

Research Paper

Comparative Seismic Performance of 14-Story Steel Moment-Resisting Frames Equipped with Single and Multiple Tuned Mass Dampers Distributed Based on Mode Shapes under Incremental Dynamic Analysis

Mohammad Rouhani¹, Seyed Mehdi Zahrai^{2*}

1- Master of Science in Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran



Citation: Rouhani, M., and Zahrai, M. (2026), "Comparative Seismic Performance of 14-Story Steel Moment-Resisting Frames Equipped with Single and Multiple Tuned Mass Dampers Distributed Based on Mode Shapes under Incremental Dynamic Analysis", *Journal of Steel & Structures*, 20(51), pp.120-138 (In Persian).

doi [10.22034/jss.2026.573111.1027](https://doi.org/10.22034/jss.2026.573111.1027)

Article info:

Article History:

Received: 8 February 2026

Revised: 2 March 2026

Accepted: 6 March 2026

Published: 4 April 2026

Keywords:

Tuned Mass Damper
Passive Control
Multiple Tuned Mass Damper
Fragility Curves
Incremental Dynamic Analysis
Steel Moment Frame

ABSTRACT

Background: Improving the seismic performance of high-rise structures and reducing earthquake-induced damage are major concerns in earthquake engineering. This study investigates the seismic performance of single tuned mass dampers (STMDs) and multiple tuned mass dampers (MTMDs) in a 14-story steel moment frame. The objective is to compare the efficiency of these systems in enhancing seismic capacity, reducing structural response, and evaluating the effect of height-wise distribution based on the modal energy index.

Methods: A 14-story steel frame was modeled in different cases in OpenSees and evaluated using Incremental Dynamic Analysis (IDA). Fourteen ground motion records, including 7 far-fault and 7 pulse-like near-fault records, were used. Seven models were analyzed: one uncontrolled structure, three STMD models with mass ratios of 1%, 3%, and 5%, and three MTMD models with the same mass ratios. Structural responses were assessed in terms of roof displacement, interstory drift ratio, base shear, IDA curves, and fragility curves.

Results: Both damping systems improved seismic performance compared to the uncontrolled structure; however, MTMDs generally performed better than STMDs in most indices. The highest median collapse intensity was obtained for the MTMD model with a 5% mass ratio, reaching 4.492, a 77.37% increase over the uncontrolled structure. MTMDs with 1% and 3% mass ratios also reduced roof displacement more effectively. Fragility analysis showed that MTMDs significantly decreased the probability of exceedance.

Conclusion: MTMDs distributed along the height based on the modal energy index are more effective than a single rooftop damper in improving seismic performance and reducing failure probability of high-rise steel structures.

* Corresponding Author's E-mail: mzahrai@ut.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

Earthquake-induced vibrations pose a serious threat to the safety and serviceability of high-rise structures, often leading to excessive damage, loss of functionality, and even collapse under severe seismic events. Therefore, improving the seismic performance of such structures has become one of the major concerns in structural and earthquake engineering. Among various passive control devices, tuned mass dampers (TMDs) have attracted considerable attention because of their simplicity, low maintenance requirements, and proven effectiveness in mitigating structural responses. Conventional single tuned mass dampers (STMDs) are commonly installed at the roof level and are generally tuned to the fundamental vibration mode of the structure. Although this approach can be effective in reducing response under certain conditions, its efficiency may decrease when higher vibration modes become significant or when the structure experiences strong nonlinear behavior during intense earthquakes. To address these limitations, multiple tuned mass dampers (MTMDs) have been introduced as an alternative strategy. By distributing several dampers along the height of the structure and tuning them over a range of frequencies, MTMD systems can provide broader and more reliable control performance. In this study, the seismic effectiveness of STMD and MTMD systems is investigated for a 14-story steel moment frame using Incremental Dynamic Analysis (IDA), with particular emphasis on the height-wise distribution of MTMDs based on the modal energy index of the first three vibration modes.

Methods

A two-dimensional, 14-story steel moment frame was numerically modeled using the OpenSees framework to capture its complex nonlinear seismic response. To evaluate the efficacy of different vibration control strategies, the structure was subjected to comparative analyses across seven distinct configurations: one uncontrolled model serving as a baseline, three models equipped

with single tuned mass dampers (STMDs) with mass ratios of 1%, 3%, and 5%, and three models utilizing multiple tuned mass dampers (MTMDs) with identical mass ratios. In the STMD configurations, the entire damper mass was concentrated at the roof level, tuned specifically to the fundamental mode. Conversely, the MTMD systems employed a height-wise distribution strategy, where the dampers were strategically placed along the building height based on the modal energy index to capture approximately 80% of the effective modal energy of the first three vibration modes. The seismic performance of these models was rigorously investigated through Incremental Dynamic Analysis (IDA), utilizing a set of 14 ground motion records, comprising 7 far-fault and 7 pulse-like near-fault earthquakes. The primary response indices assessed included roof displacement, interstory drift ratios, and base shear, alongside the generation of IDA and fragility curves. Structural collapse was precisely defined by two criteria: reaching a maximum interstory drift ratio of 5% or observing a significant degradation in the IDA curve slope to less than 20% of its initial value.

Results

The numerical results demonstrate that both STMD and MTMD systems effectively enhanced the seismic performance of the 14-story structure compared to the uncontrolled baseline. However, the MTMD configuration consistently outperformed the STMD in terms of median collapse capacity for equivalent mass ratios. Specifically, the median collapse intensity increased from 2.533 in the uncontrolled model to 3.482, 3.732, and 4.129 for STMD systems with mass ratios of 1%, 3%, and 5%, respectively. These values correspond to improvements of 37.5%, 47.4%, and 63% over the uncontrolled state. Notably, the MTMD system exhibited superior efficiency, achieving median collapse intensities of 3.765, 4.119, and 4.492 for the same mass ratios, respectively. These figures correspond to more significant improvements of 48.7%, 62.6%, and 77.4% over the uncontrolled state.

Regarding serviceability, MTMDs with 1% and 3% mass ratios provided greater reductions in roof displacement than their STMD counterparts. While the STMD at a 5% mass ratio demonstrated a marginally better reduction in roof displacement, the overall performance—especially concerning fragility curves—remained in favor of the distributed system. The fragility analysis confirmed that MTMDs substantially lowered the probability of damage-state exceedance across both Life Safety and Collapse Prevention performance levels. This underscores that effective seismic mitigation in high-rise structures is not merely dependent on damper mass but is fundamentally driven by the strategic height-wise distribution of dampers. By considering multiple vibration modes through this distributed approach, MTMDs offer a more robust mechanism for energy dissipation than traditional, roof-concentrated STMDs.

Conclusion

The findings of this study provide significant insights into the seismic control of high-rise steel frames, demonstrating that multiple tuned mass dampers (MTMDs) distributed along the structural height—strategically based on the modal energy index—offer superior effectiveness compared to a conventional single rooftop tuned mass damper (STMD). The comparative analysis reveals that MTMD systems not only significantly enhance the seismic capacity of the structure but also reduce critical structural responses and lower the probability of damage exceedance more efficiently than STMDs across various mass ratios. A key takeaway from this research is that simply increasing the total mass of the damping system at the roof level is insufficient for achieving optimal control. Instead, the results highlight that the strategic distribution of mass along the height and the simultaneous consideration of multiple vibration modes through frequency tuning are the most decisive factors in performance enhancement. This study confirms that MTMDs provide a much more robust defense against nonlinear seismic excitations by addressing higher-mode effects that STMDs often neglect. Consequently, MTMD configurations can be recommended as a highly reliable and

efficient passive control strategy for the seismic rehabilitation and advanced design of tall steel structures. Future research could further explore the optimization of these distribution patterns under various soil-structure interaction scenarios to refine their practical implementation.

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

During the preparation of this work, the authors used ChatGPT to improve the language, organization, and clarity of the manuscript. After using this tool, 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

First Author: Investigating, Methodology, data analyzing, writing original draft preparation.

Second Author: Design and supervision on experiments, reviewing and acknowledging the results and editing manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to all those who contributed to this research. The help provided during the modeling, analysis, and preparation of the manuscript is gratefully acknowledged.

مقایسه عملکرد لرزه ای قاب های خمشی فولادی ۱۴ طبقه با میراگرهای جرمی تنظیم شده منفرد و چندگانه با توزیع بر اساس اشکال مودی تحت تحلیل دینامیکی فزاینده

محمد روحانی^{۱*}، سید مهدی زهرائی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده عمران دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران



Citation: Rouhani, M., and Zahrai, M. (2026), "Comparative Seismic Performance of 14-Story Steel Moment-Resisting Frames Equipped with Single and Multiple Tuned Mass Dampers Distributed Based on Mode Shapes under Incremental Dynamic Analysis", *Journal of Steel & Structures*, 20(51), pp.120-138 (In Persian).

doi [10.22034/jss.2026.573111.1027](https://doi.org/10.22034/jss.2026.573111.1027)

چکیده

زمینه پژوهش: افزایش ایمنی لرزه ای و کاهش خسارات سازه های بلندمرتبه از اهداف اصلی مهندسی زلزله است. این پژوهش به بررسی عملکرد لرزه ای میراگرهای جرمی تنظیم شده منفرد و چندگانه در یک قاب خمشی فولادی ۱۴ طبقه می پردازد. هدف، مقایسه کارایی این دو آرایش در کاهش پاسخ دینامیکی سازه و ارزیابی تأثیر توزیع ارتفاعی میراگرهای چندگانه بر اساس شاخص انرژی مودال است.

روش پژوهش: یک قاب خمشی فولادی ۱۴ طبقه در حالات مختلف در محیط Opensees مدل سازی و تحت تحلیل دینامیکی فزاینده با ۱۴ رکورد زلزله (۷ رکورد دور از گسل و ۷ رکورد نزدیک گسل پالس دار) بررسی شده است. هفت مدل شامل سازه بدون میراگر، سه مدل با میراگر منفرد و سه مدل با میراگر چندگانه با نسبت های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد تحلیل شدند. پاسخ ها از نظر جابه جایی بام، دررفت بین طبقه ای، برش پایه و منحنی های شکنندگی مقایسه شدند.

یافته ها: نتایج نشان داد هر دو سیستم، عملکرد سازه را بهبود می بخشند؛ اما میراگر چندگانه در اغلب شاخص ها برتر از منفرد بود. بیش ترین شدت طیفی میانه شتاب در مدل با نسبت جرم ۵ درصد، مقدار $4/492/4/77$ افزایش نسبت به حالت بدون میراگر بود. همچنین، کاهش جابه جایی بام در مدل های دارای میراگر چندگانه (به ویژه در نسبت های ۱ و ۳ درصد) بیش تر از منفرد بود. منحنی های شکنندگی نیز نشان دادند میراگر چندگانه احتمال فراگذشت از سطوح خرابی را کاهش می دهد.

نتیجه گیری: استفاده از میراگر چندگانه با توزیع ارتفاعی مبتنی بر انرژی مودال، راهکاری مؤثرتر از میراگر منفرد برای بهبود عملکرد لرزه ای سازه های بلندمرتبه است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۹ بهمن ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۱ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۵ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۵ فروردین ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم شده

کنترل غیرفعال

میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه

منحنی شکنندگی

تحلیل دینامیکی فزاینده

سازه قاب خمشی فولادی

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mzahrai@ut.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده (گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

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



میراگر می‌تواند پاسخ سیستم را در برابر تحریک‌هایی با پهنای باند عریض کاهش دهد و عملکرد کنترل را نسبت به یک میراگر جرمی منفرد پایدارتر نماید [۵].

