

بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده پایه تحت اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل

سپیده حاصلی، مهدی پورشاء*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ آذر ۱۳۹۵
بازنگری: ۳۰ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۸ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۱ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

جداسازی پایه
زلزله‌های نزدیک گسل
اثر پرتابی
اثر جهت‌پذیری رو به جلو
تحلیل دینامیکی غیرخطی

چکیده: به علت تاثیر قابل توجه زلزله‌ها بر ساختمان‌های واقع در مناطق نزدیک گسل، در این مطالعه سعی می‌شود که رفتار قاب‌های خمشی فولادی جداسازی شده‌ی پایه تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل با استفاده از تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ۲ قاب خمشی فولادی با ارتفاع متوسط (۹ و ۱۲ طبقه) با استفاده از جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی (LRB)^۱ جداسازی می‌شوند. برای هر سازه سه نوع جداساز با سختی‌های مختلف، شامل جداسازهای سخت (H)، جداسازهای متوسط (N) و جداسازهای نرم (S) در نظر گرفته می‌شود. به منظور انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی از چهار گروه ۷ تایی شتاب‌نگاشت استفاده می‌شود. یک گروه شامل ۷ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل (FF)^۲ بوده و سه گروه دیگر، رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل هستند که نماینده‌ی سه ویژگی مهم این زلزله‌ها شامل جهت‌پذیری رو به جلو (FD)^۳، حرکت پرتابی (FS)^۴، و زلزله‌های نزدیک گسل فاقد پالس^۵ می‌باشند. پاسخ‌های لرزه‌ای مختلف تحت اثر چهار گروه متفاوت زلزله بررسی می‌شود و اثر سختی جداساز و پریود پالس (T_p) زلزله‌های نزدیک گسل روی پاسخ‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر سیستم جداسازی از نوع سخت به نوع متوسط و نرم (افزایش میرایی و زمان تناوب) باعث کاهش نیازهای لرزه‌ای می‌شود. همچنین قاب‌های با جداسازی نوع نرم (S) (میرایی بیشتر) پاسخ تغییرمکان نسبی طبقات مناسب‌تری را به ازای مقادیر مختلف T_p ارائه می‌دهند، اما حساسیت پاسخ قاب‌های جداسازی شده با جداساز نوع سخت (میرایی پایین) به پریود پالس T_p زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر می‌باشد که عملکرد چنین قاب‌هایی را غیرقابل اطمینان می‌کند.

۱- مقدمه

همراه دارد. با پیشرفت دانش فنی و تجربه‌ی زلزله‌های شدید و ضمن تغییر در فلسفه‌ی طراحی سازه‌ها، فناوری‌هایی همچون کنترل لرزه‌ای غیرفعال سازه‌ها به کار گرفته شده است [۱].

از جمله، در جداسازی لرزه‌ای که در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، با کاهش نیاز لرزه‌ای می‌توان پاسخ سازه را در محدوده‌ای ایمن قرار داد. جداساز لرزه‌ای قادر است با دور کردن زمان تناوب سازه از زمان تناوب غالب زمین‌لرزه‌ها، پاسخ سازه را کاهش و در نتیجه خسارت‌های وارد به سازه را به حداقل برساند، زیرا هم شتاب‌های طبقات و هم تغییرمکان جانبی بین طبقه‌ای به میزان چشمگیری کاهش می‌یابند. بنابراین، جداسازی لرزه‌ای یک راه‌حل اقتصادی و عملی برای کاهش آسیب‌های لرزه‌ای در اجزای غیرسازه‌ای است [۲].

از طرف دیگر، در زلزله‌های اخیر تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها در مجاورت گسل‌های مسبب زلزله و آنهایی که در فاصله دورتری از گسل واقع شده‌اند، مشاهده شده است. جنبش زمین در نزدیک گسل دارای خصوصیات ویژه‌ای است که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت می‌باشد [۳]. کاهش فاصله تا گسل فعال علاوه بر اینکه

روش مرسوم طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مبتنی بر افزایش ظرفیت سازه است. در این رویکرد طراحی لرزه‌ای، ایجاد ظرفیت باربری جانبی در سازه، با افزایش مقاومت و تامین شکل‌پذیری صورت می‌گیرد. در نتیجه‌ی اجرای این روش، ابعاد اعضای سازه‌ای و اتصالات، افزایش یافته و در سازه، اعضای مهاربند جانبی همچون مهاربند یا دیوار برشی یا سایر اعضای سخت‌کننده در نظر گرفته می‌شود. افزایش سختی سازه باعث جذب نیروی بیشتر ناشی از زلزله می‌گردد. علاوه بر آن، در روش‌های مرسوم طراحی، به دلیل تغییرشکل‌های غیرخطی در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، امکان بروز خرابی در این اعضا و وقوع آسیب در اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات داخل طبقه به دلیل وقوع تغییرمکان‌های نسبی زیاد طبقه و شتاب‌های قابل توجه کف وجود دارد. بنابراین سازه‌های ساخته شده بر اساس روش‌های مرسوم طراحی و ساخت، در حین وقوع زلزله‌های شدید، مقدار شتاب قابل توجهی را در طبقات تجربه می‌کنند که این امر در نهایت سلب آرامش از ساکنان ساختمان‌های بلند و آسیب در اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات را به

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Poursha@sut.ac.ir

3 Forward Directivity

4 Fling Step

5 No Pulse

1 Lead Rubber Bearing

2 Far Field

پالس گونه نزدیک گسل مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که حتی برای سازه‌های الاستیک، تاثیرات نزدیک گسل با ضرب کردن ضریب برش پایه آیین‌نامه به وسیله یک ضریب نزدیک گسل ثابت به طور موثر در نظر گرفته نمی‌شوند [۷]. Jangid و Kelly (۲۰۰۱) طی یک بررسی تحلیلی روی سازه‌های جداسازی شده نشان دادند که حداکثر تغییرمکان نشیمن عمدتاً ناشی از مولفه‌ی نرمال حرکت‌های نزدیک گسل بوده و سهم مولفه‌ی موازی در تغییرمکان جداساز ناچیز می‌باشد [۸]. Alavi و Krawinkler (۲۰۰۴) در یک بررسی دیگر روی رفتار سازه‌های با سیستم مقاوم خمشی تحت اثر حرکات زمین نزدیک گسل با اعمال پالس‌های معادل بر روی سازه‌ها نشان دادند که سازه‌های با پی‌یود بلندتر از پی‌یود پالس واکنش خیلی متفاوتی نسبت به سازه‌های با پی‌یود کوتاه‌تر نشان می‌دهند. برای سازه‌های با پی‌یود بزرگتر از پی‌یود پالس ($T > T_p$) نیروهای برش طبقه بزرگی در طبقات بالاتر سازه ایجاد می‌شود. برای سازه‌های با پی‌یود کوتاه ($T < T_p$) حداکثر نیازهای شکل‌پذیری طبقه در بخش‌های پایینی اتفاق می‌افتد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که در محدوده‌ی پی‌یود تقریبی $T/T_p > 0.375$ شباهت‌های واضحی بین پاسخ سازه‌های قابی به حرکات زمین نزدیک گسل و پاسخ به تحریکات پالس معادل‌سازی شده وجود دارد. بنابراین مشخصه‌های مهم حرکات زمین نزدیک گسل می‌توانند به وسیله پالس‌های معادل ساده نشان داده شوند [۹]. Krawinkler و همکاران (۲۰۰۵) پاسخ سیستم‌های چند درجه آزادی و یک درجه آزادی را به حرکات زمین در نزدیک گسل مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ضرایب نزدیکی به گسل پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌های کنونی حفاظت مورد انتظار را در سازه‌های نزدیک گسل تامین نکرده و باید اثرات نزدیکی به گسل در تحلیل‌های خطر لرزه ای به طور صریح لحاظ شود تا از قضاوت و پیش‌بینی یک‌سویه در نیازهای لرزه‌ای ایجاد شده تحت اثر حرکات نزدیک گسل جلوگیری به عمل آید [۱۰]. Kalkan و Kunnath (۲۰۰۶) نتایج مشخصه‌های شناخته‌شده‌ی زلزله‌های نزدیک گسل را روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با پای ثابت بررسی کردند [۴]. همچنین، پالس‌های ایده‌آل‌سازی شده را برای دستیابی به شناخت بیشتر از پالس‌های با دامنه‌ی بالا روی نیازهای سازه‌ای، مورد استفاده قرار دادند. به این منظور سه ساختمان ۴، ۶ و ۱۳ طبقه با سیستم قاب خمشی ویژه‌ی فولادی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل با جهت‌پذیری رو به جلو (FD) و اثر پرتابی (FS) قرار گرفتند و برای مقایسه، پاسخ‌های لرزه‌ای تحت زلزله‌های دور از گسل نیز تحلیل شدند. در مجموع، ۲۱ رکورد برای پوشش دادن یک محدوده‌ی محتوای فرکانسی، مدت دوام و دامنه انتخاب شدند. به طور خلاصه این نتیجه حاصل شد که اثر زلزله‌های نزدیک گسل، نسبت به زلزله‌های دور از گسل بزرگتر است. به علاوه، نیازها در سطوح پایین‌تر برای رکوردهای با ویژگی اثر پرتابی، به میزان قابل توجهی نسبت به رکوردهای با جهت‌پذیری رو به جلو بیشتر می‌باشد.

Jangid (۲۰۰۷) پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های چند طبقه جداسازی شده به وسیله نشیمن‌های هسته سربی (LRB) را تحت زلزله‌های نزدیک گسل

حداکثر شتاب رکورد زمین (PGA) را افزایش می‌دهد، خصوصیات فرکانسی حرکت زمین را نیز متاثر می‌سازد. به این صورت که در زمین لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک به علت فاصله‌ی کوتاه بین محل شکست (منبع تولید موج) و محل دریافت آن فرصتی جهت مستهلک شدن فرکانس‌های بالا نمی‌باشد، از این رو، تاریخچه‌ی زمانی شتاب آنها محتوای فرکانسی بالایی دارد. در مجاورت یک سیستم گسل فعال، حرکات زمین به میزان قابل‌ملاحظه‌ای تحت تاثیر مکانیزم گسلش، جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه (جهت رو به جلو) و نیز تغییرشکل استاتیکی محتمل سطح زمین همراه با اثر پرتابی قرار می‌گیرند. زلزله‌شناسان اثر پرتابی و جهت‌پذیری رو به جلو را به عنوان مشخصات اصلی حرکات زمین در حوزه نزدیک گسل شناسایی کرده‌اند. نزدیکی به منبع لرزه‌زا موجب می‌شود که بیشتر انرژی لرزه‌ای حاصل از گسلش در یک تک پالس با پی‌یود بلند وارد گردد (یادآوری می‌شود که رکوردهای با جهت رو به عقب^۲ معمولاً حرکت‌های پالس‌گونه ایجاد نمی‌کنند). چنین مشخصه‌ی متمایز پالس‌گونه‌ای، به طور کلی در شروع منحنی‌های ترسیم شده به وسیله زلزله‌نگار به وجود می‌آید و این پالس‌های قوی به ویژه در رکوردهای جابه‌جایی و سرعت در امتداد عمود بر گسل این زلزله‌ها به وضوح قابل مشاهده است و اثرات آنها تمایل به افزایش بخش پی‌یود بلند طیف پاسخ شتاب دارد. این نوع از حرکات زمین ممکن است نیازهای بالایی را تولید کنند که سازه‌ها را با انحراف‌های تغییرمکانی بزرگ به دفع این انرژی وامی‌دارد. در نتیجه، خطر شکست ترد برای سیستم‌های با جزئیات ضعیف به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد [۴]. پی‌یود اصلی یک ساختمان با ارتفاع متعارف، معمولاً در محدوده‌ی پی‌یود غالب زلزله است. این منجر به وقوع پدیده‌ی تشدید می‌شود و به این ترتیب، انتظار می‌رود که نیروهای داخلی قابل‌توجه، در اعضای سازه بوجود آید. این مساله می‌تواند با استفاده از سیستم جداسازی پایه در تراز پی ساختمان‌ها جلوگیری شود. اما حرکات شدید زمین در نزدیک گسل که با دامنه‌ی بزرگ، پی‌یود بلند و تحریکات پالس‌گونه مشخص می‌شوند، تمایل به ایجاد جابه‌جایی‌های بزرگ در جداساز دارند. این قابلیت تغییرمکانی در جداسازها، نیاز به این دارد که اندازه‌ی آنها قابل‌توجه باشد [۵].

