



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Introduction and evaluation of a simple and accessible control strategy for seismic-excited structures: Ridge-Isolated Tuned Mass Damper

Sadegh Etedali^{*1}

1- Associate Professor, Faculty of Mining, Civil and Chemical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

ABSTRACT

A novel seismic control system, referred to as Ridge-Isolated Tuned Mass Damper (RITMD) is introduced; combined of the features of a Tuned Mass Damper (TMD) and seismic isolation. In RITMD, the building's ridge acts as a secondary oscillator, and the installation of seismic isolators at the ridge level allows for large displacements. Instead of transferring the entirety of seismic energy to the main structure, a significant portion is diverted to the ridge, which effectively reduces the building's seismic vibrations. To evaluate the performance of the RITMD system, a five-story steel moment-resisting frame was subjected to nonlinear dynamic analysis under two far-field (El Centro and Hachinohe) and two near-field (Kobe and Northridge) earthquakes. Initial modeling was conducted in ETABS, and nonlinear analyses were carried out using SeismoStruct. Results indicated that implementing the RITMD system significantly reduced seismic responses, including story displacements, accelerations, inter-story drifts, and base shear. Specifically, in the El Centro earthquake, story displacements were reduced by up to 36.71%, accelerations by 38.55%, and drifts by 36.71%. In the Kobe earthquake, these reductions were 14.90%, 17.30%, and 17.51%, respectively. On average, the system achieved reductions of 20% in displacements, 15% in accelerations, 18% in drifts, and 20% in base shear. With its applicability to both new and existing structures, low cost, quick implementation, and effective performance, the RITMD system represents a practical solution for enhancing seismic safety in buildings.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 May 2025
Revise Date: 01 September 2025
Accept Date: 27 September 2025

Keywords:

*Seismic control of structures
Tuned mass damper
Seismic isolation
Ridge-isolated TMD
Seismic evaluation*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.517661.3701>

^{*}Corresponding author: Sadegh Etedali
Email address: etedali@birjandut.ac.ir

معرفی و ارزیابی یک طرح کنترلی ساده و در دسترس برای سازه‌های در معرض زلزله: میراگر جرمی تنظیمی جداشده در خرپشته

صادق اعتدالی*

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در این پژوهش، سامانه‌ای نوین برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها با عنوان *RITMD* معرفی شده که ترکیبی از میراگر جرمی تنظیم‌شده و جداسازهای لرزه‌ای است. در این طرح، خرپشته ساختمان به‌عنوان نوسانگر فرعی عمل کرده و با نصب جداساز در طبقه خرپشته، امکان جابه‌جایی‌های بزرگ فراهم می‌شود. انرژی لرزه‌ای به‌جای انتقال کامل به سازه، به خرپشته منتقل شده و موجب کاهش مؤثر ارتعاشات سازه می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد سامانه، یک قاب خمشی فولادی پنج‌طبقه تحت چهار رکورد زلزله معروف شامل دو زلزله دور از گسل (ال سنتر و هاچینو) و دو زلزله نزدیک گسل (کوبه و نورت ریج) مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت. مدل‌سازی اولیه در نرم‌افزار *ETABS* و تحلیل‌های غیرخطی در محیط *SeismoStruct* صورت گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که پیاده‌سازی سامانه *RITMD* منجر به کاهش مؤثری در پاسخ‌های لرزه‌ای قاب شامل جابه‌جایی‌های طبقات، شتاب‌ها، دررفت و برش پایه شده است. نتایج نشان داد که در زلزله ال سنتر، جابه‌جایی طبقات تا ۳۶.۷۱٪، شتاب طبقات تا ۳۸.۵۵٪ و دررفت طبقات تا ۳۶.۷۱٪ کاهش یافته است. همچنین، در زلزله کوبه، این مقادیر به ترتیب تا ۱۴.۹۰٪، ۱۷.۳۰٪ و ۱۷.۵۱٪ کاهش یافتند. به‌طور میانگین، سامانه *RITMD* موجب کاهش ۲۰٪ در جابه‌جایی طبقات، ۱۵٪ در شتاب، ۱۸٪ در دررفت و ۲۰٪ در برش پایه شد. این روش با قابلیت اجرا در سازه‌های جدید و موجود، هزینه پایین، پیاده‌سازی سریع و عملکرد مؤثر، راهکاری کاربردی برای بهبود ایمنی لرزه‌ای سازه‌ها به شمار می‌رود.

کلمات کلیدی: کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، میراگرهای جرمی تنظیم شده، جداساز لرزه‌ای، میراگر جرمی تنظیمی جداشده در خرپشته، ارزیابی لرزه‌ای

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین
۱۴۰۴/۰۲/۲۰	۱۴۰۴/۰۶/۱۰	۱۴۰۴/۰۷/۰۵	۱۴۰۵/۰۲/۳۱
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.517661.3701		
*نویسنده مسئول:		صادق اعتدالی	
پست الکترونیکی:		etedali@birjandut.ac.ir	

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های کنترل لرزه‌ای به منظور بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر نیروهای دینامیکی نظیر زلزله و باد، به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در میان این سامانه‌ها، سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگر جرمی تنظیم‌شده^۱ یا به اختصار TMD و جداسازی پایه^۲، به دلیل ساختار ساده و عملکرد مؤثر، کاربرد زیادی یافته‌اند.

سامانه TMD که معمولاً بر رو بام ساختمان نصب می‌شود، شامل یک جرم، فنر و میراگر است و با کاهش پاسخ مود اول سازه، به بهبود رفتار لرزه‌ای آن کمک می‌کند. استراتژی به کاررفته در این سامانه بر مبنای انتقال انرژی از سازه اصلی به یک نوسانگر فرعی است که در نتیجه آن بخش زیادی از انرژی ورودی زلزله توسط این ابزار اتلاف می‌شود [۱]. مطالعات و بررسی‌های زیادی به بررسی رفتار میراگرهای جرمی تنظیم‌شده و نحوه کارکرد آن بر روی ساختمان‌ها برای کنترل ارتعاشات ناشی از بارهای جانبی نظیر باد و زلزله انجام شده است. TMD با اثرگذاری بر روی مود اول سازه، سبب کاهش دامنه پاسخ‌های لرزه‌ای می‌گردد و معمولاً آن را بر روی طبقه فوقانی ساختمان نصب می‌کنند. طراحی و تنظیم پارامترهای سامانه TMD به طور مستقیم بر عملکرد آن تأثیرگذار است. به همین دلیل، تحقیقات بسیاری در زمینه طراحی این سامانه انجام شده است. برای مثال، جانگید و باکر [۲] روابط ریاضی خاصی را برای طراحی TMD ارائه دادند. لئونگ و ژانگ [۳] با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، طراحی بهینه آن را برای سامانه‌های یک درجه آزادی تحت اغتشاشات نویزی و هارمونیک بررسی کردند. همچنین مارانو و همکاران [۴] و سایر پژوهشگران [۵-۸] به بررسی نسبت جرم مناسب و ارائه روابط طراحی پرداختند. باین‌حال، هم‌فرکانسی TMD با مود اول سازه و احتمال تحریک مودهای بالاتر در زلزله می‌تواند عملکرد سامانه را تحت تأثیر قرار دهد [۹].

جداسازهای پایه به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله در حفاظت از سازه‌های حیاتی و حساس نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای، بیمارستان‌ها، مراکز داده و صنایع پیشرفته، مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین حفظ یکپارچگی ساختار سازه با کاهش جابه‌جایی بین طبقه‌ای از اهداف اصلی استفاده از شیوه‌های جداسازی لرزه‌ای است که به همراه آن کاهش قابل توجه شتاب طبقات حاصل می‌شود. به کارگیری این روش برای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود مستلزم صرف هزینه‌های زیاد برای جاسازی جداسازها در تراز پایه است [۱۰]. باین‌حال بهره‌گیری از این روش به دلیل بومی نبودن فناوری ساخت آن و هزینه‌های هنگفت واردات این فناوری هنوز به طور گسترده‌ای در ایران مورد استقبال قرار نگرفته است. همچنین به کارگیری آن‌ها در طرح لرزه‌ای یک سازه مستلزم به کارگیری تعداد زیادی جداساز لرزه‌ای (به تعداد ستون‌های سازه) است که طرح لرزه‌ای را هزینه‌بر خواهد کرد. در حوزه جداسازهای پایه، اگرچه مطالعات پارامتریک گسترده‌ای انجام شده، باین‌حال دستیابی به عملکرد مناسب نیازمند حل مسائل عددی پیچیده و مبتنی بر شناخت دقیق سیستم است. مطالعاتی مانند تحقیقات جانگید [۱۱-۱۲]، هوآنگ و همکاران [۱۳]، اعتدالی و همکاران [۱۴] به طراحی بهینه این سامانه‌ها پرداخته‌اند. همچنین نیگدلی و همکاران [۱۵] و کمال‌زارع و همکاران [۱۶] الگوریتم‌هایی را برای تخمین سریع و دقیق پارامترهای جداساز در شرایط لرزه‌ای مختلف توسعه داده‌اند. یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد جداسازهای لرزه‌ای، عملکرد آن‌ها در مناطق نزدیک گسل است، جایی که جابه‌جایی‌های شدید ممکن است موجب برخورد سازه با ساختمان‌های مجاور و حتی آسیب به اجزای داخلی جداساز گردد [۱۷].

