

Performance Evaluation of the Novel Passive Hybrid System Incorporating with Vertical Seismic Isolator and Tuned Mass Damper

Mohammad Amin Fadaie

PhD student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Masoud Nekooei*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mohammadreza Mansouri

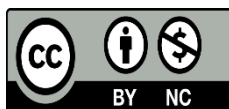
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
nekooei@iau.ac.ir

Keywords

Hybrid seismic control,
Vertical mass isolation,
stiffness subsystem,
mass subsystem,
Tune mass damper,
isolation factor.

Abstract

Vertical Mass Isolation (VMI) is a novel and rapidly developing approach in the seismic control of structures. In this method, the structure is separated into two subsystems—mass and stiffness—which are connected through a damper. The application of a Tuned Mass Damper (TMD) between these subsystems leads to effective vibration control under lateral loads. The hybrid passive control system proposed in this study combines the VMI and TMD mechanisms. Key parameters of the system, including the isolator stiffness, and the frequency and damping ratio of the TMD, are examined under various conditions to achieve optimal performance. The investigated models consist of 5 and 15 story steel structures analyzed under both seismic and harmonic excitations. The results indicate that the proposed hybrid system significantly improves the structural response compared to both the uncontrolled case and the case equipped with VMI alone. Specifically, reductions of 35% in peak mass displacement, 45% in peak base shear, and 30% in peak roof acceleration were observed relative to the uncontrolled structure. Moreover, in comparison with the structure equipped solely with VMI, the corresponding reductions were estimated to be 30%, 26%, and 27.4%, respectively. The proposed system demonstrates notable effectiveness under both seismic and harmonic loading, leading to considerable reductions in roof displacement, base shear, peak drift, and acceleration in both subsystems. Additionally, the overall performance level of the structure is improved, with its behavior remaining predominantly linear, thereby reducing structural responses and potential damage under lateral loads.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

ارزیابی عملکرد سیستم نوین کنترل سازه‌ای غیرفعال ترکیبی شامل جداساز قائم لرزه‌ای و میراگر جرمی تنظیم‌شونده

محمد امین فدائی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مسعود نکویی*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد رضا منصوری

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

nekooei@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۵ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۴

چکیده

روش جداسازی جرمی قائم (VMI) یکی از رویکردهای نوین و درحال گسترش در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها محسوب میشود. در این روش، سازه به دو زیرسیستم جرمی و سختی تفکیک شده و از طریق یک میراگر به یکدیگر متصل می‌شوند. استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD) بر روی این دو زیرسیستم، منجر به کنترل مؤثر ارتعاشات سازه تحت اثر بارهای جانبی می‌شود. سیستم کنترل ترکیبی پیشنهادی در این پژوهش، با ترکیب دو سامانه غیرفعال VMI و TMD ایجاد شده و پارامترهای کلیدی آن، شامل سختی جداساز، فرکانس و میرایی TMD، در شرایط مختلف بررسی شده‌اند تا بیشترین میزان کارایی حاصل گردد. مدل‌های مورد بررسی شامل سازه‌های فولادی ۵ و ۱۵ طبقه بوده که تحت اثر بارهای لرزه‌ای و هارمونیک تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم کنترلی ترکیبی، بهبود چشمگیری در پاسخ لرزه‌ای سازه نسبت به حالت‌های بدون کنترل و تنها با جداسازی جرمی قائم دارد. به‌طور خاص، کاهش ۳۵ درصدی بیشینه تغییر مکان زیرسیستم جرمی، ۴۵ درصدی بیشینه برش پایه و ۳۰ درصدی بیشینه شتاب بام نسبت به سازه بدون جداسازی مشاهده شد. همچنین، در مقایسه با سازه مجهز به جداسازی جرمی قائم، مقادیر متناظر این کاهش‌ها به ترتیب ۳۰، ۲۶ و ۲۷ درصد برآورد شد. کارایی این سیستم برای هردو بارگذاری لرزه‌ای و هارمونیک قابل توجه بوده و منجر به کاهش محسوس تغییر مکان بام، برش پایه، بیشینه دریافت و شتاب در هردو زیرسیستم می‌شود. علاوه بر این، سطح عملکرد کلی سازه بهبود یافته و رفتار آن عمدتاً در محدوده خطی باقی می‌ماند که این امر، کاهش پاسخ سازه و میزان خرابی ناشی از بارهای جانبی را به دنبال دارد.

واژگان کلیدی: سیستم کنترلی ترکیبی، جداساز قائم لرزه‌ای، میراگر جرمی تنظیم‌شونده، جداساز لرزه‌ای، زیرسیستم جرمی و سختی

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

در روش‌های مرسوم طراحی سازه، فلسفه اصلی بردواصل کیددی استواراست: نخست، ایجاد سختی کافی در سازه به منظور کنترل رفتار آن، جلوگیری از وقوع رزونانس، کاهش تغییر مکان جانبی و جلوگیری از تخریب اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای تحت اثر بارهای وارده؛ دوم، تأمین شکل‌پذیری مناسب و ظرفیت جذب انرژی کافی برای جلوگیری از فرو ریزش سازه. در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی برای کنترل، کاهش و هدایت بارهای وارده بر ساختمان توسعه یافته‌اند. یکی از این روش‌های نوین، سیستم کنترلی جداسازی جرمی قائم لرزه‌ای است که با کاهش انتقال انرژی زلزله به سازه، عملکرد لرزه‌ای آن را بهبود می‌بخشد [۱، ۲]. جداساز قائم یک روش نوین کنترل غیرفعال در کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای وارده است. در این روش، سازه به دو زیرسیستم مجزا شامل زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی تفکیک می‌شود. ارتباط این دو زیرسیستم از طریق میراگر برقرار می‌شود. در این تفکیک، زیرسیستم جرمی شامل بخش اعظم جرم سازه بوده، در حالی که زیرسیستم سختی عمده سختی سازه را تأمین می‌کند. این تفکیک امکان کنترل مؤثرتر ارتعاشات سازه را فراهم کرده و منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای آن می‌شود [۳، ۴]. زیرسیستم سختی دارای جرم کمتر و سختی بیشتر، در حالی که زیرسیستم جرمی دارای جرم بیشتر و سختی کمتری نسبت به زیرسیستم سختی می‌باشد. خصوصیات میراگر بین این دو زیرسیستم تأثیر مستقیمی بر پاسخ دینامیکی سازه تحت اثر بارهای وارده دارد. یکی از پارامترهای کیددی در این سیستم، ضریب جداسازی است که تعیین‌کننده نسبت جرم و سختی بین دو زیرسیستم بوده و نقش مهمی در عملکرد سیستم جداسازی جرمی قائم (VMI) ایفا می‌کند. مقدار بهینه این ضریب، تأثیر بسزایی در کنترل ارتعاشات و بهبود عملکرد سازه در برابر بارهای لرزه‌ای و دینامیکی دارد [۵، ۶]. ضریب جداساز جرمی به عنوان نسبت جرم زیرسیستم سختی به جرم زیرسیستم جرمی تعریف می‌شود، درحالی‌که ضریب جداسازی سختی نسبت سختی زیرسیستم جرمی به سختی زیرسیستم سختی می‌باشد. این ضرایب نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سیستم جداسازی جرمی قائم دارند. مشخصات جداساز، از جمله سختی و میرایی، بر اساس مقدار این ضرایب و ویژگی‌های جرم و سختی دو زیرسیستم تعیین می‌شود. انتخاب بهینه این پارامترها تأثیر مستقیمی بر کاهش ارتعاشات سازه، بهبود عملکرد دینامیکی، و کنترل مؤثر نیروهای جانبی ناشی از زلزله و سایر بارهای دینامیکی دارد [۷، ۸]. در این روش، اصل انتقال متناوب به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش پاسخ لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سیستم جداسازی جرمی قائم، زیرسیستم جرمی رفتاری مشابه یک سازه