اخیراً تحقیقات متعددی در خصوص اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر روی ساختمان‌های جداسازی شده انجام شده است. Hall و همکاران (۱۹۹۵) تئوری انتشار موج را برای مطالعه پاسخ یک ساختمان برشی پیوسته به حرکات زمین پالس‌گونه به کار بردند. آنها در مورد تاثیر مخرب حرکات زمین نزدیک گسل و نامناسب بودن ملاحظات آیین‌نامه‌های آن زمان برای در نظر گرفتن این تاثیرات در طراحی، هشدار دادند [۶]. Iwan (۱۹۹۷) یک ساختمان برشی الاستیک را برای به دست آوردن "طیف دیررفت" (حداکثر دیررفت طبقات ترسیم شده در مقابل پی‌یود سازه) به عنوان یک مقدار نیاز لرزه‌ای برای سازه‌های چند درجه آزادی (MDOF)^۳ تحت اثر زلزله‌های

- 1 Peak Ground Acceleration
- 2 Backward Directivity
- 3 Multiple Degrees of Freedom

جابجایی پایه کاهش پیدا می‌کند، اما شتاب طبقات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت میرایی، جابجایی نسبی طبقات تحت زلزله‌های دور از گسل کاهش و تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک افزایش می‌یابد [۳].

با توجه به گسترش روزافزون سیستم‌های جداسازی پایه و تاثیر نگران‌کننده‌ی زلزله‌ها بر ساختمان‌های واقع در حوزه‌ی نزدیک گسل، در این تحقیق سعی بر آنست که جداسازی پایه‌ی ساختمان‌ها به عنوان یک راه‌حل برای حفاظت آنها در برابر این گونه زلزله‌ها ارائه شده و رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده پایه با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، در این مطالعه به منظور بررسی عملکرد سطوح مختلف از سختی و میرایی سیستم جداسازی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک، سیستم‌های جداسازی در سه سطح سخت (H)، متوسط (N) و نرم (S) مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین منظور، ۲ سازه‌ی قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط با ارتفاع متوسط (۹ و ۱۲ طبقه) در نظر گرفته شده و با استفاده از سیستم جداسازی پایه جداسازی می‌شوند و تحت مجموعه‌های مختلف از رکورد زلزله‌های نزدیک و دور از گسل قرار می‌گیرند. در ادامه، رفتار این قاب‌ها در سه سطح سختی جداسازها بررسی می‌شود و تاثیر مشخصات و ویژگی‌های منحصر به فرد رکوردهای نزدیک گسل روی عملکرد سازه‌های جداسازی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر پریود پالس رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس روی قاب‌های مورد نظر، تغییرات پاسخ سازه با تغییرات پریود پالس رکوردهای نزدیک گسل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، اهداف مطالعه‌ی حاضر عبارتند از:

- بررسی اثر زلزله‌های نزدیک گسل با ویژگی‌های جهت‌پذیری رو به جلو، اثر پرتابی و بدون پالس و همچنین زلزله‌های حوزه دور بر سازه‌های جداسازی شده پایه با ارتفاع متوسط (قاب‌های ۹ و ۱۲ طبقه) و مقایسه تاثیر این دسته رکوردها با یکدیگر. شایان ذکر است که تا آنجائیکه نویسندگان این مقاله اطلاع دارند، اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک با اثر پرتابی و بدون پالس در مطالعات قبلی برای ساختمان‌های جداسازی شده مورد توجه قرار نگرفته است.

- بررسی اثر سختی جداساز بر پاسخ‌های لرزه‌ای تحت اثر انواع مختلف زلزله‌های نزدیک گسل

- بررسی روند تغییرات پاسخ سازه‌های جداسازی شده در سه سطح سختی با توجه به تغییرات پریود پالس رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس (با اثر جهت‌پذیری رو به جلو و پرتابی)

۲- مدل‌های سیستم روسازه

در این تحقیق از ۲ قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط ۹ و ۱۲ طبقه استفاده شده‌است. سازه‌های با پای ثابت با استفاده از الزامات آیین‌نامه‌های ASCE7-10 [۱۴] و AISC341-10 [۱۵] طراحی شدند. برای هر مدل سازه‌ای سه نوع جداساز با سختی‌های متفاوت برای سه سطح

مورد بررسی قرار داد. پاسخ ساختمان جداسازی شده در مقابل پارامترهای مختلف سیستم مانند انعطاف‌پذیری روسازه، پریود جداسازی و مقاومت تسلیم نشیمن مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، مقاومت تسلیم بهینه‌ی LRB از پارامترهای مختلف سیستم تحت تحریکات نزدیک گسل استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که LRB با مشخصات مناسب برای جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها تحت تحریکات نزدیک گسل کاملاً موثر است. همچنین LRB با جابجایی تسلیم بالاتر (یعنی نشیمن‌های نرمتر) نسبت به نشیمن با جابجایی تسلیم پایین تحت تحریکات نزدیک گسل بهتر عمل می‌کند. همچنین مقاومت تسلیم بهینه‌ی LRB مبتنی بر معیار حداقل‌سازی شتاب مطلق طبقه‌ی بالایی و جابجایی نشیمن در محدوده‌ی ۱۵-۱۰ درصد وزن کل ساختمان تحت تحریکات نزدیک گسل می‌باشد [۱۱]. Berton و همکاران (۲۰۰۸) یک مطالعه پارامتریک روی اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل بر روی پاسخ سازه‌های جداسازی شده‌ی پایه انجام دادند. آنها سیستم جداسازی شده را به صورت یک جرم متمرکز تعبیه شده بر روی یک نشیمن جداساز منفرد مدل‌سازی کردند و مجموعه‌ای از تحلیل‌های تاریخچه زمانی را با استفاده از دو جفت شتاب ورودی زمین ثبت شده در زلزله Chi Chi (۱۹۹۹ تایوان) انجام دادند. سه پارامتر مستقل استفاده شده در این مطالعه برای مشخص کردن پاسخ دوخطی جداساز، نیروی تسلیم یک جهته، تغییرمکان تسلیم و پریود پس از تسلیم بودند. نتایج این مطالعه نشان داد که حرکات زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل با نیازهای تغییرشکلی بزرگ در جداساز همراه هستند. به علاوه از بین ۳ پارامتری که خصوصیات مدل جداسازی شده را معرفی می‌کنند، مقاومت جداساز یا به طور معادل نیروی تسلیم، پارامتر کلیدی برای کاهش تغییرشکل‌های جداسازی است که در معرض حرکات زمین نزدیک گسل قرار می‌گیرد [۱۲]. Providakis (۲۰۰۸) اثر سیستم جداسازی پایه در عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های مرکب فولادی-بتنی را به‌وسیله تحلیل بارافزون مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که کاربرد سیستم‌های جداسازی پایه در کاهش برش پایه‌ی ساختمان تحت تحریکات زلزله نزدیک گسل موثر بوده، ولی تغییرمکان نسبی طبقه‌ی اول را افزایش می‌دهد [۵]. Hoseini Vaez و همکاران (۲۰۱۴)، اثر پالس‌های معادل زلزله‌های نزدیک گسل را روی سازه‌های بتن مسلح جداسازی شده پایه مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که تاثیر پالس علی‌رغم مدت زمان کوتاهش در مقایسه با رکورد کامل حرکت زمین بیشتر است. همچنین پاسخ جابجایی پایه مدل‌های جداسازی شده پایه تحت پالس‌های معادل سازی شده اغلب با پاسخ جابجایی پایه تحت رکوردهای کامل متناظر حرکت‌های زمین نزدیک گسل انطباق پیدا می‌کند [۱۳]. Fathi و همکاران (۲۰۱۵) اثر میرایی الحاقی را روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های جداسازی شده پایه تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که تغییر مقادیر میرایی الحاقی می‌تواند در بهبود رفتار سازه‌ها تحت زلزله‌های نزدیک گسل موثر واقع شود. آنها به این نتیجه رسیدند که به طور کل تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و حوزه‌ی دور، با افزایش نسبت میرایی،

گرفته شده (MCER) به ترتیب برای پرپود ۱ ثانیه و برای پرپوده‌های کوتاه می‌باشند. با استفاده از جدول ۱-۴-۱۱ و ۲-۴-۱۱ آیین‌نامه لرزه‌ای ASCE7-10 ضرایب سایت به صورت زیر خواهد بود:

$$F_a = 1, F_v = 1.5 \quad (2)$$

که F_a ضریب ساختگاه در زمان‌های تناوب کوتاه (در زمان تناوب ۰٫۲ ثانیه) و F_v ضریب ساختگاه در زمان‌های تناوب بلند (در زمان تناوب ۱ ثانیه) می‌باشند. در نتیجه پارامترهای شتاب طیفی طرح به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_s = 1g \quad (3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1 = 0.579g \quad (4)$$

که S_{D1} و S_{DS} پارامترهای شتاب پاسخ طیف طرح با میرایی ۵ درصد به ترتیب در پرپوده‌های کوتاه و در پرپود ۱ ثانیه می‌باشند. طبق جدول ۱-۲-۱۲ آیین‌نامه ASCE7-10، ضریب رفتار سازه با قاب خمشی فولادی متوسط برابر با ۴/۵ و طبق جدول ۱-۵-۱ و ۲-۵-۱ ضریب اهمیت برابر با یک در نظر گرفته شد. مطابق الزامات بندهای ۶-۸-۱۲ و ۱-۱۲-۱۲ و ۱-۱۲-۱۲ و ۱-۱۲-۱۲ آیین‌نامه، تغییرمکان نسبی مجاز بین طبقه‌ای برابر با ۱/۲۳ درصد به دست آمد. ترکیبات بار طراحی طبق بند ۳-۳ و ۲-۳-۱۲ آیین‌نامه برای حالت طراحی به روش مقاومت به صورت زیر انتخاب شدند:

$$1.4D$$

$$1.2D + 1.6L$$

$$(1.2 + 0.2S_{DS})D + \rho Q_E + L$$

$$(1.2 + 0.2S_{DS})D - \rho Q_E + L$$

$$(0.9 - 0.2S_{DS})D + \rho Q_E$$

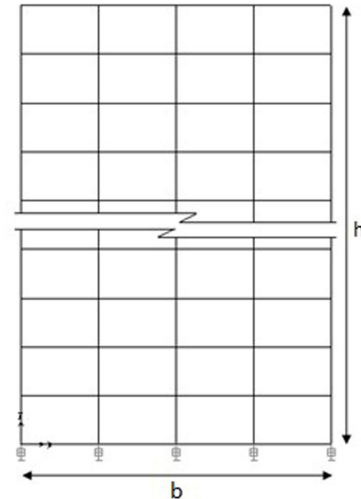
$$(0.9 - 0.2S_{DS})D - \rho Q_E$$

که D بار مرده، L بار زنده و بار جانبی زلزله است. ρ ضریب افزایش بوده و برای سازه‌های اختصاص یافته در گروه طرح لرزه‌ای D برابر با ۱/۳ می‌باشد. مشخصات اصلی سازه‌های طراحی شده با پای ثابت و زمان تناوب سه‌مورد ارتعاشی اول آنها در جدول ۱ ارائه شده است. مقاطع تیرها و ستون‌ها به ترتیب از نوع تیرورق و قوطی می‌باشد که مشخصات این مقاطع برای قاب ۹ طبقه در پیوست مقاله ارائه شده است.