لی^۹ نیز در مطالعات خود نشان داد که میراگر جرمی چندگانه با توزیع مناسب فرکانس‌های طبیعی می‌تواند برای کاهش ارتعاشات سازه تحت شتاب زمین مؤثر باشد و پارامترهایی مانند فاصله فرکانسی، نسبت جرم، میرایی و تعداد میراگرها در عملکرد نهایی اثرگذار هستند [۶ و ۷]. این مطالعات نشان می‌دهند که طراحی میراگر جرمی چندگانه فقط به مقدار جرم کل وابسته نیست، بلکه نحوه پخش جرم، سختی، میرایی و فرکانس میان میراگرهای مختلف نیز اهمیت دارد.

در ادامه مطالعات نشان دادند که کاربرد میراگر جرمی منفرد و چندگانه در سازه‌های چنددرجه آزادی نیازمند توجه به ویژگی‌های مودال سازه است. سینگ^{۱۰} و همکاران طراحی میراگر جرمی برای کنترل پاسخ سازه‌های پیچشی را بررسی کردند و نشان دادند که مکان قرارگیری و ویژگی‌های مودال سازه می‌تواند بر کارایی کنترل، اثر قابل توجهی داشته باشد [۸].

وو^{۱۱} و چن^{۱۲} نیز با انجام آزمایش روی یک مدل سه طبقه نشان دادند که استفاده از چند میراگر جرمی می‌تواند پاسخ لرزه‌ای سازه را در آزمایش‌های میز لرزان کاهش دهد [۹].

از سوی دیگر، هوانگ^{۱۳} و همکاران، روابط و فرمول‌های کاربردی برای طراحی میراگر جرمی در کاربردهای لرزه‌ای ارائه کردند و نشان دادند که با افزایش نسبت جرمی، فرکانس تنظیم بهینه و میرایی بهینه نیز تغییر می‌کند [۱۰]. این نتایج اهمیت طراحی دقیق پارامترهای میراگر جرمی منفرد و چندگانه را در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها نشان می‌دهد.

یکی از محورهای مهم در توسعه میراگرهای جرمی چندگانه، توزیع ارتفاعی میراگرها در ساختمان‌های بلند و میان مرتبه است. در طراحی‌های ساده، میراگر جرمی منفرد معمولاً در بام نصب می‌شود، زیرا دامنه جابه‌جایی مود اول در این ناحیه بیشینه است. باین‌حال، در سازه‌های چندطبقه، به‌ویژه زمانی که پاسخ شتاب طبقات، زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای یا اثر مودهای بالاتر اهمیت داشته باشد، نصب همه میراگرها در بام الزاماً بهترین گزینه نیست. موان^{۱۴} مفهوم میراگر جرمی چندگانه توزیع شده عمودی را در ساختمان‌های بلند بررسی نمود و نشان داد که توزیع میراگرها در

افزایش ارتفاع، کاهش سختی جانبی مؤثر و استفاده از سیستم‌های سازه‌ای سبک‌تر موجب شده است که کنترل پاسخ دینامیکی سازه‌ها در برابر تحریک‌های لرزه‌ای به یکی از موضوعات مهم در مهندسی زلزله تبدیل شود. در سازه‌های چندطبقه، پاسخ لرزه‌ای تنها به جابه‌جایی بام محدود نیست، بلکه شاخص‌هایی مانند زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای^۱، شتاب طبقات، برش پایه، تمرکز تغییرشکل و احتمال عبور از سطوح عملکردی مختلف نیز در ارزیابی رفتار سازه اهمیت دارند. در این چارچوب، ادوات کنترل ارتعاشات، به‌ویژه ادوات غیرفعال، به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، جایگاه مهمی در کاهش پاسخ سازه‌ای پیدا کرده‌اند. مرورهای پایه‌ای در حوزه کنترل سازه نشان می‌دهند که ادوات اتلاف انرژی و میراگرها^۲ می‌توانند با افزایش میرایی مؤثر، پاسخ سازه را در برابر بارهای دینامیکی کاهش دهند [۱ و ۲].

در میان ادوات کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده^۳ یکی از شناخته شده‌ترین ابزارهای کاهش ارتعاشات است. مبنای عملکرد میراگر جرمی بر انتقال بخشی از انرژی ارتعاشی سازه اصلی به یک جرم ثانویه است که از طریق فنر به سازه متصل می‌شود. در طراحی کلاسیک، فرکانس این جرم ثانویه نزدیک به فرکانس مود هدف سازه تنظیم می‌شود تا در محدوده فرکانسی مشخصی، دامنه پاسخ سازه کاهش یابد. روابط پایه طراحی و تنظیم میراگر جرمی در مطالعات کلاسیک دن‌هارتوگ^۴ و واربرتن^۵ توسعه یافته‌اند و همچنان مبنای بسیاری از روش‌های طراحی اولیه این میراگر محسوب می‌شوند [۳ و ۴]. با وجود این، کارایی میراگر جرمی منفرد به شدت به دقت تنظیم فرکانسی وابسته است و در صورت تغییر مشخصات دینامیکی سازه، ورود سازه به رفتار غیرخطی یا تغییر محتوای فرکانسی تحریک، امکان افت عملکرد آن وجود دارد.

برای کاهش حساسیت فرکانسی میراگر جرمی منفرد، مفهوم میراگرهای جرمی چندگانه^۶ توسعه یافته است. در این رویکرد، به جای استفاده از یک جرم متمرکز، چند جرم کوچک‌تر با فرکانس‌ها، سختی‌ها و ضرایب میرایی متفاوت به سازه اضافه می‌شوند. ایگوسا^۷ و ژو^۸ نشان دادند که پخش فرکانسی چند

^۸ Xu^۹ Li^{۱۰} Singh^{۱۱} Wu^{۱۲} Chen^{۱۳} Hoang^{۱۴} Moon^۱ Drift^۲ Dampers^۳ Tuned Mass Damper^۴ Den Hartog^۵ Warburton^۶ Multiple Tuned Mass Damper^۷ Igusa

ارتفاع سازه می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در فضای بام، امکان کنترل بهتر مودهای بالاتر را فراهم کند [۱۱].

این دیدگاه در مطالعات جدیدتر نیز توسعه یافته است؛ به‌طوری‌که اخلاق‌پسند و زهرائی نشان دادند که استفاده از بیش از یک مود برای تنظیم و توزیع میراگر جرمی چندگانه می‌تواند در ساختمان‌های بلند به غلبه بر اثر مودهای بالاتر کمک کند [۱۲]. از طرف دیگر، تحلیل عملکرد میراگر در محدوده غیرخطی و در قالب شاخص‌های احتمالاتی اهمیت زیادی دارند. ونگ^۱ و هریس^۲ نشان دادند که استفاده از میراگر جرمی می‌تواند در سطوح پایین تحریک، توانایی سازه برای اتلاف انرژی و کاهش آسیب را افزایش دهد، اما در سطوح شدیدتر زلزله، به دلیل تغییر پیوند مؤثر سازه و ورود آن به رفتار غیرخطی، کارایی میراگر جرمی ممکن است کاهش یابد [۱۳]. این نتیجه برای سازه‌های مجهز به میراگر جرمی اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد ارزیابی عملکرد میراگر جرمی منفرد یا چندگانه فقط در محدوده خطی یا در یک سطح شدت زلزله کافی نیست و باید رفتار سازه در طیف وسیعی از شدت‌های لرزه‌ای بررسی شود. از این نظر، تحلیل دینامیکی فزاینده^۳ ابزار مناسبی برای ارزیابی تدریجی پاسخ سازه از سطوح کم‌شدت تا نزدیکی ناپایداری دینامیکی محسوب می‌شود [۱۴]. تحلیل دینامیکی فزاینده با مقیاس‌نمودن رکوردهای زلزله در سطوح مختلف شدت، امکان استخراج منحنی‌های پاسخ و بررسی ظرفیت لرزه‌ای سازه را فراهم می‌کند. وامواتسیکوس^۴ و کرنل^۵ این روش را به عنوان یک ابزار مهم در مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد معرفی کردند و نشان دادند که تحلیل دینامیکی فزاینده می‌تواند برای بررسی رابطه بین شدت زمین‌لرزه و معیارهای تقاضای مهندسی، مانند زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای یا جابه‌جایی، مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]. بنابراین، برای مقایسه عملکرد سازه بدون میراگر، سازه مجهز به میراگر جرمی منفرد و سازه مجهز به میراگر جرمی چندگانه، استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده نسبت به تحلیل تاریخیچه زمانی در یک سطح شدت مشخص، تصویر کامل‌تری از رفتار سازه ارائه می‌دهد.

نوع رکوردهای زلزله نیز در ارزیابی عملکرد میراگرهای جرمی اهمیت زیادی دارد. رکوردهای نزدیک گسل پالس‌دار، به دلیل وجود پالس‌های سرعت با دامنه زیاد و مدت‌زمان کوتاه

می‌توانند پاسخ سازه را به شکل متفاوتی نسبت به رکوردهای دور از گسل تحت تأثیر قرار دهند. علوی و کراوینکلر^۶ نشان دادند که سازه‌های قاب خمشی تحت رکوردهای نزدیک گسل می‌توانند الگوهای پاسخ متفاوتی نسبت به رکوردهای معمول داشته باشند [۱۵].

بیکر^۷ نیز روشی کمی برای شناسایی رکوردهای نزدیک گسل پالس‌دار بر اساس تحلیل موجک ارائه کرد که به یکی از مبانی مهم طبقه‌بندی رکوردهای پالس‌دار تبدیل شده است [۱۶]. همچنین شاهی و بیکر در چارچوب پایگاه داده غرب آمریکا^۸ اثر جهت‌داری و ویژگی‌های رکوردهای نزدیک گسل را در مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین بررسی نمودند [۱۷]. این مطالعات نشان می‌دهند که در ارزیابی عملکرد ادوات کنترل لرزه‌ای، تفکیک رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل پالس‌دار می‌تواند ضروری باشد.

مطالعات جدید نیز نشان می‌دهند که طراحی و بهینه‌سازی میراگر جرمی منفرد و چندگانه به سمت روش‌های چندهدفه، فراابتکاری و داده‌محور حرکت کرده است. آراز و همکاران عملکرد میراگرهای جرمی دوگانه در ساختمان چندطبقه را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه^۹ بررسی نمودند و نشان دادند که این امر می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای و طراحی بهینه میراگر اثر بگذارد [۱۸].

صبحانیان و همکاران نیز طراحی پارامترهای میراگر جرمی چندگانه را با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه و با لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک و سازه بررسی کردند [۱۹].

لین^{۱۰} و همکاران، بهینه‌سازی چندهدفه میراگر جرمی را تحت رکوردهای نزدیک گسل پالس‌دار مطالعه کردند و نشان دادند که انتخاب مناسب پارامتر می‌تواند چندین پاسخ بیشینه را به‌طور هم‌زمان کاهش دهد [۲۰]. این مطالعات نشان می‌دهند که در طراحی‌های جدید، هدف فقط کاهش جابه‌جایی بام نیست، بلکه کاهش هم‌زمان زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای، شتاب، جابه‌جایی و هزینه یا جرم میراگر مورد توجه قرار می‌گیرد.