نرم از خود نشان داده و موجب افزایش زمان تناوب ارتعاشی مؤثر سازه می‌شود. این افزایش دوره تناوب، فاصله گرفتن سازه از فرکانس‌های تحریک و در نتیجه کاهش احتمال وقوع رزونانس را به دنبال دارد و به طور قابل توجهی پاسخ دینامیکی سازه را در برابر نیروهای لرزه‌ای کاهش داده و عملکرد لرزه‌ای آن را بهبود می‌بخشد [۹، ۱۰]. میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD) یکی دیگر از روش‌های کنترل غیرفعال در کاهش ارتعاشات سازه‌ها است. بر اساس پژوهش‌های هارتوق و همکاران، بیشترین کارایی TMD زمانی حاصل می‌شود که فرکانس طبیعی میراگر با فرکانس تحریک اعمال شده به سازه برابر باشد. در این شرایط، TMD به صورت مؤثر انرژی ارتعاشی سازه را جذب کرده و دامنه پاسخ دینامیکی را کاهش می‌دهد. استفاده از این سیستم به ویژه در برابر بارهای تناوبی و لرزه‌ای می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سازه داشته باشد. انتخاب بهینه جرم، سختی و میرایی TMD برای هم‌تراز شدن فرکانس آن با فرکانس سازه، نقش کیددی در کارایی این روش ایفا می‌کند [۱۱، ۱۲]. انتخاب فرکانس مناسب سبب می‌شود که میراگر جرمی تنظیم‌شونده در فاز مقابل ارتعاشی نسبت به سازه اصلی قرار گیرد. این پدیده باعث ایجاد نیروی اینرسی مخالف با حرکت سازه شده و منجر به کاهش دامنه ارتعاشات در سازه اصلی و بهبود عملکرد سیستم می‌گردد. تنظیم بهینه فرکانس TMD نسبت به فرکانس ارتعاشی سازه، عامل کیددی در کارایی این روش کنترلی محسوب می‌شود [۱۳، ۱۴]. از مزایای کیددی میراگر جرمی تنظیم‌شونده می‌توان به عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری ویژه، و قابلیت بهره‌برداری دائمی اشاره کرد. این ویژگی‌ها باعث شده است که این روش به طور گسترده در کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها، به ویژه ساختمان‌های بلندمرتبه، در برابر بارهای متناوب مانند نیروی باد مورد استفاده قرار گیرد [۱۵، ۱۶]. یکی دیگر از مزایای کیددی این سیستم این است که TMD را می‌توان بدون مشکلات اجرایی پیچیده به طبقات سازه، به ویژه به بالاترین طبقه متصل کرد، که این امر اجرای آن را ساده و اقتصادی می‌سازد. به این ترتیب، این روش به ویژه در پروژه‌های بزرگ و بلندمرتبه از محبوبیت بالایی برخوردار است [۱۷، ۱۸]. همچنین فرکانس TMD، به طور مستقیم وابسته به جرم و سختی سازه می‌باشد. این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دینامیکی سازه دارد. برای مثال، با افزایش جرم TMD، کنترل جابجایی و شتاب سازه افزایش می‌یابد، چرا که جرم بیشتر می‌تواند انرژی بیشتری را جذب کند. علاوه بر این، جانمایی TMD در سازه نیز تأثیر چشمگیری در عملکرد آن دارد. انتخاب موقعیت مناسب برای نصب TMD می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش ارتعاشات و بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه داشته باشد. علاوه بر آن نصب TMD در طبقات بالای سازه می‌تواند مؤثرتر باشد، چرا که در این نواحی

۲- مطالعه عددی

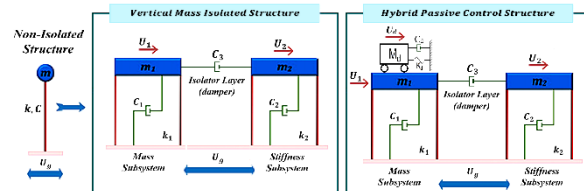
در سیستم کنترلی VMI، سختی، جرم و میرایی از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در تعیین پاسخ سازه نقش دارند. هرگونه تغییر در این پارامترها تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم VMI خواهد داشت. سختی سیستم تأثیر زیادی بر رفتار ارتعاشی سازه دارد و تغییر آن می‌تواند باعث تغییر در فرکانس طبیعی سازه و همچنین نحوه انتقال انرژی به زیرسیستم‌ها شود. جرم به‌طور مستقیم بر میزان انرژی که توسط سیستم جذب و استهلاک می‌شود، تأثیر دارد؛ علاوه بر آن میرایی نیز نقش حیاتی در کاهش دامنه ارتعاشات و کنترل پاسخ سازه دارد. بنابراین، انتخاب و تنظیم بهینه این پارامترها برای عملکرد بهینه VMI ضروری است و تأثیر زیادی بر کارایی سیستم در کنترل ارتعاشات و کاهش پاسخ سازه دارد [۲۳، ۲۴]. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، K ، C و M به ترتیب نمایانگر سختی، میرایی و جرم سازه اصلی هستند. پس از اعمال سیستم جداسازی جرمی قائم، سازه به دو زیرسیستم جرمی و سختی تقسیم می‌شود. در این فرآیند، ضریب جداساز نقش مهمی در تعیین مقدار جرم و سختی هر یک از این زیرسیستم‌ها دارد و با تنظیم پارامترهای مربوطه، تعیین‌کننده میزان جداسازی و ارتباط بین دو زیرسیستم است [۲۵، ۲۶]. هر زیرسیستم در سیستم جداسازی جرمی قائم دارای جرم، سختی و میرایی خاص خود است. به‌طور خاص جرم، سختی و میرایی در زیرسیستم جرمی به ترتیب با نمادهای M_1 ، K_1 و C_1 نمایش داده می‌شوند. برای زیرسیستم سختی، جرم، سختی و میرایی به ترتیب با نمادهای M_2 ، K_2 و C_2 نمایش داده می‌شوند. ارتباط بین این دو زیرسیستم از طریق میراگر C_3 برقرار می‌شود. میراگر باعث انتقال انرژی بین این دو زیرسیستم شده و به کاهش ارتعاشات و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه کمک می‌کند و نقش بسزایی در کنترل و کاهش پاسخ سازه تحت اثر بارهای جانبی ایفا می‌کند [۹، ۲۷]. جابجایی کل سازه، جابجایی‌های زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی به ترتیب با u_1 و u_2 نشان داده می‌شوند. این جابجایی‌ها نشان‌دهنده حرکت نسبی هر زیرسیستم هستند. طبق پژوهش نکویی و همکاران، نیروی میراگر جداساز بین دو زیرسیستم از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. این رابطه، با در نظر گرفتن جابجایی‌ها و ویژگی‌های سیستم (مانند جرم، سختی و میرایی زیرسیستم‌ها)، نیروی ایجاد شده توسط میراگر را تعیین می‌کند [۱، ۲۸].

بردار جابجایی: $\{u\}$ ، بردار سرعت: $\{\dot{u}\}$ ، بردارشتاب: $\{\ddot{u}\}$ ، ماتریس جابجایی میراگر: $[F]$ ، بردار نیروی میراگر: $\{F\}$ ، بردار تأثیر (تمامی المان‌ها عدد یک است): $\{A\}$ ، ضریب جداسازی (α) طبق پژوهش نکویی و همکاران از طریق روابط (۱) تا (۴) محاسبه می‌شود [۲۳].

ارتعاشات بیشتری مشاهده می‌شود [۱۹، ۲۰]. اثرگذاری TMD در زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از زلزله‌های حوزه دور است. در زلزله‌های حوزه نزدیک، به دلیل شدت و فرکانس بالای انرژی لرزه‌ای که به سازه وارد می‌شود، TMD قادر است با جذب انرژی بیشتری از ارتعاشات جلوگیری کرده و پاسخ سازه را به‌طور مؤثری کاهش دهد [۲۱، ۲۲]. به‌طور کلی سیستم جداساز قائم لرزه‌ای سبب افزایش پاسخ زیرسیستم جرمی می‌گردد و خرابی احتمالی در آن نسبت به زیرسیستم سختی بیشتر است. در میراگر جرمی تنظیم‌شونده هم معمولاً بیشترین اثرگذاری در بارهای هارمونیک است. در کل هرکدام از این دو سیستم کنترلی غیرفعال نقاط ضعف و قوت خاص خود را دارند. لذا هنوز نیاز به مطالعات بیشتری در این زمینه وجود دارد. در همین راستا این پژوهش با استفاده از این دو سیستم کنترلی، یک سیستم کنترلی ترکیبی غیرفعال جدیدی ارائه داده است. در این مطالعه با استفاده از TMD سعی در کنترل و بهبود پاسخ زیرسیستم جرمی و سختی شده است. TMD با فرکانس‌های متفاوت و در سازه‌های مختلف بر روی زیرسیستم‌های سازه‌ای در مقابل بارهای مختلف لرزه‌ای و متناوب قرار گرفته است تا بهترین عملکرد حاصل شود. باتوجه به اینکه در سازه‌های با جداساز قائم لرزه‌ای زیرسیستم جرمی از اهمیت جانی بیشتری نسبت به زیرسیستم سختی برخوردار است، بنابراین بهبود پاسخ باید به گونه‌ای باشد که در سیستم نوین کنترلی ترکیبی ارائه‌شده در این پژوهش، پاسخ زیرسیستم جرمی به حداقل مقدار ممکن برسد. همچنین باتوجه به اینکه دو زیرسیستم توسط جداساز از هم مجزا شده‌اند، رفتار این دو زیرسیستم از هم مستقل است و ارتباط آن‌ها با جداساز برقراری گردد. لذا با انتخاب بهترین ضریب و میرایی جداسازی می‌توان مکانیزم‌های ایجادشده در زیرسیستم‌ها را که ناشی از بارهای وارده می‌باشد کنترل نمود. بنابراین در طراحی سازه می‌توان محل و تعداد مفاصل پلاستیک را تا حد زیادی کنترل کرد. با کنترل تعداد و محل تشکیل مفاصل پلاستیک، سطح عملکردی ساختمان بهبود میابد. این ویژگی زمان برگشت‌پذیری ساختمان را کاهش می‌دهد. همچنین با بررسی و مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترلی متفاوت، موثرترین روش در شرایط مختلف بارگذاری شناسایی می‌شود. البته باتوجه به متغیرهای زیاد در این سیستم کنترلی ترکیبی بدست آوردن بهترین آن‌ها چالش مهم و از نکات کلیدی این پژوهش می‌باشد. باید جرم، سختی و میرایی و دیگر متغیرهای زیرسیستم‌ها بررسی و مقدار مناسب آن با مطالعه دقیق عددی بدست آید.

