

Research Article

Fragility and Collapse Capacity Analysis of Steel Special Moment Frames Equipped with Lead Rubber Bearings Using a Performance-Based Design ApproachReaz Noordokht^{1*}, Changiz Gheyratmand^{2*}

1- Master's Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran



Citation: Noordokht, R., and Gheyratmand, CH. (2026), "Fragility and Collapse Capacity Analysis of Steel Special Moment Frames Equipped with Lead Rubber Bearings Using a Performance-Based Design Approach", *Journal of Steel & Structures*, 20(52), pp.94-120 (In Persian).

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.584907.1040>

Article info:**Article History:****Received:** 7 December 2025**Revised:** 28 March 2026**Accepted:** 4 April 2026**Published:** 22 June 2026**Keywords:**

Lead Rubber Bearing (LRB)
Seismic Fragility
Collapse Margin Ratio
(CMR/ACMR)
Incremental Dynamic Analysis
(IDA)
Steel Special Moment Frame
(SMF)

ABSTRACT

Background: Conventional force-based seismic design may not adequately control structural damage, excessive deformation, and collapse, particularly under severe earthquakes. Despite their adequate ductility, steel special moment-resisting frames may experience considerable interstory drift and plastic-hinge rotations during ground motions. Therefore, the use of seismic isolation systems, such as Lead Rubber Bearings (LRBs), can be an effective approach for improving structural performance and reducing collapse vulnerability. This study investigates the effectiveness of LRB isolators in enhancing the seismic behavior and collapse capacity of steel special moment-resisting frames.

Methods: Three, six, and nine-story steel special moment-resisting frames were designed and evaluated in isolated and fixed-base configurations using a performance-based seismic design framework. Nonlinear static and nonlinear time-history analyses were conducted to assess the structural response at the Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP) performance levels. Incremental Dynamic Analysis (IDA) was performed using selected ground-motion records, which were scaled and matched with the Standard 2800 design spectrum at the design-earthquake and maximum-considered-earthquake levels. Interstory drift, beam and column plastic-hinge rotations, seismic fragility, collapse probability, Collapse Margin Ratio (CMR), and Adjusted Collapse Margin Ratio (ACMR) were used as the main evaluation criteria. The collapse assessment was conducted in accordance with FEMA P695 criteria.

Results: The results demonstrate that the use of LRB isolators reduces interstory drift demands and beam and column plastic-hinge rotations at three performance levels. Isolated frames exhibited lower seismic fragility and collapse probability than their corresponding fixed-base frames. The CMR and ACMR values increased for the three-, six-, and nine-story isolated frames, indicating an enhanced collapse capacity. The beneficial effects of seismic isolation were pronounced in the low-rise, short-period frame; nevertheless, improvements were also observed in the taller frames. The isolated systems showed more uniform seismic responses and lower record-to-record dispersion, particularly under severe and near-fault ground motions.

Conclusion: LRB isolation is an effective and reliable strategy for improving the seismic performance of steel special moment-resisting frames. By reducing deformation and plastic-rotation demands, decreasing fragility and collapse probability, and increasing collapse capacity, LRBs can significantly enhance the safety and resilience of steel frames within a performance-based seismic design framework.

* Corresponding Author's E-mail: ch.gheyratmand@urmia.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

Steel special moment-resisting frames (SMRFs) are widely used in seismic regions because of their high ductility, energy-dissipation capacity, architectural flexibility, and ability to accommodate large inelastic deformations. Nevertheless, experience from severe earthquakes has demonstrated that even properly designed moment-resisting frames may experience excessive interstory drift, substantial plastic-hinge rotations, nonstructural damage, and possible collapse when subjected to intense ground motions, especially near-fault records. Conventional force-based seismic design primarily focuses on satisfying strength-related requirements and may not directly ensure acceptable damage control or collapse safety under rare and extreme earthquakes. Consequently, performance-based seismic design has gained increasing attention as an appropriate framework for evaluating structural response at different performance levels, including Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP). Seismic isolation is one of the most effective strategies for improving the earthquake performance of building structures by increasing the fundamental period, reducing seismic-force transmission, and limiting deformation demands in the superstructure. Among various isolation devices, Lead Rubber Bearings (LRBs) have been extensively used because they combine vertical-load-carrying capacity, lateral flexibility, restoring capability, and hysteretic energy dissipation. Although the beneficial effects of base isolation have been widely recognized, comprehensive studies focusing on the fragility and collapse capacity of steel special moment frames equipped with LRBs at different building heights remain limited. In particular, the simultaneous evaluation of drift demand, plastic rotation, seismic fragility, collapse probability, Collapse Margin Ratio (CMR), and Adjusted Collapse Margin Ratio (ACMR) for isolated and fixed-base steel frames requires further investigation. Therefore, this study evaluates the seismic performance of three-, six-, and nine-story steel special moment-resisting frames with and without LRB isolation using a performance-based

approach. The novelty of the study lies in integrating nonlinear response assessment, Incremental Dynamic Analysis (IDA), fragility evaluation, and FEMA P695-based collapse assessment to investigate the influence of LRB isolation on steel frames with different heights. The results provide a clearer understanding of the engineering effectiveness of LRBs in reducing seismic vulnerability and improving collapse safety.

Methods

Three-, six-, and nine-story steel special moment-resisting frames were considered as representative low-, medium-, and relatively high-rise structural systems. For each height, two structural configurations were evaluated: a conventional fixed-base frame and a base-isolated frame supported by Lead Rubber Bearings. The frames were designed within a performance-based seismic design framework, and structural behavior was examined at the IO, LS, and CP performance levels. Appropriate strong-column-weak-beam requirements were considered to promote beam hinging mechanisms and reduce the likelihood of undesirable column hinging, soft-story formation, and unstable failure mechanisms. Nonlinear static analysis was first employed to obtain capacity curves and to evaluate the overall lateral-load resistance and deformation characteristics of the structural systems. Subsequently, nonlinear time-history analyses were performed to investigate the response of the frames under earthquake excitation. The principal response parameters included interstory drift ratio, beam and column plastic-hinge rotations, lateral displacement demand, and the distribution of inelastic deformation throughout the height of the frames. Incremental Dynamic Analysis was conducted by scaling selected earthquake records from low intensity levels to the onset of dynamic instability or collapse. The selected records were scaled based on the spectral acceleration corresponding to the fundamental period of the isolated structure, and the mean response spectrum was matched with the design spectrum of Iranian Standard No. 2800 at the design-earthquake

and maximum-considered-earthquake levels. The IDA results were used to develop collapse and fragility relationships for the studied frames. Collapse capacity was quantified using CMR and ACMR, while the uncertainty associated with test data, numerical modeling, and total response uncertainty was incorporated in accordance with the FEMA P695 framework. The comparison between isolated and fixed-base frames was conducted for all building heights to determine the influence of LRB isolation on deformation control, damage reduction, fragility mitigation, and collapse resistance.

Results

The analytical findings demonstrate that Lead Rubber Bearing (LRB) isolation substantially enhances the seismic performance of steel special moment-resisting frames. Compared with fixed-base configurations, the isolated systems exhibited significant reductions in interstory drift demands and plastic-hinge rotations at the Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP) performance levels, thereby mitigating structural damage and preserving post-event functionality. By localizing deformation and energy dissipation within the isolation interface, the system effectively curtailed inelastic demand in the superstructure. Incremental Dynamic Analysis (IDA) substantiated these benefits, revealing lower seismic fragility and reduced collapse probability. Quantitatively, the 3-, 6-, and 9-story isolated models demonstrated superior Collapse Margin Ratios (CMR) and Adjusted Collapse Margin Ratios (ACMR), confirming an enhanced margin of safety. While the beneficial effects of period lengthening were most pronounced in the 3-story frames, the 6- and 9-story structures also displayed substantial improvements in drift control and collapse capacity. Furthermore, isolated frames exhibited greater response uniformity and lower record-to-record dispersion, particularly under severe near-fault ground motions. Consequently, LRB isolation emerges as a robust, practical strategy for bolstering the seismic resilience and reliability of steel moment-resisting frames.

Conclusion

This study demonstrated that Lead Rubber Bearing (LRB) isolation significantly enhances the seismic performance and collapse resistance of 3-, 6-, and 9-story steel special moment-resisting frames. The isolated systems exhibited reduced interstory drift, lower plastic-hinge rotation demands, decreased fragility, and lower collapse probability, accompanied by increased CMR and ACMR values. The improvement was most pronounced in the low-rise frame, although meaningful benefits were also observed for the medium- and higher-rise structures. Overall, the findings confirm that LRB isolation is an effective and reliable means of mitigating seismic vulnerability and improving the resilience of steel moment-resisting frames, particularly under severe and near-fault ground motions.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the writing, editing, or preparation of this manuscript. All parts of this paper, including conceptualization, data analysis, drafting of the text, and scientific revisions, were performed exclusively by the authors. The authors take full responsibility for the content and accuracy of the information presented herein.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

First Author: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Writing-original Draft Preparation.

Second Author: Conceptualization, Methodology, Writing-review and Editing, Supervision.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, for the scientific and technical support provided during the course of this research. The author received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. No specific grants from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors were provided for this research.

مقاله پژوهشی

تحلیل شکنندگی و ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه فولادی مجهز به جداساز هسته سربی با رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد

رضا نوردخت^{۱*}، چنگیز غیرتمد^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران



Citation: Noordokht, R., and Gheytratmand, CH. (2026), "Fragility and Collapse Capacity Analysis of Steel Special Moment Frames Equipped with Lead Rubber Bearings Using a Performance-Based Design Approach", *Journal of Steel & Structures*, 20(52), pp.94-120 (In Persian).

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.584907.1040>

چکیده

زمینه پژوهش: محدودیت‌های طراحی لرزه‌ای مبتنی بر نیرو در کنترل تغییرشکل و فروریزش سازه، به‌ویژه تحت زلزله‌های شدید، ضرورت استفاده از رویکردهای نوین را افزایش داده است. قاب‌های خمشی ویژه فولادی، با وجود شکل‌پذیری مناسب، در این شرایط با دررفت بین‌طبقه‌ای زیاد و دوران غیرخطی مفاصل پلاستیک مواجه می‌شوند. جداسازهای هسته سربی (LRB) می‌توانند با کاهش تقاضای لرزه‌ای، ایمنی سازه را بهبود بخشند. این پژوهش اثر بخشی جداسازهای هسته سربی را در ارتقای رفتار لرزه‌ای و ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه فولادی، در چارچوب طراحی مبتنی بر عملکرد، بررسی می‌کند.

روش پژوهش: قاب‌های خمشی ویژه فولادی ۶، ۳ و ۹ طبقه در دو حالت جداسازی شده و پایه ثابت، با رویکرد مبتنی بر عملکرد، طراحی و ارزیابی شدند. پاسخ سازه در سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از فروریزش، با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی شد. تحلیل دینامیکی افزاینده با رکوردهای منتخب حرکات زمین، مقیاس شده و منطبق با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ در سطوح زلزله طرح و حداکثر، انجام گرفت. دررفت طبقات، دوران پلاستیک تیرها و ستون‌ها، شکنندگی لرزه‌ای، احتمال فروریزش، نسبت حاشیه فروریزش (CMR) و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده (ACMR) مطابق معیارهای FEMA P695، ملاک‌های اصلی ارزیابی بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد استفاده از جداسازهای LRB، تقاضای دررفت طبقات و چرخش پلاستیک تیرها و ستون‌ها را در هر سه سطح عملکردی مذکور به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. قاب‌های جداسازی شده در مقایسه با نمونه‌های پایه ثابت، شکنندگی لرزه‌ای و احتمال فروریزش کم‌تری نشان دادند. افزایش مقادیر CMR و ACMR در تمامی مدل‌های جداسازی شده ۶، ۳ و ۹ طبقه، بیانگر بهبود ظرفیت فروریزش سازه است. اثرات مثبت جداسازی در قاب‌های کوتاه‌مرتبه با دوره تناوب کوتاه، بارزتر بود؛ باین‌حال در سازه‌های بلندتر نیز بهبود قابل‌توجهی مشاهده شد. سیستم‌های جداسازی شده، به‌ویژه تحت زلزله‌های شدید و زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل، پاسخ لرزه‌ای یکنواخت‌تر و پراکندگی کم‌تری را در رکوردها نشان دادند.

نتیجه‌گیری: جداسازی با استفاده از جداسازهای LRB راهکاری مؤثر و قابل‌اعتماد برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه فولادی است. این سیستم با کاهش تقاضای تغییرشکل و دوران پلاستیک، کاهش شکنندگی و احتمال فروریزش و افزایش ظرفیت فروریزش، می‌تواند ایمنی و تاب‌آوری قاب‌های فولادی را در چارچوب طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد به‌طور چشم‌گیری ارتقا دهد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

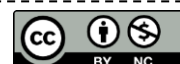
تاریخ دریافت: ۱۶ آذر ماه ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۸ فروردین ماه ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۵ فروردین ماه ۱۴۰۵
تاریخ انتشار: ۱ تیر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

جداساز هسته سربی
شکنندگی لرزه‌ای
نسبت حاشیه فروریزش
تحلیل دینامیکی افزاینده
قاب خمشی ویژه فولادی

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: ch.gheytratmand@urmia.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> مربوطه مراجعه فرمایید.



۱- مقدمه

زلزله همواره یکی از تهدیدهای اصلی برای سازه‌های شهری به‌شمار می‌رود و آثار ویرانگر آن در دهه‌های اخیر نشان داده است که تکیه بر طراحی مبتنی بر نیرو، به‌تنهایی پاسخگوی شرایط پیچیده بارگذاری لرزه‌ای نیست. تجارب ثبت‌شده از زلزله‌های مطرحی همچون نورتریج^۱، کوبه^۲، منجیل و کوجاللی^۳ نشان می‌دهد که بسیاری از سازه‌ها در برابر حرکات نزدیک‌گسل دچار آسیب‌های شدید، تغییرشکل‌های غیرقابل قبول و در برخی موارد، فروریزش شده‌اند. این واقعیت موجب شده که جامعه مهندسی زلزله، رویکردهای نوین‌تری را دنبال کند تا بیش از آن‌که بر مقاومت سازه اتکا داشته باشد، بر کنترل پاسخ، محدودسازی آسیب و ارتقای ایمنی عملکردی تمرکز نماید [۱ و ۲].

در میان راهکارهای کنترل غیرفعال، جداسازی لرزه‌ای به‌ویژه با استفاده از جداسازهای لاستیکی هسته سربی (LRB)^۴ به‌عنوان یک فناوری قابل‌اتکا، اقتصادی و مورد تأیید آیین‌نامه‌های معتبر معرفی شده است. این سیستم‌ها با افزایش دوره تناوب مؤثر سازه، کاهش سختی جانبی اولیه و ایجاد مکانیزم اتلاف انرژی از طریق هسته سربی، موجب کاهش قابل‌ملاحظه نیروهای اینرسی و تغییرشکل‌های مخرب در طبقات می‌شوند. مطالعات گذشته و نتایج تجربی نشان می‌دهد که LRB قادر است شدت دریافت طبقات، دوران مفاصل، برش پایه، و احتمال فروریزش را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد [۱، ۲].

ازسوی دیگر، رشد رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد^۵ و توسعه دستورالعمل‌هایی نظیر FEMA و ASCE/SEI 41-23 و P695 ضرورت تحلیل‌های پیشرفته‌تر را بیش از پیش نمایان کرده است. امروزه تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA)^۶ یکی از معتبرترین روش‌های ارزیابی ظرفیت فروریزش و استخراج منحنی‌های شکنندگی سازه تحت طیفی از شدت‌های لرزه‌ای است. استفاده از این روش امکان بررسی دقیق رفتار سازه در محدوده‌های غیرخطی عمیق و حتی نزدیک‌شدن به حالت فروریزش را فراهم می‌کند، که در مطالعات سنتی معمولاً مغفول مانده است [۳-۵].

