

# بررسی عددی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی شاقولی شده پس از زلزله

محمد یکرنگ‌نیا<sup>۱\*</sup>، میلاد عابدی‌فر<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

۲- کارشناس ارشد سازه، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

\* yekrangnia@sru.ac.ir، ۱۶۳-۱۶۷۸۵، صندوق پستی تهران

## چکیده

باتوجه به افزایش هزینه‌های ساخت سازه‌های جایگزین، انتظار می‌رود که ایجاد تکنیک‌های جدید جهت تسریع در بازگرداندن سازه‌های آسیب‌دیده از زلزله، به سرویس‌دهی و اسکان ساکنین، منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌ها شود. در این میان یکی از روش‌هایی که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، شاقول کردن مجدد سازه می‌باشد که استفاده آسان، هزینه نسبتاً کم و سرعت اجرای مناسبی دارد. در این تحقیق به روش تحلیلی، سه مدل سازه قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات متفاوت سه، نه و بیست طبقه، به کمک نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus، مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. مدل‌های مورد مطالعه، تحت چندین رکورد مختلف در شدت‌های مختلف قرار گرفته‌اند. هر رکورد، تحت سه حالت مجزا به هر مدل اعمال شده است. در حالت اول تنها یک رکورد زلزله به تنهایی به مدل اعمال گردیده است که مصداق وقوع یک زلزله به تنهایی است. در حالت دوم، تحلیل‌ها با تاثیرپذیری از تحلیل‌های قبلی و عدم شاقول شدن بررسی شده است. در حالت سوم، تحلیل‌ها مشابه حالت دوم تحت توالی‌های لرزه‌ای قرار گرفته است با این تفاوت که پس از اعمال هر شدت زلزله و قبل از اعمال شدت بعدی، جابجایی‌های پس‌ماند هر طبقه صفر شده است که این اقدام مصداق شاقول کردن سازه می‌باشد. با بررسی منحنی‌های به‌دست آمده استنتاج شد که در بیشتر حالات، سری دوم تحلیل‌ها یعنی تحلیل‌هایی با تاثیرپذیری از تحلیل‌های قبلی و عدم شاقول شدن به‌علت داشتن تأثیرات باقی‌مانده قابل توجه هر زلزله بر روی زلزله بعدی، دارای بیشترین گریز بیشینه و گریز پس‌ماند می‌باشند.

## واژگان کلیدی

قاب خمشی فولادی، گریز طبقه پس‌ماند و بیشینه، عملکرد لرزه‌ای، شاقولی شده

## Numerical study on the seismic performance of realigned steel moment frames

M. Yekrangnia, M. Abedifar

### Abstract

Due to the increase in construction costs of new structures, it is expected that attempts to develop new techniques to accelerate the return of earthquake-damaged structures to service. One of the methods that can be used is re-aligning the structure. In this research, three models of steel moment frame structures with different numbers of stories, were analyzed by nonlinear dynamic analyses with the help of Abaqus software. The studied models have been subjected to several different records. Each record is applied to each model under three separate fashions. In the first case, only one earthquake record is applied to the model alone. In the second case, IDA analysis is performed, and the structure is subjected to successive earthquakes from low to high intensity. In the third case, the analyzes are similar to the second case under seismic sequences, with the difference that after applying each earthquake intensity and before applying the next intensity, the residual displacements of each floor were made zero, which is an example of aligning the structure. It was concluded that in most cases, the second series of analyzes, have the maximum drift and residual drift ratios.

### Keywords

Steel moment frame, Maximum and residual drift, Seismic performance, Aligned

معمولاً زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان یک رویداد منفرد رخ نمی‌دهند، بلکه به‌صورت مجموعه‌ای از لرزه‌ها اتفاق می‌افتند. زمین‌لرزه‌های قوی، پس‌لرزه‌های بیشتر و بزرگ‌تر و همچنین پیش‌لرزه‌هایی دارند و توالی آن‌ها می‌تواند سال‌ها یا حتی بیشتر طول بکشد. در چنین مواردی که زلزله‌های مکرر رخ دهند، سازه‌هایی که پس از اولین زلزله آسیب دیده‌اند و تعمیر نشده باقی می‌مانند، ممکن است در پایان زلزله‌های متوالی و تأثیر پس‌لرزه‌ها کاملاً آسیب ببینند.

در طول سال‌های اخیر، تحقیقاتی برای بررسی تأثیر پس‌لرزه‌ها بر پاسخ‌های سازه‌های مختلف انجام شده است و نتایج مفیدی را برای گنجاندن پس‌لرزه در طراحی لرزه‌ای ارائه کرده‌اند. اگرچه انواع مختلف سازه‌ها و توالی زلزله‌های ثبت‌شده در بررسی‌ها به کار گرفته شده‌اند، اما همچنان این نتیجه مشترک حاصل می‌شود که پس‌لرزه‌های متوسط و قوی باعث افزایش آسیب سازه می‌شوند.