۴- مدل‌های سیستم جداسازی

یکی از رایج‌ترین نوع نشیمن‌ها، نشیمن لاستیکی با هسته سربی (LRB) می‌باشد که برای جداسازی پایه سازه‌های قابی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. مفهوم جداسازی پایه با قرارگیری نشیمن‌ها

حفاظتی مختلف طراحی و در نظر گرفته شد. سپس این سازه‌ها با قرار دادن جداسازها در پای هر ستون، در پایه جداسازی شدند. شکل ۱ پیکربندی این قاب‌ها را نشان می‌دهد. هر قاب دارای چهار دهانه و عرض کل ۲۰ متر بوده که طول هر دهانه برابر با ۵ متر می‌باشد. ارتفاع تمامی طبقات نیز ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: پیکربندی قاب‌های استفاده شده

Fig. 1. Configuration of the frames used

۳- تحلیل و طراحی سیستم روسازه

برای انجام طراحی روسازه از آیین‌نامه لرزه‌ای ASCE7-10 [۱۴] و آیین‌نامه طراحی AISC341-10 [۱۵] استفاده شده است. بار مرده و بار زنده تمامی طبقات به ترتیب برابر با ۶۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع فرض شده است. عرض بارگیر قاب‌ها ۵ متر و جرم لرزه‌ای طبقات برابر با بار مرده بعلاوه ۲۰ درصد بار زنده در نظر گرفته شد. فولاد مصرفی از نوع St37 با مشخصات مدول الاستیسیته 10^6 kg/cm^2 و $2/1^*$ ضریب پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم 2400 kg/cm^2 می‌باشد. برای تحلیل مدل‌ها از روش تحلیل طیفی (RSA) و برای طراحی مدل‌ها از روش حالت حدی (LRFD) استفاده شده است. به منظور بارگذاری لرزه‌ای، منطقه‌ای نزدیک به گسل فعال (فاصله تا گسل کمتر از ۱۵ کیلومتر) با مشخصات زیر از روی نقشه‌های شتاب طیفی ASCE7-10 [۱۴] انتخاب شد:

نوع زمین: خاک سخت (Site Class D)

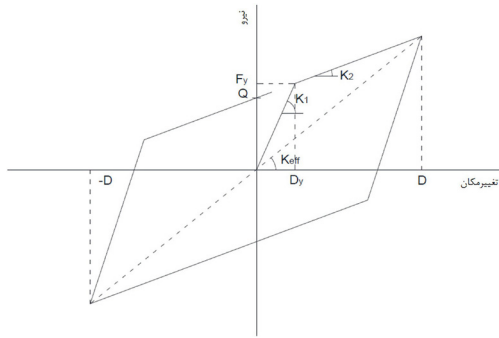
مقادیر شتاب طیفی ماکزیمم:

$$S_S = 1.5g, S_1 = 0.579g \quad (1)$$

که S_1 و S_2 پارامترهای شتاب پاسخ طیفی حداکثر زلزله‌ی در نظر

1 Response Spectrum Analysis

2 Load and Resistant Factor Design



شکل ۲: رفتار دوخطی جداسازها [۱۷]

Fig. 2. Bilinear behavior of isolators [17]

۵- طراحی جداسازها

روند طراحی جداسازهای نوع متوسط (N) در گام‌های زیر خلاصه

می‌شود:

$$1- \text{ فرض نسبت } K_1/K_2$$

۲- تخمین مناسب از سختی مؤثر (K_{eff})، مقاومت مشخصه (Q) و

تغییرمکان طرح (D_D) برای جداساز

در این مرحله می‌توان مقدار اولیه برای مقاومت مشخصه، Q، را با

فرض یک سطح میرایی مطلوب، β_{eff} ، و صرف نظر از مقدار D_y از رابطه

زیر تخمین زد:

$$Q = \frac{\pi}{2} k_{eff} D_D \beta_{eff} \quad (5)$$

۳- محاسبه پارامترهای D_y ، k_2 ، β_{eff} و F_y با استفاده از روابط زیر:

$$D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2} \quad (6)$$

$$k_2 = k_{eff} - \frac{Q}{D_D} \quad (7)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D_D - D_y)}{\pi k_{eff} D_D^2} \quad (8)$$

$$F_y = K_1 D_y \quad (9)$$

۴- محاسبه تغییرمکان طرح با استفاده از رابطه زیر:

$$D_D = \frac{g S_{D1} T_D}{4 \pi^2 B_D} \quad (10)$$

۵- اصلاح مقدار Q با استفاده از زیر و مقادیر حاصل از روابط فوق:

$$Q = \frac{\pi}{2(D_D - D_y)} k_{eff} D_D^2 \beta_{eff} \quad (10)$$

۶- تکرار گام‌های ۳ تا ۵ بر اساس پارامترهای به دست آمده با فرض

K_{eff} ثابت تا وقتی که تغییرمکان طرح به یک مقدار مشخص همگرا

در پای هر ستون برآورده شده است. جرم لرزه‌ای در تراز فونداسیون برابر با جرم لرزه‌ای سایر طبقات در نظر گرفته شده است (جدول ۱). برای هر مدل سازه‌ای از سه نوع جداساز مختلف، شامل جداساز سخت (H)، متوسط (N) و نرم (S) استفاده شده است. جداسازها طوری طراحی شده‌اند که محدوده وسیعی از زمان تناوب سیستم جداسازی را پوشش دهند. سختی جداسازها برای سه سطح حفاظتی مختلف زیر انتخاب شده‌اند [۱۶].

۱. جداسازهای سخت که نمی‌توانند روسازه را به اندازه کافی محافظت کنند و برای شدیدترین رکورد زلزله‌ی موجود سازه را تا آستانه فرو ریزش محدود می‌کنند.

۲. جداسازهای متوسط که برای ترکیبات بار طراحی ذکر شده، روسازه را دقیقاً در محدوده خطی نگه می‌دارند و ماکزیمم ضریب شکل‌پذیری دورانی تیرها و ستون‌ها را به کوچک‌تر از ۱ یا برابر آن محدود می‌کنند.

۳. جداسازهای نرم که برای شدت‌های مختلف، روسازه را حتی الامکان در محدوده‌ی الاستیک نگه می‌دارند.

جدول ۱: مشخصات سازه‌های طراحی شده با پای ثابت و زمان تناوب سه مود اول ارتعاشی آنها

Table 1. Characteristics of the designed fixed-base structures and the periods of the first three modes

تعداد طبقات	h (m)	b (m)	جرم لرزه ای طبقات $kg.s^2/m$	زمان تناوب		
				$T_1(s)$	$T_2(s)$	$T_3(s)$
۹	۲۸/۸	۲۰	۷۰۳۶	۱/۶۸۰	۰/۶۵۳	۰/۳۸۷
۱۲	۳۸/۴	۲۰	۷۰۳۶	۲/۱۵۸	۰/۸۲۴	۰/۴۹۵

برای سطح حفاظتی ۲، سختی افقی جداسازها با دقت به وسیله تحلیل الاستیک با استفاده از طیف پاسخ ASCE7-10 برای سطح زلزله طرح، خاک گروه D و با فرض ضریب رفتار $R_1=1$ طراحی شد. دو سطح حفاظتی دیگر به طور مصنوعی با افزایش و کاهش قابل توجه سختی جداساز، بدون تغییر در مشخصه‌های اصلی جداساز (K_1/K_2 ، Q)، به دست آمد که در آن K_1 سختی الاستیک، K_2 سختی پس از تسلیم و Q مقاومت مشخصه جداساز می‌باشد. برای جداسازهای نوع سخت (H)، سختی جداسازها طوری در نظر گرفته شدند که برای قویترین رکورد زلزله، روسازه به آستانه فروریزش برسد. برای جداسازهای نوع نرم (S) نیز، سختی جداسازها طوری در نظر گرفته شدند که برای قویترین رکورد زلزله، روسازه اساساً در محدوده‌ی الاستیک باقی بماند [۱۶]. لازم به ذکر است که رفتار جداسازها برای تحلیل‌های الاستیک به صورت خطی و برای تحلیل‌های غیرالاستیک به صورت دوخطی مطابق شکل ۲ مدل‌سازی شدند. در بخش بعدی، نحوه طراحی سیستم جداسازی توضیح داده می‌شود.

۶- مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده

به منظور انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی از ۴ گروه ۷ تایی شتاب‌نگاشت استفاده شد. گروه اول شامل ۷ رکورد زلزله‌ی دور از گسل می‌باشد که فاصله‌ی آنها تا نزدیک‌ترین گسل بیش از ۲۰ کیلومتر است. ۳ گروه دیگر، رکوردهای نزدیک گسل با حداکثر فاصله‌ی ۱۵ کیلومتر تا گسل می‌باشند که نماینده‌ی ۳ ویژگی مهم رکوردهای نزدیک گسل هستند. یک گروه هفت‌تایی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل با مشخصه‌ی جهت‌پذیری روبه‌جلو^۱، یک گروه ۷ تایی با مشخصه‌ی حرکت پرتابی^۲، و گروه ۷ تایی دیگر، زلزله‌های نزدیک گسل فاقد پالس متمایز هستند. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که رکوردهای انتخابی منطبق بر خاک گروه D آیین‌نامه ASCE7-10 می‌باشند. رکورد این زلزله‌ها از پایگاه PEER [۱۸] انتخاب شدند.

برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها، کلیه رکودها با روش مقیاس SI_p [۱۹] نسبت به طیف طرح برای ساختمان‌های ۹ و ۱۲ طبقه مقیاس شدند. در این روش ابتدا مساحت زیر نمودار طیف پاسخ هر رکورد در بازه‌ی پریودهای مورد نظر محاسبه می‌شود. سپس حرکت‌های زمین طوری مقیاس می‌شوند که این مساحت برابر با مساحت زیر نمودار طیف طرح هدف بین همان دو پریود باشد. این روش نسبت به روش مقیاس آیین‌نامه ASCE7-10 ضرایب کوچکتری را برای هر رکورد به دست می‌دهد [۱۹]. در واقع ضرایب به دست آمده با استفاده از روش مقیاس ASCE7-10 محافظه‌کارانه می‌باشد. در این مطالعه بازه‌ی پریود ۴/۵-۰ و ۵/۵-۰ ثانیه به ترتیب برای سازه‌های ۹ و ۱۲ در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب پریود ۰ ثانیه این اطمینان را می‌دهد که پریودهای کوتاه که روی پاسخ سازه تاثیر دارند (اثر موده‌های ارتعاشی بالاتر)، در نظر گرفته می‌شوند. حد بالای پریودها هم طوری انتخاب شد که حداقل تا ۱/۲۵ برابر T_M حدودی فرض شده برای جداسازهای سطح نرم را در هر یک از قاب‌ها پوشش دهد که T_M پریود موثر سازه‌ی جداسازی شده در تغییرمکان حداکثر، در جهت مورد بررسی است.

جدول ۳: مشخصات جداسازهای طراحی شده

Table 3. Characteristics of the designed isolators

سازه	نوع جداساز	K_{eff} (kg/m)	β_{eff} (%)	T_{eff} (s)	K_1 (kg/m)	F_y (kg)	K_1/K_2	D_D (m)
۹ طبقه	H	۱۵۰۰۰۰	۱۶/۰۸	۱/۹۲۴	۱۱۰۵۴۰۰	۸۶۱۲	۱۰	۰/۱۹۶۴
	N	۸۹۰۰۰	۲۳/۱۴	۲/۴۹۸	۵۴۱۶۹۰	۸۶۱۲	۱۰	۰/۲۲۲۵
	S	۴۴۰۰۰	۳۲/۸۰	۳/۵۵۳	۱۵۵۲۸۰	۸۶۱۲	۱۰	۰/۲۷۲۲
۱۲ طبقه	H	۱۳۱۰۰۰	۱۶/۹۵	۳/۳۴۸	۱۱۳۸۳۳۲	۹۲۸۲	۱۲	۰/۲۳۵۲
	N	۷۴۳۰۰	۲۵/۳۹	۳/۱۱۸	۵۱۰۰۱۲	۹۲۸۲	۱۲	۰/۲۶۷۳
	S	۳۹۰۰۰	۳۴/۹۴	۴/۳۰۳	۱۴۹۱۴۸	۹۲۸۲	۱۲	۰/۳۱۹۹

1 Directivity Forward

2 Fling-Step

شود.

۷- تحلیل مدل‌ها به‌وسیله تحلیل الاستیک با استفاده از طیف پاسخ ASCE7-10 با فرض ضریب رفتار $R = 1$ و کنترل حداکثر ضریب شکل‌پذیری دورانی تیرها و ستون‌ها برای ترکیبات بار طراحی.

