

Research Paper

Seismic Behavior of High-Rise Steel Frames with an Inter-Story Seismic Isolation System and a Proposed Method for Identifying the Optimal Isolation Level

Behnam Bashiri¹, Farhad Daneshjoo^{2*}

1- Master of Science Graduate, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran



Citation: Daneshjoo, F., and Bashiri, B. (2026), "Seismic Behavior of High-Rise Steel Frames with an Inter-Story Seismic Isolation System and a Proposed Method for Identifying the Optimal Isolation Level", *Journal of Steel & Structures*, 20(51), pp.139-155.

doi 10.22034/jss.2026.577339.1030

Article info:

Article History:

Received: 9 October 2025

Revised: 22 February 2026

Accepted: 2 March 2026

Published: 4 April 2026

Keywords:

Inter-Story Seismic Isolator
Tall Buildings
Incremental Nonlinear Dynamic Analysis (IDA),
Lead Rubber Bearings (LRB)
Optimal Location

ABSTRACT

Background: Conventional seismic design strategies based solely on ductility, stiffness enhancement, or mass modification cannot fully prevent structural damage during strong earthquakes. Although base isolation has proven effective for low- and mid-rise buildings, its application to high-rise structures is generally limited by excessive flexibility, longer vibration periods, and increased displacement demands. Inter-story seismic isolation (ISI) has recently emerged as a promising alternative; however, the influence of isolator location on the seismic performance of high-rise steel buildings has not yet been comprehensively established.

Methods: This study evaluates the seismic behavior of 20- and 25-story steel buildings with dual moment-resisting frame and eccentric bracing systems equipped with inter-story seismic isolators. Lead-rubber bearings with different stiffness and damping properties were modeled in OpenSees and installed at various elevations corresponding to changes in column sections, including the base level. Modal analysis and Incremental Dynamic Analysis (IDA) were performed using 22 far-field ground motions in accordance with FEMA P-695. Structural performance was assessed at the Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP) performance levels using spectral acceleration, floor acceleration, and inter-story drift as evaluation criteria.

Results: The results demonstrate that the effectiveness of inter-story seismic isolation is highly dependent on its installation level. The optimum locations were identified as the 20th floor for the 25-story frame and the 15th floor for the 20-story frame. At these elevations, the isolated structures exhibited higher seismic capacities at both LS and CP performance levels while reducing floor accelerations by approximately 20% and 13%, and inter-story drifts by approximately 8% and 3.5%, respectively, in the isolated portion of the buildings. In contrast, placing the isolator at lower stories, including the base level, decreased structural capacity and adversely affected seismic performance. Furthermore, increasing isolator stiffness alone did not improve structural response, demonstrating that stiffness and damping must be optimized simultaneously to achieve the desired seismic performance.

Conclusion: Inter-story seismic isolation provides an effective seismic protection strategy for high-rise steel buildings when implemented at an optimum elevation. Properly positioned isolators enhance seismic capacity while significantly reducing acceleration and drift demands without adversely affecting the lower portion of the structure. Conversely, lower installation levels may compromise structural stability and are therefore not recommended. Based on the obtained results, a practical design flowchart is proposed to facilitate the identification of the optimum installation level of inter-story seismic isolators in future high-rise building designs.

* Corresponding Author's E-mail: danesh_fa@modares.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

Seismic design of high-rise buildings through ductility, mass variation or higher stiffness alone could not avoid the structural damages during a strong earthquake. So, the use of response vibration control strategies plays a crucial role mainly in structures. Using base isolation systems for tall buildings might present with greater difficulties such as insufficient structural stiffness, development of tension in vertical members due to their slender profile, longer natural vibration period and therefore may reduce the seismic displacement collapse capacity and increase displacement in higher floors, resulting in greater damage, and is therefore not recommended for tall buildings in most cases. In an alternative method, use of inter-story isolation systems in tall buildings has received attention in recent years, especially in Japan, but the conceptual framework of the seismic behavior of these buildings with inter-story isolation has not been well defined yet. The Inter-story or Middle-story isolation system includes employing a flexible isolation system positioned at a specific level within building's height.

Methods

Two high-rise steel frames of 20 and 25 stories with a dual system of flexural frame and eccentric bracing were designed and modeled and verified using OpenSees software. Also, two types of rubber seismic isolators with lead core and different stiffness and damping were selected, modeled and verified to evaluate the effect of mechanical properties. Since in the design procedure, the column cross-sections change in every five floors, the inter-story isolation system is defined once for the base level and then for subsequent times only in one of the floors where the column cross-sections change, that is, for all columns of floors 5, 10, 15, and 20, respectively. Modal analysis was used to investigate the effect of the isolator on the structural period and incremental nonlinear dynamic analysis was used to determine the seismic performance levels of the frames. For the incremental nonlinear dynamic analysis, 22 earthquake records were used according to FEMA-P695 guidelines. Seismic behavior levels of Immediate Occupancy IO, Life Safety (design

level) LS, and Collapse Prevent CP were determined using earthquakes with return periods of 10, 475, and 2475 years, respectively. Maximum relative drift and corresponding spectral acceleration were calculated for the 84th, 50th, and 16th percentiles.

Results

Modal analysis results indicated that the lower the level at which the isolator is installed, the longer the structure's period becomes. Incremental Nonlinear dynamic (IDA) analysis shows that for the 25-story frame, installing the isolator at the 20th-story level yields the best performance, reaching the LS and CP performance levels at a spectral acceleration (S_a) value more than 10% higher. Furthermore, the floor acceleration response indicated that acceleration decreases in the stories above the isolation system; for instance, during the Northridge earthquake, at the drift level where the non-isolated structure reaches the Collapse Prevention performance level, the isolated structure exhibits no change in the section below the isolator while floor accelerations in the isolated section decrease by approximately 21 percent. The drift distribution revealed a reduction in drift for the isolated stories, specifically, in the 25-story frame subjected to the Northridge earthquake, stories above the isolator experienced a reduction of up to approximately 8 percent. Implementing the isolation system at the 15th, 10th, and 5th story levels, as well as at the base, results in the isolated structure reaching the CP performance level at lower spectral acceleration (S_a) values compared to the non-isolated case. The floor acceleration response indicated that acceleration decreases in the stories above the isolator; for instance, during the Northridge earthquake, at the drift level where a non-isolated structure reaches the Collapse Prevention (CP) performance level, the isolated structure's acceleration below the isolation interface remains unchanged, while acceleration in the isolated portion of the structure decreases by approximately 13 percent. The drift distribution showed a reduction in drift for the isolated stories. Drift distribution analysis revealed that seismically isolated stories exhibit reduced drift. Specifically, in the case of the Northridge earthquake and a 20-story frame,

stories above the isolation system showed a drift reduction of up to 3.5%. For the 20-story frame, the use of isolators, whether placed at the base or at the 5th and 10th levels, enables the isolated structure to reach the Collapse Prevention (CP) performance level at lower spectral acceleration (S_a) values compared to the non-isolated configuration. An investigation into the effects of stiffness and damping parameters in seismic isolators demonstrated that increasing isolator shear stiffness does not necessarily improve the structure's seismic performance; rather, stiffness and damping parameters are interdependent and must be optimally selected to satisfy the structure's seismic requirements across various performance levels.

The results show that the optimal floor for installing an inter-story isolator in the 25-storey and 20-storey frames are at the 20th and 15th floor levels, respectively. It was also found that using a seismic isolator at the optimal floor, not only does not reduce the seismic capacity of the structure, but also increases the seismic spectral acceleration capacity at life safety LS and collapse prevent CP levels. Also, it reduces the acceleration response by 20 and 13 percent, and reduces the drift by 8 and 3.5 percent at floors above the isolator, respectively for 25- and 20-story frames, while for the floors below the isolators these remain almost unchanged. It was also found that using the isolator in floors lower than the optimal floor, such as the base level, and floors 5 and 10, weakens the seismic behavior of the structures and reduces the seismic capacity and therefore is not recommended. The process of determining the optimal floor for inter-story isolators has also been proposed by providing a flowchart for use in future researches.

Conclusion

Results indicate that, implementation of mid-story seismic isolation systems in upper sections of high-rise buildings, can yield favorable seismic performance. Installing isolators in the upper part of the building reduces accelerations, inter-story drifts, and forces transmitted to structural members, thereby lowering the likelihood of structural and non-structural damage during an earthquake. Conversely, employing the seismic isolators at the lower levels of a structure may lead to global instability, or even collapse, at low spectral acceleration levels, thereby compromising the system's overall performance. Furthermore results

show, structural height plays a decisive role in the effectiveness of inter-story isolation systems. As Structural height decreases, the positive impact of the inter-story isolator reduces. This indicates that the use of inter-story isolation is more justifiable for tall structures than for low- or mid-rise buildings.

Finally, based on the results of this research, an effective new method for identifying the ideal level in high-rise buildings for the installation of inter-story isolators is presented in the form of a flowchart.

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

During the preparation of this work, the authors used ChatGPT for searching the previous researches on the subject and also used "Google translate" during translating from Persian to English. the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication."

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

This presented article is major part of the first author B. Bashiri MSc thesis in Tarbiat Modares University under the supervision of First author Professor F. Daneshjoo.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی بلندمرتبه با سیستم جداساز لرزه‌ای بین‌طبقه‌ای و ارائه روشی برای شناسایی تراز ایده‌آل

بهنام بشیری^۱، فرهاد دانشجو^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران



Citation: Daneshjoo, F., and Bashiri, B. (2026), "Seismic Behavior of High-Rise Steel Frames with an Inter-Story Seismic Isolation System and a Proposed Method for Identifying the Optimal Isolation Level", *Journal of Steel & Structures*, 20(51), pp.139-155.

doi [10.22034/jss.2026.577339.1030](https://doi.org/10.22034/jss.2026.577339.1030)

چکیده

زمینه پژوهش: اگرچه سیستم‌های جداساز پایه در ساختمان‌های کوتاه و میان‌مرتبه عملکرد مطلوبی دارند، استفاده از آن‌ها در ساختمان‌های بلند به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، طولانی‌تر شدن دوره تناوب و افزایش تقاضای جابه‌جایی، معمولاً توصیه نمی‌شود. در سال‌های اخیر، سیستم جداساز لرزه‌ای بین‌طبقه‌ای به عنوان راهکاری جایگزین برای کنترل پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است؛ با این حال، تأثیر محل نصب جداساز بر عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها هنوز به طور جامع مشخص نشده است.