با توجه به اهمیت عملکرد قاب‌های خمشی ویژه فولادی (SMF)^۷ در مناطق لرزه‌خیز، ارزیابی اثر به‌کارگیری LRB بر این

سیستم‌ها اهمیت دوچندان دارد. این سازه‌ها به‌عنوان یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم جانبی در ساختمان‌های متوسط و بلندمرتبه، باید قادر باشند تغییرشکل‌های بزرگ را تحمل نمایند و عملکرد مناسب خود را در سطح عملکرد ایمنی جانبی (LS)^۸ و پیش‌گیری از فروریزش (CP)^۹ حفظ نمایند. از این‌رو بررسی دقیق اثر جداساز بر پایداری، شکل‌پذیری، کاهش احتمال فروریزش و شاخص‌های ACMR/^{۱۰}CMR می‌تواند به‌عنوان گامی اساسی در توسعه استانداردهای نوین طراحی لرزه‌ای مطرح شود.

لازم به ذکر است که اهداف عملکردی سازه‌ها تابعی از سطح خطر لرزه‌ای، نوع کاربری، درجه اهمیت و الزامات آیین‌نامه‌ای مربوط به ساختمان است. در پژوهش حاضر، قاب‌های خمشی ویژه فولادی مورد مطالعه، به‌عنوان سازه‌های متعارف با درجه اهمیت معمولی فرض شده‌اند؛ از این‌رو، اهداف عملکردی و معیارهای ارزیابی ارائه‌شده، صرفاً برای این دامنه از سازه‌ها تعریف و تفسیر شده‌اند. بنابراین، اهداف مذکور نباید به‌صورت کلی به ساختمان‌های با درجات اهمیت بالاتر، ساختمان‌های دارای کاربری‌های خاص یا تأسیسات حیاتی تعمیم داده شوند. برای این دسته از سازه‌ها، لازم است اهداف عملکردی متناسب با درجه اهمیت، کاربری و الزامات لرزه‌ای اختصاصی آن‌ها به‌طور جداگانه تعیین شود. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی دقیق غیرخطی و اجرای IDA بر روی قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه، تلاش دارد تصویری جامع از اثربخشی جداسازهای LRB در کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ارائه دهد و خلأهای پژوهشی موجود در ادبیات فنی به‌ویژه در حوزه سیستم‌های فولادی را برطرف سازد. در ادامه مطالب ذکرشده، می‌توان پژوهش‌های مرتبط با جداسازهای لرزه‌ای را به‌طور کلی در سه محور اصلی طبقه‌بندی نمود:

الف) مطالعات مربوط به کاهش پاسخ سازه با استفاده از

LRB

بخش عمده‌ای از تحقیقات اولیه بر کاهش دریافت طبقات، کاهش شتاب سقف و کاهش نیروهای داخلی در سازه‌های مجهز به جداساز تمرکز داشته‌اند. نتایج این مطالعات نشان داده است که LRB می‌تواند به کاهش قابل توجه پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، از جمله برش پایه و دریافت طبقات، منجر شود و تغییرشکل‌های طبقات

^۸ Life Safety^۹ Collapse Prevention^{۱۰} Adjusted Collapse Margin Ratio^{۱۱} Collapse Margin Ratio^۱ Northridge^۲ Kobe^۳ Kocaeli^۴ Lead Rubber Bearing^۵ Performance-Based Seismic Design^۶ Incremental Dynamic Analysis^۷ Steel Special Moment Frame

پ) مطالعات مقایسه‌ای اثر ارتفاع سازه بر کارایی جداساز ارتفاع سازه یکی از شاخص‌های مؤثر در کارایی جداساز است. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جداسازی در سازه‌های کوتاه‌مرتبه بیش‌ترین اثر را دارد، اما در میان‌مرتبه و بلندمرتبه ممکن است رفتار سازه تحت تأثیر مودهای بالاتر، پیچیده‌تر شود. با این وجود، تعداد مطالعاتی که عملکرد جداساز را در سازه‌هایی با تعداد طبقات مختلف به صورت هم‌زمان بررسی کرده باشند، بسیار محدود است [۱۵-۱۹]. در جدول (۱) تعدادی از مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر جداسازها در رفتار سازه‌ها ارائه شده است.

را به میزان چشم‌گیری محدود نماید [۶]. با این حال در بسیاری از این تحقیقات، رفتار فروریزش و شاخص‌های ایمنی مبتنی بر FEMA P695 مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است [۶-۹].

ب) مطالعات تحلیل پیشرفته فروریزش و منحنی‌های شکنندگی

پژوهش‌هایی که از روش IDA برای استخراج منحنی شکنندگی استفاده کرده‌اند، عمدتاً بر روی قاب‌های بتن‌آرمه یا سازه‌های کوتاه‌مرتبه تمرکز داشته‌اند. اگرچه برخی مطالعات اثر جداسازها بر منحنی‌های شکنندگی را بررسی کرده‌اند، اما پژوهش‌های کم‌تری به بررسی قاب‌های خمشی فولادی با مدل‌سازی دقیق هیستریزس، اثر ارتفاع سازه، و محاسبه هم‌زمان CMR و ACMR پرداخته‌اند [۱۰-۱۴].

جدول ۱- تعدادی از مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر جداسازها

ردیف	نویسندگان/سال	عنوان تحقیق	روش/نوع سازه	نتایج کلیدی
۱	Nguyen et al., (2023) [1]	Seismic Fragility Analysis of Steel Moment Frames Using ML	قاب خمشی فولادی، تحلیل ML، NLTH	توسعه مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی شکنندگی
۲	Kelly, J.M. (1997) [2]	Earthquake-Resistant Design with Rubber	قاب فولادی با LRB، تحلیل احتمالاتی	افزایش قابلیت اطمینان لرزه‌ای سازه
۳	Naeim, F., and Kelly, J.M. (2021) [6]	Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice	تحلیل غیرخطی، رکوردهای مختلف	کاهش احتمال آسیب با LRB
۴	Buckle et al., (2014) [7]	Seismic Isolation of Buildings: Design and Practice	قاب جداسازی شده، IDA	بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش فروریزش
۵	Warn, G.P., and Whittaker, A.S (2008) [8]	A Study of the Coupling of the Translational and Torsional Responses of Base-Isolated Buildings	پل‌های جداسازی شده، شبکه عصبی BP	تأثیر دما بر عملکرد LRB
۶	Constantinou et al., (2007) [9]	LRB Isolators: Experimental and Analytical Studies	تحلیل NLTH	کاهش احتمال آسیب سازه با LRB
۷	Whittaker et al., (1998), [10]	Seismic Isolation of Buildings	تحلیل اثر تخریب مکانیکی LRB	افت سختی/استحکام موجب افزایش شکنندگی
۸	Ryan et al., (2013) [11]	Influence of Seismic Isolation and Supplemental Damping on Floor Acceleration Demands in Building Structures	قاب فولادی با LRB و HSS	کاهش جابه‌جایی و برش پایه با LRB
۹	Hall et al., (2001) [12]	Near-Source Ground Motion and Its Effects on Flexible Buildings	جداسازی بین‌طبقه، تحلیل شکنندگی	کاهش آسیب و بهبود عملکرد
۱۰	Jangid, R.S., and Kelly, J.M. (2001) [13]	Base Isolation for Near-Fault Motions	تحلیل پارامتریک	حساسیت زیاد شکنندگی به سختی و F_y جداساز
۱۱	Mazzoni et al., (2006) [14]	OpenSees Command Language Manual	مدل‌سازی پیشرفته هسته سرب	درک بهتر رفتار حرارتی-مکانیکی LRB
۱۲	Kalkan, E., and Kunnath, S.K. (2006) [15]	Assessment of Current Nonlinear Static Procedures for Seismic Evaluation of Buildings	سازه مدولار، جداساز X شکل	عملکرد لرزه‌ای بهتر نسبت به حالت ثابت
۱۳	Liel et al., (2009) [16]	Incorporating Modeling Uncertainties in the Assessment of Seismic Collapse Risk of Buildings	روش سریع تحلیل شکنندگی	کاهش چشم‌گیر زمان تحلیل با حفظ دقت
۱۴	Chopra, A.K. (2020) [17]	Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering	پل بتن‌آرمه، جداساز الاستومری	کاهش ریسک لرزه‌ای پل‌ها
۱۵	Baker, J.W. (2015) [18]	Efficient Seismic Fragility Analysis of Structures Using Statistical Learning	آزمایش هیبریدی، LHB	جذب انرژی بیش‌تر نسبت به LRB

لرزه‌ای می‌تواند پاسخ سازه را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد، اما رفتار واقعی سازه‌های فولادی مجهز به LRB در محدوده غیرخطی عمیق و نزدیک به حالت فروریزش به‌طور دقیق بررسی نشده است.

علاوه بر این، نبود اطلاعات کافی درباره اثر ارتفاع سازه، عدم ارزیابی جامع شاخص‌های ایمنی فروریزش (CMR و ACMR) و محدودبودن مطالعات مربوط به منحنی‌های شکنندگی، خلأهایی هستند که می‌توانند موجب سردرگمی طراحان در استفاده از سیستم‌های جداساز شوند.

بنابراین هدف اصلی این پژوهش، بررسی توان جداسازهای هسته سربی در کاهش احتمال فروریزش، آسیب‌پذیری لرزه‌ای و شاخص‌های عملکردی قاب‌های خمشی فولادی با ارتفاع‌های مختلف است.

باوجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در زمینه استفاده از جداسازهای لرزه‌ای و ارزیابی عملکرد قاب‌های فولادی، بررسی هم‌زمان اثر جداسازهای هسته سربی بر رفتار لرزه‌ای، منحنی‌های شکنندگی و ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه فولادی همچنان با محدودیت‌هایی همراه است. بخش قابل‌توجهی از مطالعات پیشین بر پاسخ‌های لرزه‌ای متعارف، مانند کاهش برش پایه یا تغییر مکان نسبی طبقات، تمرکز داشته‌اند؛ درحالی‌که ارتباط میان استفاده از جداساز هسته سربی و احتمال رسیدن سازه به حالت‌های حدی مختلف، به‌ویژه فروریزش، کم‌تر بررسی شده است. افزون بر این، تأثیر عواملی همچون تعداد طبقات، ویژگی‌های دینامیکی قاب، مشخصات هیستریزس جداساز و سطح شدت زلزله بر پاسخ شکنندگی و ظرفیت فروریزش، نیازمند مطالعه‌ای نظام‌مند است.

در پژوهش حاضر، ابتدا مدل‌های عددی قاب‌های خمشی ویژه فولادی مجهز به جداساز هسته سربی توسعه داده می‌شوند. سپس رفتار غیرخطی قاب‌ها تحت مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله و در سطوح مختلف شدت لرزش بررسی می‌شود. در ادامه، با استفاده از نتایج تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، منحنی‌های شکنندگی و ظرفیت فروریزش مدل‌های مورد مطالعه استخراج و با قاب‌های مشابه فاقد جداساز مقایسه می‌شوند. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کمی تأثیر جداساز هسته سربی بر کاهش احتمال عبور از سطوح مختلف آسیب و بهبود ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه فولادی است.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از سامانه‌های جداسازی لرزه‌ای و سایر سامانه‌های کنترل ارتعاش می‌تواند با کاهش انتقال نیروی زلزله به روسازه، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، ازجمله شتاب طبقات، تغییر مکان نسبی طبقات و برش پایه را کاهش دهد. در همین راستا، پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی، تحلیل منحنی‌های شکنندگی و ارزیابی ظرفیت فروریزش آن‌ها پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات بیانگر آن است که عواملی همچون نحوه مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح و اعضا، مشخصات هیستریزس، اندرکنش میان روسازه و جداساز و همچنین شرایط مرزی، تأثیر قابل‌توجهی بر دقت پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای و احتمال فروریزش دارند. با وجود مطالعات انجام‌شده، بررسی جامع و هم‌زمان تأثیر جداسازهای هسته سربی بر شاخص‌های شکنندگی و ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه فولادی، همچنان نیازمند توجه بیشتری است. از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر این موضوع، اثر استفاده از جداساز هسته سربی را بر پاسخ لرزه‌ای، منحنی‌های شکنندگی و ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه فولادی بررسی می‌کند.

با توجه به طبقه‌بندی ذکرشده، می‌توان موارد زیر را به‌عنوان خلأهای موجود در ادبیات تحقیق ذکر کرد:

الف) کمبود مطالعات جامع بر روی قاب‌های خمشی ویژه فولادی مجهز به LRB

بیش‌تر تحقیقات بر روی سازه‌های بتن‌آرمه بوده و مطالعات فولادی بسیار محدود است.

ب) نبود تحلیل‌های جامع فروریزش با شاخص‌های CMR و ACMR درحالی‌که این شاخص‌ها معیار اصلی در ارزیابی ایمنی لرزه‌ای هستند، اغلب مطالعات تنها به مقایسه دریف‌ها اکتفا کرده‌اند.

پ) عدم بررسی پراکندگی رکوردها و پایداری پاسخ در حضور جداساز

مسئله بسیار مهمی که در تحقیقات اندکی مورد توجه قرار گرفته است.

ت) فقدان مطالعه نظام‌مند اثر ارتفاع سازه سه ارتفاع متفاوت در یک پژوهش نادر است و اغلب مطالعات تک‌مدله هستند.

لذا با توجه به خلأهای موجود در ادبیات و پیشرفت‌های قابل‌ملاحظه در طراحی لرزه‌ای، سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی ویژه همچنان در برابر زلزله‌های شدید به‌ویژه زلزله‌های نزدیک گسل آسیب‌پذیر هستند. ازسوی دیگر، با آن‌که جداسازی

نتایج مربوط به نزدیکی فروریزش، محدودیت مذکور مدنظر قرار گرفته است.

مدل‌های عددی قاب‌های خمشی ویژه فولادی مجهز به جداساز هسته سربی در محیط OpenSees توسعه داده شدند. هندسه قاب‌ها، مشخصات مقاطع تیر و ستون، ارتفاع طبقات، طول دهانه‌ها، بارهای ثقیل، جرم لرزه‌ای طبقات و شرایط مرزی مطابق مدل‌های مورد مطالعه تعریف شد. جرم لرزه‌ای هر طبقه به صورت متمرکز در گره‌های تراز طبقات اعمال شد و اثرات هندسی مرتبه دوم با استفاده از تبدیل هندسی P- Δ در تحلیل‌ها لحاظ شد.

به منظور بازنمایی رفتار غیرخطی توزیع شده در طول اعضا، تیرها و ستون‌های فولادی با استفاده از المان‌های فایبری مدل شدند. در این روش، سطح مقطع اعضا به الیاف فولادی تقسیم و رفتار مصالح هر فیبر با مدل Steel01 تعریف شد. پارامترهای اصلی این مدل شامل مدول الاستیسیته فولاد (E)، تنش تسلیم (F_y) و نسبت سخت‌شوندگی پس از تسلیم (b) است. بنابراین، رفتار غیرخطی خمشی اعضا از طریق تسلیم تدریجی الیاف در سطح مقطع و امتداد طول عضو بازنمایی شد.

جداسازهای هسته سربی در تراز جداسازی مدل‌سازی شدند و پارامترهای رفتاری آن‌ها، شامل سختی اولیه، سختی پس از تسلیم، نیروی مشخصه/تسلیم هسته سربی و مشخصات قائم جداساز، مطابق مشخصات طراحی سامانه جداسازی تعریف شد. رفتار چرخه‌ای جداساز به گونه‌ای در نظر گرفته شد که سختی اولیه، تسلیم هسته سربی، سختی پس از تسلیم و ظرفیت اتلاف انرژی آن بازنمایی شود.

پاسخ لرزه‌ای مدل‌ها با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی بررسی شد. شتاب‌نگاشت‌های منتخب با روش مقیاس‌سازی دامن‌ای مقیاس شدند؛ بدین معنا که هر رکورد تنها در یک ضریب ثابت ضرب شد و هیچ‌گونه تغییر زمانی یا تطبیق طیفی مصنوعی در آن اعمال نشد. معیار تشخیص ناپایداری و فروریزش نیز بر اساس چارچوب FEMA P695 و با توجه به عدم همگرایی پایدار تحلیل یا وقوع ناپایداری دینامیکی تعیین شد.

