



## ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی فولادی با جداساز سرب لاستیکی

مازیار فهیمی فرزاد\*، میرامیر یوسفی\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

### کلمات کلیدی:

نمودار شکنندگی  
تحلیل غیرخطی  
تحلیل دینامیکی افزایشی  
کنترل غیرفعال  
OpenSEES

**خلاصه:** بررسی احتمالاتی سازه‌ها یکی از روش‌های مناسب جهت در نظر گرفتن اثرات عدم قطعیت و افزایش اطمینان به نتایج حاصل از تحلیل سازه‌ها است. نمودارهای شکنندگی یکی از مؤثرترین روش‌های بررسی و ارزیابی احتمالاتی سازه‌ها هستند. این نمودارها احتمال رخداد خسارت را به صورت تابعی از شدت بار لرزه‌ای اعمالی بر سازه نمایش می‌دهند. روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیلی برای ترسیم نمودارهای شکنندگی است. در این پژوهش به بررسی آماری و احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های معیار (SAC) ۳ و ۹ طبقه فولادی تحت ۲۲ جفت رکورد دور از گسل معرفی شده در FEMA P695 با استفاده از نرم‌افزار OpenSEES پرداخته خواهد شد. سازه‌های ذکر شده با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی برای حالت بدون جداساز و با جداساز سرب - لاستیکی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس با استفاده از نمودارهای IDA، یک رابطه کلی ریاضی متناظر با سازه مورد مطالعه، برای تمامی سطوح عملکرد تعیین خواهد شد. این رابطه معرف مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای هر سازه می‌باشد. با استفاده از این روابط، نمودارهای شکنندگی سطح عملکرد فروریزش برای سازه بدون جداساز و با جداساز ترسیم خواهد شد. به منظور ارزیابی احتمالاتی تأثیر سطوح مختلف شدت‌های لرزه‌ای بر عملکرد سازه جداسازی شده، نمودارهای شکنندگی فروریزش برای سه سطح متفاوت از شدت‌های رکوردهای مورد بررسی ارائه شده است. با توجه به نمودارهای شکنندگی ترسیم شده، می‌توان علاوه بر تأثیر سطوح مختلف شدت لرزه‌ای بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های احتمالاتی سازه، تأثیر مثبت جداساز سرب - لاستیکی را در کاهش احتمال رخداد فروریزش مشاهده کرد. همچنین طبق نتایج منحنی شکنندگی، نسبت حاشیه اطمینان فروریزش در سازه ۳ و ۹ طبقه به ترتیب ۱۰۰٪ و ۸۱٪ افزایش یافته است که نشان دهنده عملکرد احتمالاتی بهتر جداساز در سازه‌های کوتاه مرتبه است.

### ۱- مقدمه

افزوده می‌شود. این ابزارها خود به چهار نوع اصلی غیرفعال<sup>۱</sup>، فعال<sup>۲</sup>، نیمه فعال<sup>۳</sup> و مختلط<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند [۲]. ابزارهای کنترل غیرفعال با توجه به این موضوع که هزینه‌ی نگهداری پایینی دارند و نیاز به انرژی فعال‌سازی خارجی ندارند بین مهندسان از اقبال بیشتری برخوردار هستند [۳ و ۲]. ابزارهای کنترل غیرفعال انواع متفاوتی دارند که به طور کلی می‌توان این ابزارها را به دو دسته جداسازها<sup>۵</sup> و میراگرها<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کرد [۴]. یکی از مهم‌ترین انواع ابزارهای کنترل سازه، جداسازهای سرب - لاستیکی می‌باشند. جذابیت اصلی جداسازهای سرب - لاستیکی (LRB) در ترکیب سیستم جداسازی

در دهه‌های اخیر به علت افزایش جمعیت و افزایش چشمگیر هزینه‌های احداث انواع سازه‌های مهم همچون پل‌ها، ساختمان‌های بلند، بیمارستان‌ها و راکتورهای اتمی، بحث حفاظت از سازه‌ها بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین روش‌های مراقبت از سازه، استفاده از ابزارهای کنترلی می‌باشد. از سیستم‌های کنترلی در علوم متفاوتی همچون هوا و فضا، مکانیک، الکترونیک، مهندسی عمران و... استفاده می‌شود [۱]. ابزارهای کنترل سازه یکی از روش‌های مناسب جهت کنترل ارتعاشات و کاهش پاسخ سازه در برابر بارهای وارد بر سازه است که به پیکره اصلی سازه

- 1 Passive Control Devices
- 2 Active Control Devices
- 3 Semi - Active Control Devices
- 4 Hybrid Control Devices
- 5 Base Isolation
- 6 Damper

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.farzam@maragheh.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



و سیستم اتلاف انرژی در یک ابزار کنترل است. همچنین افزودن سرب به جداساز باعث بهبود عملکرد جداساز در برابر بارهای جانبی ضعیفی همچون بادها و زلزله‌های خفیف می‌شود [۶ و ۵]. عملکرد یک سیستم جداساز لرزه‌ای را می‌توان با دو شاخصه مهم بیان کرد. مورد اول مربوط به افزایش دوره تناوب طبیعی سازه است که این امر باعث انتقال دوره تناوب طبیعی سازه‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه به ناحیه با میزان شبه شتاب طیفی کمتر خواهد شد. دوم، توانایی ایجاد میرایی مناسب برای کاهش جابه‌جایی بین پی و سازه و مستهلک نمودن انرژی ناشی از تحریکات لرزه‌ای است [۷]. از خصوصیات اصلی جداسازها می‌توان به سختی محوری زیاد (جهت تحمل بار ثقلی وارد از سمت سازه) و سختی برشی کم اشاره نمود. از این نوع سیستم کنترلی برای سازه‌های تازه احداث شده و همچنین برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود استفاده می‌شود. علاوه بر این، جداسازهای لرزه‌ای در سایر سازه‌ها مانند پل‌ها و نیروگاه‌های هسته‌ای نیز به کار برده شده‌اند [۸]. همچنین از جداسازها برای محافظت از تجهیزات حساس به ارتعاشات نظیر دستگاه‌های پزشکی نیز استفاده شده است [۱].

هنگام ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها و سیستم‌های کنترلی، عدم قطعیت‌های گوناگونی همچون خطاهای مربوط به اجرا و ساخت، پارامترهای سازه، پارامترهای سیستم کنترلی و نیروی لرزه‌ای وجود دارد. بررسی آماری و احتمالاتی سازه‌ها یکی از روش‌های مناسب جهت در نظر گرفتن اثرات عدم قطعیت و افزایش اطمینان در نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها است. نمودارهای شکنندگی<sup>۱</sup> یکی از متداول‌ترین روش‌های بررسی و ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه‌ها هستند. این نمودارها احتمال رخداد خسارت را به صورت تابعی از شدت بار لرزه‌ای نمایش می‌دهند.

کندی و همکاران در سال ۱۹۸۰ با استفاده از نمودارهای شکنندگی و توابع لوگ نرمال، احتمال رخداد خسارت را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به زلزله و سیستم سازه‌ای بررسی کردند. این مطالعه نقطه شروعی برای بررسی رفتار احتمالاتی سازه‌ها با استفاده از نمودارهای شکنندگی و در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت‌ها بر روی پاسخ سازه محسوب می‌شود [۹].

در سال ۲۰۱۹ نگوین و همکاران با بررسی تأثیرات خواص مکانیکی جداسازهای سرب - لاستیکی و ترسیم نمودارهای شکنندگی بر روی نیروگاه‌های اتمی جداسازی شده به این نتیجه رسیدند که طیف پاسخ با تغییر در سختی الاستیک LRB، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند و با توجه به نمودارهای شکنندگی، نیروگاه‌های اتمی جداسازی شده از پایه تحت

تحریک لرزه‌ای با PGA کمتر از  $0.4/g$  بدون آسیب عمل می‌کنند [۱۰]. شیائو و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک روش بهبود یافته برای تجزیه و تحلیل شکنندگی لرزه‌ای یک قاب بتن مسلح با جداسازهای سرب-لاستیکی پیشنهاد کردند به طوری که تقاضاهای لرزه‌ای بر روی اجزای سازه‌ای می‌تواند به طور مؤثرتر در نظر گرفته شود [۱۱].

چاندا و دبارما در طی مطالعه‌ای به تهیه مجموعه‌ای از منحنی‌های شکنندگی ساختمان جداسازی شده با جداساز سرب-لاستیکی پرداخته‌اند. در این مقاله یک ساختمان جداسازی شده ۶ طبقه بتن مسلح تحت تحریک‌های لرزه‌ای نزدیک و دور از گسل بررسی شده است. حالت جداسازی نشده ساختمان نیز برای مقایسه تأثیرات سیستم کنترلی، مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفته است. برای پارامترهای طراحی از UBC-۹۷ استفاده شده است و برای تهیه منحنی‌های شکنندگی از تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده شده است. حداکثر دررفت طبقات، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب بام به عنوان پارامترهای خسارت در نظر گرفته شده‌اند و احتمال رخداد خسارت در برابر شدت‌های مختلف زلزله ارائه شده است. نتایج نمودار شکنندگی بیانگر این موضوع است که ساختمان‌های جداسازی نشده در صورت رخداد هر دو زلزله نزدیک و دور از گسل، احتمال خرابی بسیار بالایی دارند در صورتی که استفاده از جداساز احتمال رخداد خسارت را کاهش می‌دهد. اگر چه آسیب‌پذیری ساختمان جداسازی شده تحت زمین لرزه‌های نزدیک گسل زیاد بوده ولی برای زمین لرزه‌های دور از گسل احتمال رخداد خسارت بسیار پایین است [۱۲].

بهاندیری و همکاران در سال ۲۰۱۹ با هدف ارزیابی ریسک لرزه‌ای احتمالاتی با انجام تحلیل شکنندگی، یک قاب ساختمانی جداسازی شده را تحت مجموعه رکوردهای زمین لرزه نزدیک و دور از گسل مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور، یک قاب بتنی مسلح ۱۰ طبقه با جداساز سرب - لاستیکی در نظر گرفته شده است. پاسخ‌های در نظر گرفته شده برای بررسی رخداد خسارت در این مطالعه شامل حداکثر دررفت طبقات، حداکثر برش پایه، حداکثر نسبت دررفت بام، حداکثر شتاب بام و حداکثر جابه‌جایی جداساز می‌باشد. علاوه بر این، برای بررسی تأثیر محتوای فرکانسی زلزله‌های نزدیک گسل، نسبت حداکثر سرعت زلزله به حداکثر شتاب زلزله، برای زلزله‌های با اثر جهت‌پذیری به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است. دو مجموعه رکورد از زمین لرزه‌های نزدیک گسل در نظر گرفته شدند، یکی دارای نسبت PGV به PGA کم (کمتر از  $150\text{ cm/s/g}$ )، و دیگری دارای نسبت PGV به PGA بالا (بیشتر از  $150\text{ cm/s/g}$ ). برای به دست آوردن

سازه‌ها و رکوردهای معیار می‌باشند، استفاده از این سازه‌ها و رکوردها بستر مقایسه مؤثرتری را با نتایج سایر پژوهش‌های انجام یافته و یا پژوهش‌های در حال انجام فراهم می‌کند. مجموعه رکوردهای دور از گسل FEMA-P695 شامل ۲۲ رکورد دور از گسل است که می‌تواند تعداد مناسبی از رکوردها را برای در نظر گرفتن عدم قطعیت رکورد به رکورد در اختیار محققین قرار دهد. همچنین در این مطالعه دو ساختمان فولادی ۳ و ۹ طبقه که معرف سازه‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه هستند بدون جداساز و با جداساز از نظر آماری و احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از نظر آماری شاخص پایه جابه‌جایی بام سازه و از نظر احتمالاتی دو شاخص کلی منحنی شکنندگی سطح فروریزش و شاخص محلی نسبت حاشیه اطمینان فروریزش مورد مقایسه قرار گرفته است. بنابراین در کنار استخراج منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های معیار ۳ و ۹ طبقه که معمولاً در مطالعات ریسک لرزه‌ای مورد توجه است، در این مطالعه هدف مقایسه عملکرد ابزارهای کنترلی بر اساس شاخص‌های احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای بوده است. همچنین علاوه بر بررسی اثر عدم قطعیت رکورد به رکورد و در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل، اثر مقدار حداکثر شتاب زمین بر عملکرد احتمالاتی لرزه‌ای هر دو سازه معیار مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه

جهت بررسی احتمالاتی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی جداسازی شده، در این پژوهش از سازه‌های معیار ۳ و ۹ طبقه فولادی SAC استفاده شده است. سازه‌های مذکور در دو حالت سه بعدی طراحی شده‌اند که در این پژوهش مدل دو بعدی سازه‌ها در نظر گرفته شده است. در این سازه‌ها سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری ویژه به عنوان سیستم مهار جانبی در برابر بارهای جانبی همچون زلزله در نظر گرفته شده است. برای طراحی و اعمال بارگذاری لرزه‌ای سازه‌های مذکور از آئین‌نامه UBC-۹۴ استفاده شده است [۲۵].