روش پژوهش: در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای دو قاب فولادی ۲۰ و ۲۵ طبقه با سیستم دوگانه قاب خمشی و مهاربند برون‌محور مجهز به جداساز لرزه‌ای بین‌طبقه‌ای بررسی شد. جداسازهای لاستیکی با هسته سربی و مشخصات سختی و میرایی متفاوت در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شدند و در ترازهای مختلف ساختمان، از جمله تراز پایه، نصب شدند. برای ارزیابی عملکرد سازه، تحلیل مودال و تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) بر اساس ۲۲ رکورد زلزله مطابق دستورالعمل FEMA P-695 انجام شد و عملکرد سازه در سطوح بهره‌برداری بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) با استفاده از شتاب طیفی، شتاب طبقات و دریفت بین‌طبقه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند به محل نصب جداساز بین‌طبقه‌ای وابستگی زیادی دارد. ترازهای بهینه نصب جداساز برای قاب‌های ۲۵ و ۲۰ طبقه، به ترتیب طبقات بیستم و پانزدهم تعیین شدند. استقرار جداساز در این ترازها موجب افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه در سطوح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فروریزش، کاهش حدود ۲۰ و ۱۳ درصدی شتاب طبقات و کاهش حدود ۸ و ۳/۵ درصدی دریفت طبقات بالای جداساز در قاب‌های ۲۵ و ۲۰ طبقه شد. همچنین مشخص شد افزایش سختی جداساز به تنهایی موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای نمی‌شود و انتخاب هم‌زمان سختی و میرایی بهینه برای دستیابی به عملکرد مناسب ضروری است. در مقابل، نصب جداساز در طبقات پایین‌تر، از جمله تراز پایه، موجب کاهش ظرفیت لرزه‌ای و تضعیف عملکرد سازه شد.

نتیجه‌گیری: به کارگیری سیستم جداسازی لرزه‌ای بین‌طبقه‌ای در تراز بهینه، راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی بلند محسوب می‌شود و ضمن افزایش ظرفیت لرزه‌ای، موجب کاهش شتاب و دریفت طبقات بالای جداساز بدون تأثیر نامطلوب بر طبقات پایین‌تر می‌شود. در مقابل، استفاده از جداساز در ترازهای پایین توصیه نمی‌شود. در پایان، یک فلوچارت کاربردی برای تعیین تراز بهینه نصب جداساز بین‌طبقه‌ای در ساختمان‌های بلند ارائه شده است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۷ مهر ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۳ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۱ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۵ فروردین ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

جداساز لرزه‌ای بین‌طبقه‌ای
تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی (IDA)
تکیه‌گاه‌های لاستیکی سربی (LRB)
ساختمان بلند
مکان بهینه برای نصب جداساز
بین‌طبقه‌ای

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: danesh_fa@modares.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

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از رویداد زلزله همواره یکی از دغدغه‌های مهندسی بوده و هرساله تحقیقات و مطالعات قابل‌توجهی در این خصوص انجام می‌شود؛ هرچند افزایش مقاومت ساختمان‌ها اولین راهکار قابل‌تصور برای این مساله محسوب می‌شود، اما مشکلات جانبی نظیر افزایش وزن و هزینه ساخت، موجب شده تا سایر رویکردها از جمله استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای مورد توجه قرار گیرد [۱].

مهم‌ترین چالش در به‌کارگیری سیستم‌های جداساز پایه، کنترل تغییر مکان نسبی بزرگ درون جداسازها بدون افزایش شتاب‌های منتقل‌شده به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در روسازه است. به‌کارگیری این سیستم‌ها در ساختمان‌های بلندمرتبه در مناطق لرزه‌خیز می‌تواند با مشکلات بیش‌تری از جمله سختی ناکافی سازه، ایجاد کشش در اعضای عمودی به‌دلیل لاغری آن‌ها، افزایش طول دوره تناوب طبیعی، پیچیدگی در توزیع جرم و نیاز به انطباق با شرایط لرزه‌ای محلی مواجه شود. بنابراین، کارایی سیستم جداساز پایه عمدتاً برای ساختمان‌های کوتاه تا میان‌مرتبه یا سازه‌هایی با دوره تناوب طبیعی کم‌تر از یک ثانیه مناسب است [۲].

جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رویکرد متداول در به‌کارگیری سیستم جداساز پایه برای ساختمان‌های بلند ممکن است با معایبی از جمله هزینه بالا، پیچیدگی در طراحی و اثربخشی محدود در بازه‌ای مشخص از فرکانس‌های حرکات زمین همراه باشد [۲].

برای مقابله با این مشکل، استفاده از سیستم‌های جداساز بین‌طبقه‌ای (ISI)^۱ در ساختمان‌های بلند در سال‌های اخیر به‌خصوص در ژاپن محبوبیت قابل‌توجهی به‌دست آورده است. اما چارچوب مفهومی رفتار لرزه‌ای این ساختمان‌ها و مسائل طراحی آن‌ها به خوبی تثبیت نشده است [۳].

درحالی‌که سیستم جداساز پایه کاربرد گسترده‌ای در کشورهای مختلف دارد، سیستم جداساز میان‌طبقه‌ای هنوز به بلوغ کامل نرسیده و تقریباً نوظهور است. ژانگ^۲ و همکاران یک سیستم جداساز طبقه پلکانی جدید بر اساس سیستم جداساز پایه و سیستم جداساز بین‌طبقه‌ای توسعه دادند. همچنین برای تجزیه و

تحلیل مقایسه‌ای، مدل‌های یک سازه جداسازی پایه، جداسازی بین‌طبقه‌ای و مقاوم در برابر زلزله را ایجاد کرده و عملکرد جذب شوک و آسیب‌های آن‌ها را بررسی نمودند [۴]. آنها نتیجه گرفتند که عملکرد جذب شوک سازه جداسازی طبقه پلکانی جدید، کمی بدتر از سازه جداسازی پایه اما کمی بهتر از سازه جداسازی میان‌طبقه‌ای است. به‌نظر می‌آید که در تحقیق آن‌ها علت این که سیستم با جداساز بین‌طبقه‌ای رفتار بدتری از دو سیستم دیگر نشان داده است، انتخاب نامناسب محل نصب جداساز بین‌طبقه‌ای است. رایان^۳ و ارل^۴ اثربخشی سیستم‌های جداسازی بین‌طبقه‌ای را به‌عنوان تابعی از محل استقرار آن‌ها در سازه مورد بررسی قرار دادند و روش‌های جایگزینی برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی جداسازها ارائه نمودند [۵].

گالانتی^۵ و فورچلینی^۶ مزایای جداسازی طبقات از دیدگاه سازه‌ای (زمان‌های تناوب طبیعی اصلی، شتاب‌ها و جابه‌جایی‌ها) را بررسی نمودند. در این پژوهش، رابطه‌های جداسازی در موقعیت‌هایی معرفی شده‌اند که حالت‌های شکل نقاط عطف را نشان می‌دهند و از فناوری چاپگر سه‌بعدی برای تولید مدل‌های مقیاس‌بندی‌شده سه‌بعدی نماینده، روی میزهای لرزان کوچک داخلی در دانشگاه کالیفرنیا، سن‌دیگو استفاده شده است. مقایسه بین مدل‌های عددی و مدل‌های آزمایشگاهی از نظر زمان‌های تناوب و شتاب‌های طبقه بالا، توافق خوبی را نشان داد. در این راستا، به‌نظر نمی‌رسد جداسازی پایه اثرات قابل‌توجهی در کاهش حداکثر شتاب‌های طبقه به‌ویژه در طبقات بالا ایجاد کند. نتایج تأیید می‌کنند که اثربخشی ایزولاسیون پایه با افزایش انعطاف‌پذیری سازه، کاهش می‌یابد. این مقاله سهم جداساز طبقه را در کاهش شتاب‌های طیفی بالای سازه، در مقایسه با جداساز پایه نشان می‌دهد. در نتیجه، این کار را می‌توان اولین تلاش برای بررسی امکان بازتولید جداساز طبقه‌ای در ساختمان‌های بلند با استفاده از مدل‌های چاپگر سه‌بعدی مقیاس‌بندی‌شده در نظر گرفت که برای تحقیقات آینده با هزینه کم‌تر و بدون نیاز به کارهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

فایلا^۷ و مله^۸ دو سازه بلندمرتبه با ویژگی‌های کاملاً متفاوت که به سیستم جداسازی بین‌طبقه‌ای مجهز شده‌اند را به‌منظور تطبیق روش‌های نوین طراحی با دستاوردهای دانشگاهی، با

³ Ryan

⁴ Earl

⁵ Gallanti

⁶ Forcellini

⁷ Faiella

⁸ Mele

¹ Inter Story Isolation System

² Zhang

استفاده از تحلیل‌های مودال و تاریخچه زمانی مورد ارزیابی قرار دادند [۳].

سها^۱ و میشر^۲ عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های دارای جداسازی بین‌طبقه‌ای ISI که تحت تأثیر حرکات زمین پالس‌گونه نزدیک به گسل قرار دارند، مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، مجموعه‌ای از تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی روی ساختمان‌های مدل‌شده با ویژگی‌های سازه‌ای متفاوت انجام شد [۷].

ژانگ^۳ و همکاران جداسازی بین‌طبقه‌ای سازه با استفاده از سیستم آونگ اصطکاکی را با استفاده از آزمایش میز لرزان و مدل‌سازی عددی بر روی سازه‌ای با نسبت ابعادی بزرگ‌تر از چهار بررسی نمودند [۸]. آزمایش‌های میز لرزان با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند حرکات زمین، شعاع لغزش و لایه‌های کف ایزولاسیون انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این نوع سیستم برای کنترل ارتعاشات سازه فولادی مونتازی با نسبت منظر بیش از چهار، عملی و مؤثر است.