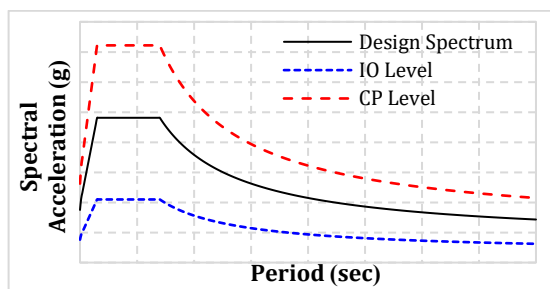
لازم به ذکر است که مدل Steel01 رفتار دوخطی الاستوپلاستیک همراه با سخت‌شوندگی را شبیه‌سازی می‌کند؛ اما زوال چرخه‌ای سختی و مقاومت، افت مقاومت پس از اوج، کماتش موضعی و شکست کم چرخه‌ای را شبیه‌سازی نمی‌کند. بنابراین، مدل حاضر به منظور ارزیابی پاسخ غیرخطی کلی قاب و شاخص‌های عملکردی آن به کار گرفته شده است و در تفسیر

ارزیابی دقیق ایمنی فروریزش و شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه فولادی مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای هسته سربی، نیازمند یک رویکرد احتمالی منسجم است که عدم قطعیت‌های موجود در تحریک جانبی زلزله و مشخصات ساختاری را به طور هم‌زمان لحاظ کند. بدین منظور، در این پژوهش از چارچوب ارزیابی کمی عملکرد لرزه‌ای ارائه شده در دستورالعمل FEMA P695 استفاده شده است. شکل مفهومی این روش شناسی مبتنی بر گذر از تحلیل‌های استاتیکی خطی اولیه به سمت تحلیل‌های پیشرفته دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزایشی است. خروجی این تحلیل‌ها مبنای استخراج منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای و تعیین شاخص‌های حاشیه ایمنی فروریزش قرار می‌گیرد [۳ و ۱۵-۱۹].

شایان ذکر است که استاندارد ASCE/SEI 41-23، ماهیت ارزیابی و بهسازی برای سازه‌های موجود را دارد و برای طراحی اولیه ساختمان‌های جدید، استاندارد ASCE-7 مرجع اصلی محسوب می‌شود. در این مطالعه، از آنجایی که تمرکز بر ارزیابی عملکردی، تعیین منحنی‌های شکنندگی و برآورد ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی ویژه (که پیش‌تر بر اساس ضوابط طراحی لرزه‌ای طراحی شده‌اند) بوده است، ضوابط ASCE 41-23 صرفاً به عنوان چارچوب ارزیابی سطح عملکرد و تعیین معیارهای پذیرش غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، علی‌رغم محدودیت‌های روش استاتیکی غیرخطی در طراحی ساختمان‌های جدید، از این روش در کنار تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، برای درک بهتر توزیع غیرخطی و توالی تشکیل مفاصل پلاستیک در سیستم‌های مجهز به جداساز استفاده شده است.

اعضای فولادی قاب با استفاده از المان‌های فایبری^۱ و بر مبنای رویکرد پلاستیسیته گسترده مدل‌سازی شدند. برای تعریف رفتار غیرخطی فولاد، مدل مصالح Steel01 در نرم‌افزار OpenSees به کار گرفته شد. این مدل، رفتار دوخطی الاستوپلاستیک همراه با سخت‌شوندگی سینماتیکی را بازنمایی می‌کند. لازم به ذکر است که مدل Steel01 به صورت ذاتی، زوال چرخه‌ای سختی و مقاومت، افت مقاومت پس از اوج، کماتش موضعی و شکست کم چرخه‌ای را شبیه‌سازی نمی‌کند. بنابراین، مدل حاضر به منظور ارزیابی پاسخ غیرخطی کلی قاب و شاخص‌های عملکردی آن به کار گرفته شده است و در تفسیر

¹ Fiber Sections



شکل ۱- طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) [۲۰]

$$S_{50\% \text{ in } 50 \text{ year}} = S_{10\% \text{ in } 50 \text{ year}} \times \left(\frac{P_R}{475}\right)^n \quad (3)$$

که دوره بازگشت سطح خطر مورد نظر و (n) ضریب وابسته به شرایط لرزه‌خیزی و شکل طیف است. با در نظر گرفتن دوره بازگشت حدود ۲۵۰۰ سال برای سطح خطر ۲٪ در ۵۰ سال و ضریب $n = 0.44$ (مورد استفاده در مطالعه، ضریب تبدیل حاصل، تقریباً برابر با ۱/۵ به دست می‌آید. از این رو، در این پژوهش، طیف متناظر با سطح خطر ۲٪ در ۵۰ سال، از ضرب طیف متناظر با ۱۰٪ در ۵۰ سال در ضریب ۱/۵ محاسبه شده است.

$$S_{2\% \text{ in } 50 \text{ year}} = 1.5 \times S_{10\% \text{ in } 50 \text{ year}} \quad (4)$$

برای ارزیابی سازه در آستانه فروریزش، جابه‌جایی جانبی هدف بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای به میزان ۱/۵ برابر تغییر مکان متناظر با سطح عملکرد فروپاشی، کنترل می‌شود. به منظور جلوگیری از تشکیل مکانیزم‌های خرابی نامطلوب مانند طبقه نرم و هدایت پلاستیسیته به سمت مفاصل خمیری در تیرها، ضابطه ستون قوی-تیر ضعیف در تمامی اتصالات قاب خمشی ویژه مطابق رابطه (۵) کنترل می‌شود [۴]:

$$\frac{\sum M_{PC}}{\sum M_{PB}} > 1 \quad (5)$$

که $(\sum M_{PC})$ مجموع ظرفیت خمشی پلاستیک ستون‌ها با لحاظ نمودن اثر نیروی محوری و $(\sum M_{PB})$ مجموع ظرفیت خمشی پلاستیک تیرها در بر اتصال است. شبیه‌سازی پاسخ غیرخطی قاب‌های خمشی ویژه فولادی در نرم‌افزار OpenSees با استفاده از رویکرد مدل‌سازی فایبر، انجام شده است [۲۱].

قاب‌های مورد مطالعه و بررسی نسبی اثر جداساز هسته سربی بر شاخص‌های پاسخ، شکنندگی و ظرفیت فروریزش به کار گرفته شده است.

۱-۲- فلسفه طراحی مبتنی بر عملکرد و ضوابط طراحی سازه

در رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد (PBD)، هدف اصلی، فراتر رفتن از معیارهای تجویزی آیین‌نامه‌ها و تضمین سطوح عملکردی مشخص در سطوح خطر مختلف زلزله است. سه سطح عملکردی کلیدی شامل قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی و آستانه فروریزش در این فرآیند ارزیابی می‌شوند.

تغییر مکان هدف (δ_t)، نشان‌دهنده حداکثر جابه‌جایی جانبی بام سازه تحت زلزله طرح است و مطابق با آیین‌نامه ASCE 41-23، از رابطه (۱) تعیین می‌شود [۴]:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (2)$$

که (C_0) ضریب اصلاح برای ارتباط دادن تغییر مکان سیستم یک‌درجه آزادی معادل به جابه‌جایی بام ساختمان چنددرجه آزادی، (C_1) ضریب اصلاح برای در نظر گرفتن بیشینه تغییر مکان غیرالاستیک متناظر با رفتار خطی، (C_2) ضریب اصلاح برای لحاظ نمودن اثرات شکل منحنی‌های هیستریزس بر جابه‌جایی بیشینه، (g) شتاب ثقل زمین، (S_a) شتاب طیفی در دوره تناوب مؤثر سازه (T_e) ، (K_i) سختی اولیه و (K_e) سختی مؤثر است.

شتاب طیفی مبنا بر اساس طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) برای سطح ایمنی جانی تعیین می‌شود. طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) که در شکل (۱) ارائه شده [۲۰]، به منظور انطباق با سایر سطوح عملکردی، شتاب‌های طیفی متناظر با سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه و آستانه فروریزش به ترتیب از روابط (۳) و (۴) استخراج می‌شوند:

¹ Performance-Based Design

² Immediate Occupancy

المان‌های سازه‌ای: برای شبیه‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان‌های Nonlinear Beam-Column با فرمولاسیون مبتنی بر نیرو یا جابه‌جایی استفاده می‌شود که پلاستیسیته گسترده را در طول عضو پایش می‌کند. رفتار غیرخطی مصالح فولادی با استفاده از مدل مادی Steel-01 (با رفتار دوخطی الاستوپلاستیک همراه با سخت‌شوندگی حرکتی) شبیه‌سازی شده است. بارهای ثقلی مرده و زنده به‌صورت بارهای توزیع‌شده روی تیرها اعمال شده و جرم لرزه‌ای طبقات در گره‌های ثقلی متمرکز گردیده است. اثرات هندسی مرتبه دوم ($P-\Delta$) نیز در تحلیل‌ها لحاظ شده است.

در این پژوهش، هدف از مدل‌سازی غیرخطی، شبیه‌سازی پاسخ کلی سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای شدید و استخراج شاخص‌های عملکردی، شکنندگی و ظرفیت فروریزش در چارچوب تحلیل‌های غیرخطی افزایشی بوده است. بنابراین، مدل عددی حاضر برای بازتولید همه مکانیزم‌های ریزمقیاس آسیب، از جمله زوال سختی و مقاومت درون‌چرخه‌ای و برون‌چرخه‌ای یا کماتش موضعی اعضا، توسعه نیافته است. باین‌حال، برای اعضای فولادی از مدل مادی Steel-01 با رفتار دوخطی الاستوپلاستیک و سخت‌شوندگی حرکتی و برای جداساز هسته سربی از مدل هیستریزس چرخه‌ای متعارف استفاده شده است؛ از این‌رو، مدل ارائه‌شده برای ارزیابی پاسخ غیرخطی کل سازه و تحلیل فروریزش در چارچوب FEMA P695 مناسب و متعارف است.

۲-۲- مدل‌سازی سیستم جداساز هسته سربی (LRB)

جداسازهای هسته سربی به‌عنوان سیستم کنترل غیرفعال لرزه‌ای، وظیفه افزایش پریود تناوب سازه و مستهلک‌نمودن انرژی زلزله را بر عهده دارند. مدل‌سازی عددی LRB در OpenSees نیازمند شبیه‌سازی هم‌زمان رفتار الاستیک لایه‌های لاستیک و رفتار به‌شدت غیرخطی هسته سربی است.

برای شبیه‌سازی رفتار برشی چندجهته LRB، از المان‌های دوگرهی صفرطول^۱ بهره گرفته شده است. رفتار این المان‌ها در تراز فونداسیون با تعریف مدل مصالح موازی^۲، مدل‌سازی می‌شود [۲۵-۲۱].

مؤلفه^۳ لاستیک^۳، نشان‌دهنده سختی الاستیک افقی لاستیک است که با رفتار الاستیک خطی شبیه‌سازی می‌شود. مؤلفه^۴ هسته سربی^۴ و شبیه‌سازی رفتار اتلافی هسته سربی با استفاده از مدل

هیستریزس چرخه‌ای بوک-ون^۵، یا مدل پلاستیک دوخطی کامل انجام می‌شود تا پدیده تسلیم سرب تحت برش و ظرفیت میرایی بالای آن به درستی شبیه‌سازی شود.

بار قائم ناشی از وزن سازه، تأثیر مستقیمی بر سختی جانبی و ظرفیت مستهلک‌سازی انرژی جداساز دارد. در مدل‌سازی تفصیلی، تغییرات سختی برشی ناشی از فشار قائم اعمالی روی تک‌تک جداسازها پایش شده و ناپایداری‌های احتمالی تحت جابه‌جایی‌های جانبی بزرگ (کنترل واژگونی) لحاظ می‌شود.

در این پژوهش، رفتار غیرخطی جداسازهای هسته سربی با استفاده از المان zeroLength در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شد. رفتار جانبی هر جداساز از ترکیب سختی الاستیک لایه‌های لاستیکی و رفتار هیستریزیسی هسته سربی تشکیل شده است. برای رفع ابهام در مدل‌سازی، رفتار هسته سربی با مدل پلاستیک دوخطی کامل در نظر گرفته شد؛ به‌طوری‌که سختی اولیه، سختی پس از تسلیم و نیروی تسلیم، به‌ترتیب مشخص‌کننده سختی پیش از تسلیم، سختی ناشی از لایه‌های لاستیکی پس از تسلیم هسته سربی و ظرفیت تسلیم هسته سربی هستند.

برای قاب سه‌طبقه، سختی اولیه و سختی پس از تسلیم جداسازها به‌ترتیب حدود $K_1 = 6 \text{ (kN/mm)}$ و $K_2 = 0.6 \text{ (kN/mm)}$ در نظر گرفته شد. نیروی تسلیم هسته سربی نیز حدود $Q_d = 60 \text{ (kN)}$ و جابه‌جایی تسلیم متناظر تقریباً $u_y = 11 \text{ (mm)}$ لحاظ شد. نسبت میرایی مؤثر سامانه جداسازی در سطح جابه‌جایی طرح حدود ۱۵٪ در نظر گرفته شد.

برای قاب شش طبقه، با توجه به افزایش بار قائم و تقاضای جانبی وارد بر تکیه‌گاه‌ها، مشخصات جداسازها افزایش داده شد؛ به‌طوری‌که سختی اولیه و سختی پس از تسلیم به‌ترتیب برابر با $K_1 = 10 \text{ (kN/mm)}$ ، $K_2 = 1.0 \text{ (kN/mm)}$ و نیروی تسلیم هسته سربی برابر با $Q_d = 100 \text{ (kN)}$ در نظر گرفته شد. جابه‌جایی تسلیم متناظر حدود $u_y = 11 \text{ (mm)}$ و نسبت میرایی مؤثر نیز حدود ۱۵٪ فرض شد.

برای قاب ۹ طبقه نیز به‌منظور تأمین ظرفیت قائم و کنترل پاسخ جانبی سازه، سختی اولیه و سختی پس از تسلیم جداسازها به‌ترتیب برابر با $K_1 = 14 \text{ (kN/mm)}$ و $K_2 = 1.4 \text{ (kN/mm)}$ لحاظ شد. نیروی تسلیم هسته سربی در این مدل حدود $Q_d = 14 \text{ (kN)}$ ، جابه‌جایی تسلیم حدود $u_y = 11 \text{ (mm)}$ و

⁵ Bouc-Wen

¹ zeroLength

² Parallel Material (UniaxialMaterial Parallel 1 \$matRubber \$matLead)

³ matRubber

⁴ matLead

۲-۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA)

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، دقیق‌ترین ابزار عددی برای پایش پاسخ سازه از رفتار کاملاً الاستیک تا فروریزش دینامیکی است. در این فرآیند، هر جفت شتاب‌نگاشت با گام‌های مقیاس فزاینده (مثلاً افزایش تدریجی شتاب طیفی) به سازه اعمال می‌شود [۲۶-۲۹].

شاخص شدت (IM)^۱، در این پژوهش، شتاب طیفی در پیوند مود اول نوسان سازه با ۵ درصد میرایی یعنی $S_a(T_1, 5\%)$ به‌عنوان شاخص شدت انتخاب شده است. شاخص نیاز سازه‌ای (DM)^۲ بیشینه نسبت دریافت نسبی طبقات^۳، به‌عنوان شاخص کلیدی آسیب انتخاب شده است.

معیارهای فروریزش دینامیکی بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای، فروریزش سازه در فرآیند تحلیل IDA زمانی حاصل می‌شود که یکی از سه شرط زیر ارضا شود:

معیار دریافت محدودکننده: تجاوز حداکثر جابه‌جایی جانبی نسبی طبقات از مرز ۱۰ درصد.

کاهش سختی مماس: کاهش شیب منحنی IDA به کم‌تر از ۲۰ درصد شیب اولیه منحنی در ناحیه الاستیک.