۸- اگر حداکثر ضریب شکل‌پذیری دورانی تیرها و ستون‌ها برای ترکیبات بار طراحی کوچک‌تر از ۱ یا برابر با آن نباشد، گام‌های ۲ تا ۷ با فرض سختی مؤثر جدید تکرار می‌شوند تا وقتی که حداکثر ضریب شکل‌پذیری دورانی تیرها و ستون‌ها برای ترکیبات بار طراحی به کوچک‌تر از ۱ یا برابر با آن ($\mu \leq 1$) محدود شود.

زمان تناوب سه مود ارتعاشی اول سازه‌های جداسازی شده پایه در جدول ۲ آمده است. مشخصات جداسازهای طراحی شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

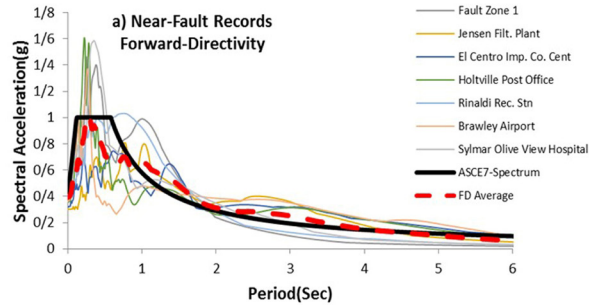
جدول ۲: زمان تناوب سه مود ارتعاشی اول سازه‌های جداسازی شده

Table 2. The periods of the first three modes of the base-isolated structures

سازه	نوع سیستم جداسازی	زمان تناوب		
		T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)
۹ طبقه	H	۲/۴۴۵	۰/۸۸۶	۰/۴۹۷
	N	۲/۹۰۱	۰/۹۳۵	۰/۵۰۸
	S	۲/۸۳۴	۰/۹۸	۰/۵۱۶
۱۲ طبقه	H	۳/۰۵۲	۱/۱۱۵	۰/۶۲۸
	N	۳/۶۵۲	۱/۱۸۷	۰/۶۴۲
	S	۴/۶۸۹	۱/۲۴۴	۰/۶۵۰

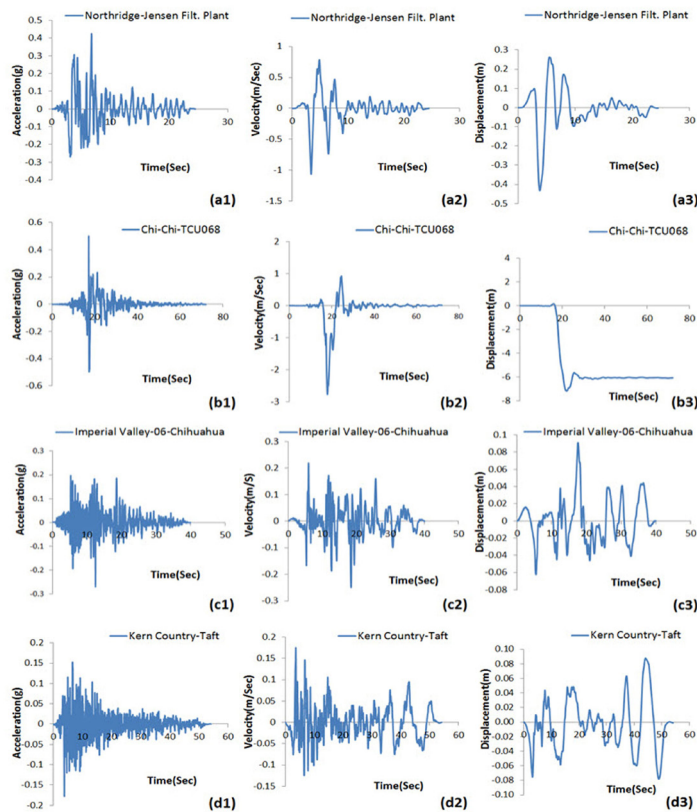
۱۰، در بازه‌ی پریودی ۴/۵-۰ ثانیه، یک ضریب مقیاس منحصر به فرد به دست می‌آید. همچنین در این شکل، طیف پاسخ میانگین ۷ رکورد مقیاس شده با اثر FD نیز ترسیم شده است که انطباقی قابل قبولی را با طیف طرح هدف نشان می‌دهد.

در شکل ۳ رکوردهای نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری رو به جلو که با استفاده از روش یاد شده مقیاس شده‌اند، برای قاب ۹ طبقه، به طور نمونه ترسیم شده‌اند. در این شکل برای هر رکورد با توجه به نسبت مساحت زیر نمودار طیف پاسخ آن رکورد به مساحت زیر نمودار طیف طرح ASCE7-



شکل ۳: طیف طرح ASCE7، طیف‌های پاسخ شبه شتاب و طیف پاسخ میانگین زلزله‌های مقیاس شده‌ی نزدیک گسل با ویژگی FD، برای سازه‌ی جداسازی شده‌ی ۹ طبقه

Fig. 3. Design spectrum of ASCE7, pseudo-acceleration and the mean response spectra of the scaled near-field earthquakes with the effect of forward-directivity for the 9-story base-isolated structure



شکل ۴: تاریخچه‌های شتاب، سرعت و تغییر مکان زلزله‌های: الف) نزدیک گسل با ویژگی جهت‌پذیری رو به جلو (زلزله‌ی Northridge)، ب) نزدیک گسل با ویژگی اثر پرتابی (زلزله‌ی Chi-Chi)، ج) نزدیک گسل بدون حضور پالس متمایز (زلزله‌ی Imperial-Valley) و د) دور از گسل (زلزله‌ی Kern Country)

Fig. 4. Acceleration, velocity and displacement time-histories of: a) near-field earthquake with forward-directivity (Northridge); b) near-field earthquake with fling-step (Chi-Chi); c) non-pulse near-field earthquake (Imperial valley); and d) far-field earthquake (Kern Country)

با زمان تناوب در این محدوده دارد و منجر به جابه‌جایی قابل توجهی در جداگرها می‌شود [۲۱]. اما با بررسی نسبت PGD /PGV ملاحظه می‌شود که به دلیل وجود تغییرمکان ماندگار نسبتاً زیاد در تاریخچه‌ی تغییرمکان زلزله‌های با اثر پرتابی (FS) و افزایش قابل توجه PGD نسبت به سایر گروه رکوردها، این نسبت در این دسته از زلزله‌های نزدیک گسل مقادیر بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد و مقدار این نسبت به بیشتر از ۲ و حتی ۳ می‌رسد. می‌توان گفت که در سایر گروه‌ها این نسبت دارای مقادیر تقریباً نزدیکی است و حداکثر به ۰/۶۴ برای زلزله‌های انتخابی رسیده است. در زلزله‌های نزدیک گسل FD به دلیل افزایش میزان PGV نسبت به رکوردهای نزدیک گسل بدون پالس و دور از گسل، انتظار می‌رود که نسبت PGD /PGV کاهش یابد، اما با نگاهی به پالس با دامنه‌ی بلند موجود در تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان رکوردهای FD می‌توان چنین استدلال کرد که میزان PGD نیز افزایش یافته و این نسبت برای سه دسته رکوردهای زلزله تقریباً در حدود یکسانی واقع می‌شود.

شکل ۵ نمودار سه جانبه شبه شتاب، شبه سرعت و جابه‌جایی (ترکیبی A-V-D) را برای چهار رکورد Northridge-Jensen Filt. Plant (FD)، Chi-Chi-TCU068 (FS)، Imperial Valley-Chihuahua (No Pulse) و Kern Country-Taft (FF) نشان می‌دهد. مطابق شکل، در قسمت شتاب ثابت (پریود ۰-۰/۵ ثانیه)، منحنی رکوردهای نزدیک گسل نسبت به منحنی رکوردهای دور از گسل مقادیر سرعت بیشتری را نشان می‌دهد، ولی در مقایسه با قسمت سرعت ثابت نمودار (پریود ۰/۵-۳ ثانیه) این اختلاف کمتر است (لازم به ذکر است که پریودهای مرزی برای هر رکوردهای متفاوتی دارد و مقادیر ذکر شده در این قسمت تقریبی است). به علت حضور پالس با اوج بالا، در تاریخچه‌ی سرعت رکوردهای زلزله‌های FD و FS، در بخش سرعت ثابت، تفاوت قابل توجهی بین منحنی این رکوردها با منحنی رکوردهای بدون پالس وجود دارد که در شکل هم به وضوح قابل ملاحظه است. در این قسمت، مقادیر منحنی FD تقریباً با منحنی FS مشابه است و منحنی رکوردهای دور از گسل پایین‌تر از سایر منحنی‌ها واقع می‌شود. در قسمت تغییرمکان ثابت (پریودهای بزرگتر از ۳ ثانیه) یک افزایش بسیار قابل توجه در منحنی مربوط به رکوردهای FS مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تغییرمکان ماندگار زیاد در این رکوردها است. پس از آن، رکوردهای اثر FD، به علت حضور پالس تغییرمکان مقادیر بیشتری را نسبت به رکوردهای بدون پالس در این ناحیه به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به توضیحات فوق و با توجه به این که پریود مود اصلی سازه‌های جداسازی شده در ناحیه سرعت ثابت یا تغییرمکان ثابت قرار می‌گیرد، اثر مهم رکوردهای زلزله‌های با ویژگی‌های جهت‌پذیری رو به جلو (FD) و اثر پرتابی (FS) روی سازه‌های جداسازی شده، در مقایسه با سایر گروه زلزله‌ها روشن می‌گردد که در قسمت‌های بعد این امر به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل ۴ تاریخچه‌ی زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی برای یکی از رکوردهای هر دسته به طور نمونه که با استفاده از برنامه‌ی SeismoSignal-v4.3.0 [۲۰] به دست آمده‌اند، نشان داده شده است. اکثر این رکوردها محتوی انرژی زیادی در پریودهای بلند هستند [۲۱]. مشخصه‌ی رکوردها در حوزه‌ی نزدیک یعنی وجود یک پالس پریود بلند با سرعت زیاد در این رکوردها مشهود است. برای رکوردهای زلزله‌ی Chi-Chi (TCU068) وجود این پالس حتی در رکورد شتاب نیز مشخص می‌باشد. مطابق شکل ۴ پالس دو طرفه با سرعت بالا برای رکوردهای زلزله‌ی Northridge (Jensen Filt. Plant) و پالس یک طرفه‌ی سرعت برای رکوردهای زلزله‌ی Chi-Chi (TCU068) کاملاً مشهود است که این زلزله‌ها به ترتیب از نوع زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک با ویژگی جهت‌پذیری رو به جلو (FD) و اثر پرتابی (FS) می‌باشند. چنین پالس‌هایی در رکوردهای معمولی دور از گسل (FF) مثل رکوردهای زلزله‌ی Kern Country در ایستگاه Taft دیده نمی‌شود. رکوردهای زلزله‌ی Chi-Chi یک تغییرشکل تکتونیک ماندگار را در انتهای تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان نشان می‌دهد که این یک مشخصه‌ی معمول اثر پرتابی است [۲۲]. رکوردهای Imperial-Valley در ایستگاه Chihuahua هم یک رکوردهای نزدیک گسل است که فاقد پالس ورودی است و در مراحل بعدی تاثیر این رکوردها نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در جدول ۴ نسبت PGV /PGA و PGD /PGV برای هر یک از رکوردهای مربوط به چهار مجموعه زلزله مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است که PGV، PGA و PGD به ترتیب شتاب، سرعت و جابه‌جایی حداکثر زمین می‌باشند.

با توجه به مرجع [۲۳] نسبت‌های PGD /PGV و PGV /PGA مربوط به مولفه‌های عمود بر گسل حرکات زمین در حالت نزدیک و دور با هم متفاوت می‌باشد. این مرجع با بررسی مولفه‌ی عمود بر گسل حرکات زمین ثبت شده در ایستگاه Rinaldi زلزله Northridge (به عنوان یک زلزله نزدیک گسل) و مقایسه‌ی آن با رکوردهای ثبت شده در ایستگاه Taft زلزله Kern County (به عنوان زلزله‌ی دور از گسل) نشان می‌دهد که نسبت PGV /PGA برای حرکات زمین نزدیک گسل (۲۰۸/۰۸) بسیار بزرگتر از نسبت مربوط به حرکات دور از گسل (۹۷/۲۲) می‌باشد، در حالی که نسبت PGD /PGV برای حرکات نزدیک گسل خیلی کمتر است [۲۳].

