

# تأثیر جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی بر پتانسیل خرابی پیش‌رونده‌ی قاب‌های خمش‌ی فولادی تحت بار لرزه‌یی

Original Article

میلاذ فخاری‌نیا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رامسر

طاها بخشپوری\* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان

سعید پورزینلی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه گیلان

«خرابی پیش‌رونده» به خرابی موضعی که بر اثر عوامل مختلف در اعضای باربر سازه ایجاد و سپس به اعضای مجاور سرایت می‌کند و در کل سازه گسترش می‌یابد اطلاق می‌شود. یکی از عوامل موجد خرابی در سازه‌ها «زلزله» است. بر اثر زلزله‌های شدید ممکن است در اجزای سازه نیروهای مضاعف ایجاد شود که باعث گسیختگی عضو باربر و در نتیجه پدیده خرابی پیش‌رونده می‌شود. بدین منظور در این مطالعه، به مقایسه‌ی رفتار قاب‌های خمش‌ی فولادی با شکل‌پذیری متوسط، در دو حالت پایه ثابت و دارای جداسازی لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی، تحت خرابی پیش‌رونده و با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی در موقعیت‌های مختلف حذف ستون پرداخته‌ایم. افزودن سیستم جداساز لرزه‌یی به سازه باعث کاهش پاسخ سازه‌ها تحت زلزله می‌شود. همچنین نتایج تحلیل‌های خرابی پیش‌رونده نشان می‌دهد که افزایش تعداد طبقات سازه موجب کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده می‌شود و استفاده از سیستم جداساز لرزه‌یی تأثیر قابل توجهی در موضعی کردن خرابی‌ها تحت بارهای لرزه‌یی و جلوگیری از گسترش آنها در سازه دارد.

واژگان کلیدی: جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی، خرابی پیش‌رونده‌ی لرزه‌یی، قاب خمش‌ی فولادی متوسط.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر توجه محققین بر رفتار سازه‌ها و زیرساخت‌های ساخته شده در مناطق شهری، تحت حوادث مخرب طبیعی یا حوادث ساخته‌ی دست بشر (مانند زمین‌لرزه‌های بزرگ، آتش، انفجار گاز، طوفان‌های شدید، تصادفات یا ضربه‌های مخرب و انفجارهای تروریستی) متمرکز شده است. باید توجه داشت که یک حادثه‌ی تصادفی می‌تواند عاملی باشد برای ایجاد حوادثی چندین برابر شدیدتر همچون امواج سونامی شدید و فاجعه‌ی هسته‌یی فوکوشیما پس از وقوع زلزله‌ی بزرگ در شرق ژاپن (توکویو، ۲۰۱۱) یا فروپاشی کامل برج‌های دوقلو با برخورد ناشی از هواپیما در مرکز تجارت جهانی.<sup>[۱]</sup>

به‌عنوان تعریف، خرابی پیش‌رونده به خرابی تمام یا قسمت عمده‌یی از یک سازه اطلاق می‌شود که با گسیختگی موضعی در بخشی از سازه شروع شده و می‌تواند

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۲۳، پذیرش ۱۳۹۷/۴/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2018.50361.2301

پایداری کل سازه را تهدید کند. به‌طور دقیق‌تر این پدیده هنگامی به وجود می‌آید که بروز یک خرابی موضعی در یک عضو سازه‌یی، منجر به شکست اعضای مجاور آن و نهایتاً خرابی کل سازه یا خرابی نامتناسب بخش اعظم آن شود. از ویژگی‌های این پدیده آن است که خرابی نهایی متناسبی با خرابی اولیه ندارد. در بیشتر موارد، این خرابی جزئی که منجر به خرابی پیش‌رونده می‌شود، ناشی از بارهای غیرعادی است. بارهای غیرعادی بارهایی هستند که به‌طور معمول در طراحی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند. نخستین خرابی ثبت شده در قرن گذشته، تخریب بنای کلیسای مارک در جولای ۱۹۰۲ است. علاوه بر این، بسیاری از سازه‌ها به‌علت حوادث لرزه‌یی در طول عمر ساختمان، خرابی پیش‌رونده را تجربه کرده‌اند؛ برای نمونه خرابی ساختمان کایزر پس از زلزله‌ی نورث‌ریچ و خرابی ساختمان بانک توسعه‌ی کشاورزی شعبه بیجان چین پس از زلزله بیجان (۲۰۰۸) را می‌توان نام برد.<sup>[۱]</sup>

با توجه به اهمیت موضوع، محققین بسیاری چگونگی جلوگیری از گسترش خرابی اولیه ناشی از بارگذاری‌های شدید را که منجر به خرابی نامتناسب بخشی

موضعی کردن خرابی‌ها تحت بارهای لرزه‌یی و جلوگیری از گسترش آنها در سازه دارد.

در ادامه، پس از بیان ضرورت و مروری بر ادبیات موضوع در بخش سوم به جزئیات مدل‌سازی جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی و سازه‌ها می‌پردازیم. در بخش چهارم پس از بیان نحوه‌ی انجام تحلیل‌های استفاده شده به ارائه و تفسیر نتایج به دست آمده پرداخته‌ایم. در نهایت بخش پنجم به جمع‌بندی نتایج حاصله اختصاص یافته است.

## ۲. جداساز لرزه‌یی

زمانی که سازه در معرض بارهای غیرممتزیه چون ضربه، انفجار، آتش‌سوزی و غیره - که در فرایند طراحی معمولی در نظر گرفته نمی‌شود - قرار می‌گیرد، ممکن است آسیب‌پذیر باشد. در حین ارتعاشات زلزله و بر اثر عواملی مانند گسیختگی آبی میان‌قاب، وجود ستون کوتاه، پیچش در ساختمان، کمانش ستون‌ها یا ضعف طراحی و اجرا، ممکن است عضو از ساختمان - به ویژه ستون‌ها - آسیب ببیند و مقاومت خود را از دست بدهد و با ادامه‌ی بارگذاری به گسیختگی برسد. تحقیق بر خرابی پیش‌رونده را می‌توان به دو رویکرد مختلف طبقه‌بندی کرد: ۱. گسترش سیستم‌های سازه‌یی که مانع از خرابی پیش‌رونده شود؛ ۲. ایجاد یک روش تحلیلی و کارآمد.<sup>[۴]</sup> سیستم جداساز لرزه‌یی را می‌توان طبق رویکرد اول به‌عنوان یکی از روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده بررسی کرد که هدف اصلی این مطالعه است.

سیستم‌های جداساز لرزه‌یی یکی از روش‌های مؤثر برای محافظت از ساختمان‌ها در مقابل تأثیرات زلزله‌اند.<sup>[۷]</sup> انواع گوناگونی از وسایل جداساز لرزه‌یی در طی ۲۰ سال گذشته مورد استفاده قرار گرفته است: جداساز لاستیکی (با هسته‌ی سربی و بدون هسته‌ی سربی)، تکیه‌گاه اصطکاکی و تکیه‌گاه غلتکی. در میان انواع گوناگون سیستم‌های جداساز، سیستم جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی در نیوزلند، ژاپن و ایالات متحده‌ی آمریکا کاربرد زیادی داشته است. این تکیه‌گاه از لایه‌های لاستیکی و ورق‌های فولادی شامل یک یا چند هسته‌ی سربی که در سوراخی نصب می‌شود تشکیل شده است. هسته‌ی سربی در برش ایجاد شده تغییر شکل می‌دهد و در برابر زمین‌لرزه‌های کم و بادهای قوی، صلیبیت اولیه ایجاد می‌کند.

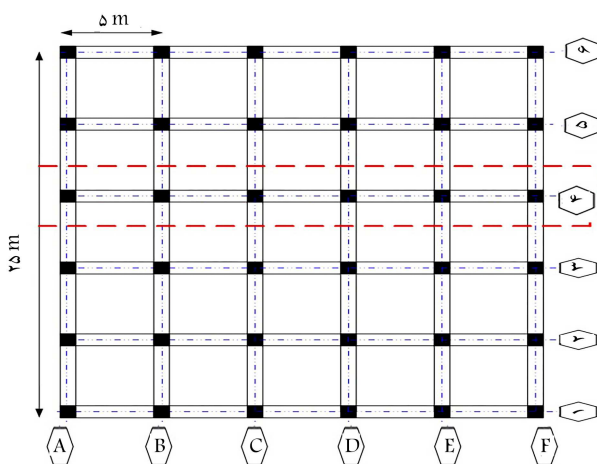
مطالعات گسترده‌ی پیرامون سیستم‌های جداساز لرزه‌یی با هدف مقاوم‌سازی سازه با پایه‌ی ثابت - که در معرض تحریکات لرزه‌یی قرار می‌گیرند - انجام شده است. تأثیر سیستم‌های جداسازی بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌ها عمدتاً از جوانب مختلف بررسی شده است. بنداری و همکاران<sup>[۸]</sup> (۲۰۱۷) به مطالعه‌ی عددی ساختمان‌های جداسازی شده تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک پرداختند. این مطالعه نشان داد که جداساز نقش مؤثری در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک ندارد. در سال ۲۰۱۷ تأثیر استفاده از جداساز لرزه‌یی در بهسازی سیلوهای صنعتی در مطالعه‌ی مقایسه‌یی<sup>[۹]</sup> بین عملکرد سازه‌ی بهسازی شده با سازه‌ی موجود با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده بررسی و نشان داده شد که پاسخ‌های سازه به طور وسیعی بعد از بهسازی کاهش یافته است. نوروزی و همکاران<sup>[۱۰]</sup> (۲۰۱۷) تأثیر جداساز لرزه‌یی در پاسخ نیاز لرزه‌یی ساختمان ۱۲ طبقه‌ی بتنی با سیستم قاب خمشی طراحی شده برای خاک‌های نوع II و III طبق استاندارد لرزه‌یی ایران، را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که جداساز تأثیر قابل توجهی در کاهش توزیع جابه‌جایی نسبی طبقات در ترازهای بالای سازه دارد.