فوسلینی^۴ و کالفاس^۵ جداسازی میان‌طبقه‌ای در ساختمان‌های بلندمرتبه را با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته و با تمرکز بر امکان تفکیک بخش‌های مختلف سازه که دارای کاربری‌ها و الزامات عملکرد لرزه‌ای متفاوتی هستند، مورد بررسی قرار دادند و پتانسیل‌های جداسازی بین‌طبقه‌ای را به‌عنوان وسیله‌ای به‌جای جداسازی پایه نشان دادند [۹].

در پژوهش حاضر، تأثیر موقعیت نصب سیستم جداساز لرزه‌ای میان‌طبقه‌ای بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی بلندمرتبه بررسی و تحلیل می‌شود. برای این منظور، اثرات مختلف نصب جداساز بر ظرفیت سازه در برابر شتاب‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور دستیابی به این هدف، تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده تحت ۲۲ رکورد زمین‌لرزه پیشنهادی توسط FEMA-P695 انجام شده است [۱۰]. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها با خلاصه‌سازی منحنی‌های IDA از طریق صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد ارائه می‌شود تا دید جامعی نسبت به تغییرات پاسخ سازه در شرایط مختلف لرزه‌ای به‌دست آید. این پژوهش همچنین به بررسی توزیع شتاب، دررفت و جابه‌جایی در طبقات قاب‌های بلندمرتبه می‌پردازد و تأثیر موقعیت نصب جداساز میان‌طبقه‌ای بر این پارامترها را مورد تحلیل قرار می‌دهد.

علاوه بر این، اثر پارامترهایی مانند سختی و میرایی سیستم جداساز بر پاسخ لرزه‌ای سازه بررسی شده تا نقش این عوامل در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه روشن شود. در انتها روند و روشی مؤثر برای مشخص کردن طبقه بهینه به‌صورت یک فلوچارت برای استفاده در تحقیقات آتی پیشنهاد شده است.

۲- طراحی قاب‌های مورد مطالعه

فرآیند طراحی و کنترل سازه‌های فولادی ۲۰ و ۲۵ طبقه بر اساس الزامات استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم)، مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان است [۱۱-۱۳]. سیستم سازه‌ای مورد استفاده در این مطالعه، از نوع سیستم دوگانه متشکل از قاب خمشی ویژه و مهاربند و اگر است. رفتار لرزه‌ای تیرهای پیوند به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی قاب‌های مهاربندی و اگر در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. محل احداث در شهر تهران با خطر نسبی لرزه‌ای خیلی زیاد و کاربری مسکونی انتخاب شده است. فرآیند بارگذاری ثقلی سازه‌ها با استناد به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و طراحی لرزه‌ای با استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی مطابق با الزامات استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) در هر دو راستای اصلی متعامد سازه با اعمال خروج از مرکزیت تصادفی به میزان ۵ درصد بُعد ساختمان و با هدف بررسی پاسخ سازه به نوسانات پیچشی و کنترل اثرات ناشی از توزیع نامتقارن جرم و سختی صورت گرفته است. برای طراحی سازه‌ها، از نرم‌افزار ETABS استفاده شده است. در گام نخست، مقاطع فولادی با رعایت الزامات فشردگی مقاطع مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان تعریف شده‌اند. پس از انجام تحلیل دینامیکی طیفی، مقاطع مناسب به اعضای سازه‌ای اختصاص یافته‌اند. تمامی اجزای سازه‌ای با فرض استفاده از فولاد ساختمانی ST37 طراحی شده که مشخصات مکانیکی آن با فرضیات آیین‌نامه‌ای مطابقت دارد.

پلان، نمای سه‌بعدی و نمای قاب‌های طراحی شده به‌ترتیب در شکل (۱) نشان داده شده است. قاب‌ها شامل سه دهانه هستند که طول هر دهانه ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۵ متر است و مهاربند و اگر در دهانه وسط قرار دارد. ارتفاع کل سازه‌ها برای مدل‌های ۲۰ و ۲۵ طبقه به‌ترتیب برابر ۷۰ و ۸۷/۵ متر است. ابعاد افقی این سازه‌ها ۱۵ متر است؛ بنابراین نسبت ارتفاع به بعد افقی (طول) برای هر دو مدل به‌ترتیب برابر با ۴/۶ و ۵/۸ به‌دست می‌آید که

¹ Saha

² Mishra

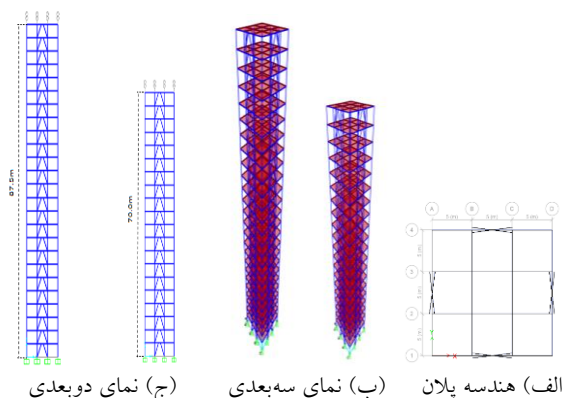
³ Zhang

⁴ Forcellini

⁵ Kalfas

بیش از عدد پی بوده و بیانگر ویژگی‌های سازه‌های بلندمرتبه و لاغر است.

طول تیرهای پیوند به‌گونه‌ای انتخاب شده که مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، در محدوده عملکرد برشی قرار گیرند.



شکل ۱- پلان و نمای سه‌بعدی و دوبعدی سازه‌های طراحی شده

۳- مدل‌سازی و صحت‌سنجی

برای تحلیل و ارزیابی سازه‌ها از نرم افزار Opensess استفاده شده است. هندسه سازه در تحلیل عددی با استفاده از گره‌ها^۱ مشخص می‌شود. گره‌ها محل تقاطع المان‌های سازه‌ای بوده و همچنین نقاط اتصال سازه به تکیه‌گاه‌ها را تشکیل می‌دهند. در مدل‌سازی دوبعدی، هر گره با سه درجه آزادی شامل دو درجه آزادی انتقالی در راستای محورهای افقی (X)، عمودی (Y) و یک درجه آزادی دورانی حول محور خارج از صفحه (Z) تعریف می‌شود.

برای مدل‌سازی اعضای اصلی سازه شامل تیرها، ستون‌ها و مهاربندها در نرم‌افزار Opensess، از المان‌های تیر-ستون غیرخطی با مقطع فایبر^۲ استفاده شده است. به‌منظور افزایش دقت در توزیع کرنش و نیرو در طول اعضا، از پنج نقطه انتگرال‌گیری^۳ در طول هر عضو بهره گرفته شده است [۹].

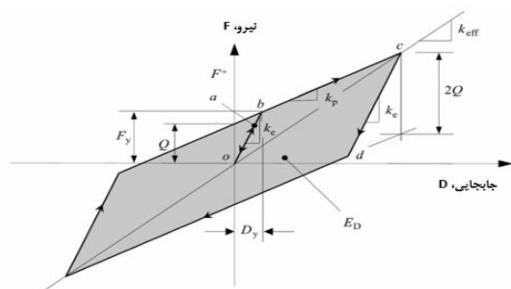
برای تعریف رفتار مصالح فولادی در مدل‌سازی عددی، از مدل رفتاری گیوفر-منگوتو-پینتو^۴ استفاده شده است که در نرم‌افزار Opensess با عنوان Steel02 شناخته می‌شود [۱۵].

۳-۱- مدل‌سازی دوخطی جداساز لرزه‌ای

طراحی سامانه جداساز لرزه‌ای نوع LRB مطابق با دستورالعمل ارائه‌شده در نشریه ۵۲۳ انجام شده است [۱]. برای انتخاب و استفاده از سیستم جداساز نوع LRB، از اطلاعات مندرج در

کاتالوگ محصولات شرکت FIP ایتالیا که در پروژه‌های اجرایی داخل کشور نیز به‌کار می‌روند، استفاده شده است. در نشریه ۵۲۳، از یک مدل عمومی برای شبیه‌سازی رفتار جداسازهای لرزه‌ای استفاده شده است. پارامترهای این مدل بر اساس نوع جداساز، در هر بخش به‌صورت جداگانه معرفی می‌شوند. مدل عمومی مورد استفاده، مدل دوخطی است که برای بیان رابطه میان نیروی برشی و جابه‌جایی جانبی به‌کار می‌رود. این مدل با استفاده از سه پارامتر اصلی، سختی ارتجاعی (k_e)، سختی پس از تسلیم (k_p) و مقاومت مشخصه (Q) تعریف می‌شود. معمولاً زمانی که یک جداساز، تعداد زیادی حلقه‌های بارگذاری و باربرداری را تجربه می‌کند، مقاومت مشخصه می‌تواند برآوردی از پایداری رفتار هیستریزس آن ارائه دهد. این سه پارامتر به‌خوبی ویژگی‌های مکانیکی جداسازها را توصیف کرده و برآورد مناسبی از رفتار غیرخطی آن‌ها فراهم می‌کند.

در شکل (۲)، مدل دوخطی ایده‌آل که بر اساس نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شده، نمایش داده شده است. برای محاسبه سختی مؤثر یک جداساز (k_{eff}) در ناحیه پس از تسلیم، از رابطه (۱) استفاده می‌شود که ترکیبی از سختی پس از تسلیم و مقاومت مشخصه بر حسب جابه‌جایی جانبی طراحی است.