در سال‌های اخیر، ادوات توسعه‌یافته‌تر مانند میراگر جرمی اینترتوردار^{۱۱}، دوگانه^{۱۲} و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین نیز

^۶ Krawinkler

^۷ Baker

^۸ NGA-West2

^۹ Soil-Structure Interaction

^{۱۰} Lin

^{۱۱} Tuned Mass Damper Inerter

^{۱۲} Double Tuned Mass Damper

^۱ Wong

^۲ Harris

^۳ Incremental Dynamic Analysis

^۴ Vamvatsikos

^۵ Cornell

مورد توجه قرار گرفته‌اند. الیاس و جرونی^۱، عملکرد میراگر جرمی اینترتدار را تحت رکوردهای نزدیک گسل پالس‌دار و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بررسی کردند و نشان دادند که ترکیب جرم، میرایی و مشخصات اینترت می‌تواند بر کاهش پاسخ سازه اثرگذار باشد [۲۱].

فو^۲ و همکاران، یک روش بهینه‌سازی ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای طراحی میراگر جرمی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه ارائه نمودند [۲۲].

همچنین زمانی و همکاران طراحی بهینه میراگرهای جرمی دوگانه را با استفاده از چند الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه فراابتکاری بررسی کردند و نشان دادند که انتخاب پارامترهای دینامیکی میراگر جرمی تنظیم‌شده دوگانه نقش مهمی در کاهش جابه‌جایی و شتاب سازه دارد [۲۳]. این مطالعات جدید بیانگر آن است که موضوع طراحی و مکان‌یابی میراگرهای جرمی همچنان فعال و در حال توسعه است.

با وجود پیشرفت‌های گسترده در زمینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده منفرد و چندگانه، چند خلأ پژوهشی همچنان قابل توجه است. ابتدا، بسیاری از مطالعات، میراگرهای جرمی را صرفاً بر اساس مود اول یا به صورت متمرکز در بام طراحی کرده‌اند، در حالی که در سازه‌های چندطبقه، پاسخ لرزه‌ای می‌تواند تحت تأثیر هم‌زمان مودهای اول، دوم و سوم قرار گیرد. دوم، اگرچه مطالعاتی درباره میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه توزیع‌شده عمودی وجود دارد، اما استفاده از یک شاخص ساده و قابل تفسیر مبتنی بر انرژی مودال ترکیبی برای تعیین طبقات مناسب نصب میراگرها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سوم، بسیاری از پژوهش‌ها عملکرد میراگرهای جرمی منفرد و چندگانه را در قالب تحلیل‌های تاریخیچه زمانی محدود بررسی کرده‌اند و کمتر به مقایسه سازه بدون میراگر، سازه مجهز به میراگر جرمی منفرد و سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه در قالب تحلیل دینامیکی فزاینده پرداخته‌اند. چهارم، اثر تفاوت رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل پالس‌دار بر عملکرد ادوات میراگر جرمی همچنان نیازمند بررسی بیش‌تر است.

بر این اساس، پژوهش حاضر عملکرد لرزه‌ای یک سازه ۱۴ طبقه را در هفت حالت کنترلی بررسی می‌کند. این حالات شامل سازه بدون میراگر، سازه مجهز به میراگر جرمی منفرد در بام با نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد، و سازه مجهز به میراگرهای جرمی چندگانه با نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد

است. در حالت چندگانه، توزیع ارتفاعی میراگرها بر اساس شاخص انرژی مودال ترکیبی مودهای اول، دوم و سوم انجام می‌شود. در این روش، برای هر طبقه شاخصی به صورت مجموع مربعات مؤلفه‌های مودال آن طبقه در مودهای منتخب تعریف می‌شود و طبقات دارای سهم بیش‌تر از انرژی مودال ترکیبی برای نصب میراگرها انتخاب می‌شوند. این روشی مناسب برای تعیین محل قرارگیری میراگرها است؛ زیرا طبقات منتخب صرفاً بر اساس جابه‌جایی مود اول انتخاب نمی‌شوند، بلکه نقش هم‌زمان مودهای بالاتر نیز در توزیع میراگرها وارد می‌شود.

برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، مدل سازه تحت ۱۴ رکورد زلزله شامل هفت رکورد دور از گسل و هفت رکورد نزدیک گسل پالس‌دار تحلیل می‌شود. منحنی‌های مربوط به تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از روش هانت-فیل^۳ استخراج شده و پاسخ سازه در سطوح مختلف شدت لرزه‌ای بررسی می‌شود. استفاده از منحنی‌های شکنندگی امکان ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه را فراهم می‌کند و می‌تواند نشان دهد که اضافه‌کردن میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد یا چندگانه تا چه اندازه احتمال عبور از سطح عملکردی مشخص را کاهش می‌دهد. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که منحنی‌های شکنندگی می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده تحت بارهای دینامیکی باشند [۲۴].

نوآوری اصلی این پژوهش در سه محور خلاصه می‌شود: در ابتدا، مقایسه میراگر جرمی منفرد و چندگانه در سه سطح نسبت جرمی؛ دوم، استفاده از شاخص انرژی مودال ترکیبی برای توزیع ارتفاعی میراگرها به جای اتکا به یک مود منفرد؛ و سوم، ارزیابی عملکرد سیستم‌ها در قالب تحلیل دینامیکی فزاینده تحت رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل پالس‌دار. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند درک روشن‌تری از اثر نسبت جرمی، توزیع مودال میراگرها و نوع رکورد زلزله بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگرهای جرمی ارائه دهد.

۲- مدل‌سازی و سازه‌های مورد مطالعه

۲-۱- مشخصات سازه‌ها

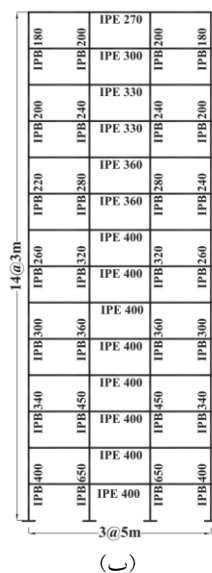
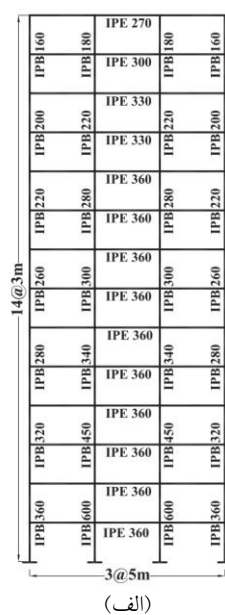
در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای میراگر جرمی تنظیم‌شده، از قاب خمشی فولادی ۱۴ طبقه برگرفته از مطالعه قربانی و رفوعی استفاده شده است [۲۵]. مدل مرجع شامل یک قاب خمشی فولادی دوبعدی با ۱۴ طبقه، سه دهانه مساوی و

^۳ Hunt and Fill

^۱ Djerouni

^۲ Fu

در این مطالعه، قاب‌های سازه‌ای در دو حالت طراحی ارائه شده‌اند. حالت اول، قاب طراحی شده بر اساس برش پایه کامل و حالت دوم، قاب طراحی شده بر اساس برش پایه کاهش یافته است. در پژوهش حاضر، مدل بدون میراگر بر پایه قاب F-۱۴ در نظر گرفته شده است. این مدل نماینده سازه فولادی ۱۴ طبقه طراحی شده بر اساس برش پایه کامل و بدون استفاده از ادوات کنترل لرزه‌ای است. در مقابل، مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد و میراگرهای جرمی چندگانه بر پایه قاب R-۱۴ ساخته شده‌اند که از نظر مقاطع اعضا، قاب F-۱۴ دارای مقاطع سنگین‌تری نسبت به قاب R-۱۴ است.



شکل ۱- (الف) سازه R-۱۴، (ب) سازه F-۱۴

ارتفاع یکنواخت طبقات است. عرض هر دهانه برابر ۵ متر و ارتفاع هر طبقه برابر ۳ متر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، عرض کل قاب برابر ۱۵ متر و ارتفاع کل سازه برابر ۴۲ متر است. همچنین برای قاب مورد بررسی، عرض بارگیر ۵ متر لحاظ شده است.

سازه‌های مورد استفاده در مقاله مرجع برای ناحیه لس‌آنجلس و بر روی خاک نوع D در نظر گرفته شده‌اند. بارهای ثقلی طبقات شامل بار مرده (kg/m^2) ۶۰۰ و بار زنده (kg/m^2) ۲۵۰ است. برای بام نیز بار مرده و زنده به ترتیب برابر (kg/m^2) ۵۵۰ و (kg/m^2) ۱۵۰ در نظر گرفته شده‌اند. تنش تسلیم فولاد در اعضای سازه‌ای برابر (kg/cm^2) ۲۴۰۰ فرض شده است. در مدل‌سازی مقاطع، از مقاطع IPB برای ستون‌ها و مقاطع IPE برای تیرها استفاده شده و مقاطع ستون‌ها در امتداد ارتفاع، به صورت مرحله‌ای در هر دو طبقه تغییر کرده‌اند. جزئیات مقاطع در شکل (۱) قابل مشاهده است.

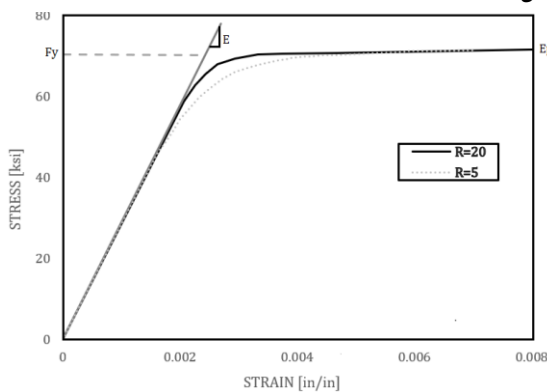
بر اساس ضوابط ASCE 7-16 برای سازه‌های مجهز به میراگر، در صورتی که این شرایط برقرار باشد، می‌توان برش پایه طراحی سیستم مقاوم جانبی را کاهش داد. (۱) سیستم میراگر باید شامل بیش از یک دستگاه میراگر در هر جهت برای مقاومت در برابر پیچش باشد، (۲) سیستم مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای نباید دارای بی‌نظمی‌های پیچشی شدید و طبقه نرم باشد. در صورت برآورده شدن این دو شرط، نیروی برشی پایه بزرگ‌تر محاسبه شده از معادلات زیر به عنوان حداقل نیروی برشی پایه، V_{min} ، در نظر گرفته می‌شود که در طراحی سیستم مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای استفاده خواهد شد: به همین دلیل، مدل‌های F-۱۴ و R-۱۴ به ترتیب نماینده قاب ۱۴ طبقه طراحی شده با برش پایه کامل و قاب ۱۴ طبقه طراحی شده با برش پایه کاهش یافته هستند.

$$V_{min} = V/B_{v+1} \quad (۱)$$

$$V_{min} = 0.75V \quad (۲)$$

که در آن (V) نیروی برشی پایه سازه معمول (قاب خمشی) در جهت مورد نظر است و پارامتر (B_{v+1}) به نسبت میرایی بستگی دارد که مجموع نسبت‌های میرایی ویسکوز ذاتی و اضافی است. از آنجایی که هدف این مطالعه ارزیابی کارایی میراگرها در کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب‌های سازه‌ای است، از معادله (۲) برای به دست آوردن حداقل نیروی برشی پایه طراحی استفاده می‌شود.

میراگر ناشی از ترکیب اثر ادوات کنترل و ویژگی‌های قاب کاهش یافته است.