از سازه می‌شود، بررسی کرده‌اند. جینکو کیم و تاوان کیم<sup>[۴]</sup> (۲۰۰۹) در مطالعه‌ی پتانسیل خرابی پیش‌رونده را در قاب‌های خمشی فولادی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها از روش مسیر جایگزین پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های GSA و DOD بر اساس تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و استاتیکی خطی بهره گرفتند. مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌های غیرخطی و خطی حاکی از پاسخ‌های سازه‌یی بزرگ‌تر برای تحلیل دینامیکی غیرخطی است. شایان ذکر است که نتایج حاصله به طور قابل ملاحظه‌یی وابسته به تغییرات بار اعمالی، مکان حذف ستون و تعداد طبقات است. مشهدی و سفاری<sup>[۱۴]</sup> (۲۰۱۷) تأثیر نسبت سختی ثانویه اعضا را بر ضریب بار دینامیکی در تحلیل غیرخطی سازه تحت حذف ستون بررسی کردند. آنها نشان دادند که با در نظر گرفتن سازه‌های فولادی قاب خمشی کوتاه و متوسط با طول دهانه و تعداد طبقات متفاوت، تأثیر قابل توجه سختی ثانویه بر ضریب بار دینامیکی به‌عنوان یک پارامتر اساسی مشهود است. توکلی و حسینی<sup>[۵]</sup> (۲۰۱۷) نیز تأثیر مشخصات پارامترهای زمین‌لرزه بر پتانسیل خرابی پیش‌رونده‌ی لرزه‌یی در قاب‌های خمشی فولادی را مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس مطالعه‌ی پتانسیل خرابی پیش‌رونده به محل حذف ستون و تعداد طبقات بستگی دارد و نیز پاسخ دینامیکی عضو حذف شده تحت بار زلزله کاملاً به ویژگی‌های زلزله مانند شدت آریاس (میزان انرژی وارد بر سازه)، بیشینه‌ی شتاب زمین و محتوای فرکانسی وابسته است. پتانسیل خرابی پیش‌رونده ساختمان چند طبقه‌ی بتنی نیز در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی سه‌بعدی و بر اثر دادن ستون در طول زلزله مورد بررسی قرار گرفته است.<sup>[۴]</sup> در این بررسی پارامترهایی نظیر محل حذف ستون در پلان و ارتفاع، حالت‌های بارگذاری و تأثیر دال سقف نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از بحرانی‌تر بودن حذف ستون تحت رویداد زلزله نسبت به حذف در بار ثقلی و تأثیر قابل توجه دال در توسعه‌ی عملکرد زنجیروار است.

با مروری دقیق‌تر بر ادبیات موضوع و با توجه به مواردی از مطالعات جدید صورت گرفته در این زمینه که به اجمال اشاره شد، می‌توان مشاهده کرد که بررسی توانایی سیستم‌های ساختمانی برای مقاومت در برابر خسارت تحت بارهای شدید همواره مورد علاقه‌ی محققین متعددی است. از آن‌جا که سازه‌ها ممکن است در معرض خرابی پیش‌رونده‌ی ناشی از بارهای غیرمعمول توأم با زمین‌لرزه قرار گیرند، بنابراین می‌توان نقش وسایل کنترل لرزه‌یی سازه‌ها همانند جداساز لرزه‌یی را در کاهش صدمات ناشی از حذف اعضای کلیدی و باربر سازه بررسی کرد. از این رو در این مقاله به دنبال مطالعه و بررسی تأثیر سیستم جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی در افزایش مقاومت لرزه‌یی و مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده تحت خرابی اعضای سازه‌یی در برابر بار ثقلی و لرزه‌یی، به‌عنوان یکی از متداول‌ترین انواع وسایل جداساز لرزه‌یی، هستیم. بدین منظور، در این پژوهش تأثیر جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی بر افزایش مقاومت سازه‌های فولادی تحت خرابی پیش‌رونده‌ی ناشی از بار لرزه‌یی مطالعه شده است. عملکرد جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی قرار گرفته در سازه‌های فولادی قاب خمشی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت خرابی پیش‌رونده مطابق دستورالعمل ۳ - ۰۲۳ - ۴ UFC با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی برای هر دو حالت پایه‌ی ثابت و جداسازی شده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای بررسی خرابی پیش‌رونده تحت بار لرزه‌یی استفاده شد و پارامترهای جابه‌جایی قائم، جابه‌جایی نسبی طبقات و انرژی مورد بررسی قرار گرفت. افزودن سیستم جداساز لرزه‌یی به سازه باعث کاهش پاسخ سازه‌ها تحت زلزله می‌شود. همچنین نتایج تحلیل‌های خرابی پیش‌رونده نشان می‌دهد که افزایش تعداد طبقات سازه موجب کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده می‌شود و استفاده از سیستم جداساز لرزه‌یی تأثیر قابل توجهی در

جدول ۱. مشخصات مقاطع المان سازه‌یی.

نوع سازه		طبقه ۱۲		طبقه ۸		طبقه ۴		طبقه
ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	
BOX ۴۰۰ × ۴۰۰ × ۳۰		BOX ۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۵	W ۲۱ × ۵۷	BOX ۲۴۰ × ۲۴۰ × ۲۲/۲	W ۱۸ × ۴۰	BOX ۲۲۰ × ۲۲۰ × ۲۲/۲	W ۱۸ × ۳۵	۱
BOX ۳۴۰ × ۳۴۰ × ۳۰	W ۲۱ × ۵۷	BOX ۲۶۰ × ۲۶۰ × ۲۵	W ۲۱ × ۴۴	BOX ۲۰۰ × ۲۰۰ × ۲۰	W ۱۴ × ۴۰		W ۱۲ × ۱۹	۲
BOX ۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۵		BOX ۲۲۰ × ۲۲۰ × ۲۲/۲	W ۱۸ × ۴۰					۳
		BOX ۲۰۰ × ۲۰۰ × ۲۲/۲	W ۱۸ × ۳۵					۴
BOX ۲۴۰ × ۲۴۰ × ۲۵								۵
BOX ۲۴۰ × ۲۴۰ × ۲۵	W ۲۱ × ۴۴	BOX ۲۰۰ × ۲۰۰ × ۲۰	W ۱۶ × ۲۶					۶
			W ۱۲ × ۱۹					۷
								۸
BOX ۲۴۰ × ۲۴۰ × ۲۲/۲	W ۱۸ × ۳۵							۹
	W ۱۴ × ۲۶							۱۰
								۱۱
BOX ۲۰۰ × ۲۰۰ × ۲۲/۲	W ۱۲ × ۱۹							۱۲



شکل ۱. پلان مدل‌های مورد مطالعه.

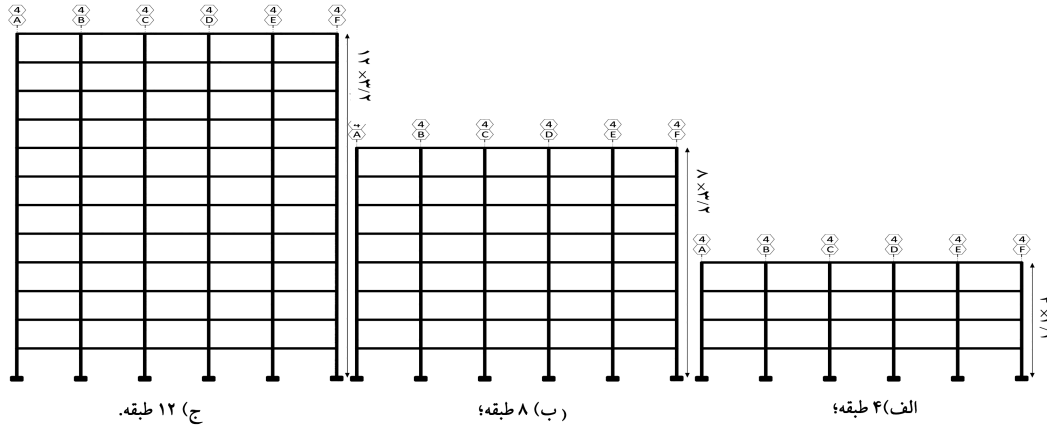
منطقه‌ی مورد مطالعه دارای شدت لرزه‌خیزی زیاد ( $A = 0.3$ ) و خاک آن از نوع III در نظر گرفته شده است. تمامی اتصالات و تکیه‌گاه‌ها صلب فرض شده‌اند. بارگذاری ثقلی براساس آیین‌نامه‌ی بارگذاری ایران (میچث ششم) [۱۳] انجام شده است. بار ثقلی طبقات به جز طبقه‌ی بام شامل  $420 \text{ kgf/m}^2$  بار مرده،  $180 \text{ kgf/m}^2$  بار جداسازی و  $200 \text{ kgf/m}^2$  بار زنده و برای طبقه‌ی بام شامل  $500 \text{ kgf/m}^2$  بار مرده و  $150 \text{ kgf/m}^2$  بار زنده است. برای محاسبه‌ی وزن مؤثر لرزه‌یی هر طبقه در هنگام زلزله کل بار مرده و ۲۰ درصد از بار زنده لحاظ شده است. سازه به صورت سه بعدی مدل‌سازی و طراحی شده است و به منظور ساده‌سازی و صرف زمان کمتر برای انجام تحلیل‌های غیرخطی یکی از قاب‌های میانی سازه برای تحلیل انتخاب شده است (شکل ۲). ابعاد مقاطع المان‌های سازه‌یی در جدول ۱ آورده شده است.

