ساختمان‌های بلند، یک مسئله چالش‌برانگیز در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. در این مقاله رفتار یک ساختمان ۴۲ طبقه بتن مسلح تحت اثر زلزله‌های نزدیک به گسل با انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی بررسی شده است. به‌منظور بررسی اثر پالس سرعت بر رفتار لرزه‌ای ساختمان، ابتدا تحلیل سازه تحت اثر رکوردهای اصلی انجام گرفته و سپس پالس رکوردها با

- Building Code, Falls Church, VA.
13. LATBSDC (2008) *An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region*. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, Los Angeles, CA.
 14. Pacific Earthquake Engineering Research Center (2010) *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings*. College of Engineering, University of California, CA.
 15. ACI Committee 363 (1992) *State-of-the-Art Report in High Strength Concrete*. American Concrete Institute.
 16. ASCE (2006) *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. ASCE/SEI 7-05, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
 17. Baker, J.W. (2007) Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5), 1486-1501.
3. Memarpour, M., Ghodrati Amiri, Gh., Razeghi, H.R., and Akbarzadeh, M. (2016) Characteristics of horizontal and vertical near-field ground motions and investigation of their effects on the dynamic response of bridges. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **4**(2), 10-28.
 4. Krawinkler, H. and Alavi, B. (1998) Development of improved design procedures for near-fault ground motions. *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, **15**.
 5. Hall, F., Heaton, T., Halling, M., and Wald, D.J. (1995) Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, **11**(4), 569-605.
 6. Archila, M. (2014) *Directionality Effects of Pulse-Like Near Field Ground Motions on Seismic Response of Tall Buildings*. Diss. University of British Columbia.
 7. Alavi, B. and Krawinkler, H. (2004) Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(6), 687-706.
 8. Calugaru, V. and Panagiotou, M. (2012) Response of tall cantilever wall buildings to strong pulse type seismic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(9), 1301-1318.
 9. Molina Hutt, C., Almufti, I., Willford, M., and Dierlein, G.G. (2015) Seismic loss and downtime assessment of existing tall steel-framed buildings and strategies for increased resilience. *Journal of Structural Engineering*, **142**(8), 415-425.
 10. Kohrangi, M., Vamvatsikos, D., and Bazzurro, P. (2018) Pulse-like versus non-pulse-like ground motion records: spectral shape comparisons and record selection strategies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **48**(1), 46-64.
 11. Moehle, J., Bozorgnia, Y., Jayaram, N., Jones, P., Rahnama, M., Shome, N., Tuna, Z., Wallace, J., and Zareian, F. (2011) *Case Studies of the Seismic Performance of Tall Buildings Designed by Alternative Means*. Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley PEER Report 5.
 12. International Code Council (2006) International

واژه‌نامه

Directivity Pulse	۱- پالس جهت یافتگی
Strike Slip	۲- گسل‌های امتدادلغز
Dip Slip	۳- گسل‌های شیب‌لغز
Core Wall	۴- دیوار برشی مرکزی
Shell	۵- پوسته‌ای
Rigid Diaphragm	۶- صلبیت کامل
Fast Nonlinear Analysis (FNA)	۷- روش تحلیل غیرخطی سریع
Loma Prieta	۸- لوما پریتا
Matlab	۹- کد متلب

The Effect of Directivity Pulse of Near Fault Earthquakes on Seismic Response of a Tall Building

Soheil Hemati¹, Mohammad Ali Asghari Varzaneh², and Akbar Vasseghi^{3*}

1. Ph.D. Candidate, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES), Tehran, Iran
2. Ph.D. Candidate, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES), Tehran, Iran
3. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: vasseghi@iiees.ac.ir

A special class of ground motions near the fault regions has distinct characteristics that are different from far-field ground motions. One of the critical features of these ground motions is the existence of a velocity pulse in the ground motion record in the direction perpendicular to the fault rupture. These pulse-like ground motions generally occur when the fault rupture propagates towards a site located near the fault. The accumulation of energy in the seismic wave front results in a velocity pulse with a relatively long period in the direction perpendicular to the fault line. This phenomenon could adversely affect the seismic performance of tall buildings with relatively long fundamental periods.

In this paper the effect of velocity pulse on seismic response of a 42-story reinforced concrete building with a central core wall structural system is evaluated. The building has already been studied in the TBI project of the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). The structural model of the building is developed based on the information contained in the PEER report. The model is first verified by conducting a nonlinear response analysis using one of the ground motion records in the PEER report and comparing the results with that report. After verification, the model is subjected to three earthquake records each containing a velocity pulse (i.e., Northridge 1994, Cape Mendocino 1992, and Chuetsu-Oki, Japan 2007). Subsequently, the velocity pulse of each record is removed using a recently proposed wavelet-based signal processing approach and the building is analyzed again to determine the impact of the velocity pulse. The results of the analyses show that the velocity pulse significantly affects the seismic response of the building. By removing the velocity pulse, the lateral drift and rotation of the coupling beams decrease by about 50% and 60%, respectively. Also, the forces in the structure (shear and bending moment) are reduced by about 40%. The dominant effect of the velocity pulse on the seismic response of the building is due to the high energy content in the frequency range of the pulse velocity. However, due to the different frequency content of each record, the effect of the pulse period cannot be accurately assessed. Therefore, the study of buildings with the same lateral bearing system and different natural periods (i.e., different heights) can be considered as a way to evaluate the effect of the pulse period on seismic response of the building.

Keywords: Tall Building; Velocity Pulse; Concrete Core; Response History Analysis.