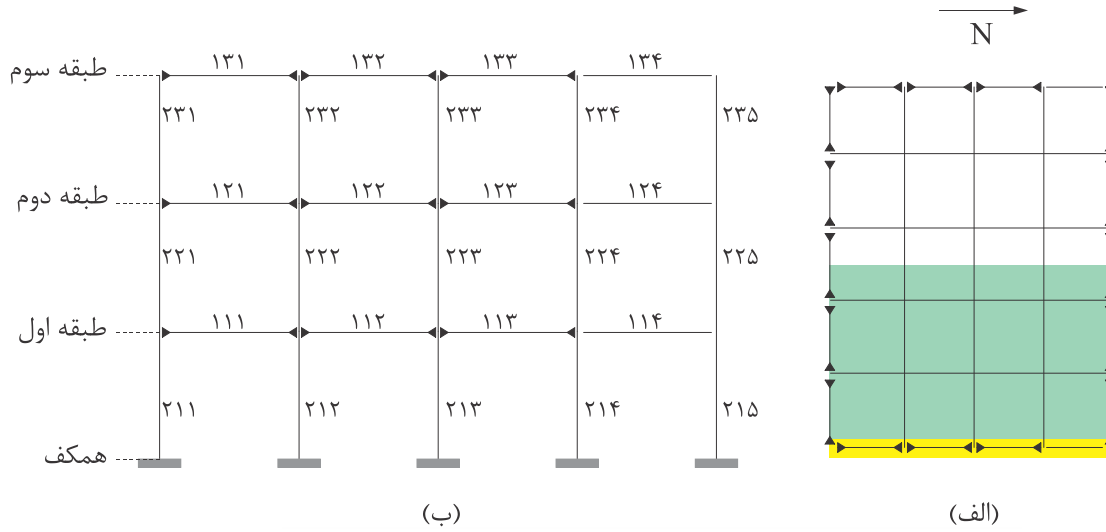
### ۲-۱- سازه ۳ طبقه معیار گروه SAC

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است این سازه با ابعاد پلان ۳۶/۵۸ متر در ۵۴/۷۸ متر با ارتفاع کلی ۱۱/۸۹ متر طراحی شده است. این سازه در جهت شمال - جنوب شامل ۴ دهانه به عرض ۹/۱۵ متر و همچنین در جهت شرق - غرب شامل ۶ دهانه به عرض ۹/۱۵ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر می‌باشد که در ۳ طبقه طراحی شده است. در شکل

منحنی‌های شکنندگی از تجزیه و تحلیل دینامیکی افزایشی با فرض مقادیر مختلف حالت آسیب، استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داد نسبت PGV به PGA تأثیر مهمی در میزان احتمال رخداد خسارت در زمین لرزه‌های نزدیک گسل دارد به نحوی که احتمال رخداد خسارت در نسبت‌های بالای PGV به PGA در مقایسه با نسبت PGV به PGA کم، بیشتر است [۱۳]. نصیرپور و همکاران در سال ۲۰۱۷ عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی دو و چهار طبقه را با استفاده از نمودارهای شکنندگی مورد ارزیابی قرار دادند. سازه‌های مورد مطالعه یک بار بار در نظر گرفتن دیوارهای داخلی و یک بار هم بدون در نظر گرفتن دیوارهای داخلی مورد ارزیابی قرار گرفتند، زیرا دیوارهای داخلی تأثیر قابل توجهی بر سختی جانبی، مقاومت و شکل‌پذیری کل سیستم دارد. آن‌ها برای ترسیم نمودارهای شکنندگی و بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از تحلیل دینامیکی افزایشی و روش ابری<sup>۱</sup> استفاده کردند. در روش ابری از ۱۵۰ رکورد زلزله بدون مقیاس استفاده شد. همچنین برای روش IDA، ۲۰ رکورد از FEMA P695 انتخاب شد. با توجه به نتایج به دست آمده، روش ابری، روش دقیق‌تری نسبت به تحلیل دینامیکی افزایشی است ولی باید توجه داشت که این روش نیاز به تحلیل‌های بیشتری دارد و زمان بر است [۱۴]. علاوه بر بررسی تأثیر LRB در ساختمان‌ها، در بررسی عملکرد لرزه‌ای سایر سازه‌ها نظیر پل‌ها [۱۷-۱۵]، سدها [۱۸] و مخازن ذخیره آب [۲۰ و ۱۹] نیز از نمودارهای شکنندگی استفاده شده است.

مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی عملکرد جداسازهای در کنترل ارتعاش لرزه‌ای ساختمان‌ها انجام یافته است. اما این مطالعات معمولاً بر ارزیابی عملکرد جداسازها در کنترل شاخص‌های پایه مهندسی مانند کنترل جابه‌جایی بام، کنترل جابه‌جایی نسبی طبقات، کنترل شتاب طبقات و غیره متمرکز بوده‌اند [۲۴-۲۱]. البته همانطور که در بالا اشاره شد در مطالعات محدودی این ارزیابی بر اساس کنترل پاسخ‌های توسعه یافته‌تر که در برگرفته عدم قطعیت ذاتی زلزله و عدم قطعیت شناختی پارامترهای سازه باشد نیز انجام یافته است. هر چند این مطالعات در مقایسه با مجموعه مطالعات انجام شده در بحث ارزیابی عملکرد لرزه‌ای جداسازها محدود است و نیاز به مطالعات بیشتر را نشان می‌دهد. همچنین مطالعاتی که به صورت مشخص سازه‌های فولادی با ارتفاع‌های متفاوت و تحت رکوردهای معیار با تعداد مناسبی از رکوردها را مطالعه کرده باشند، به دلیل حجم بالای محاسبات بسیار محدود بوده است.

با توجه به اینکه سازه‌های SAC و رکوردهای FEMA-P695 جزء



شکل ۱. سازه ۳ طبقه معیار گروه SAC، الف) پلان سازه ب) نمای قاب شرقی

Fig. 1. 3-Story benchmark building of the SAC project. A) Plane B) East frame

#### جدول ۱. مقاطع تیرهای سازه ۳ طبقه معیار SAC

Table 1. Beam Sections of the 3-story building

شماره المان	مقطع	شماره المان	مقطع	شماره المان	مقطع
۱۱۱	W33×118	۱۲۱	W30×116	۱۳۱	W24×68
۱۱۲	W33×118	۱۲۲	W30×116	۱۳۲	W24×68
۱۱۳	W33×118	۱۲۳	W30×116	۱۳۳	W24×68
۱۱۴	W21×44	۱۲۴	W21×44	۱۳۴	W21×44

W شکل استفاده شده است. مشخصات مقاطع در جدول ۱ و جدول ۲ شرح داده شده است. در این پژوهش برای مدل سازی سازه مذکور از قاب دو بعدی استفاده شده است [۲۶].

#### ۲-۲- سازه ۹ طبقه معیار گروه SAC

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است این سازه با ابعاد پلان ۴۵/۷۳ متر در ۴۵/۷۳ متر با ارتفاع کلی ۳۷/۱۹ متر طراحی شده است. این سازه در جهت شمال - جنوب شامل ۵ دهانه به عرض ۹/۱۵ متر و همچنین در جهت شرق - غرب شامل ۵ دهانه به عرض ۹/۱۵ متر می باشد. ارتفاع طبقات ۱ تا ۸، ۳/۹۶ متر است. همچنین ارتفاع طبقه همکف و زیر زمین به ترتیب ۵/۴۹ متر و ۳/۶۵ متر است. در شکل ۲-الف پلان سازه به همراه

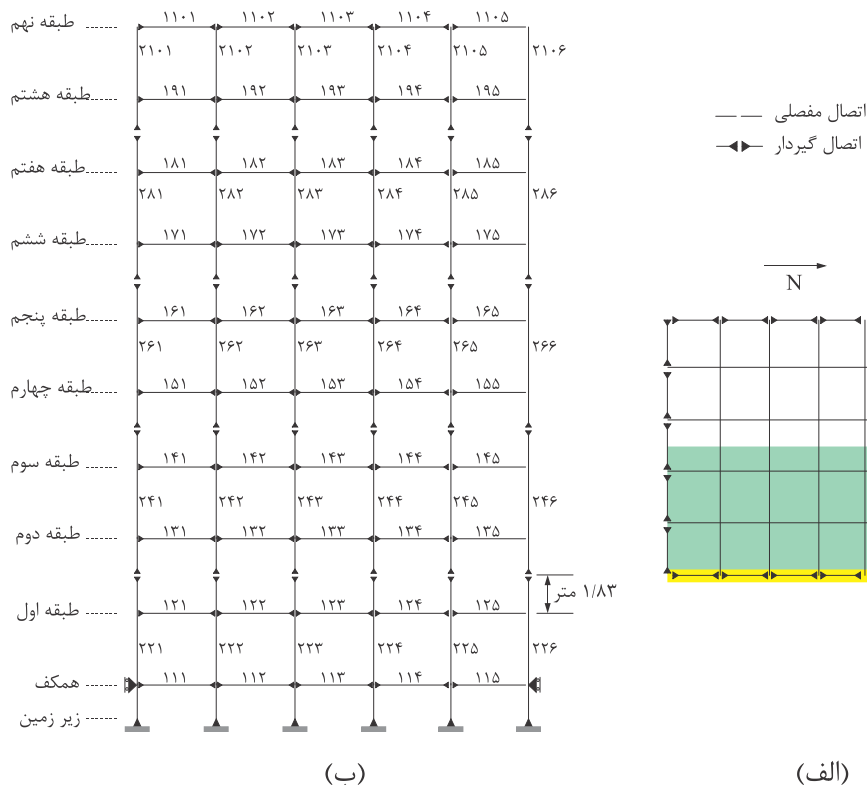
۱-الف پلان سازه به همراه قاب مورد بررسی به رنگ زرد و سهم قاب از جرم لرزه‌ای سازه با رنگ سبز نمایش داده شده است. سازه سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی برای این سازه سیستم قاب خمشی<sup>۱</sup> همراه با قاب ساده در نظر گرفته شده است. اتصال پای ستون‌ها به زمین به صورت گیردار است. سقف مورد استفاده در سازه مذکور از نوع سقف کامپوزیت عرشه فولادی می باشد. جرم لرزه‌ای طبقات در طبقه اول و دوم ۹۵۷ تن و طبقه سوم ۱۰۴۰ تن برای ساختمان سه بعدی است که با توجه به وجود دو قاب باربر جانبی در هر راستا، نصف جرم کل به هر قاب خواهد رسید. مصالح استفاده شده برای تیرها و ستون‌ها به ترتیب از مصالح فولادی با تنش تسلیم ۲۴۸ و ۳۴۵ مگاپاسکال است. برای مقاطع تیرها و ستون‌ها از مقاطع فولادی بال پهن

#### 1 Moment Resisting Frames (MRFs)

جدول ۲. مقاطع ستون‌های سازه ۳ طبقه معیار SAC

Table 2. Column Sections of the 3-story building

شماره المان	مقطع	شماره المان	مقطع	شماره المان	مقطع
۲۱۱	W14×257	۲۲۱	W14×257	۲۳۱	W14×257
۲۱۲	W14×311	۲۲۲	W14×311	۲۳۲	W14×311
۲۱۳	W14×311	۲۲۳	W14×311	۲۳۳	W14×311
۲۱۴	W14×257	۲۲۴	W14×257	۲۳۴	W14×257
۲۱۵	W14×68	۲۲۵	W14×68	۲۳۵	W14×68



شکل ۲. سازه ۹ طبقه معیار گروه SAC (الف) پلان سازه (ب) نمای قاب شرقی

Fig.2. 9-Story benchmark building of the SAC project. A) Plane B) East frame

قاب مورد بررسی به رنگ زرد و سهم قاب از جرم لرزه‌ای سازه با رنگ سبز نمایش داده شده است. سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی برای این سازه سیستم قاب خمشی همراه با قاب ساده در نظر گرفته شده است. اتصال پای ستون‌ها به زمین به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است. سقف مورد استفاده در سازه مذکور از نوع سقف کامپوزیت عرشه فولادی می‌باشد. محل اتصال ستون‌ها به یکدیگر ۱/۸۳ متر بالاتر از تراز طبقات می‌باشد. جرم لرزه‌ای طبقات در طبقه همکف ۹۶۵ تن، طبقه اول ۱۰۱۰ تن، طبقات دوم تا هشتم ۹۸۹ تن و طبقه نهم ۱۰۷۰ تن برای ساختمان سه بعدی است که است [۲۶].