**Faisal** و همکارانش [۱]، برای اولین بار با هدف تعیین تأثیر زلزله‌های مکرر دور از گسل بر شکل‌پذیری طبقه و ایجاد رابطه تجربی، بر روی قاب‌های بتن مسلح صورت گرفته است. مطابق نتایج این مطالعه، حداکثر شکل‌پذیری طبقه سازه‌های مورد بررسی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر زلزله‌های مکرر قرار می‌گیرد. حداکثر شکل‌پذیری طبقه در سازه‌های ناشی از زلزله‌های مکرر، برای سازه کوتاه، یعنی مدل ۳ طبقه، با ضریب رفتار پایین، در سطح بالایی ظاهر می‌شود. با افزایش ضریب رفتار، این حداکثر تقاضا به پایین‌ترین طبقه منتقل می‌شود. برای مدل‌های بلندتر، یعنی مدل‌های ۶، ۱۲، و ۱۸ طبقه، حداکثر شکل‌پذیری طبقه به‌دلیل زلزله‌های مکرر در طبقه پایین قرار دارد.

**Wen** و همکارانش [۲]، نویسندگان اثر پس‌لرزه بر منحنی شکنندگی را برای یک سازه بتن مسلح ۵ طبقه مورد بررسی قرار دادند و اثبات نمودند که پس‌لرزه ممکن است تغییر مکان پس‌ماند سقف را به‌دلیل قطبیت حرکت پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی، افزایش یا کاهش دهد. پس‌لرزه می‌تواند هم میانگین شاخص آسیب و هم پراکندگی شاخص آسیب سازه را افزایش دهد و این افزایش، شدت زلزله اصلی و پس‌لرزه بستگی دارد.

در مطالعه‌ای توسط **Ruiz-Garcia** [۳] این چنین نتیجه‌گیری شده است که مدت زمان حرکت زمین به‌طور قابل توجهی بر گریز پس‌ماند بام در سیستم‌های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی تأثیر نمی‌گذارد. در مطالعه‌ای که **Raghuandan** و **Liel**

[۴]، اثر مدت زمان بر ریزش ساختمان‌های بتن آرمه با خواص ساختاری متفاوت بررسی شده و این نتیجه به‌دست آمده است که مدت زمان حرکت زمین تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت فروریختن سازه‌های بتنی با فرسودگی زیاد و فرسودگی کمتر دارد.

**Ruiz-Garcia** [۵] نتیجه‌گیری کرد، ویژگی‌های زلزله اصلی و پس‌لرزه بررسی شده و بیان گردیده است که دوره تناوب پس‌لرزه‌ها کوتاه‌تر از پس‌لرزه‌های اصلی است و ممکن است به‌طور قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های تحت اثر پس‌لرزه تأثیر بگذارد. در مقاله‌ای توسط **Song** و همکارانش [۶]، تأثیر ویژگی‌های پس‌لرزه بر خطر فروپاشی برای هر دو مدل ساختمان فولادی یک درجه آزادی و چند درجه آزادی پس از زلزله اصلی بررسی شده است. تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی مجموعه‌ای از ۶۲ رکورد پس‌لرزه با ویژگی‌های متفاوت انجام شده و تجزیه و تحلیل آن بر اساس یک سیستم یک درجه آزادی غیرخطی و یک ساختمان معمولی چهار طبقه با قاب فولادی است. نتایج نشان می‌دهد که هم مدت و هم محتوای فرکانس حرکات زمین نقش مهمی در ظرفیت فروپاشی سازه پس از زلزله اصلی دارند. ظرفیت فروریزش سازه، که توسط شدت حرکت زمین قبل از فروریختن ساختمان‌ها تعیین می‌شود، با افزایش مدت زمان مؤثر حرکت زمین کاهش می‌یابد. با افزایش سطح خسارت، تأثیر ویژگی‌های پس‌لرزه بر ظرفیت‌های فروپاشی پس از زلزله شدیدتر است. نتایج مشابهی در مطالعه مرجع [۷] گزارش شده است.

در مطالعه‌ای **Lee** و **Foutch** [۸]، پاسخ چهار مدل تحلیلی سه‌بعدی ساختمان‌های بتنی را تحت مجموعه‌ای از پنج توالی لرزه‌ای زلزله اصلی-پس‌لرزه ثبت‌شده مورد بررسی قرار داده‌اند. ساختمان‌های منتخب دارای ارتفاع ۳ و ۵ طبقه بودند که شامل منظم و نامنظم در ارتفاع برای هر ساختمان بودند. محققین هم‌چنین زوج زلزله اصلی-پس‌لرزه را به ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه چرخاندند تا تأثیر زاویه توالی رویداد را بررسی نمایند. مطابق نتایج به‌دست آمده، تحریکات پس‌لرزه به‌طور سیستماتیک پارامترهای تقاضای لرزه‌ای مانند نسبت گریز بین طبقه و نسبت گریز پسماند و هم‌چنین شاخص آسیب را افزایش می‌دهد؛ که به پیکربندی ارتفاع نیز بستگی دارد. نتایج مشابهی در مرجع [۹] گزارش شده است.