شکل ۲- مدل دوخطی ایده‌آل یک جداساز

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (1)$$

تغییر مکان تسلیم (D_y) برحسب پارامترهای اصلی از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

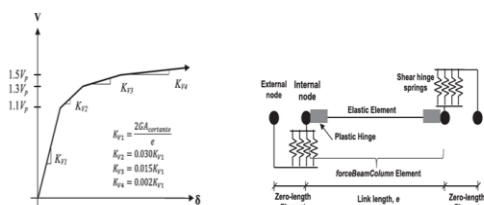
$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \quad (2)$$

¹ Nodes

² Nonlinear Beam-Column Element with Fiber Section

³ Five-Point Gauss Integration

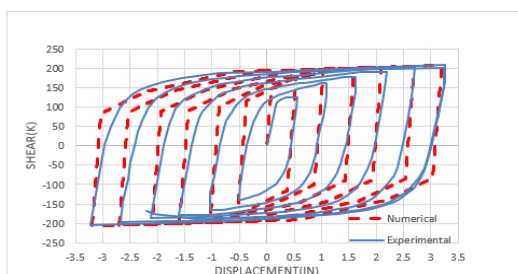
⁴ Giuffrè-Menegotto-Pinto



شکل ۳- منحنی رفتاری و مدل سازی عددی تیر پیوند

به منظور صحت سنجی مدل سازی پیوند برشی، از داده های آزمایشگاهی استفاده شده است؛ داده ها مربوط به تیر پیوند با مقطع W18×40، طول 28 (in) و سختی برشی 126 (kip) هستند که تحت بارگذاری چرخه ای مورد آزمایش قرار گرفته اند [۱۷].

منحنی های هیستریزس حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، شکل و روند منحنی هیستریزس مدل پریزن تطابق قابل قبولی با داده های آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴- صحت سنجی تیر پیوند

۳-۳- صحت سنجی جداساز لرزه ای

رفتار مکانیکی جداسازهای لرزه ای را می توان به صورت مؤثر با استفاده از مدل دوخطی شبیه سازی نمود. این مدل، بر پایه سه پارامتر اصلی شامل سختی اولیه (k_e)، سختی پس از تسلیم و مقاومت تسلیم (F_y) تعریف می شود که قابلیت بازنمایی دقیق رفتار هیستریزس جداساز را فراهم می آورند.

در نرم افزارهای تحلیل سازه، این مدل معمولاً با به کارگیری المان های فنی غیرخطی پیاده سازی می شود. انتخاب صحیح نوع المان و تنظیم دقیق پارامترهای رفتاری آن نقش تعیین کننده ای در صحت نتایج تحلیل ایفا می کند.

در این مطالعه، برای مدل سازی جداساز لرزه ای در نرم افزار OpenSees، از المان twoNodeLink استفاده شده است. این المان، که برای تحلیل در فضای دوبعدی طراحی شده، قادر است در هر سه جهت محوری، برشی و پیچشی مصالح مختلف را

نیروی تسلیم (F_y) در جابه جایی تسلیم (D_y) طبق رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (3)$$

نسبت میرای مؤثر (β_{eff}) معیاری از میزان جذب انرژی در یک حلقه کامل رفت و برگشت است که طبق رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} D^2} \quad (4)$$

که (E_D) انرژی تلف شده در یک حلقه کامل رفت و برگشتی برای مدل دوخطی در شکل (۴) سطح محصور در حلقه هیستریزس است و طبق رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$E_D = 4Q(D - D_y) \quad (5)$$

۳-۲- صحت سنجی تیر پیوند

عضو پیوند برشی به روش پیشنهادی گوهر^۱ و رامادان^۲ که توسط بسیاری از محققان در مطالعات عددی خود برای شبیه سازی دقیق رفتار پیوندهای برشی به کار رفته و اعتبار آن در ادبیات مهندسی زلزله به اثبات رسیده، استفاده شده است [۱۶].

مدل سازی این عضو در نرم افزار OpenSees مطابق با شکل (۳)، شامل سه المان است؛ یک المان تیر در وسط عضو پیوند که برای شبیه سازی تغییر شکل های الاستیک در راستای محوری، برشی و خمشی و همچنین تسلیم در خمش به کار گرفته می شود، دو المان با طول صفر در دو انتهای پیوند که به منظور شبیه سازی رفتار غیرخطی ناشی از تسلیم برشی استفاده می شوند. برای تیر میانی، از المان تیر با پلاستیسیته متمرکز استفاده شده است. این المان متشکل از سه ناحیه است؛ یک ناحیه الاستیک خطی در مرکز عضو و دو مفصل پلاستیک با طول صفر در دو انتهای عضو، که رفتار خمشی غیرخطی را مدل سازی می کنند. در تعریف رفتار مصالح مفاصل انتهایی، از مدل دوخطی استفاده شده است.

¹ Ghobarah

² Ramadan

تراز طبقه ۲۰، این مقدار به ۲/۸۱ ثانیه رسیده که معادل حدود ۳/۷ درصد افزایش است.

جدول ۱- زمان تناوب سه مود اول سازه ۲۵ طبقه با جداساز لرزه‌ای میان طبقه‌ای و بدون جداساز

تراز	نوع جداساز	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)
طبقه	بدون جداساز	2.71	0.88	0.47
۲۰	LRB-SN500/200-130	2.81	0.93	0.5
	LRB-SN700/203-170	2.79	0.91	0.48
۱۵	LRB-SN700/203-170	2.8	0.89	0.49
	LRB-SN800/200-190	2.79	0.9	0.49
۱۰	LRB-SN800/200-190	2.82	0.89	0.49
	LRB-SN1000/207-200	2.8	0.89	0.49
۵	LRB-SN1000/207-200	2.85	0.93	0.48
	LRB-SN1200/275-215	2.83	0.93	0.48
پایه	LRB-SN1000/207-200	2.9	0.94	0.5
	LRB-SN1200/275-215	2.88	0.95	0.51

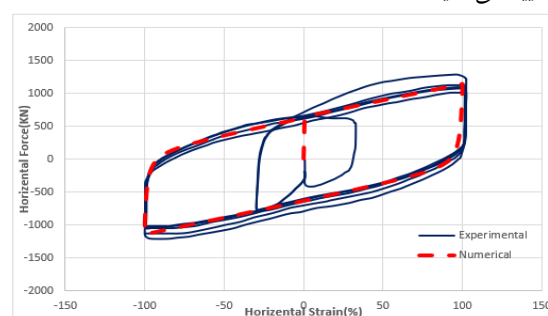
در صورت جداسازی در طبقه پنجم، پیوند غالب به ۲/۸۵ ثانیه می‌رسد و ۵/۲ درصد افزایش می‌یابد و در صورت جداسازی در پایه، پیوند به ۲/۹ ثانیه افزایش می‌یابد که معادل ۷ درصد افزایش نسبت به حالت بدون جداساز است. جدول (۲) نیز زمان تناوب سه مود اول سازه ۲۰ طبقه را نشان می‌دهد که در نهایت در تراز پایه زمان تناوب مود اول سازه با جداساز به میزان ۷/۴۷ درصد نسبت به سازه بدون جداساز افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که هرچه جداساز در تراز پایین‌تری نصب شود، اثر افزایش پیوند بیش‌تر می‌شود.

جدول ۲- زمان تناوب سه مود اول سازه ۲۰ طبقه با جداساز لرزه‌ای میان طبقه‌ای و بدون جداساز

تراز	نوع جداساز	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)
طبقه	بدون جداساز	2.41	0.76	0.41
۱۵	LRB-SN500/200-130	2.49	0.81	0.42
	LRB-SN800/200-190	2.45	0.78	0.41
۱۰	LRB-SN800/200-190	2.51	0.77	0.43
	LRB-SN1000/207-200	2.51	0.77	0.43
۵	LRB-SN1000/207-200	2.55	0.801	0.41
	LRB-SN1200/275-215	2.56	0.8	0.41
پایه	LRB-SN1000/207-200	2.59	0.89	0.44
	LRB-SN1200/275-215	2.59	0.83	0.54

دریافت کرده و رفتار غیرخطی مصالح را بازنمایی کند. درواقع، با درنظرگرفتن سیستم جداساز به صورت یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF) در راستای افقی، از این المان به عنوان گزینه‌ای مناسب برای مدل‌سازی رفتار دوخطی جداساز استفاده شده است. روش محاسبه پارامترهای اصلی مدل دوخطی جداساز، در روابط (۱) الی (۵) ارائه شده است. به منظور اعتبارسنجی رفتار چرخه‌ای مدل عددی تعریف شده برای جداساز لرزه‌ای، از داده‌های یک نمونه آزمایشگاهی گزارش شده، استفاده شده است. در این مقاله، یک جداساز لاستیکی-سربی (LRB) که برای کاربرد در نیروگاه هسته‌ای طراحی شده، تحت آزمایش‌های چرخه‌ای در شرایط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۷]. مشخصات این جداساز شامل قطر ۱۵۰۰ میلی‌متر، ارتفاع کل لاستیک ۲۲۴ میلی‌متر، تعداد لایه‌های لاستیکی ۳۲ لایه، ضخامت هر لایه لاستیکی ۷ میلی‌متر، قطر هسته سربی ۳۲۰ میلی‌متر و مدول برشی لاستیک ۴ مگاپاسکال است.

در این پژوهش، مدل عددی توسعه یافته در Opensees با استفاده از نتایج این آزمایش کالیبره شده است. در این راستا، منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از شبیه‌سازی عددی با منحنی ثبت شده در آزمون واقعی مقایسه شده و با تنظیم دقیق پارامترهای رفتاری شامل k_p ، k_e و F_p ، انطباق مناسبی حاصل شده است. شکل (۵)، صحت مدل‌سازی رفتار غیرخطی و چرخه‌ای جداساز را تأیید می‌نماید.