همین نتایج به وضوح در جدول ۴ برای این دو رکوردها مشاهده می‌شود. اما مقایسه بین چهار دسته رکوردها نشان می‌دهد که نسبت PGV /PGA برای زلزله‌های نزدیک گسل دارای پالس نسبت به زلزله‌های نزدیک گسل بدون پالس و دور از گسل قابل توجه می‌باشد.

این تفاوت حاکی از بالا بودن مقدار اوج پالس سرعت در زلزله‌های نزدیک گسل است که برای زلزله‌های مورد بررسی در این مطالعه مقدار آن به بیش از ۰/۵ متر بر ثانیه می‌رسد و زمان تناوب پالس اغلب بین ۱ تا ۵ ثانیه است. وجود این گونه پالس‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سیستم‌های جداسازی

جدول ۴: مشخصات رکوردهای چهار دسته زلزله‌ی مورد استفاده در این مطالعه

Table 4. Characteristics of the four sets of ground motion records used in this study

NO.	Forward-Directivity records							
	Record name	Station	Distance	Date	Component	PGV/PGA	PGD /PGV	PGA
1	Parkfield	Fault Zone 1	3.4	2004	FN	128.3	0.197	0.5
2	Northridge	Jensen Filt. Plant	6.2	1994	022	253.09	0.407	0.42
3	Imperial-Valley	El Centro Imp. Co. Cent	7.6	1979	092	299.13	0.572	0.23
4	Imperial-Valley	Holtville Post Office	8.8	1979	315	226.36	0.642	0.22
5	Northridge	Rinaldi Rec. Stn	8.6	1994	S49W	208.08	0.280	0.84
6	Imperial-Valley	Brawley Airport	11.3	1979	225	224.06	0.624	0.16
7	Northridge	Sylmar Olive View Hospital	6.4	1994	360	155.2	0.243	0.84
Fling-Step records								
1	Chi-Chi	TCU068	3.0	1999	EW	555.12	2.579	0.5
2	Chi-Chi	TCU074	13.8	1999	EW	116.78	2.804	0.59
3	Chi-Chi	TCU079	11.0	1999	EW	119.4	2.440	0.57
4	Chi-Chi	TCU067	1.1	1999	EW	196.48	1.922	0.48
5	Chi-Chi	TCU068	3.0	1999	NS	817.05	3.045	0.36
6	Chi-Chi	TCU076	3.2	1999	EW	199.79	1.542	0.33
7	Chi-Chi	TCU065	2.5	1999	EW	168.84	1.780	0.76
No-Pulse records								
1	Imperial Valley-06	Bonds Corner	2.7	1979	140	76.88	0.372	0.588
2	Imperial Valley-06	Chihuahua	7.3	1979	012	92.04	0.366	0.27
3	Northridge-01	Northridge-Saticoy	12.1	1994	180	128.87	0.359	0.477
4	Parkfield	Parkfield Cholame 8	6.8	1966	320	41.43	0.274	0.273
5	Loma Prietta	Captolia	14.5	1989	000	66.31	0.26	0.528
6	Superstition Hills	Superstition Mtn	4.3	1987	045	47.66	0.144	0.682
7	Northridge	Rinaldi	6.5	1994	318	154.66	0.271	0.472
Far-Field records								
1	Big Bear	Desert Hot Spr	40.1	1992	090	85.066	0.237	0.225
2	Northridge	Moorpark	26.4	1994	180	72.31	0.261	0.29
3	Northridge	Staturen Street School	26.9	1994	S70E	101.21	0.529	0.43
4	Kern Country	Taft	36.2	1952	111	97.22	0.502	0.18
5	Northridge	Montebello	42.2	1994	206	52.28	0.160	0.18
6	Northridge	Terminal Island Fire Stn. 111	57.5	1994	330	63.63	0.188	0.19
7	Kobe,Japan	Shin-Osaka	19.2	1995	000	157.5	0.226	0.24

داشت. به طور مثال، حداکثر دامنه‌ی فوریه در رکورد FD مورد بررسی، در فرکانس ۰/۳۹۱ Hz (پریود ۲/۵۶ ثانیه)، در رکورد FS در فرکانس ۰/۳۷۸ Hz (پریود ۲/۶۴ ثانیه)، در رکورد نزدیک گسل بدون پالس در فرکانس ۱/۳۶۷ Hz (پریود ۰/۷۳ ثانیه) و در رکورد دور از گسل منتخب در فرکانس ۳/۰۰۳ Hz (پریود ۰/۳۳ ثانیه) اتفاق می‌افتد.

۷- جزئیات تحلیل‌های انجام شده در مطالعه‌ی حاضر

در این مطالعه، از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای تحلیل مدل‌ها استفاده شده‌است. تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SAP [۲۶] انجام گرفته‌است. جرم لرزه‌ای هر طبقه به صورت جرم متمرکز در مرکز جرم آن طبقه (گره میانی) در نظر گرفته شده‌است. لازم به ذکر است که کف هر طبقه به صورت دیافراگم صلب در نظر گرفته شده‌است. براساس [۲۷] هر تحلیل غیرخطی تحت اثر بارهای جانبی باید در ادامه تحلیل تحت اثر ترکیب بارهای ثقلی انجام یابد. ترکیب بارهای ثقلی براساس این دستورالعمل بصورت زیر می‌باشند:

$$Q_G = 1.1(Q_D + Q_L + Q_S) \quad (12)$$

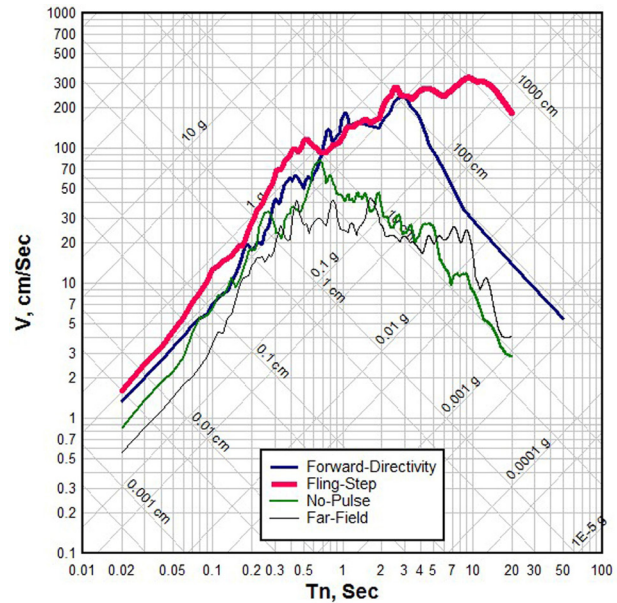
$$Q_G = 0.9Q_D \quad (13)$$

که در آن Q_D معادل بار مرده، Q_L بار زنده مؤثر (برابر با ۲۵٪ بار زنده طراحی کاهش نیافته) و Q_S بار مؤثر برف می‌باشد که در این مطالعه منظور نشده‌است. با توجه به اینکه در اکثر حالات ترکیب بار ثقلی ۱۱ بحرانی‌تر می‌باشد، بنابراین، تنها این ترکیب بار ثقلی در نظر گرفته شده‌است.

رفتار غیرخطی اعضای روسازه براساس FEMA356 [۲۷]، با فرض تشکیل مفاصل پلاستیک در دو انتهای عضو تعریف شد. برای تیرها مفاصل پلاستیک با در نظرگیری اثر لنگر خمشی حول محور قوی، M_3 ، و برای ستون‌ها مفاصل پلاستیک با در نظرگیری اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی حول محور قوی، $(P-M_3)$ ، تعریف گردید. همچنین شیب شاخه دوم پس از تسلیم، برابر M_3 شاخه الاستیک فرض گردید. میرایی سیستم روسازه به صورت ترکیب جرم و سختی متناسب با میرایی در نظر گرفته شده‌است. میرایی ویسکوز معادل برای مود اول و سوم برای سازه‌های با ارتفاع متوسط (۹ و ۱۲ طبقه) برابر ۵ درصد منظور شده‌است. میرایی جداسازها بطور جداگانه به صورت میرایی هیسترتیک مدل دوخطی نشیمن‌ها در نظر گرفته شده‌است. برای تحلیل تاریخچه زمانی از روش انتگرال‌گیری مستقیم به روش نیومارک با شتاب متوسط، $\beta=0.25$ و $\gamma=0.5$ استفاده شده‌است.

۸- نتایج

در اشکال ۷ تا ۹ میانگین نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی غیرخطی برای هر دسته رکورد زلزله در سازه‌های جداسازی شده پایه نشان داده شده‌است. نتایج به صورت حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات (شکل ۷)، حداکثر تغییرمکان طبقات (شکل ۸) و حداکثر شتاب مطلق کف‌ها (شکل ۹) ارائه



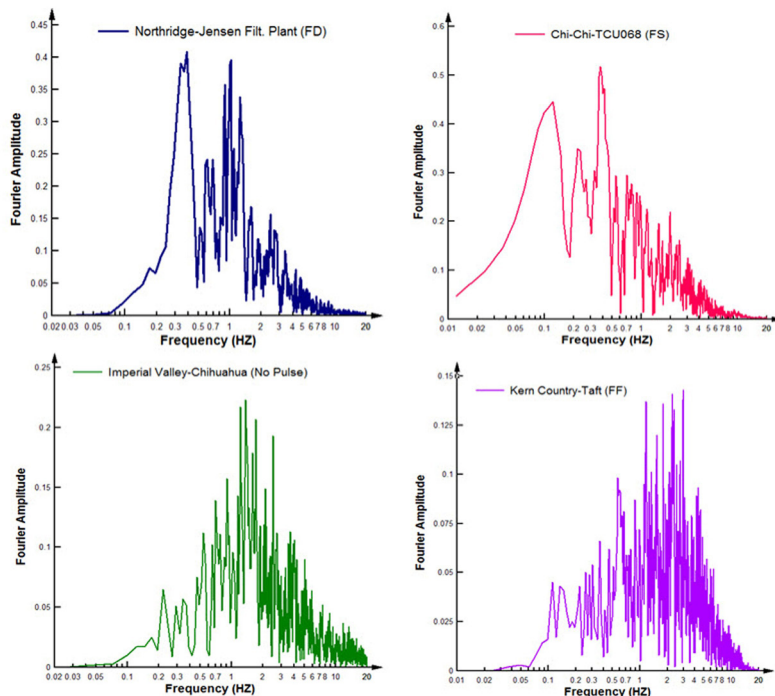
شکل ۵: نمودار سه جانبه (ترکیبی A-V-D) چهار رکورد منتخب از هر دسته رکورد مورد بررسی در این مطالعه به ازای میرایی ۵٪

Fig. 5. Tripartite plots of 5 percent damped elastic response spectra for the selected ground motions

شکل ۵ طیف دامنه‌ی فوریه را برای چهار رکورد منتخب Northridge-Jensen Filt. Plant (FD)، Chi-Chi-TCU068 (FS)، Imperial Kern Country-Taft (FF) و Valley-Chihuahua No Pulse چهار گروه زلزله نشان می‌دهد. یک راه مشخص کردن محتوای فرکانسی زلزله، نشان دادن دامنه‌ی فرکانسی آن از طریق طیف دامنه فوریه است [۲۴]. همانطور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، رکوردهای FD و FS در محدوده‌ی فرکانس‌های کوتاه (پریودهای بلندتر) دامنه‌ی به مراتب بزرگتری نسبت به رکوردهای بدون پالس دارند که این حاکی از بالا بودن محتوای فرکانسی این دسته از رکوردها و انرژی قابل توجه اعمال شده از طرف آنهاست [۲۵]. در بین رکوردهای بدون پالس نیز رکورد نزدیک گسل مقادیر دامنه‌ی بیشتری را نسبت به رکورد دور از گسل به خود اختصاص می‌دهد. اوج دامنه‌ی فوریه در زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل در محدوده‌ی فرکانس‌های کوچک‌تر (پریودهای بلندتر) اتفاق می‌افتد و این بدان معناست که پریود غالب زلزله‌های نزدیک گسل در محدوده‌ی پریود سازه‌هایی قرار می‌گیرد که به وسیله‌ی جداسازی پایه زمان تناوبشان افزایش یافته‌است. با توجه به اینکه زلزله‌های نزدیک گسل به ویژه نوع FD و FS در محدوده‌ی فرکانس‌های پایین، دارای مقادیر دامنه‌ی فوریه بزرگتری می‌باشند، انتظار می‌رود که اثر این نوع زلزله‌ها روی سازه‌های جداسازی شده که دارای پریود بلند هستند، در مقایسه با سازه‌های با پای ثابت قابل توجه باشد که در قسمت‌های بعد این مهم به صورت جامع مورد بررسی قرار خواهد گرفت. محتوای فرکانسی زلزله‌های نزدیک گسل و به تبع آن انرژی ایجاد شده در اثر این نوع زلزله‌ها در سازه‌های با پریود بلندتر اثر بیشتری خواهد