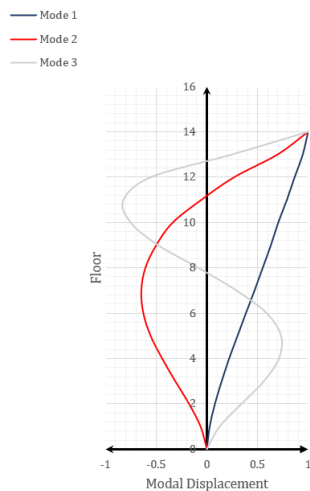


شکل ۲- رفتار مصالح Steel02 [۲۶]

در جدول (۱) نتایج صحت‌سنجی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل R-۱۴ تنها ۱/۷٪ و مدل F-۱۴ با ۲/۰۳٪ اختلاف در پریود مود اول، ۱/۴۸٪ و ۱/۲۸٪ اختلاف در درصد مشارکت جرمی مود اول دارند که نشان از دقت بالای مدل است.

۲-۲- آنالیز مودال

برای طراحی میراگرها و محاسبه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده، سازه R-۱۴ تحت آنالیز مودال قرار گرفته که می‌توان شکل نوسانی سه مود اول آن را در شکل (۳) مشاهده کرد.



شکل ۳- شکل نوسانی سه مود اول سازه

همچنین نتایج جابه‌جایی‌های مودی برای مود اول و دوم و سوم که بیش‌ترین درصدهای مشارکت وزنی را دارند در جدول (۲) نشان داده شده است.

مشخصات دینامیکی دو قاب F-۱۴ و R-۱۴ نیز با یکدیگر متفاوت است. مشخصات دینامیکی دو قاب در جدول (۱) به‌همراه مشخصات دینامیکی مدل صحت‌سنجی‌شده ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات دینامیکی سازه‌ها

مشخصه	سازه R-۱۴	سازه حاضر R-۱۴	سازه حاضر F-۱۴
پریود مود اول (s)	۲/۲۲	۲/۲۶	۱/۹۷
پریود مود دوم (s)	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۷۷
پریود مود سوم (s)	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۴۵
جرم مودی موثر مود اول (%)	۷۳/۳۷	۷۲/۲۸	۶۹/۷۸
جرم مودی موثر مود دوم (%)	۱۲/۰۸	۱۱/۷۵	۱۳/۷۷
جرم مودی موثر مود سوم (%)	۴/۶۸	۵/۱۵	۴/۹۵

در مدل‌سازی عددی، رفتار فولاد به‌صورت دوطبقی در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته فولاد برابر ۲۰۵/۹۴ گیگاپاسکال، تنش تسلیم برابر ۲۳۵/۳۶ مگاپاسکال و سخت‌شوندگی کرنشی برابر ۳ درصد سختی اولیه لحاظ شده است. به‌منظور مدل‌سازی مصالح فولادی از مصالح تک‌محوری فولاد ۱۰۲ استفاده شده که برای ساخت مصالح فولادی گیوفر و مگنتو و پیتو^۲ به‌کار می‌روند [۲۶]. می‌توان مدل رفتاری این مصالح را در شکل (۲) مشاهده کرد. تیرها و ستون‌ها با استفاده از المان‌های تیر-ستون غیرخطی با پلاستیسیته گسترده مدل شده‌اند. پای ستون‌ها در تراز پایه، گیردار فرض شده و برای اعمال صلبیت درون‌صفحه‌ای دیافراگم کف، گره‌های انتهایی تیرها در هر طبقه به یکدیگر مقید شده‌اند. همچنین میرایی رایلی با نسبت میرایی ۵ درصد برای دو مود اول سازه در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که استفاده از F-۱۴ برای مدل قاب خمشی ساده و R-۱۴ برای مدل‌های دارای میراگر، به این معنا است که مقایسه انجام‌شده صرفاً مقایسه یک قاب کاملاً یکسان در حالت با و بدون میراگر نیست؛ بلکه مقایسه میان یک قاب معمولی طراحی‌شده بر اساس برش پایه کامل و قاب‌های کنترل‌شده طراحی‌شده بر اساس برش پایه کاهش‌یافته است. بنابراین، در تفسیر نتایج باید توجه شود که بهبود عملکرد مدل‌های دارای

¹ UniaxialMaterial Steel02

² Giuffre-Menegotto-Pinto

$$K_d = M_d \omega_d^2 \quad (۴)$$

که (ω_d) مقدار فرکانس دورانی میراگر است که از رابطه (۵) استخراج می‌شود.

$$\omega_d = f_{opt} \omega_s \quad (۵)$$

که (f_{opt}) و (ω_s) به ترتیب نسبت فرکانسی بهینه و فرکانس دورانی سازه هستند و از روابط (۶) و (۷) استخراج می‌شوند:

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (۶)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \quad (۷)$$

که (T_s) نماینده نسبت پریود مود اول سازه که مود غالب سازه محسوب می‌شود، است. در نهایت با استفاده از رابطه (۸) مقدار (G_d) نیز محاسبه شده و کار طراحی میراگر جرمی منفرد به پایان می‌رسد.

$$G_d = 2\xi_{opt} M_d \omega_d \quad (۸)$$

که (ξ_{opt}) مقدار میرایی ویسکوز بهینه است که از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (۹)$$

بر این اساس، برای هر یک از نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد، جرم، سختی و ضریب میرایی میراگر منفرد محاسبه شده و در مدل‌سازی اعمال می‌شود. در تمامی این مدل‌ها، میراگر جرمی منفرد در تراز بام نصب شده است. دلیل این انتخاب، آن است که در مود اول، بیشینه جابه‌جایی جانبی معمولاً در طبقه بام رخ می‌دهد و نصب میراگر در این تراز، بیش‌ترین مشارکت را در کنترل پاسخ مود اول ایجاد می‌کند.

۳-۱-۲- طراحی میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه

در سیستم میراگرهای جرمی چندگانه، جرم کل میراگر به جای تمرکز در یک نقطه، بین چند میراگر کوچک‌تر توزیع می‌شود. این روش موجب کاهش حساسیت ابزار کنترل به یک فرکانس تنظیم‌شده منفرد شده و عملکرد میراگر را بهبود می‌بخشد.

جدول ۲- نتایج تحلیل مودال برای سه مود اول

طبقه	مود اول	مود دوم	مود سوم
۱	۰/۰۲۸	-۰/۰۶۳	۰/۱۲۵
۲	۰/۰۷۹	-۰/۱۷۷	۰/۳۴۱
۳	۰/۱۴۶	-۰/۳۱۳	۰/۵۶۳
۴	۰/۲۲۰	-۰/۴۴۳	۰/۷۱۲
۵	۰/۳۰۳	-۰/۵۵۷	۰/۷۳۴
۶	۰/۳۸۶	-۰/۶۲۹	۰/۵۹۲
۷	۰/۴۷۱	-۰/۶۴۹	۰/۲۹۴
۸	۰/۵۵۲	-۰/۶۰۹	-۰/۰۸۳
۹	۰/۶۳۲	-۰/۵۰۲	-۰/۴۸۰
۱۰	۰/۷۰۵	-۰/۳۳۸	-۰/۷۵۲
۱۱	۰/۷۹۱	-۰/۰۵۶	-۰/۸۲۳
۱۲	۰/۸۶۷	۰/۲۷۰	-۰/۵۵۳
۱۳	۰/۹۴۷	۰/۶۹۸	۰/۲۴۸
۱۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰

۳- میراگر جرمی تنظیم‌شده

۳-۱- طراحی میراگر

۳-۱-۱- طراحی میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد

برای طراحی میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد از روش **دن‌هارتوگ** استفاده شده است. در این حالت، کل جرم میراگر در یک تراز متمرکز شده و فرکانس آن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که با فرکانس مود غالب سازه، هم‌خوانی داشته باشد. از آن‌جاکه در سازه‌های چندطبقه، مود اول معمولاً بیش‌ترین سهم را در پاسخ جانبی سازه دارد، طراحی میراگر جرمی منفرد بر اساس مشخصات مود اول انجام شده است.

برای طراحی و مدل‌سازی میراگر جرمی منفرد نیاز به سه پارامتر (M_d) ، (K_d) و (G_d) است که به ترتیب نماینده جرم، سختی و میرایی میراگر هستند. در ادامه با استفاده از روابط کلاسیک **دن‌هارتوگ** این مقادیر محاسبه می‌شوند. برای محاسبه با استفاده رابطه (۳) این مقدار محاسبه می‌شود:

$$M_d = \mu M_s \quad (۳)$$

که (μ) و (M_s) به ترتیب نسبت جرمی میراگر و جرم کل سازه است. سپس با تکیه بر رابطه (۴) مقدار سختی میراگر محاسبه می‌شود:

$$\omega_c = f_{opt} \omega_{s,1} \quad (13)$$

که (ω_c) و $(\omega_{s,1})$ به ترتیب فرکانس مرکزی و فرکانس مود اول سازه هستند.

برای افزایش پهنای باند عملکردی میراگر جرمی چندگانه، فرکانس میراگرها در اطراف فرکانس مرکزی پخش می‌شوند. با فرض پارامتر β به عنوان پهنای باند فرکانسی، ضریب فرکانسی میراگر λ_m با نماد r_j در بازه زیر قرار می‌گیرد:

$$1 - \frac{\beta}{2} \leq r_j \leq 1 + \frac{\beta}{2} \quad (14)$$

در صورتی که ضرایب فرکانسی به صورت یکنواخت در این بازه توزیع شوند، مقدار ضریب فرکانسی میراگر λ_m از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_j = 1 - \frac{\beta}{2} + \frac{j-1}{N_d-1} \beta, j = 1, 2, \dots, N_d \quad (15)$$

بنابراین فرکانس میراگر λ_m برابر است با:

$$\omega_{d,j} = r_j \omega_c \quad (16)$$

و در ادامه مقادیر سختی و میرایی میراگر λ_m بر اساس جرم و فرکانس میراگر λ_m محاسبه می‌شوند. توجه شود که مقدار میرایی ویسکوز بهینه در تمامی میراگرها برای حفظ سازگاری میان مدل‌های مجهز به میراگر جرمی منفرد و چندگانه ثابت است.

۳-۲- چیدمان میراگر

در مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد کل جرم میراگر در تراز بام سازه قرار داده شده است. دلیل این انتخاب، آن است که در مود اول سازه، بیشینه جابه‌جایی جانبی در طبقات بالایی و به‌ویژه در بام رخ می‌دهد؛ بنابراین نصب میراگر منفرد در این تراز، بیش‌ترین اثر را در کنترل پاسخ مود غالب سازه ایجاد می‌کند. در مدل‌های دارای میراگرهای جرمی چندگانه، میراگرها در چند طبقه توزیع شده‌اند. انتخاب طبقات بر اساس شاخص انرژی مودال انجام شده است. در این روش، ابتدا مقدار شاخص انرژی مودال برای تمام طبقات محاسبه شده و سپس طبقات بر اساس مقدار این شاخص مرتب می‌شوند. طبقات منتخب به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که مجموع انرژی مودال تجمعی آن‌ها حدود ۸۰ درصد از انرژی مودال مؤثر سازه را پوشش دهد. به این ترتیب،

بنابراین، درحالی‌که میراگر جرمی منفرد عمدتاً برای کنترل یک مود خاص، معمولاً مود اول، طراحی می‌شود، سیستم میراگرهای جرمی چندگانه می‌تواند با توزیع جرم، سختی و فرکانس در چند طبقه، عملکرد مؤثرتری در کنترل پاسخ مودهای مختلف سازه داشته باشد.