۳- مدل‌سازی ساختاری

در این پژوهش، با بررسی دو سیستم کنترلی غیرفعال میراگر جرمی تنظیم‌شونده و جداساز قائم لرزه‌ای، یک سیستم ترکیبی کنترلی نوین غیرفعال ارائه شده‌است. با بهبود و اصلاح متغیرهای مربوط به هر یک از



شکل ۱- شکل شماتیک سازه یک طبقه جداسازی نشده و جداسازی شده

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = [F]\{F\} - [M]\{\Lambda\}\ddot{U}_g \quad (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_n \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$$

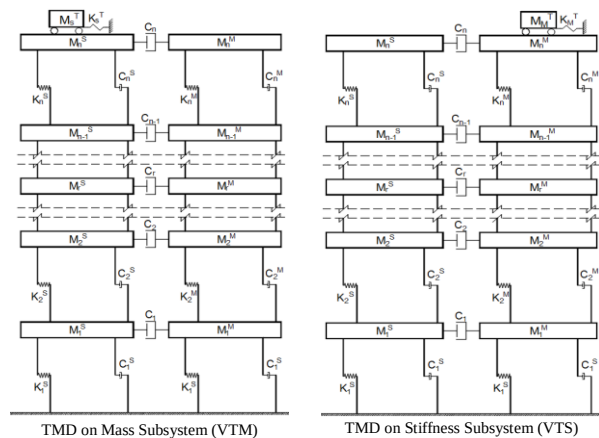
$$\{\ddot{u}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix}, \{\dot{u}\} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix}, \{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \end{bmatrix}, [\Lambda] = \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \end{bmatrix}, [F] = \begin{bmatrix} C_3 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

این سیستم‌ها، سیستم ترکیبی جدیدی با بهره‌وری بالاتر و اصلاح نقاط ضعف سیستم‌های قبلی معرفی گردید. این سیستم جدید در کنترل پاسخ سازه نسبت به سیستم‌های قبلی در برابر بارهای جانبی عملکرد بهتری از خود نشان داده است. در این پژوهش، دو سازه ۵ و ۱۵ طبقه با اسکلت فلزی و سیستم لرزه‌ای قاب خمشی متوسط مورد بررسی قرار گرفته است. کاربری سازه‌ها به‌عنوان سازه‌های مسکونی واقع در شهر تهران در نظر گرفته شده‌است. همچنین، مدل‌ها با استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی و روش انتگرال‌گیری مستقیم تحلیل شده‌اند. مشخصات بارهای لرزه‌ای وارد شده در جدول (۱) آورده شده است. هرکدام از این دو سیستم کنترل لرزه‌ای دارای پارامترهایی از جمله جرم، سختی، میرایی، فرکانس و ... می‌باشند. علاوه بر آن ترکیب این دو سیستم کنترلی تغییراتی در این پارامترها ایجاد می‌کند. بنابراین، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی این تحقیق، کسب مناسب‌ترین پارامترهای در سیستم ترکیبی جدید حاصل از ترکیب این دو سیستم کنترلی است. این کار چالش بزرگی را ایجاد می‌کند، زیرا تغییر در هرکدام از این متغیرها تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ سازه خواهد گذاشت. بنابراین، رسیدن به بهترین متغیرها درحالی‌که پاسخ سازه کنترلی کمینه گردد، نیازمند مطالعه عددی دقیق و بهبود عملکرد متغیرها است. در این پژوهش، با بررسی دو سازه ۵ و ۱۵ طبقه و با توجه به تحقیقات نکویی و ضیایی‌فر، ابتدا سیستم جداساز قائم لرزه‌ای در سازه‌ها اعمال و تأثیر آن بررسی می‌شود. این مراحل می‌تواند به درک بهتری از عملکرد سیستم ترکیبی کمک کند [۲۹]. سپس، سازه جداسازی شده در دو حالت کلی مورد بررسی قرار می‌گیرد: الف)

TMD بر روی زیرسیستم جرمی (VTM)، ب) TMD بر روی زیرسیستم سختی (VTS). در این مراحل، بهترین فرکانس TMD با توجه به زمان‌تناوب سازه‌های جداسازی شده به دست می‌آید. برای رسیدن به بهترین پاسخ، جانمایی TMD بر روی هر دو زیرسیستم سختی و جرمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، فرکانس TMD، میرایی میراگر و میرایی TMD در حالات مختلف تحلیل می‌شود تا به بهترین عملکرد حاصل گردد. بهترین پاسخ زمانی بدست می‌آید که تمام متغیرها از جمله جداساز، فرکانس، جانمایی TMD و بهترین مقادیر سایر پارامترهای مرتبط حاصل گردند. این فرآیند یک مطالعه دقیق عددی و با انجام تحلیل‌های متعدد صورت می‌گیرد تا پاسخ سازه در برابر بارهای لرزه‌ای به حداقل برسد. شکل ۲ نشان دهنده شکل شماتیک سیستم کنترلی ترکیبی برای سازه چند طبقه می‌باشد که در آن درجات آزادی، جرم، سختی و میرایی در آن مشخص شده است. ضیایی‌فر و همکاران با بررسی ضریب جداساز، بهینه‌ترین محدوده برای آن را ۰/۱ تا ۰/۲ شناسایی کردند. در این پژوهش، ضریب جداساز جرمی و سختی برای سیستم به ترتیب حدوداً برابر ۰/۲ و ۰/۱ در نظر گرفته شده

است.



شکل ۲- شکل شماتیک سیستم کنترلی چند طبقه

در این مطالعه، جداساز بر بام هرطبقه نصب گردیده است. همچنین، منحنی نتایج آزمایشگاهی میراگر جداساز برای سازه ۱۵ طبقه تحت بار متناوب در شکل ۳ نشان داده شده است. این نتایج به‌طور مشخص به تحلیل رفتار سازه تحت بارهای متناوب و اثرات عملکرد جداساز در شرایط مختلف بارگذاری کمک می‌کند [۷، ۳۰].

۴- بارهای جانبی

بارهای جانبی اعمالی به سازه شامل بارهای لرزه‌ای و بارهای هارمونیک می‌باشد. بار لرزه‌ای شامل ۱۴ رکورد حوزه نزدیک و ۱۴ رکورد حوزه دور براساس FEMA P-695 است. مشخصات این بارهای لرزه‌ای و مشخصات رکوردهای استفاده‌شده در جدول (۱) آورده شده‌است. این رکوردها برای تحلیل دقیق رفتار سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف (حوزه

دینامیکی و بررسی شرایط متفاوت بارگذاری، نتایج عملی مناسبی برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی شدید ارائه می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات رکوردهای لرزه ای انتخابی

Record No.	Earthquake Name	PGA (g)	M	Record No.	Earthquake Name	PGA (g)	M
Far Field				Near Field			
F ₁	Chi-Chi-Taiwan	0.51	7.6	F ₁₅	Cape Mendocino	1.43	7
F ₂	Cape Mendocino	0.55	7	F ₁₆	Chi-Chi, Taiwan	0.56	7.6
F ₃	Fruli, Italy	0.35	6.5	F ₁₇	Chi-Chi, Taiwan	1.16	7.6
F ₄	Hector Mine	0.34	7.1	F ₁₈	Gazli, USSR	0.71	6.8
F ₅	Kobe, Japan	0.51	6.9	F ₁₉	Loma Prieta	0.64	6.9
F ₆	Kocaeli, Turkey	0.22	7.5	F ₂₀	Loma Prieta	0.51	6.9
F ₇	Landers	0.24	7.3	F ₂₁	Nahanni, Canada	1.18	6.8
F ₈	Loma Prieta	0.56	6.9	F ₂₂	Nahanni, Canada	0.45	6.8
F ₉	Majil, Iran	0.51	7.4	F ₂₃	Denali, Alaska	0.33	7.9
F ₁₀	Northridge	0.52	6.7	F ₂₄	Cape Mendocino	0.63	7
F ₁₁	Northridge	0.48	6.7	F ₂₅	Chi-Chi, Taiwan	0.29	7.6
F ₁₂	San Fernando	0.21	6.6	F ₂₆	Imperial Valley-06	0.46	6.5
F ₁₃	Superstition Hills	0.36	6.5	F ₂₇	Landers	0.79	7.3
F ₁₄	TABAS	0.86	7.35	F ₂₈	Northridge-01	0.73	6.7

جدول ۲ ضریب مقیاس زلزله ها برای سازه های چند درجه آزاد

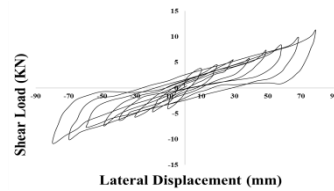
Model Name	5 Story	15 Story
Scale Factor	1.37	1.43

۵- نتایج عددی

سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل ۵ و ۱۵ طبقه بوده و هر سازه در شش حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است: حالت اول: سازه جداسازی نشده (MDOF)، حالت دوم: سازه جداسازی شده (VMI)، حالت سوم: سازه جداسازی شده و TMD بر روی سازه سخت (VTS)، حالت چهارم: سازه جداسازی شده و TMD بر روی سازه جرمی (VTM)، حالت پنجم: TMD با میرایی ۵ درصد بر روی سازه سخت (VTSD)، حالت ششم: TMD با میرایی ۵ درصد بر روی سازه جرمی (VTMD)، تفاوت میان حالت‌های ۳ و ۴ با حالت‌های ۵ و ۶ در میرایی ذاتی TMD است. در حالات ۳ و ۴، TMD بدون میرایی در نظر گرفته شده است، در حالی که در حالات ۵ و ۶ TMD دارای میرایی است، تا تأثیر آن در سیستم کنترلی ترکیبی مورد بررسی قرار گیرد. برای بهبود کارایی TMD، جانیایی آن بر روی سقف بام آخرین طبقه می باشد. این جانیایی به‌ویژه در سازه‌های بلندمرتبه اهمیت زیادی دارد، زیرا در این طبقات ارتعاشات بیشتری ایجاد می‌شود [۱۲، ۳۳]. در این تحقیق، سازه‌ها در حالات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تلاش شده است تا بهترین متغیرهای سیستم استخراج شود. نتایج ارائه شده علاوه بر این، اثر میرایی TMD و جانیایی TMD بر پاسخ و رفتار سازه در حالت‌های مختلف نیز به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. این تحلیل‌ها به درک بهتر از کارایی TMD

نزدیک و دور) استفاده می‌شوند و به کمک آن‌ها می‌توان پاسخ دینامیکی سازه در برابر انواع بارهای جانبی را بررسی کرد [۳۱]. رکوردهای زلزله براساس نوع خاک سازه و سرعت موج برشی در خاک مورد نظر انتخاب شده‌اند. سازه در شهر تهران و در خاک نوع ۲ با خطر نسبی زلزله خیلی زیاد واقع شده است و انتخاب رکورد زلزله و طراحی سازه اصلی بر این اساس انجام شده است. این انتخاب‌ها به منظور ارزیابی مناسب‌تر عملکرد سازه در برابر بارهای لرزه‌ای و اطمینان از تطابق با شرایط واقعی زمین‌شناسی و لرزه‌ای منطقه صورت گرفته است.