به صورت مشابه با ساختمان سه طبقه و با توجه به وجود دو قاب برابر جانبی در هر راستا، نصف جرم کل به هر قاب خواهد رسید. برای تیرها و ستون‌ها به ترتیب از مصالح فولادی با تنش تسلیم ۲۴۸ و ۳۴۵ مگاپاسکال استفاده شده است. برای مقاطع تیرها و ستون‌ها از مقاطع فولادی بال پهن W استفاده شده است که مشخصات مقاطع در جدول ۳ شرح داده شده است. در این پژوهش برای مدل‌سازی سازه مذکور از قاب دو بعدی استفاده شده است [۲۶].

جدول ۳. مقاطع تیرها و ستون‌های سازه ۹ طبقه معیار SAC

Table 3. Beam & column sections of the 9-story building

شماره المان	مقطع	مقاطع ستون‌ها				شماره المان	مقطع	مقاطع تیرها	
		شماره المان	مقطع	شماره المان	مقطع			طبقه	مقطع
۲۲۱	W14×370	۲۴۲	W14×257	۲۶۴	W14×370	۲۸۶	W14×82	همکف تا ۲	W36×160
۲۲۲	W14×500	۲۴۳	W14×455	۲۶۵	W14×283	۲۱۰۱	W14×233	۳ تا ۶	W36×135
۲۲۳	W14×500	۲۴۴	W14×455	۲۶۶	W14×109	۲۱۰۲	W14×257	۷	W30×99
۲۲۴	W14×500	۲۴۵	W14×370	۲۸۱	W14×257	۲۱۰۳	W14×257	۸	W27×84
۲۲۵	W14×370	۲۴۶	W14×145	۲۸۲	W14×283	۲۱۰۴	W14×257	۹	W24×68
۲۲۶	W14×193	۲۶۱	W14×283	۲۸۳	W14×283	۲۱۰۵	W14×233		
۲۴۱	W14×370	۲۶۲	W14×370	۲۸۴	W14×283	۲۱۰۶	W14×48		
		۲۶۳	W14×370	۲۸۵	W14×257				

جدول ۴. نتایج صحت‌سنجی سازه ۳ و ۹ طبقه معیار SAC

Table 4. Verification of the 3- & 9-story building responses

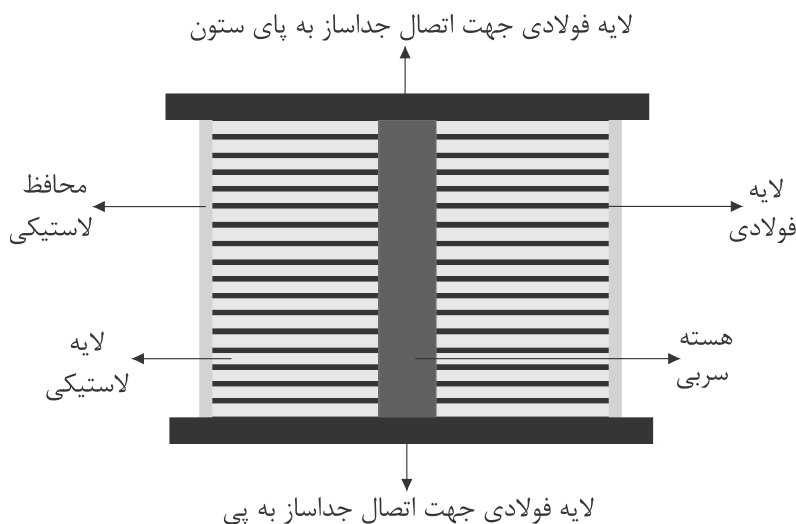
	SAC - 9			SAC - 3		
	مقاله	OpenSEES	خطا (%)	مقاله	OpenSEES	خطا (%)
فرکانس (Hz)	۰/۴۴	۰/۴۲۷	۲/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۸۳	۰/۷
جابه‌جایی بام (m)	۰/۴۶۱	۰/۴۵۹	۰/۴۳	۰/۱۸۵	۰/۱۷	۸/۱
سرعت بام (m/s)	۱/۱۵	۱/۱۶۸	۱/۵۶	۰/۹۲	۰/۸۴	۸/۶
شتاب بام (m/s <sup>2</sup> )	۶/۰۳	۵/۷۳	۴/۹	۶/۹۳	۷/۱	۲/۴

### ۳- جداساز سرب - لاستیکی (LRB)

ایده اولیه این نوع جداساز برای اولین بار توسط رایبسون و تاکر مطرح شد [۲۷]. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است این جداساز از اتصال چندین لایه لاستیکی و فولادی که به صورت یک در میان قرار دارند تشکیل شده است. همچنین یک یا چندین هسته از جنس سرب در مرکز جداساز تعبیه شده است. در این نوع جداساز همانند موارد قبلی از لایه‌های فولادی برای افزایش سختی محوری و جلوگیری از بشکته‌ای شدن جداساز استفاده می‌شود. یکی از مزیت‌های این نوع جداساز، عملکرد مطلوب آن

### ۲-۳- صحت‌سنجی سازه‌های معیار گروه SAC

جهت اطمینان از روند صحیح مدل‌سازی سازه‌ها در این پژوهش، نتایج به دست آمده از مدل‌سازی نرم‌افزاری با نتایج ارائه شده در مقاله اوتوری و همکاران [۲۶] مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی داده‌ها، از پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب بام استفاده شده است. مطابق مقاله اوتوری و همکاران [۲۶] جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و ورد سازه به ناحیه رفتار غیرخطی، از زلزله Hachinohe (مولفه شمال - جنوب، زلزله توکاجی ۱۹۶۸، شهر هاچینو) با ضریب مقیاس ۱/۵ استفاده شده است.



شکل ۳. شکل شماتیک جداساز سرب - لاستیکی

Fig. 3. Typical configuration of LRB

جدول ۵. مشخصات جداسازهای سرب - لاستیکی به کار رفته برای کنترل سازه ۳ و ۹ طبقه معیار SAC

Table 5. Specifications of the designed LRB for 3- & 9-story buildings

	A-Rubber (m <sup>2</sup> )	H-Rubber (m)	A-Lead (m <sup>2</sup> )	Shear modulus (N/m <sup>2</sup> )	Yield stress (N/m <sup>2</sup> )
SAC - 3	0.3421	0.18	0.0093	$6.4 \times 10^5$	$8 \times 10^6$
SAC - 9	0.8355	0.5	0.0235	$6.4 \times 10^5$	$8 \times 10^6$

### ۳-۱- طراحی جداساز سرب - لاستیکی

در این پژوهش برای طراحی جداساز، از روابط ارائه شده در راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها (نشریه شماره ۵۳۳) استفاده شده است. مشخصات جداسازهای استفاده شده که شامل پارامترهای سطح مقطع جداساز، ارتفاع جداساز، سطح مقطع هسته سربی، مدول برشی و تنش تسلیم می‌باشد، در جدول ۵ شرح داده شده است. همچنین برای مدل‌سازی جداساز سرب - لاستیکی در نرم‌افزار OpenSEES از کد KikuchiAikenLRB استفاده شده است [۲۸].

### ۳-۲- صحت‌سنجی جداساز سرب - لاستیکی

جهت اطمینان از روند صحیح مدل‌سازی جداساز سرب - لاستیکی در این پژوهش، نتایج به دست آمده از مدل‌سازی جداساز در نرم‌افزار OpenSEES با نتایج ارائه شده در مقاله کیکوچی و همکاران [۲۹] که مرجع

در برابر بارهای سرویس نظیر زلزله‌های خفیف و بار باد است به نحوی که هنگام اعمال بار جانبی کم، هسته سربی از حرکت افقی جداساز جلوگیری می‌کند ولی به محض افزایش بار جانبی، هسته سربی جاری می‌شود و یک رفتار دو خطی از خود نشان می‌دهد. این امر باعث می‌شود این سیستم کنترلی با استفاده از ناحیه غیرخطی، به نحو مطلوبی بتواند نیروی لرزه‌ای وارد شده را با تشکیل چرخه‌های هیستریزیس متوالی مستهلک نماید. همچنین با توجه به عملکرد مطلوب سرب در بارگذاری‌های پیاپی، هسته سربی تحت بارهای رفت و برگشتی زلزله دچار پدیده خستگی<sup>۱</sup> نشده و یک رفتار پایدار از خود به نمایش می‌گذارد. یکی دیگر از مزیت‌های این نوع جداساز برگشت به حالت اولیه<sup>۲</sup> است که جداساز پس از رخداد زلزله به کمک خاصیت فنری و ارتجاعی لاستیک به حالت اولیه خود بر می‌گردد. میرایی معادل جداساز سرب - لاستیکی حدود ۱۵ تا ۳۵ درصد می‌باشد.

- 1 Fatigue
- 2 Self Centering

جدول ۶. مشخصات رکوردهای مورد مطالعه

Table 6. List of benchmark earthquakes

ID no.	M	Year	Name	Station name	ID no.	M	Year	Name	Station name
1	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	12	7.3	1992	Landers	Coolwater
2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	13	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	14	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array 3
4	7.1	1999	Hector Mine	Hector	15	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar
5	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	16	6.5	1987	Superstition Hills	El Centro Imp Co.
6	6.5	1979	Imperial Valley	El Centro Arrau 11	17	6.5	1987	Superstition Hills	Poe Road(temp)
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	18	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelike	21	6.6	1971	San Fernando	LA-Hollywood Stor
11	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo

۵- تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA<sup>1</sup>)

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی یکی از دقیق‌ترین روش‌های تحلیل سازه‌ها می‌باشد. در این روش، سازه تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی با شدت اصلی رکورد زلزله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ولی برای اینکه رفتار سازه در بازه وسیعی از سطوح مختلف شدت‌های زمین لرزه مورد ارزیابی قرار گیرد می‌توان با اعمال ضرایب متفاوتی به رکورد اصلی زمین لرزه، رفتار لرزهای سازه را در سطوح مختلفی از شدت‌های زلزله بررسی کرد که اصطلاحاً به این نوع تحلیل، تحلیل دینامیکی افزایشی می‌گویند. برترو [۳۱] برای اولین بار از این ایده برای ارزیابی رفتار لرزهای سازه استفاده نمود. با توجه به این موضوع که در روش تحلیل دینامیکی افزایشی، رفتار سازه تحت سطوح مختلف شدت‌های زمین لرزه مورد بررسی قرار می‌گیرد، نتایج به دست آمده از این نوع تحلیل شامل طیف وسیعی از پاسخ سازه در برابر سطوح مختلف شدت‌های زمین لرزه می‌باشد و نتایج حاصل از این نوع تحلیل دقیق‌تر است. برای انجام تحلیل دینامیکی افزایشی ابتدا با توجه به خصوصیات و محل احداث سازه یک سنجح شدت (IM<sup>2</sup>) مناسب انتخاب می‌شود. این پارامتر می‌تواند بیشینه شتاب زمین، بیشینه سرعت زمین، شتاب طیفی متناظر با پرپود اصلی سازه و ... باشد. در بین پارامترهای اشاره شده، به علت اینکه خصوصیات سازه در سنجح شدت شتاب طیفی دخیل است نسبت به سایر