ایده سقف جدا شده^۳، به عنوان یک نوآوری در کنترل ارتعاشات سازه‌ای، نخستین بار توسط ویلاورده پیشنهاد شد [۱۸] و در ادامه، مطالعات تجربی بیشتری در این زمینه صورت گرفت [۱۹]. در این سیستم، دال سقف از سازه جدا شده و توسط جداسازهای لرزه‌ای الاستومری پشتیبانی می‌شود. این فناوری با موفقیت در یک ساختمان ۹ طبقه در ارمنستان پیاده‌سازی گردید [۲۰] و نتایج آن توسط ملکومیان [۲۱] گزارش شده است. همچنین نیستیکو [۲۲] این سامانه را به عنوان یک TMD با جرم بالا برای ساختمان‌های پیش‌ساخته معرفی کرده است. مارالاندا و همکاران [۲۳] یک سیستم جداسازی سقف را به عنوان یک روش مقاوم‌سازی برای دانشکده مهندسی دانشگاه دل‌واله کلمبیا پیشنهاد دادند. راجانا و گیارالیس [۲۴] یک سامانه نوین کنترل ارتعاش غیرفعال را معرفی کردند که شامل یک میراگر جرمی تنظیم‌شده-

¹ Tuned mass damper

² Base isolation

³ Isolated roof

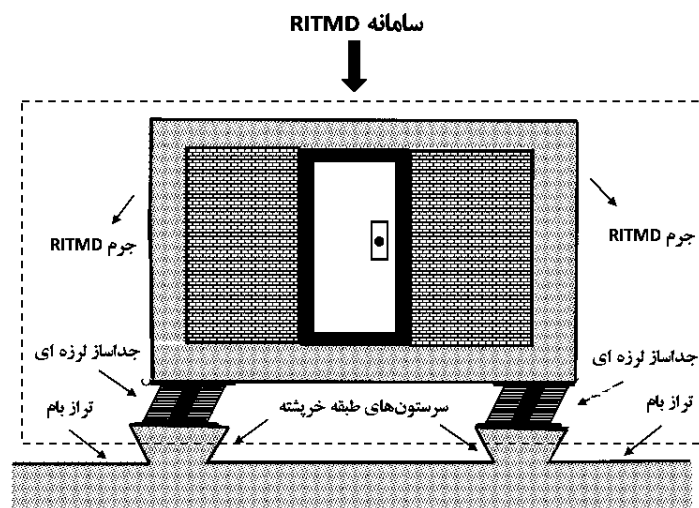
اینتر درون یک بام جداسازی شده لرزه‌ای است. آن‌ها به صورت عددی کارایی آن را در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی بررسی کردند. با این حال بهره‌گیری از ایده سقف جدا شده نیاز به استفاده از جداسازهای لرزه‌ای زیاد (به تعداد ستون‌های ساختمان) و ایجاد تغییرات سازه‌ای و صرف هزینه‌های هنگفت است. در این پژوهش، یک سامانه کنترل لرزه‌ای جدید، ساده و اقتصادی با عنوان میراگر جرمی تنظیمی جدا شده در خرپشته (Ridge-Isolated Tuned Mass Damper) یا به اختصار RITMD معرفی می‌شود. نوآوری این سامانه در این است که از خرپشته ساختمان (یک بخش غیرقابل استفاده و صرفاً رابط برای ارتباط با پشت‌بام) به عنوان یک نوسانگر فرعی در نظر گرفته شده است. خرپشته سازه بر روی چهار جداساز لرزه‌ای قرار گرفته در زیر ستون‌های طبقه خرپشته مستقر می‌شود. در حین زلزله، بخشی از انرژی لرزه‌ای، به جای انتقال به نوسانگر اصلی (ساختمان)، به نوسانگر فرعی (خرپشته) منتقل می‌شود و خرپشته در فازی متفاوت با فاز حرکت ساختمان بر روی جداسازهای لرزه‌ای، با سختی افقی پایین، شروع به ارتعاش کرده و جابه‌جا خواهد شد؛ بنابراین در هنگام زلزله، بخش اعظمی از انرژی زلزله به سامانه RITMD منتقل و با تبدیل آن به انرژی جنبشی (جابه‌جایی‌های طبقه خرپشته) جذب و با گذر زمان اتلاف می‌شود و از این طریق بخش زیادی از انرژی لرزه‌ای به سازه اصلی منتقل نخواهد شد. نکته حائز اهمیت این است که این باتوجه به اینکه خرپشته روی طبقه بام است، فضای لازم برای چنین جابه‌جایی‌هایی نیز فراهم است. در ضمن در صورتی که جداساز رفتار غیرخطی داشته باشد یا مجهز به هسته سربی باشد، بخش زیادی از انرژی ورودی به سامانه به دلیل رفتار غیرخطی جداساز و هسته سربی اتلاف می‌شود که این مسئله در سامانه‌های خطی TMD وجود ندارد. برای ارزیابی اثربخشی این سامانه در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی یک قاب خمشی فولادی پنج طبقه تحت چهار رکورد زلزله معروف شامل دو زلزله دور از گسل (ال سنتر و هاجینو) و دو زلزله نزدیک گسل (کوبه و نورتریج) انجام و عملکرد لرزه‌ای قاب مجهز به آن در مقایسه با قاب بدون آن مقایسه شده است.

بخش‌های بعدی مقاله حاضر به شرح زیر ساماندهی شده است: در بخش دوم، سامانه میراگر جرمی تنظیم شده جدا شده در خرپشته معرفی شده است. بخش سوم به ارزیابی عملکرد سامانه RITMD برای یک قاب ساختمانی در معرض زلزله می‌پردازد. برای این منظور یک قاب ساختمانی فولادی ۵ طبقه انتخاب و سامانه پیشنهادی بر روی آن پیاده‌سازی شده است. سپس پاسخ‌های لرزه‌ای قاب مجهز به سامانه در دو زلزله دور از گسل و دو زلزله نزدیک گسل با رفتار لرزه‌ای سازه متناظر فاقد سامانه مقایسه شده است. در بخش چهارم، نتایج کلی حاصل از مطالعه حاضر جمع‌بندی می‌شوند.

۲- معرفی سامانه میراگر جرمی تنظیم شده جدا شده در خرپشته

در این مقاله طرح سامانه میراگر جرمی تنظیم شده جدا شده در خرپشته موسوم به RITMD پیشنهاد شده است. شکل ۱ سامانه RITMD و نحوه پیاده‌سازی آن بر روی سازه را نشان می‌دهد. در طرح پیشنهادی از وضعیت موجود سازه و یک پتانسیل مغفول در یک بخش به ظاهر کم‌اهمیت از سازه به نام خرپشته که عموماً در سازه‌ها تعریف شده یا به راحتی قابل تعریف است، برای تحقق یک امتیاز و بهره‌باهمیت (کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه اصلی و نتایجاً کاهش خسارت سازه اصلی در هنگام زلزله) استفاده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در طرح سامانه پیشنهادی RITMD، خرپشته ساختمان (یک بخش غیرقابل استفاده و صرفاً رابط برای ارتباط با پشت‌بام) به عنوان یک نوسانگر فرعی در نظر گرفته شده است که بر روی جداسازهای لرزه‌ای قرار گرفتن در زیر ستون‌های طبقه خرپشته مستقر خواهد شد. در سامانه RITMD، طبقه خرپشته به عنوان میراگر جرمی تنظیم شده بر روی چهار جداساز لرزه‌ای (در حالت سازه سه بعدی) قرار می‌گیرد؛ لذا با بهره‌مندی از چهار جداساز لرزه‌ای، یک طرح کنترل لرزه‌ای با هزینه کم، سرعت اجرای بالا و پیاده‌سازی ساده برای سازه‌های موجود و حتی بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود فراهم می‌شود، زیرا برای پیاده‌سازی سامانه نیاز به تغییر عمده در سیستم باربر جانبی یا ثقلی سازه اصلی وجود ندارد، چون خرپشته نقش الحاقی دارد. تنها تقویت موضعی محل استقرار جداسازها (زیر ستون‌های خرپشته) ممکن است نیاز باشد تا ظرفیت کافی برای انتقال بار ثقلی داشته باشند. در ساختمان‌های موجود، اجرای سامانه بدون نیاز به تخریب یا تغییر اساسی در طبقات پایین‌تر صورت می‌گیرد و صرفاً در سطح بام عملیات انجام می‌شود. بررسی وضعیت خرپشته موجود (طراحی آن در سازه‌های جدید)، تقویت اتصالات و اجرای کلاف‌بندی موضعی برای انتقال نیرو، نصب جداسازهای لرزه‌ای در زیر ستون‌های خرپشته به عنوان مراحل اصلی فرایند پیاده‌سازی سامانه است.