از آن‌جا که سازه‌ها ممکن است در معرض خرابی پیش‌رونده ناشی از بارهای غیر معمول توأم با زمین‌لرزه قرار گیرند، می‌توان نقش وسایل کنترل لرزه‌یی سازه‌ها همانند جداساز لرزه‌یی را در کاهش صدمات ناشی از حذف اعضای کلیدی و باربر سازه بررسی کرد. کیم و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۱ به بررسی عملکرد میراگرها در افزایش مقاومت لرزه‌یی و مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده تحت خرابی اعضای سازه‌یی در برابر بار ثقلی پرداختند؛ بنابراین، می‌توان به مطالعه و بررسی تأثیر سایر سیستم‌های کنترل سازه‌یی مانند جداساز لرزه‌یی در سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده پرداخت.

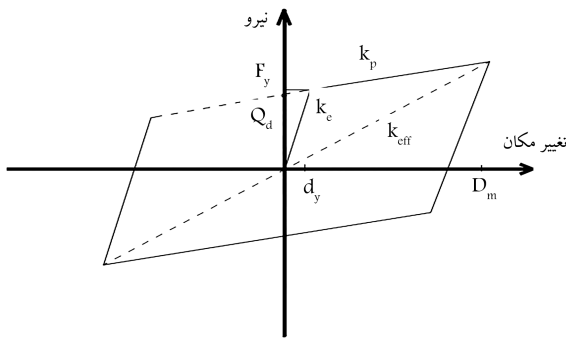
### ۳. مدل‌سازی

در این مطالعه، سه مدل ساختمانی فولادی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه که به ترتیب بیان‌گر سازه‌های کوتاه، متوسط و نسبتاً بلند است، در دو حالت جداسازی شده با سیستم‌های جداساز لرزه‌یی و پایه ثابت با کاربری مسکونی و با اهمیت متوسط در نظر گرفته شده است. پلان طبقات مطابق شکل ۱ در تمام طبقات دارای ۵ دهانه‌ی ۵ متری در هر دو جهت طولی و عرضی است. در تمام مدل‌های سازه‌یی ارتفاع تمام طبقات یکسان و برابر ۳/۲ متر است. سیستم باربر جانبی، قاب خمشی فولادی متوسط است. طراحی سازه در نرم‌افزار سپ و بر اساس آیین‌نامه‌ی فولاد ایران (میچث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۱]) است. برای بارگذاری لرزه‌یی سازه‌ها طبق آیین‌نامه‌ی لرزه‌یی ایران [۱۱] از روش تحلیل استاتیکی معادل استفاده شده است. در طراحی مقاطع برای داشتن طرح بهینه، سعی شده است که نسبت تنش‌ها کمتر یا مساوی و نزدیک به ۱ باشد و در نهایت سازه‌ها با توجه به ضوابط آیین‌نامه‌ی لرزه‌یی ایران برای جابه‌جایی نسبی مجاز نیز کنترل شدند.

مدل	$k_{eff}$ (KN/m)	$k_e$ (KN/m)	$k_p$ (KN/m)	$Q_d$ (KN)	$F_y$ (KN)	$\alpha$	$T_D$ (s)	$D_D$ (m)
۴ طبقه	۳۲۲٫۲۶	۲۸۸۳٫۴۵	۲۲۱٫۰۵	۳۲٫۲۸	۳۶٫۰۴	۰٫۰۷۶	۲٫۵	۰٫۲۴۴۴
۸ طبقه	۵۶۴٫۶۳	۴۲۰۲	۳۸۷٫۲۵	۵۹٫۱۷	۵۴٫۶۳	۰٫۰۹۲	۲٫۷	۰٫۲۶۴
۱۲ طبقه	۶۹۱٫۵	۷۰۰۰	۴۷۴٫۳	۹۷٫۸۶	۱۰۵	۰٫۰۶۷	۳	۰٫۲۹۶



شکل ۲. نمای مدل‌های مورد مطالعه.

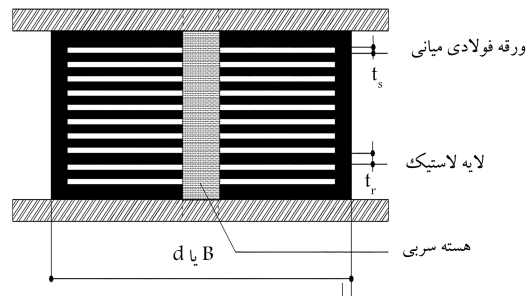


شکل ۴. رفتار غیرخطی جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی.

امتداد حلقه پسماند با محور نیرو بوده و بر مبنای تنش تسلیم سرب و مساحت هسته‌ی سربی تعیین می‌شود.

### ۲.۳. مشخصات جداساز

به طور کلی، طراحی جداساز مبتنی بر یک روش تکراری است. اولین گام طراحی جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی تعیین بیشینه جابه‌جایی است که جداساز تجربه خواهد کرد. جابه‌جایی جداسازها عمدتاً تحت تأثیر سه پارامتر پر بود هدف ساختمان جداسازی شده ( $T_D$ )، بار کل روی جداساز ( $W$ ) و سطح خطر لرزه‌ی است. طراحی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی در این مطالعه با توجه به نشریه‌ی ۵۲۳ (راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ی در ساختمان‌ها<sup>[۱۵]</sup>) انجام گرفته است. طراحی جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی را می‌توان به دو بخش طراحی هسته‌ی سربی و طراحی بخش لاستیکی تقسیم کرد. مشخصات مکانیکی جداسازهای طراحی شده در جدول ۲ شامل  $D_D$  تغییر مکان طرح،  $T_D$  زمان تناوب طرح،  $\alpha$  نسبت سختی پس از تسلیم به سختی اولیه و  $k_{eff}$  سختی مؤثر ارائه شده است. نتایج طراحی جداساز در جدول ۳ شامل  $h$  ارتفاع جداساز،  $N$  تعداد ورق‌های لاستیک،  $t_r$  ضخامت هر لایه‌ی لاستیک،  $t_s$  ضخامت هر ورق فولاد،  $N_S$  تعداد



شکل ۳. مشخصات جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی.<sup>[۱۵]</sup>

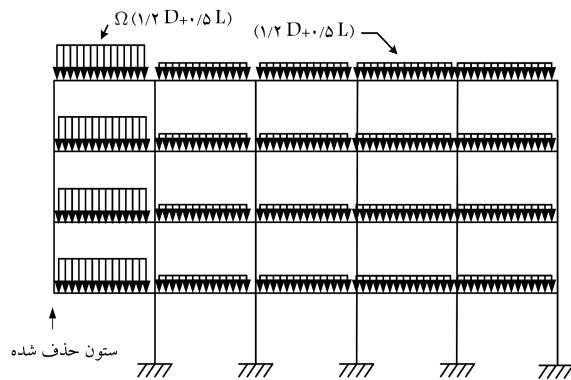
فولاد به کار گرفته شده در این مقاطع ST۳۷ است که مقدار مقاومت تسلیم و نهایی آن به ترتیب  $F_y = ۲۴۰۰ \text{ kgf/cm}^2$  و  $F_u = ۳۷۰۰ \text{ kgf/cm}^2$  در نظر گرفته می‌شوند.

### ۱.۳. مدل‌سازی جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی

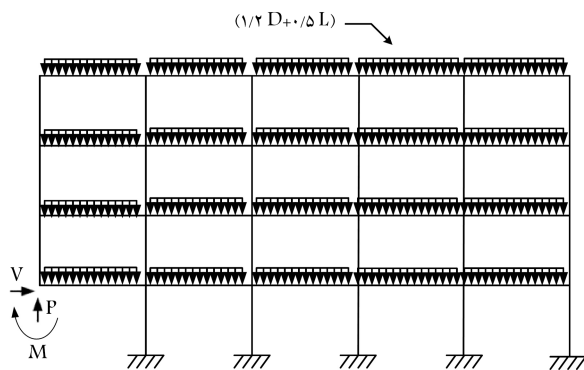
سیستم جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی از لایه‌های لاستیک برای تأمین شکل‌پذیری افقی و ورق‌های فولادی برای تأمین سختی قائم تشکیل شده است. یک نمونه جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی در شکل ۳ نمایش داده شده است. این جداساز دارای یک هسته‌ی سربی است که اثرات استهلاک انرژی هیستریزس را تأمین می‌کند. سیستم جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی قادر به نگهداری سازه در راستای قائم، تأمین انعطاف‌پذیری افقی همراه با نیروی بازگرداننده و تأمین میرایی هیستریزس مورد نیاز است. جداسازها با المان isolator در نرم‌افزار Perform - ۳D<sup>[۱۴]</sup> مدل می‌شوند و این جداسازها میرایی هیستریزس را از طریق تسلیم هسته‌ی سربی فراهم می‌کنند. جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی با در نظر گرفتن مشخصات مکانیکی که در مدل هیستریزس دوخطی نشان داده شده (شکل ۴)، بر اساس سه پارامتر  $k_e$  و  $k_p$  و  $Q$  مدل‌سازی می‌شود.  $k_e$  سختی کشسان،  $k_p$  سختی پس از تسلیم و  $Q_d$  مقاومت مشخصه است که محل برخورد

جدول ۳. ابعاد به دست آمده از طراحی جداساز.

مدل	h(cm)	N	T <sub>r</sub> (cm)	N <sub>s</sub>	t <sub>s</sub> (cm)	t <sub>tp</sub> (cm)	D <sub>p</sub> (cm)	d(cm)
۴ طبقه	۴۵	۲۴	۰٫۷	۲۳	۱	۲٫۵	۶	۳۰
۸ طبقه	۴۰	۱۸	۱	۱۷	۱	۲٫۵	۸	۴۰
۱۲ طبقه	۳۸٫۳	۲۰	۱	۱۹	۰٫۷	۲٫۵	۱۰	۵۰



شکل ۶. نحوه اعمال بارهای تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش قائم.