علاوه بر بار لرزه‌ای، تحریک سینوسی با فرکانس برابر فرکانس مود اول انتقالی سازه اعمال می‌شود که آن را در حالت رزونانس قرار می‌دهد و بیشترین نیروی جانبی ممکن را به سازه اعمال می‌کند. این روش بمنظور ایجاد شرایط بحرانی و ارزیابی عملکرد سازه تحت بارهای حداکثری استفاده می‌شود.



شکل ۳- منحنی رفتار میراگر جداساز ۱۵ طبقه [۲]

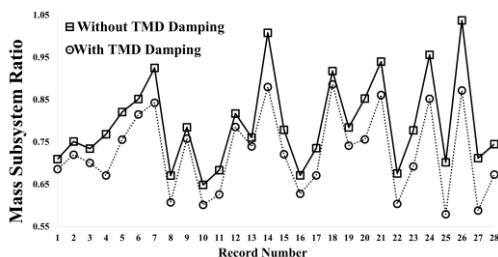
فرکانس بار هارمونیک برای سازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه بطور جداگانه محاسبه و اعمال شده است (با توجه به مود اول انتقالی آن‌ها). از آنجایی که آنالیزهای انجام شده غیرخطی هستند، همپایه کردن رکورد شتاب‌ها ضروری است. بنابراین، شکل (۴) نمودار همپایه شده زلزله‌های اعمالی به سازه ۵ طبقه را نشان می‌دهد که بر اساس ASCE/SEI 7-16, 2017 و با فرض نسبت میرایی ۵ درصد تنظیم شده است [۳۲]. تمامی رکوردهای زلزله در سازه با توجه به جدول ۲ برای سازه ۵ و ۱۵ طبقه براساس استاندارد ۲۸۰۰ همپایه‌سازی شده‌اند، که به تحلیل دقیق‌تر و مقایسه صحیح پاسخ‌های دینامیکی سازه در برابر بارهای لرزه‌ای کمک می‌کند. این روش اطمینان می‌دهد که تمامی رکوردهای زلزله بطور یکسان و براساس شرایط مشابه همپایه شده‌اند تا نتایج تحلیل‌ها معتبر و قابل اعتماد باشند.

نکویی و همکاران طی یک پژوهش بر روی سازه جداسازی شده، میرایی جداساز را در سه حالت مختلف بررسی کرده‌اند. C_{opt} : برای بهینه‌ترین پاسخ (برش پایه و تغییرمکان)، C_{fmin} : برای پاسخ حداقل برش پایه، C_{xmin} : پاسخ حداقل تغییرمکان. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در پاسخ سازه‌ها در این سه حالت است. در این تحقیق، سازه برای حالت C_{opt} مورد بررسی قرار گرفته است، که دارای بالاترین میرایی در ضرایب جداسازی مختلف می‌باشد [۲۴]. هر ضریب جداساز برای تمامی سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا بهترین نتایج در برابر بارهای جانبی حاصل شود. این پژوهش به کمک تحلیل‌های

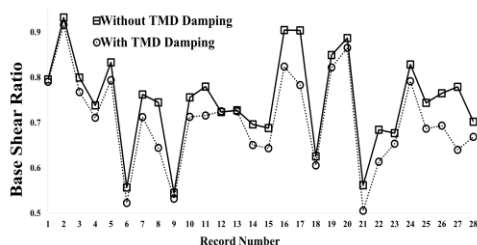
در شرایط مختلف بارگذاری و تاثیر آن بر بهبود عملکرد سازه کمک کرده‌اند. نمودارها و جداول زیر نتایج سازه‌ها تحت اثر بارهای جانبی وارده را نمایش می‌دهند.

۵-۱ بار لرزه ای

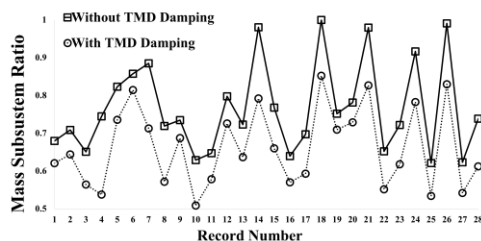
۵-۱-۱ نتایج سازه پنج طبقه



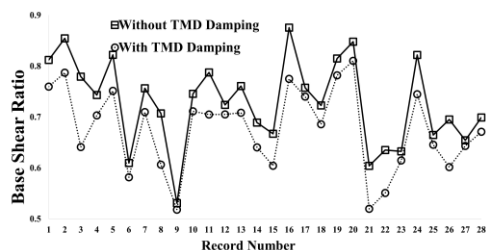
شکل ۴- نسبت بیشینه جابجایی بام زیرسیستم جرمی VTSD به MDOF - ۵ طبقه



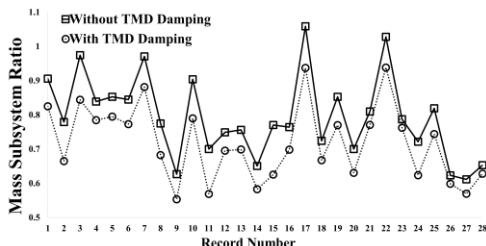
شکل ۵- نسبت بیشینه برش پایه VTSD به MDOF - ۵ طبقه



شکل ۶- نسبت بیشینه جابجایی بام زیرسیستم جرمی VTMD به MDOF - ۵ طبقه



شکل ۷- نسبت بیشینه برش پایه VTMD به VMI و MDF - ۵ طبقه

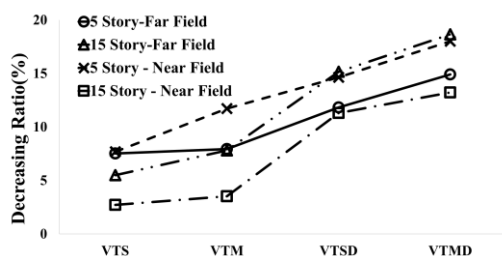


شکل ۸- نسبت بیشینه جابجایی بام زیرسیستم جرمی VTSD به MDOF - ۱۵ طبقه

اشکال ۴ تا ۱۵ بیانگر نتایج مدل‌های مورد بررسی از جمله بیشینه تغییر مکان بام، بیشینه برش پایه، بیشینه شتاب بیشینه دررفت طبقات سازه‌ها می‌باشد. بررسی نتایج بدست‌آمده در سازه ۵ طبقه نشان‌دهنده کاهش پاسخ در مقایسه با سیستم‌های کنترل نشده است. برای زلزله حوزه دور، تغییر مکان بام در سازه‌های جرمی VTSD حدود ۱۳ تا ۴۰ درصد و در سازه‌های سختی حدود ۴۰ تا ۷۶ درصد کاهش نسبت به MDOF داشته که در اشکال ۴ تا ۷ آمده است. برای زلزله حوزه دور، تغییر مکان بام در سازه‌های جرمی VTSD حدود ۱۳ تا ۴۰ درصد و در سازه‌های سختی حدود ۴۰ تا ۷۶ درصد کاهش نسبت به MDOF داشته است. این میزان برای ۴۳ تا ۷۰ درصد است. میزان کاهش برش پایه برای VTSD حدود ۱۰ تا ۴۸ درصد و برای VTMD بین ۲۱ تا ۵۰ درصد به ترتیب برای زیرسیستم‌های جرمی و سختی است.