شکل ۵- صحت‌سنجی جداساز لرزه‌ای

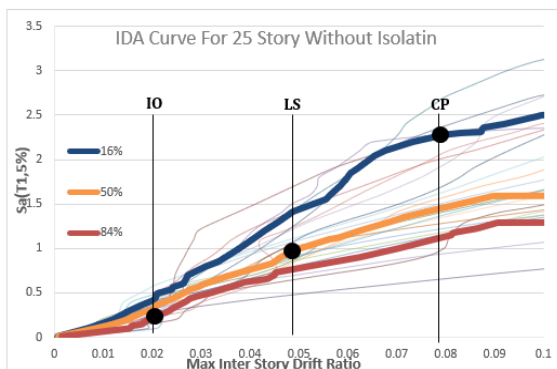
۴- آنالیز مودال و بررسی اثر جداسازی میان طبقه در افزایش زمان تناوب

در سازه‌های بلندمرتبه که به طور ذاتی دارای پیوند طبیعی بلندتری هستند، تأثیر افزایش پیوند در کاهش پاسخ لرزه‌ای محدودتر است. مطابق جدول (۱)، در سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز، پیوند غالب برابر با ۲/۷۱ ثانیه است؛ در حالی که با اجرای جداساز در

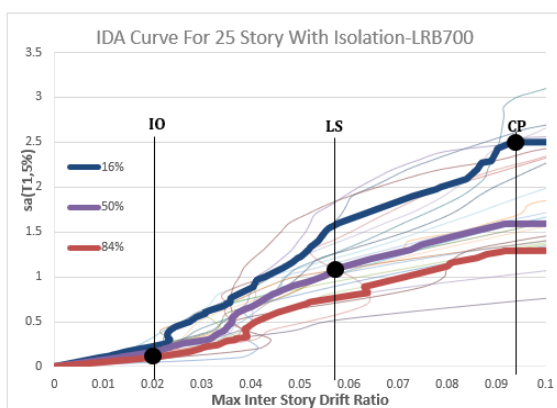
۵-۱- بررسی عملکرد لرزه‌ای جداساز در تراز طبقات با

استفاده از منحنی‌های IDA برای قاب ۲۵ طبقه

برای نمونه، منحنی‌های خلاصه‌شده شامل صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ زمانی که جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰ و زیر ستون‌های طبقه ۲۱ قرار داده شده است، در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار منحنی خلاصه‌شده IDA قاب ۲۵ طبقه بدون جداساز لرزه‌ای



شکل ۸- نمودار منحنی خلاصه‌شده IDA قاب ۲۵ طبقه با جداساز لرزه‌ای LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰

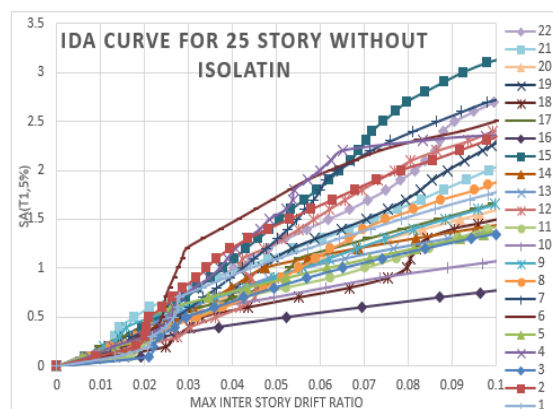
بر اساس نام‌گذاری در کاتالوگ شرکت FIP ایتالیا، حرف SN نشان‌دهنده نوع سیستم از لحاظ مدول برشی (۰/۶ مگاپاسکال)، عدد ۷۰۰ قطر جداساز (بر حسب میلی‌متر)، عدد ۲۰۳ بیانگر مجموع ارتفاع لایه‌های لاستیکی جداساز (میلی‌متر) و عدد ۱۷۰ نیز قطر هسته سربی (میلی‌متر) را مشخص می‌کند.

۵- تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA)

به منظور دستیابی توازن میان پوشش آماری کافی رکوردها و کارایی در زمان و منابع محاسباتی، در این پژوهش از ۲۲ رکورد زلزله دور از گسل استفاده شده است که در دستورالعمل FEMA P-695 پیشنهاد شده‌اند [۱۰]. این مجموعه، انتخابی متداول و معتبر برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها در مطالعات مبتنی بر تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده IDA^۱ به‌شمار می‌رود [۱۸].

با توجه به این که در تحلیل IDA یکی از رایج‌ترین معیارها، شتاب طیفی مود اول سازه است و همچنین با توجه به وابستگی $S_a(T_1, 5\%)$ به طیف پاسخ زمین و دارا بودن خصوصیات سازه و این که پراکندگی منحنی‌های IDA متأثر از رکوردهای ورودی است، این نوع از شتاب طیفی به‌عنوان پارامتر حرکت زمین و معیار شدت لرزه ای انتخاب شده است. همچنین به دلیل این که از یک سو تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای (Interstory Drift) می‌تواند مستقیماً منجر به ایجاد خرابی‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای شود و از سوی دیگر، بسیاری از مطالعات پیشین نیز از این شاخص به‌عنوان یکی از پرکاربردترین معیارهای خسارت در تحلیل IDA بهره برده‌اند، بیشینه دریافت نسبی بین طبقه‌ای به‌عنوان معیار اصلی خسارت انتخاب شده است.

شکل (۶) منحنی IDA مربوط به سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز لرزه‌ای را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها و دستیابی به یک رفتار کلی و مشخص از آن‌ها، همچنین با هدف کاهش پراکندگی منحنی‌های IDA، این منحنی‌ها در شکل (۷) با بهره‌گیری از روش‌های آماری در سه دسته ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ خلاصه شده‌اند.



شکل ۶- نمودار منحنی IDA قاب ۲۵ طبقه بدون جداساز لرزه‌ای

¹ Incremental Dynamic Analysis

جدول ۳- سطوح عملکرد سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰

سطح عملکرد	نوع جداساز	DM		IM	
		Drift Ratio	درصد اختلاف	Sa (g)	درصد اختلاف
IO	بدون جداساز	0.02		0.22	59.09
	LRB-SN700/203-170	0.02	-	0.09	کاهش
LS	بدون جداساز	0.0495	14.75	0.98	28.57
	LRB-SN700/203-170	0.0568	افزایش	0.7	کاهش
CP	بدون جداساز	0.079	18.61	2.27	0.44
	LRB-SN700/203-170	0.0937	افزایش	2.28	افزایش

با توجه به جدول (۳)، عملکرد لرزه‌ای سازه در سطوح مختلف شدت زلزله بر اساس صدک‌های آماری، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه و با معیار حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.02 g، سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز در شتاب طیفی متناظر با $Sa=0.22$ g به سطح عملکرد IO می‌رسد. سازه مجهز به جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه بیستم، در شتاب طیفی $Sa=0.1$ g به سطح عملکرد IO می‌رسد.

در سطح عملکرد ایمنی جانی، برای سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0495 بوده و این مقدار در شتاب طیفی متناظر با $Sa=0.98$ g به دست آمده است. برای سازه مجهز به جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه بیستم، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0568 در شتاب طیفی $Sa=1.08$ g رخ داده است. با مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که در سازه مجهز به جداساز، مقدار دررفت بین طبقه‌ای $16/16$ درصد افزایش یافته و افزایش جذب شتاب برابر $10/2$ درصد است. در سطح عملکرد آستانه فروریزش برای سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.079 بوده و این مقدار در شتاب طیفی متناظر با $Sa=2.27$ g به دست آمده است. برای سازه مجهز به جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه بیستم، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0937 در شتاب طیفی $Sa=2.5$ g رخ داده است. با مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که در سازه مجهز به جداساز، مقدار دررفت بین طبقه‌ای $20/25$ درصد افزایش یافته و افزایش جذب شتاب برابر $10/13$ درصد است. استفاده از

۵-۲- تعیین ظرفیت IO، LS و CP بر روی خلاصه منحنی IDA

برای مقایسه عملکرد سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز و با جداساز لرزه‌ای LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰، لازم است سطوح عملکرد آستانه فروریزش (CP)، ایمنی جانی (LS) و استفاده بی‌وقفه (IO)، با دقت بر روی صدک‌های $16/$ ، $50/$ و $84/$ استخراج شده از منحنی‌های IDA در شکل‌های (۷) و (۸) تعیین شد. حد نهایی سطح عملکرد CP (جلوگیری از فروریزش) از روی منحنی IDA صدک $16/$ که بیان‌کننده زلزله‌های با PGA بزرگ هستند، بر اساس دو معیار حداکثر دررفت 10 درصد یا کاهش شیب منحنی به کم‌تر از 20 درصد سختی (هرکدام که زودتر رخ دهد)، مشخص شده است. حد نهایی سطح عملکرد IO از روی منحنی IDA صدک $84/$ که بیان‌کننده زلزله‌های با PGA کم هستند و با معیار حداکثر دررفت 2 درصد که تضمین‌کننده رفتار خطی نیز می‌باشد، مشخص شده است. حد نهایی سطح عملکرد LS از میانگین دو سطح CP و LS و با استفاده از صدک $50/$ محاسبه می‌شود. برای سازه‌های با و بدون جداساز مربوط به خودشان و با معیارهای ذکر شده، حد سطوح عملکرد مختلف مشخص شدند.

بنابراین، نقاط فروریزش بر اساس این معیار از منحنی‌ها استخراج شده و سپس مقایسه‌ای بین رفتار لرزه‌ای سازه مجهز به جداساز در تراز طبقه ۲۰ و سازه بدون جداساز انجام خواهد شد.

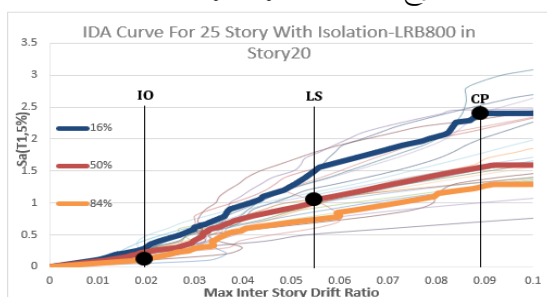
باتوجه به این که طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)، سازه تحت تاثیر زلزله ضعیف با دوره بازگشت حدود 10 سال باید در سطح رفتار IO و برای زلزله طراحی با دوره بازگشت حدود 475 سال باید در سطح رفتار LS و همچنین برای زلزله‌های شدید با دوره بازگشت حدود 2475 سال باید در سطح رفتار CP باقی بماند، بنابراین ماکزیمم دررفت نسبی بین طبقه‌ای و Sa متناظر با آن برای سطوح عملکرد CP، LS و IO به ترتیب بر روی صدک‌های $16/$ ، $50/$ و $84/$ برای دو حالت بدون جداساز و با جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰ در شکل‌های (۷) و (۸) مشخص شده است.