در این سامانه، طبقه خرپشته به عنوان جرم میراگر تنظیم شده، بر روی چهار جداساز لرزه‌ای قرار گرفته و ایفای نقش می‌کند. از آنجایی که خرپشته‌ها معمولاً به عنوان بخشی متداول از سازه‌های ساختمانی تعریف می‌شوند، استفاده از تنها چهار جداساز لرزه‌ای در زیر ستون‌های خرپشته می‌تواند این سامانه را به گزینه‌ای مقرون به صرفه و مناسب برای پیاده‌سازی در ساختمان‌های موجود، یا بهسازی لرزه‌ای آن‌ها، تبدیل کند. در این روش، خرپشته که معمولاً نقش سازه‌ای فعالی ندارد، به عنوان یک نوسانگر فرعی در نظر گرفته شده است. در هنگام زلزله، بخشی از انرژی ورودی به جای انتقال مستقیم به سازه اصلی، به خرپشته منتقل شده و این بخش از سازه با فازی متفاوت از ساختمان شروع به ارتعاش می‌کند؛ در نتیجه، بخشی قابل توجه از انرژی لرزه‌ای جذب و مستهلک می‌شود. از این دیدگاه، خرپشته نقش یک TMD را ایفا می‌کند که اساس عملکرد آن مبتنی بر اصل جذب انرژی توسط نوسانگر فرعی است. برای دستیابی به جابه‌جایی‌های مؤثر و کافی در خرپشته، این بخش از سازه به کمک جداسازهای لرزه‌ای از طبقه بام جدا می‌شود. با توجه به سختی افقی کم جداسازها و موقعیت مناسب خرپشته در بالاترین تراز سازه، امکان حرکت نسبی بزرگ فراهم شده و فضای لازم برای عملکرد مؤثر سامانه وجود دارد. علاوه بر این، بخشی از انرژی منتقل شده نیز از طریق میرایی ذاتی جداسازها مستهلک می‌شود که در واقع بهره‌گیری هم‌زمان از اصل دوم؛ یعنی اتلاف انرژی از طریق میرایی را ممکن می‌سازد. در مجموع، سامانه پیشنهادی RITMD به عنوان یک سیستم کنترل لرزه‌ای ترکیبی، تلفیقی از دو استراتژی اصلی جذب و اتلاف انرژی را به کار می‌گیرد و می‌تواند به عنوان راهکاری ساده، کم‌هزینه و مؤثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، به‌ویژه در ساختمان‌های موجود، مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱: سامانه RITMD و نحوه پیاده‌سازی آن بر روی سازه.

۳- ارزیابی عملکرد سامانه RITMD برای یک قاب ساختمانی در معرض زلزله

برای ارزیابی میزان اثرگذاری سامانه پیشنهادی RITMD در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها، یک سازه فولادی با پلان مصور در شکل ۲ انتخاب شده است. سازه مورد نظر یک سازه فولادی ۵ طبقه با سیستم باربر جانبی از نوع قاب خمشی متوسط در هر دو جهت است. فولاد مصرفی در تمامی اعضا از نوع ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقه اول برابر ۳/۲ متر، سایر طبقات ۳ متر و خرپشته ۲/۴ متر است. جهت مدل‌سازی اولیه و طراحی سازه مورد مطالعه، از نرم‌افزار ETABS 2016 استفاده شده است. در مدل‌سازی سازه، المان‌های تیر و ستون به صورت المان‌ها Frame تعریف شده‌اند. اتصالات تیر به ستون در تمامی طبقات به صورت گیردار در نظر گرفته شده‌اند تا رفتار قاب خمشی به درستی شبیه‌سازی شود. همچنین اتصال پایه ستون‌ها به فونداسیون به صورت گیردار مدل شده است. بار مرده سازه شامل بار مرده و بار معادل تیغه‌بندی به ترتیب به میزان 4 kN/m^2 و 1 kN/m^2 در نظر گرفته شده است. همچنین بار

زنده طبقات و بام به ترتیب برابر 2 kN/m^2 و 1.5 kN/m^2 لحاظ شده است. این بارها به صورت بار گسترده به دال‌های هر طبقه تخصیص یافته‌اند. برای اعمال بارهای جانبی ناشی از زلزله، از تحلیل استاتیکی معادل مطابق با ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) استفاده شده است. با در نظر گرفتن ضریب اهمیت (I) برابر ۱ و نوع زمین ساختگاه از نوع II و شتاب مبنای طرح برابر $0.35g$ (شتاب گرانشی زمین است)، نیروی جانبی طراحی با استفاده از روابط آیین‌نامه و بر اساس وزن مؤثر لرزه‌ای (شامل بار مرده و ۲۰ درصد بار زنده طبقات) محاسبه گردید. در محیط نرم‌افزار ETABS، بارهای جانبی حاصل در دو جهت اصلی سازه به صورت نیروهای معادل استاتیکی تعریف و در ترکیبات بارگذاری سازه منظور شده‌اند تا طراحی اعضای سازه‌ای بر اساس اثرات لرزه‌ای انجام پذیرد. خروجی‌های حاصل از این تحلیل، شامل نیروها و مقاطع طراحی، به عنوان مبنای طراحی اولیه و استخراج مشخصات مقاطع اعضای سازه‌ای استفاده شده‌اند. طراحی قاب فولادی در محیط ETABS با استفاده از آیین‌نامه AISC-LRFD 2010 انجام و نهایتاً مقاطع طراحی شده برای تیرها و ستون‌ها به شرح جدول ۱ طراحی شد. سپس قاب راستای ۲ مطابق شکل ۲ برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار SeismoStruct 2024 مدل‌سازی شد. شکل ۳ مدل‌سازی قاب مورد مطالعه را در این نرم‌افزار به تصویر کشیده است. کلیه تیرها و ستون‌ها به صورت المان‌های غیرخطی نوع InfirmFB (force-based inelastic frame element) مدل شده‌اند که توانایی شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح و تشکیل مفاصل پلاستیک در طول عضو را دارا است. مقاطع فولادی ساختمان از نوع ST37 با تنش تسلیم، تنش نهایی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر $F_y=2400 \text{ kg/cm}^2$ ، $F_u=3700 \text{ kg/cm}^2$ و $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ انتخاب شده است. بار مرده و زنده به صورت یکنواخت روی تیرهای قاب توزیع شده است. میرایی سازه به صورت میرایی رایلی و با در نظر گرفتن ۵ درصد میرایی بحرانی در نرم‌افزار قابل اعمال است. جداسازهای لرزه‌ای با بهره‌گیری از المان NLLINK (Nonlinear link element) و بین بالای ستون بام و پایین ستون خرپشته مدل‌سازی شده‌اند. این المان محلی در شکل ۳ به صورت یک مکعب توپر نشان داده شده است. رفتار جداسازها در سه جهت اصلی مطابق با مشخصات مکانیکی جداسازها (سختی برشی، سختی محوری و ظرفیت میرایی) قابل تعریف است. سختی جداسازها در راستای حرکت (راستای افق) به صورت دوخطی مدل‌سازی شده و با تعیین سختی اولیه، سختی تسلیم و نسبت سختی ثانویه به اولیه مدل‌سازی می‌شوند. باتوجه به بالابودن سختی قائم جداسازها برای تحمل بارهای قائم، سختی جداسازها در راستای قائم برابر ۱۰۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر لحاظ شده است. به دلیل وجود هسته سربی در جداسازها، میرایی جداساز نیز به صورت یک میرایی ویسکوز تعیین و به موازات حرکت افقی سازه در مدل‌سازی جداسازها اعمال شده است.

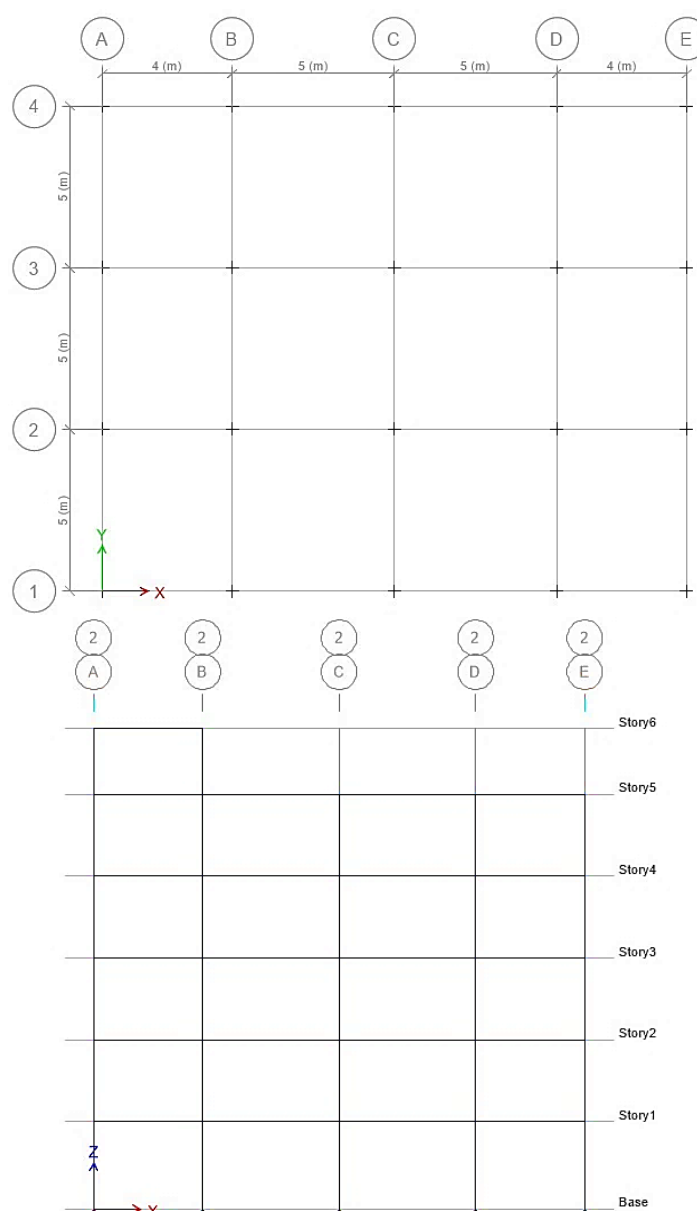
دوره تناوب اصلی قاب با استفاده از آنالیز مودال برابر $1/0.1$ ثانیه محاسبه شد. با تنظیم فرکانس سامانه RITMD در نزدیکی فرکانس اصلی سازه و ملحوظ نمودن ۵ درصد میرایی برای سازه، پارامترهای سامانه RITMD برای قاب مورد مطالعه قابل محاسبه است. برای این منظور یک نسبت جرمی عملیاتی معادل ۵ درصد جرم سازه برای سامانه در نظر گرفته شده است، لذا مقدار فرکانس و درصد میرایی سامانه RITMD برابر $\omega_R = 6.5583 \text{ rad/s}$ و $\xi_R = 0.1092$ تعیین شدند. با تعیین جرم و فرکانس مناسب سامانه RITMD، سختی اولیه سامانه از طریق رابطه $k_R = m_R \omega_R^2$ قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن مقدار جابه‌جایی حداکثر سامانه در ناحیه خطی برابر ۵۰ سانتی‌متر، مقدار نیروی تسلیم سامانه قابل محاسبه است. انتخاب مقدار جابجایی حداکثر سامانه بر اساس ملاحظات دستورالعمل طراحی جداسازها و محدودیت‌های جابجایی خرپشته صورت گرفته است. در این انتخاب، دوره تناوب هدف جداساز و ملاحظات طراحی آن از جمله تعداد ورق‌های فولادی و لاستیکی، کنترل کمانش جداساز و جلوگیری از دررفتگی لایه‌های لاستیک در نظر گرفته شده‌اند. باتوجه به اینکه امکان رفتار غیرخطی سامانه در زلزله‌های شدید وجود دارد، یک نسبت سختی ثانویه به اولیه برابر 0.1 نیز برای جداسازهای سامانه RITMD در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب مذکور، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه در معرض دو زلزله دور از گسل آل‌سنترو (۱۹۴۰) و هاجینو (۱۹۶۸) و همچنین دو زلزله نزدیک گسل نورت‌ریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) انجام شده است. پیشینه شتاب زمین در زلزله‌های یاد شده به $0.35g$ مقیاس شده است که g معرف شتاب گرانشی زمین است. مشخصات زلزله‌های اعمال شده در جدول ۲ و تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. مبنای انتخاب این رکوردها، پوشش پاسخ‌های لرزه‌ای متنوع ناشی از زلزله‌های نزدیک و دور از گسل بوده است. زلزله‌های نزدیک گسل معمولاً دارای پالس‌های سرعت قوی، مدت‌زمان کوتاه و شدت انرژی بالاتری هستند که می‌توانند اثرات