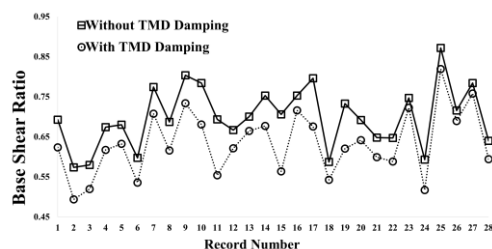
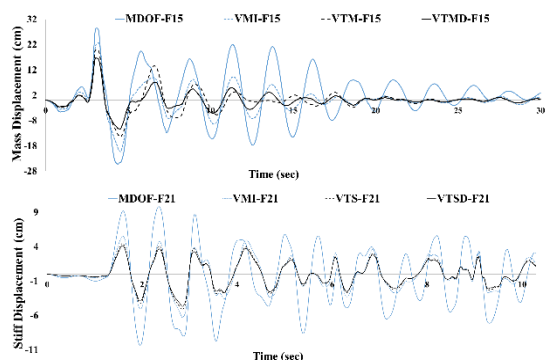
۵-۱-۲ نتایج سازه پانزده طبقه

اشکال ۸ تا ۱۶ بیانگر نتایج سازه های ۱۵ طبقه تحت بارهای جانبی می‌باشد. با توجه به اشکال ۸ و ۱۰، در زلزله حوزه نزدیک، کاهش تغییر مکان زیرسیستم جرمی برای VTSD بین ۱۲ تا ۴۲ درصد و برای VTMD بین ۱۵ تا ۴۶ درصد است. به همین صورت، کاهش تغییر مکان زیرسیستم سختی در VTSD حدودا ۳۹ تا ۶۷ درصد و در VTMD بین ۴۳ تا ۶۸ درصد می‌باشد. کاهش برش پایه در زلزله حوزه نزدیک برای VTSD بین ۱۴ تا ۴۹ درصد و برای VTMD بین ۱۹ تا ۴۷ درصد است. این کاهش در زلزله حوزه دور به ترتیب ۱۹ تا ۴۷ و ۲۲ تا ۵۲ درصد می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم کنترلی ترکیبی در کاهش پاسخ دینامیکی سازه، به ویژه در برابر بارهای لرزه‌ای، و اثربخشی این روش در کاهش ارتعاشات و بهبود عملکرد سازه در شرایط مختلف است. با بررسی نتایج حاصله از سازه ۱۵ طبقه و اشکال ۱۱ تا ۱۵، بیشینه تغییر مکان بام در زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی در زلزله حوزه نزدیک در سازه VTSD به ترتیب حدود ۱۲ تا ۴۵ و ۲۳ تا ۵۴ درصد کاهش داشته است. در سیستم VTMD این کاهش به ترتیب ۲۴ تا ۵۷ و ۳۶ تا ۶۰ درصد نسبت به MDOF مشاهده می‌شود. کاهش برش پایه در سیستم‌های VTSD و VTMD در زلزله حوزه دور به ترتیب ۲۷ تا ۵۱ و ۲۹ تا ۵۷٪

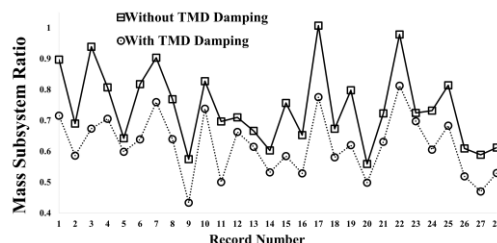


شکل ۱۴- نسبت میانگین کاهش بیشینه برش پایه نسبت به VMI

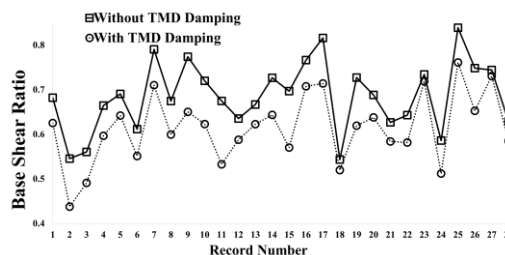
است. اما در زلزله حوزه نزدیک برای سازه ۱۵ طبقه، کاهش تغییر مکان زیرسیستم جرمی در دو سیستم کنترلی VTSD و VTMD به ترتیب ۷ تا ۴۳ و ۱۹ تا ۵۳ درصد می‌باشد. همچنین، تغییر مکان زیر سیستم سختی برای دوسیستم کنترلی VTSD و VTMD به ترتیب ۳۲ تا ۶۳ و ۳۱ تا ۶۷ درصد نسبت به MDOF کاهش یافته‌است. تغییرات برش پایه کل در دو سیستم VTSD و VTMD در زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۱۹ تا ۴۸ و ۲۴ تا ۴۹ درصد نسبت به MDOF کاهش داشته‌است. کاهش شتاب در زیرسیستم جرمی در دو سیستم کنترلی VTSD و VTMD به ترتیب ۲۷ تا ۶۸ و ۳۳ تا ۶۷ درصد در زلزله حوزه دور و به ترتیب ۱۴ تا ۴۴ و ۲۰ تا ۴۸ درصد در زلزله حوزه نزدیک مشاهده شده‌است. نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم‌های ترکیبی در کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ها، به‌ویژه در برابر لرزه ای حوزه دور و نزدیک، و تأثیر این سیستم در کاهش تغییر مکان‌ها، برش پایه و شتاب سازه است. همچنین، این سیستم به‌طور مؤثری عملکرد سازه را در شرایط بارگذاری مختلف بهبود می‌بخشد. در این پژوهش، با بررسی TMD در دو حالت با و بدون میرایی، میزان اثرگذاری میرایی TMD بر عملکرد سیستم کنترلی ترکیبی غیرفعال مورد بررسی قرار گرفت. پس از تجزیه و تحلیل میرایی‌های مختلف TMD، میرایی ۵ درصد برای TMD انتخاب گردید. با بررسی نتایج VTS با VTSD و VTM با VTMD، تغییرات قابل‌توجهی در بیشینه تغییر مکان بام، بیشینه برش پایه، بیشینه شتاب و بیشینه دررفت مشاهده می‌شود.



شکل ۹- نسبت بیشینه برش پایه VTSD به MDOF - ۱۵ طبقه



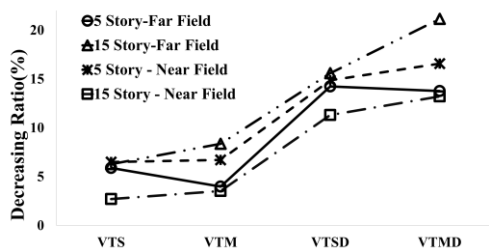
شکل ۱۰- نسبت بیشینه جابجایی بام زیرسیستم جرمی VTMD به MDOF - ۱۵ طبقه



شکل ۱۱- نسبت بیشینه برش پایه VTSD به MDOF - ۱۵ طبقه



شکل ۱۲- نسبت میانگین کاهش بیشینه جابجایی زیرسیستم جرمی نسبت به VMI



شکل ۱۳- نسبت میانگین کاهش بیشینه جابجایی زیرسیستم سختی نسبت به VMI

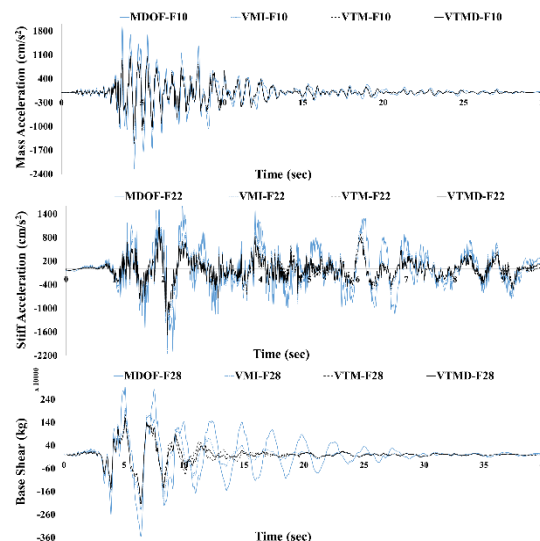
به VTS و VTM به ترتیب ۷ و ۱۱ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۷ و ۹ درصد کاهش یافته است. همچنین، برش پایه کل به ترتیب ۶ و ۵ درصد کاهش داشته است. میانگین کاهش بیشینه شتاب زیرسیستم جرمی به ترتیب ۷ و ۸ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۸ و ۹ درصد است. این تغییرات برای هردو طیف زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نشان‌دهنده بهبود چشمگیر عملکرد سازه‌ها می‌باشد. اشکال ۱۳ و ۱۴ نشان‌دهنده میانگین درصد کاهش بیشینه تغییرمکان بام نسبت به MDOF می‌باشد. بررسی نتایج به دست آمده از اشکال ۱۳ تا ۱۵ بیانگر آن است که سیستم کنترلی ترکیبی غیرفعال ارائه شده در این پژوهش، دارای اثرگذاری خوب و کارایی بالایی در بهبود رفتار سازه در برابر بارهای لرزه‌ای و هارمونیک دارد. این عملکرد نشان‌دهنده پتانسیل بالای سیستم کنترلی ترکیبی در کاهش ارتعاشات و افزایش ایمنی سازه‌ها در شرایط زلزله‌های با شدت‌های مختلف است.