در ادامه برای محاسبه پارامترهای میراگر جرمی چندگانه، مجدداً از روش کلاسیک **دن‌هارتوگ** استفاده شده است اما در محاسبه جرم، سختی و میرایی میراگرها تغییراتی شکل گرفته است. در این پژوهش برای توزیع جرم بین میراگرها از اساس شاخص انرژی استفاده شده است و متعاقباً برای محاسبه دیگر پارامترهای میراگر و تنظیم فرکانس‌ها از همین مقدار جرم استفاده شده است. در ادامه برای به‌دست‌آوردن جرم هر میراگر از رابطه (۱۰) استفاده شده است.

$$M_{d,j} = w_j M_{d,total} \quad (10)$$

که $(M_{d,j})$ جرم میراگر در طبقه λ_m و (w_j) وزن جرمی آن میراگر است. اگر I_j شاخص انرژی مودال طبقه λ_m باشد، وزن جرمی آن از رابطه (۱۱) بر اساس شاخص انرژی مودال همان طبقه تعیین می‌شود.

$$w_j = \frac{I_j}{\sum_{k=1}^{N_d} I_k} \quad (11)$$

که (N_d) تعداد میراگرها بوده و حاصل مخرج کسر فوق، مجموع انرژی مودال طبقات دارای میراگر است. همچنین مقدار شاخص انرژی طبقه λ_m از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$I_i = \phi_{i,1}^2 + \phi_{i,2}^2 + \phi_{i,3}^2 \quad (12)$$

که $(\phi_{i,1})$ ، $(\phi_{i,2})$ و $(\phi_{i,3})$ به ترتیب جابه‌جایی مودال طبقه λ_m در مود اول، دوم و سوم هستند. مقدار بیش‌تر شاخص انرژی در هر طبقه، نشان‌دهنده مشارکت بیش‌تر آن در پاسخ مودال ترکیبی سازه است. بنابراین طبقات دارای شاخص انرژی مودال بزرگ‌تر، مکان‌های مناسب‌تری برای نصب میراگرهای جرمی چندگانه محسوب می‌شوند.

برای طراحی فرکانسی میراگرها، ابتدا پارامتری تحت عنوان فرکانس مرکزی با استفاده از رابطه کلاسیک **دن‌هارتوگ** و بر اساس مود اول سازه تعیین می‌شود.

میراگرها در طبقاتی قرار می‌گیرند که بیش‌ترین سهم را در پاسخ مودال ترکیبی سازه دارند.

پس از تعیین طبقات منتخب، جرم کل میراگرها متناسب با وزن انرژی مودال بین میراگرهای نصب‌شده در طبقات مختلف توزیع شده است. به این ترتیب، برخلاف مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد که در آن کل جرم میراگر در بام متمرکز است، در مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه جرم و اثر کنترلی میراگر در چند تراز مختلف سازه پخش شده و امکان کنترل مؤثرتر پاسخ مودهای مختلف فراهم می‌شود.

۳-۳- مدل‌سازی میراگر

در این پژوهش، میراگرهای جرمی تنظیم‌شده در محیط Opensees به‌صورت جرم، فنر و میرایی مدل‌سازی شده‌اند. در این روش هر میراگر شامل یک جرم متمرکز، یک فنر و یک میراگر ویسکوز است که در راستای افقی سازه به طبقه مورد نظر متصل می‌شود.

برای مدل‌سازی هر میراگر، ابتدا در تراز طبقه محل نصب، یک گره کمکی به‌عنوان گره جرم میراگر تعریف شده است. این گره در همان تراز طبقه قرار دارد و جرم میراگر به‌صورت جرم متمرکز به درجه آزادی افقی آن اختصاص داده می‌شود. سپس این گره کمکی از طریق دو المان طول صفر^۱ به گره اصلی طبقه متصل می‌شود.

سختی میراگر با استفاده از مصالح الاستیک^۲ تعریف شده است. سختی این فنر برابر سختی طراحی شده میراگر بوده است. همچنین میرایی آن با استفاده از مصالح ویسکوز^۳ مدل شده و مقدار میرایی آن برابر میرایی طراحی شده میراگر بوده است.

همان‌طور که اشاره شده برای اتصال میراگر به سازه، از دو المان طول صفر در راستای افقی استفاده شده است. این المان‌ها بین گره سازه و گره جرم میراگر قرار گرفته‌اند و رفتار ترکیبی فنر و میراگر ویسکوز را در راستای افقی منتقل می‌کند به‌گونه‌ای که سختی میراگر با مصالح الاستیک به یکی از المان‌های طول صفر و میرایی آن به دیگری اختصاص داده شده است. در نتیجه، نیروی ایجادشده در میراگر تابعی از اختلاف جابه‌جایی و اختلاف سرعت بین طبقه سازه و جرم میراگر است.

در مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد، تنها یک گره جرم میراگر در تراز بام ایجاد شده و کل جرم میراگر به آن اختصاص

داده شده است. این گره از طریق فنر و میراگر ویسکوز به گره کنترل بام متصل شده است. بنابراین، میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد به‌صورت یک جرم ثانویه متصل به بام سازه مدل شده است. در مدل‌های دارای میراگرهای جرمی چندگانه، برای هر طبقه منتخب، یک گره جرم میراگر جداگانه تعریف شده است. جرم، سختی و ضریب میرایی هر میراگر بر اساس سهم جرمی و فرکانس تنظیم‌شده همان میراگر محاسبه و به گره و المان‌های مربوط به همان طبقه اختصاص داده شده است. به این ترتیب، در مدل مجهز به میراگر جرمی چندگانه جرم، فنر و میرایی مستقل در طبقات منتخب نصب شده‌اند که همگی به‌صورت هم‌زمان در پاسخ دینامیکی سازه مشارکت می‌کنند.

لازم به ذکر است که میرایی ذاتی سازه با استفاده از میرایی رایلی^۴ و بر اساس مودهای اصلی سازه مدل شده است، درحالی‌که میرایی میراگرها به‌صورت جداگانه و از طریق المان‌های ویسکوز خطی اعمال شده است. بنابراین، سهم میرایی ناشی از میراگرها با میرایی ذاتی سازه تداخل مستقیم ندارد و اثر میراگرها به‌صورت مستقل در معادلات حرکت سازه وارد می‌شود.

۴- نتایج

۴-۱- کلیات تحلیل و مدل‌های مقایسه‌شده

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی فزاینده و بررسی عملکرد لرزه‌ای مدل‌های مختلف سازه ارائه می‌شود. به‌منظور ارزیابی اثر میراگرهای جرمی تنظیم‌شده، هفت مدل شامل سازه بدون میراگر، سه مدل مجهز به میراگر جرمی منفرد و سه مدل مجهز به میراگرهای جرمی چندگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نسبت‌های جرمی میراگرها در مدل‌های کنترل‌شده برابر ۱، ۳ و ۵ درصد جرم مؤثر مودال سازه در نظر گرفته شده است. در مدل‌های مجهز به میراگر منفرد، کل جرم میراگر در تراز بام متمرکز شده است، درحالی‌که در مدل‌های مجهز به میراگر چندگانه جرم کل میراگرها بین چند طبقه منتخب و بر اساس شاخص انرژی مودال توزیع شده است. پاسخ لرزه‌ای مدل‌ها با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده ارزیابی شده و شاخص‌های اصلی شامل منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده، جابه‌جایی و زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای، برش پایه و منحنی‌های شکنندگی استخراج شده‌اند. معیار اصلی خرابی در تحلیل شکنندگی، رسیدن بیشینه زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای به مقدار ۵ درصد و یا شیب

⁴ Rayleigh

¹ Zerolength Element

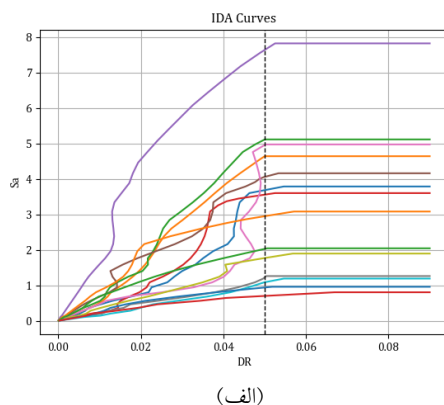
² UniaxialMaterial Elastic

³ Viscous Material

- (۱) ابتدا یک ضریب برای تحلیل انتخاب می‌شود و تحلیل انجام می‌شود.
- (۲) ضریب افزایش می‌یابد.
- (۳) شیب نمودار در هر مرحله ثبت و با شیب اولیه مقایسه می‌شود.
- (۴) در نقطه‌ای که واگرایی ثبت می‌شود کران بالا انتخاب می‌شود.
- (۵) مجدداً ضریب کاهش می‌یابد و تحلیل انجام می‌شود.
- (۶) ضریب تا قبل از کران بالا افزایش می‌یابد و تحلیل انجام می‌شود.
- (۷) در نقطه‌ای که ضریب فعلی با کران بالا از مقداری مشخص تجاوز کند تحلیل وارد فاز بعدی می‌شود.
- (۸) در این فاز ضریب کاهش می‌یابد تا نقاط خالی بین این کران‌ها پر شوند.
- (۹) در نهایت پس از رسیدن تحلیل به معیار خرابی، تحلیل متوقف می‌شود، بنابراین ادامه منحنی به صورت افقی یا صاف نمایش داده شده است و تا زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای برابر ۰/۰۹ ادامه داده شده است.

۳-۴- نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده

نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده مدل‌های مورد بررسی در شکل (۴) ارائه شده است. این شکل شامل منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده برای مدل بدون میراگر، مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد با نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد، و مدل‌های دارای میراگرهای جرمی چندگانه با نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد است. در تمام نمودارها، محور افقی نشان‌دهنده زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای و محور قائم نشان‌دهنده شدت مقیاس‌شده زلزله‌های زلزله است.



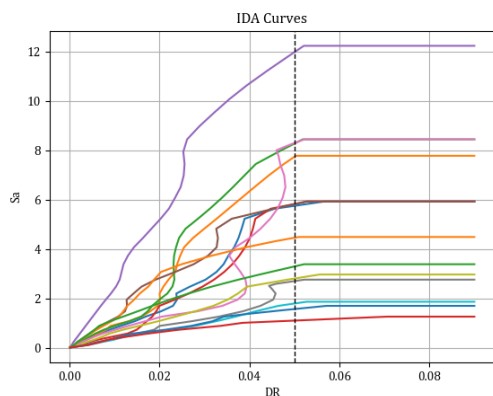
حاضر در هر مرحله تحلیل کمتر از ۲۰ درصد شیب ابتدایی در نظر گرفته شده است [۱۳]. در این پژوهش برای تحلیل دینامیکی فزاینده از ۱۴ رکورد زلزله، هفت رکورد دور از گسل و هفت رکورد نزدیک گسل پالس دار، به روش هانت-فیل استفاده شده است. همچنین رکوردها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که مدت زمان حرکت قوی زمین سه برابر پریود مود غالب سازه یا ۱۰ ثانیه باشد. مشخصات رکوردهای زلزله در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله

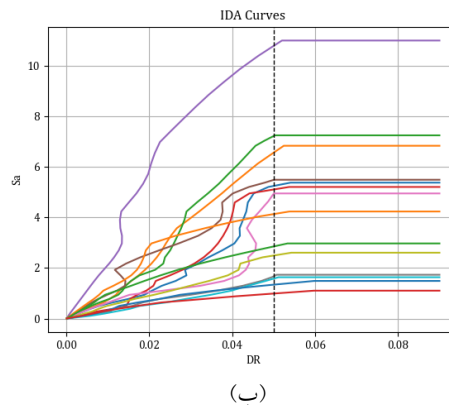
رخداد	نام ایستگاه	مدت زمان حرکت قوی (s)	بیشینه شتاب (g)
Imperial Valley	Delta	۵۰/۵۱	۰/۲۴
Kobe	Nishi-Akashi	۱۱/۲۵	۰/۴۶
Kobe	Shin-Osaka	۱۱/۵۹	۰/۲۳
Kocaeli	Duzce	۱۰/۸۵	۰/۳۶
Kocaeli	Arcelik	۱۱/۰۵	۰/۲۱
Landers	Yermo Fire Station	۱۸/۸۴	۰/۱۵
Loma Prieta	Capitola	۱۲/۱۵	۰/۵۱
Imperial Valley	El Centro Array	۱۱/۴۶	۰/۴۴
Irpinia	Sturmo	۱۵/۲۰	۰/۳۲
Superstition Hills	Parachute Test Site	۱۰/۵۷	۰/۴۳
Cape Mendocino	Petrolia	۱۶/۰۸	۰/۶۶
Landers	Lucerne	۱۳/۷۸	۰/۷۸
Kocaeli	Izmit	۱۳/۲۶	۰/۲۳
Chi-Chi	TCU065	۲۸/۵۵	۰/۷۸

۲-۴- روش هانت-فیل

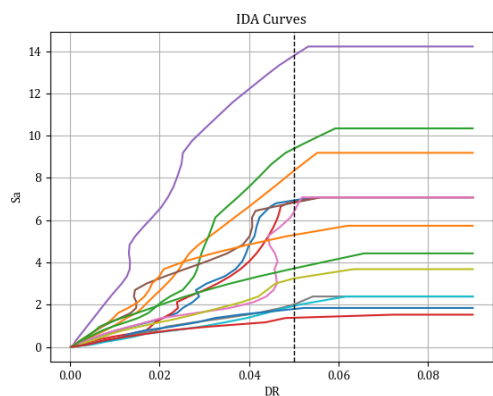
روش هانت-فیل سری یک الگوریتم تطبیقی برای ترسیم منحنی تحلیل دینامیکی فزاینده است که در آن سطوح شدت حرکت زمین به صورت از پیش تعیین شده انتخاب نمی‌شوند، بلکه هر تحلیل جدید بر اساس نتایج تحلیل‌های قبلی تعیین می‌شود [۲۷]. این روش ابتدا با افزایش تدریجی شدت، ناحیه تقریبی فروپاشی را شناسایی می‌کند؛ سپس با محدودسازی بازه بین پاسخ همگرا و واگرا، آستانه فروپاشی را با دقت بیش‌تری تعیین می‌کند؛ و در نهایت با افزودن نقاط جدید در بزرگ‌ترین فاصله‌های موجود، منحنی تحلیل دینامیکی فزاینده را کامل می‌کند. این رویکرد موجب کاهش تحلیل‌های غیرضروری می‌شود، اما به دلیل وابستگی ترتیبی مراحل، ماهیتی سری دارد. در ادامه مراحل اجرای این تحلیل توضیح داده شده است.



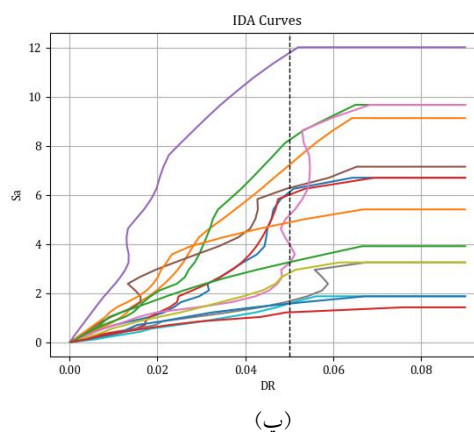
(ج)



(ب)



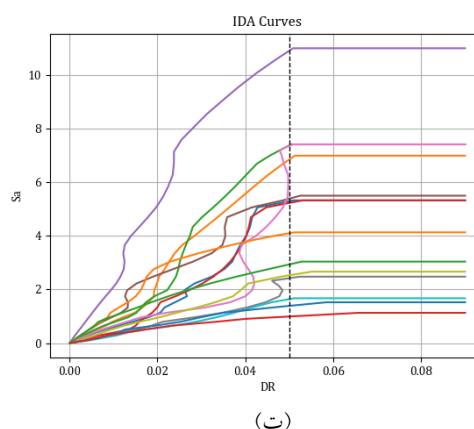
(ج)



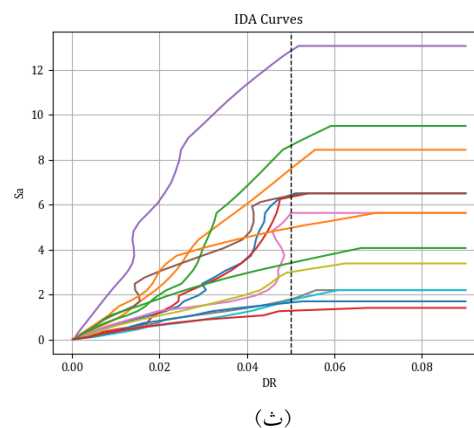
(ب)

شکل ۴- منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده مدل‌های مختلف سازه
 الف) سازه بدون میراگر، ب) سازه با میراگر منفرد با نسبت جرمی ۱ درصد،
 پ) سازه با میراگر چندگانه با نسبت جرمی ۱ درصد،
 ت) سازه با میراگر منفرد با نسبت جرمی ۳ درصد، ث) سازه با میراگر
 چندگانه با نسبت جرمی ۳ درصد، ج) سازه با میراگر منفرد با نسبت
 جرمی ۵ درصد، چ) سازه با میراگر چندگانه با نسبت جرمی ۵ درصد

بررسی شکل (۴) نشان می‌دهد که مدل بدون میراگر در مقایسه با سایر مدل‌ها در شدت‌های پایین‌تری به محدوده خرابی می‌رسد. یکی از معیارهای مقایسه برای این مسئله در این پژوهش شدت میانه رسیدن به حد خرابی است. شدت میانه رسیدن به حد خرابی به مقداری از شدت زلزله گفته می‌شود که در آن، ۵۰ درصد رکوردهای زلزله موجب رسیدن سازه به معیار خرابی زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای ۰.۵٪ می‌شوند. بنابراین، شدت میانه خرابی نشان‌دهنده مقدار میانه ظرفیت لرزه‌ای سازه بر اساس نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده است. شدت میانه رسیدن به حد خرابی برای مدل بدون میراگر برابر ۲/۵۳۳ به دست آمده است. با اضافه شدن میراگر جرمی تنظیم‌شده، منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده به‌طور کلی به سمت شدت‌های بالاتر منتقل شده‌اند که

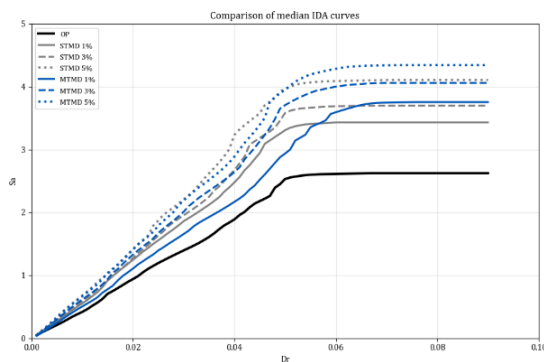


(ت)



(ث)

با نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد نشان می‌دهد. مطابق با این نمودار، منحنی مدل بدون میراگر به دلیل عدم بهره‌مندی از ابزارهای اتلاف انرژی، در شدت‌های لرزه‌ای پایین‌تری زاویه رانش نسبی بین طبقه‌های بزرگ‌تری را تجربه کرده است و کم‌ترین ظرفیت لرزه‌ای میانه را دارا است؛ درحالی‌که افزودن میراگرها با انتقال منحنی‌ها به سمت راست و بالا، بهبود ظرفیت لرزه‌ای سازه را به همراه داشته است. در این میان، اگرچه افزایش نسبت جرمی در مدل‌های منفرد همواره با بهبود گام‌به‌گام عملکرد همراه بوده و مدل مجهز به میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۵٪ نیز بالاترین ظرفیت لرزه‌ای میانه را ثبت کرده است، اما مقایسه مدل‌های مجهز به میراگر جرمی چندگانه با نسبت‌های جرمی ۱ و ۳ درصد رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که منحنی مدل مجهز به میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۱ درصد در زاویه رانش‌های نسبی بین طبقه‌های بزرگ‌تر، کمی بالاتر از مدل مجهز به میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۳ درصد قرار گرفته است. این پدیده را می‌توان به نحوه تنظیم فرکانس و اندرکنش غیرخطی میراگرهای چندگانه با سازه در تغییرشکل‌های بزرگ نسبت داد که در آن، توزیع جرمی سبک‌تر در مدل مجهز به میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۱ درصد عملکرد هماهنگ‌تر و مؤثرتری با مودهای ارتعاشی سازه تحت زلزله‌های شدید برقرار کرده و مانع از پدیده‌هایی نظیر خارج‌شدن میراگر از فاز بهینه در مقایسه با نسبت جرمی ۳٪ شده است.



شکل ۵- مقایسه منحنی‌های شدت طیفی میانه شتاب برای نمودارهای تحلیل دینامیکی فزاینده

۴-۴- ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه

۴-۴-۱- جابه‌جایی بام

برای ارزیابی عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده در کنترل تغییر مکان‌های سازه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، پاسخ جابه‌جایی بام سازه در سطح شدت لرزه ای بیشینه مربوط به هر رکورد برای آن رکورد مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این

نشان‌دهنده افزایش ظرفیت لرزه‌ای و تأخیر در رسیدن سازه به حد خرابی است.

در مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد، شدت میانه خرابی برای مدل‌های ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب برابر $3/482$ ، $3/732$ و $4/129$ است. بنابراین افزایش نسبت جرمی میراگر منفرد از ۱ به ۳ و سپس ۵ درصد موجب افزایش ظرفیت سازه شده است. این افزایش به ترتیب معادل $37/50$ ، $47/36$ و $63/03$ درصد نسبت به مدل بدون میراگر است. با این حال، روند افزایش ظرفیت کاملاً خطی نیست، زیرا در محدوده پاسخ غیرخطی، عملکرد میراگر تحت تأثیر ویژگی رکوردها، تغییر سختی مؤثر سازه و خروج نسبی سیستم از حالت تنظیم قرار می‌گیرد.

در مدل‌های دارای میراگرهای جرمی چندگانه نیز روند افزایش ظرفیت مشاهده می‌شود. شدت میانه خرابی برای مدل‌های دارای نسبت جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب برابر $3/765$ ، $4/119$ و $4/492$ به دست آمده است. این مقادیر نسبت به مدل بدون میراگر به ترتیب افزایش $48/65$ ، $62/63$ و $77/37$ درصدی را نشان می‌دهند. مقایسه مدل‌های هم‌جرم نشان می‌دهد که سازه‌های دارای میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه در همه نسبت‌های جرمی عملکرد بهتری نسبت به سازه‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد داشته است. به‌طور مشخص، ظرفیت مدل دارای میراگر چندگانه با درصد نسبت جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد نسبت به مدل دارای میراگر جرمی منفرد با نسبت جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد حدود $8/11$ ، $10/36$ و $8/80$ درصد بیش‌تر است.