همچنین مطالعات مختلفی نیز بر روی گریز پسماند در سیستم‌های سیستم یک درجه آزادی انجام شده است. به‌عنوان مثال، در [۱۰]، تجزیه و تحلیل پارامتری سیستم یک درجه



آزادی تحت ۱۱ زلزله برای ارزیابی گریز پس ماند انجام شده و ثابت شده است که نسبت سختی پس از تسلیم به طور قابل توجهی بر روی گریز پسماند تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، نتایج این مطالعه نشان داد که اثرات پریرود ارتعاش الاستیک و حداکثر شکل‌پذیری هدف بر روی گریزهای پسماند جزئی است. در مطالعه دیگری توسط *Miranda* و *Ruiz-García* [۱۱]، مقادیر جابجایی پس ماند سیستم‌های سیستم یک درجه آزادی با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهایی از جمله پریرود ارتعاش الاستیک، بزرگی زلزله، شرایط محل و فاصله تا گسل بررسی شده است. همچنین، یک معادله تحلیلی از طریق تحلیل دینامیکی غیرخطی سیستم‌ها تحت ۲۴۰ حرکت زمین برای پیش‌بینی جابجایی پس ماند پیشنهاد گردیده است. *Fardis* و *Lioassatou* [۱۲] به بررسی اثرات پالس سرعت زلزله و مدل‌های هیستریک سیستم یک درجه آزادی بر روی تغییر مکان پسماند نرمال شده تا حداکثر تغییر مکان خطی و غیرخطی پرداخته‌اند. این مطالعه، توابع میانگین، واریانس و خودهمبستگی و همچنین توزیع احتمال حاشیه‌ای طیف تغییر مکان پسماند نرمال شده را به‌عنوان فرآیند تصادفی ارتعاش معرفی کرده است. علاوه بر این، در مقاله‌ای توسط *Guo* و *Christopoulos* [۱۳]، یک چارچوب احتمالی برای پیش‌بینی گریز پسماند سیستم‌های سیستم یک درجه آزادی ایده‌آل به‌عنوان معرف سازه‌های متعارف با استفاده از تحلیل نوسانات غیرخطی ارائه شده است. همچنین، برای یافتن روندهای آماری نسبت‌های پسماند، تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در برابر حرکات زمینی نزدیک و دور انجام شده است. نویسندگان در مقاله [۱۴]، نسبت‌های تغییر مکان پسماند با مقاومت ثابت را برای سازه‌های ساخته شده در سایت‌های خاک نرم ارزیابی کرده‌اند. نویسندگان یک معادله آماری را برای تخمین جابجایی پس ماند سازه سیستم یک درجه آزادی تحت ۲۳۸ زمین لرزه ثبت شده در مکزیکوسیتی و منطقه خلیج سانفرانسیسکو پیشنهاد نموده‌اند.

در مقاله [۱۵]، روشی برای ارزیابی نسبت‌های جابجایی غیر الاستیک سیستم‌های سیستم یک درجه آزادی بر اساس فرمول تجربی به‌دست‌آمده از مطالعات پارامتری گسترده پیشنهاد شده است. تأثیر پریرود ارتعاش، ضریب کاهش نیرو، شرایط نوع خاک، نسبت سختی پس از تسلیم (سخت‌شدن و نرم‌شدن) و نسبت میرایی ویسکوز مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. نوآوری اصلی آن مقاله، مربوط به اندازه‌گیری اثر مستقیم توالی لرزه‌ای بر روی جابجایی است. مطابق نتایج به‌دست آمده، افزایش ضرایب کاهش نیرو همیشه منجر به افزایش نسبت

جابجایی غیر الاستیک می‌شود و بالعکس. علاوه بر این، این مقادیر به پریرود سیستم سیستم یک درجه آزادی، به‌ویژه در محدوده کوتاه، مثلاً تا ۰/۵ ثانیه، وابسته است. در این حالت، هرچه دوره تناوب کمتر باشد، نسبت جابجایی غیر الاستیک بیشتر است. علاوه بر این، کاهش نسبت سختی پس از تسلیم منجر به جابجایی بالاتر می‌شود و بالعکس. این اثر برای مقادیر منفی این پارامتر، بارزتر است. از سوی دیگر، شرایط محلی و نسبت میرایی ویسکوز کمی بر نسبت جابجایی غیر الاستیک تأثیر می‌گذارد و عملاً می‌توان آنها را نادیده گرفت. نتایج مشابهی در مرجع [۱۶] گزارش شده است.