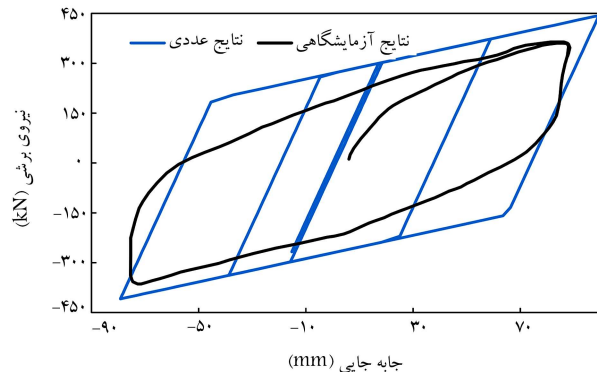


شکل ۷. نحوه اعمال بارهای تحلیل دینامیکی غیرخطی.

تأثیر حذف ستون بر مدل غیرخطی توسط دو روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش قائم و دینامیکی غیرخطی بررسی شود. در این مطالعه، برای انجام تحلیل‌های خرابی پیش‌رونده از ترکیب بار قائم پیشنهادی دستورالعمل ۳ - ۲۳ - ۴ - UFC<sup>[۱۷]</sup> استفاده می‌شود.

برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش قائم ترکیب بار ثقلی  $\Omega(1/2D + 0/5L)$  به کار گرفته می‌شود ( $\Omega$  ضریب بار دینامیکی است). بارهای ضریب‌دار مطابق شکل ۶ فقط در دهانه‌هایی که ستون حذف شده است اعمال می‌شود. در این روش تحلیل، با افزایش تدریجی جابه‌جایی قائم در محل ستون حذف شده، مقاومت سازه در برابر این تغییر شکل بررسی می‌شود. در هر مرحله طی تحلیل پوش قائم، مقدار بار معادل متناظر با جابه‌جایی قائم محل ستون حذف شده تعیین می‌شود. نسبت بار در هر مرحله به بار مشخص شده را «ضریب بار» می‌نامند.

برای انجام روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بار ثقلی، بار  $(1/2D + 0/5L)$  به طور یکنواخت در همه دهانه‌ها مطابق شکل ۷ اعمال می‌شود و نیروی محوری ستون قبل از این که حذف شود محاسبه و سپس ستون با بارهای نقطه‌یی معادل نیروهای عضو جایگزین می‌شود. برای شبیه‌سازی پدیده حذف ناگهانی ستون



شکل ۵. صحت سنجی نمودار غیرخطی جداساز.<sup>[۱۶]</sup>

ورق‌های فولاد، ضخامت ورق‌های فولادی بالا و پایین جداساز،  $d_p$  قطر هسته‌ی سربی و  $d$  قطر جداساز ارائه شده است.

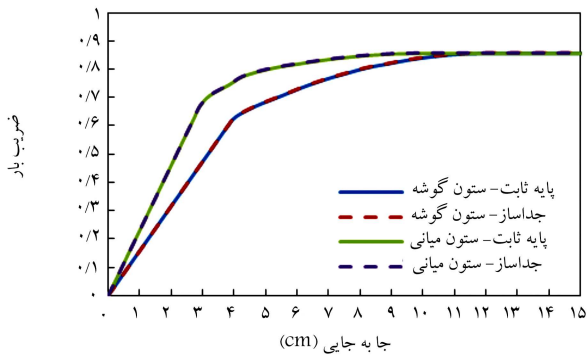
### ۳.۳. صحت‌سنجی جداساز طراحی شده با پژوهش آزمایشگاهی

به‌منظور صحت‌سنجی نرم‌افزار ۳D - Perform در تحلیل جداساز طراحی شده در این مطالعه، از جداساز بررسی شده در پژوهش آزمایشگاهی توسط رابینسون<sup>[۱۶]</sup> استفاده شده است. در این بررسی آزمایشگاهی رفتار هیستریزیس جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی مناسب برای محافظت سازه در طی زلزله‌ها، با ابعاد و هندسه‌های متفاوت تحت روش‌های بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. بخشی از ارزیابی بر روی یک جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی با قطر ۶۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۱۹۷ میلی‌متر، قطر هسته‌ی سربی ۱۷۰ میلی‌متر، با سختی برشی ثانویه ۱/۷۵ کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع و سختی محوری ۶۰۰ کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع تحت جابه‌جایی نهایی ۹۱ میلی‌متر تحت بار محوری ۳۱۵۰ کیلو نیوتن و نیروی برشی هارمونیک با فرکانس ۰٫۹ هرتز انجام شده است. در شکل ۵ مقایسه‌ی حلقه‌ی هیستریزیس به دست آمده از نرم‌افزار ۳D - Perform و داده‌های تجربی موجود نشان داده شده است.

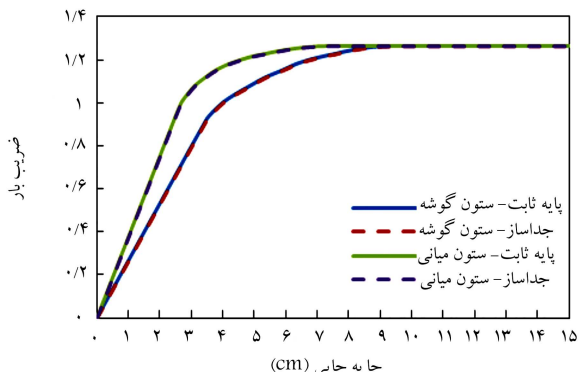
چنان که مشاهده می‌شود، نتایج عددی با اطلاعات تجربی همخوانی دارد. در این مطالعه از مدل ساده شده‌ی غیرخطی فولاد استفاده شده است که اثر زوال سختی و مقاومت را در نظر نمی‌گیرد. مدل‌های رفتاری غیرخطی گوناگونی وجود دارد که می‌توانند با لحاظ کردن این اثرات، منجر به پاسخ بهتر شوند.

### ۴. روش تحلیل

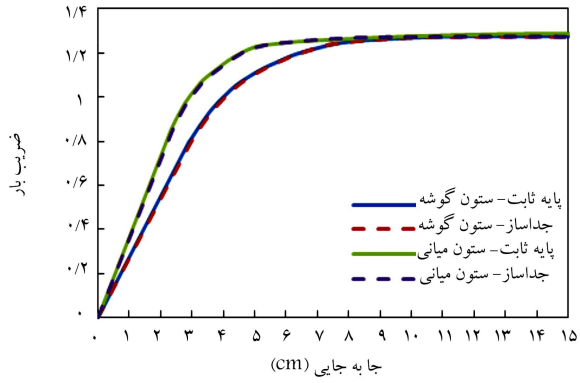
برای بررسی تأثیر سیستم‌های جداسازی با خرابی پیش‌رونده که به علت طراحی و ساخت ضعیف ایجاد شده است ابتدا باید مقاومت سازه‌ها در مقابل خرابی پیش‌رونده تحت بارهای ثقلی بررسی شود. بدین منظور، باید یک عضو باربر (در اینجا ستون) با توجه به ضوابط دستورالعمل ۳ - ۲۳ - ۴ - UFC<sup>[۱۷]</sup> حذف شود و سپس



الف) سازه ۴ طبقه؛



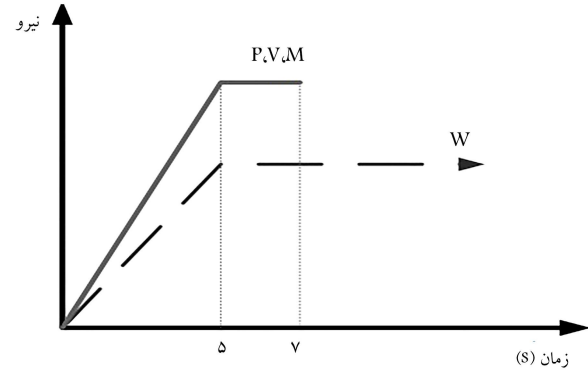
ب) سازه ۸ طبقه؛



ج) سازه ۱۲ طبقه.

شکل ۹. نمودار نیرو - تغییر مکان تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش عمودی.

در موقعیت‌های گوشه و میانی انجام شد. ترکیب بار قائم مطابق دستورالعمل ۳ - ۲۳ - ۴ UFC به صورت تدریجی طی ۵۰ گام به سازه اعمال می‌شود. مقاومت خرابی پیش‌رونده در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش قائم، با ضریب بار متناظر با جابه‌جایی قائم محل حذف ستون در هر مرحله بیان می‌شود. ضریب بار ۱ بیان می‌دارد که نیروی حاصل از پوش قائم به بار تعیین شده در دستورالعمل ۳ - ۲۳ - ۴ UFC می‌رسد، که ترکیب بار مرده و بار زنده در ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی است. در شکل ۹ نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش قائم مدل‌های سازه‌ی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با جداساز لرزه‌ی و پایه ثابت نشان داده شده، که ستون در طبقه‌ی اول آنها در حالت گوشه و میانی حذف شده است. محور قائم و افقی به ترتیب بیان‌گر ضریب بار و تغییر مکان قائم محل حذف ستون بر حسب سانتی‌متر



شکل ۸. تابع حذف ستون در تحلیل دینامیکی غیرخطی.