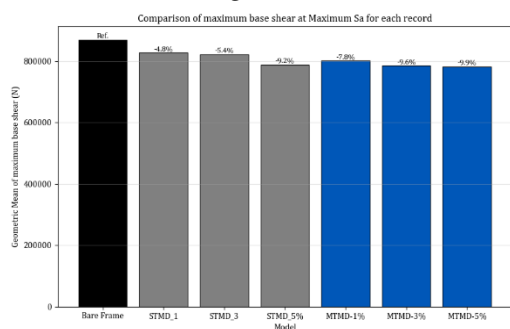
از نظر شکل کلی منحنی‌ها، مدل‌های دارای میراگر نسبت به مدل بدون میراگر در سطح شدت‌های بالاتری به دریافت ۵ درصد می‌رسند. همچنین افزایش نسبت جرمی موجب افزایش ظرفیت شده، اما تفاوت میان برخی مدل‌ها، مانند سازه دارای میراگر جرمی منفرد با نسبت جرمی ۳٪ و سازه دارای میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۱٪، یا سازه دارای میراگر جرمی منفرد با نسبت جرمی ۵٪ و سازه دارای میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۳٪، نسبتاً محدود است. این موضوع نشان می‌دهد که تنها افزایش جرم میراگر، تعیین‌کننده عملکرد نیست؛ بلکه نحوه توزیع جرم در ارتفاع سازه نیز نقش مهمی دارد. به همین دلیل، مدل مجهز به میراگر چندگانه با نسبت جرمی کم‌تر در برخی موارد عملکردی نزدیک به مدل مجهز به میراگر منفرد با نسبت جرمی بیش‌تر نشان داده است.

شکل (۵) روند تغییرات شدت طیفی میانه شتاب را بر حسب بیشینه زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای برای مدل بدون میراگر و مدل‌های مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم‌شده منفرد و چندگانه

پاسخ‌های مودال مختلف پخش شده و با وجود بهبود عملکرد کلی سازه، سهم کم‌تری به کاهش جابه‌جایی بام اختصاص می‌یابد. اگرچه در این نسبت جرمی و در شاخص جابه‌جایی بام، مدل دارای میراگر جرمی منفرد عملکرد اندکی بهتر (حدود ۱/۵٪) نسبت به مدل دارای میراگر جرمی چندگانه نشان می‌دهد، اما باید به دو نکته کلیدی توجه داشت؛ نکته اول آن است که ساخت و نصب یک میراگر جرمی منفرد غول‌پیکر با وزن ۵٪ کل سازه از نظر اجرایی با چالش‌های جدی همراه است، درحالی‌که میراگر جرمی چندگانه این جرم را به چندین میراگر کوچک‌تر تقسیم می‌کند. نکته دوم و مهم‌تر این است که همان‌طور که در نتایج بخش‌های ۲-۴ و ۴-۴ مشاهده می‌شود، مدل دارای میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۵٪ در کنترل دریافت طبقات و کاهش احتمال فراگذشت از حدود عملکردی، عملکرد بهتری از سایر مدل‌ها داشته است. این امر نشان می‌دهد اگرچه مدل دارای میراگر جرمی منفرد در کنترل جابه‌جایی مطلق بام (که عمدتاً تحت تأثیر مود اول است) موفق عمل کرده، اما میراگرهای جرمی چندگانه با پوشش طیف وسیع‌تری از فرکانس‌ها، در کنترل زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای سازه کارایی بهتری داشته است.

۴-۲-۴-۲- برش پایه سازه

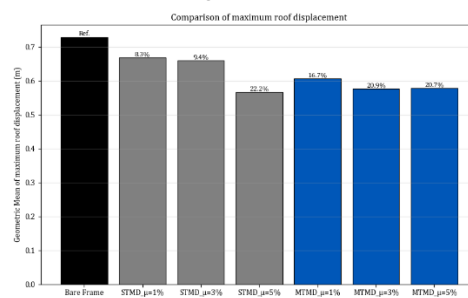
یکی از مسائل مهم در استفاده از میراگرهای جرمی، اطمینان از عدم افزایش برش پایه سازه به دلیل افزایش جرم توسط خود میراگر است. به همین دلیل، بیشینه برش پایه کل سازه برای تمامی رکوردها استخراج شده و میانگین هندسی آن‌ها در سطح شدت لرزه‌ای بیشینه مربوط به هر رکورد برای آن رکورد محاسبه شد. شکل (۷) درصد کاهش بیشینه برش پایه مدل‌های مختلف را نسبت به مدل بدون میراگر نشان می‌دهد.



شکل ۷- مقایسه و مقدار کاهش برش پایه سازه‌های مجهز به میراگر با سازه بدون میراگر

مطابق شکل (۷)، برخلاف برخی فرضیات سنتی که کاهش جابه‌جایی را همواره با افزایش برش پایه همراه می‌دانند، نصب

منظور، بیشینه تغییر مکان بام تحت هر یک از ۱۴ رکورد زلزله محاسبه شده و مقدار میانگین هندسی این پاسخ‌ها محاسبه شده است، سپس درصد کاهش جابه‌جایی بام برای هر مدل نسبت به سازه بدون میراگر محاسبه و در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه و مقدار کاهش جابه‌جایی بام سازه‌های مجهز به میراگر با سازه بدون میراگر

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، تمامی مدل‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد و چندگانه کاهش چشم‌گیری را در جابه‌جایی بام نشان می‌دهند. در نسبت جرمی ۱٪، مدل دارای میراگر جرمی منفرد با نسبت جرمی ۱ درصد توانسته است جابه‌جایی بام را به میزان ۸/۳٪ کاهش دهد، درحالی‌که مدل دارای میراگر جرمی چندگانه با توزیع فرکانسی مناسب، جابه‌جایی بام را به میزان ۱۶/۷٪ کنترل کرده است که تقریباً به اندازه دوبرابر عملکرد بهتری داشته است. روند مشابهی در نسبت جرمی ۳٪ نیز تکرار شده است به‌طوری‌که کاهش ۹/۴٪ در مدل دارای میراگر منفرد به ۲۰/۹٪ در مدل دارای میراگر چندگانه تبدیل شده است. این امر نشان‌دهنده برتری مطلق سیستم‌های چندگانه در نسبت‌های جرمی متداول است؛ چراکه میراگر جرمی چندگانه با پهن‌تر نمودن باند جذب انرژی، حساسیت سیستم به پدیده خروج از تنظیم را به شدت کاهش می‌دهد.

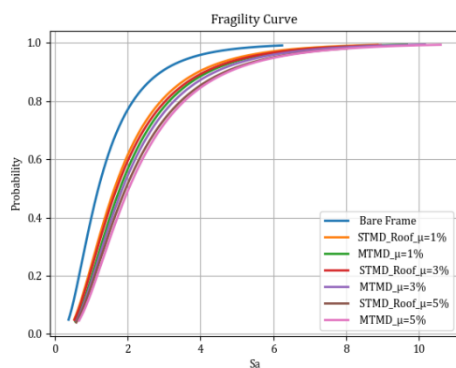
با افزایش نسبت جرمی به ۵٪، بیش‌ترین میزان کاهش جابه‌جایی بام در مدل مجهز به میراگر جرمی منفرد به میزان ۲۲/۲٪ رخ داده است، درحالی‌که این مقدار در مدل مجهز به میراگر چندگانه به مقدار ۲۰/۷٪ رسیده است. این مسئله را می‌توان به دو عامل نسبت داد: اولاً در سیستم منفرد تمام جرم میراگر در بام، یعنی محل بیشینه دامنه مود اول، متمرکز و فرکانس آن مستقیماً با مود غالب سازه تنظیم شده است؛ از این رو اثر بیش‌تری بر پاسخ موضعی بام دارد. دوم، در سیستم میراگر جرمی چندگانه، جرم کل میان چند واحد با فرکانس‌های تنظیم متفاوت توزیع می‌شود؛ بنابراین ظرفیت کنترل در بازه فرکانسی گسترده‌تر و میان

$$\beta = \sqrt{(1/i) \sum_1^i (\ln(Sa_i) - \mu)^2} \quad (19)$$

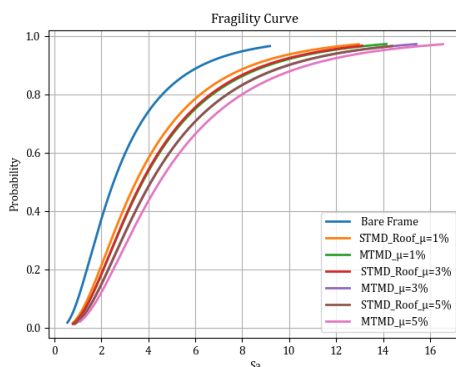
که (μ) مقدار میانگین لگاریتم طبیعی، (β) انحراف معیار لگاریتمی و (i) تعداد رکوردها است. پس از محاسبه پارامترهای لگ-نرمال، میانه توزیع آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود. همچنین پارامتر انتقال برای برازش به شکل استاندارد برابر صفر در نظر گرفته شده است. در نهایت منحنی‌های شکنندگی با برازش تابع توزیع لگ-نرمال بر نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده حاصل شده‌اند و احتمال فراگذشت از سطح عملکردی مورد نظر را در برابر شدت‌های مختلف طیفی نمایش می‌دهند.

$$P(DR \geq ds | Sa = x) = \phi\left(\frac{\ln(x/Sa)}{\beta}\right) \quad (20)$$

که (ds) مقدار زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای و (ϕ) تابع توزیع تجمعی نرمال است.



(الف)



(ب)

شکل ۸- نمودارهای شکنندگی؛ (الف) نمودار شکنندگی در سطح عملکردی ایمنی جانی، (ب) نمودار شکنندگی در سطح عملکردی آستانه فروریزش

میراگرهای جرمی در این سازه نه تنها برش پایه را افزایش نداده، بلکه در تمامی مدل‌ها منجر به کاهش آن شده است. همچنین با افزایش نسبت جرمی، میزان کاهش برش پایه در هر دو سیستم‌های مجهز به میراگر جرمی منفرد و چندگانه افزایش می‌یابد. در مدل‌های مجهز به میراگر جرمی منفرد، درصد کاهش از ۴/۸٪ برای نسبت جرمی ۱٪ به ۵/۴٪ برای نسبت جرمی ۳٪ و در نهایت به ۹/۲٪ برای نسبت جرمی ۵٪ می‌رسد. این درحالی است که برای سازه‌های مجهز به میراگر جرمی چندگانه در تمامی نسبت‌های جرمی عملکرد برتری نسبت به سیستم‌های منفرد هم‌وزن خود نشان داده‌اند. مدل‌های مجهز به میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب به درصد کاهش‌های ۷/۸٪، ۹/۶٪ و ۹/۹٪ رسیده‌اند.

مقایسه مدل‌های مجهز به میراگر جرمی منفرد و چندگانه با نسبت جرمی ۵ درصد در جابه‌جایی و برش پایه نشان می‌دهد که مدل مجهز به میراگر منفرد با تمرکز جرم بالا در یک فرکانس واحد، اگرچه در کاهش تغییر مکان مود اول (جابه‌جایی بام) بسیار موفق بوده (۲۲/۲٪)، اما به دلیل تمرکز نیروی اینرسی میراگر، کاهش برش پایه کم‌تری نسبت به مدل مجهز به میراگر چندگانه داشته است (۹/۲٪ در برابر ۹/۹٪). درواقع، مدل دارای میراگر جرمی چندگانه با نسبت جرمی ۵٪ با توزیع جرم در فرکانس‌های مختلف، نیروهای اینرسی اعمالی از سوی میراگرها را در زمان‌های متفاوتی به سازه وارد می‌کند که این عدم هم‌پوشانی فازها، منجر به کاهش بهتر نیروهای ضربه‌ای و در نتیجه کاهش بیش‌تر برش پایه سازه گشته است.