## ۲- فرضیات و مدل‌ها

در این بخش، به توضیح مدل‌های در نظر گرفته شده سه، نه و بیست طبقه پرداخته شده و جزئیات تحلیل و طراحی و محاسبات نیروی زلزله و... برای این سه مدل ارائه شده است. تحلیل و طراحی اولیه مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار ETABS19 [۱۷] انجام شده است. تحلیل و طراحی تمامی مدل‌ها مطابق طراحی سازه‌های متداول اسکلت فولادی بوده و تمامی الزامات تجویزی مبحث دهم مقررات ملی [۱۸]، استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] مدنظر بوده است. تمامی مقاطع مورد استفاده در تیرها و ستون‌ها در هر سه مدل، از نوع فشرده لرزه‌ای می‌باشند. بار مرده و زنده طبقات به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. محل ساختمان‌های مورد بررسی شهر تهران، نوع خاک محل تیپ ۲ و سیستم باربر جانبی برای مدل‌های ۳ و ۹ طبقه قاب خمشی متوسط و برای مدل ۲۰ طبقه قاب خمشی ویژه است. به منظور مدل‌سازی در نرم افزار *Abaqus*، از المان‌های تیر استفاده شده است. تنش تسلیم و تنش حد نهایی مصالح فولادی به ترتیب برابر ۲۴۰ و ۴۷۵ مگاپاسکال می‌باشد. مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ است. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

در تمام مدل‌ها، شدت‌های مختلف زلزله از حداکثر شتاب  $0.2g$  تا  $1.6g$  با گام‌های  $0.2$  به تکیه‌گاه‌های گیردار اعمال گردیده است. هر رکورد، تحت سه حالت مجزا به هر مدل اعمال شده است. در حالت اول تنها یک رکورد زلزله به تنهایی به مدل اعمال گردیده است که مصداق وقوع یک زلزله به تنهایی بوده و بدون داشتن پس لرزه و تأثیر زلزله‌های متوالی می‌باشد که مطابق عرف طراحی‌های حال حاضر است. در حالت دوم تحلیل‌ها با تأثیرپذیری از تحلیل‌های قبلی و عدم شاقول

جدول ۱- مشخصات رکوردهای مورد استفاده در مطالعه

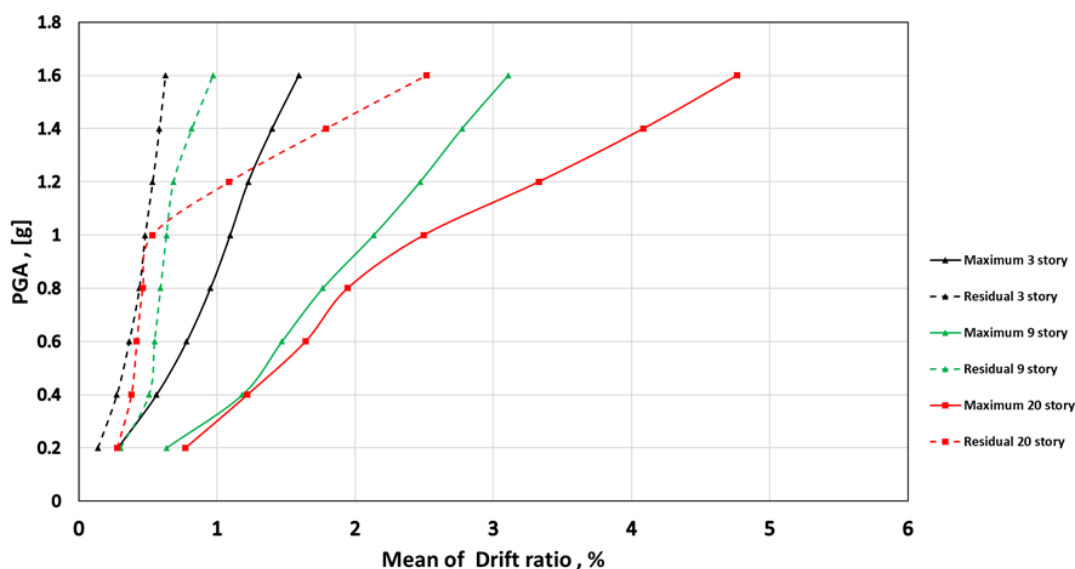
نام رکورد	تاریخ وقوع	ایستگاه	PGA	منبع
Northridge	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	Pacoima Kagel Canyon	۰/۴۴g	PEER
Irpinia Italy	۱۹۸۰/۱۱/۲۳	Bagnoli Irpinio	۰/۱۹g	PEER
Cape Mendocino	۱۹۹۲/۰۴/۲۵	Petrolia	۰/۷۳g	PEER
Montenegro Yugo	۱۹۷۹/۰۴/۱۵	Bar-Skupstina Opstine	۰/۳۹g	PEER
L'Aquila Italy	۲۰۰۹/۰۴/۰۶	L'Aquila - Parking	۰/۳۴g	PEER
Chuetsu-oki	۲۰۰۷/۰۷/۱۶	Joetsu Kakizakiku Kakizaki	۰/۵۰g	PEER
Chi-chi	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU101	۰/۲۲g	PEER

و حذف ارتعاشات احتمالی، در نظر گرفته شده است. برای هر شدت از هر رکورد و برای هر طبقه از تمامی مدل‌ها، تحت سه حالت ذکر شده، منحنی‌های بیشینه شتاب زمین بر حسب نسبت گریز شامل گریز بیشینه و گریز پس ماند، و منحنی بیشینه شتاب زمین بر حسب برش پایه رسم گردیده است.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها