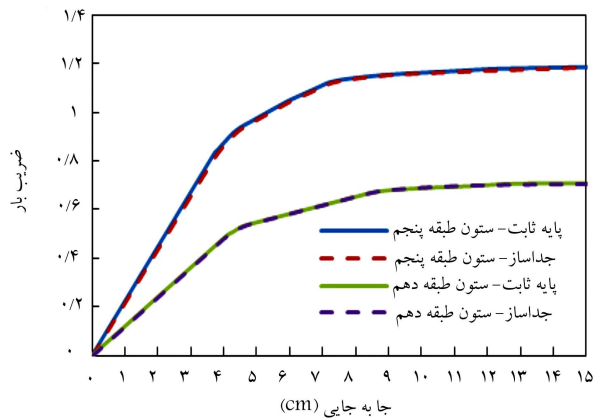
(مطابق شکل ۸ که متغیرهای  $P$  و  $M$  به ترتیب نیروی برشی، نیروی محوری و لنگر ستون حذف شده را نشان می‌دهند)، به همراه بار ثقلی ( $W$ ) به مدت ۵ ثانیه به صورت خطی افزایش می‌یابند تا به مقدار نهایی خود برسند و ۲ ثانیه ثابت نگه داشته می‌شوند تا سیستم به شرایط پایداری برسد.<sup>[۱۷]</sup> سپس در مدت زمان کوتاهی، که در دستورالعمل ۳ - ۲۳ - ۴ UFC پیشینه‌ی این زمان برابر با ۰٫۱ زمان تناوب سازه است، به طور ناگهانی حذف می‌شوند. تحلیل خرابی پیش‌رونده تحت بار لرزه‌ی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام می‌شود و در آن حذف ستون در ابتدای نیروی زلزله اتفاق می‌افتد.

برای در نظر گرفتن اثر بارهای لرزه‌ی بر قاب‌ها با حذف ستون، انجام تحلیل دینامیکی ضروری است. تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از روش تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انتگرال‌گیری مستقیم در نرم‌افزار ۳D - Perform انجام می‌شود که عموماً به خوبی همگرا شده و نتایج خوبی می‌دهد. میرایی متناسب با جرم و سختی برابر ۵٪ در تمام مودها در نظر گرفته شده است. برای انجام تحلیل از ۳ رکورد زمین‌لرزه‌های دور از گسل شامل دوزچی ترکیه، امیرالولایی و نورث‌ریچ به عنوان حرکت‌های ورودی زمین استفاده می‌شود (جدول ۴). پیشینه شتاب زمین در رکورد‌های زلزله به شتاب ۰٫۳ g مقیاس شدند و در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به کار گرفته شدند. شتاب‌نگاشت‌های زلزله بر پایه‌ی طیف استاندارد آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰<sup>[۱۲]</sup> مقیاس می‌شود. برای این کار ابتدا لازم است طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها به دست آید. آنگاه بر پایه‌ی روند مطرح شده در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ضریب مقیاس از مقایسه‌ی طیف پاسخ میانگین شتاب‌نگاشت‌ها و طیف طراحی قابل محاسبه است. دقت تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله چگونگی انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای تحلیل است. آیین‌نامه‌های زلزله به‌عنوان نمونه‌ی استاندارد ۲۸۰۰<sup>[۱۲]</sup> معیارهای کلی برای انتخاب زلزله‌های مناسب را ارائه می‌دهند. شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا باشند. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی باید به‌نحوی انتخاب شوند که بزرگی، فاصله‌ی گسل‌ها و سازوکار منبع زمین‌لرزه‌ی آنها متناسب با زمین‌لرزه‌ی طرح و محل ساخت سازه باشد. در این مطالعه که هدف صرفاً بررسی خرابی تحت زلزله است، نکات دور بودن از گسل و نوع خاک و همگرا شدن نتایج در انتخاب این شتاب‌نگاشت‌ها دخیل بوده است.

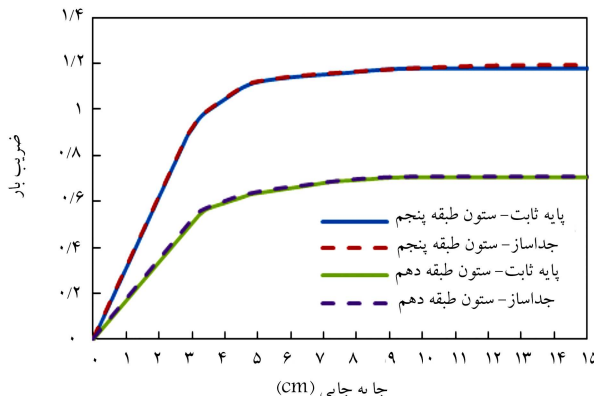
۱.۴. ظرفیت مقاومت قاب در برابر خرابی پیش‌رونده تحت بار ثقلی  
تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش قائم با حذف ستون در طبقه‌ی اول قاب ساختمانی

جدول ۴. مشخصات رکوردهای زمین لرزه.

رکورد زلزله	ایستگاه زلزله	بزرگا ( $M_w$ )	فاصله از گسل (km)	سرعت موج برشی (m/s)
Imperial Valley ۱۹۷۹/۱۰/۱۵	Plaster City	۶٫۵۳	۳۰٫۳۳	۳۱۶٫۶۴
Northridge ۱۹۹۴/۰۱/۱۷	Anaverde Valley City R	۶٫۶۹	۳۷٫۶۷	۳۴۹٫۶
Duzce, Turkey ۱۹۹۹/۱۱/۱۲	Cekmece	۷٫۱۴	۱۸۲٫۷۸	۳۴۶



الف) حذف ستون گوشه؟



ب) حذف ستون میانی.

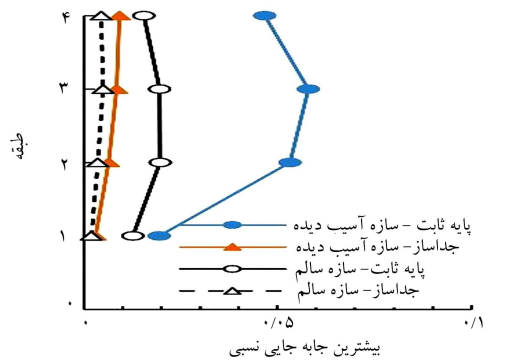
شکل ۱۰. نمودار نیرو- تغییر مکان تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش عمودی سازه ۱۲ طبقه.

۲.۴. ظرفیت مقاومت قاب در برابر خرابی پیش‌رونده تحت بار لرزه‌یی در بخش پیش نتایج تحلیل‌های خرابی پیش‌رونده برای سازه‌ها در دو حالت جداسازی شده و پایه ثابت حاصل از تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی پوش عمودی تحت بارهای ثقیل بیان شد و نتایج یکسان برای سازه‌های جداسازی شده و پایه ثابت به دست آمد. در این بخش خرابی پیش‌رونده تحت بارهای لرزه‌یی بر اساس تحلیل دینامیکی غیرخطی بررسی می‌شود. مدل‌های سازه‌یی تحت شتاب‌نگاشت‌هایی که در جدول ۳ معرفی شده‌اند و نیز تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از

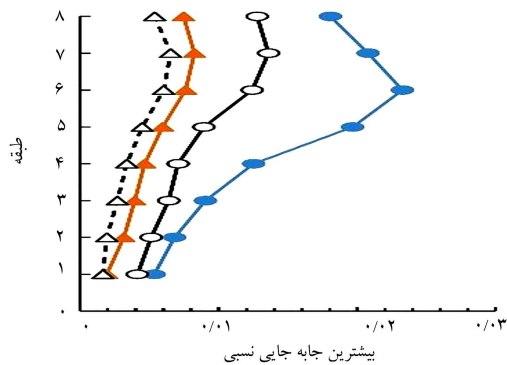
است. بررسی شکل ۹ که نشان‌گر نتایج برای ضریب بار در هر دو سازه جداسازی شده و پایه ثابت است، نشان می‌دهد که ضریب بار حذف ستون گوشه و میانی در سازه‌های جداسازی شده و پایه ثابت تفاوتی ندارند و منحنی پوش قائم آنها بر هم منطبق است. ضریب بار در حالت حذف ستون گوشه در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب برابر ۰٫۸۹، ۱٫۲۶ و ۱٫۲۸ است و با حذف ستون میانی، به ترتیب برابر ۰٫۹، ۱٫۳۰ و ۱٫۲۹ است. می‌توان مشاهده کرد که افزایش تعداد طبقات باعث افزایش ضریب بار و در نتیجه افزایش مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده در هر دو موقعیت حذف ستون می‌شود. اختلاف مشهود در ضریب بار ناشی از افزایش عملکرد زنجیروار اعضای سازه با افزایش تعداد طبقات است.

نتایج مطرح شده در شکل ۹ مربوط به بررسی مقاومت خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها در اثر حذف ستون در طبقه اول بوده است. همچنین، سازه ۱۲ طبقه که بیان‌گر سازه‌ی نسبتاً بلند است، در برابر حذف ستون در طبقه اول در دو موقعیت مکانی گوشه و میانی ایمن بوده‌اند. شکل ۱۰ بررسی مقاومت سازه ۱۲ طبقه در برابر حذف ستون در طبقات پنجم و دهم را نشان می‌دهد. سازه ۱۲ طبقه در حذف ستون طبقه دهم ضریب بار ۰٫۷۱ را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر خرابی پیش‌رونده در این موقعیت حذف ستون است. مقاومت در برابر خرابی در سازه ۱۲ طبقه در حالت حذف ستون در طبقه پنجم به دلیل بیشتر بودن اعضای مشارکت‌کننده در باز توزیع نیرو نسبت به حذف ستون در طبقه دهم بیشتر است. مانند سایر نتایج، برای حالت حذف ستون در سایر طبقات پاسخ سازه جداسازی شده و پایه ثابت یکسان است.