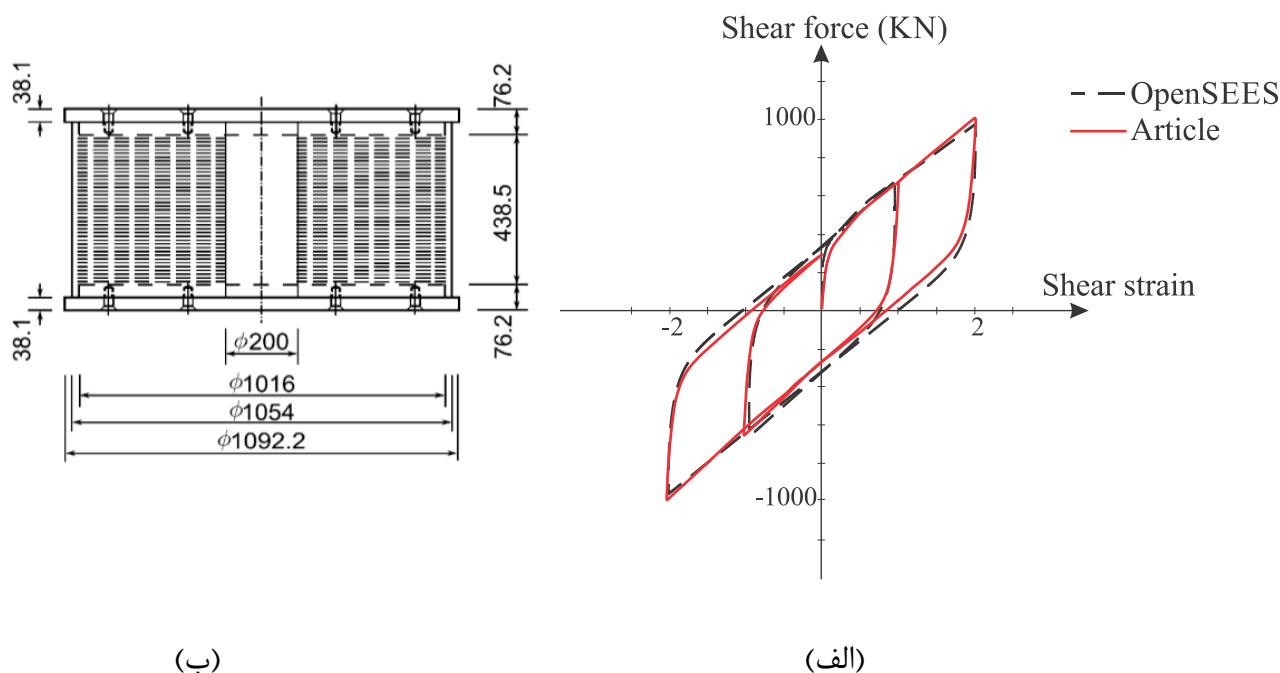
اصلی خود راهنمای سایت OpenSEES نیز است مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی سیستم کنترلی، نمودار نیرو-تغییر مکان جداساز تحت نیروی جانبی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

۴- مشخصات زلزله‌های مورد مطالعه

یکی از دسته‌بندی‌های مهم انواع زلزله، دور یا نزدیک بودن آن‌ها از گسل است. به طور کلی به رکوردهایی با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر، زلزله‌های نزدیک گسل و به رکوردهای با فاصله بیشتر از ۱۰ کیلومتر، زلزله‌های دور از گسل گفته می‌شود. در این پژوهش برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی از رکوردهای دور از گسل استفاده شده است. با توجه به موضوع این پژوهش که در رابطه با بررسی احتمالاتی سازه‌ها با استفاده از نمودارهای شکنندگی و انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی است ترجیحاً برای انتخاب رکوردها از رکوردهای ارائه شده در دستورالعمل FEMA P۶۹۵ استفاده شده است. در این دستورالعمل برای زلزله‌های دور از گسل ۲۲ زلزله ارائه شده است که با در نظر گرفتن دو رکورد افقی برای هر زلزله، در کل ۴۴ رکورد زلزله معرفی شده است. به منظور ارزیابی احتمالاتی تأثیر سطوح مختلف شدت‌های لرزه‌ای بر عملکرد سازه جداسازی شده، نمودارهای شکنندگی فروریزش برای سه سطح متفاوت از شدت‌های رکوردهای مورد بررسی قرار گرفته است [۳۰]. سطح‌بندی مجموعه رکوردها به نحوی انجام شده است که تعداد رکورد در هر یک از سه دسته تقریباً با یکدیگر برابر باشد.

1 Incremental Dynamic Analysis  
2 Intensity Measure



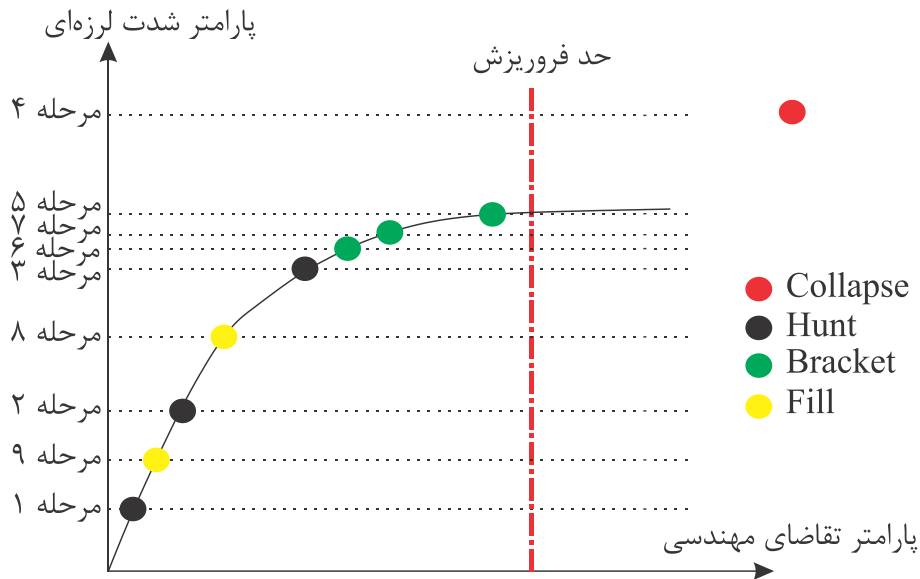


شکل ۴. (الف) نمودار نیرو تغییر مکان جداساز سرب - لاستیکی و (ب) مشخصات جداساز مورد مطالعه برای صحت‌سنجی Hunt & Fill

Fig. 4. Verified force-displacement curve of LRB

ضرایب گام‌های بعدی به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. این روند تا گامی ادامه می‌یابد که از حد فروریزش عبور کند. پس از اینکه اولین نقطه از حد فروریزش عبور کرد الگوریتم وارد مرحله Bracket می‌شود. در این مرحله نقطه بعدی در یک سوم فاصله بین نقطه قبل و بعد از فروریزش انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی که فاصله بین نقاط کم شود ادامه می‌یابد. پس از این مرحله، تحلیل وارد مرحله Fill می‌شود. در این مرحله فواصل بین نقاط اولیه منحنی تکمیل می‌شود. برای انتخاب حد فروریزش سازه می‌توان از ۳ معیار، نقطه رخداد شیب ۲۰٪ در نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی، انتخاب حد فروریزش با استفاده از مقادیر دررفت طبقات و واگرایی نرم‌افزاری استفاده کرد. در نهایت با در نظر گرفتن این معیارها، نقطه فروریزش سازه برای ترسیم نمودار شکنندگی فروریزش مشخص می‌شود [۳۵].

سنجه‌های شدت، نتایج مطلوب‌تری ارائه می‌دهد و پراکندگی نتایج در این معیار کمتر است [۳۲]. سپس پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) انتخاب می‌شود. این پارامتر می‌تواند حداکثر چرخش مفاصل پلاستیک، حداکثر شتاب بام، حداکثر برش پایه، حداکثر نسبت جابه‌جایی بام، حداکثر دررفت بین طبقات و ... باشد. سپس یک الگوریتم مناسب برای پیاده‌سازی تحلیل انتخاب می‌شود. در این پژوهش از الگوریتم Hunt & Fill برای مقیاس رکوردها در تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده شده است. این الگوریتم یکی از مناسب‌ترین الگوریتم‌های پیاده‌سازی این نوع تحلیل می‌باشد [۳۳] که اولین بار توسط وامواتسیکوس و همکاران مطرح شده است [۳۴]. با توجه به شکل ۵ اولین مرحله در این الگوریتم، مرحله Hunt می‌باشد. در این مرحله یک ضریب اولیه کوچک برای سنجه شدت لرزه‌ای انتخاب می‌شود. سپس



شکل ۵. نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از الگوریتم Hunt & Fill

Fig. 5. Hunt & Fill technique steps

#### ۶- منحنی شکنندگی<sup>۱</sup>

$$\theta = \exp(\mu \ln X) \quad (۱)$$

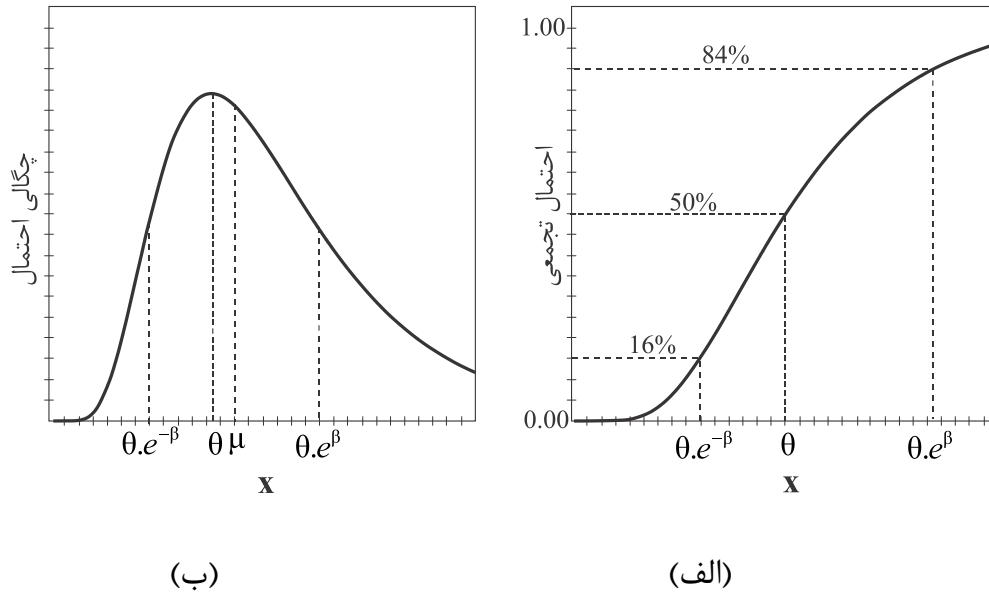
$$\beta = \sigma_{\ln X} \quad (۲)$$

$$f_X(x) = \frac{1}{x\beta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x/\theta))^2}{2\beta^2}} = \varphi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (۳)$$

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln \theta}{\beta}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu \ln X}{\sigma_{\ln X}}\right) \quad (۴)$$

برای ترسیم منحنی‌های شکنندگی، توزیع‌های گوناگونی وجود دارد که در این پژوهش از توزیع لوگ نرمال استفاده شده است. دامنه متغیر مورد بررسی در توزیع نرمال از  $-\infty$  تا  $+\infty$  می‌باشد، در صورتی که دامنه پارامترهای شدت و پاسخ در بازه  $0$  تا  $+\infty$  است. برای حل این مشکل همانطور که در شکل ۶ ترسیم شده است با  $\ln$  گیری از متغیرهای مورد مطالعه، مقادیر پارامترها به دامنه  $-\infty$  تا  $+\infty$  برده می‌شود که به این نوع توزیع، توزیع لوگ نرمال گفته می‌شود. با توجه به مشکل مطرح شده، از این نوع توزیع اغلب برای بررسی مسائل احتمالاتی ترسیم نمودارهای شکنندگی مربوط به تحلیل خطر<sup>۲</sup> و ریسک لرزه‌ای<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. در توزیع لوگ نرمال،  $\mu$  میانگین،  $\beta$  انحراف معیار لگاریتمی، و  $\theta$  میانه لگاریتمی است. در این توزیع نیز همانند توزیع قبلی، میزان عدم قطعیت متغیر  $X$  رابطه مستقیمی با انحراف معیار لگاریتمی دارد. روابط این توزیع برای تابع چگالی احتمال  $f(x)$  و تابع احتمال تجمعی  $F(x)$  بر اساس روابط ۱ تا ۴ محاسبه می‌شود [۳۶]:

- 1 Fragility Curve
- 2 Probabilistic Seismic Hazard Analysis
- 3 Probabilistic Seismic Risk Analysis