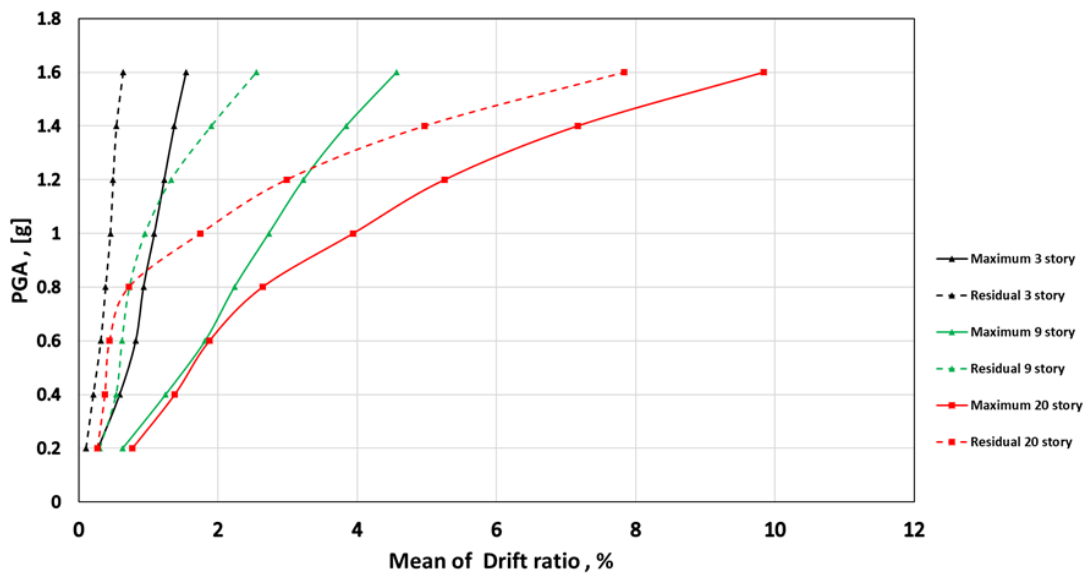
در این بخش به تشریح و تفسیر نتایج به دست آمده از رکوردها پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۱ تا ۳ محور افقی بیانگر میانگین مقادیر گریز هفت رکورد مورد مطالعه می‌باشد. در شکل‌های (۱) تا (۳)، مقادیر گریز برای هر سه مدل و به تفکیک سری تحلیل بیان گردیده است.

شدن بررسی شده است یعنی سازه تحت زلزله‌های متوالی از شدت کم بشدت زیاد قرار گرفته است و اثرات هر زلزله مانند تنش‌ها و جابجایی‌ها و گریزهای پس ماند بر روی زلزله بعدی در نظر گرفته شده است. در حالت سوم تحلیل‌ها، مشابه حالت دوم تحت توالی‌های لرزه‌ای قرار گرفته است با این تفاوت که پس از اعمال هر شدت زلزله و قبل از اعمال شدت بعدی، جابجایی‌های پس ماند هر طبقه صفر شده است که این اقدام مصداق شاقول کردن سازه می‌باشد. در این حالت تنها جابجایی‌های پس ماند صفر گردیده است و سایر تأثیرات زلزله قبلی مانند تنش‌ها، مفاصل پلاستیک احتمالی و... همچنان در سازه وجود دارد. در حالت‌های دوم و سوم تحلیل، بعد از اعمال هر شدت و قبل از اعمال شدت بعدی و همچنین بعد از شاقول کردن سازه، فاصله زمانی ۶ ثانیه‌ای جهت آرامش سازه