عدم همگرایی عددی: وقوع عدم همگرایی در الگوریتم حل عددی فرآیند تحلیل دینامیکی فزاینده در نرم‌افزار OpenSees به‌علت ناپایداری هندسی شدید سازه.

منحنی شکنندگی لرزه‌ای بیانگر احتمال شرطی فروریزش سازه در یک شاخص شدت مشخص (IM=S) است. این احتمال با استفاده از یک تابع توزیع تجمعی (CDF) لگ‌نرمال به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$P(\text{Collapse}|S_a=s) = \Phi\left(\frac{\ln(s/\hat{S}_{CT})}{\beta_{TOT}}\right) \quad (6)$$

که Φ تابع توزیع نرمال استاندارد تجمعی $\hat{S}_{CT}$ ، $\hat{S}_{CT}$ میانه ظرفیت فروریزش سازه (شدتی که در آن دقیقاً ۵۰٪ از رکوردها موجب فروریزش سازه می‌شوند) و β_{TOT} انحراف معیار لگاریتمی کل که بیانگر عدم قطعیت سیستم است.

به‌منظور تعیین نسبت حاشیه فروریزش، ابتدا تحلیل‌های دینامیکی افزایشی برای هریک از شتاب‌نگاشت‌های منتخب انجام شد. در هر تحلیل، شدت شتاب‌نگاشت به‌تدریج افزایش یافت تا مدل به معیار فروریزش تعریف‌شده برسد. شدت طیفی متناظر با

نسبت میرایی مؤثر سامانه جداسازی حدود ۱۵٪ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، افزایش مشخصات سختی و ظرفیت تسلیم جداسازها متناسب با افزایش ارتفاع، جرم و بار قائم مدل‌های سازه‌ای اعمال شد.

۲-۳- انتخاب و مقیاس‌سازی رکوردهای زلزله

بر اساس الزامات متدولوژی FEMA P695، ارزیابی ظرفیت فروریزش لرزه‌ای باید با استفاده از مجموعه‌ای معتبر از شتاب‌نگاشت‌ها انجام شود. در این پژوهش، مجموعه ۲۲ جفت رکورد زلزله دور از گسل (منطبق بر پیوست الف دستورالعمل FEMA P695) انتخاب شده که مشخصات تفصیلی آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است [۳]. رکوردهای انتخابی ابتدا بر اساس شتاب طیفی در پیوند اصلی سازه مجهز به جداساز ($S_a(T_1, 5\%)$) به‌نحوی مقیاس می‌شوند که شتاب طیفی میانگین آن‌ها با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) در تراز زلزله طرح و زلزله بیشینه MCE در بازه زمانی ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب سازه منطبق شود. از آن‌جا که در این روش تنها دامنه شتاب‌نگاشت‌ها تغییر می‌کند و شکل تابع شتاب-زمان اصلاح نمی‌شود، محتوای فرکانسی، مدت دوام و ویژگی‌های زمانی اصلی رکوردها حفظ می‌شوند. این روش با رویکرد مطرح‌شده در ویرایش‌های ASCE/SEI 41-23 و ASCE/SEI 41-17 نیز سازگار است.

جدول ۲- مشخصات رکوردهای دور از گسل مورد استفاده در

تحلیل‌های دینامیکی در این تحقیق [۳]

	M	Name	PGA _{max}
1	6.7	Northridge	0.52
2	6.7	Northridge	0.48
3	7.1	Duzce, Turkey	0.82
4	7.1	Hector Mine	0.34
5	6.5	Imperial Valley	0.35
6	6.5	Imperial Valley	0.38
7	6.9	Kobe, Japan	0.51
8	6.9	Kobe, Japan	0.24
9	7.5	Kocaeli, Turkey	0.36
10	7.5	Kocaeli, Turkey	0.22
11	7.3	Landers	0.24
12	7.3	Landers	0.42
13	6.9	Loma Prieta	0.53
14	6.9	Loma Prieta	0.56
15	7.4	Manjil, Iran	0.51
16	6.5	Superstition Hills	0.36
17	6.5	Superstition	0.45
18	7	Cape Mendocino	0.55
19	7.6	Chi-Chi, Taiwan	0.44
20	7.6	Chi-Chi, Taiwan	0.51
21	6.6	San Fernando	0.21
22	6.5	Friuli, Italy	0.35

¹ Intensity Measure

² Damage Measure

³ Maximum Inter-Story Drift Ratio- IDR max

ب) عدم قطعیت ضوابط طراحی (β_{DR}) بازتاب دهنده کیفیت آیین نامه طراحی مورد استفاده برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. پ) عدم قطعیت داده های آزمایشگاهی β_{TD} نشان دهنده جامعیت داده های تست اجزای سازه و سیستم LRB برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

ت) عدم قطعیت صحت مدل سازی عددی (β_{MDL}) معرف دقت مدل عددی در شبیه سازی مکانیزم های خرابی برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۹)، عدم قطعیت کل برابر با ۰/۵ محاسبه می شود.

در این پژوهش، مقدار عدم قطعیت کل برای تمامی مدل های ۳، ۶ و ۹ طبقه برابر با $\beta_{TOT} = 0.5$ در نظر گرفته شد. این فرض بر مبنای یکسان بودن چارچوب مدل سازی عددی، نوع سیستم باربر جانبی، مدل مصالح، روش تحلیل غیرخطی، مدل سازی جداسازهای هسته سربی و معیارهای ارزیابی عملکرد در هر سه مدل اتخاذ شده است؛ بنابراین، کیفیت مدل سازی و عدم قطعیت معرف آن در سطحی یکسان فرض شد.

افزون بر این، از آنجا که برای همه مدل ها مجموعه یکسانی از رکوردهای زلزله دور از گسل FEMA P695 و روش مقیاس سازی مشابه استفاده شده است، تغییرپذیری ناشی از رکوردهای زمین لرزه نیز مستقل از ارتفاع سازه در نظر گرفته شد. باین وجود، باید توجه داشت که در سازه های بلندتر، اثر مودهای بالاتر، اثرات مرتبه دوم و تفاوت در توزیع تقاضای لرزه ای می تواند موجب تغییر در سطح واقعی عدم قطعیت شود. از این رو، مقدار ثابت $\beta_{TOT} = 0.5$ در این مطالعه یک فرض ساده کننده تلقی می شود و ارزیابی عدم قطعیت های وابسته به ارتفاع، می تواند در پژوهش های آینده بررسی شود.

پذیرش فروریزش مقدار $ACMR$ به دست آمده برای مدل سازه باید با معیارهای پذیرش آیین نامه FEMA P695 مقایسه شود. معیار متوسط گروه عملکردی $ACMR 10\%$ ، میانگین مقادیر $ACMR$ برای نمونه ها باید بزرگ تر از حد پذیرش متناظر با احتمال فروریزش 10% باشد تا ایمنی کلی سیستم تأیید شود. معیار تک مدل $ACMR 20\%$ مقدار $ACMR$ برای هر مدل سازه ای به طور منفرد باید بزرگ تر از حد پذیرش متناظر با احتمال فروریزش 20% باشد.

معیار فروریزش در این پژوهش بر اساس چارچوب FEMA P695 و با اتکا به بروز ناپایداری دینامیکی در تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی تعیین شد. برای قاب های مجهز به جداساز هسته سربی، علاوه بر پاسخ روسازه، تغییر مکان لایه جداسازی و رفتار غیرخطی جداساز نیز در کنترل رسیدن سیستم

فروریزش برای هر رکورد ($S_{CT,i}$)، از منحنی IDA استخراج شد. سپس، میانه شدت های فروریزش ($\hat{S}_{CT}$)، برای هر مدل تعیین و نسبت حاشیه فروریزش از رابطه زیر محاسبه شد. نسبت حاشیه فروریزش به عنوان شاخص بنیادین توصیف ایمنی لرزه ای سازه، از نسبت ظرفیت فروریزش میانه $\hat{S}_{CT}$ به شتاب طیفی متناظر با زلزله سطح حداکثر محتمل SMT در پریود مود اول به دست می آید (رابطه (۷)):

$$CMR = \frac{\hat{S}_{CT}}{S_{MT}} \quad (7)$$

محاسبه CMR اولیه، اثرات مربوط به شکل طیف (SSF)، رکوردهای زلزله را در جابه جایی های بزرگ به طور کامل منعکس نمی کند. برای اصلاح این اثر، نسبت حاشیه فروریزش تعدیل یافته، با استفاده از ضریب شکل طیف (SSF) مطابق رابطه (۸) محاسبه می شود:

$$ACMR = SSF \times CMR \quad (8)$$

ضریب SSF تابعی از دوره تناوب سازه و پارامتر شکل پذیری مبتنی بر پریود است که از جدول های مرجع FEMA P695 استخراج می شود [۳].

انحراف معیار توزیع احتمالی فروریزش یا عدم قطعیت کل سیستم (β_{TOT})، از ترکیب چهار منبع مستقل عدم قطعیت مطابق رابطه (۹) به دست می آید:

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (9)$$

در این پژوهش، پارامترهای عدم قطعیت بر اساس ویژگی های کیفی سیستم سازه ای و کیفیت مدل سازی مطابق موارد (الف) تا (ت) لحاظ شده اند.

الف) عدم قطعیت تغییرپذیری رکوردها (β_{RTR}) برای سیستم های جداساز لرزه ای با اضافه پریود و شکل پذیری مشخص، بر اساس رابطه (۱۰) تعیین می شود (در این پژوهش برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است).

$$\beta_{RTR} = 0.1 + 0.1\mu_T \leq 0.4 \quad (10)$$

¹ Spectral Shape Effect

به حالت حدی فروریزش مورد توجه قرار گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به استفاده از مدل Steel-01، مکانیسم‌های موضعی زوال سختی و مقاومت اعضای فولادی به‌طور مستقیم در مدل لحاظ نشده‌اند.

حدود تغییر مکان نسبی طبقه مورد استفاده برای ارزیابی سطح عملکرد روسازه، بر اساس جدول C1-3 از پیوست تفسیری FEMA 356، با عنوان Structural Performance Levels and Damage-Vertical Elements، تعیین شد. این حدود به‌منظور ارزیابی میزان آسیب و سطح عملکرد اعضای قائم قاب فولادی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که معیارهای مذکور مربوط به روسازه بوده و کنترل تغییر مکان جانبی سامانه جداسازی به‌طور مستقل، با توجه به ظرفیت تغییر مکان مجاز جداسازهای هسته سربی، انجام شده است [۳۰].

طراحی قاب‌های خمشی ویژه فولادی مورد مطالعه در این پژوهش، بر اساس فرضیات متناظر با بدترین سناریوی خطر لرزه‌ای، یعنی شرایط رده طراحی لرزه‌ای با خطر بسیار زیاد مطابق با خاک تپ (III) استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) انجام شده است. اگرچه متدولوژی FEMA P695 برای تعیین ضرایب رفتار آیین‌نامه‌ای، ارزیابی ترکیبی از رده‌های مختلف طراحی نظیر $SDCD_{max}$ و $SDCD_{min}$ را پیشنهاد می‌کند؛ اما در این پژوهش به دلیل ماهیت مقایسه‌ای مطالعه روی قاب‌های مجهز به جداساز و فاقد جداساز، ارزیابی‌ها بر روی سناریوی بحرانی لرزه‌خیزی تمرکز یافته است که نتایجی محافظه‌کارانه و قابل اطمینان برای ارزیابی ظرفیت فروریزش ارائه می‌دهد.

مراحل اجرایی فرآیند عددی فوق به شرح زیر انجام می‌شود:
الف) مدل‌سازی فیزیکی و هندسی: ساخت هندسه قاب فولادی.

ب) اختصاص جرم لرزه‌ای و قراردادی جداسازهای هسته سربی در تراز پایه.

پ) تحلیل ثقلی غیرخطی: اعمال بار مرده و درصد معینی از بار زنده به‌صورت کنترل نیرو قبل از شروع تحلیل‌های تاریخیچه زمانی.

ت) فراخوانی شتاب‌نگاشت‌ها: اعمال رکوردهای لرزه‌ای با گام‌های زمانی مناسب^۱ و اجرای تحلیل دینامیکی با الگوریتم‌های تکرارشونده نیوتن-رافسون جهت همگرایی سریع.

ث) پایش پاسخ دینامیکی و استخراج داده‌ها: ثبت بیشینه دررفت نسبی طبقات در هر گام تحلیلی.

ج) محاسبات آماری: برآزش توزیع لگ‌نرمال بر اساس میانه ظرفیت‌های فروریزش به‌دست آمده، اعمال ضرایب تعدیل لرزه‌ای،

ارزیابی عدم قطعیت‌ها و درنهایت ترسیم منحنی‌های شکنندگی (منحنی‌های شکنندگی ارائه شده در این پژوهش بر اساس احتمال تجاوز دررفت بیشینه طبقه از حد دررفت متناظر با سطح عملکرد پیش‌گیری از فروریزش ترسیم شده‌اند.) لرزه‌ای نهایی سازه مجهز به جداساز LRB.

۳- نتایج عددی

در این مطالعه قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه، با فرضیات دارای شکل‌پذیری معمولی و ویژه، کاربری مسکونی، واقع شده در منطقه با خطر نسبی بسیار زیاد و خاک نوع سه، جهت تجزیه و تحلیل انتخاب شده‌اند. به‌منظور منعکس نمودن تفاوت میان ستون‌های خارجی و داخلی بر رفتار قاب، اختصاص حداقل سه دهانه به قاب‌ها ضروری است. اعضای تیر و ستون به‌گونه‌ای گروه‌بندی شدند که به هر دو طبقه، یک گروه تیر و دو گروه ستون شامل ستون‌های داخلی و ستون‌های خارجی اختصاص داده می‌شود. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر و طول دهانه‌ها ۶ متر در نظر گرفته شده است.

برای انجام تحلیل‌های مودال، خطی و غیرخطی مورد استفاده در این پژوهش، سازه‌ها در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شدند. در پژوهش حاضر، عناصر سازه‌ای توسط المان تیر-ستون غیرخطی^۲ شامل مقاطع فایبر و بر اساس شیوه انتگرال‌گیری پلاستیسیته گسترده مدل می‌شوند. همچنین اثرات P-Δ المان‌های ستون لحاظ شده و به‌منظور شبیه‌سازی اثرات دال صلب، تغییر مکان افقی گره‌ها یکسان‌سازی می‌شود. مطالعه انجام شده شامل دو فاز اصلی است؛ در فاز اول قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه با شکل‌پذیری ویژه، طبق ضوابط ASCE41-13 طراحی مبتنی بر عملکرد شده و سپس در همین قاب‌های طراحی شده جداساز نیز طراحی می‌شود. در فاز دوم از این تحقیق به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های طراحی شده در فاز اول با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی پرداخته شده است.

۳-۱- قاب خمشی ۳ طبقه

در قاب خمشی ۳ طبقه، قاب با حالت بدون و با جداساز LRB به‌ترتیب با علائم 3S_CD و 3S_BS نام‌گذاری شد. در جدول (۳) مقاطع قاب ۳ طبقه نشان داده شده است. این طرح از نظر قیود اجرایی، طراحی بر اساس نیرو، طراحی بر اساس عملکرد با توجه به ضوابط آیین‌نامه ASCE41-23 همگی قابل قبول است. در شکل (۲) نیز نحوه گروه‌بندی مقاطع در قاب ۳ طبقه و در ادامه نتایج این قاب نشان داده شده است.

² NonlinearBeamColumn Element

¹ Time Step

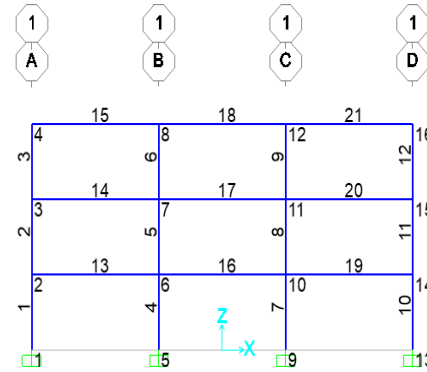
در شکل (۴) نیز منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات برای قاب ۳ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی نشان داده شده است. در شکل (۵) نمودار نسبت دوران المان‌های تیر و ستون برای قاب طراحی شده در حالت بدون جداساز و با جداساز LRB قاب ۳ طبقه در سه سطح عملکردی مذکور برای نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی و بار افزون نشان داده شده است.