جدول ۳- میانگین درصد کاهش بیشینه جابجایی بام در مقایسه با سازه جداسازی نشده

		VTS(%)		VTM(%)		VTSD(%)		VTMD(%)	
		mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff
5	far	24.3	52.8	30.2	51.8	27.2	55.1	34.8	55.1
	near	21.8	47.5	26.1	48.4	27.7	51.6	32.8	52.8
15	far	21.6	40	29.9	43	27.6	44.4	37.2	48.2
	near	23.7	46	31.6	46.1	28.8	49.8	39	50.6
average		22.9	46.6	29.5	47.3	27.8	50.2	36.0	51.7

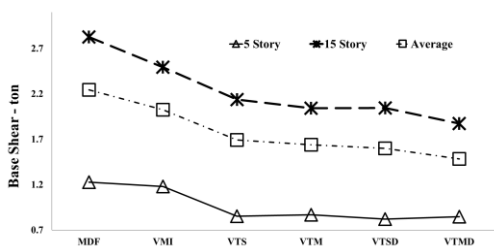
Mass: زیرسیستم جرمی، stiff: زیرسیستم سختی، st: طبقه، far: حوزه دور، near: حوزه نزدیک

همان‌طور که از اشکال ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ مشخص است، سیستم کنترلی ترکیبی موجب کاهش چشمگیر برش پایه نسبت به MDOF و VMI می‌شود. میرایی TMD تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سیستم دارد و منجر به کاهش بیشتر پاسخ سازه می‌گردد. جداول ۳ و ۴ نتایج مقایسه بیشینه تغییرمکان بام، بیشینه برش پایه و بیشینه شتاب است و در شکل ۱۵ به صورت تصادفی نتایج تاریخچه زمانی تعدادی از رکوردها لرزه ای را در سیستم‌های مختلف کنترلی باهم مقایسه می‌کند. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، استفاده از سیستم کنترلی نوین ترکیبی، سبب کاهش شدید بیشینه پاسخ سازه، به‌ویژه در برش پایه و تغییرمکان می‌شود. این دستاورد منجر به کاهش چشمگیر خرابی‌های ناشی از زلزله شده و در نتیجه، بهبود عملکرد سازه و افزایش قابلیت بازگشت‌پذیری آن را می‌شود. جدول ۴ نشان‌دهنده درصد کاهش بیشینه شتاب در زیرسیستم‌های مختلف سازه شامل VMI، VTS، VTM، VTSD و VTMD نسبت به MDOF می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که به‌طور میانگین در سازه ۵ طبقه، شتاب بام زیرسیستم جرمی و سختی به ترتیب ۳۳ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. در سازه ۱۵ طبقه، این کاهش برای زیرسیستم جرمی ۱۰ و برای زیرسیستم سختی ۲ درصد بوده است. با مقایسه شتاب سازه در دو حالت با و بدون میرایی TMD در سازه ۵ طبقه، میانگین کاهش شتاب ۵ و ۶ درصد به ترتیب برای زلزله حوزه دور و نزدیک است. در سازه ۱۵ طبقه، این کاهش به ترتیب ۱۱ و ۸ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم کنترلی ترکیبی در کاهش شتاب هر دو زیرسیستم جرمی و سختی مؤثر است، اما این کاهش در زیرسیستم جرمی بیشتر از زیرسیستم سختی می‌باشد.



شکل ۱۵- نتایج تاریخچه زمانی سازه جداسازی شده و جداسازی نشده تحت بار لرزه‌ای

این تغییرات در اشکال ۵ تا ۱۵ آورده شده است، که نشان‌دهنده تأثیرات میرایی بر بهبود عملکرد سازه تحت بارهای لرزه‌ای و هارمونیک است و به‌وضوح اثر میرایی TMD در کاهش ارتعاشات سازه و بهبود عملکرد سیستم کنترلی ترکیبی در برابر بارهای جانبی را نشان می‌دهند. در سازه ۵ طبقه و زلزله حوزه دور، میانگین کاهش پاسخ تغییرمکان بام زیرسیستم جرمی برای VTSD و VTMD نسبت به VTS و VTM به ترتیب ۴ و ۷ درصد بوده و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۵ و ۷ درصد کاهش داشته است. برش پایه کل نیز به ترتیب ۲ و ۴ درصد کاهش می‌یابد. میانگین کاهش شتاب زیرسیستم جرمی به ترتیب ۳ و ۶ درصد بوده و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۳ و ۷ درصد است. در زلزله حوزه نزدیک برای سازه ۵ طبقه، میانگین کاهش تغییرمکان بام زیرسیستم جرمی برای VTSD و VTMD نسبت به VTS و VTM به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۶ و ۸ درصد است. همچنین، برش پایه حدوداً ۴ درصد کاهش داشته است. علاوه بر آن میانگین کاهش شتاب برای زیرسیستم جرمی به ترتیب ۵ و ۶ درصد بوده و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۷ و ۶ درصد کاهش مشاهده می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر میرایی TMD در بهبود عملکرد سیستم کنترلی ترکیبی در کاهش تغییرمکان، برش پایه و شتاب در سازه ۵ طبقه است و اثربخشی این سیستم را در برابر بارهای لرزه‌ای و هارمونیک تایید می‌کند. در سازه ۱۵ طبقه و در زلزله حوزه دور، میانگین کاهش بیشینه تغییرمکان بام زیرسیستم جرمی برای VTSD و VTMD نسبت به VTS و VTM به ترتیب ۱۱ و ۱۶ درصد بوده و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد است. همچنین، برش پایه کل به ترتیب ۱۰ و ۱۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. همچنین میانگین کاهش شتاب زیرسیستم جرمی به ترتیب ۱۰ و ۱۱ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۱۰ و ۱۲ درصد کاهش داشته است. در زلزله حوزه نزدیک برای سازه ۱۵ طبقه، میانگین کاهش بیشینه تغییرمکان بام زیرسیستم جرمی برای VTSD و VTMD نسبت



شکل ۱۶- نتایج برش پایه - بارهارمونیک

دربرسی اثر میرایی TMD برپاسخ سازه تحت بارهارمونیک، درسازه ۵ طبقه، کاهش بیشینه تغییرمکان بام زیرسیستم جرمی و سختی به ترتیب ۱۲ و ۱۳ درصد بوده و درسازه ۱۵ طبقه، این کاهش برای زیرسیستم جرمی و سختی به ترتیب ۱۱ و ۷ درصد می‌باشد. همچنین کاهش بیشینه شتاب درسازه ۵ طبقه زیرسیستم جرمی و سختی به ترتیب ۸ و ۱۹ درصد و در سازه ۱۵ طبقه به ترتیب ۳ و ۸ درصد است. کاهش بیشینه برش پایه ناشی از میرایی TMD درسازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۳ و ۶ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر میرایی TMD در کاهش پاسخ سازه تحت بارهارمونیک بیشتر از لرزه ای است. به عنوان مثال، شتاب دربارهارمونیک در برخی موارد تا ۴۲ درصد کاهش یافته است. یکی از موارد مورد بررسی در این پژوهش، بیشینه دررفت طبقات است که نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است. دررفت در شرایط بارهارمونیک و زلزله مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که سیستم کنترلی ترکیبی غیرفعال کاهش قابل توجهی در بیشینه دررفت طبقات ایجاد می‌کند. با توجه به جدول ۷ کاهش بیشینه دررفت زیرسیستم جرمی سازه ۵ طبقه VTSD، VTM، VTMD و VTSD به ترتیب ۹، ۲۲، ۳۶، ۲۷ و ۳۹ درصد، زیرسیستم سختی به ترتیب ۵۵، ۵۴، ۶۱، ۶۰ و ۵۹ درصد است و کاهش بیشینه دررفت زیرسیستم جرمی درسازه ۱۵ طبقه به ترتیب ۱۶، ۲۰، ۱۵، ۲۳ و ۲۲ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۶۲، ۶۳، ۶۳ و ۶۴ درصد است.

جدول ۶- میانگین بیشینه شتاب طبقات - بار لرزه ای

	MDF	VTS		VTM		VTSD		VTMD	
		a(cm/s ²)							
		mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff
5st	1103.7	1049	917	915	869	934	830	866	788
15st	417.7	385	373	360	306	374	342	346	281
Ratio 5 st	1	0.95	0.83	0.83	0.79	0.85	0.75	0.78	0.71
Ratio 15 st	1	0.92	0.89	0.86	0.73	0.89	0.82	0.83	0.67
Ave	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7

Mass: زیرسیستم جرمی، Stiff: زیرسیستم سختی، St: طبقه

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع سازه، تأثیرسیستم کنترلی بر کاهش دررفت افزایش می‌یابد. این اثرگذاری به طور میانگین زیرسیستم جرمی بیشتر است. همچنین، میزان کاهش دررفت در بارهای لرزه‌ای بیشتر از بار هارمونیک است و سیستم کنترلی ترکیبی در زلزله‌های حوزه دور عملکرد بهتری نسبت به حوزه نزدیک دارد.

همچنین، تأثیر این کاهش در سازه ۵ طبقه محسوس تر از سازه ۱۵ طبقه است، که نشان دهنده عملکرد بهتر این سیستم در کاهش شتاب سازه‌های کوتاه مرتبه می‌باشد.

جدول ۴- میانگین درصد کاهش بیشینه شتاب در مقایسه با سازه جداسازی نشده

		VTS(%)		VTM(%)		VTSD(%)		VTMD(%)	
		mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff
5 st	far	27.8	23.2	30	22.2	29.8	25.7	33.8	26.9
	near	28.6	28.1	33.2	31.5	32	32.7	36.6	36.6
15 st	far	20	11.6	25.5	3.9	26.2	2.3	31	5.2
	near	14	11.2	17.1	6.2	20	1.8	22.9	3.2
average		22.6	25.7	26.5	26.9	27	29.2	31.1	17.9

Mass: زیرسیستم جرمی، Stiff: زیرسیستم سختی، St: طبقه، far: حوزه دور، near: حوزه نزدیک

۵-۲- بارهارمونیک

بارهارمونیک اعمالی همان گونه که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، به صورت سینوسی است که فرکانس آن برابر با فرکانس مود اول انتقالی سازه می‌باشد و سیستم را در محدوده رزونانس قرار می‌دهد و باعث ایجاد تغییرمکان‌های بزرگ در آن می‌شود. سیستم کنترلی غیرفعال ترکیبی با جذب و کنترل انرژی ارتعاشی، موجب کاهش قابل توجه پاسخ سازه در برابر بارهارمونیک می‌گردد. با توجه به جداول ۵، ۶ و ۷ و شکل ۱۶، سیستم مورد مطالعه باعث کاهش شدید در پارامترهای کلیدی سازه، شامل بیشینه تغییرمکان بام، بیشینه شتاب، بیشینه دررفت طبقات و بیشینه برش پایه کل می‌شود و عملکرد موثری در بهبود پایداری سازه و کاهش اثرات نامطلوب بارهای دینامیکی دارد. درسازه ۵ طبقه، کاهش بیشینه تغییرمکان بام در زیرسیستم جرمی برای VTSD و VTMD به ترتیب ۳۶ و ۴۸ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۴۷ و ۵۹ درصد مشاهده شده است. کاهش بیشینه شتاب زیرسیستم جرمی به ترتیب ۱۵ و ۲۲ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد است. علاوه بر آن، کاهش بیشینه برش پایه به ترتیب ۳۳ و ۳۱ درصد برای VTSD و VTMD است. درسازه ۱۵ طبقه، کاهش بیشینه تغییرمکان بام زیرسیستم جرمی برای VTSD و VTMD به ترتیب ۳۳ و ۳۷ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۳۵ و ۵۰ درصد می‌باشد. کاهش بیشینه شتاب زیرسیستم جرمی به ترتیب ۱۱ و ۱۷ درصد و در زیرسیستم سختی به ترتیب ۱۸ و ۳۳ درصد است. کاهش بیشینه برش پایه کل به ترتیب ۲۸ و ۳۴ درصد برای VTSD و VTMD است.