شکل ۶. توزیع لوگ نرمال (الف) تابع احتمال تجمعی و (ب) تابع چگالی احتمال

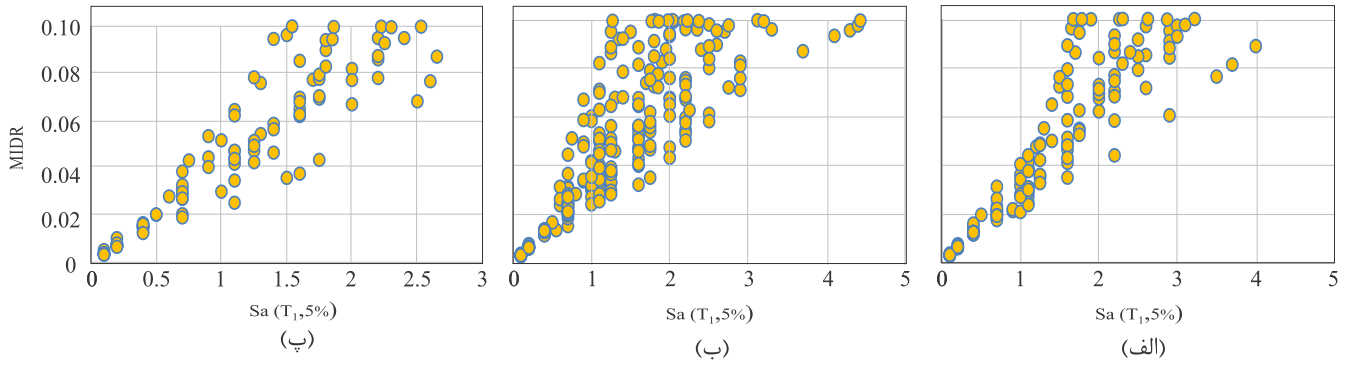
Fig. 6. Lognormal probabilistic distribution curve

گروه رکوردهای با شدت کم، رکوردهایی که شتاب مقیاس شده‌ای بزرگ‌تر از کران بالا داشته باشند در گروه رکوردهای با شدت زیاد و رکوردهای که در بین این دو کران قرار بگیرند رکوردهای با شدت متوسط در نظر گرفته شده است. سپس منحنی شکنندگی و در نتیجه احتمال شکست سازه تحت هر یک از این دسته رکوردها به صورت جداگانه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با  $\ln$  گیری از مقادیر سنجه شدت و مقادیر متناظر پارامتر تقاضای مهندسی هر تحلیل، نمودار لگاریتمی داده‌ها ترسیم شده است. در مرحله بعد از بین داده‌های این نمودار، یک خط برازش می‌شود و معادله این خط به دست می‌آید. معادله این خطوط معرف مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای هر سازه می‌باشد. در شکل ۷ تا ۱۰، نمودارهای تحلیل دینامیکی و لگاریتمی سازه ۳ طبقه معیار با تفکیک سطوح مختلف شدت‌های PGA ترسیم شده است. در جدول ۷ به طور کامل به تمامی مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای به دست آمده اشاره شده است. با استفاده از این مدل‌های احتمالاتی می‌توان بدون انجام تحلیل‌های جدید برای تمامی سطوح عملکرد متفاوت، منحنی شکنندگی متناظر با آن سطح عملکرد را ترسیم نمود. در این پژوهش سطح عملکرد فروریزش مورد مطالعه قرار گرفته است و منحنی شکنندگی سطح فروریزش برای حالت جداسازی شده و جداسازی نشده برای سطوح مختلف شدت‌های PGA ترسیم شده است. در مرحله بعد برای تمامی ۴۴ رکورد مورد مطالعه به صورت یک جا نمودارهای شکنندگی بدون تفکیک سطوح مختلف شدت‌های PGA ترسیم شده است.

## ۷- مطالعه احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های معیار SAC جداسازی شده با استفاده از منحنی‌های شکنندگی

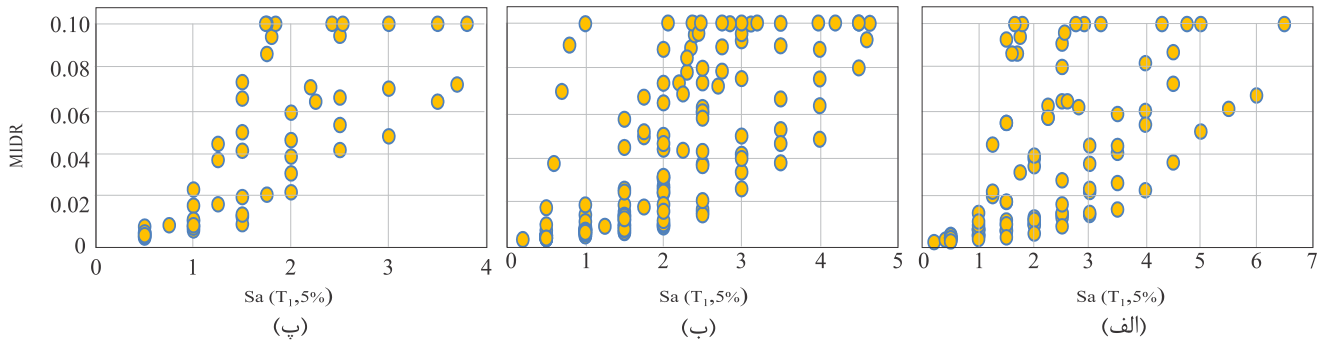
در این مطالعه به منظور بررسی اثر مقادیر حداکثر شتاب زمین بر عملکرد احتمالاتی ساختمان‌های مورد مطالعه ابتدا مجموعه رکوردهای FEMA P۶۹۵ به سه سطوح مختلف شدت PGA تفکیک شده است. سپس نتایج ارزیابی عملکرد احتمالاتی تحت دو حالت بدون جداساز و با جداساز سرب - لاستیکی برای سه سطح مختلف PGA ترسیم شده است. در انتها کلیه رکوردهای FEMA P۶۹۵ بدون تفکیک و به صورت یکپارچه برای ارزیابی عملکرد احتمالاتی مورد استفاده قرار گرفته است و نمودارهای شکنندگی مربوط به هر دو حالت تفکیک شده و تفکیک نشده ارائه گردیده است.

برای تعیین این سه سطح مختلف از شدت PGA ابتدا مجموعه رکوردهای معیار دور از گسل معرفی شده در FEMA P۶۹۵ برای سازه ۳ و ۹ طبقه به گونه‌ای مقیاس شده‌اند که مقادیر پاسخ شتاب طیفی هر زلزله در پیوند اصلی هر سازه برابر شود. سپس کران‌های مجموعه رکوردها به گونه‌ای مشخص شده است که پراکندگی تقریباً یکسانی از نظر تعداد رکوردهای موجود در سه دسته رکورد مورد بررسی وجود داشته باشد. بر این اساس و با هدف ایجاد تعداد رکوردهای تقریباً یکسان در هر دسته رکورد برای سازه ۳ طبقه دو کران  $0.75g$  و  $1/5g$  مشخص شده است و برای سازه ۹ طبقه دو کران پایین و بالای  $2g$  و  $5g$  تعیین شده است. در این شرایط رکوردهای مقیاس شده‌ای که شتاب کمتر از کران پایین داشته باشند در



شکل ۷. نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی سازه ۳ طبقه معیار SAC کنترل نشده تحت رکوردهای دور از گسل با سطوح مختلف شدت‌های PGA (الف) کم، (ب) متوسط و (پ) زیاد

Fig. 7. IDA of the uncontrolled 3-story building under far-fault records with different PGA intensity levels: A) low B) medium C) high



شکل ۸. نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی سازه ۳ طبقه معیار SAC کنترل شده با جداساز سرب - لاستیکی تحت رکوردهای دور از گسل با سطوح مختلف شدت‌های PGA (الف) کم، (ب) متوسط و (پ) زیاد

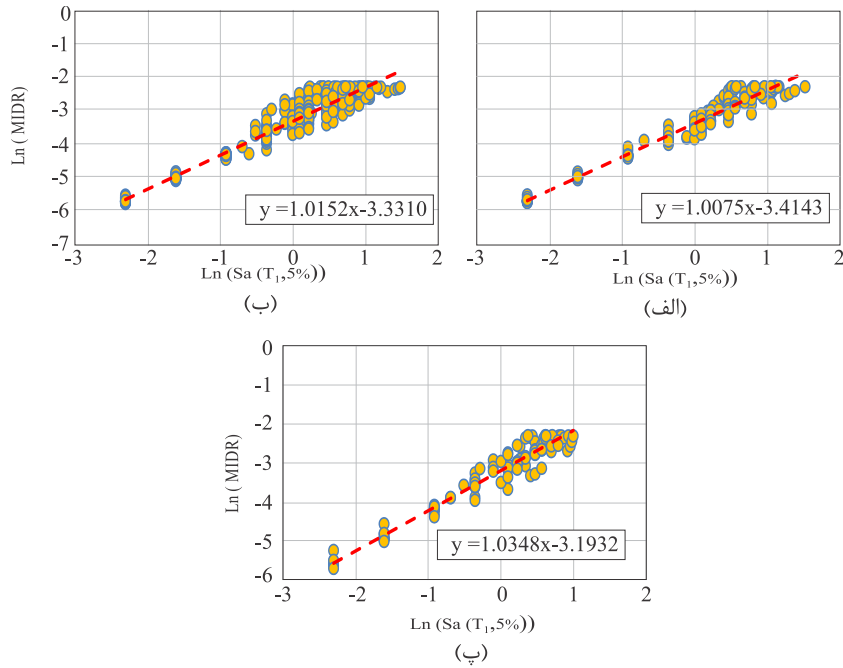
Fig. 8. IDA of the controlled 3-story building under far-fault records with different PGA intensity levels: A) low B) medium C) high

که ۱۰٪ می‌باشد ادامه پیدا کرده است. انتخاب دریفت ۱۰٪، توسط مقدار گزارش شده در FEMA-۳۵۶ برای حد فروریزش انتخاب شده است و در مطالعات قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۳۷ و ۳۸].

در شکل ۹ و ۱۰ نمودارهای لگاریتم طبیعی متناظر با نمودارهای IDA به ترتیب برای ساختمان ۳ طبقه بدون جداساز و با جداساز سرب - لاستیکی ترسیم شده است. در ادامه از بین داده‌های رسم شده یک خط برازش داده شده است تا مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای هر سازه مشخص شود.

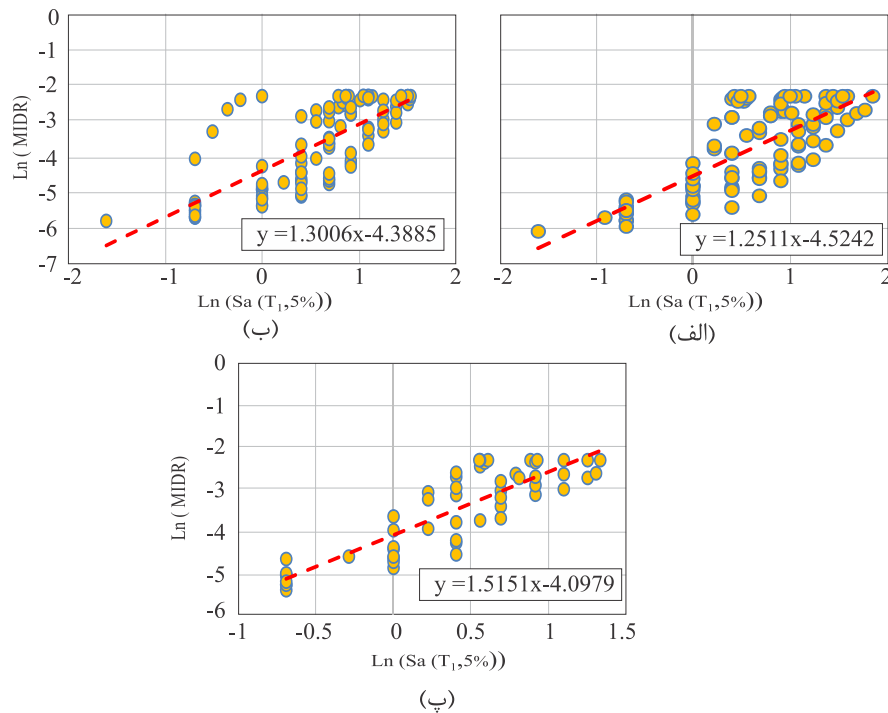
برای ترسیم نمودارهای شکنندگی سطوح عملکرد مختلف، کفایت برای هر سطح عملکرد خاص، دو پارامتر انحراف معیار (total  $\beta$ ) و میانه (MD) متناظر با آن سطح عملکرد تعیین شود. برای به دست آوردن انحراف معیار از رابطه ۵ استفاده شده است. در این رابطه پارامتر  $C\beta$  عدم قطعیت