با توجه به منحنی پروفیل دریافت طبقات قاب‌های ۳ طبقه طراحی شده با و بدون در نظرگیری جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP و مقادیر مجاز برای دریافت با توجه به دستورالعمل FEMA356 برای قاب خمشی فولادی ۳ طبقه در سطوح عملکردی IO=0.007، LS=0.02 و CP=0.025، قاب طراحی شده از لحاظ عملکرد کلی قاب، با توجه به نتایج تحلیل بار افزون در محدوده پذیرش سطوح عملکردی است. همچنین با توجه به میانگین نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی برای جابه‌جایی نسبی طبقات در قاب ۳ طبقه، در نظرگیری جداساز LRB در این قاب، سبب کاهش دریافت شده است. در شکل‌های (۵) و (۶) نیز منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات برای قاب ۳ طبقه با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی برای نتایج حاصل از تک تک رکوردهای زلزله نشان داده شده است.

در شکل (۷) نیز نمودار نسبت دوران المان‌های تیر و ستون برای قاب طراحی شده در حالت بدون جداساز و با جداساز LRB قاب ۳ طبقه در سطوح عملکردی استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی برای نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی و بار افزون نشان داده شده است.

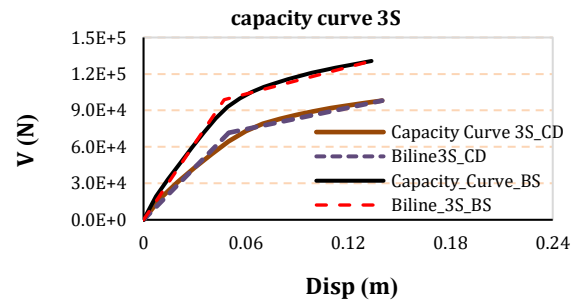
جدول ۳- مشخصات سازه‌ای مدل ۳ طبقه

C_1	W14x53
C_2	W14x53
C_3	W14x48
C_4	W14x68
b_1	W18x35
b_2	W18x35
b_3	W16x45

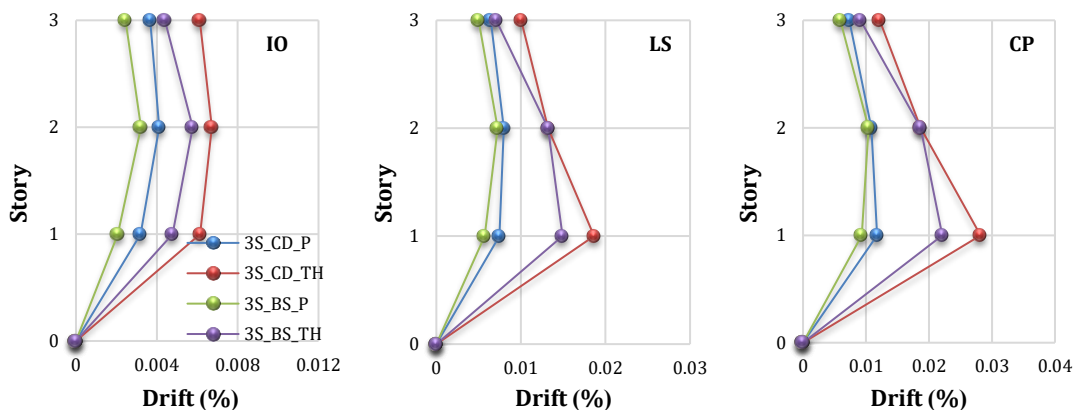


شکل ۲- قاب خمشی ۳ طبقه

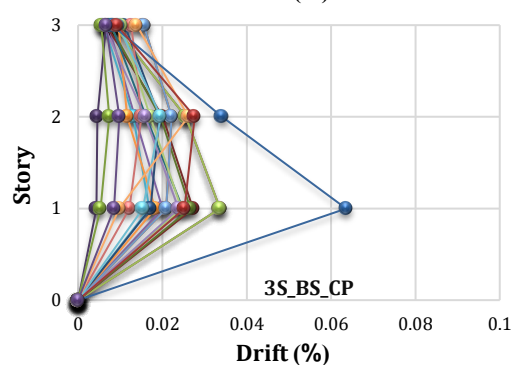
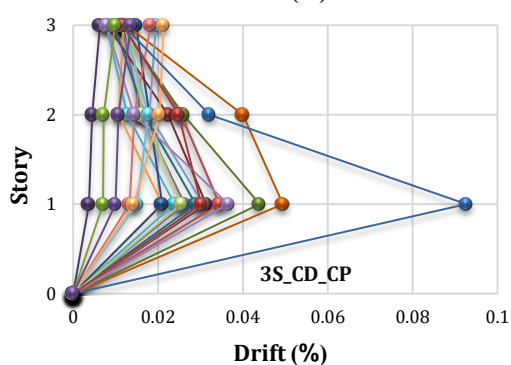
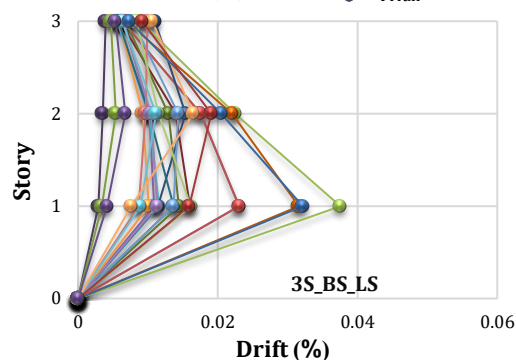
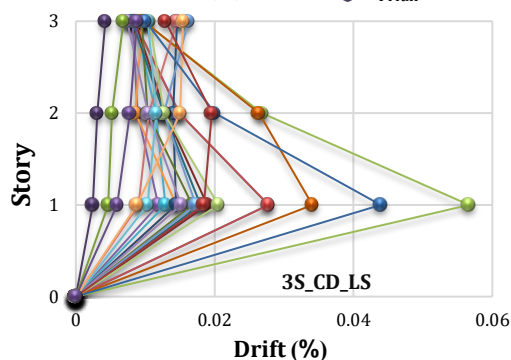
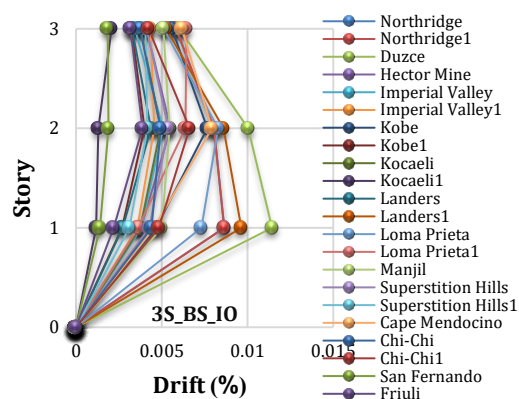
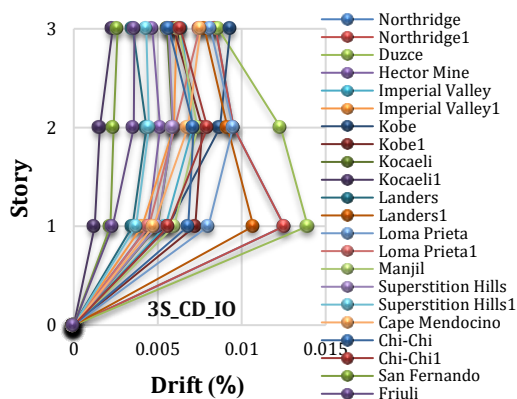
نمودار منحنی ظرفیت یا همان منحنی تحلیل پوش اور به ترتیب برای دو حالت با و بدون جداکننده در قاب سه طبقه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی ظرفیت قاب ۳ طبقه با و بدون جداساز LRB

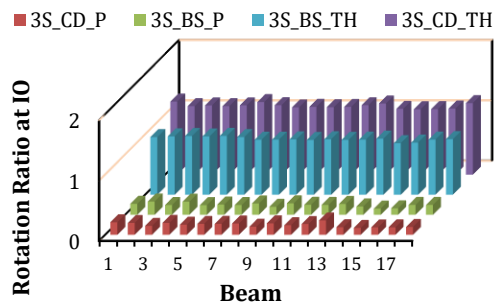
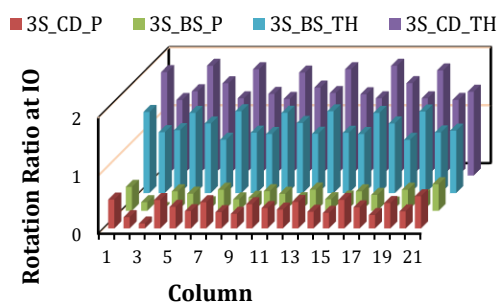


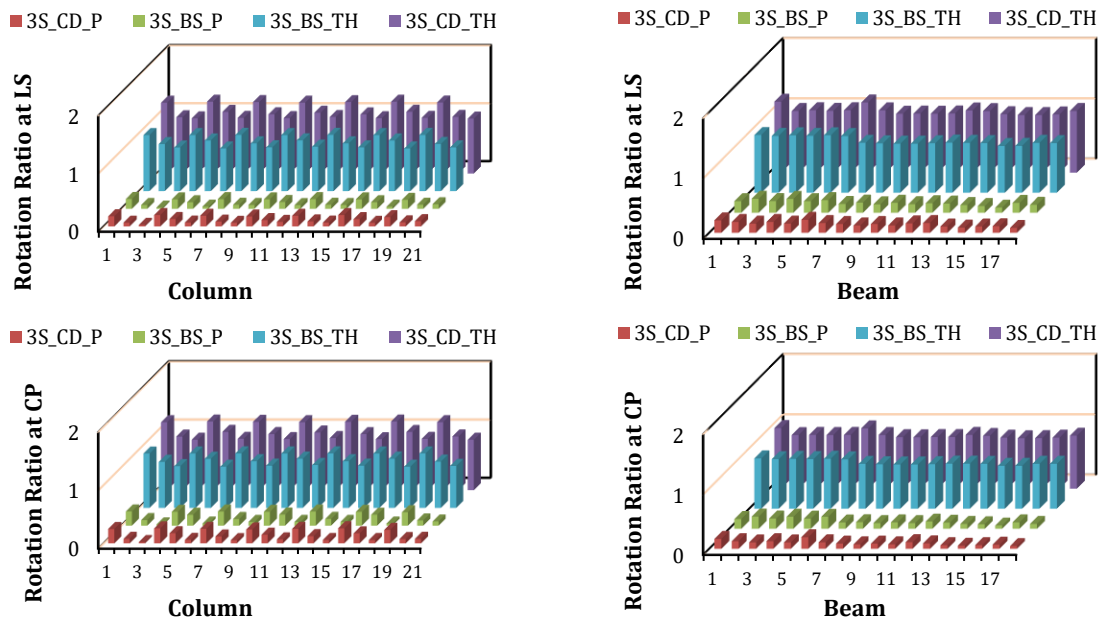
شکل ۴- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۳ طبقه طراحی شده با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP



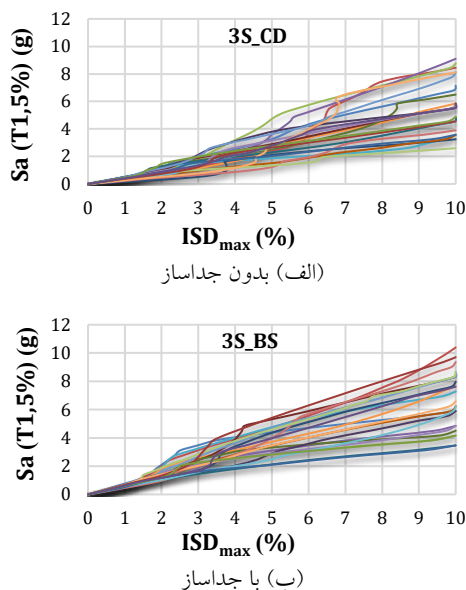
شکل ۶- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۳ طبقه بدون جداساز در سطوح عملکردی IO، LS و CP برای تک تک رکوردها

شکل ۵- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۳ طبقه طراحی شده با جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP برای تک تک رکوردها





شکل ۷- نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل بار افزون برای نسبت دوران موجود به مجاز المان‌های تیر و ستون قاب ۳ طبقه طراحی شده برای حالت با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی (IO)، (LS) و (CP)



شکل ۸- منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی قاب ۳ طبقه برای حالت با و بدون جداساز LRB

در شکل (۹) نیز منحنی شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۳ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی و شکنندگی نیز مشاهده می‌شود جداساز LRB، نسبت حاشیه فروریزش و به طبع آن ایمنی لرزه‌ای را افزایش و شکنندگی را کاهش می‌دهد.

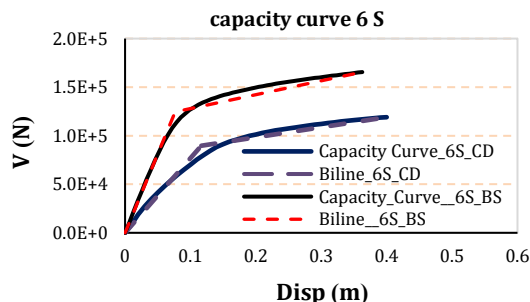
در جدول (۴) نیز نتایج حاصل برای نسبت حاشیه فروریزش و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده برای قاب‌های ۳ طبقه طراحی شده در حالت با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است.

جدول ۴- مقادیر نسبت فروریزش قاب ۳ طبقه

CMR	SSF	ACMR	ACMR Accept
3.17	1.19	3.79	1.92
CMR_BS	Ductility	ACMR_BS	ACMR Accept
3.68	3.65	4.37	1.92

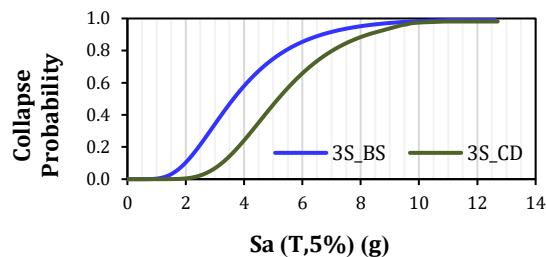
با توجه به مقادیر به دست آمده برای نسبت حاشیه فروریزش و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده برای قاب‌های ۳ طبقه مشاهده می‌شود که جداساز LRB، سبب می‌شود نسبت حاشیه فروریزش و به تبع آن ایمنی لرزه‌ای افزایش و شکنندگی نیز کاهش یابد. در شکل (۸) منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب طراحی شده با و بدون جداساز LRB برای قاب ۳ طبقه نشان داده شده است.

نمودار منحنی ظرفیت یا همان منحنی تحلیل پوش‌آور به ترتیب برای دو حالت با و بدون جداکننده در قاب ۶ طبقه در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- منحنی ظرفیت قاب ۶ طبقه طراحی شده با و بدون جداساز LRB

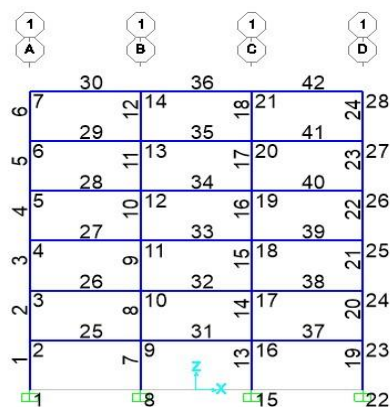
در شکل (۱۲) منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات برای قاب ۶ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخچه زمانی و پوش‌آور نشان داده شده است. با توجه به منحنی پروفیل دریافت طبقات قاب ۶ طبقه طراحی شده با و بدون در نظرگیری جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP و مقادیر مجاز برای دریافت با توجه به دستورالعمل FEMA356 برای قاب خمشی فولادی ۶ طبقه در سطوح عملکردی IO=0.007، LS=0.02 و CP=0.025، قاب طراحی شده از لحاظ عملکرد کلی قاب، با توجه به نتایج تحلیل بار افزون در محدوده پذیرش سطوح عملکردی است. همچنین با توجه به میانگین نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای جابه‌جایی نسبی طبقات در قاب ۶ طبقه، در نظرگیری جداساز LRB در این قاب، سبب کاهش دریافت در طبقات آخر شده است. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات برای قاب ۶ طبقه با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی برای نتایج حاصل از تک تک رکوردهای زلزله نشان داده شده است. در شکل (۱۵) نمودار نسبت دوران المان‌های تیر و ستون برای قاب طراحی شده در حالت بدون جداساز و با جداساز LRB قاب ۶ طبقه در سطوح عملکردی مذکور برای نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و بار افزون نشان داده شده است.