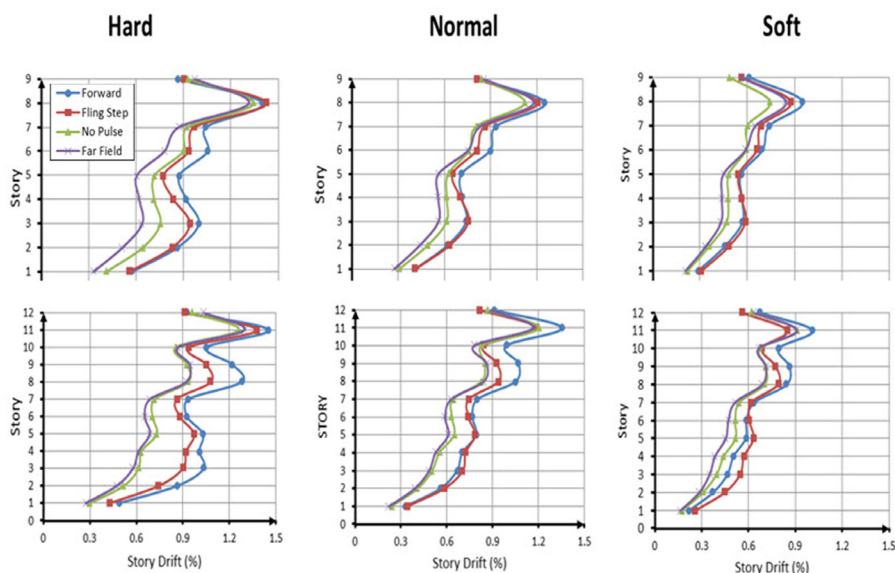
از مقایسه‌ی تغییرمکان‌های نسبی، به وضوح می‌توان تاثیر قابل توجه رکوردهای با جهت‌پذیری رو به جلو (FD) را نسبت به رکوردهای نوع دیگر مشاهده کرد.

شده است. شایان ذکر است که حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات (دریفت) از تقسیم جابجایی نسبی طبقات بر ارتفاع طبقه به دست آمده است.



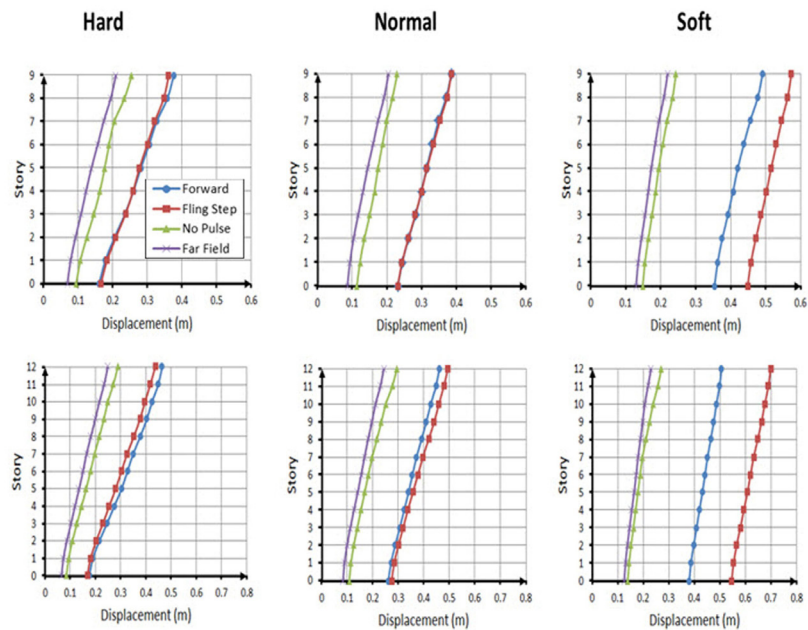
شکل ۶: نمودار طیف دامنه‌ی فوریه برای چهار رکورد منتخب از چهار دسته زلزله مورد بررسی در این مطالعه

Fig. 6. Fourier Amplitude spectrum for the selected ground motions



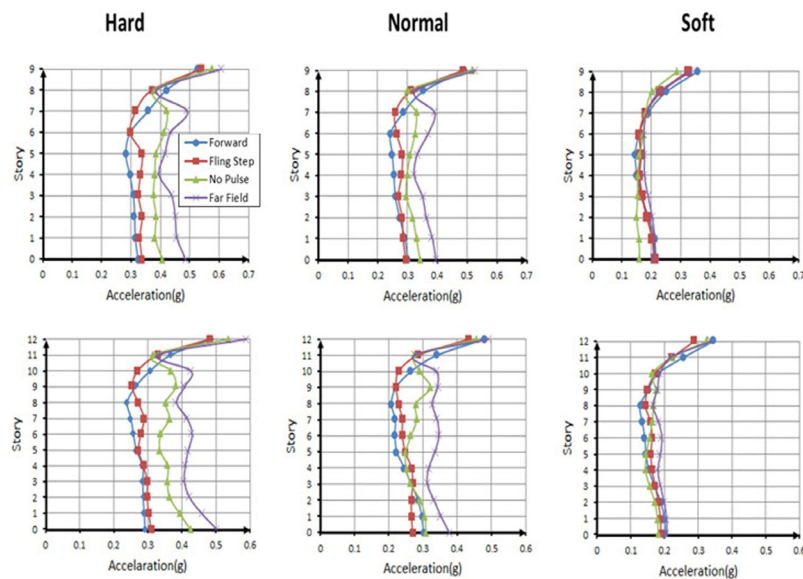
شکل ۷: حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات سازه‌های جداسازی شده برای گروه‌های زلزله‌ی مختلف

Fig. 7. Maximum interstory drifts of the base-isolated structures subjected to different sets of ground motions



شکل ۸: حداکثر تغییر مکان کف طبقات سازه‌های جداسازی شده برای گروه‌های زلزله‌ی متفاوت

Fig. 8. Maximum floor displacements of the base-isolated structures subjected to different sets of ground motions



شکل ۹: حداکثر شتاب کف‌های سازه‌های جداسازی شده برای گروه‌های زلزله‌های مختلف

Fig. 9. Maximum floor accelerations of the base-isolated structures subjected to different sets of ground motions

با نرم‌تر شدن سیستم جداسازی و با افزایش ارتفاع سازه، تاثیر رکوردهای با ویژگی پرتابی FS در مقایسه با سایر گروه رکوردها در طبقات پایین بیشتر می‌شود و رکوردهای FS بیشتر توسط مود ارتعاشی اول تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در واقع همانطور که در مطالعات قبلی [۴] نتیجه‌گیری شده است،

در سازه‌های جداسازی شده با جداساز سخت، جابجایی‌های نسبی طبقات حاصل از اثر زلزله‌های با جهت‌پذیری رو به جلو (FD) بزرگتر از رکوردهای با حرکت پرتابی و آنها هم بزرگتر از زلزله‌های بدون پالس و دور از گسل می‌باشند.

دور از گسل در مقایسه با سایر گروه رکوردها قدری بیشتر است که این افزایش به خصوص در سازه‌های با ارتفاع بلندتر و جداساز نوع سخت بیشتر می‌باشد. با اضافه کردن هسته‌ی سربی به نشیمن‌های معمولی می‌توان میرایی آنها را افزایش داد. با توجه به مطالعات انجام یافته در مرجع [۸] می‌توان گفت که افزایش میرایی جداسازها در تغییرمکان‌های زیاد (که در این مطالعه تحت اثر رکوردهای دارای پالس اتفاق می‌افتد) مفید واقع شده و تغییرمکان جداساز را کاهش می‌دهد. اما، در تغییرمکان‌های کمتر (تحت اثر زلزله‌های دور از گسل و فاقد پالس در این مطالعه)، این افزایش میرایی فراتر از مقدار معمول (که در این بررسی با استفاده از جداساز با هسته سربی به میزان ۳۵٪-۱۵٪ فراهم می‌آید [۲۸])، سبب می‌شود که جداساز موثر واقع نشود.

به عبارت دیگر، تحت اثر یک زلزله با محتوای فرکانسی متوسط (مثل زلزله‌های دور از گسل) که تغییرمکان‌های کمتری را ایجاد می‌کنند، در صورت افزایش میرایی، برخی مزایای مورد انتظار از سیستم جداسازی، مثل کاهش شتاب طبقه برای حفاظت از تجهیزات داخلی و اجزای غیرسازه‌ای، ممکن است اتفاق نیفتد. دلیل اصلی برای استفاده از جداسازی لرزه‌ای برای بیمارستان‌ها، مراکز ارائه‌دهنده‌ی خدمات اضطراری و ساختمان‌هایی از این قبیل، حفاظت از تجهیزات و محتویات داخلی، از طریق تخفیف و تضعیف شتاب‌های ورودی زمین است. اما اگر سیستم جداسازی از طریق اضافه کردن میرایی آن، فقط برای مقاومت در برابر تغییرمکان‌های بزرگ ایجاد شده در اثر یک رکورد زلزله‌ی پالس‌گونه طراحی شود، سازه برای یک زلزله‌ی متوسط (بدون پالس و معمولی) به صورت یک سازه‌ی سخت رفتار خواهد کرد و جداسازی موثر واقع نخواهد شد و تجهیزات داخلی می‌توانند تحت اثر شتاب‌های بالای نسبتاً زیادی قرار بگیرند و این سازه‌ها، بر عکس آنچه از جداسازی انتظار می‌رود، برای زلزله‌های معمولی نقش سازه‌های سخت را ایفا می‌کنند که شتاب در آنها افزایش می‌یابد [۸].

همچنین با گذر از حالت جداسازی سخت به نرم، از میزان شدت شتاب در تمامی گروه رکوردها کاسته می‌شود و نیز در سازه‌های با جداساز نرم اختلاف شتاب بین انواع مختلف رکوردها به حداقل می‌رسد که در برخی موارد می‌توان گفت این نتایج بر هم منطبق می‌شوند. این همان نوع عملی و بهینه‌ی جداگرها است که حداقل اثر تخریبی نیز در این حالت اتفاق می‌افتد. این حاکی از پایین بودن حساسیت جداسازی نوع نرم نسبت به انواع گروه رکوردهای زلزله می‌باشد.

رکوردهای FD و FS بیشترین تاثیر را در ایجاد مفاصل پلاستیک در سازه‌ها دارند و رکوردهای دور از گسل و فاقد پالس تقریباً مفصلی در سازه ایجاد نمی‌کنند که شکل‌های مربوطه جهت اختصار نشان داده نمی‌شوند. همچنین، با گذر از حالت جداسازی سخت به نرم، میزان تشکیل مفاصل پلاستیک کاهش می‌یابد و در حالت جداسازی نرم، روسازه حتی تحت اثر رکوردهای FD و FS تقریباً در حالت الاستیک باقی می‌ماند و این همان عملکردی است که از جداسازی انتظار می‌باشد.

تاثیر موده‌های بالاتر در رکوردهای FD غلبه‌ی بیشتری دارد و با افزایش ارتفاع، تاثیر موده‌های بالاتر نیز بیشتر می‌شود و به این علت اثر رکوردهای FD در نیازهای لرزه‌ای دیربخت در طبقات بالاتر به تدریج قابل توجه خواهد شد. همچنین با عنایت به شکل ۷ جابجایی نسبی طبقات تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل بدون پالس نسبت به دور از گسل در بعضی موارد قدری بیشتر بوده و در موارد متعددی این نیازها تا حد زیادی بر هم منطبق می‌شوند.