در شکل ۷ و ۸ به ترتیب نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی برای ساختمان ۳ طبقه بدون جداساز و با جداساز سرب - لاستیکی ترسیم شده است. در بخش الف، ب و پ هر شکل، برای ساختمان مورد نظر به ترتیب تحت رکوردهای مربوط به سطح شدت PGA کم، متوسط و زیاد تحلیل دینامیکی افزایشی انجام شده است. در این تحلیل سنجش شدت شتاب طیفی مود اول، پارامتر تقاضای مهندسی حداکثر نسبت جابه‌جایی بین طبقه‌ای و تغییرات سنجش شدت با استفاده از الگوریتم Hunt and Fill تعیین شده است. در این نمودارها هر نقطه متناظر یک گام از تحلیل دینامیکی افزایشی است که مقادیر سنجش شدت متناظر آن گام در برابر حداکثر نسبت جابه‌جایی بین طبقه‌ای (پارامتر تقاضای مهندسی) در کل طول زمان تحلیل رسم شده است. افزایش مقادیر سنجش شدت تا رسیدن به بیشینه دریفت بین طبقه‌ای



شکل ۹. نمودار لگاریتمی و مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای تحلیل دینامیکی افزایشی سازه ۳ طبقه معیار SAC بدون جداساز تحت رکوردهای دور از گسل با سطوح مختلف شدت‌های PGA (الف) کم، (ب) متوسط و (پ) زیاد

Fig. 9. Logarithmic curve of PSDM for 3-story building without LRB under far-fault records different PGA intensity levels: A) low B) medium C) high



شکل ۱۰. نمودار لگاریتمی و مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای تحلیل دینامیکی افزایشی سازه ۳ طبقه معیار SAC با جداساز سرب - لاستیکی تحت رکوردهای دور از گسل با سطوح مختلف شدت‌های PGA (الف) کم، (ب) متوسط و (ج) زیاد

Fig. 10. Logarithmic curve of PSDM for 3-story building with LRB under far-fault records with different PGA intensity levels: A) low B) medium C) high

جدول ۷. مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای سازه معیار ۳ و ۹ طبقه برای حالت بدون جداساز و جداساز برای سطوح مختلف شدت‌های PGA و مشخصات نمودار شکنندگی متناظر با سطح عملکرد فروریزش

Table 7. PSDMs of 3- & 9-story buildings with & without LRB under different PGA intensity levels & the lognormal parameters of the collapse fragility curve

	PGA	معادلات خط	M <sub>d</sub>	β <sub>D</sub>	β <sub>total</sub>
SAC - 3	کم	Y=1.0075X-3.4143	۳/۰۱	۰/۲۱	۰/۳۶
	متوسط	Y=1.0152X-3.3310	۲/۷۵	۰/۲۷	۰/۴۰
	کنترل نشده	Y=1.0348X-3.1932	۲/۳۶	۰/۲۲	۰/۳۷
	زیاد	Y=1.2511X-4.5242	۵/۹۰	۰/۷۵	۰/۸۱
	متوسط	Y=1.3006X-4.3885	۴/۹۰	۰/۷۰	۰/۷۶
	کنترل شده	Y=1.5151X-4.0979	۳/۲۷	۰/۵۲	۰/۶۰
SAC - 9	کم	Y=1.0083X-2.7703	۱/۵۹	۰/۲۴	۰/۳۹
	متوسط	Y=0.9527X-2.6220	۱/۴۰	۰/۲۸	۰/۴۲
	کنترل نشده	Y=1.0374X-2.1771	۰/۸۸	۰/۲۸	۰/۴۱
	زیاد	Y=0.5061X-4.2880	۲/۱۱	۰/۳۲	۰/۴۴
	متوسط	Y=0.5509X-3.9962	۲/۰۱	۰/۳۲	۰/۴۴
	کنترل شده	Y=0.5800X-3.7919	۱/۳۶	۰/۳۲	۰/۴۴

PGA ترسیم شده است و احتمال رخداد فروریزش متناظر با سطوح مختلف شتاب‌های طیفی برای حالت بدون جداساز و جداسازی شده نشان داده شده است. همچنین برای محاسبه مقادیر گزارش شده برای M<sub>d</sub> از معادلات خطوط جدول ۷ استفاده شده است. نحوه محاسبه M<sub>d</sub> به این صورت است که به جای پارامتر Y مقدار Ln حد فروریزش (۱۰٪) قرار داده شده است و به جای پارامتر X مقدار Ln(M<sub>d</sub>) قرار می‌گیرد. با جایگذاری این مقادیر، معادله تبدیل به یک معادله یک مجهولی می‌شود که می‌توان مقدار M<sub>d</sub> را برای هر معادله محاسبه کرد.

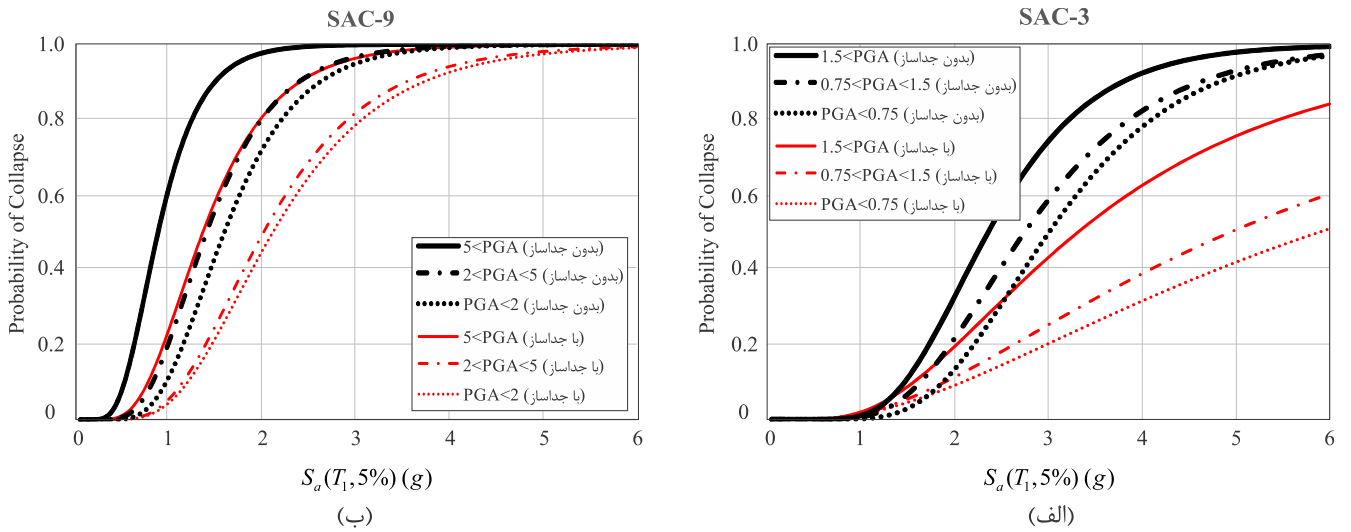
در شکل ۱۲ و ۱۳ نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی سازه ۳ و ۹ طبقه معیار بدون جداساز و با جداساز سرب - لاستیکی با در نظر گرفتن دریافت ۱۰٪ به عنوان حد فروریزش برای تمامی مجموعه رکوردهای دور از گسل بدون تفکیک سطوح مختلف شدت‌های PGA ترسیم شده است. در مرحله بعد احتمال رخداد فروریزش برای شتاب‌های طیفی متناظر به دست آمده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی با استفاده از توزیع لوگ نرمال محاسبه شده است. در شکل ۱۴ برای حالتی که هر ۲۲ رکورد معیار به صورت همزمان و بدون تفکیک سطوح مختلف شدت استفاده شوند، نمودارهای شکنندگی سازه ۳ طبقه برای دو حالت بدون جداساز و جداسازی شده ترسیم شده است.

مربوط به ظرفیت سازه و β<sub>D</sub> عدم قطعیت ناشی از ورودی زلزله است [۳۹]. طبق توصیه منصوری و همکاران، مقدار β<sub>C</sub> برای سازه جداسازی شده و بدون جداساز مقدار ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۴۰]. برای محاسبه β<sub>D</sub> از رابطه ۶ استفاده شده است. در این رابطه N تعداد داده‌های تحلیل دینامیکی افزایشی و Δ اختلاف مقادیر داده‌های تحلیل دینامیکی افزایشی و مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای است [۴۱].

$$\beta_{total} = \sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2} \quad (5)$$

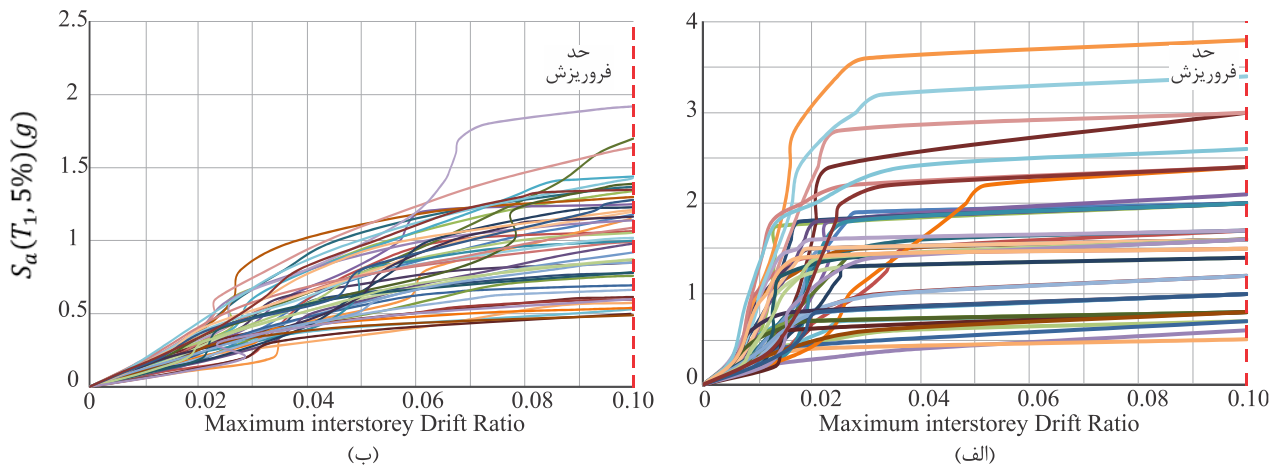
$$\beta_D = \sqrt{\frac{\sum(\Delta)^2}{N-2}} \quad (6)$$

همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است، انحراف معیار و میانه سطح عملکرد فروریزش برای شرایط مختلف محاسبه شده است. سپس با استفاده از این داده‌ها در شکل ۱۱ نمودار شکنندگی فروریزش سازه ۳ و ۹ طبقه بدون جداساز و جداسازی شده برای سه سطح مختلف شدت



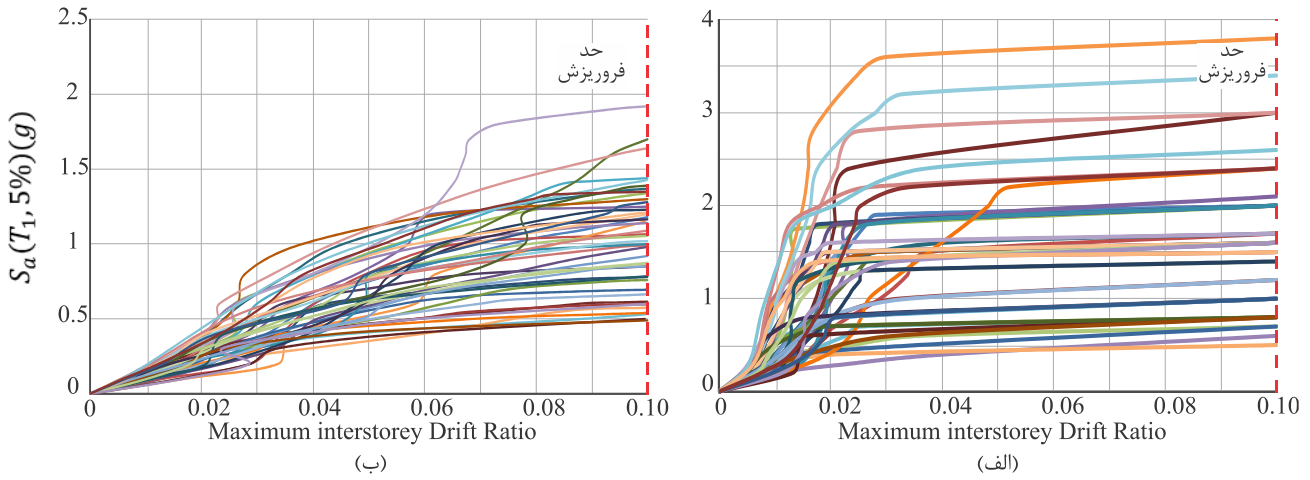
شکل ۱۱. نمودار شکنندگی فروریزش سازه ۳ (الف) و ۹ (ب) طبقه معیار SAC برای حالت بدون جداساز و جداسازی شده برای سطوح مختلف شدت‌های PGA رکوردهای حوزه دور از گسل