جدول ۵- نتایج بیشینه جابجای بام - بارهارمونیک

	MDF	VTS (cm)		VTM (cm)		VTSD (cm)		VTMD (cm)	
		mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff
5 st	(cm)	39.8	27.5	23	24.9	19.5	25.6	20.8	16.4
15 st	115.9	88.1	79.7	81.6	63.3	77.9	75.7	72.7	57.9
5 st Reduction (%)	-	31	42	38	51	36	47	48	59
15 st Reduction (%)	-	24	31	30	45	33	35	37	50
Ave Red (%)	-	27.5	36.5	34	48	34.5	41	42.5	54.5

Mass: زیرسیستم جرمی، Stiff: زیرسیستم سختی، St: طبقه

جدول ۷- نتایج میانگین پیشینه دریافت طبقات

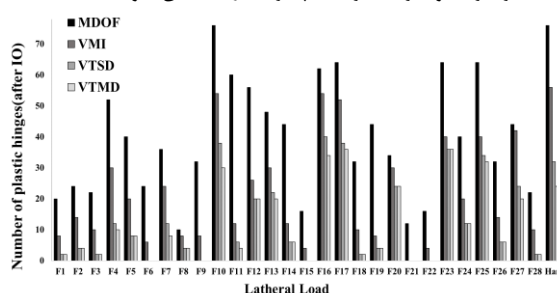
	MDOF		VTS		VTM		VTSD		VTMD	
	(mm)	mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff	mass	stiff	
Far field										
5st										
Dr _{avg}	36.5	32.5	15.3	25	14.9	32.1	15.4	24.2	13.8	
Ratio	1	0.89	0.42	0.68	0.41	0.88	0.42	0.66	0.38	
15st										
Dr _{avg}	32.6	23.4	13.1	28.1	12.9	22.5	12.8	26.7	12.6	
Ratio	1	0.72	0.4	0.86	0.4	0.69	0.39	0.82	0.39	
Near field										
5st										
Dr _{avg}	25.6	21.5	11.7	17.9	9.4	19.4	9.8	16.6	10.2	
Ratio	1	0.84	0.46	0.7	0.37	0.76	0.38	0.65	0.4	
15st										
Dr _{avg}	35.8	32.3	14.1	28.9	14.1	32.6	13.8	26.8	13.6	
Ratio	1	0.9	0.39	0.81	0.39	0.91	0.39	0.75	0.38	
Harmonic Load										
5st										
Dr _{avg}	41.9	25.5	20.5	22.2	16.6	22.7	16.6	22	17.9	
Ratio	1	0.61	0.49	0.53	0.4	0.54	0.4	0.53	0.43	
15st										
Dr _{avg}	33.4	26.4	10.7	29	10.6	23.3	9.6	26.2	10.5	
Ratio	1	0.79	0.32	0.87	0.32	0.7	0.29	0.78	0.31	
Ratio _{avg}	1	0.79	0.41	0.74	0.38	0.75	0.38	0.7	0.37	

Mass: زیرسیستم جرمی، Stiff: زیرسیستم سختی، Dr_{avg}: میانگین دریافت

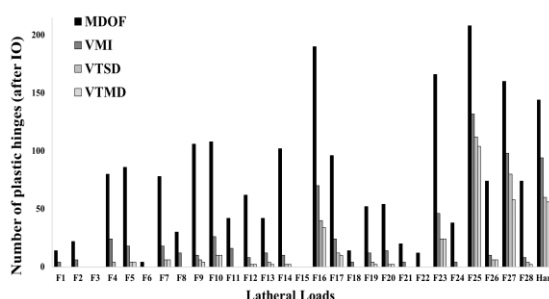
۵-۳ سطوح عملکرد سازه

تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سیستم‌های سازه ای در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در این اشکال، تعداد مفاصل بالاتر از سطح عملکرد LS برای بارهای جانبی (زلزله و هارمونیک) ارائه شده است و از ارائه نتایج مربوط به مفاصل IO صرف نظر شده است. تعریف مفاصل پلاستیک مطابق با استاندارد ASCE/SEI 7-16, 2017 انجام شده است [۳۳]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دهنده کاهش قابل توجه تعداد مفاصل پلاستیک در سیستم کنترلی ترکیبی نسبت به سازه‌های جداسازی شده و جداسازی نشده است. در سازه ۵ طبقه، تعداد مفاصل پلاستیک نسبت به سیستم جداسازی نشده به ترتیب ۵۰ درصد برای VMI، ۷۴ درصد برای VTSD و ۷۶ درصد برای VTMD کاهش داشته است. این کاهش در سازه ۱۵ طبقه به ترتیب ۷۵، ۹۱ و ۹۳ درصد است. کاهش تعداد مفاصل پلاستیک در زیرسیستم جرمی بیشتر از زیرسیستم سختی می باشد. علاوه بر آن، سطح عملکرد زیرسیستم جرمی نسبت به زیرسیستم سختی در برابر بارهای جانبی بالاتر و عمدتاً در محدوده خطی و IO باقی مانده است. از آنجایی که زیرسیستم جرمی محل سکونت افراد است، ایمنی جانی (Life Safety) در این سامانه نسبت به زیرسیستم سختی از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، سطح عملکرد به دست آمده در سیستم کنترلی ترکیبی پیشنهادی، نشان دهنده کارایی بسیار بالای آن در کنترل رفتار سازه است. علاوه بر آن، اثرگذاری سیستم کنترلی ترکیبی در کاهش تعداد مفاصل پلاستیک تحت هردو بارگذاری لرزه ای و هارمونیک کاملاً مشهود است اما بررسی نتایج نشان می دهد که سیستم کنترلی ترکیبی در بارهای لرزه ای عملکرد بهتری نسبت به هارمونیک دارد. علاوه بر آن رفتار دو زیرسیستم را می توان با تغییر در مقدار عددی جداساز تغییر داد. این ویژگی سبب می شود که بتوان تعداد مفاصل پلاستیک و محل تشکیل آن ها را تغییر داد. با افزایش میرایی جداساز تعداد مفاصل پلاستیک در زیرسیستم جرمی افزایش و در زیرسیستم سختی کاهش میابد و مکانیزم های ایجاد شده در سازه به سمت زیرسیستم سختی حرکت می کند. این ویژگی سبب می شود که در طراحی بتوان محل و تعداد

مفاصل پلاستیک را کنترل کرد و بتوان خرابی های احتمالی را به محل های مورد نظر در ساختمان منتقل نمود. این امر می تواند سبب کاهش چشمگیر هزینه و سرعت برگشت پذیری در ساختمان شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- تعداد مفاصل پلاستیک (بعد از LS) - (الف) ۵ طبقه، (ب) ۱۵ طبقه

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، با ترکیب دوسیستم کنترلی غیرفعال TMD و VMI، یک سیستم کنترلی ترکیبی ارائه شده و تأثیر آن در کاهش پاسخ سازه تحت ۱۴ رکورد زلزله حوزه دور، ۱۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک و بارهارمونیک مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم جداساز قائم لرزه ای (VMI) به عنوان یک سیستم جدید کنترل سازه، شامل دوزیرسیستم جرمی و سختی می باشد. با جانمایی TMD در نقاط مختلف سازه (زیرسیستم جرمی و سختی) و تعیین مناسب ترین متغیرها از جمله فرکانس TMD، میرایی TMD، محل قرارگیری، ضریب جداسازی، میرایی جداساز و سایر پارامترهای مرتبط، تأثیر این متغیرها بر کنترل و کاهش پاسخ سازه بررسی شده است.

۵. کاهش بیشینه شتاب در زیرسیستم جرمی نسبت به زیرسیستم سختی

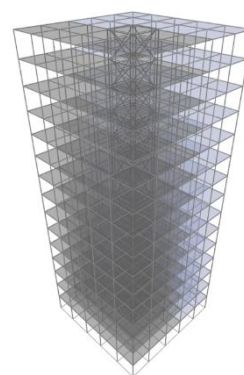
بیشتر بوده، در حالی که برای دریافت این روند برعکس است و کاهش آن در زیرسیستم سختی بیشتر از جرمی می‌باشد. علاوه بر این، تأثیرسیستم ترکیبی در کاهش بیشینه شتاب و دریافت برای بارهای لرزه‌ای بیش از بارهای هارمونیک است.