شکل ۹- منحنی شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۳ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB

۳-۲- قاب خمشی ۶ طبقه

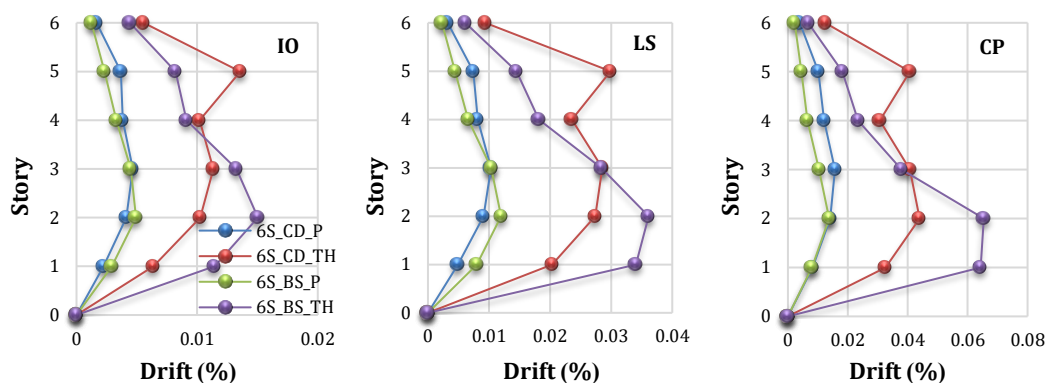
در قاب خمشی ۶ طبقه، قاب با حالت بدون و با جداساز LRB به ترتیب با علائم 6S-BS و 6S-CD نام‌گذاری شد. در جدول (۵) مقاطع قاب ۶ طبقه نشان داده شده است. این طرح از نظر قیود اجرایی، طراحی بر اساس نیرو و طراحی بر اساس عملکرد با توجه به ضوابط آیین‌نامه ASCE41-23 قابل قبول می‌باشد. در شکل (۱۰) نیز نحوه گروه‌بندی مقاطع در قاب ۶ طبقه و در ادامه نتایج این قاب نشان داده شده است.



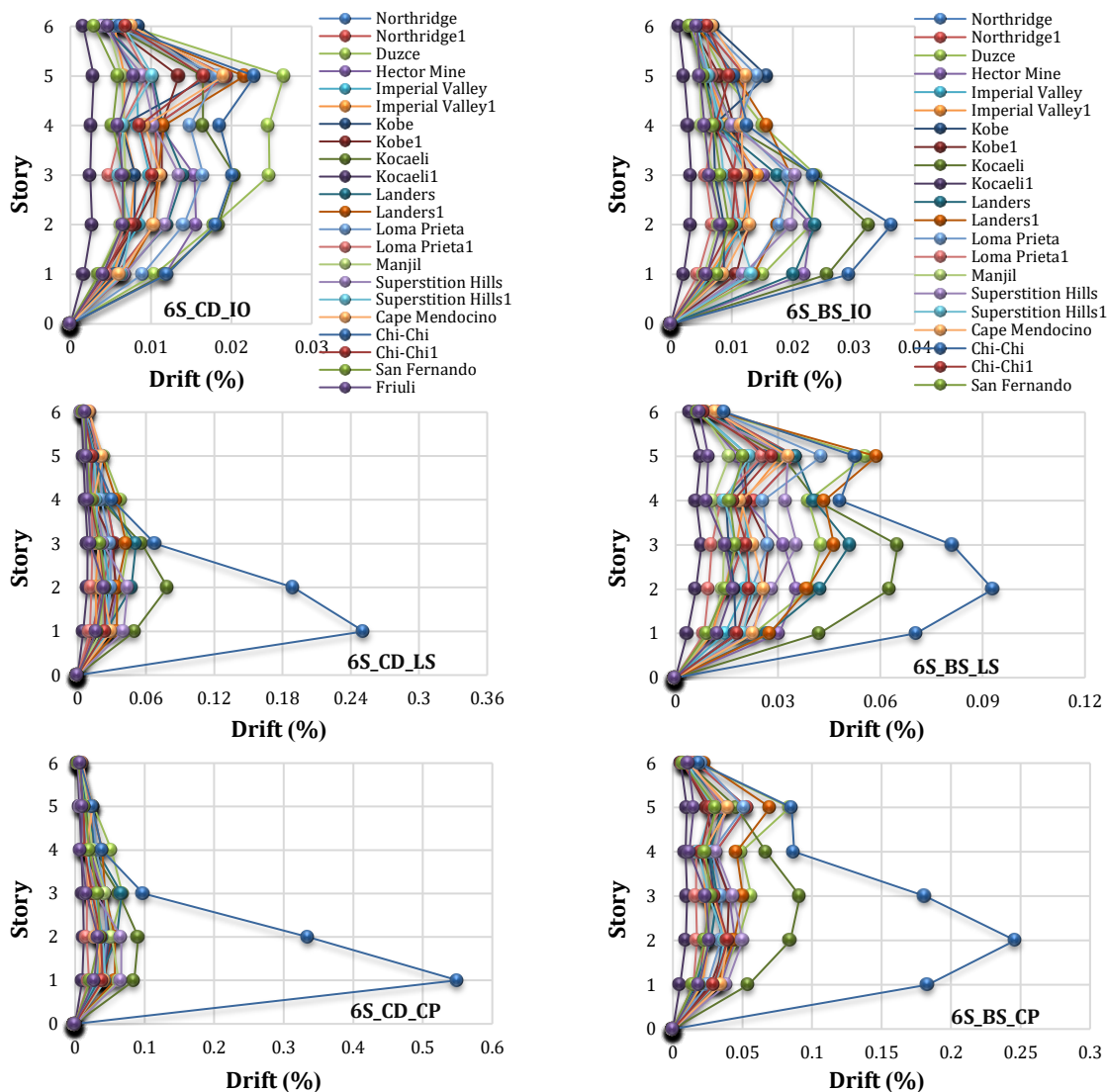
شکل ۱۰- قاب خمشی ۶ طبقه

جدول ۵- مشخصات سازه‌ای مدل ۶ طبقه

C ₁	W14x132
C ₂	W14x68
C ₃	W14x68
C ₄	W14x132
C ₅	W14x132
C ₆	W14x132
b ₁	W21x44
b ₂	W21x44
b ₃	W21x44
b ₄	W21x44
b ₅	W21x44
b ₆	W16x45

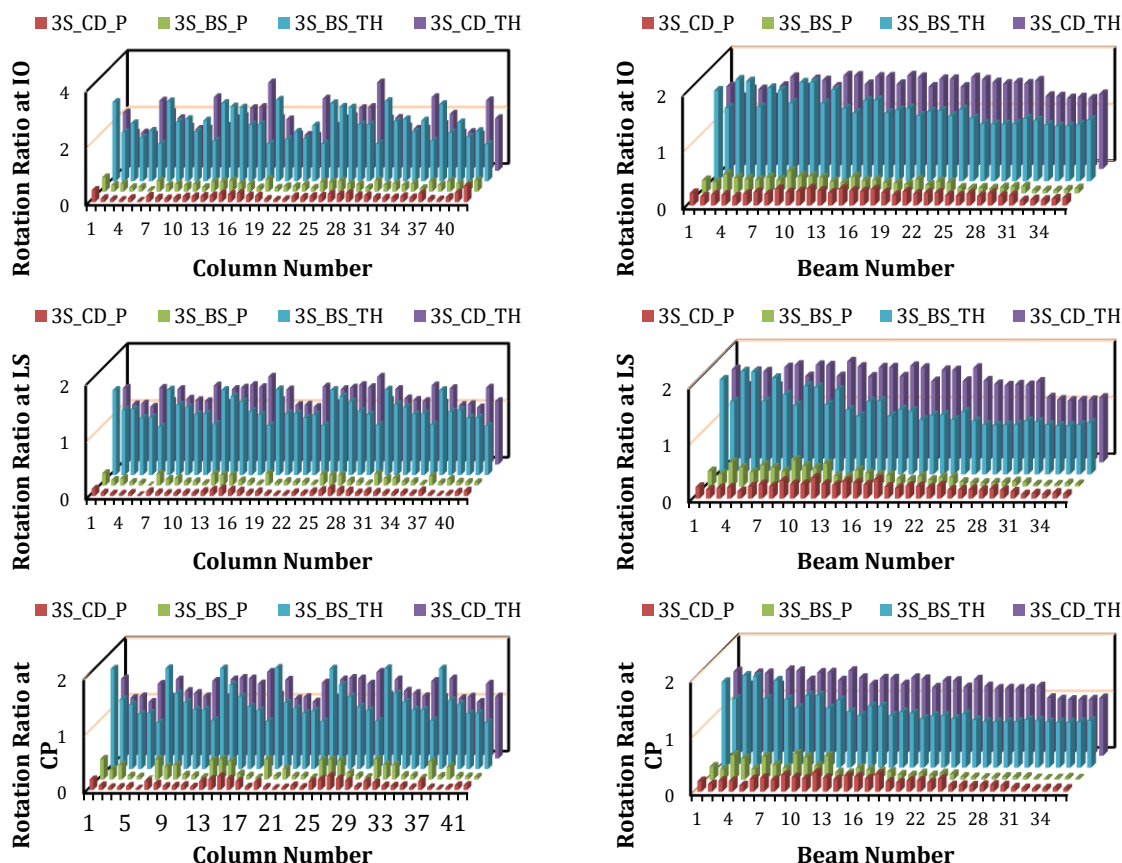


شکل ۱۲- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۶ طبقه با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP



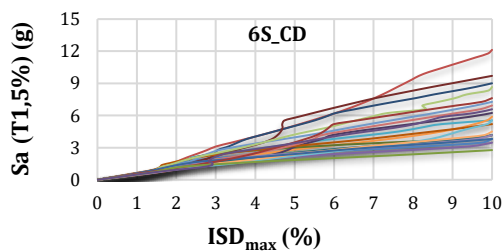
شکل ۱۴- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۶ طبقه بدون جداساز در سطوح عملکردی IO، LS و CP برای تک تک رکوردها

شکل ۱۳- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۶ طبقه طراحی شده با جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP برای تک تک رکوردها

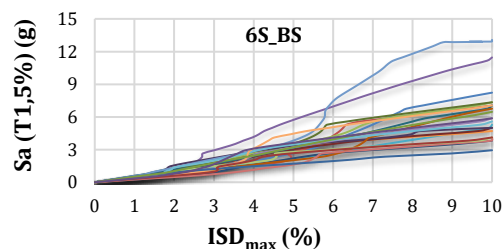


شکل ۱۵- نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل بار افزون برای نسبت دوران موجود به مجاز المان‌های تیر و ستون قاب ۶ طبقه طراحی شده برای حالت با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی (IO)، (LS) و (CP)

مشاهده شد که جداساز LRB، نسبت حاشیه فروریزش و به طبع آن ایمنی لرزه‌ای را افزایش و شکنندگی را کاهش می‌دهد.



(الف) بدون جداساز



(ب) با جداساز

شکل ۱۶- منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی قاب ۶ طبقه برای حالت با و بدون جداساز LRB

در جدول (۶) نتایج حاصل برای نسبت حاشیه فروریزش و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده برای قاب ۶ طبقه با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است.

جدول ۶- مقادیر نسبت فروریزش قاب ۶ طبقه

CMR	SSF	ACMR	ACMR Accept
3.01	1.18	3.56	1.92
CMR_BS	Ductility	ACMR_BS	ACMR Accept
3.98	4.29	4.74	1.92

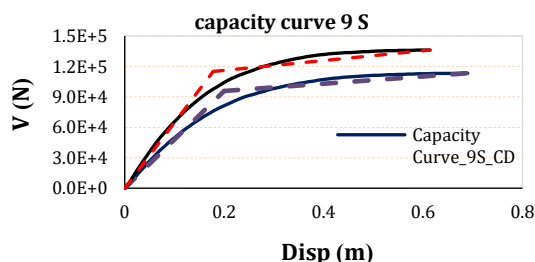
با توجه به مقادیر به دست آمده برای شکل پذیری و نسبت حاشیه فروریزش و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده برای قاب ۶ طبقه نیز همانند قاب‌های ۳ طبقه مشاهده می‌شود که جداساز LRB سبب افزایش نسبت حاشیه فروریزش و به تبع آن ایمنی لرزه‌ای می‌شود و شکنندگی نیز کاهش می‌یابد. در شکل (۱۶) منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۶ طبقه با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است.

در شکل (۱۷) نیز منحنی شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۶ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی و شکنندگی برای قاب ۶ طبقه همانند قاب ۳ طبقه نیز

جدول ۷- مشخصات سازه‌ای مدل ۹ طبقه

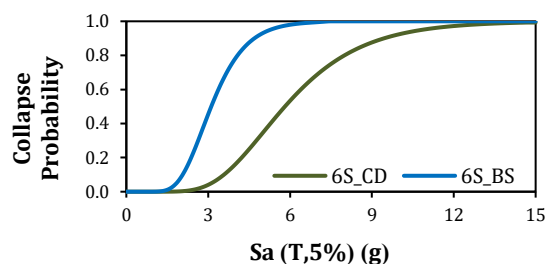
C ₁	W14x132
C ₂	W14x74
C ₃	W14x68
C ₄	W14x53
C ₅	W14x53
C ₆	W14x132
C ₇	W14x132
C ₈	W14x82
C ₉	W14x74
C ₁₀	W14x53
C ₁₁	W14x132
C ₁₂	W14x132
C ₁₃	W14x82
C ₁₄	W14x68
C ₁₅	W14x68
b ₁	W18x46
b ₂	W18x46
b ₃	W18x50
b ₄	W18x50
b ₅	W18x46
b ₆	W16x45
b ₇	W16x45
b ₈	W12x35
b ₉	W12x35

نمودار منحنی ظرفیت یا همان منحنی تحلیل پوش‌آور به‌ترتیب برای دو حالت با و بدون جداکننده در قاب ۹ طبقه در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۹- منحنی ظرفیت قاب ۹ طبقه طراحی شده با و بدون جداساز LRB

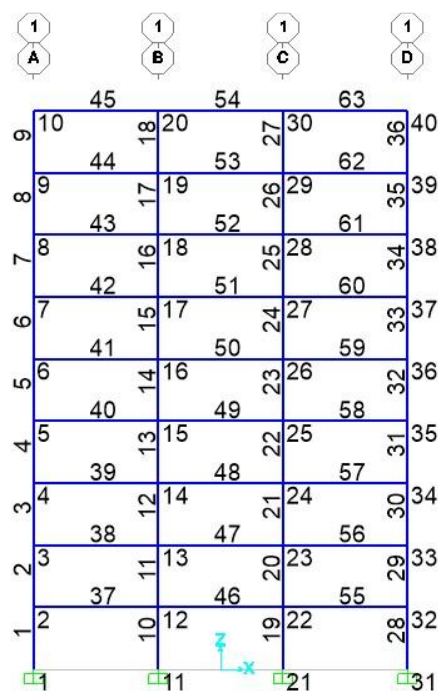
در شکل (۲۰) منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات برای قاب ۹ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی و پوش‌آور نشان داده شده است. با توجه به منحنی پروفیل دریافت طبقات قاب ۹ طبقه طراحی شده با و بدون در نظرگیری جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP و مقادیر مجاز برای دریافت با توجه به دستورالعمل FEMA356 برای قاب خمشی فولادی ۹ طبقه در سطوح عملکردی IO=0.007، LS=0.02 و CP=0.025، قاب طراحی شده از لحاظ عملکرد کلی قاب، با توجه به نتایج تحلیل بار افزون در محدوده پذیرش سطوح عملکردی است. همچنین با توجه به میانگین نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی برای جابه‌جایی نسبی طبقات در قاب ۹ طبقه، در نظرگیری جداساز LRB در قاب ۹ طبقه سبب کاهش دریافت در طبقات آخر شده است. در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نیز منحنی جابه‌جایی نسبی