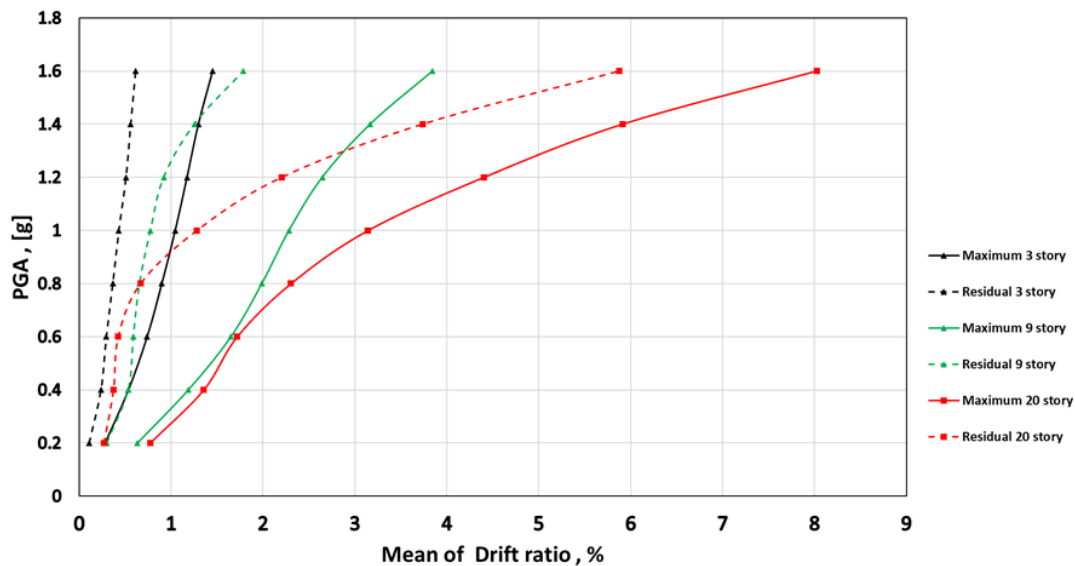


شکل ۱- مقایسه حداکثر گریز متوسط مدل‌های ۳ و ۹ و ۲۰ طبقه در سری اول تحلیل‌ها





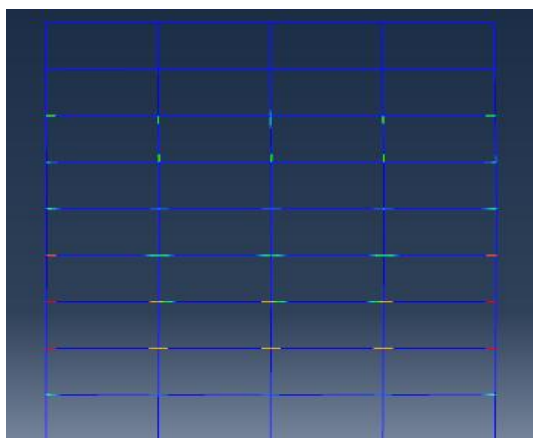
شکل ۲- مقایسه حداکثر گریز متوسط مدل‌های ۳ و ۹ و ۲۰ طبقه در سری دوم تحلیل‌ها



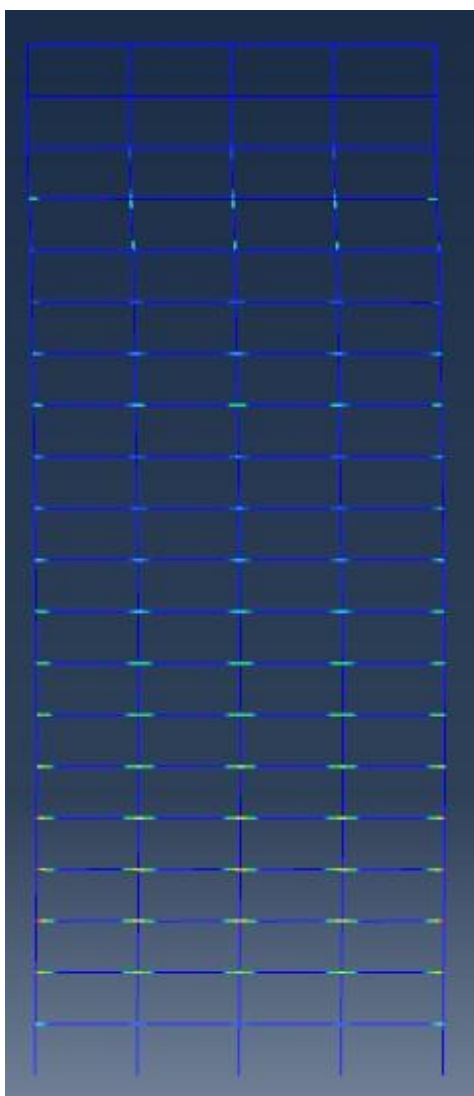
شکل ۳- مقایسه حداکثر گریز متوسط مدل‌های ۳ و ۹ و ۲۰ طبقه در سری سوم تحلیل‌ها

گریز بیشینه و پس ماند می‌باشند. همچنین استنتاج می‌شود که سری دوم تحلیل‌ها یعنی تحلیل‌هایی با تأثیرپذیری از تحلیل‌های قبلی و عدم شاقول شدن، به‌علت داشتن تأثیرات باقی‌مانده قابل توجه هر زلزله بر روی زلزله بعدی از جمله جابجایی پسماند، خستگی مصالح و... دارای بیشترین گریز بیشینه و گریز پس ماند می‌باشند. سری سوم تحلیل‌ها یعنی سازه‌های شاقول شده، در رده دوم از نظر گریز بیشینه و پس ماند بوده و سری اول تحلیل‌ها در رتبه سوم می‌باشند. سازه‌های سری دوم به‌علت خرابی‌های جزئی، مفصل

با بررسی شکل‌ها می‌توان دریافت که در سه سری تحلیل‌های انجام شده، با افزایش تعداد طبقات، مقدار گریز بیشینه و گریز پس ماند افزایش می‌یابد به عبارت دیگر، سازه‌های بیست، نه و سه طبقه، به ترتیب بیشترین مقدار گریز را داشته‌اند. همچنین تعداد پس‌لرزه‌ها پارامتر مهمی در تعیین میزان خرابی می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش تعداد پس‌لرزه‌های اعمالی، افزایش بیشتری را در گریز بیشینه و گریز پس ماند شاهد هستیم. مشخصات پس‌لرزه شامل بیشینه شتاب و مدت زمان موثر، دو پارامتر تعیین کننده در ایجاد خرابی و افزایش مقادیر



شکل ۵- محل کرنش‌های پلاستیک مدل نه طبقه ناشی از توالی لرزه‌ای تحت رکورد Northridge