جدول (۳) ماکزیمم دررفت نسبی بین طبقه‌ای و Sa متناظر با آن را برای سطوح عملکردی IO، LS و CP با توجه به منحنی‌های خلاصه شده در شکل‌های (۷) و (۸) برای سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰ نشان می‌دهد. جدول (۴) نیز این مقادیر را به عنوان نمونه برای زمانی که جداساز در طبقه ۱۵ نصب شده نشان می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات فنی برای سه نوع جداساز استفاده شده در تراز طبقه بیستم از سازه ۲۵ طبقه

جداساز لرزه‌ای	F_y (kN)	F_2 (kN)	D_y (mm)	D_2 (mm)	K_{shear} (kN/m)	ξ_e (%)
LRB-SN500/200-130	148	322	16	400	9250	26
LRB-SN700/203-170	256	595	16	400	16000	24
LRB-SN800/200-190	321	722	16	400	20262.5	23

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو پارامتر کلیدی سختی و میرایی در طراحی جداسازهای لرزه‌ای به‌طور متقابل به یکدیگر وابسته‌اند و باید به‌گونه‌ای بهینه انتخاب شوند که نیازهای لرزه‌ای سازه را در سطوح مختلف عملکردی برآورده سازند.



شکل ۹- نمودار منحنی خلاصه شده IDA قاب ۲۵ طبقه با جداساز لرزه‌ای LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۲۰

جدول ۶- سطوح عملکرد سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۲۰

سطح عملکرد	نوع جداساز	DM		IM	
		Drift Ratio	درصد اختلاف	Sa (g)	درصد اختلاف
IO	بدون جداساز	0.02		0.22	40.9
	LRB-SN800/200-190	0.02	-	0.13	کاهش
LS	بدون جداساز	0.0495	11.79	0.98	8.6
	LRB-SN800/200-190	0.055	افزایش	1.06	افزایش
CP	بدون جداساز	0.079	19.92	2.27	5.73
	LRB-SN800/200-190	0.09	افزایش	2.4	افزایش

جداساز در قاب ۲۵ طبقه برای ترازهای ۱۵، ۱۰، ۵ و تراز پایه موجب می‌شود سازه دارای جداساز در S_a های کم‌تری نسبت به حالت بدون جداساز به سطح عملکرد CP برسد.

جدول ۴- سطوح عملکرد سازه ۲۵ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۱۵

سطح عملکرد	نوع جداساز	DM		IM	
		Drift Ratio	درصد اختلاف	Sa (g)	درصد اختلاف
IO	بدون جداساز	0.02		0.22	54.55
	LRB-SN700/203-170	0.02	-	0.1	کاهش
LS	بدون جداساز	0.0495	16.16	0.98	10.2
	LRB-SN700/203-170	0.0575	افزایش	1.08	افزایش
CP	بدون جداساز	0.079	20.25	2.27	10.13
	LRB-SN700/203-170	0.095	افزایش	2.5	افزایش

همچنین، با توجه به جدول (۴) و مقایسه با جدول (۳) مشخص می‌شود که در قاب ۲۵ طبقه، آوردن تراز جداساز به سمت طبقات تحتانی باعث می‌شود سازه با شتاب طیفی S_a کم‌تری به حدود نهایی IO، LS و CP برسد.

۳-۵ اثر پارامترهای سختی و میرایی سیستم جداساز بر پاسخ لرزه‌ای سازه

به‌منظور مقایسه، پارامترهای مهم مکانیکی جداساز لرزه‌ای در جدول (۵) برای سه نوع جداساز خلاصه شده است. با توجه به این جدول با افزایش قطر جداساز سختی برشی افزایش و میرایی جداساز کاهش می‌یابد.

از طرفی استفاده از LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه بیستم از سازه ۲۵ طبقه مطابق شکل (۸) و جدول (۳) موجب افزایش ظرفیت شتاب طیفی لرزه‌ای در سطوح ایمنی جانی و آستانه فروریزش بیش از ۱۰ درصد شده است؛ در صورتی که مطابق شکل (۹) و جدول (۶) استفاده از LRB-SN800/200-190 در همان تراز طبقه بیستم از سازه ۲۵ طبقه موجب افزایش ۸/۶ درصد ظرفیت شتاب طیفی لرزه‌ای در سطوح ایمنی جانی و افزایش ۵/۷۳ درصد ظرفیت شتاب طیفی لرزه‌ای در سطوح آستانه فروریزش می‌شود.

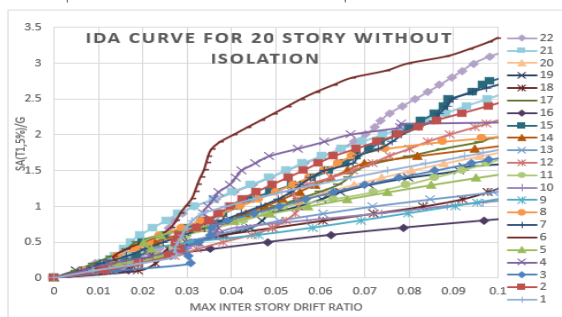
۵-۴- بررسی پاسخ شتاب، دررفت و جابه‌جایی در طبقات در قاب ۲۵ طبقه

از میان ۲۲ رکورد مورد بررسی، سه رکورد مجزا (نورث‌ریج^۱، هکتورماین^۲ و لندرز^۳) به‌ترتیب برای سطوح لرزه‌ای IO و LS، انتخاب شده‌اند تا تحلیل دقیق‌تری از توزیع پارامترهای لرزه‌ای مانند شتاب، دررفت و جابه‌جایی در طبقات قاب‌ها انجام گیرد. شکل (۱۰-الف) مربوط به پاسخ شتاب و شکل (۱۰-ب) مربوط به پاسخ دررفت رکورد زلزله نورث‌ریج با $PGA=0.516\text{ g}$ است. تحت این رکورد، سازه بدون جداساز در ماکزیمم دررفت بین طبقه‌ای برابر با ۰/۰۷۹، وارد آستانه فروریزش شده است. در مقابل، سازه مجهز به جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰، در همین سطح عملکردی هنوز به آستانه فروریزش نرسیده است.

در دررفت بین طبقه‌ای تجربه کرده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که جداساز در تراز طبقه ۲۰ با تمرکز اثر خود بر نیمه فوقانی سازه، توانسته پاسخ لرزه‌ای را در طبقات بالایی کنترل کرده و از گسترش آسیب به آن‌ها جلوگیری نماید.

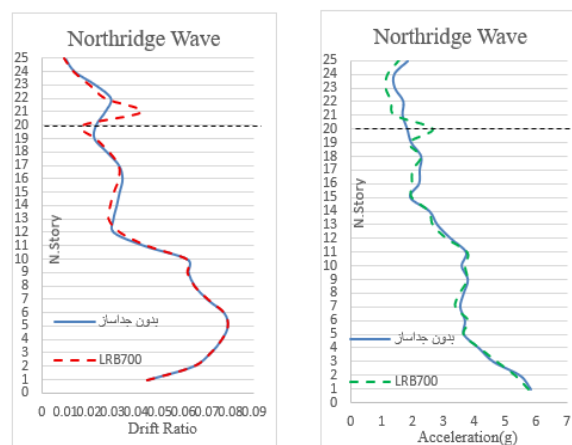
۵-۵- بررسی عملکرد لرزه‌ای جداساز در تراز طبقات با استفاده از منحنی‌های IDA برای قاب ۲۰ طبقه

ابتدا قاب ۲۰ طبقه بدون جداساز تحت ۲۲ رکورد زلزله قرار گرفته و منحنی‌های IDA مطابق شکل (۱۱) و سپس خلاصه منحنی‌ها مطابق شکل (۱۲) ترسیم شد و در نهایت سطوح عملکردی IO، LS و CP بر روی خلاصه منحنی‌ها مشخص شد؛ در ادامه با قرارگیری جداساز لرزه‌ای در تراز طبقات مختلف و انجام تحلیل‌های IDA و ترسیم خلاصه منحنی‌ها، مقایسه انجام شد.



شکل ۱۱- نمودار منحنی IDA قاب ۲۰ طبقه بدون جداساز لرزه‌ای

برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵ و زیر ستون‌های طبقه ۱۶ قرار داده شده است. منحنی‌های خلاصه‌شده شامل صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ در شکل (۱۳) ارائه شده است. همچنین جدول (۷) ماکزیمم دررفت نسبی بین طبقه‌ای و S_a متناظر با آن را برای سطوح عملکردی IO، LS و CP با توجه به منحنی‌های خلاصه‌شده در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) برای سازه ۲۰ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵ نشان می‌دهد.



(الف) پاسخ شتاب طبقات (ب) پاسخ دررفت طبقات

شکل ۱۰- پاسخ شتاب و دررفت طبقات قاب ۲۵ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN700/203-170 در تراز طبقه ۲۰ در سطح CP

بررسی شکل (۱۰) نشان می‌دهد که عملکرد سیستم جداساز در این مرحله، تفاوت معناداری در نیمه بالایی سازه ایجاد کرده است؛ و در نیمه پایینی سازه، توزیع شتاب و دررفت بین طبقه‌ای تقریباً مشابه حالت بدون جداساز باقی مانده، شتاب طبقه جداسازی‌شده (تراز طبقه ۲۰) حدود ۴۶/۱۵ درصد افزایش یافته است؛ درحالی‌که طبقات بالاتر از تراز جداساز، کاهش بین ۱۵ تا ۲۱ درصد در شتاب ورودی نسبت به حالت بدون جداساز نشان می‌دهند.