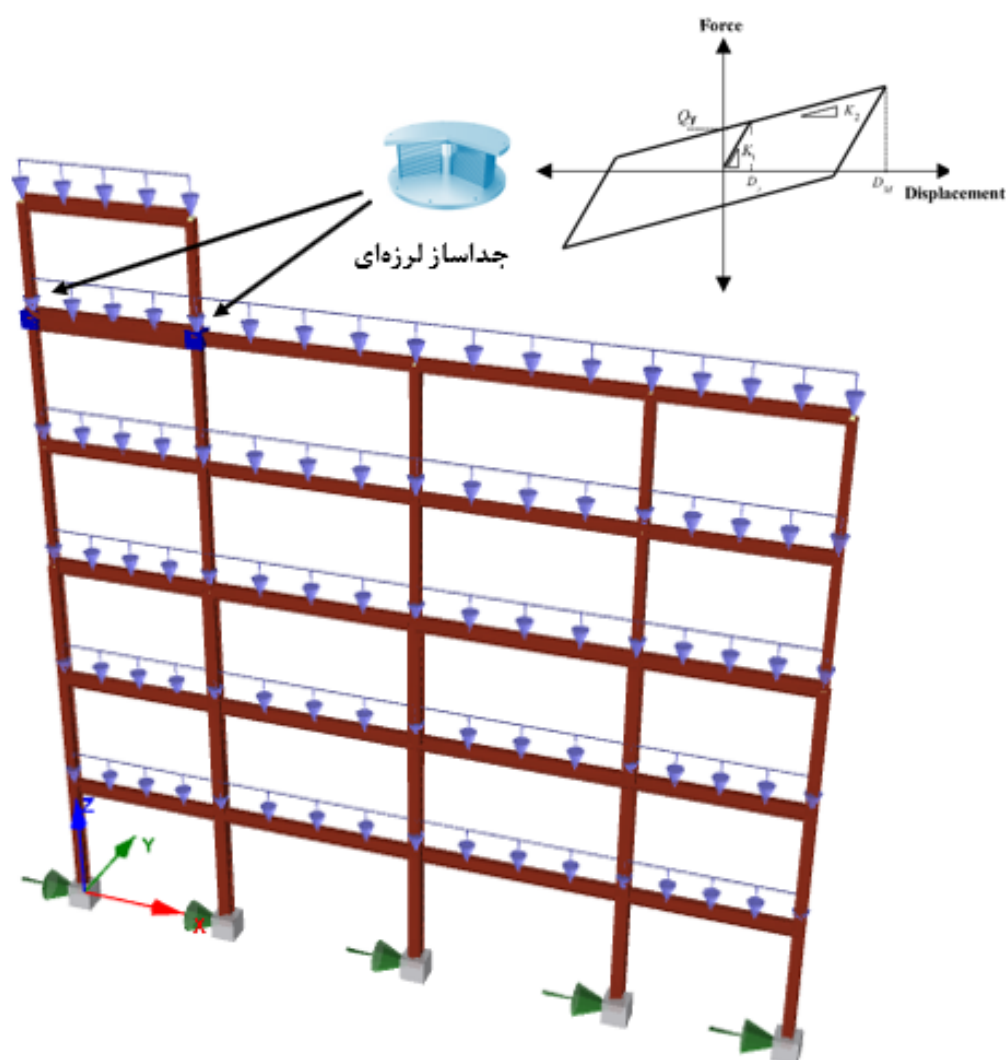
مخربی بر سازه‌ها داشته باشند. در مقابل، زلزله‌های دور از گسل دارای ویژگی‌های متفاوتی از جمله مدت زمان طولانی‌تر و محتوای فرکانسی متنوع هستند. این تمایزها در بسیاری از استانداردها و منابع معتبر از جمله FEMA P-695 [۲۵] مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

جدول ۱: مقاطع طراحی قاب ساختمانی مورد مطالعه.

تیرهای ۴ متری	تیرهای ۵ متری	ستون‌های خارجی	ستون‌های میانی	طبقات
IPE 360	IPE 360	BOX 26×26×10	BOX 30×30×10	۱ و ۲ و ۳
IPE 300	IPE 300	BOX 22×22×10	BOX 26×26×10	۴ و ۵



شکل ۲. پلان ساختمان و قاب مورد مطالعه در راستای ۲



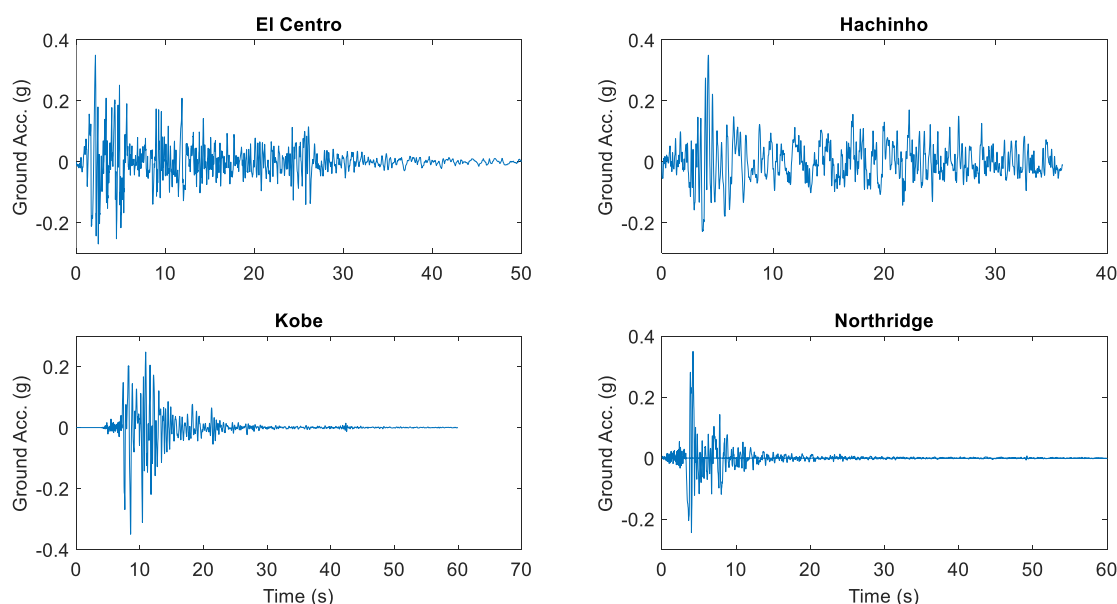
شکل ۳. مدل سازی قاب مورد مطالعه در نرم افزار SeismoStruct.

جدول ۲: مشخصات زلزله های اعمال شده به قاب.

نوع زلزله	مدت دوام (ثانیه)	شدت (ریشتر)	کشور	سال (میلادی)	ایستگاه	نام زلزله
دور از گسل	۲۰.۲۲	۷.۱	آمریکا	۱۹۴۰	امپریال والی	ال سنتر
نزدیک گسل	۱۰.۷۶	۷.۲	ژاپن	۱۹۹۵	آژانس هواشناسی ژاپن (JMA)	کوبه
دور از گسل	۲۳.۳۵	۷.۹	ژاپن	۱۹۶۸	هاچینو	هاچینو
نزدیک گسل	۷.۴۴	۶.۸	آمریکا	۱۹۹۴	بیمارستان سیلمار	نورتریج

* بیشینه شتاب زلزله های مذکور به شتاب $0.35g$ مقیاس شده اند (g شتاب ثقل زمین است).