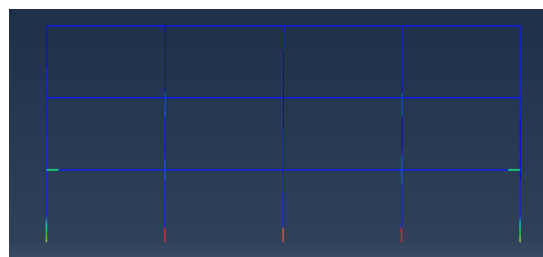


شکل ۶- محل کرنش‌های پلاستیک مدل ۲۰ طبقه ناشی از توالی لرزه‌ای تحت رکورد Northridge

پلاستیک، تنش‌های پس‌ماند و غیره دارای گریز بیشتری نسبت به سری اول بوده ولی به علت صفر شدن جابجایی‌ها و شاقول شدن، دارای گریز کمتر نسبت به حالت سوم می‌باشد. از آنجا که معیار صریحی برای خرابی سازه وجود ندارد، درصد گریزهای نسبتاً زیاد استخراج شده از تحلیل‌ها، می‌تواند معیاری برای خرابی شدید و فروریزش سازه باشد.

با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان به این نتیجه رسید که طبقات پایین‌تر، دارای گریز بیشتر نسبت به طبقات بالاتر هستند و با افزایش ارتفاع در هر مدل، نسبت گریز طبقات کاهش می‌یابد؛ به دلیل اینکه هر طبقه مجموع نیروهای برشی طبقات بالاتر از خود را تحمل می‌کند و بیشترین نیروی جانبی به طبقات پایین اعمال می‌شود، این نتیجه منطقی خواهد بود. همچنین از مقایسه بیشینه گریز در سه حالت تحلیل، استنتاج می‌شود که سری دوم تحلیل‌ها یعنی تحلیل‌هایی با اثرپذیری از تحریک قبلی و بدون شاقولی، به دلیل اثرات تجمعی زلزله‌های متوالی دارای بیشترین گریز پس‌ماند می‌باشد. اثرات باقی‌مانده از هر زلزله بر روی زلزله بعدی شامل جابجایی پس‌ماند، اعوجاج جزئی المان‌ها، خستگی مصالح، جابجایی پس‌ماند مفاصل پلاستیک و ... می‌باشد. همچنین با بررسی روند تغییر برش پایه در مدل‌ها، می‌توان دریافت که مقدار تفاوت برش پایه در سری دوم (بدون شاقولی) و سری سوم (با شاقولی) اندک است و با اختلاف جزئی، سری دوم برش پایه بیشتری را تحمل کرده است. همچنین سری اول تحلیل (بدون پس‌لرزه) برش پایه کمتری را ایجاد کرده است.

با توجه به شکل‌های (۴) تا (۶) که محل کرنش‌های پلاستیک، پس از اعمال رکورد با شدت  $1/4 \cdot g$  و قبل از اعمال رکورد با شدت  $1/6 \cdot g$  تحت رکورد Northridge را برای سازه‌های مورد تحلیل نشان می‌دهد، افزایش گریز سری دوم و سوم نسبت به گریز سری اول، به خاطر اثرات و خرابی‌های موجود در سازه ناشی از توالی زلزله‌ها، قابل توجه است.



شکل ۴- محل کرنش‌های پلاستیک مدل سه طبقه ناشی از توالی لرزه‌ای تحت رکورد Northridge

## ۴- نتیجه‌گیری

۱- در تمامی مدل‌ها، سری دوم تحلیل‌ها یعنی سازه‌های متاثر از پس‌لرزه و عدم شاقول شدن، به‌علت داشتن تأثیرات باقی‌مانده قابل توجه هر زلزله بر روی زلزله بعدی از جمله جابجایی پس‌ماند، کرنش پلاستیک، خستگی مصالح و...، دارای بیشترین گریز بیشینه و گریز پس‌ماند می‌باشند.

۲- سازه‌های شاقول شده به‌علت آسیب‌ها و جابجایی‌های پس‌ماند و ... دارای بیشینه گریز بیشتری نسبت به سری اول (تحت زلزله منفرد) بوده ولی به‌علت صفرشدن جابجایی‌ها و شاقول شدن، دارای بیشینه گریز کمتر نسبت به حالت دوم (دارای پس‌لرزه و بدون شاقولی) می‌باشند.

۳- مقادیر گریز بیشینه سازه‌های دارای پس‌لرزه با مقادیر گریز بیشینه سازه‌های بدون پس‌لرزه در شدت‌های کم زلزله، تفاوت مشهودی دارد اما تأثیر شاقولی کردن سازه در شدت‌های بالاتر و تعداد پس‌لرزه‌های بیشتر، بارزتر می‌باشد.

۴- در تمامی تحلیل‌های انجام شده، با افزایش تعداد طبقات، مقدار گریز بیشینه و گریز پس‌ماند افزایش می‌یابد به عبارت دیگر، سازه‌های بیست، نه و سه طبقه، به ترتیب بیشترین مقدار گریز را داشته‌اند و سازه‌های بلندمرتبه‌تر خرابی بیشتری را تجربه کرده‌اند.