در کل، با تغییر سختی سیستم جداسازی از سخت به نرم نیازهای لرزه‌ای کاهش پیدا می‌کنند که این با فلسفه‌ی جداسازی لرزه‌ای سازگار می‌باشد. اثر قابل توجه رکوردهای دارای پالس روی جابجایی نسبی طبقات در سازه‌های با جداسازی نوع سخت نسبت به رکوردهای بدون پالس به وضوح قابل رویت است، حال آنکه در سازه‌های با جداساز نوع نرم، نتایج رکوردهای دارای پالس در مقایسه با رکوردهای بدون پالس دارای اختلاف کمتری می‌باشند. در نتیجه سازه‌ی با جداساز نرم حساسیت کمتری را نسبت به گروه‌های مختلف رکوردها برای جابجایی نسبی طبقات از خود نشان می‌دهد. حال می‌توان گفت که بر اساس شرایط مطالعه‌ی حاضر، جداساز نوع نرم، نوع عملی، قابل کاربرد، منطقی و بهینه برای جداسازی لرزه‌ای می‌تواند باشد. سایر شرایط مبنی بر کفایت و تناسب این نوع سیستم جداسازی در ادامه، با عنایت به نتایج دیگر احراز می‌شود.

با توجه به شکل ۸، رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس (FD و FS)، تغییرمکان‌های کف قابل ملاحظه‌ای را نسبت به رکوردهای دور از گسل و بدون پالس ایجاد می‌کنند. میزان تغییرمکان کف طبقات در همه‌ی قاب‌ها با گذر از حالت جداسازی نوع سخت (H) به سمت نوع نرم (S) (کم شدن سختی جداساز) به میزان زیادی افزایش می‌یابد که این مساله نیاز به استفاده از جداسازهای با ابعاد بزرگتر را برای تحمل تغییرمکان‌های بزرگتر، در حالت عملی (جداسازی نوع نرم) و به خصوص تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل با ویژگی جهت‌پذیری رو به جلو و حرکت پرتابی افزایش می‌دهد. تغییرمکان حداکثر کف طبقات تحت اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بدون پالس نسبت به زلزله‌های دور از گسل در تمامی سازه‌ها اندکی بیشتر می‌باشد. همچنین، تاثیر رکوردهای FS بر تغییرمکان سازه‌های با جداسازی نرم در همه طبقات به طور قابل توجهی بیشتر از رکوردهای FD و آن هم به مراتب بزرگتر از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک بدون پالس و حوزه‌ی دور می‌باشد. به عنوان مثال، تغییرمکان جداساز نوع نرم (S) در سازه‌ی ۱۲ طبقه تحت اثر زلزله‌های با اثر پرتابی ۴۳/۵۹٪ بزرگتر از زلزله‌های با جهت‌پذیری رو به جلو و ۲۹۱/۵۳٪ بزرگتر از زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بدون پالس است.

در ساختمان‌های جداسازی شده با جداسازهای سخت و نرمال و با ارتفاع متوسط رکوردهای FD و FS تقریباً نیازهای جابجایی کف مشابهی را ایجاد می‌کنند. همچنین، اختلاف پاسخ جابجایی کف‌ها ناشی از رکوردهای دارای پالس (FD و FS) و رکوردهای بدون پالس در سازه‌های با جداساز نوع نرم به مراتب بیشتر از سازه‌های با جداساز سخت و نرمال است.

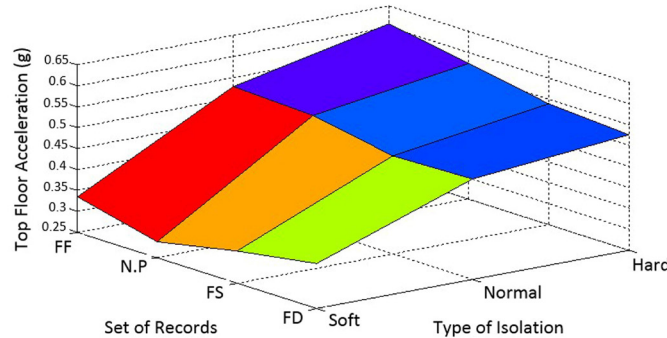
شکل ۹ نشان می‌دهد که شتاب مطلق حداکثر کف‌ها تحت اثر زلزله‌های

به جلو و اثر پرتابی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. شکل ۱۲ حداکثر جابجایی نسبی طبقه را در هر قاب برای انواع جداسازی پایه به صورت تابعی از T_p نشان می‌دهد.

مطابق شکل، قاب‌های با جداسازی نوع نرم (S) (میرایی بیشتر) پاسخ مناسبتری (کمتری) را در محدوده‌ی مقادیر در نظر گرفته شده برای T_p ارائه می‌دهند. از طرف دیگر، نتیجه جالب این است که حساسیت پاسخ جابجایی نسبی طبقه در قاب‌های جداسازی شده با جداساز نوع سخت (میرایی پایین) به پیروید پالس، T_p ، در زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر بوده که عملکرد چنین قاب‌هایی را غیرقابل اطمینان می‌کند. همچنین، در سازه‌های جداسازی شده با ارتفاع متوسط، بیشترین جابجایی نسبی طبقه در پیرودهای پالس کوتاهتر اتفاق می‌افتد، چون زلزله‌های نزدیک گسل تمایل به تحریک مودهای بالاتر دارند [۴] و تاثیر مودهای بالاتر با افزایش تعداد طبقات و نیز با گذر از حالت جداسازی نوع نرم به سخت افزایش می‌یابد.

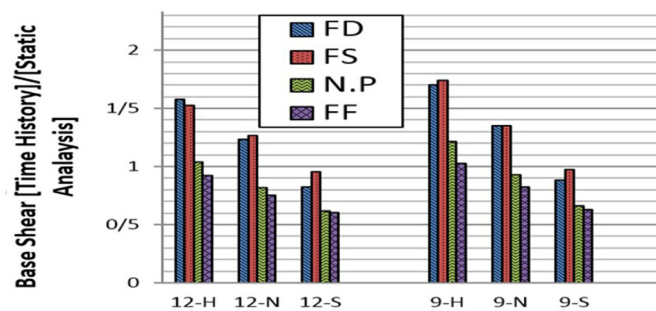
در شکل ۱۰ نیز، میانگین حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای شتاب مطلق طبقه‌ی بام، در مقابل تغییرات سختی جداساز، تحت چهار دسته رکورد مورد بررسی برای سازه‌ی ۹ طبقه نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ پاسخ شتاب مطلق ایجاد شده تحت اثر تمام رکوردها در سازه‌های با جداساز نرم مقادیر کمتری را به خود اختصاص می‌دهد.

دو گروه از زلزله‌های مورد بررسی در این مطالعه، زلزله‌های نزدیک گسلی می‌باشند که مشخصه‌ی بارز آنها حضور پالس با دامنه‌ی بزرگ و پیروید بلند است. این دسته رکوردها به طور عمده توسط سرعت اوج، V_p ، (و یا شتاب اوج، A_p) به همراه پیروید پالس سرعت، T_p ، مشخص می‌شوند که پیروید غالب و محتوای انرژی‌شان را نشان می‌دهد. در نتیجه در این بخش عملکرد قاب‌های جداسازی شده‌ی ۹ و ۱۲ طبقه‌ی جداسازی شده با سه نوع جداساز نرم (S)، متوسط (N) و سخت (H) در مقابل پیروید پالس سرعت، T_p ، برای دو مجموعه رکورد دارای پالس نزدیک گسل دارای جهت‌پذیری رو



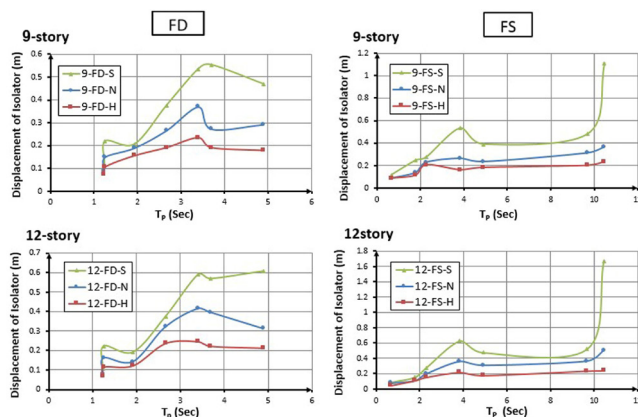
شکل ۱۰: میانگین حداکثر شتاب مطلق بام تحت اثر چهار دسته رکورد در مقابل تغییرات سختی جداساز برای سازه ۹ طبقه

Fig. 10. The mean of the maximum absolute acceleration of the roof of the 9-story building subjected to the four sets of ground motions for different types of isolators



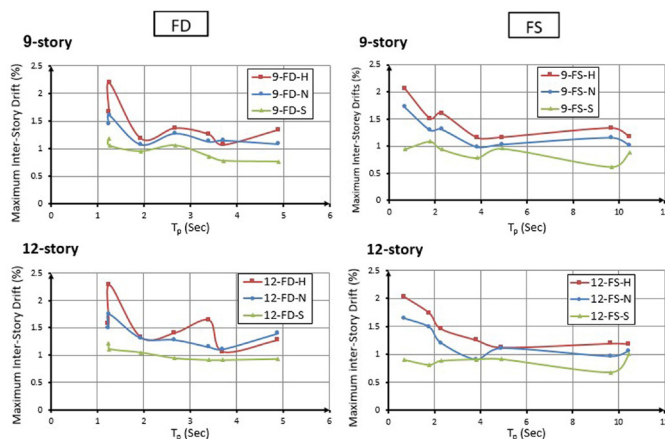
شکل ۱۱: نسبت برش پایه حاصل از تحلیل تاریخیچه‌زمانی غیرخطی به برش پایه‌ی حاصل از روش نیروی جانبی معادل ASCE7-10 در سه سطح جداسازی سخت، متوسط و نرم برای سازه‌های مختلف

Fig. 11. The ratio of the base shear obtained from the nonlinear response-history analysis to that from the equivalent lateral force method described in the ASCE7-10 for hard, normal and soft isolators for different buildings



شکل ۱۲: حداکثر جابجایی نسبی طبقه قاب‌های ۹ و ۱۲ طبقه‌ی جداسازی شده با جداسازهای نوع نرم (S)، متوسط (N) و سخت (H) برای دو مجموعه رکورد نزدیک گسل دارای جهت‌پذیری رو به جلو (FD) و اثر پرتابی (FS)

Fig. 12. Maximum interstory drifts of the 9- and 12-story structures isolated with hard (H), normal (N) and soft (S) isolators subjected to the near-field ground motions with forward-directivity (FD) and fling-step (FS) characteristics

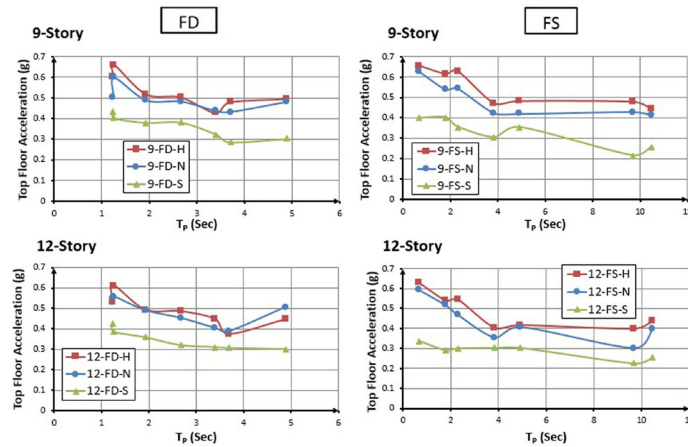


شکل ۱۳: تغییرمکان جداساز در قاب‌های ۹ و ۱۲ طبقه‌ی جداسازی شده با جداسازهای نوع نرم (S)، متوسط (N) و سخت (H) برای دو مجموعه رکورد نزدیک گسل دارای جهت‌پذیری رو به جلو (FD) و اثر پرتابی (FS)

Fig. 13. Isolator displacement of the 9- and 12-story structures isolated with hard (H), normal (N) and soft (S) isolators for the near-field ground motions with forward-directivity (FD) and fling-step (FS) characteristics

از یکدیگر فاصله می‌گیرد. همچنین، رکوردهای با پریود پالس بلندتر نسبت به رکوردهای با پریود پالس کوتاهتر، سازه‌های جداسازی شده با جداساز نوع نرم را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهند. مطابق شکل ۱۳، جابجایی جداساز در سازه‌های با جداساز نرم در مقایسه با جداساز سخت و متوسط دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پریود پالس می‌باشد و جابجایی‌های بیشتری را متحمل می‌شوند.