با در نظر گرفتن چگالی دیوار آجری برابر حدود $1800-2000 \text{ kg/m}^3$ و محاسبه حجم دیوارهای خرپشته برابر 14.4 مترمکعب، خرپشته سازه جرمی حدود 24 تن دارد که نصف آن برای قاب مورد مطالعه لحاظ می شود (12 تن). این مقدار جرم در حدود همان 5 درصد جرم قاب است و لذا جرم طراحی شده برای سامانه از طریق جرم خرپشته تأمین می شود، لذا پیاده سازی RITMD منجر به تحمیل جرم جدید یا غیرمنتظره ای بر ستون های تکیه گاهی نشده است. علاوه بر این، جداسازهای لرزه ای دارای سختی قائم بالا برای تحمل بارهای قائم هستند و کنترل های ظرفیت محوری - خمشی و کمانش برای ستون ها نشان می دهد که هرگونه تغییر موضعی در تقاضاها همچنان در محدوده ظرفیت مقاطع قرار دارد.

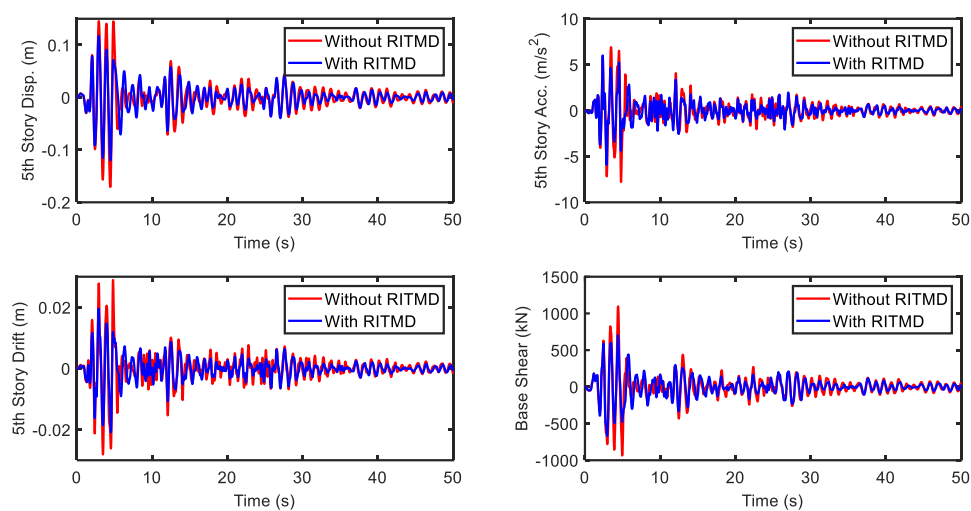


شکل ۴. تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های اعمال شده به قاب (بیشینه شتاب زلزله‌های مذکور به شتاب $0.35g$ مقیاس شده‌اند).

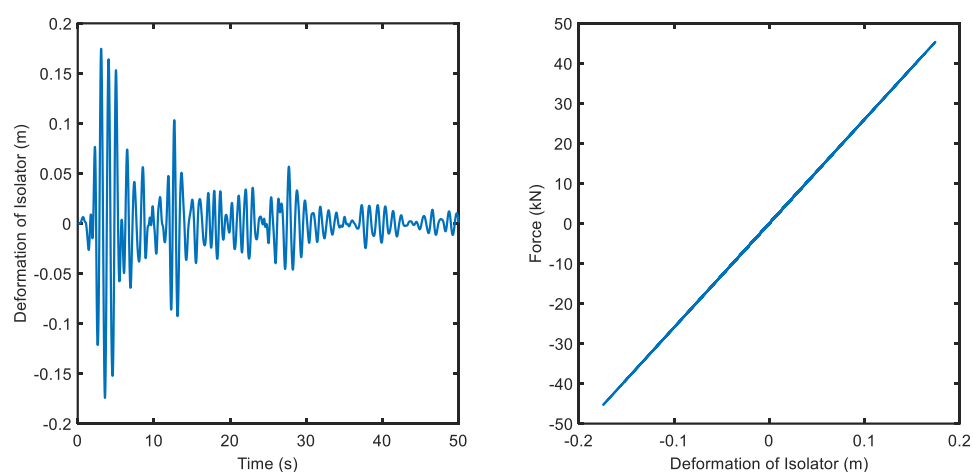
برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب مجهز به سامانه مذکور در مقایسه با قاب فاقد آن، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قاب در معرض زلزله‌های اشاره شده انجام و پاسخ‌های مهم لرزه‌ای قاب با همدیگر مقایسه شده است. شکل ۵ تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقه بام، شتاب طبقه بام، جابه‌جایی نسبی طبقه بام و برش پایه قاب را در زلزله ال‌سنترو و برای دو حالت با و بدون سامانه RITMD نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه جابه‌جایی و شتاب بام برای حالت قاب بدون سامانه به ترتیب برابر 17.07 cm و 7.79 m/s^2 هستند که با به‌کارگیری سامانه RITMD به مقادیر 11.99 cm و 6.00 m/s^2 تقلیل پیدا کرده‌اند که به ترتیب کاهشی حدود $29/8$ و $22/9$ درصد را نشان می‌دهند. همچنین در نتیجه بهره‌مندی از سامانه مذکور در قاب، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقه بام و برش پایه قاب از مقادیر $2/89 \text{ cm}$ و $1096/59 \text{ kN}$ به مقادیر $2/08 \text{ cm}$ و $702/44 \text{ kN}$ تقلیل پیدا کرده‌اند که کاهش حدود $28/0$ و $35/9$ را نشان می‌دهند.

شکل ۶ تاریخچه زمانی جابه‌جایی جداساز در سامانه RITMD و همچنین منحنی هیستریزس آن را در زلزله ال‌سنترو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این زلزله، سامانه RITMD بیشینه جابه‌جایی برابر $17/54$ سانتی‌متر را تجربه نموده است و در ناحیه خطی باقی‌مانده است.

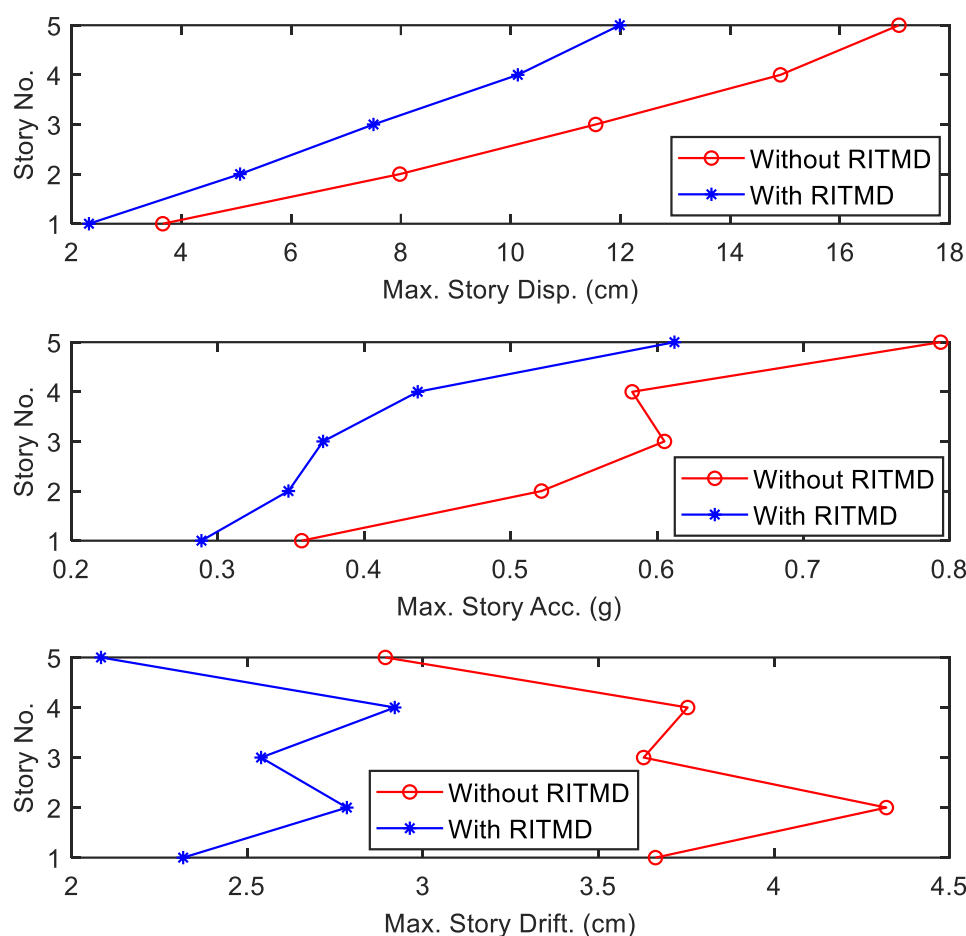
شکل ۷ یک مقایسه از بیشینه جابه‌جایی، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات قاب و همچنین برش پایه قاب در زلزله ال‌سنترو و برای دو حالت با و بدون سامانه RITMD را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سامانه RTMDI قادر است به طور محسوسی پاسخ‌های لرزه‌ای طبقات قاب مورد مطالعه را در زلزله ال‌سنترو کاهش دهد. بیشینه جابه‌جایی طبقات قاب از طبقه یک تا طبقه پنجم به ترتیب کاهشی برابر $36/71$ ، $36/47$ ، $35/05$ و $32/08$ و $29/78$ درصد را تجربه نموده‌اند. همچنین در نتیجه پیاده‌سازی سامانه مذکور، بیشینه شتاب طبقات قاب به ترتیب $19/17$ ، $33/18$ ، $38/55$ و $25/13$ و $22/92$ درصد کاهش یافته است. به طور مشابه، سامانه RTMDI جابه‌جایی نسبی طبقات قاب را به میزان ترتیب $36/71$ ، $35/55$ ، $30/01$ و $22/21$ و $27/98$ درصد کاهش داده است.