Fig. 11. Collapse fragility curve of uncontrolled & controlled 3- & 9-story building under far-fault records with different PGA intensity levels



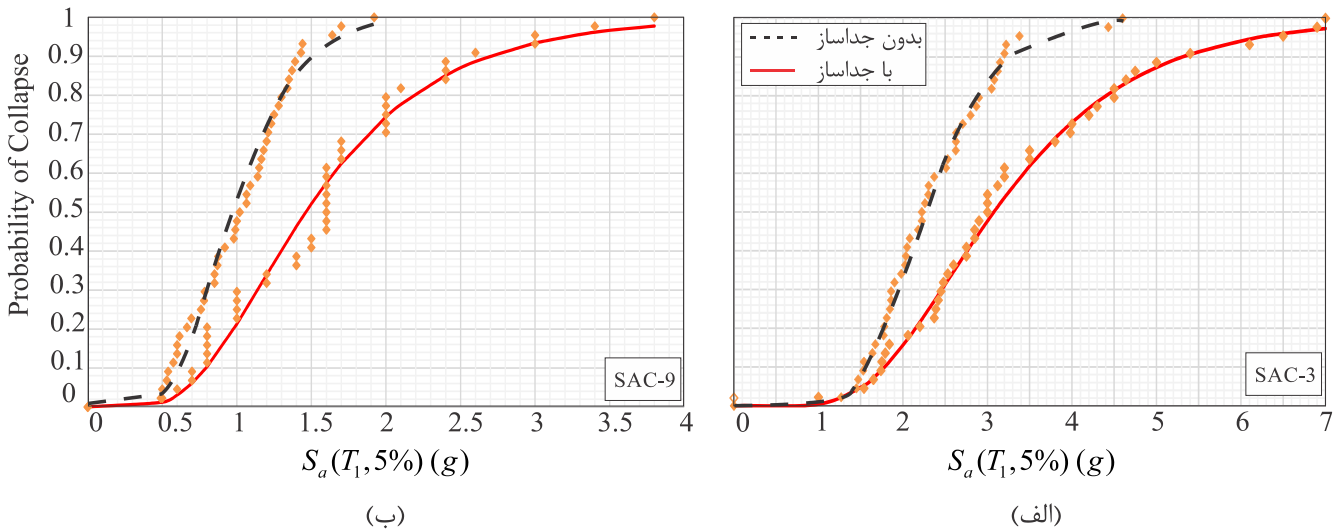
شکل ۱۲. (الف) نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی سازه معیار ۳ طبقه جداسازی شده و (ب) نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی سازه معیار ۳ طبقه بدون جداساز بدون تفکیک سطوح مختلف شدت‌های PGA

Fig. 12. IDA of 3-story building A) with LRB & B) without LRB under all earthquakes



شکل ۱۳. نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی سازه ۹ طبقه جداسازی شده و (ب) نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی سازه معیار ۹ طبقه بدون جداساز بدون تفکیک سطوح مختلف شدت‌های PGA

Fig. 13. IDA of 9-story building A) with LRB & B) without LRB under all earthquakes



شکل ۱۴. نمودار شکنندگی فروریزش سازه (الف) ۳ و (ب) ۹ طبقه معیار SAC برای حالت بدون جداساز و با جداساز بدون تفکیک سطوح مختلف شدت‌های PGA

Fig. 14. Collapse fragility curve of A) 3-story & B) 9-story buildings with & without LRB under all earthquakes



جدول ۸. درصد افزایش شتاب طیفی فروریزش برای سازه ۳ طبقه معیار جداسازی شده نسبت به سازه بدون جداساز

Table 8. The increase of spectral acceleration of the collapse limit state for 3-story with and without LRB

احتمال رخداد فروریزش (%)	شتاب طیفی فروریزش سازه کنترل نشده	شتاب طیفی فروریزش سازه کنترل شده	درصد افزایش شتاب طیفی فروریزش در سازه کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده (%)
۱۰	۱/۵۹	۱/۷۹	۱۳
۵۰	۲/۲۹	۳/۰۸	۳۴
۱۰۰	۴/۶	۷	۵۲

جدول ۹. درصد افزایش شتاب طیفی فروریزش برای سازه ۹ طبقه معیار جداسازی شده نسبت به سازه بدون جداساز

Table 9. The increase of spectral acceleration of the collapse limit state for 9-story building with and without LRB

احتمال رخداد فروریزش (%)	شتاب طیفی فروریزش سازه کنترل نشده	شتاب طیفی فروریزش سازه کنترل شده	درصد افزایش شتاب طیفی فروریزش در سازه کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده (%)
۱۰	۰/۶۲۵	۰/۸	۲۸
۵۰	۰/۹۷	۱/۴۶	۵۱
۱۰۰	۱/۹۲	۳/۸	۹۸

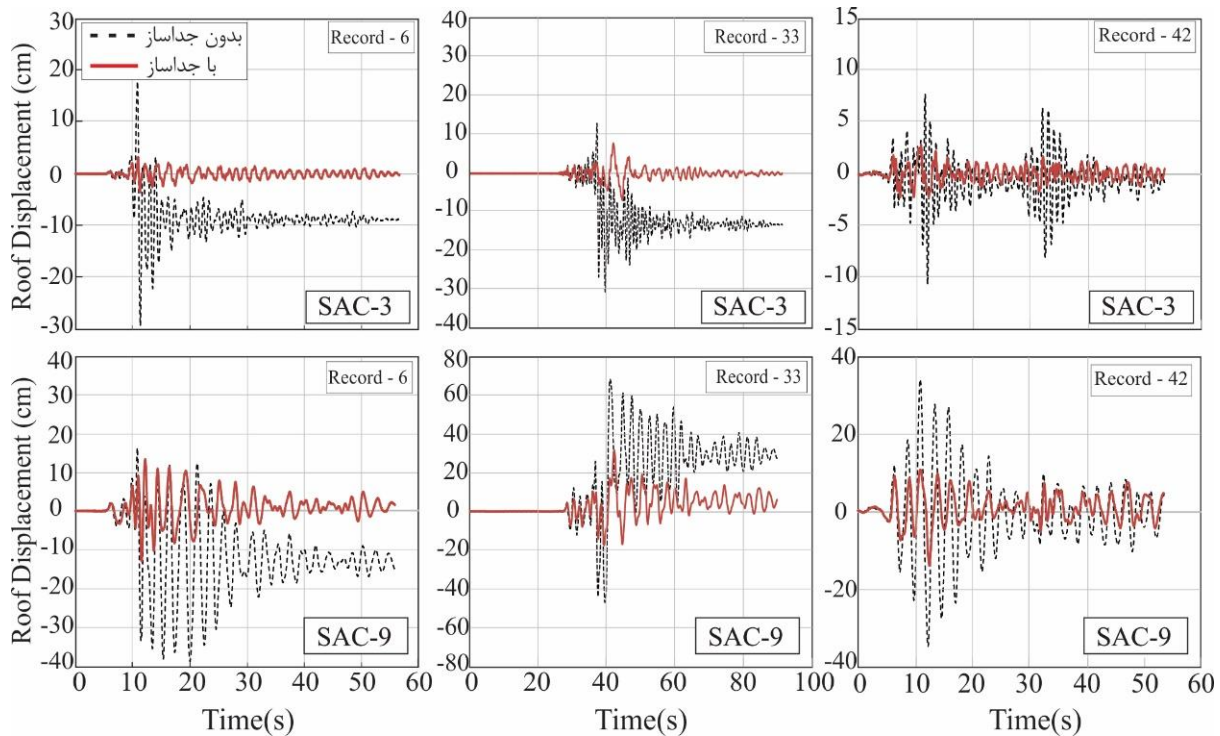
جدول ۱۰. نسبت حاشیه اطمینان سازه ۳ و ۹ طبقه معیار بدون جداساز و با جداساز

Table 10. Collapse margining ratio of the 3- & 9-story buildings with & without LRB

تعداد طبقات ساختمان	نسبت حاشیه اطمینان سازه کنترل نشده	نسبت حاشیه اطمینان سازه کنترل شده
	CMR <sub>UnCon.</sub>	CMR <sub>Con.</sub>
۳	۱/۵۶	۳/۱۴
۹	۱/۵۲	۲/۷۵

با توجه به جدول ۱۰ نسبت حاشیه اطمینان فروریزش برای سازه ۳ طبقه بدون جداساز و با جداساز به ترتیب برابر ۱/۵۶ و ۳/۱۴ است. همچنین همانطور که در جدول ۹ برای سازه ۹ طبقه اشاره شده است، شتاب طیفی فروریزش متناظر با احتمال رخداد ۱۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ برای حالت کنترل شده با جداساز سرب – لاستیکی به ترتیب به میزان ۲۸٪، ۵۱٪ و ۹۸٪ افزایش پیدا کرده است. در جدول ۱۰ نسبت حاشیه اطمینان فروریزش برای سازه ۹ طبقه بدون جداساز و با جداساز به ترتیب برابر ۱/۵۲ و ۲/۷۵ محاسبه شده است.

همانطور که در جدول ۸ برای سازه ۳ طبقه اشاره شده است، شتاب طیفی فروریزش متناظر با احتمال رخداد ۱۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ برای حالت با جداساز سرب – لاستیکی به ترتیب به میزان ۱۳٪، ۳۴٪ و ۵۲٪ افزایش پیدا کرده است. از جمله پارامترهای مهمی که می‌توان از تحلیل IDA و نمودارهای شکنندگی به دست آورد، نسبت حاشیه اطمینان فروریزش (CMR) است. هر چه این نسبت بزرگ‌تر باشد احتمال رخداد خسارت کاهش می‌یابد. این نسبت از تقسیم میانه شتاب‌های طیفی فروریزش با احتمال رخداد ۵۰٪ بر شتاب طیفی زلزله سطح MCE به دست می‌آید.