دررفت بین طبقه‌ای در اولین طبقه بالای جداساز ۵۷/۸۴ درصد افزایش یافته، اما طبقات بالاتر، کاهش نسبی بین ۳ تا ۸ درصد را

¹ Northridge

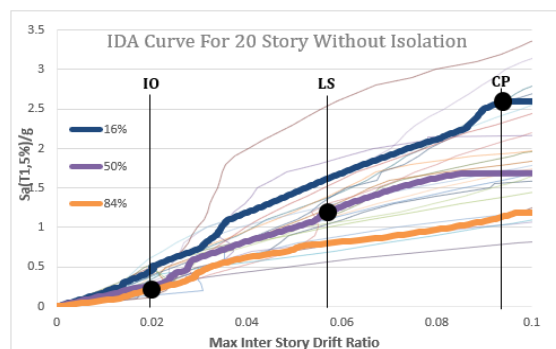
² Hector Mine

³ Landers

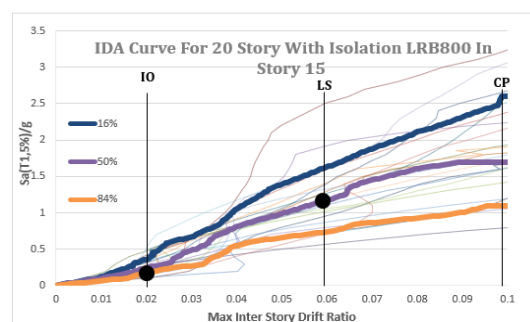
IO می‌رسد. سازه مجهز به جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵، در شتاب طیفی $S_a=0.17\text{ g}$ به سطح عملکرد IO می‌رسد. در سطح عملکرد ایمنی جانی، برای سازه ۲۰ طبقه بدون جداساز، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0571 بوده و این مقدار در شتاب طیفی متناظر با $S_a=1.19\text{ g}$ به دست آمده است. برای سازه مجهز به جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0593 در شتاب طیفی $S_a=1.16\text{ g}$ رخ داد است. با مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که در سازه مجهز به جداساز، مقدار دررفت بین طبقه‌ای $3/85$ درصد افزایش یافته و کاهش جذب شتاب برابر $2/52$ درصد است. در سطح عملکرد آستانه فروریزش برای سازه ۲۰ طبقه بدون جداساز، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0943 بوده و این مقدار در شتاب طیفی متناظر با $S_a=2.6\text{ g}$ به دست آمده است. برای سازه مجهز به جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵، حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.0987 در شتاب طیفی $S_a=2.6\text{ g}$ رخ داده است. با مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که در سازه مجهز به جداساز، مقدار دررفت بین طبقه‌ای $4/66$ درصد افزایش یافته و جذب شتاب برابر حالت بدون جداساز است. استفاده از جداساز در قاب ۲۰ طبقه برای ترازهای ۱۰، ۵ و تراز پایه موجب می‌شود سازه دارای جداساز در S_a های کمتری نسبت به حالت بدون جداساز به سطح عملکرد CP برسد.

۵-۶- بررسی پاسخ شتاب، دررفت و جابه‌جایی در طبقات در قاب ۲۰ طبقه

از میان ۲۲ رکورد مورد بررسی، سه رکورد مجزا (نورث‌ریچ، هکتورماین و لندرز) به ترتیب برای سطوح لرزه‌ای IO، LS و CP انتخاب شده‌اند تا تحلیل دقیق‌تری از توزیع پارامترهای لرزه‌ای مانند شتاب، دررفت و جابه‌جایی در طبقات قاب‌ها انجام گیرد. شکل (۱۴-الف) مربوط به پاسخ شتاب و شکل (۱۴-ب) مربوط به پاسخ دررفت رکورد زلزله نورث‌ریچ با $PGA=0.516\text{ g}$ است. تحت این رکورد، سازه بدون جداساز در ماکزیمم دررفت بین طبقه‌ای برابر با 0.0943 ، وارد آستانه فروریزش شده است. در مقابل، سازه مجهز به جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵، در همین سطح عملکردی هنوز به آستانه فروریزش نرسیده است.



شکل ۱۲- نمودار منحنی خلاصه شده IDA قاب ۲۰ طبقه بدون جداساز لرزه‌ای



شکل ۱۳- نمودار منحنی خلاصه شده IDA قاب ۲۰ طبقه با جداساز لرزه‌ای LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵

جدول ۷- سطوح عملکرد سازه ۲۰ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵

سطح عملکرد	نوع جداساز	DM		IM	
		Drift Ratio	درصد اختلاف	S_a (g)	درصد اختلاف
IO	بدون جداساز	0.02		0.22	54.55
	LRB-SN800/200-190	0.02	-	0.17	کاهش
LS	بدون جداساز	0.0571	3.85	1.19	2.52
	LRB-SN800/200-190	0.0593	افزایش	1.16	کاهش
CP	بدون جداساز	0.0943	4.66	2.6	
	LRB-SN800/200-190	0.0987	افزایش	2.6	-

با توجه به جدول (۷)، عملکرد لرزه‌ای سازه در سطوح مختلف شدت زلزله بر اساس صدک‌های آماری، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه و با معیار حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای برابر 0.02 ، سازه ۲۰ طبقه بدون جداساز در شتاب طیفی متناظر با $S_a=0.22\text{ g}$ به سطح عملکرد

استفاده قرار گیرد. روش پیشنهادی با هدف ساده‌سازی فرآیند تحلیل و افزایش دقت در ارزیابی اثرات سیستم جداساز لرزه‌ای تدوین شده است و قابلیت انطباق با مدل‌های عددی مختلف را دارد. نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش می‌تواند به مهندسان سازه و پژوهشگران در طراحی بهینه قاب‌های بلند، کاهش آسیب‌های لرزه‌ای و بهبود عملکرد دینامیکی سازه‌ها کمک شایانی نماید.

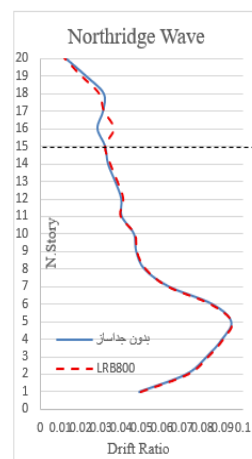
۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر جداساز بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی بلندمرتبه با سیستم جداساز لرزه‌ای بین طبقه‌ای شامل شتاب طیفی (Sa)، پاسخ شتاب و دررفت طبقات بررسی و در انتها روشی برای شناسایی تراز ایده‌آل برای نصب جداساز ارائه شد. برای این منظور دو قاب فولادی ۲۰ و ۲۵ طبقه با سیستم دوگانه قاب خمشی و مهاربند برون‌محور طراحی و با استفاده از نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شدند.

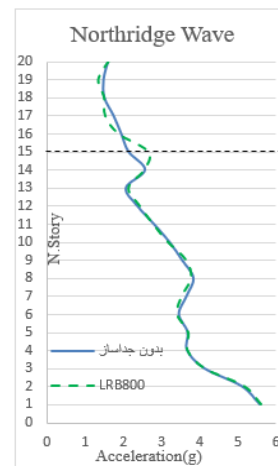
دو نوع جداساز لاستیکی با هسته سربی و سختی و میرایی متفاوت برای ارزیابی اثر مشخصات مکانیکی در هر تحلیل انتخاب شدند؛ برای تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده، ۲۲ رکورد زلزله مطابق دستورالعمل FEMA-P695 به‌کار برده شد. نتایج آنالیز مودال نشان داد که هرچه جداساز در تراز پایین‌تری نصب شود، پریود سازه بیش‌تر می‌شود. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی نشان داد که در قاب ۲۵ طبقه، نصب جداساز در تراز طبقه ۲۰، بهترین عملکرد را دارد و با بیش از ۱۰ درصد Sa بیش‌تر به سطوح عملکرد LS و CP می‌رسد.

همچنین پاسخ شتاب در طبقات نشان داد که شتاب در طبقات بالاتر از جداساز، کاهش می‌یابد؛ به‌طور مثال، در زلزله نورث‌ریج در در رفتی که سازه بدون جداساز به سطح عملکرد CP می‌رسد، سازه دارای جداساز در طبقه ۲۰ برای بخش پایین جداساز بدون تغییر می‌ماند و برای بخش جداساز، شتاب طبقات تا حدود ۲۱ درصد کاهش می‌یابد.

توزیع دررفت نشان داد طبقات جداساز کاهش دررفت دارند. به‌طور مشخص برای زلزله نورث‌ریج، در قاب ۲۵ طبقه، طبقات بالاتر از جداساز، کاهش تا حدود ۸ درصد داشتند. استفاده از جداساز در قاب ۲۵ طبقه برای ترازهای ۱۵، ۱۰، ۵ و تراز پایه، موجب می‌شود سازه دارای جداساز در Saهای کم‌تری نسبت به حالت بدون جداساز به سطح عملکرد CP برسد.