شکل ۵. تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقه بام، شتاب طبقه بام، جابه‌جایی نسبی طبقه بام و برش پایه قاب در زلزله ال سنترو.



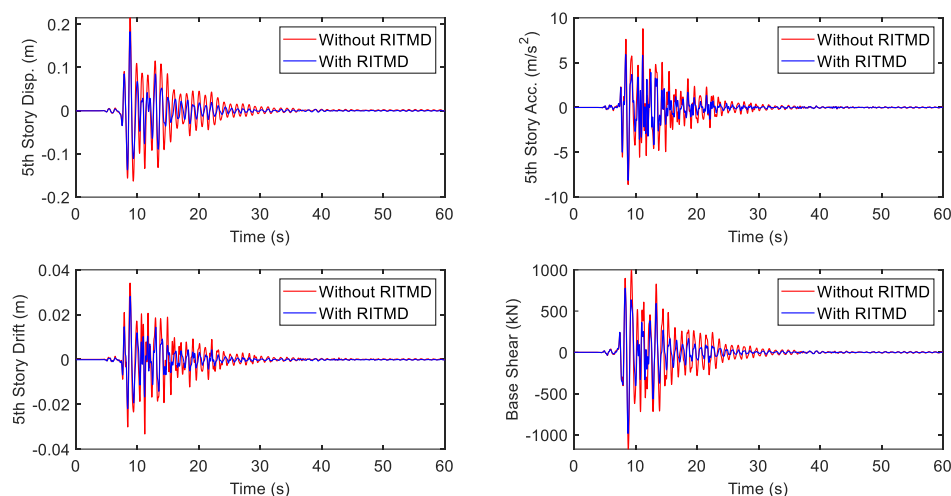
شکل ۶. تاریخچه زمانی جابه‌جایی جداساز در سامانه RITMD و منحنی هیستریزیس آن در زلزله ال سنترو



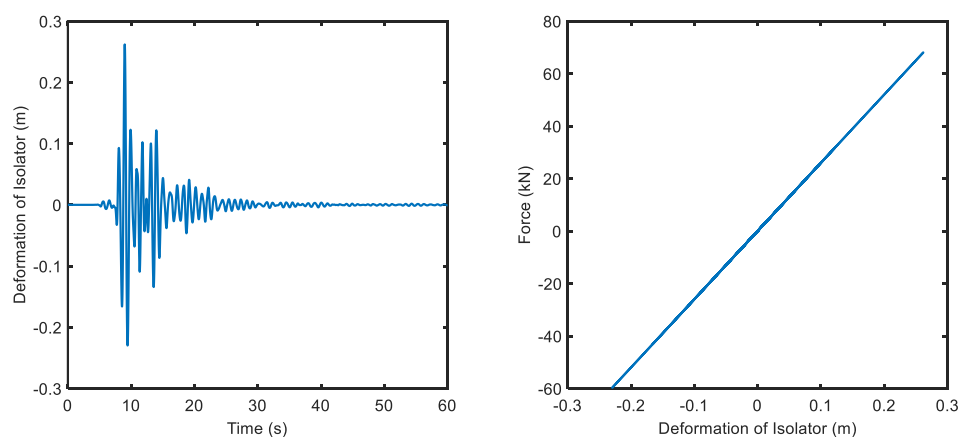
شکل ۷. مقایسه مقادیر بیشینه جابه‌جایی، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات قاب و برش پایه قاب تحت رکورد زلزله ال سنترو در دو حالت با و بدون سامانه RITMD

در ادامه تأثیر به کارگیری سامانه RITMD بر پاسخ‌های لرزه‌ای قاب مورد بررسی تحت رکورد زلزله کوبه به عنوان یک زلزله نزدیک گسل بررسی شده است. بدین منظور، پاسخ‌های تاریخچه زمانی غیرخطی قاب در طبقه بام و همچنین مقادیر بیشینه پارامترهای دینامیکی قاب برای دو حالت با و بدون سامانه RITMD مقایسه شده است. مطابق شکل ۸، در حالت بدون استفاده از سامانه RITMD، بیشینه جابه‌جایی و شتاب طبقه بام به ترتیب برابر با برابر $21/49 \text{ cm}$ و $8/27 \text{ m/s}^2$ است. در مقابل، با به کارگیری سامانه مذکور در قاب، این مقادیر به برابر $18/27 \text{ cm}$ و $8/13 \text{ m/s}^2$ کاهش یافته‌اند. این تغییرات به معنای کاهش حدود $14/99$ درصدی در جابه‌جایی بام و $7/43$ درصدی در شتاب طبقه بام است. افزون بر این، پیاده‌سازی سامانه RITMD موجب کاهش جابه‌جایی نسبی بام از $3/41 \text{ cm}$ به $2/81 \text{ cm}$ و برش پایه قاب از $1173/07 \text{ kN}$ به $983/76 \text{ kN}$ شده است؛ که به ترتیب کاهشی معادل $17/51$ درصد و $16/14$ درصد را نشان می‌دهند.

شکل ۹ جابه‌جایی جداساز و منحنی هیستریزیس آن را تحت اثر زلزله کوبه نمایش می‌دهد. طبق نتایج حاصل، حداکثر جابه‌جایی ثبت شده برای جداساز برابر با $26/19 \text{ cm}$ بوده که طی آن، رفتار سامانه در ناحیه الاستیک باقی مانده است.

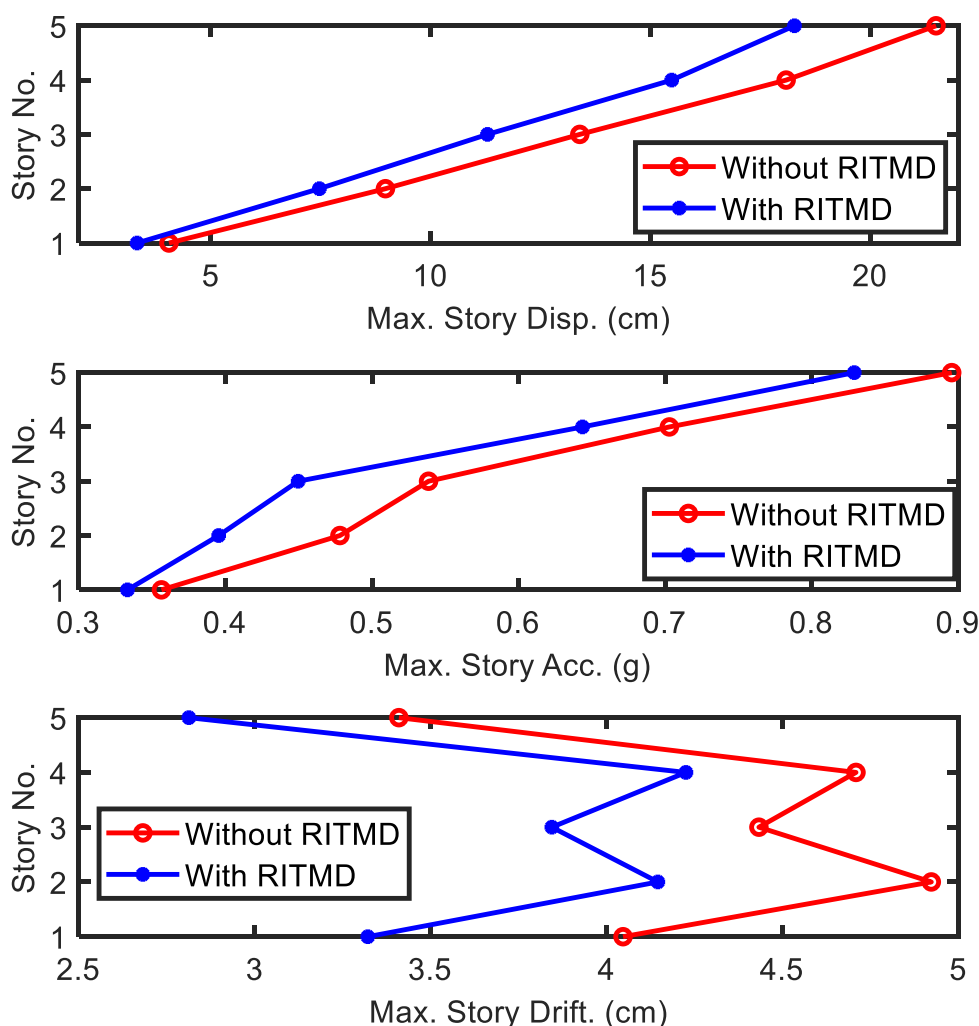


شکل ۸. تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقه بام، شتاب طبقه بام، جابه‌جایی نسبی طبقه بام و برش پایه قاب در زلزله کوبه.



شکل ۹. تاریخچه زمانی جابه‌جایی جداساز در سامانه RITMD و منحنی هیستریزیس آن در زلزله کوبه.

شکل ۱۰ به مقایسه بیشینه مقادیر جابه‌جایی، شتاب، جابه‌جایی نسبی و برش پایه طبقات قاب در دو حالت با و بدون سامانه RITMD پرداخته است. نتایج حاکی از آن است که این سامانه منجر به کاهش در پاسخ‌های لرزه‌ای شده است. بیشینه جابه‌جایی طبقات از طبقه اول تا پنجم به ترتیب ۱۷/۹۳، ۱۶/۷۶، ۱۵/۶۸، ۱۴/۳۹ و ۱۴/۹۹ درصد کاهش یافته است. همچنین، کاهش بیشینه شتاب طبقات به ترتیب برابر با ۶/۵۱، ۱۷/۳۰، ۱۶/۵۲، ۸/۴۳ و ۷/۴۳ درصد گزارش شده است. به طور مشابه، سامانه RITMD توانسته جابه‌جایی نسبی طبقات را نیز به ترتیب ۱۷/۹۳، ۱۵/۷۹، ۱۳/۲۸، ۱۰/۲۷ و ۱۷/۵۱ درصد کاهش دهد.