۶. تأثیر سیستم کنترلی ترکیبی در بهبود سطح عملکرد سازه بسیار چشمگیر است، به گونه‌ای که زیرسیستم جرمی عمدتاً در محدوده خطی و IO باقی می‌ماند. علاوه بر این، سیستم کنترلی ترکیبی نسبت به سیستم جداسازی قائم لرزه‌ای عملکرد بهتری در کاهش تعداد مفاصل پلاستیک، به ویژه در زیرسیستم جرمی، از خود نشان می‌دهد.

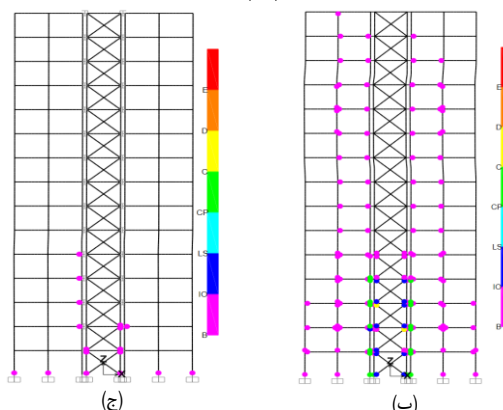
۷. تأثیر میرایی TMD در کاهش پاسخ سازه قابل توجه است و این اثرگذاری در سازه ۱۵ طبقه نسبت به سازه ۵ طبقه بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، میرایی TMD در بارهای لرزه‌ای نسبت به بارهای هارمونیک عملکرد بهتری دارد.

منابع

- [1] Nekooei M, Ziyaeifar M. Vertical seismic isolation of structures. Journal of Applied sciences. 2008;8(24):4656-61. <https://doi.org/10.3923/jas.2008.4656.466>
- [2] Moeinadini A, Ziyaeifar M, Nekooei M, editors. Facade isolation in seismic design of tall buildings. Structures; 2024: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105416>
- [3] Abdi MS, Nekooei M, Jafari M-A. Seismic control of multi-degrees-of-freedom structures by vertical mass isolation method using MR dampers. J Earthquake Engineering Engineering Vibration .202 ; <https://doi.org/10.1007/s11803-024-2251-y>
- [4] Milanchian R, Hosseini M, Nekooei M. Vertical isolation of a structure based on different states of seismic performance. J Earthquakes Structures. 2017;13(2):103-18 <https://doi.org/10.12989/eas.2017.13.2.103>.
- [5] Milanchian R, Hosseini M. Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral response reduction. Journal of Building Engineering. 2019;23 :144-54. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.026>
- [6] Ziyaeifar M, Gidfar S, Nekooei M. A model for mass isolation study in seismic design of structures. Structural Control and Health Monitoring. 2012;19(6):627-45. <https://doi.org/10.1002/stc.459>
- [7] Nekooei M, Rahgozar N, Rahgozar N. Vertical seismic isolated rocking-core system. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures Buildings. 2021;174(8):627-36. <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00158>



(الف)



شکل ۱۸- (الف) مدل سه بعدی، (ب) تغییر مکان سازه push envelope-MDF، (ج) تغییر مکان سازه F4 Eq-Push envelope-VTMD

با توجه به اینکه زیرسیستم جرمی محل زندگی افراد در ساختمان است، ایمنی جانی (Life Safety) این زیرسیستم از اهمیت بالایی برخوردار بوده و انتخاب متغیرهای سیستم کنترلی براساس حداقل سازی پاسخ این زیرسیستم تحت بارهای جانبی انجام شده است. انتخاب پارامترهای مناسب برای جداساز تأثیر مستقیمی بر پاسخ هردو زیرسیستم دارد. با جمع بندی نتایج این پژوهش درمی یابیم:

۱. سیستم کنترلی ترکیبی سبب کاهش چشمگیر بیشینه تغییر مکان بام زیرسیستم جرمی و سختی می‌شود. همچنین بیشینه برش پایه کل، بیشینه شتاب و دریافت طبقات با کاهش قابل توجهی همراه است.
۲. نتایج نشان دهنده کاهش چشمگیر بیشینه برش پایه کل در سیستم کنترلی ترکیبی در مقایسه با سیستم جداسازی نشده است.
۳. عملکرد دو سیستم VTMD و VTM در کاهش بیشینه تغییر مکان بام زیرسیستم جرمی نسبت به VTSD و VTS بیشتر بوده و حتی در برخی موارد تا ۲۰ درصد مؤثرتر می‌باشد.
۴. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب سیستم کنترلی ترکیبی در برابر طیف گسترده بارهای جانبی از جمله بارهای هارمونیک، لرزه ای حوزه دور و نزدیک (پالسی و غیر پالسی) دارد.

buildings including soil-structure interaction. Journal of Building Engineering. 2024;85:108674.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108674>

[20] Cetin H, Aydin E. A new tuned mass damper design method based on transfer functions. KSCE Journal of Civil Engineering. 2019;23(10):4463-80.

<https://doi.org/10.1007/s12205-019-0305-x>

[21] Sadek F, Mohraz B, Taylor AW, Chung RM. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. J Earthquake Engineering Structural Dynamics 1997; [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10969845\(199706\)26:6<617::AID-EQE664>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)10969845(199706)26:6<617::AID-EQE664>3.0.CO;2-Z)

[22] Choo JF, Ha D-H, Lee D-H, Cho E-S. Improvement and Field Testing of Tuned Mass Piezo-Damper with Electricity-Generating Capacity. KSCE Journal of Civil Engineering 2022; <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0999-z>

[23] Nekooei M, Ziyaeifar M, editors. Spectral investigation on the seismic behaviour of vertical mass isolated structures against earthquake. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.

[24] Fadaie MA, Nekooei M, Mansouri M, editors. Seismic and harmonic response analysis of vertically mass isolated multi-story steel structures equipped with tuned mass dampers. Structures; 2025: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108690>

[25] Fadaie MA, Nekooei M, Javadi P. Effect of dry and saturated bentonite on plastic concrete. J KSCE Journal of Civil Engineering. 2019;23(8):3431-42. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0835-2>

[26] Wang L, Nagarajaiah S, Shi W, Zhou Y. Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper. J Engineering Structures. 2022;271:114963. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114963>

[27] Ferretti M, Di Egidio A. Effectiveness in protecting rigid-block-like objects through horizontal and vertical seismic isolation. J Nonlinear Dynamics. 2024;112(21):18745-66. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09998-7>

[28] Bibi T, Ali A, Naeem A, Zhang C, Ahmad N. To investigate different parameters of economic sliding based seismic isolation system. Journal of Earthquake Engineering. 2024;28(3):659-88. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2217935>

[29] Abdi MS, Nekooei M, Jafari M-A. Numerical Investigation of a New Method for Seismic Control of Structures. J KSCE Journal of Civil Engineering. 2021;25(1):162-72. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-2368-0>

[8] Zhu Y-P, Lang Z, Fujita K, Takewaki I. Analysis and design of non-linear seismic isolation systems for building structures—An overview. Frontiers in Built Environment. 2023;8:1084081. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1084081>

[9] Nekooei M, Ziyaeifar M, editors. Seismic behaviour of vertical mass isolated structures. AIP Conference Proceedings; 2008: American Institute of Physics. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2963769>

[10] Farajiani F, Nekooei M, Mansoori MR, editors. Study of vertical mass isolation structures equipped with metallic dampers with a focus on the position of stiff subsystem. Structures;2021:Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.003>

[11] Den Hartog J, fourth edition Mechanical J. Vibrations: McGraw-Hill Book Company, Inc., New York; 1956 .

[12] Sarkar S, Fitzgerald B. Design of Tuned Mass Damper Fluid Inerter for Wind-Induced Vibration Control of a Tall Building. Journal of Structural Engineering. 2024;150(3):04023242. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12599>

[13] Shen J, Zhu S. Active tuned mass damper for a benchmark tall building using an energy-harvesting electromagnetic damper. Journal of Vibration Control. 2024;10775463241252215. <https://doi.org/10.1177/1077546324125222>

[14] Hoang N, Fujino Y, Warnitchai P. Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas. J Engineering structures. 2008;30(3):707-15. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.007>

[15] Kang X, Huang Q, Wu Z, Tang J, Jiang X, Lei S, et al. A Review of the Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) in Energy Harvesting and Vibration Control: Designs, Analysis and Applications. J CMES-Computer Modeling in Engineering. 2024;139(3). <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.043936>

[16] Gaur S, Elias S, Hobbel T, Matsagar VA, Thiele K. Tuned mass dampers in wind response control of wind turbine with soil-structure interaction. J Soil Dynamics Earthquake Engineering. 2020;132:106071 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106071>

[17] Nigdeli SM, Bekdaş G. Optimum tuned mass damper design in frequency domain for structures. J KSCE journal of civil engineering. 2017;21:912-22. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0829-2>

[18] He H, Tan P, Hao L, Xu K, Xiang Y. Optimal design of tuned viscous mass damper for acceleration response control of civil structures under seismic excitations. J Engineering structures. 2022;252:113685. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113685>

[19] Elias S, Djerouni S. Optimum tuned mass damper inerter under near-fault pulse-like ground motions of

[30] Wu Q, Yan H, Zhu H, Bai X. Shaking table test study on the seismic isolation effect of a hybrid passive control system. J Measurement. 2020;164:108125.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108125>

[31] Council AT. Quantification of building seismic performance factors: US Department of Homeland Security, FEMA; 2009 .

[32] Engineers ASOC, editor Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures 2017: American Society of Civil Engineers.

[33] Forcellini D, editor A 3-DOF system for preliminary assessments of the interaction between base isolation (BI) technique and soil structure interaction (SSI) effects for low-rise buildings. Structures; 2024: Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105754>