۴-۵- تحلیل نمودارهای شکنندگی و مقایسه نسبت جرمی

منحنی‌های شکنندگی برای دو سطح عملکردی «ایمنی جانی» و «آستانه فروریزش» در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. بر اساس ضوابط FEMA، بیشینه زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای برای این دو سطح مختص قاب خمشی فولادی و سازه‌های مجهز به ادوات کنترلی غیرفعال، به ترتیب برابر با ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است که برای ترسیم این نمودارها مقادیر شتاب طیفی در این مقادیر ثبت شده و سپس لگاریتم طبیعی آن‌ها با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شده است. در ادامه پارامترهای لگ-نرمال رابطه (۱۷) از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند.

$$Y_i = \ln(Sa) \quad (17)$$

$$\mu = (1/i) \sum_1^i \ln(Sa_i) \quad (18)$$

در مقایسه با افزایش جرم در سیستم‌های منفرد برای کاهش ریسک لرزه‌ای سازه است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی ۱۴ طبقه تحت اثر ۱۴ رکورد زلزله (حوزه نزدیک و دور) با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده منفرد و چندگانه با نسبت‌های جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده و لحاظ نمودن معیار خرابی (زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای برابر ۵٪ یا کم‌تر شدن شیب نمودار تحلیل دینامیکی فزاینده در هر مرحله از ۲۰٪ شب اولیه)، نتایج به شرح زیر است:

- تحلیل‌ها نشان داد که افزودن میراگرها منجر به انتقال منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده به سمت شتاب‌های بالاتر و افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه شده است. شدت میانه خرابی برای سازه بدون میراگر برابر ۲/۵۳۳ به دست آمد که با افزودن میراگرها به طور قابل توجهی افزایش یافت. این افزایش ظرفیت در مدل‌های دارای میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد از ۳۷/۵۰٪ برای مدل با نسبت جرمی ۱٪ تا ۶۳/۰۳٪ برای مدل با نسبت جرمی ۵٪ و در مدل‌های دارای میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه از ۴۸۵/۶۵٪ برای مدل با نسبت جرمی ۱٪ تا ۷۷/۳۷٪ برای مدل با نسبت جرمی ۵٪ نسبت به سازه مرجع متغیر بود.

- مقایسه مدل‌های دارای میراگر با نسبت جرمی یکسان نشان داد که میراگر جرمی چندگانه در تمامی نسبت‌های جرمی، عملکردی به مراتب بهتر از میراگرهای جرمی منفرد دارند. به طور مشخص، افزایش ظرفیت سازه‌های مجهز میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه نسبت به منفرد با همان نسبت جرمی، حدود ۸/۱۱٪ (در نسبت جرمی ۱٪)، ۱۰/۳۶٪ (در نسبت جرمی ۳٪) و ۸/۸۰٪ (در نسبت جرمی ۵٪) برآورد شد. این برتری نشان می‌دهد که توزیع جرم در ارتفاع سازه (بر اساس شاخص انرژی مودال) نسبت به تمرکز کل جرم در تراز بام، تأثیر بسیار موثرتری در کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای دارد.

- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنها افزایش جرم میراگر لزوماً بهترین راهکار برای بهسازی نیست، بلکه نحوه توزیع جرم و تنظیم فرکانسی میراگرها نقش مهمی در کنترل پاسخ‌ها دارند. استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه به دلیل توزیع هوشمندانه جرم و اثرات اتلاف انرژی در بازه فرکانسی وسیع‌تر، به عنوان راهکار مناسبی برای سازه‌های بلندمرتبه برای کنترل زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای و کاهش احتمال خرابی لرزه‌ای پیشنهاد می‌شود.

مطابق با نتایج به دست آمده، تمامی مدل‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده، فارغ از نوع توزیع آن‌ها و نسبت جرمی، موجب انتقال منحنی شکنندگی به سمت راست نسبت به مدل بدون میراگر شده‌اند. این جابجایی به معنای کاهش احتمال فراگذشت در یک شدت زلزله ثابت و در نتیجه افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه است. در سطح عملکردی ایمنی جانی، همه میراگرها به ویژه در شدت‌های پایین و متوسط، نقش مؤثری در کاهش احتمال آسیب‌های سازه‌ای دارند؛ درحالی‌که در سطح آستانه فروریزش، به دلیل ورود سازه به ناحیه رفتار غیرخطی شدید، برتری مدل‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه نسبت به مدل‌های دارای میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد قابل درک‌تر است. این برتری را می‌توان به توزیع فرکانسی و پایداری بیش‌تر سیستم‌های چندگانه در کنترل پاسخ سازه تحت زلزله‌های شدید نسبت داد. در هر دو سطح عملکردی، مدل مجهز به میراگر چندگانه با نسبت جرمی ۵٪ بیش‌ترین فاصله را از مدل بدون میراگر داشته و عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

با بررسی دقیق‌تر در منحنی‌های شکنندگی، می‌توان مشاهده نمود که در سطح ایمنی جانی و در شدت شتاب طیفی برابر با ۲g، احتمال فراگذشت مدل بدون میراگر از زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای ۰/۲۵٪ حدود ۷۷٪ است؛ درحالی‌که این مقدار برای مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد و چندگانه با نسبت جرمی ۵٪ به ترتیب به حدود ۵۱٪ و ۴۷٪ کاهش می‌یابد. بنابراین در این سطح عملکردی احتمال فراگذشت مدل‌های دارای میراگر جرمی منفرد و چندگانه با نسبت جرمی ۵٪ از زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای ۰/۲۵٪ نسبت به مدل بدون میراگر به ترتیب حدود ۳۳٪ و ۳۹٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین در سطح آستانه فروریزش و در شدت شتاب طیفی برابر با ۴g مدل بدون میراگر، دارای احتمال فراگذشت حدود ۷۸٪ از زاویه رانش نسبی بین طبقه‌ای ۰/۵٪ است؛ درحالی‌که با استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد با نسبت جرمی ۵٪، این احتمال به حدود ۴۸٪ و با استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه با همان نسبت جرمی به حدود ۴۳٪ کاهش می‌یابد که نشان از کاهش به ترتیب ۳۸٪ و ۴۵٪ درصدی نسبت به مدل بدون میراگر دارند. نکته حائز اهمیت آن است که در هر دو سطح عملکردی، مدل دارای میراگر چندگانه با نسبت جرمی ۱٪ عملکردی بسیار نزدیک و گاهی برتر از مدل دارای میراگر جرمی منفرد با نسبت جرمی ۳٪ نشان داده است؛ موضوعی که بیانگر اهمیت نحوه توزیع جرم میراگر و کارایی میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه با توزیع در ارتفاع سازه

- [15] Alavi, B., and Krawinkler, H. (2004), "Behavior of Moment-Resisting Frame Structures Subjected to Near-Fault Ground Motions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(6), pp.687-706.
- [16] Baker, J.W. (2007), "Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), pp.1486-1501.
- [17] Shahi, S.K., and Baker, J.W. (2014), "NGA-West2 Models for Ground-Motion Directionality", *Earthquake Spectra*, 30(3), pp.1285-1300.
- [18] Araz, O., Elias, S., and Kablan, F. (2023), "Seismic-Induced Vibration Control of a Multi-Story Building with Double Tuned Mass Dampers Considering Soil-Structure Interaction", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 165, pp.107654.
- [19] Sobhanian, R., Sabouri, J., and Dabiri, R. (2024), "Optimal parameter design of multiple tuned mass damper for tall buildings using multi-objective particle swarm optimization algorithm considering soil-structure interaction effects", *Cadernos de Educação Tecnologia e Sociedade*, 17(3), pp.216-230.
- [20] Lin, Y., and Liu, T. (2024), "Seismic Vibration Control and Multi-Objective Optimization of Transmission Tower with Tuned Mass Damper under Near-Fault Pulse-Like Ground Motions", *Buildings*, 14(11), pp.3572.
- [21] Elias, S., and Djerouni, S. (2024), "Optimum Tuned Mass Damper Inerter under Near-Fault Pulse-Like Ground Motions of Buildings Including Soil-Structure Interaction", *Journal of Building Engineering*, 85, pp.108674.
- [22] Fu, B., Liu, X., and Chen, J. (2024), "Machine Learning-Based Hybrid Optimization Method for Tuned Mass Damper Considering Seismic Soil-Structure Interaction", *Journal of Earthquake Engineering*, 28, pp.3410-3439.
- [23] Zamani, F., Alavi, S.H., Mashayekhi, M., and Hosseini, M. (2025), "Optimum Design of Double Tuned Mass Dampers Using Multiple Metaheuristic Multi-Objective Optimization Algorithms under Seismic Excitation", *Frontiers in Built Environment*, 11, pp.1559530.
- [24] Pozos-Estrada, A., Martin del Campo-Preciado, J. O. and Pozos-Estrada, O. (2024), "Fragility Curves of a Slender Structure Fitted with Tuned Mass Dampers Subjected to Turbulent Wind and Seismic Loading", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 25(4), pp.1-15.
- [25] Ghorbani, H.R., and Rofooei, F.R. (2020), "A Novel Double Slip Loads Friction Damper to Control the Seismic Response of Structures", *Engineering Structures*, 225, pp.111273.
- [26] Filippou, F. C., Popov, E.P. and Bertero, V.V. (1983), "Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints", Report EERC 83-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [27] Vamvatsikos, D. (2011), "Performing incremental dynamic analysis in parallel", *Computers & Structures*, 89(1-2), pp.170-180.
- [1] Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T.P. (1997), "Structural Control: Past, Present, and Future", *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), pp.897-971.
- [2] Soong, T.T., and Dargush, G.F. (1997), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons.
- [3] Den Hartog, J.P. (1956), "Mechanical Vibrations", 4th Edition, McGraw-Hill.
- [4] Warburton, G.B. (1982), "Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(3), pp.381-401.
- [5] Igusa, T., and Xu, K. (1994), "Vibration Control Using Multiple Tuned Mass Dampers", *Journal of Sound & Vibration*, 175(4), pp.491-503.
- [6] Li, C. (2000), "Performance of Multiple Tuned Mass Dampers for Attenuating Undesirable Oscillations of Structures under the Ground Acceleration", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(9), pp.1405-1421.
- [7] Li, C. (2002), "Optimum Multiple Tuned Mass Dampers for Structures under the Ground Acceleration Based on DDMF and ADMF", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(4), pp.897-919.
- [8] Singh, M.P., Singh, S., and Moreshchi, L.M. (2002), "Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(4), pp.749-769.
- [9] Chen, G., and Wu, J. (2003), "Experimental Study on Multiple Tuned Mass Dampers to Reduce Seismic Responses of a Three-Storey Building Structure", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(5), pp.793-810.
- [10] Hoang, N., Fujino, Y., and Warnitchai, P. (2008), "Optimal Tuned Mass Damper for Seismic Applications and Practical Design Formulas", *Engineering Structures*, 30(3), pp.707-715.
- [11] Moon, K.S. (2010), "Vertically Distributed Multiple Tuned Mass Dampers in Tall Buildings: Performance Analysis and Preliminary Design", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19(3), pp.347-366.
- [12] Akhlagh Pasand, A., and Zahrai, S.M. (2024), "Seismic Control of Tall Buildings Using Vertically Distributed Multiple Tuned Mass Dampers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 33(3), pp.2123.
- [13] Wong, K.K.F., and Harris, J.L. (2012), "Seismic Damage and Fragility Analysis of Structures with Tuned Mass Dampers Based on Plastic Energy", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(4), pp.296-310.
- [14] Vamvatsikos, D., and Cornell, C.A. (2002), "Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), pp.491-514.