۵- مشخصات پس‌لرزه شامل بیشینه شتاب، مدت زمان موثر و تعداد پس‌لرزه‌ها، پارامترهای تعیین‌کننده در افزایش میزان خرابی می‌باشند به گونه‌ای که با افزایش این متغیرها، افزایش بیشتری را در گریز بیشینه و گریز پس‌ماند شاهد هستیم.

۶- در مدل سه طبقه، وقوع پس‌لرزه در مقدار گریز بیشینه و پس‌ماند، تأثیر قابل توجهی ندارد اما در مدل نه و بیست طبقه (بر خلاف مدل سه طبقه)، وقوع پس‌لرزه‌ها در افزایش مقدار گریز بیشینه و پس‌ماند، تأثیر قابل توجهی داشته است.

۷- به طور کلی می‌توان تأثیر شاقولی سازه بر کاهش مقدار گریز را در مدل‌های مورد مطالعه، به شرح زیر بیان نمود:

- در سازه سه طبقه، شاقولی سازه منتج به کاهش ۱۰ درصدی گریز بیشینه و کاهش ۱/۵ درصدی گریز پس‌ماند شده است.
- در سازه نه طبقه، شاقولی سازه منتج به کاهش ۱۲ درصدی گریز بیشینه و کاهش ۱۸ درصدی گریز پس‌ماند شده است.
- در سازه بیست طبقه، شاقولی سازه منتج به کاهش ۱۳ درصدی گریز بیشینه و کاهش ۴۵ درصدی گریز پس‌ماند شده است.

کاهش گریز به میزان مقادیر ذکر شده، می‌تواند منجر به قرارگرفتن گریز طبقات در محدوده مجاز شده و به سرویس‌دهی سازه به مدت طولانی کمک شایانی نماید.

## ۵- مراجع

- [1] Faisal, A., Majid, T.A. and Hatzigeorgiou, G.D. (2013), "Investigation of story ductility demands of inelastic concrete frames subjected to repeated earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 44, pp. 42-53.
- [2] Wen, W., Zhai, C., Ji, D., Li, S. and Xie, L. (2017), "Framework for the vulnerability assessment of structure under mainshock-aftershock sequences", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 101, pp. 41-52.
- [3] Ruiz-García, J. (2010), "On the influence of strong-ground motion duration on residual displacement demands", *Earthquake and Structures*, Vol. 1, pp. 327-344.
- [4] Raghunandan, M. and Liel, A.B. (2013), "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Structural Safety*, Vol. 41, pp. 119-133.
- [5] Ruiz-García, J. (2012), "Mainshock-aftershock ground motion features and their influence in building's seismic response", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 16, pp. 719-737.
- [6] Song, R., Li, Y. and Van de Lindt, J.W. (2014), "Impact of earthquake ground motion characteristics on collapse risk of post-mainshock buildings considering aftershocks", *Engineering Structures*, Vol. 81, pp. 349-361.
- [7] Ruiz-García, J. and Negrete-Manriquez, J.C. (2011), "Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshock-aftershock seismic sequences", *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 621-634.
- [8] Lee, K. and Foutch, D.A. (2004), "Performance evaluation of damaged steel frame buildings subjected to seismic loads", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, pp. 588-599.
- [9] Ruiz-García, J., Yaghmaei-Sabegh, S. and Bojórquez, E. (2018), "Three-dimensional response of steel moment-resisting buildings under seismic sequences", *Engineering Structures*, Vol. 175, pp. 399-414.
- [10] Kawashima, K., MacRae, G. A., Hoshikuma, J. and Nagaya, K. (1998), "Residual displacement response spectrum", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, pp. 523-530.
- [11] Ruiz-García, J. and Miranda, E. (2006), "Residual displacement ratios for assessment of existing structures", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 35, pp. 315-336.
- [12] Liossatos, E. and Fardis, M.N. (2015), "Residual displacements of RC structures as SDOF systems", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 44, pp. 713-734.
- [13] Guo, J.W.W. and Christopoulos, C. (2018), "A probabilistic framework for estimating the residual drift of idealized SDOF systems of non-degrading conventional



- and damped structures”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 47, pp. 479–496.
- [14] Ruiz-García, J. and Guerrero, H. (2017), “Estimation of residual displacement ratios for simple structures built on soft-soil sites”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 100, pp. 555–558.
- [15] Hatzigeorgiou, G.D. and Beskos, D.E. (2009), “Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated earthquakes”, Engineering structures, Vol. 31, no. 11, pp. 2744–2755.
- [16] Hosseinpour, F. and Abdelnaby, A.E. (2017), “Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 98, pp. 222–234.
- [16] ETABS User’s Manual, Integrated Building Design Software, Computer and Structure Inc. Berkeley, USA.

[۱۷] مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، ”طرح و اجرای ساختمان های فولادی-مبحث دهم“، وزارت مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.

[۱۸] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۹۳)، ”آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰“، ویرایش چهارم، کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله.