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر بیشینه جابه‌جایی، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات قاب و برش پایه قاب تحت رکورد زلزله ال سنترو در دو حالت با و بدون سامانه RITMD

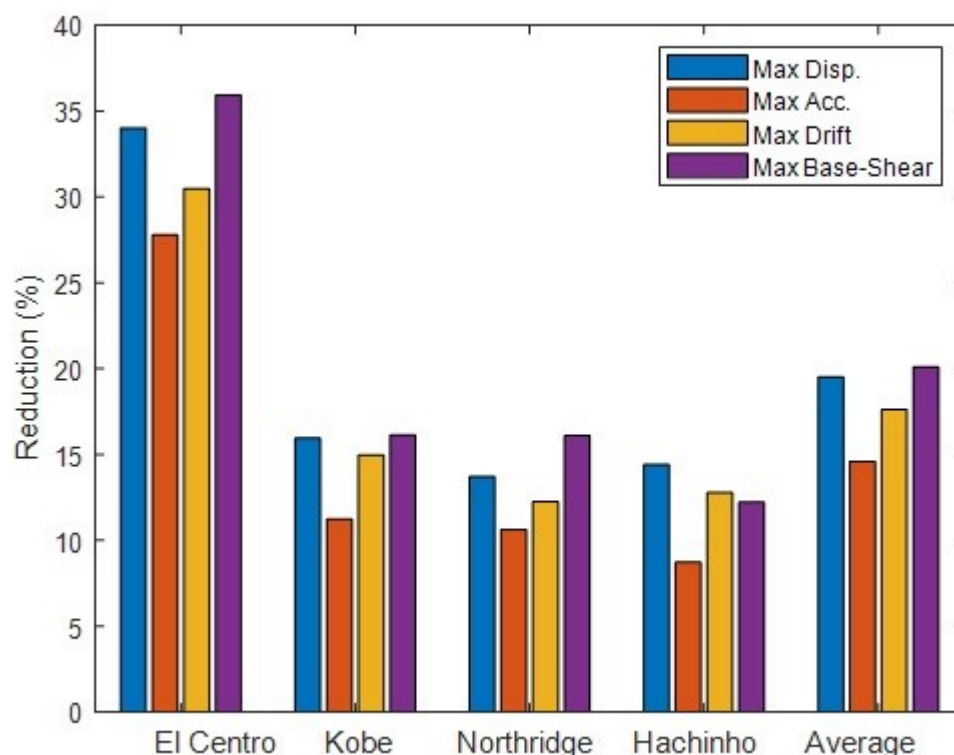
جدول ۳ بیشینه جابه‌جایی، بیشینه شتاب، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب مورد مطالعه را تحت چهار رکورد زلزله مورد مطالعه و در دو حالت با و بدون سامانه RITMD گزارش می‌دهد. همچنین درصد کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای قاب مذکور در نتیجه پیاده‌سازی سامانه RITMD در این جدول آورده شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های جدول نشان می‌دهند که به‌کارگیری سامانه RITMD تأثیر قابل‌توجهی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه دارد. برای تمام زلزله‌های مورد بررسی، بیشینه جابه‌جایی، شتاب و دررفت طبقات در قاب مجهز به سامانه RITMD به‌طور موثری کاهش یافته است. در میان زلزله‌های بررسی‌شده، بیشترین کاهش جابه‌جایی مربوط به زلزله ال سنترو در طبقه اول با کاهش ۳۶/۷۱ درصد و کمترین آن مربوط به زلزله نورتریج در طبقه پنجم با کاهش ۵/۱۴ درصد بوده است. کاهش شتاب نیز در اکثر موارد مناسب و نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً مطلوب سامانه در کاهش شتاب وارده به طبقات می‌باشد. بیشترین کاهش در طبقه سوم قاب در معرض زلزله ال سنترو مشاهده شد، درحالی‌که اثرپذیری سامانه در کاهش شتاب طبقات در برخی موارد چشمگیر نمی‌باشد. همچنین دررفت طبقات که یکی از شاخص‌های اصلی در کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه است، در نتیجه بهره‌گیری از سامانه RTMDI، در بسیاری از موارد کاهش مناسبی را تجربه نموده است. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سامانه RITMD در سازه‌ها به‌عنوان یک راهکار مؤثر در

کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند و می‌تواند موجب افزایش ایمنی و کاهش آسیب‌های سازه‌ای شود. همچنین برتری عملکرد لرزه‌ای سامانه در زلزله‌های دور از گسل نسبت به زلزله‌های نزدیک گسل مشاهده می‌شود. به طور کلی، تفاوت در درصد کاهش جابه‌جایی‌ها ناشی از سه عامل کلیدی است: الف) فرصت بیشتر سامانه برای فعال‌سازی تدریجی و مدیریت بهتر انرژی ورودی در زلزله‌های دور از گسل. ب) وجود پالس‌های سرعت شدید در زلزله‌های دور از گسل که می‌توانند باعث اشباع سریع یا کاهش عملکرد سیستم کنترل شوند. ج) تطابق بهتر محتوای فرکانسی زلزله‌های دور گسل با باند فرکانسی پاسخ‌پذیر سیستم کنترل. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که کارایی سامانه پیشنهادی به‌طور چشمگیری تحت تأثیر مشخصات زلزله ورودی قرار دارد؛ امری که با ماهیت عملکردی بیشتر سامانه‌های میراگر جرمی تنظیم‌شده، جداسازها و سایر سیستم‌های کنترل غیرفعال نیز سازگار است.

برای دستیابی به یک نتیجه کلی، درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه همه طبقات سازه در زلزله‌های مختلف و متوسط کاهش آن‌ها برای چهار زلزله در شکل ۱۱ به صورت یک نمودار میله‌ای نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بیشترین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در زلزله‌ال سنتر و کمترین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در زلزله نورتریج حاصل شده است. به طور متوسط برای همه زلزله‌ها، سامانه RTMDI کاهشی در حدود ۲۰، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ درصد را به ترتیب در بیشینه جابه‌جایی طبقات، شتاب طبقات، جابه‌جایی نسبی طبقات و برش پایه قاب فراهم نموده است.

جدول ۳: درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه همه طبقات سازه در زلزله‌های مختلف و متوسط کاهش آن‌ها برای چهار زلزله

زلزله	طبقه	بیشینه پاسخ قاب بدون سامانه			بیشینه پاسخ قاب مجهز به سامانه			درصد کاهش		
		جابه‌جایی	شتاب	دریفت	جابه‌جایی	شتاب	دریفت	جابه‌جایی	شتاب	دریفت
		(cm)	(g)	(cm)	(cm)	(g)	(cm)	(%)	(%)	(%)
ال سنتر و	1	3.66	0.36	3.66	2.32	0.29	2.32	36.71	19.17	36.71
	2	7.98	0.52	4.32	5.07	0.35	2.78	36.47	33.18	35.55
	3	11.55	0.61	3.63	7.50	0.37	2.54	35.05	38.55	30.01
	4	14.92	0.58	3.75	10.13	0.44	2.92	32.08	25.13	22.21
	5	17.07	0.79	2.89	11.99	0.61	2.08	29.78	22.92	27.98
کوبه	1	4.05	0.36	4.05	3.32	0.33	3.32	17.93	6.51	17.93
	2	8.97	0.48	4.92	7.47	0.40	4.15	16.76	17.30	15.79
	3	13.39	0.54	4.43	11.29	0.45	3.84	15.68	16.52	13.28
	4	18.08	0.70	4.71	15.48	0.64	4.23	14.39	8.43	10.27
	5	21.49	0.90	3.41	18.27	0.83	2.81	14.99	7.43	17.51
نورتریج	1	3.45	0.44	3.45	2.87	0.44	2.87	16.75	1.01	16.75
	2	7.06	0.66	3.61	5.83	0.58	2.97	17.45	13.25	17.64
	3	9.50	0.72	2.50	7.85	0.54	2.36	17.39	24.68	5.78
	4	10.99	0.43	3.12	9.69	0.40	3.01	11.85	8.89	3.70
	5	12.03	0.69	2.65	11.41	0.64	2.19	5.14	7.30	17.46
هاچینو	1	3.67	0.34	3.67	3.16	0.34	3.16	13.96	0.63	13.96
	2	7.97	0.64	4.30	6.77	0.55	3.64	15.00	13.35	15.28
	3	11.68	0.73	3.71	9.78	0.62	3.33	16.22	14.63	10.44
	4	15.44	0.62	4.36	13.23	0.56	4.08	14.31	9.47	6.44
	5	18.06	0.90	3.47	15.79	0.85	2.85	12.54	5.52	17.79



شکل ۱۱. درصد کاهش پاسخ های بیشینه همه طبقات سازه در زلزله های مختلف در نتیجه پیاده سازی سامانه RITMD.