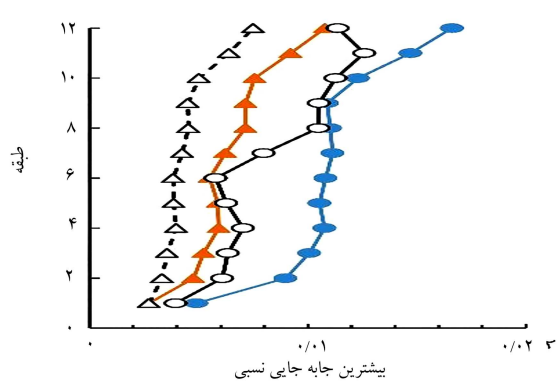
در شکل ۱۱ جابه‌جایی قائم محل حذف ستون تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی را برای دو حالت حذف ستون گوشه و میانی نشان می‌دهد. مقادیر جابه‌جایی قائم در سازه‌هایی که ستون گوشه در آنها حذف شده است نسبت به حالتی که ستون میانی حذف می‌شود بیشتر است. به دلیل افزایش کشش زنجیروار تیرها، زمانی که ستون میانی حذف می‌شود جابه‌جایی قائم کمتر از زمانی است که ستون گوشه حذف می‌شود. چنان که در نتایج تحلیل استاتیکی پوش عمودی مشاهده شد، سازه ۴ طبقه به دلیل ضریب بار کمتر از ۱ مستعد وقوع خرابی پیش‌رونده است که تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی به ناحیه‌ی تخریب رسید. در شکل ۱۲ تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی قائم محل حذف ستون در طبقه اول، پنجم و دهم، در حالت گوشه و میانی نشان داده شده است. پاسخ سازه با حذف ستون در طبقه پنجم در دو حالت گوشه و میانی بیشتر از حالتی است که ستون در طبقه اول حذف می‌شود؛ با حذف ستون در طبقه دهم سازه با خرابی مواجه می‌شود. شدت جابه‌جایی قائم باعث می‌شود که مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده به شدت کاهش یابد.



بیشترین جابه‌جایی نسبی



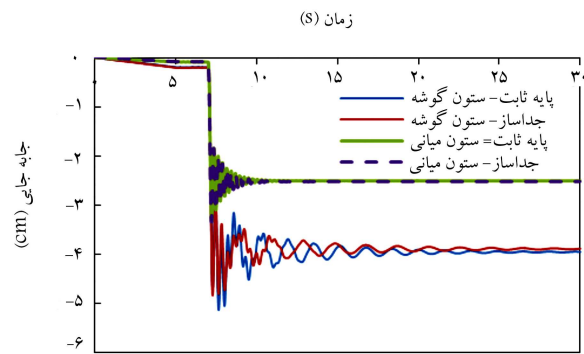
بیشترین جابه‌جایی نسبی



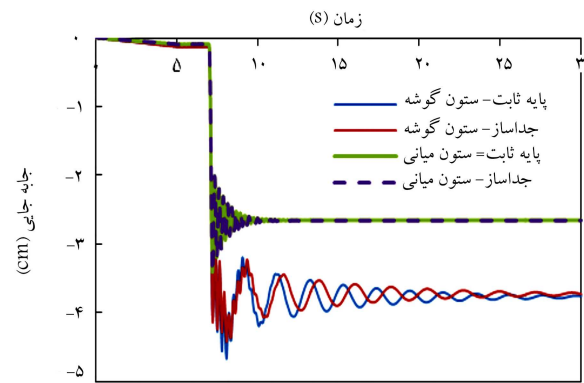
بیشترین جابه‌جایی نسبی

شکل ۱۳. بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات.

نرم‌افزار ۳D - Perform قرار گرفته‌اند. در شکل ۱۳ بیشترین پاسخ جابه‌جایی نسبی داخلی طبقات تحت سه شتاب‌نگاشت اعمالی به مدل‌های سازه‌ی نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، با حذف ستون در طبقه‌ی اول، جابه‌جایی نسبی سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه با پایه ثابت بسیار کمتر است. نتایج به دست آمده از پاسخ جابه‌جایی قائم محل حذف ستون برای سازه‌های جداسازی شده و پایه ثابت تحت بار ثقلی تفاوت ناچیزی داشته‌اند. شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ تاریخچه‌ی زمانی حاصل از پاسخ جابه‌جایی قائم محل حذف ستون در طبقه اول را تحت بارهای لرزه‌ی امپریالوالی، نورث‌ریچ و دوزچی نشان می‌دهند. چنان‌که مشاهده می‌شود، سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های با پایه ثابت پس از گذشت مدتی از لحظه‌ی آغازین حذف ستون تفاوت چندانی در جابه‌جایی قائم محل حذف ستون ندارند، اما مشاهده می‌شود با افزایش زمان که سازه تحت تأثیر شتاب‌های بزرگ‌تر زلزله قرار می‌گیرد، تأثیرگذاری جداساز قابل مشاهده هست، در

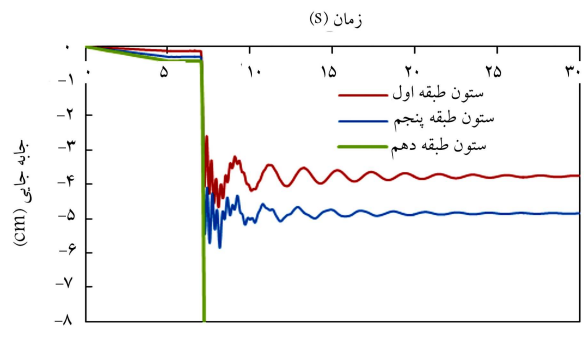


الف) سازه ۸ طبقه؛

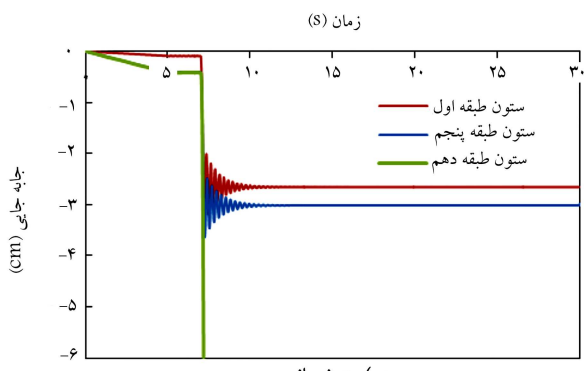


ب) سازه ۱۲ طبقه.

شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تغییر مکان قائم محل حذف ستون.



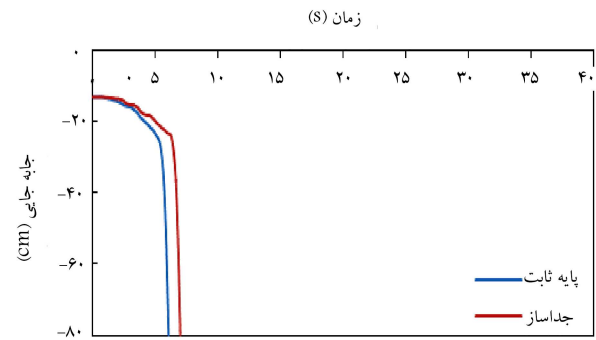
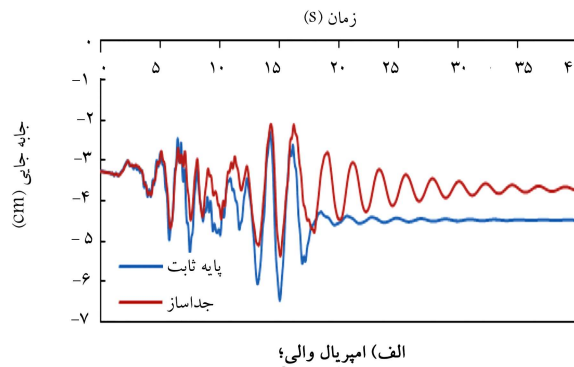
الف) ستون گوشه؛



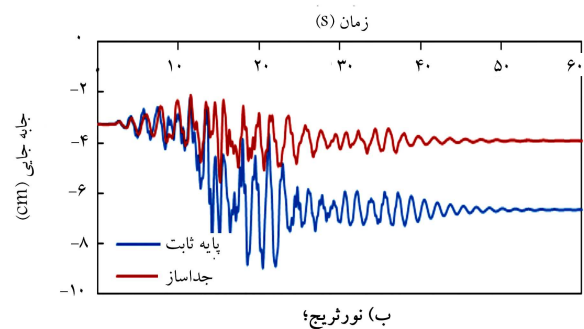
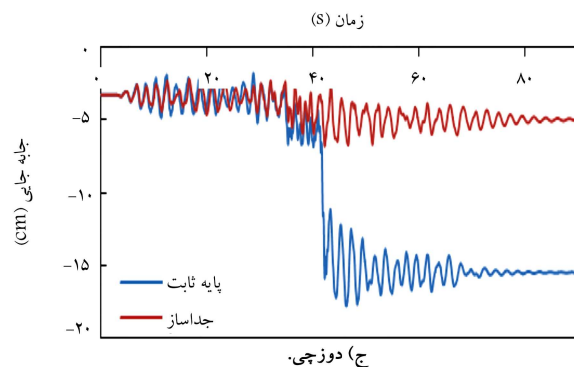
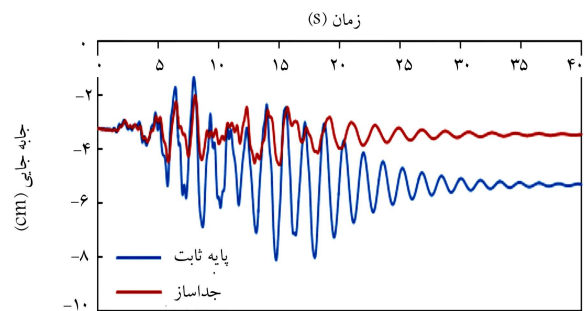
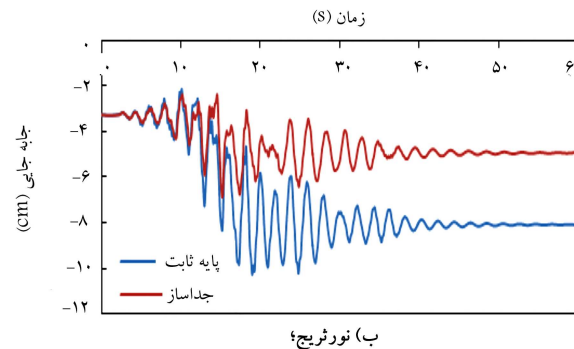
ب) ستون میانی.

شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تغییر مکان قائم محل حذف ستون طبقات مختلف سازه ۱۲ طبقه.

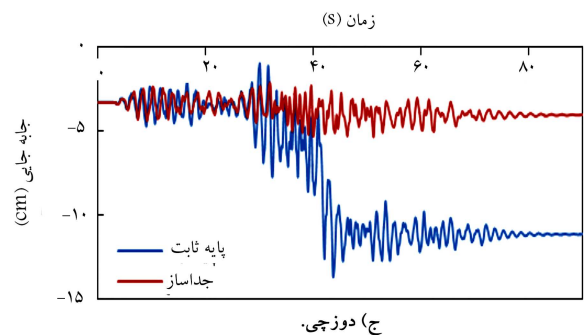




شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان قائم محل حذف ستون سازه ۴ طبقه تحت زلزله امپریالوالی.



شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان قائم محل حذف ستون سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله.



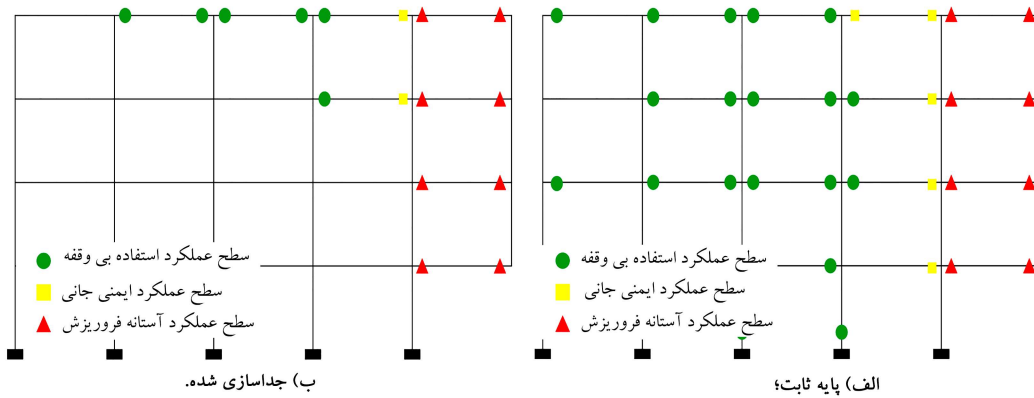
شکل ۱۵. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان قائم محل حذف ستون سازه ۸ طبقه تحت زلزله.

قائم کاهش می‌یابد. جداساز لرزه‌یی به دلیل ایجاد انعطاف پذیری افقی در سازه‌ها مانع از افزایش بسیار زیاد تغییر شکل قائم محل حذف ستون نسبت به حالت پایه ثابت می‌شود.

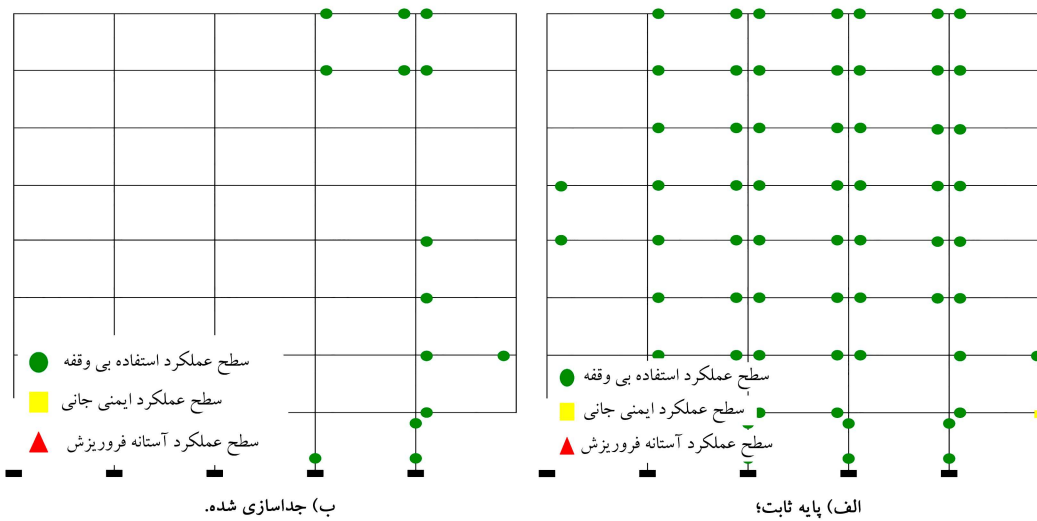
با بررسی رفتار سازه تحت بار لرزه‌یی، در واقع زلزله‌ها نه تنها می‌توانند عامل راه‌اندازی و شروع خرابی باشند، بلکه باعث پیشرفت خرابی در اعضا نیز می‌شوند. نیروهای افقی زلزله باعث افزایش نیروهای داخلی اعضا شده و با توجه به تسلیم شدن تیر باعث افزایش تغییر مکان قائم تیر می‌شوند.

در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ مفاصل تشکیل شده در سازه‌های پایه ثابت و جداسازی شده تحت خرابی ناشی از بار لرزه‌یی نشان داده شده است. مفاصل نشان داده شده در آخرین گام از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی استخراج شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود، سازه ۴ طبقه با پایه ثابت، در هر حالت حذف ستون گوشه مفاصل در سطح عملکردی آستانه فروریزش در دهانه‌ی آسیب دیده تشکیل شده و نشان می‌دهد سازه دچار خرابی شده است. برخلاف نتایج به دست آمده از

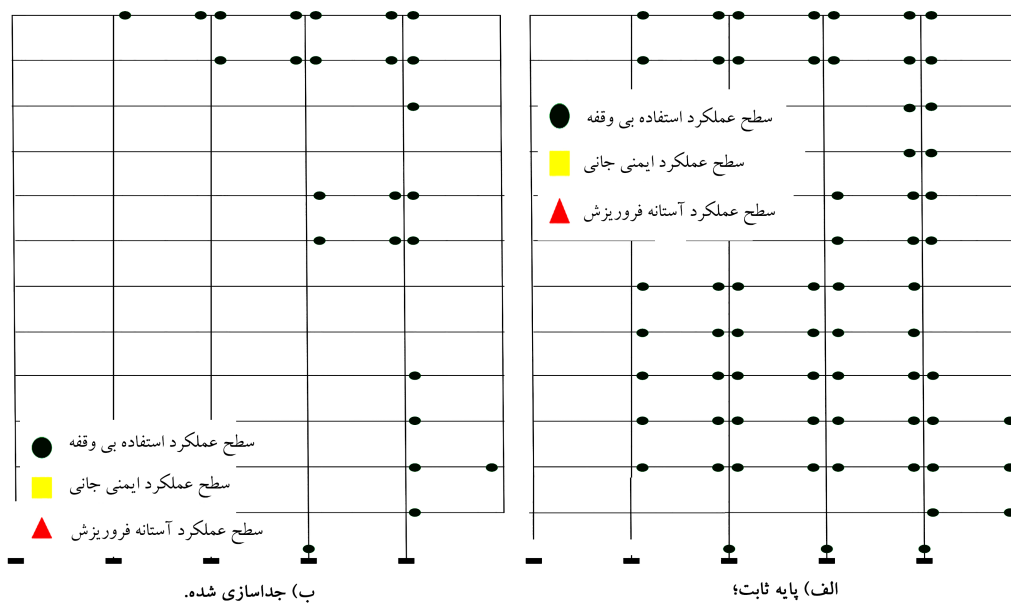
نتیجه می‌توان بیان کرد که سازه‌های جداسازی شده در طول زلزله کمتر تحت تأثیر افزایش تغییر شکل قائم در محل حذف ستون قرار می‌گیرند. سازه ۴ طبقه تحت خرابی لرزه‌یی دچار فروریزش می‌شود (شکل ۱۴). در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ هر دو مدل سازه‌یی جداسازی شده و پایه ثابت با افزایش تعداد طبقات پاسخ جابه‌جایی



شکل ۱۷. مفاصل تشکیل شده در سازه ۴ طبقه تحت خرابی پیش‌رونده‌ی لرزه‌ی بی.



شکل ۱۸. مفاصل تشکیل شده در سازه ۸ طبقه تحت خرابی پیش‌رونده‌ی لرزه‌ی بی.



شکل ۱۹. مفاصل تشکیل شده در سازه ۱۲ طبقه تحت خرابی پیش‌رونده‌ی لرزه‌ی بی.

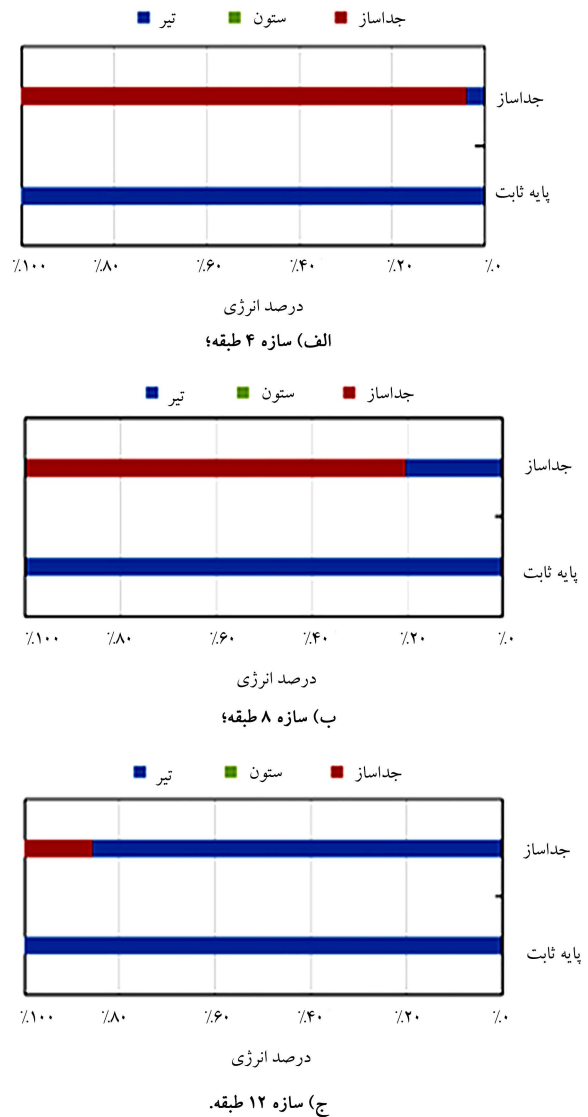
در دهانه‌های سالم شده است. به همین دلیل، سطح عملکرد ایمنی جانی تحت بارهای لرزه‌یی در این سازه‌ها حفظ شده است و بنابراین سازه‌هایی را که تحت افزایش ترکیب بارهای قائم  $۰.۲۳ - ۰.۳ - ۰.۴$  UFC در برابر خرابی پیش‌رونده کاملاً ایمن‌اند می‌توان با به‌کارگیری جداساز لرزه‌یی در برابر بارهای لرزه‌یی ایمن نگه داشت و مانع از گسترش خرابی در کل سازه شد.