(ب) پاسخ دررفت طبقات



(الف) پاسخ شتاب طبقات

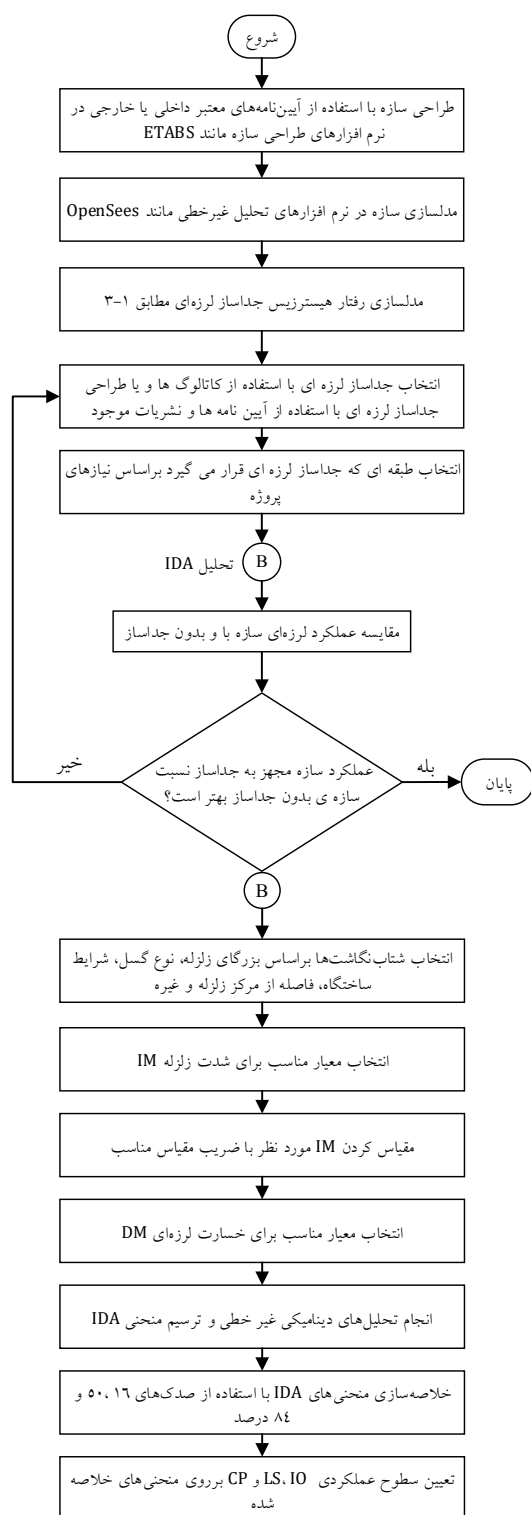
شکل ۱۴- پاسخ شتاب و دررفت طبقات قاب ۲۰ طبقه بدون جداساز و با جداساز LRB-SN800/200-190 در تراز طبقه ۱۵ در سطح CP

بررسی نتایج شکل (۱۴) نشان می‌دهد که عملکرد سیستم جداساز در این مرحله، تفاوت معناداری در بالای جداساز ایجاد کرده است؛ و در پایین جداساز، توزیع شتاب، جابه‌جایی و دررفت بین طبقه‌ای تقریباً مشابه حالت بدون جداساز باقی مانده است. شتاب طبقه جداسازی شده (تراز طبقه ۱۵) حدود ۲۳/۸۳ درصد افزایش یافته است؛ درحالی‌که طبقات بالاتر از تراز جداساز، کاهشی تا حدود ۱۳ درصد در برخی طبقات در شتاب ورودی نسبت به حالت بدون جداساز نشان می‌دهند.

دررفت بین طبقه‌ای در اولین طبقه بالای جداساز (تراز طبقه ۱۶) ۲۸/۴۷ درصد افزایش یافته، اما در برخی طبقات بالاتر، کاهش نسبی تا حدود ۱۰ درصد را در دررفت بین طبقه‌ای تجربه کرده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که جداساز در تراز طبقه ۱۵ با تمرکز اثر خود بر بخش جداسازی شده سازه، توانسته پاسخ لرزه‌ای را در طبقات بالای جداساز کنترل کرده و از گسترش آسیب به آن‌ها جلوگیری نماید.

۶- روند پیشنهادی به منظور یافتن تراز ایده‌آل برای جداساز

در شکل (۱۵) یک روش تحلیلی جامع و پیشنهادی به صورت فلوچارت، برای بررسی رفتار سازه‌های مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای میان طبقه‌ای ارائه شده است. این روش فارغ از نوع سیستم باربر جانبی و مصالح به کاررفته اعم از فولادی یا بتنی، قابل استفاده بوده و می‌تواند به عنوان یک چارچوب عمومی و قابل تعمیم برای تحلیل و طراحی سازه‌های بلند دارای جداساز بین طبقه‌ای مورد



برای قاب ۲۰ طبقه، نصب جداساز در تراز طبقه ۱۵ بهترین عملکرد را دارد. پاسخ شتاب طبقات نشان داد که شتاب در طبقات بالاتر از جداساز، کاهش می‌یابد؛ به‌طور مثال، در زلزله نورتریج در درستی که سازه بدون جداساز به سطح عملکرد CP می‌رسد، سازه دارای جداساز در طبقه ۱۵ برای بخش پایین جداساز، بدون تغییر می‌ماند و برای بخش جداساز، شتاب طبقات تا حدود ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

توزیع دررفت نشان داد طبقات جداساز کاهش دررفت دارند. به‌طور مشخص برای زلزله نورتریج، در قاب ۲۰ طبقه، طبقات بالاتر از جداساز کاهش تا ۳/۵ درصد داشتند. استفاده از جداساز در قاب ۲۰ طبقه برای ترازهای ۱۰، ۵ و تراز پایه موجب می‌شود سازه دارای جداساز در S_a های کم‌تری نسبت به حالت بدون جداساز به سطح عملکرد CP برسد.

بررسی اثر پارامترهای سختی و میرایی در جداسازهای لرزه‌ای نشان داد لزوماً افزایش سختی برشی جداساز موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه دارای جداساز نمی‌شود و پارامترهای سختی و میرایی به‌طور متقابل به یکدیگر وابسته‌اند و باید به‌گونه‌ای بهینه انتخاب شوند که نیازهای لرزه‌ای سازه را در سطوح مختلف عملکردی برآورده سازند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش، به‌کارگیری سیستم‌های جداساز لرزه‌ای میان‌طبقه‌ای در ساختمان‌های بلند، به‌ویژه در نواحی فوقانی سازه، می‌تواند عملکرد لرزه‌ای مطلوبی ایجاد نماید.

شکل ۱۷- روش پیشنهادی به‌صورت فلوچارت، برای بررسی رفتار سازه‌های مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای میان‌طبقه‌ای

نصب جداساز در قسمت فوقانی ساختمان سبب کاهش در شتاب‌ها، تغییر مکان نسبی بین طبقات و نیروهای انتقالی به اعضای سازه‌ای می‌شود و در نتیجه احتمال آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در زمان زلزله کاهش می‌یابد. در مقابل، استفاده از جداساز لرزه‌ای در ترازهای پایینی سازه، ممکن است منجر به ناپایداری کلی سازه و حتی فروریزش در سطوح پایین شتاب طیفی شود که موجب تضعیف عملکرد کلی سیستم می‌شود. همچنین، ارتفاع سازه نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی سیستم جداساز میان طبقه‌ای دارد؛ به گونه‌ای که با کاهش ارتفاع، میزان تأثیر مثبت جداساز کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که استفاده از جداساز میان طبقه‌ای در سازه‌های بلند بیش از سازه‌های کوتاه و میان مرتبه توجیه‌پذیر است.

- Manual", Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264(1), pp.137-158.
- [16] Ramadan, T., and Ghobarah, A. (1995), "Analytical Model for Shear-Link Behavior", Journal of Structural Engineering, 121(11), pp.1574-1580.
- [17] Kim J.H., Kim M.K., and Choi, I.K. (2019), "Experimental Study on Seismic Behavior of Lead-Rubber Bearing Considering Bi-Directional Horizontal Input Motions", Engineering Structures. 198, pp.109529.
- [18] Vamvatsikos, D., and Cornell, C.A. (2002), "Incremental Dynamic Analysis", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31(3), pp.491-514.
- [1] Management and Planning Organization (2011) Guide for the Design and Construction of Seismic Isolation Systems in Buildings (Publication No. 523). Tehran: Management and Planning Organization.
- [2] Avinash, G.C., and Lingeshwaran, N. (2024), "Review on Base and Inter Storey Seismic Isolation Systems for High Rise Buildings", Research on Engineering Structures & Materials.
- [3] Mele, E., and Faiella, D. (2018), "Inter-Story Isolation Systems (IIS) for Tall Buildings: Design Considerations", CTBUH Journal, (2), pp.34-41.
- [4] Zhang, Y., Liu, D., Fang, S., Lei, M., Zhu, Z., and Liao, W. (2022), "Study on Shock Absorption Performance and Damage of a New Staggered Story Isolated System", Advances in Structural Engineering, 25(5), pp.1136-1147.
- [5] Becker, T.C., and Ezazi, A. (2016), "Enhanced Performance Through a Dual Isolation Seismic Protection System", The Structural Design of Tall & Special Buildings, 25(1), pp.72-89.
- [6] Gallanti, L., and Forcellini, D. (2016), "Numeric Validation of 3D Printer Technology Applied to Story Isolation on Tall Buildings", Journal of Statistical Science & Application, 4(05-06), pp.132-143.
- [7] Saha, A., and Mishra, S.K. (2021), "Amplification of Seismic Demands in Inter-Storey-Isolated Buildings Subjected to Near Fault Pulse Type Ground Motions", Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 147, pp.106771.
- [8] Zhang, Ch. Duan, C., and Sun, L. (2023), "Experimental Investigation of FPS Inter-Story Isolation Control for Assembled Steel Structure with High Aspect Ratio", Structures, 53, pp.550-567.
- [9] Forcellini, D., and Kalfas, N.K. (2023), "Inter-Story Seismic Isolation for High-Rise Buildings", Engineering Structures, 275, pp.115175.
- [10] FEMA (2009), FEMA-P695: Quantification of building seismic performance factors, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.
- [11] Standard 2800 (2015), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (4th edition)", Road, Housing and Urban Development Research Center. (in Persian)
- [12] Ministry of Roads and Urban Development, (2019), "Iranian National Building Regulations, Part 6: Loads on Buildings", 4th edition. (in Persian)
- [13] Ministry of Roads and Urban Development, (2013), "Iranian National Building Regulations, Part 10: Design and Construction of Steel Structures", 4th edition, pp.220. (in Persian)
- [14] Hjelmstad, K.D., and Popov, E.P. (1983), "Seismic Behavior of Active Beam Links in Eccentrically Braced Frames", NASA STI/Recon Technical Report 84, pp.18480.
- [15] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006), "OpenSees Command Language