شکل ۱۷- منحنی شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۶ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB

۳-۳- قاب خمشی ۹ طبقه

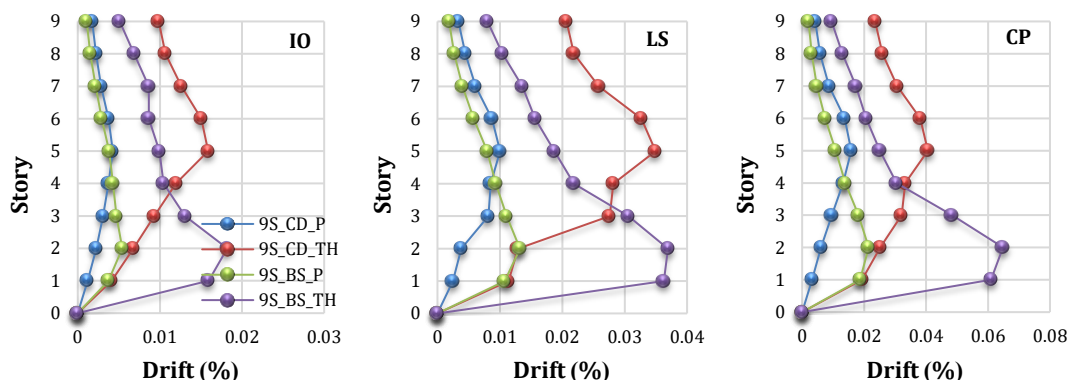
در قاب خمشی ۹ طبقه، قاب با حالت بدون و با جداساز LRB به‌ترتیب با علائم 9S-BS و 9S-CD نام‌گذاری شد. در جدول (۷) مقاطع قاب ۹ طبقه نشان داده شده است. این طرح از نظر قیود اجرایی، طراحی بر اساس نیرو و طراحی بر اساس عملکرد با توجه به ضوابط آیین‌نامه ASCE41-23 قابل قبول می‌باشد. در شکل (۱۸) نیز نحوه گروه‌بندی مقاطع در قاب ۹ و در ادامه نتایج این قاب نشان داده شده است.



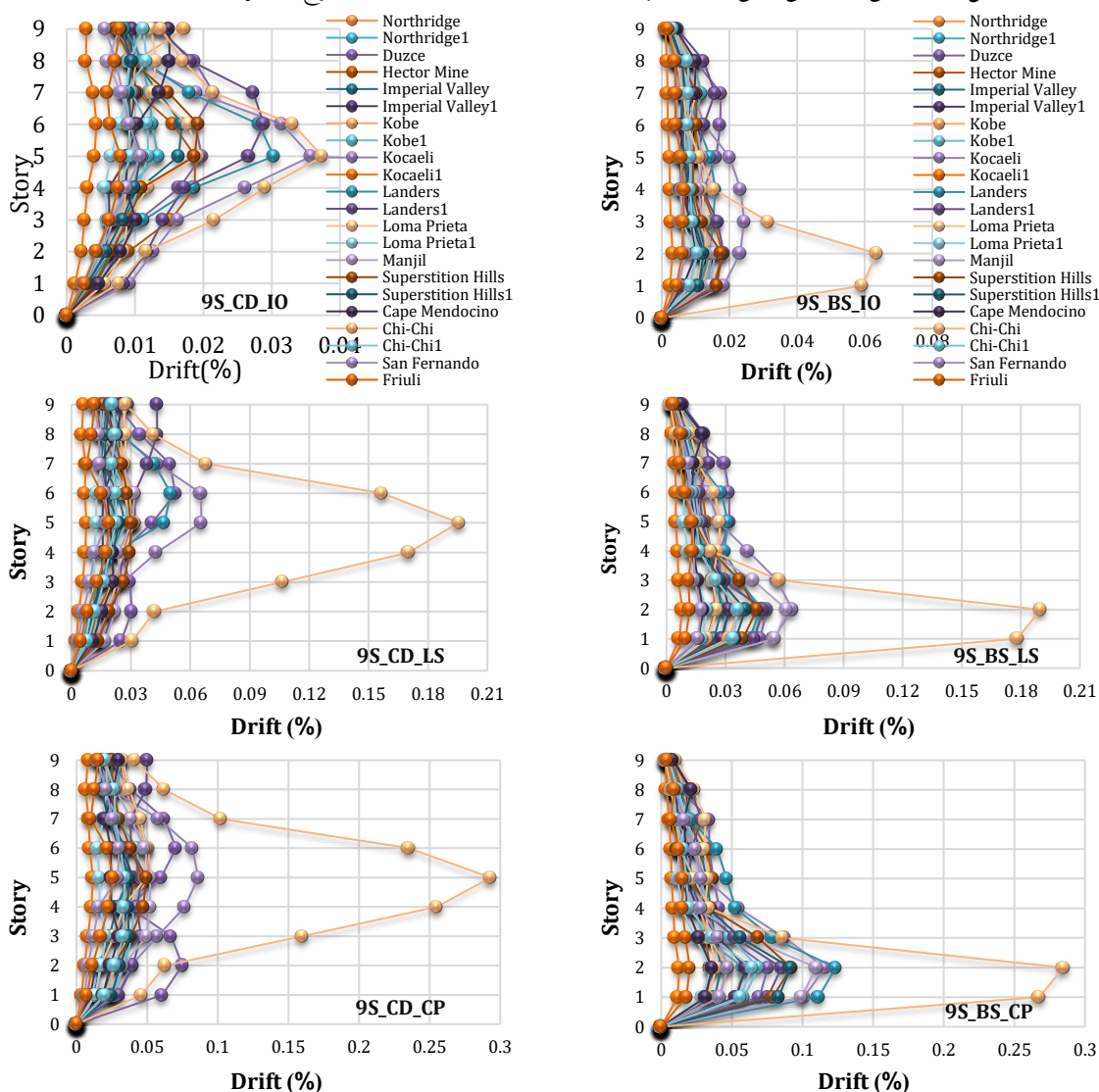
شکل ۱۸- قاب خمشی ۹ طبقه

و ستون برای قاب طراحی شده در حالت بدون جداساز و با جداساز LRB قاب ۹ طبقه در سطوح عملکردی مذکور برای نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی و بار افزون نشان داده شده است.

طبقات برای قاب ۹ طبقه با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و پیش‌گیری از خرابی برای نتایج حاصل از تک تک رکوردهای زلزله نشان داده شده است. در شکل (۲۳) نیز نمودار نسبت دوران المان‌های تیر

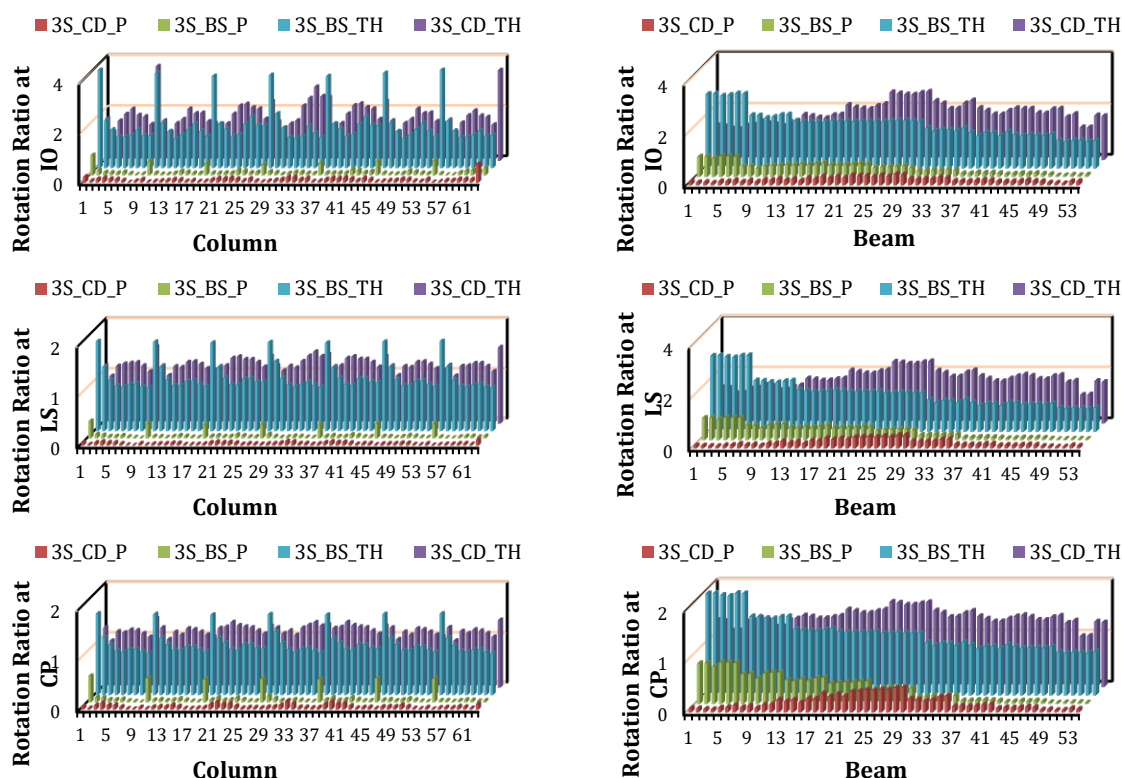


شکل ۲۰- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۹ طبقه با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP



شکل ۲۱- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۹ طبقه بدون جداساز در سطوح عملکردی IO، LS و CP برای تک تک رکوردها

شکل ۲۲- منحنی جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۹ طبقه طراحی شده با جداساز LRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP برای تک تک رکوردها



شکل ۲۳- نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل بار افزون برای نسبت دوران موجود به مجاز المان‌های تیر و ستون قاب ۹ طبقه طراحی شده برای حالت با و بدون جداساز LRB در سطوح عملکردی (IO)، (LS) و (CP).

فروریزش و به طبع آن ایمنی لرزه‌ای را افزایش و شکنندگی را کاهش می‌دهد.

مقایسه نتایج قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه نشان می‌دهد که افزایش تعداد طبقات، با افزایش جرم لرزه‌ای و انعطاف‌پذیری کلی روسازه، موجب تغییر در ویژگی‌های دینامیکی و الگوی توزیع تغییر مکان در ارتفاع می‌شود. در قاب‌های بلندتر، اثر مودهای بالاتر و تمرکز نسبی دررفت در طبقات میانی یا بالایی می‌تواند نسبت به قاب کوتاه‌مرتبه برجسته‌تر باشد؛ از این‌رو، ارزیابی پاسخ تنها بر اساس مقدار بیشینه دررفت کافی نبوده و بررسی پروفیل دررفت در ارتفاع ضروری است.

استفاده از جداساز هسته سربی با افزایش دوره تناوب مؤثر سامانه و تأمین ظرفیت اتلاف انرژی، سبب کاهش انتقال شتاب و تقاضای دررفت به روسازه می‌شود. با این حال، میزان اثربخشی جداساز در مدل‌های مختلف، یکسان نیست؛ زیرا تغییر تعداد طبقات، جرم مؤثر، سختی جانبی و نسبت دوره تناوب روسازه به دوره تناوب سامانه جداسازی، بر نحوه توزیع انرژی و پاسخ سازه اثر می‌گذارد. به همین دلیل، اختلاف مشاهده شده در پاسخ‌های لرزه‌ای، منحنی‌های شکنندگی و شاخص‌های ظرفیت فروریزش

در جدول (۸) نتایج حاصل برای نسبت حاشیه فروریزش و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده برای قاب ۹ طبقه با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است.

جدول ۸- مقادیر نسبت فروریزش قاب ۹ طبقه

CMR	SSF	ACMR	ACMR Accept
2.13	1.29	2.78	1.92
CMR_BS	Ductility	ACMR_BS	ACMR Accept
2.35	4.51	3.04	1.92

با توجه به مقادیر به دست آمده برای شکل‌پذیری و نسبت حاشیه فروریزش و نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده برای قاب ۹ طبقه مشاهده می‌شود که جداساز LRB موجب افزایش نسبت حاشیه فروریزش و به تبع آن ایمنی لرزه‌ای می‌شود و شکنندگی نیز کاهش می‌یابد. در شکل (۲۴) منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۹ طبقه با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است. در شکل (۲۵) نیز منحنی شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۹ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی و شکنندگی برای قاب ۹ طبقه مشخص شد که جداساز LRB، نسبت حاشیه

دارد. در این بخش ابتدا مهم‌ترین یافته‌های به دست آمده از تحلیل‌های انجام شده و ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی مورد مطالعه مرور می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که اهداف اصلی تحقیق تا چه حد محقق شده و چه نکات تازه‌ای درخصوص عملکرد سازه‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای آشکار شده است.

از آن‌جا که در فرآیند تحقیق از روش‌های عددی پیشرفته نظیر تحلیل دینامیکی غیرخطی و تحلیل استاتیکی غیرخطی بهره گرفته شده، نتایج به دست آمده می‌تواند تصویری واقع‌بینانه‌تر از عملکرد لرزه‌ای سازه ارائه دهد. همچنین مقایسه نتایج با معیارهای آیین‌نامه‌ای و روش‌های مرسوم طراحی، نقاط قوت و ضعف این روش‌ها را مشخص می‌سازد.

به طور کلی، این بخش تلاشی است برای آن‌که ضمن جمع‌بندی نتایج، مسیر آینده پژوهش در این حوزه نیز روشن شود و امکان بهره‌برداری علمی و کاربردی از یافته‌های تحقیق فراهم شود. تمامی تحلیل‌ها در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار OpenSees انجام شده است.

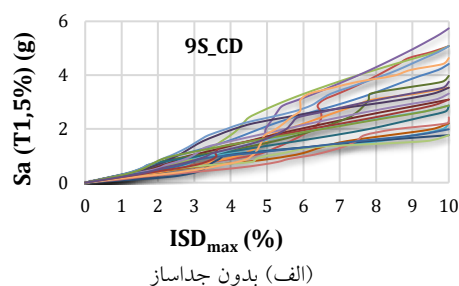
مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل قاب‌های خمشی ویژه فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه هستند؛ بنابراین، نتایج حاصل به این بازه ارتفاعی محدود می‌شود. با توجه به این‌که قاب ۹ طبقه لزوماً در طبقه‌بندی متعارف مهندسی زلزله در زمره سازه‌های بلندمرتبه قرار نمی‌گیرد، نتایج این مطالعه نباید به صورت مستقیم به ساختمان‌های بلندمرتبه تعمیم داده شود. بررسی عملکرد سامانه جداسازی هسته سربی در قاب‌های با ارتفاع بیش‌تر، با در نظر گرفتن نقش برجسته‌تر مودهای بالاتر، اثرات P-Δ و اندرکنش روسازه-جداساز، می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده باشد.

اهداف اصلی این پژوهش در دو بخش متمایز دنبال شد که هرکدام از آن‌ها دیدگاه‌های کاربردی و علمی مهمی در حوزه طراحی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه دادند.