شکل ۲۰ میزان درصد انرژی جذب شده سازه در دو حالت پایه ثابت و جداسازی شده تحت بارهای لرزه‌یی اعمالی به سازه در حالت حذف ستون را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از جداساز لرزه‌یی سبب کاهش میزان انرژی جذب شده توسط سازه و در نتیجه باعث افزایش پایداری سازه تحت بار لرزه‌یی می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل ضوابط تیر ضعیف و ستون قوی در این سازه، بیشترین انرژی جذب شده توسط تیرها صورت می‌گیرد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر سیستم‌های جداساز لرزه‌یی در افزایش ظرفیت مقاومت سازه‌های ساختمانی فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده و زمین‌لرزه مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای انجام این مطالعه از مدل‌سازه‌یی قاب خمشی فولادی متوسط ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در دو حالت جداسازی شده با جداساز لرزه‌یی لاستیکی با هسته‌ی سربی و پایه ثابت استفاده شده است. سپس، نتایج به دست آمده از روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی تحت زمین لرزه‌های امیرالوالی، نورث‌ریچ و دوزچی ترکیه و به منظور بررسی عملکرد جداساز لرزه‌یی در سازه‌ها در مقایسه با سازه‌های پایه ثابت در برابر رویدادهای لرزه‌یی مقایسه شده‌اند. برای بررسی مقاومت مدل‌های سازه‌یی در برابر خرابی پیش‌رونده از روش‌های تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی تحت بار ثقلی پیشنهادی دستورالعمل  $۰.۳ - ۰.۲۳ - ۰.۴$  UFC و دینامیکی غیرخطی تحت بارهای لرزه‌یی با حذف ستون در طبقه اول و سایر طبقات در دو موقعیت گوشه و میانی استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت است از:

۱. پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های پایه ثابت و جداسازی شده در حالت‌های حذف ستون میانی و گوشه با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی مطابق بارگذاری دستورالعمل  $۰.۳ - ۰.۲۳ - ۰.۴$  UFC یکسان است. ضرب بار به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌داون با افزایش تعداد طبقات سازه و نیز افزایش اعضای مشارکت‌کننده در توزیع بار محل عضو - که باعث افزایش نامعینی سازه و در نتیجه توزیع بهتر نیرو بعد از حذف عضو می‌شود - افزایش می‌یابد.
۲. مقادیر جابه‌جایی قائم محل حذف ستون تحت بار ثقلی در سازه‌هایی پایه ثابت و جداسازی شده مشابه است. این مقدار در سازه‌هایی که ستون گوشه در آنها حذف شده است نسبت به حالتی که ستون میانی حذف می‌شود بیشتر است که به دلیل افزایش کنش زنجیروار تیرها، زمانی که ستون میانی حذف می‌شود جابه‌جایی قائم کمتر از زمانی است که ستون گوشه حذف می‌شود. همچنین حذف ستون در طبقات بالاتر باعث جابه‌جایی قائم بیشتر محل حذف ستون می‌شود.
۳. جابه‌جایی نسبی طبقات سازه‌های جداسازی شده تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بارهای لرزه‌یی نسبت به سازه با پایه ثابت بسیار کمتر است. در سازه‌های کوتاه تأثیر جداساز بر کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات بیشتر از



شکل ۲۰. درصد انرژی جذب شده توسط تیر، ستون و جداساز.

تحلیل‌های مربوط به استفاده از جداساز در سازه‌های سالم که می‌گویند جداسازی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌های کوتاه مؤثرتر است، در این بخش به دلیل مقاومت بسیار کم سازه ۴ طبقه در برابر خرابی پیش‌رونده، سازه از آغاز خرابی وارد مرحله آستانه فروریزش شده و جداساز فقط مانع از گسترش خرابی به دهانه‌های سالم شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۸ و ۱۹ پیشرفت خرابی در دهانه‌های سالم در مدل‌های ۸ طبقه و ۱۲ طبقه، به دلیل افزایش کنش زنجیره‌یی اعضا برای حفظ تعادل سازه بسیار کمتر شده است. مفاصل پلاستیک به لحاظ سطح عملکرد در سازه جداسازی شده، در مدل‌های ۱۲ طبقه نسبت به مدل‌های کوتاه و متوسط به ترتیب، ۴ و ۸ طبقه دارای وضعیت بهتری است به طوری که هیچ یک از مفاصل پلاستیک در مدل‌های ۱۲ طبقه جداسازی شده از سطح عملکرد استفاده‌بی‌وقفه فراتر نرفته است.

در تحلیل‌های پوش‌داون تحت بارهای ثقلی، مدل‌های سازه‌یی ۱۲ طبقه در برابر خرابی پیش‌رونده کاملاً ایمن بوده‌اند و جداساز لرزه‌یی مانع از گسترش خرابی

- جابه‌جایی قائم تحت بار ثقلی می‌شود.
۵. سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های با پایه ثابت، عملکرد بهتری در جلوگیری از گسترش خرابی و کاهش تشکیل مفاصل پلاستیک در دهانه‌های مجاور دهانه‌های آسیب دیده (که یکی از ستون‌های آنها حذف شده است) دارند.
۶. استفاده از جداساز در سازه‌های کوتاه مرتبه تأثیر بیشتری در جذب انرژی زلزله و پایداری سازه نسبت به سازه‌ی بلندمرتبه دارد.

سازه‌های بلند است. حذف ستون در طبقات بالاتر باعث افزایش جابه‌جایی نسبی طبقات بالاتر نسبت به حذف در طبقات پایین‌تر می‌شود.

۴. جابه‌جایی محل حذف ستون برای سازه‌های جداسازی شده و پایه ثابت تحت بارهای لرزه‌یی در مدت زمان آغازین زلزله تفاوتی ندارد و با گذشت زمان سیستم جداساز باعث جلوگیری از افزایش جابه‌جایی قائم محل حذف ستون می‌شود. نیروهای زلزله باعث افزایش جابه‌جایی قائم محل حذف ستون در مقایسه با

### منابع (References)

- Forni, D. "Progressive collapse induced by fire and blast", PhD diss., Politecnico di Torino, (2017).
- Elshaer, A., Mostafa, H. and Salem, H. "Progressive collapse assessment of multistory reinforced concrete structures subjected to seismic actions", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **21**(1), pp. 184-194. (2017).
- Kim, J. and Kim, T. "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(1), pp. 169-179 (2009).
- Mashhadi, J. and Saffari, H. "Modification of dynamic increase factor to assess progressive collapse potential of structures", *Journal of Constructional Steel Research*, **138** pp. 72-78 (2017).
- Tavakoli, H.R. and Hasani, A.H. "Effect of earthquake characteristics on seismic progressive collapse potential in steel moment resisting frame", *Earthquakes and Structures*, **12**(5), pp. 529-541 (2017).
- Kim, J., Choi, H. and Min, K.W. "Use of rotational friction dampers to enhance seismic and progressive collapse resisting capacity of structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **20**(4), pp. 515-537 (2011).
- Kang, B.S., Li, L. and Ku, T.W. "Dynamic response characteristics of seismic isolation systems for building structures", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**(8), pp. 2179-2192 (2009).
- Bhandari, M. and et al. "The numerical study of base-isolated buildings under near-field and far-field earthquakes", *Journal of Earthquake Engineering*, **22**(6), pp. 1-19 (2017).
- Kanyilmaz, A. and Castiglioni, C.A. "Reducing the seismic vulnerability of existing elevated silos by means of base isolation devices", *Engineering Structures*, **143**, pp. 477-497 (2017).
- Norouzi, F., Hasanpour, A. and Saeedian, S "Seismic response assessment of high rise RC building with lead rubber bearing base isolator on different soil types", *Journal of Civil Engineering Researchers*, **1**(4), pp. 1-9 (2017).
- Iranian National Building Code, Part 10*, "Design and construction of steel structures", Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran (2013).
- Iranian Building Codes and Standards*, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (standard no. 2800)", 4th Edition, Road, Housing and Urban Development Research Center, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran (2014).
- Iranian National Building Code, Part 6*. "Design loads for buildings, ministry of roads and urban development", Tehran, Iran (2013).
- Computers and Structures Inc. (CSI)*, "PERFORM-3D nonlinear analysis and performance assessment for 3-D structures", Structural and Earthquake Engineering Software, Version 5, Berkeley, CA, USA (2011).
- Guideline for Design and Practice of Base Isolation, No. 523, Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System, (2010).
- Systems in Buildings, Robinson, W.H., "Lead- rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **10**(4), pp. 593-604 (1982).
- DoD, U*. "Unified facilities criteria (UFC)", US DoD Antiterrorism Requirements for Buildings. Department of Defense, USA (2013).