شکل ۱۵. نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه ۳ و ۹ طبقه سازه معیار SAC بدون جداساز و با جداساز

Fig. 15. Response history of the roof displacement of the 3- & 9-story buildings with & without LRB

حاشیه اطمینان فروریزش مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجا که در رسم منحنی‌های شکنندگی رسم شده تنها عدم قطعیت رکورد به رکورد و عدم قطعیت مدل در نظر گرفته شده است به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت حداکثر شتاب زلزله، مجموعه رکوردهای معیار FEMA P۶۹۵ به سه دسته رکورد با مقادیر مختلف شدت تفکیک شده و منحنی شکنندگی این دسته رکوردها مورد مقایسه قرار گرفته است. با بررسی نتایج به دست آمده، خلاصه نتایج به شرح زیر می‌باشد:

از نظر ارزیابی جابه‌جایی بام سازه با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی انجام شده بر روی سازه ۳ (۹) طبقه معیار، جابه‌جایی بام سازه با جداساز سرب - لاستیکی نسبت به سازه بدون جداساز به طور میانگین به میزان ۷۳٪ (۴۵٪) با انحراف معیار ۹٪ (۱۶٪) کاهش یافته است. حداکثر و حداقل مقادیر کاهش پاسخ بام سازه ۳ (۹) طبقه با جداساز نسبت به سازه بدون جداساز تحت مجموعه رکوردهای مورد بررسی به ترتیب ۸۸٪ (۶۹٪) و ۴۱٪ (۱۱٪) می‌باشد. کاهش جابه‌جایی بام سازه ناشی از کاهش تقاضای لرزه‌ای و افزایش میرایی سازه می‌باشد. همانطور که مشخص است هم از نظر کاهش میانگین جابه‌جایی بام و هم از نظر کاهش

در شکل ۱۵، چند نمونه از نمودارهای پاسخ تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام برای سازه ۳ و ۹ طبقه بدون جداساز و با جداساز سرب - لاستیکی ارائه شده است. با بررسی نمودارها می‌توان به وضوح تأثیر مثبت جداساز را در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها مشاهده کرد. همچنین هنگام رخداد زلزله‌های شدید، به علت جاری شدن مصالح و ورود به ناحیه غیرارتجاعی، پس از اتمام تحریک لرزه‌ای، سازه دیگر توان برگشت به حالت اولیه خود را ندارد و در سیستم سازه‌ای یک جابه‌جایی پسماند باقی خواهد ماند. از مزیت‌های استفاده از جداساز سرب - لاستیکی، جلوگیری از ورود به ناحیه غیرارتجاعی و کاهش جابه‌جایی پسماند می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به وضوح تأثیر استفاده از جداساز در کاهش جابه‌جایی پسماند برای سازه ۳ و ۹ طبقه SAC را مشاهده کرد.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی معیار ۳ و ۹ طبقه کنترل شده با جداساز سرب - لاستیکی بر اساس شاخص پایه جابه‌جایی بام سازه، شاخص‌های احتمالاتی کلی منحنی شکنندگی و محلی نسبت

## منابع

- [1] P. Balaji, K.K. SelvaKumar, Applications of nonlinearity in passive vibration control: a review, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, (2020) 1-31.
- [2] Z. Lu, Z. Wang, Y. Zhou, X. Lu, Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: A review, *Journal of Sound and Vibration*, 423 (2018) 18-49.
- [3] Y. Parulekar, G. Reddy, Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 9(01) (2009) 151-177.
- [4] A.S.o.C. Engineers, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, in, *American Society of Civil Engineers*, 2017.
- [5] B. Kavyashree, S. Patil, V.S. Rao, Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications, *International Journal of Dynamics and Control*, (2020) 1-16.
- [6] P. Clemente, A. Martelli, Seismically isolated buildings in Italy: state-of-the-art review and applications, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119 (2019) 471-487.
- [7] G. Bhaskar, M. Khanchandani, A Review On Seismic Response Of Building With Base Isolation, *International Journal Of Scientific Research And Review*, 7(1) (2018) 92-96.
- [8] A. Beirami Shahabi, G. Zamani Ahari, M. Barghian, Base Isolation Systems—A State of the Art Review According to Their Mechanism, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(2) (2020) 37-61.
- [9] R.P. Kennedy, C.A. Cornell, R. Campbell, S. Kaplan, H. Perla, Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant, *Nuclear Engineering and Design*, 59(2) (1980) 315-338.
- [10] D.-D. Nguyen, B. Thusa, H. Park, H. Lee, T.-H. Lee, Effects of Mechanical Properties of LRB on Seismic Performance of Base-Isolated NPP Structures, in: *Transaction of the 25th Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-25) Conference*, Charlotte, NC,

عدم قطعیت رکورد به رکورد جداساز عملکرد بهتری در سازه ۳ طبقه داشته است که ناشی از پرپود کمتر سازه ۳ طبقه و اثر بیشتر جداساز در سازه‌های کوتاه مرتبه می‌باشد. همچنین جداساز سرب – لاستیکی با کاهش تقاضای لرزه‌ای و افزایش میرایی باعث می‌شود دامنه ارتعاش در طول زمان سریع‌تر کاهش یابد و سازه کمتر وارد ناحیه غیرخطی شود که این امر باعث کاهش جابه‌جایی پسماند در سازه‌ها شده است.

طبق نتایج منحنی شکنندگی، جداساز با کاهش تقاضای لرزه‌ای و در نتیجه دریافت بین طبقات، باعث کاهش خسارات وارد بر هر دو سازه ۳ و ۹ طبقه شده است. طبق تحلیل‌های انجام شده، شتاب طیفی فروریزش متناظر با احتمال رخداد ۱۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ برای حالت با جداساز سرب – لاستیکی برای سازه ۳ و ۹ (۹) طبقه به ترتیب به میزان ۱۳٪، ۳۴٪ و ۵۲٪ و (۲۸٪، ۵۱٪ و ۹۸٪) افزایش پیدا کرده است. باید توجه داشت که پرپود سازه با جداساز نسبت به سازه بدون جداساز برای سازه ۳ و ۹ طبقه به صورت متفاوتی تغییر می‌کند و در نتیجه درصد کاهش تقاضای لرزه‌ای نیز متفاوت است. بنابراین مقایسه درصد افزایش شتاب طیفی فروریزش به دست آمده از منحنی شکنندگی این دو سازه نمی‌تواند معیار مناسبی در زمینه مقایسه عملکرد جداساز در دو سازه ۳ و ۹ طبقه باشد. به همین منظور شاخص محلی نسبت حاشیه اطمینان فروریزش که این اختلاف افزایش پرپود در محاسبات آن در نظر گرفته شده باشد نیز برای دو سازه ۳ و ۹ طبقه و در دو حالت بدون جداساز و با جداساز مورد مقایسه قرار گرفته است.

نسبت حاشیه اطمینان فروریزش در سازه ۳ و ۹ طبقه بدون جداساز (با جداساز) به ترتیب برابر ۱/۵۶ (۳/۱۴) و ۱/۵۲ (۲/۷۵) می‌باشد. هر چه این نسبت بزرگ‌تر باشد، احتمال رخداد خسارت کاهش می‌یابد. با بررسی نسبت‌های حاشیه اطمینان محاسبه شده، مشاهده می‌شود که جداساز سرب لاستیکی طراحی شده برای سازه ۳ و ۹ طبقه حاشیه اطمینان فروریزش را به ترتیب ۱۰۰٪ و ۸۱٪ افزایش داده است. این نتایج به صورت مشابه با نتایج آماری حاصل از شاخص جابه‌جایی بام نشان دهنده عملکرد بهتر جداساز در کاهش احتمال فروریزش سازه ۳ طبقه، در مقایسه با سازه ۹ طبقه است. همچنین علاوه بر بررسی اثر عدم قطعیت رکورد به رکورد، اثر مقدار حداکثر شتاب زمین بر عملکرد احتمالاتی لرزه‌ای هر دو سازه معیار مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج نشان دهنده عملکرد مثبت جداساز در زلزله‌های با حداکثر شتاب زمین کم به خصوص در سازه‌های کوتاه مرتبه می‌باشد.

- [20] S.K. Saha, K. Sepahvand, V.A. Matsagar, A.K. Jain, S. Marburg, Fragility Analysis of Base-Isolated Liquid Storage Tanks under Random Sinusoidal Base Excitation Using Generalized Polynomial Chaos Expansion-Based Simulation, *J. Struct. Eng.*, 142(10) (2016).
- [21] R.S. Jangid, Stochastic response of building frames isolated by lead-rubber bearings, *J. Struct. Control Health Monit.*, 17(1) (2010) 1-22.
- [22] M.H. Stanikzai, S. Elias, V.A. Matsagar, A.K. Jain, Seismic response control of base-isolated buildings using tuned mass damper, *Aust. J. Struct. Eng.*, (2019).
- [23] A.B. Habieb, M. Valente, G. Milani, Effectiveness of different base isolation systems for seismic protection: Numerical insights into an existing masonry bell tower, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125 (2019).
- [24] M.Z. Kangda, S. Bakre, The Effect of LRB Parameters on Structural Responses for Blast and Seismic Loads, *Arab. J. Sci. Eng.*, 43(4) (2018) 1761-1776.
- [25] S.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).
- [26] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 366-385.
- [27] W. Robinson, A. Tucker, A lead-rubber shear damper, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 10(3) (1977) 151-153.
- [28] M. Mousazadeh, F. Pourreza, M.C. Basim, M. Chenaghlo, An efficient approach for LCC-based optimum design of lead-rubber base isolation system via FFD and analysis of variance (ANOVA), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(4) (2020) 1805-1827.
- [29] M. Kikuchi, I. Aiken, A. Kasalanati, Simulation analysis for the ultimate behavior of full-scale lead-rubber seismic isolation bearings, in: 15th world conference on earthquake engineering, 2012.
- [30] A.T. Council, U.S.F.E.M. Agency, Quantification of building seismic performance factors, US Department of USA, 2019.
- [11] Y. Xiao, K. Ye, W. He, An improved response surface method for fragility analysis of base-isolated structures considering the correlation of seismic demands on structural components, *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2020) 1-21.
- [12] A. Chanda, R. Debbarma, Probabilistic seismic analysis of base isolated buildings considering near and far field earthquake ground motions, *Struct. Infrastructure Eng.*, (2020).
- [13] M. Bhandari, S.D. Bharti, M.K. Shrimali, T.K. Datta, Seismic Fragility Analysis of Base-Isolated Building Frames Excited by Near- and Far-Field Earthquakes, *J. Perform. Constr. Facil.*, 33(3) (2019).
- [14] A. Nassirpour, B. Song, D. D'Ayala, IDA & Cloud Method for Fragility Assessment of Bare & Infilled Steel Frame Structures, in: 16th World Conference on Earthquake Engineering, National Information Centre of Earthquake Engineering, 2017.
- [15] N. Xiang, M.S. Alam, Comparative Seismic Fragility Assessment of an Existing Isolated Continuous Bridge Retrofitted with Different Energy Dissipation Devices, *J Bridge Eng*, 24(8) (2019).
- [16] M. Montazeri, G. Ghodrati Amiri, P. Namiranian, Seismic fragility and cost-benefit analysis of a conventional bridge with retrofit implements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141 (2021).
- [17] S. Kurino, W. Wei, A. Igarashi, Seismic fragility and uncertainty mitigation of cable restrainer retrofit for isolated highway bridges incorporated with deteriorated elastomeric bearings, *Eng. Struct.*, 237 (2021).
- [18] K. Mahmoodi, A. Noorzad, A. Mahboubi, M. Alembagheri, Seismic performance assessment of a cemented material dam using incremental dynamic analysis, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1187-1198.
- [19] S.K. Saha, V.A. Matsagar, A.K. Jain, Seismic fragility of base-isolated water storage tanks under non-stationary earthquakes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(4) (2016) 1153-1175.

- [37] V. Saberi, H. Saberi, A.J.J.o.S. Sadeghi, Technology, Collapse assessment of steel moment frames based on development of plastic hinges, (2020).
- [38] H. Kouhestanian, H. Pahlavan, J. Shafaei, M.J.A.J.o.C.E. Shamekhi Amiri, Probabilistic Seismic Assessment of RC Buildings Considering Soft and Extreme Soft Story Irregularities Subjected to Main Shock-Aftershock Sequences, 53(2) (2021) 457-478.
- [39] K. Pitilakis, H. Crowley, A.M. Kaynia, SYNER-G: typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 27 (2014) 1-28.
- [40] I. Mansouri, G. Ghodrati Amiri, J.W. Hu, M. Khoshkalam, S. Soori, S. Shahbazi, Seismic fragility estimates of LRB base isolated frames using performance-based design, Shock and Vibration, 2017 (2017).
- [41] A. Chanda, R. Debbarma, Probabilistic seismic analysis of base isolated buildings considering near and far field earthquake ground motions, Structure and Infrastructure Engineering, (2020) 1-12.
- Homeland Security, FEMA, 2009.
- [31] V. Bertero, Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments, Structural engineering and structural mechanics, 53(1) (1977) 29-79.
- [32] X. He, Z. Lu, Seismic fragility assessment of a super tall building with hybrid control strategy using IDA method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 123 (2019) 278-291.
- [33] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Applied incremental dynamic analysis, Earthquake spectra, 20(2) (2004) 523-553.
- [34] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, Earthquake engineering & structural dynamics, 31(3) (2002) 491-514.
- [35] S.J. Venture, G.D. Committee, Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, Federal Emergency Management Agency Washington, DC, USA, 2000.
- [36] K. Porter, A beginner's guide to fragility, vulnerability, and risk, Encyclopedia of earthquake engineering, 2015 (2015) 235-260.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fahimi Farzam, M. A. Yousefi, Probabilistic seismic performance evaluation of the steel frame buildings controlled with lead rubber bearings (LRBs), Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 163-184.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20865.7563