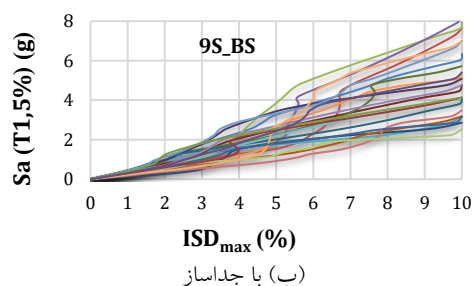
در بخش نخست، به طراحی بر اساس عملکرد قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه پرداخته شد. در این بخش اثر جداساز لاستیکی سربی (Lead Rubber Bearing-LRB) در بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. قیود طراحی و معیارهای عملکردی طبق دستورالعمل ASCE41-13، انتخاب شد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از جداساز LRB در فرآیند طراحی قاب‌های خمشی فولادی به صورت مستقیم موجب بهبود

قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه باید در چارچوب اندرکنش دینامیکی میان روسازه و سامانه جداسازی تفسیر شود.

همچنین، کاهش احتمال تجاوز از سطح عملکرد پیش‌گیری از فروریزش در قاب‌های مجهز به جداساز، بیانگر نقش جداساز هسته سربی در کنترل تقاضای تغییرشکل روسازه است. با این وجود، در مدل‌های بلندتر، افزایش دوره تناوب و مشارکت بیش‌تر مودهای بالاتر می‌تواند سبب شود میزان بهبود پاسخ نسبت به مدل‌های کوتاه‌تر متفاوت باشد. بنابراین، انتخاب مشخصات جداساز باید متناسب با جرم، سختی، تعداد طبقات و ویژگی‌های دینامیکی هر قاب انجام شود و نمی‌توان یک میزان اثربخشی ثابت را برای تمامی ارتفاع‌ها در نظر گرفت.

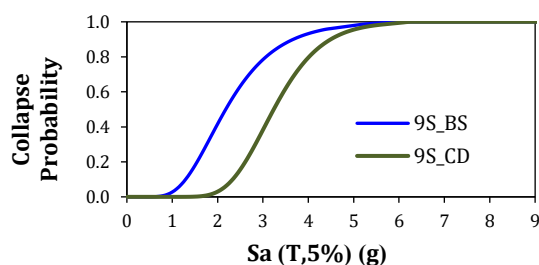


(الف) بدون جداساز



(ب) با جداساز

شکل ۲۴- منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی قاب ۹ طبقه برای حالت با و بدون جداساز LRB



شکل ۲۵- منحنی شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب ۹ طبقه در حالت با و بدون جداساز LRB

۴- نتیجه‌گیری

بخش نتیجه‌گیری به عنوان بخش پایانی این پژوهش، به جمع‌بندی نتایج و دستاوردهای حاصل از مراحل مختلف تحقیق اختصاص

شاخص‌های عملکردی می‌شود. مهم‌ترین یافته‌های این بخش عبارت‌اند از:

- در تمامی مدل‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه، حضور جداساز LRB موجب کاهش محسوس تغییر مکان نسبی طبقات شد. این موضوع اهمیت ویژه‌ای در کاهش آسیب‌های غیرسازه‌ای و ارتقای ایمنی جانی ساکنین دارد.
- همچنین استفاده از جداساز LRB منجر به کاهش دوران نهایی اعضا در سطوح عملکردی شد که نشان‌دهنده افزایش کنترل تغییر شکل‌های غیرخطی و بهبود رفتار کلی سازه است.
- این نتایج نشان می‌دهد که گنجاندن جداساز LRB در فرآیند طراحی می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی در نظر گرفته شود.

در بخش دوم، ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های طراحی شده با تمرکز بر منحنی‌های شکنندگی و ظرفیت فروریزش تحت رکوردهای زلزله دور از گسل انجام گرفت. در این مرحله، محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای FEMA356 برای دریافت طبقات و ASCE41-23 برای دوران تیرها و ستون‌ها در سطوح عملکرد (IO)، (LS) و (CP) به کار گرفته شدند. همچنین با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشده و براساس روش پیشنهادی FEMA P695، نسبت حاشیه ایمنی فروریزش برای مدل‌ها محاسبه و ارزیابی شد. نتایج مهم این بخش عبارت‌اند از:

- تمامی قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه طراحی شده بر اساس عملکرد، معیارهای پذیرش لرزه‌ای FEMA P695 را برآورده ساخته و در محدوده ایمنی قابل قبول قرار گرفتند.
- استفاده از جداساز LRB منجر به افزایش نسبت حاشیه فروریزش و ضریب حاشیه ایمنی فروریزش اصلاح شده شد. این موضوع بیانگر افزایش سطح اطمینان لرزه‌ای و کاهش احتمال فروریزش سازه تحت زلزله‌های شدید دور از گسل است.
- نتایج ارزیابی ظرفیت فروریزش نشان داد که به کارگیری جداسازهای هسته سربی موجب افزایش نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده در هر سه مدل مورد بررسی شده است. مقدار ACMR قاب ۳ طبقه از ۳/۷۹ در حالت پایه گیردار به ۴/۳۷ در حالت مجهز به جداساز افزایش یافت که بیانگر رشد تقریبی ۱۵٪ است. این مقدار برای قاب ۶ طبقه از ۳/۵۶ به ۴/۷۴، معادل افزایش حدود ۳۳٪

و برای قاب ۹ طبقه از ۲/۷۸ به ۳/۰۴، حدود ۹٪ افزایش یافت. بنابراین، در محدوده مدل‌ها و فرضیات این پژوهش، سامانه جداسازی LRB سبب بهبود ظرفیت فروریزش و ایمنی لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه فولادی شده است؛ هرچند میزان این بهبود، تابع ارتفاع سازه و مشخصات دینامیکی مدل است.

- بیش‌ترین اثربخشی جداساز LRB در قاب‌های ۶ طبقه مشاهده شد؛ به نحوی که هم در کاهش شکنندگی و هم در افزایش ظرفیت فروریزش، نسبت به قاب‌های کوتاه و بلندمرتبه عملکرد بهتری داشتند. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت ویژه استفاده از جداساز در سازه‌های میان‌مرتبه است.
- تحلیل‌های صورت گرفته همچنین نشان داد که استفاده از جداساز LRB علاوه بر بهبود شاخص‌های کمی نظیر CMR و ACMR، موجب یکنواخت‌تر شدن رفتار لرزه‌ای قاب‌ها و کاهش پراکندگی پاسخ‌ها تحت رکوردهای مختلف شد.

در این پژوهش، عملکرد قاب‌های خمشی ویژه فولادی مجهز به جداساز هسته سربی با قاب‌های مشابه فاقد سامانه جداسازی مقایسه شد؛ بنابراین نتایج ارائه شده بیانگر اثر به کارگیری سامانه LRB نسبت به حالت پایه ثابت هستند و نباید به عنوان مقایسه مستقیم یا اثبات برتری LRB نسبت به سایر انواع جداسازهای لرزه‌ای تفسیر شوند. بررسی هم‌زمان قاب‌های مجهز به LRB و جداساز الاستومری معمولی بدون هسته سربی، با مشخصات سختی و دوره تناوب قابل مقایسه، می‌تواند سهم مستقل هسته سربی و مکانیزم اتلاف انرژی آن را در بهبود پاسخ لرزه‌ای، شکنندگی و ظرفیت فروریزش سازه روشن‌تر سازد؛ از این رو، این موضوع به عنوان مسیر پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده مطرح می‌شود.

همچنین در پژوهش حاضر، عملکرد قاب‌های مجهز به جداساز هسته سربی با قاب‌های مشابه پایه ثابت و فاقد سامانه کنترل لرزه‌ای مکمل مقایسه شده است. بنابراین، نتایج حاصل، بیانگر اثر استفاده از LRB نسبت به حالت پایه ثابت هستند و نباید به عنوان مقایسه مستقیم یا برتری این سامانه نسبت به میراگرهای ویسکوز درون قابی یا سایر سامانه‌های کنترل لرزه‌ای تفسیر شوند. بررسی مقایسه‌ای قاب‌های پایه ثابت مجهز به میراگر ویسکوز درون قابی و قاب‌های مجهز به LRB، با در نظر گرفتن سطح عملکرد، هزینه، محدودیت تغییر مکان، افزایش دوره تناوب و

ظرفیت اتلاف انرژی، می‌تواند در مطالعات آینده به ارزیابی کاربردی‌تر راهبردهای کنترل لرزه‌ای منجر شود.

در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که به‌کارگیری جداساز لاستیکی سربی به‌عنوان یک سامانه نوین کاهنده آسیب‌پذیری لرزه‌ای، می‌تواند به شکل مؤثری ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی فولادی را افزایش داده و سطح ایمنی آن‌ها را در برابر زلزله‌های شدید، به‌ویژه زلزله‌های دور از گسل، ارتقا دهد. رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش از مجموعه پیشنهادی FEMA P695 انتخاب شده‌اند و نتایج حاصل به ویژگی‌های این مجموعه شتاب‌نگاشت‌ها محدود است. در این مطالعه، رکوردهای حوزه نزدیک گسل دارای پالس جهت‌پذیری به‌صورت یک مجموعه مستقل بررسی نشده‌اند. از آنجا که پالس‌های نزدیک گسل می‌توانند تقاضای تغییر مکان قابل‌توجهی در تراز جداسازی ایجاد کرده و پاسخ غیرخطی سامانه‌های مجهز به جداساز هسته سربی را تغییر دهند، تعمیم نتایج حاضر به شرایط نزدیک گسل باید با احتیاط انجام شود. بررسی مقایسه‌ای پاسخ قاب‌های مجهز به LRB تحت رکوردهای نزدیک گسل پالسی و رکوردهای غیرپالسی، با تمرکز بر تغییر مکان جداساز، دریافت روسازه و احتمال فروریزش، به‌عنوان موضوعی برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

در مدل‌سازی اعضای تیر و ستون، از مقاطع فایبر همراه با مصالح فولادی دوخطی الاستوپلاستیک استفاده شد. این رویکرد امکان لحاظ نمودن توزیع غیرخطی کرنش در سطح مقطع و اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی را فراهم می‌سازد. با این حال، مدل حاضر به‌صورت صریح مکانیزم‌های تخریب موضعی اعضای فولادی، شامل کماتش موضعی بال و جان، کماتش جانبی-پیچشی، شکست کم‌چرخه و زوال تدریجی مقاومت و سختی ناشی از بارگذاری چرخه‌ای را شبیه‌سازی نمی‌کند.

از این‌رو، نتایج تحلیل‌های غیرخطی و ارزیابی فروریزش در این پژوهش در چارچوب ظرفیت و رفتار هیستریزس مدل فایبری منتخب تفسیر می‌شوند و در سطوح دررفت بسیار بزرگ، که اثرات کماتش موضعی و افت مقاومت اعضا می‌تواند قابل‌توجه باشد، دارای محدودیت هستند. توسعه مدل با استفاده از مصالح یا مفصل غیرخطی دارای قابلیت زوال مقاومت و سختی، ازجمله مدل‌های مبتنی بر Ibarra-Krawinkler، می‌تواند در پژوهش‌های آینده بررسی شود.

- [17] Chopra, A.K. (2020), "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", 5th Edition, Pearson, Boston, pp.500-550.
- [18] Baker, J.W. (2015), "Efficient Seismic Fragility Analysis of Structures Using Statistical Learning", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(1), pp.117-133.
- [19] Kim, Y.M. (2006), "The Vibration Performance Experiment of Tuned Liquid Damper and Tuned Liquid Column Damper", *Journal of Mechanical Science & Technology*, 20(6), pp.795-805.
- [20] Road, Housing and Urban Development Research Center (2014), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800), 4th Edition. (in Persian)
- [21] OpenSees (2024), OpenSees (Version 3.6.0) [Computer software], PEER, Berkeley, CA.
- [22] Mansouri, I., Ghodrati Amiri, G., Hu, J.W., Khoshkalam, M., Soori, S., and Shahbazi, S. (2017), "Seismic Fragility Estimates of LRB Base-Isolated Frames Using Performance-Based Design", *Shock & Vibration*, 2017, p.5184790.
- [23] Shi, Y., Xiong, L., Qin, H., Han, J., and Sun, Z. (2022), "Seismic Fragility Analysis of LRB-Isolated Bridges Considering Regional Temperature Uncertainty Using BP Neural Networks", *Structures*, 42, pp.566-578.
- [24] Soong, T. T., and Dargush, G.F. (1997), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons.
- [25] Zeng, X., Yu, Y., Zhang, L., Liu, Q., and Wu, H. (2014), "A New Energy-Absorbing Device for Motion Suppression in Deep-Sea Floating Platforms", *Energies*, 8(1), pp.111-132.
- [26] Deierlein, G.G., Liel, A.B., and Haselton, C.B. (2007), "Assessing Building System Collapse Performance and Associated Requirements for Seismic Design", *SEAOC Convention Proceedings*.
- [27] Fragiadakis, M., Lagaros, N.D., and Papadrakakis, M. (2006), "Performance-Based Earthquake Engineering Using Structural Optimization Tools", *International Journal of Reliability & Safety*, 1(1-2), pp.59-76.
- [28] Hardyniec, A. and Charney, F. (2015), "A New Efficient Method for Determining the Collapse Margin Ratio Using Parallel Computing", *Computers & Structures*, 148, pp.15-25.
- [29] Haselton, C.B., Liel, A.B., Deierlein, G.G., Dean, B.S., and Chou, J.H. (2011), "Seismic Collapse Safety of Reinforced Concrete Buildings: I. Assessment of Ductile Moment Frames", *Journal of Structural Engineering*, 137(4), pp.481-491.
- [30] Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- [1] Nguyen, H.D., Lee, Y.J., LaFave, J.M., and Shin, M. (2023), "Seismic Fragility Analysis of Steel Moment Frames Using Machine Learning Models", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, p.106976.
- [2] Kelly, J.M. (1993), "Earthquake-Resistant Design with Rubber", 7, London: Springer-Verlag.
- [3] ASCE/SEI. (2023). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-23)*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [4] Federal Emergency Management Agency (2009), *Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA P-695)*, Federal Emergency Management Agency.
- [5] Federal Emergency Management Agency (2000), *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA 356)*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [6] Naeim, F., and Kelly, J.M. (1999), "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", John Wiley & Sons, New York, pp.85-110.
- [7] Buckle, I.G., Constantinou, M.C., Dargush, G., and Ryan, K. (2014), "Seismic Isolation of Buildings: Design and Practice", MCEER, University at Buffalo, NY.
- [8] Warn, G.P., and Whittaker, A.S. (2008), "A Study of the Coupling of the Translational and Torsional Responses of Base-Isolated Buildings", *Earthquake Spectra*, 24(3), pp.741-764.
- [9] Constantinou, M.C., Kalpakidis, I., Filiatrault, A., and Eckerst, R. (2007), "LRB Isolators: Experimental and Analytical Studies", MCEER Report, Buffalo, NY.
- [10] Whittaker, A., Constantinou, M.C., and Tsopelas, P. (1998), "Seismic Isolation of Buildings", *Journal of Structural Engineering*, 124(11), pp.1289-1300.
- [11] Ryan, K.L., Dao, N.D., and Sato, E. (2013), "Influence of Seismic Isolation and Supplemental Damping on Floor Acceleration Demands in Building Structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(5), pp.637-654.
- [12] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., and Wald, D.J. (1995), "Near-Source Ground Motion and Its Effects on Flexible Buildings", *Earthquake Spectra*, 11(4), pp.569-605.
- [13] Jangid, R.S., and Kelly, J.M. (2001), "Base Isolation for Near-Fault Motions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(5), pp.691-707.
- [14] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006), "OpenSees Command Language Manual", Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [15] Kalkan, E., and Kunnath, S.K. (2006), "Assessment of Current Nonlinear Static Procedures for Seismic Evaluation of Buildings", *Engineering Structures*, 28(3), pp.305-316.
- [16] Liel, A.B., Haselton, C.B., Deierlein, G.G., and Baker, J.W. (2009), "Incorporating Modeling Uncertainties in the Assessment of Seismic Collapse Risk of Buildings", *Structural Safety*, 31(2), pp.197-211.