سامانه RITMD با بهره گیری از خرپشته به عنوان نوسانگر فرعی، رویکردی نوین، کم هزینه و اجرایی برای کنترل لرزه ای ساختمان ها ارائه می دهد. خرپشته که ماهیتی غیرسازه ای و الحاقی دارد، بدون نیاز به تغییرات اساسی در سیستم باربر ساختمان اصلی، تنها بر روی چهار جداساز لرزه ای در تراز بام مستقر می شود. این ویژگی باعث می شود اجرای سامانه در سازه های موجود بدون تخریب یا تغییر جدی در طبقات پایین تر و صرفاً با عملیات محدود در بام امکان پذیر باشد. در مقایسه با روش های مرسوم نظیر جداسازی لرزه ای کل سازه یا به کارگیری TMD ها که نیازمند تعداد زیادی جداساز و یا جرم افزوده قابل توجه هستند، سامانه پیشنهادی با استفاده از جرم موجود خرپشته و تنها چهار جداساز، هزینه بسیار کمتری تحمیل می کند. برآوردهای اقتصادی نیز نشان می دهد که اجرای این سامانه در یک ساختمان پنج طبقه تنها حدود ۳ درصد هزینه ساخت را شامل می شود که آن را به گزینه ای مقرون به صرفه و در دسترس تبدیل می نماید. افزون بر این، سامانه قابلیت کاربرد در هر دو حالت سازه های موجود و ساختمان های در حال طراحی را دارد و می تواند به عنوان روشی مکمل برای کاهش پاسخ های لرزه ای مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، سامانه ای جدید برای کنترل لرزه ای سازه ها با عنوان RITMD مرکب از میراگر جرمی تنظیم شده و جداسازهای لرزه ای پیشنهاد شده است. در این سامانه، خرپشته ساختمان به عنوان نوسانگر فرعی عمل کرده و با نصب جداساز در طبقه خرپشته، امکان جابه جایی های بزرگ فراهم می شود. انرژی لرزه ای به جای انتقال کامل به سازه، به خرپشته منتقل شده و موجب کاهش مؤثر ارتعاشات سازه می گردد. برای بررسی کارایی سامانه پیشنهادی RITMD در کاهش پاسخ های لرزه ای، یک قاب خمشی فولادی ۵ طبقه تحت چهار رکورد

زلزله معروف شامل دو زلزله دور از گسل (ال سنتر و هاچینو) و دو زلزله نزدیک گسل (کوبه و نورت ریج) مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت. مدل سازی اولیه در نرم افزار ETABS و تحلیل های غیرخطی در محیط SeismoStruct صورت گرفت. پارامترهای سامانه RITMD شامل فرکانس، میرایی و سختی، بر اساس ضوابط حاکم بر طرح میراگرهای جرمی تنظیم و تعیین شدند. سامانه مورد نظر به نحوی طراحی شد که در محدوده خطی باقی بماند و در عین حال قابلیت اتلاف انرژی مؤثری را فراهم نماید. نتایج تحلیل ها نشان داد:

(۱) پیاده سازی سامانه RITMD منجر به کاهش مؤثری در پاسخ های لرزه ای قاب شامل جابه جایی های طبقات، شتاب ها، دررفت و برش پایه شده است. در زلزله ال سنتر و، بیشینه جابه جایی طبقات بین ۲۹/۷۸ تا ۳۶/۷۱، شتاب طبقات بین ۱۹/۱۷ تا ۳۸/۵۵ و دررفت طبقات بین ۲۲/۲۱ تا ۳۶/۷۱ کاهش یافت. برای زلزله کوبه نیز، به ترتیب کاهش هایی در حدود ۱۴/۹۰، ۱۷/۳۰ و ۱۷/۵۱ به ترتیب در بیشینه جابه جایی های طبقات، شتاب طبقات و دررفت طبقات مشاهده شد.

(۲) منحنی های هیستریزس به دست آمده از سامانه RITMD در هر دو زلزله حاکی از عملکرد پایدار و باقی ماندن در محدوده الاستیک بودند.

(۳) همچنین، داده های آماری حاصل از نتایج نشان دادند که این سامانه در زلزله های دور از گسل عملکرد بهتری از خود نشان داده است. مقایسه کاهش میانگین پاسخ های لرزه ای در چهار زلزله و برای همه طبقات بررسی شده نشان داد که سامانه RITMD به طور متوسط سبب کاهش ۲۰٪ در جابه جایی طبقات، ۱۵٪ در شتاب طبقات، ۱۸٪ در دررفت طبقات و ۲۰٪ در برش پایه شده است.

(۴) کارایی سامانه RITMD به طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی های دینامیکی زلزله (مانند محتوای فرکانسی، شدت، مدت دوام و نزدیکی به گسل) و نسبت فرکانس طبیعی سازه و نوسانگر فرعی است. به عنوان نمونه، در زلزله ال سنتر و به دلیل هم پوشانی محتوای فرکانسی رکورد با فرکانس تنظیم شده سامانه، بیشترین کارایی میراگر جرمی حاصل شد؛ در حالی که در زلزله های کوبه و نورت ریج به دلیل تفاوت محتوای فرکانسی و وجود پالس سرعتی قوی، عملکرد سامانه کاهش یافت. به طور کلی، این نتایج نشان می دهد که همانند سایر سیستم های کنترل غیرفعال، کارایی RITMD به طور چشمگیری وابسته به مشخصات رکورد زلزله ورودی است.

(۵) در جمع بندی کلی می توان اظهار داشت که استفاده از سامانه RITMD در سازه ها به عنوان یک روش ساده و کم هزینه با امکان اجرا در سازه های موجود و سازه های نو، راهکاری مؤثر برای کاهش خسارات ناشی از زلزله محسوب می شود و موجب ارتقای ایمنی لرزه ای سازه ها خصوصاً در برابر زلزله می گردد.

حمایت مالی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۲۵۶۲۹ انجام شده است.

مراجع

1. Rahimi, F., Aghayari, R., & Samali, B. (2020). Application of tuned mass dampers for structural vibration control: a state-of-the-art review. *Civil Engineering Journal*, 1622-1651.
2. Bakre, S. V., & Jangid, R. S. (2007). Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system. *Structural Control and Health Monitoring*, 14(3), 448-470.
3. Leung, A. Y. T., & Zhang, H. (2009). Particle swarm optimization of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 31(3), 715-728.
4. Marano, G. C., Greco, R., & Chiaia, B. (2010). A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design. *Journal of Sound and Vibration*, 329(23), 4880-4890.
5. Mirzai, N. M., Zahrai, S. M., & Bozorgi, F. (2017). Proposing optimum parameters of TMDs using GSA and PSO algorithms for drift reduction and uniformity. *Structural Engineering and Mechanics*, 63(2), 147-160.
6. Keshtegar, B., & Etedali, S. (2018). Nonlinear mathematical modeling and optimum design of tuned mass dampers using adaptive dynamic harmony search algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(7), e2163.

7. Etedali, S., Akbari, M., & Seifi, M. (2019). MOCS-based optimum design of TMD and FTMD for tall buildings under near-field earthquakes including SSI effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 36-50.
8. Etedali, S. (2020). Ranking of design scenarios of TMD for seismically excited structures using TOPSIS. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14, 1372-1386.
9. Etedali, S. (2022). Probabilistic study on buildings with MTMD system in different seismic performance levels. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 81(4), 429-441.
10. De Luca, A., & Guidi, L. G. (2019). State of art in the worldwide evolution of base isolation design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105722.
11. Jangid, R. S. (2005). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 27(3), 349-359.
12. Jangid, R. S. (2007). Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions. *Engineering Structures*, 29(10), 2503-2513.
13. Huang, P. C., Wan, S., and Yen, J. Y. (2009). A novel method of searching appropriate ranges of base isolation design parameters through entropy-based classification. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(4), 385-405.
14. Etedali, S., Hasankhoie, K., & Sohrabi, M. R. (2020). Optimal design of pure-friction isolators with and without restoring device: A multi-objective cuckoo search-based approach for seismic-excited structures. *Structures*, 25, 708-719.
15. Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., and Alhan, C. (2014). Optimization of seismic isolation systems via harmony search. *Engineering Optimization*, 46(11), 1553-1569.
16. Etedali, S., & Zamani, A. A. (2022). Semi-active control of nonlinear smart base-isolated structures using MR damper: sensitivity and reliability analyses. *Smart Materials and Structures*, 31(6), 065021.
17. Kamalzare, M., Johnson, E. A., and Wojtkiewicz, S. F. (2015). Efficient optimal design of passive structural control applied to isolator design. *Smart structures and systems*, 15(3), 847-862.
18. Villaverde, R. (1998). Roof isolation system to reduce the seismic response of buildings: a preliminary assessment. *Earthquake spectra*, 14(3), 521-532.
19. Villaverde, R., & Mosqueda, G. (1999). Aseismic roof isolation system: analytic and shake table studies. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(3), 217-234.
20. Melkumyan, M.: New Solution in Seismic Isolation. Lusabats, Yerevan (2011). ISBN: 978-9939-808-76-5.
21. Melkumyan, M. (2013). Experimental investigation of efficiency of tuned single and double mass damper and its application in the form of an additional upper floor for seismic protection of existing multistory buildings. *Construction Engineering*, 1(2), 15.
22. Nisticò, N., Gkagka, E. E., & Gantes, C. J. (2015). Roof isolation with tuned mass-based systems and application to a prefabricated building. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 431-442.
23. Marulanda, J., Thomson, P., & Tocoche, J. (2023). Seismic retrofitting of academic buildings using roof isolation as a tuned mass damper. *Ingeniería y competitividad*, 25(1).
24. Rajana, K., & Giaralis, A. (2023). A novel nonlinear isolated rooftop tuned mass damper-inerter (IR-TMDI) system for seismic response mitigation of buildings. *Acta Mechanica*, 234(9), 3751-3777.
25. Applied Technology Council. (2009). Quantification of building seismic performance factors. US Department of Homeland Security, FEMA.