شکل ۱۳ جابجایی تراز جداسازی را در هر قاب برای سه سطح جداسازی سخت، متوسط و نرم به صورت تابعی از پریود پالس (T_p) نشان می‌دهد. با توجه به شکل، زلزله‌های دارای پریود پالس طولانی‌تر تاثیر بیشتری روی سازه‌ها در هر سه سطح جداسازی دارند. با ذکر این نکته که سازه‌های با جداساز نرم با توجه به ویژگی نوع جداساز آنها (سختی کمتر)، جابجایی‌های بیشتری را در تراز جداسازی متحمل می‌شوند، اختلاف تغییرات تغییرمکان در سطح جداسازی بین سه سطح جداسازی با افزایش پریود پالس بیشتر شده و منحنی پاسخ‌ها برای سه سطح جداسازی در پریودهای بلندتر بیشتر



شکل ۱۴: شتاب مطلق کف تراز بام برای قاب‌های ۹ و ۱۲ طبقه‌ی جداسازی شده با جداسازهای نوع نرم (S)، متوسط (N) و سخت (H) برای دو مجموعه رکورد نزدیک گسل دارای جهت‌پذیری رو به جلو (FD) و اثر پرتابی (FS)

Fig. 14. Absolute acceleration of the roof of the 9- and 12-story structures isolated with hard (H), normal (N) and soft (S) isolators for the near-field ground motions with forward-directivity (FD) and fling-step (FS) characteristics

در جابجایی نسبی طبقات بالاتر به تدریج پرننگتر خواهد شد.
 - شتاب حداکثر مطلق طبقات تحت زلزله‌های دور از گسل افزایش بیشتری نسبت به سایر گروه رکوردها دارد. به علت بالا بودن میزان میرایی (۱۵٪-۳۵٪)، در سازه‌های جداسازی شده (بر عکس آنچه از جداسازی انتظار می‌رود) تحت اثر زلزله‌های معمولی نقش سازه‌های سخت را ایفا می‌کنند که شتاب در آنها افزایش می‌یابد.

- سازه‌ی با جداسازی نرم حساسیت کمتر و انعطاف بیشتری را در پاسخ‌های تغییرمکان نسبی ماکزیمم، شتاب مطلق و مفاصل پلاستیک تحت اثر گروه‌های مختلف رکوردها از خود نشان می‌دهد. بنابراین، نوع جداسازی نرم، نوع عملی، قابل کاربرد و بهینه‌ی جداسازی می‌باشد.

- قاب‌های با جداساز نوع نرم (S) (میرایی بیشتر)، پاسخ تغییرمکان نسبی طبقات کمتری را برای مقادیر مختلف پریود پالس (T_p) ارائه می‌دهند، اما حساسیت پاسخ تغییرمکان نسبی طبقه در قاب‌های جداسازی شده با جداساز نوع سخت (میرایی پایین) به پریود پالس زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر است که عملکرد چنین قاب‌هایی را غیرقابل اطمینان می‌کند.

- زلزله‌های دارای پریود پالس طولانی‌تر تاثیر بیشتری روی پاسخ جابجایی سازه‌ها در هر سه سطح جداسازی دارند. سازه‌های با جداساز نرم با توجه به ویژگی نوع جداساز آنها (سختی کمتر)، بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته و دارای جابجایی‌های بیشتری در تراز جداسازی می‌باشند.

- پالس‌های با پریود مختلف، در اکثر موارد شتاب بیشتری را در سازه‌های با جداسازی نوع سخت نسبت به نوع متوسط و نرم، در تمام قاب‌ها ایجاد می‌کنند، به طوری که سازه‌های با جداساز نوع نرم به ازای پالس‌های با پریود مختلف دارای کمترین شتاب کف می‌باشند که این با فلسفه جداسازی لرزه‌ای سازگار می‌باشد.

با بررسی نمودارهای تغییرات شتاب مطلق کف تراز بام بر حسب تغییرات پریود پالس رکوردهای نزدیک گسل در شکل ۱۴، می‌توان نتیجه گرفت که پالس‌های با پریود مختلف، در اکثر موارد شتاب بیشتری را در سازه‌های با جداسازی نوع سخت نسبت به نوع متوسط و نرم، در تمام قاب‌ها ایجاد می‌کنند، به طوری که سازه‌های با جداسازی نوع نرم به ازای پالس‌های با پریود مختلف دارای کمترین شتاب می‌باشند که این با فلسفه جداسازی لرزه‌ای سازگار می‌باشد. همچنین، در سازه‌های با ارتفاع متوسط، شتاب ایجاد شده تحت اثر رکوردهای با پریود پالس کوتاهتر بیشتر بوده و در این سازه‌ها مودهای بالاتر بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته‌اند.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ۲ قاب خمشی فولادی ۹ و ۱۲ طبقه که با جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی از پایه جداسازی شده‌اند تحت اثر چهار گروه ۷ تایی شتاب‌نگاشت که یکی دور و سه گروه دیگر نزدیک به گسل هستند با استفاده از تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین منظور اثر سختی جداساز و پریود پالس زلزله‌های نزدیک گسل روی پاسخ‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مطالعه زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک با اثر پرتابی و بدون پالس مورد تاکید قرار دارند. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- با گذر از جداساز نوع سخت به نرم (افزایش زمان تناوب و میرایی)، تاثیر مجموعه رکوردهای با اثر پرتابی (FS) بر نیاز تغییرمکان نسبی طبقات پایین‌تر نسبت به سایر مجموعه رکوردها بیشتر بوده و از این رو، تاثیر این دسته رکوردها در تحریک مود اول آشکار می‌گردد. این در حالی است که تاثیر مودهای بالاتر در رکوردهای FD غلبه‌ی بیشتری دارد و به این علت با افزایش ارتفاع و با گذر از جداسازی نوع سخت به نرم، تاثیر رکوردهای

- [14] American Society of Civil Engineers (ASCE), Seismic design requirements for seismically isolated structures, Section 17 in ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Reston, 2010.
- [15] AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago, IL, 2010.
- [16] V. Kilar, and D. Koren, Simplified inelastic seismic analysis of base-isolated structures using the N2 method, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(9) (2009) 967-989.
- [17] F. Chatzidaki, Optimum Design of Base Isolated RC Structures, M.Sc. Thesis, National Technical University of Athens, 2011.
- [18] <http://peer.berkeley.edu>.
- [19] D. Michaud, and P. Leger, Ground motions selection and scaling for nonlinear dynamic analysis of structures located in Eastern North America, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(3) (2013) 232-244.
- [20] SeismoSoft, SeismoSignal Version 4.3.0. SeismoSoft Ltd., Inc., Earthquake Engineering Software Solutions, Pavia, Italy, [online]. Available from URL: <http://www.seisimosoft.com>, 2011.
- [21] B. Mehrparvar, Active and semi-active control of nonlinear base-isolated structures under the effect of near-fault ground motions, PhD Thesis, Amirkabir University of Technology, 2010 (in Persian).
- [22] E. Garini, and G. Gazetas, Damage potential of near-fault records: sliding displacement against conventional intensity measures *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(2) (2013) 455-480.
- [23] A.K. Chopra, *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*. Prentice-Hall, 2007.
- [24] Y. Bozorgnia, and V.V. Bertero, *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*, CRC press, 2004.
- [25] B. Mohraz, and F. Sadek, Earthquake ground motion and response spectra, in the *Seismic Design Handbook*, Springer (2001) 47-124.
- [26] CSI. SAP, *Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-dimensional Structures*. Computer and Structures, Inc.: Berkeley, CA, 2013.
- [27] Building Seismic Safety Council (BSSC), *Pre-standard commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA-356, Washington (DC): Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [28] F.Y. Cheng, H. Jiang, and K. Lou, *Smart structures: Innovative systems for seismic response control*, CRC Press, 2010.
- [1] Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings, No. 523, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Islamic Republic of Iran, 2010 (in Persian).
- [2] Naeim, F., *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*, John Wiley & Sons, 1999.
- [3] M, Fathi, A. Makhdoui, M. Parvizi, Effect of supplemental damping on seismic response of base isolated frames under near & far field accelerations, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(5) (2015) 1359-1365.
- [4] E. Kalkan, S.K. Kunnath, "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake Spectra*, 22(2) (2006) 367-390.
- [5] C.P. Providakis, Pushover analysis of base-isolated steel-concrete composite structures under near-fault excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(4) (2008) 293-304.
- [6] J. Hall, T. Heaton, M. Halling, D. Wald, Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, *Earthquake Spectra*, 11(4) (1995) 569-605.
- [7] W. Iwan, Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 123(4) (1997) 397-404.
- [8] R.S. Jangid, and J.M. Kelly, Base isolation for near-fault motions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(5) (2001) 691-707.
- [9] B. Alavi, H. Krawinkler, Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 33(6) (2004) 687-706.
- [10] H. Krawinkler, B. Alavi, and F. Zareian, Impact of near-fault pulses on engineering design: Directions in Strong Motion Instrumentation. Springer Netherlands (2005) 83-106.
- [11] R. S. Jangid, Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions, *Engineering structures*, 29(10) (2007) 2503-2513.
- [12] S. Berton, J. E. Bolander, A. Pasion, Bi-directional response of base isolated structures subjected to near-fault ground motions, *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*, Beijing, China, 2008.
- [13] R. Hoseini Vaez, H. Naderpour, R. Carneiro Barros, Influence of equivalent pulses of near fault ground motions on base-isolated RC structures, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, EUROLYN, 2014.

جدول پ ۲:- مشخصات مقطع تیر

Section	d (cm)	t (cm)
C ₁	20	1.5
C ₂	25	1.5
C ₃	25	2
C ₄	30	2
C ₅	35	2.5

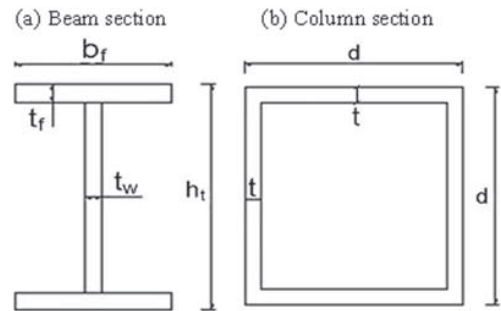
جدول پ ۳:- مشخصات مقاطع سازه ۹ طبقه با پای ثابت

تیرها	ستون‌های کناری	ستون‌های داخلی	طبقه
B ₂	C ₃	C ₅	2و1
B ₂	C ₃	C ₄	4و3
B ₂	C ₂	C ₄	5
B ₁	C ₂	C ₃	6
B ₁	C ₁	C ₃	7
B ₁	C ₁	C ₁	9و8

پیوست

مشخصات مقاطع سازه ۹ طبقه با پای ثابت

در جدول پ-۳ مشخصات مقاطع تیرها و ستون‌های سازه ۹ طبقه آورده شده است. ستون‌ها از نوع قوطی و تیرها از نوع تیورق انتخاب شده‌اند. در شکل پ-۱ مقطع تیرها و ستون‌های مورد استفاده در این مطالعه به صورت شماتیک نشان داده شده است. در جدول‌های پ-۱ و پ-۲ نیز ابعاد این تیرها و ستون‌ها بر اساس پارامترهای شکل پ-۱ ارائه می‌شود.



شکل پ ۱:- مقاطع تیرها و ستون‌ها

جدول پ ۱:- مشخصات مقطع ستون

Section	h _t (cm)	t _w (cm)	b _f (cm)	t _f (cm)
B ₁	35	0.8	20	2
B ₂	40	0.8	22.5	2

Please cite this article using:

S. Haseli, M. Puorsha, Investigation of the seismic responses of base-isolated buildings under the influence of near-field ground motions, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 579-596.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11973.5159

