



Evaluation of control methods for earthquake-resistant structures with a dual-purpose approach and using AHP method

Shahin Lale Arefi ^{a*}, Hossein Hatami Nejad ^b, Alireza Ghafouri Zarandi ^c

^{a*}. Department of civil engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

^b. Department of Human Geography and planning, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

^c. Department of Geography and Urban Planning, Caspian International Campus, University of Tehran, Rezvanshahr, Gilan, Iran

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2041500.1133>

ARTICLE INFO

Keywords:

Structural control
Emergency exit
Building
Earthquake load
AHP method

Received:

23 September 2024

Received in revised form:

04 June 2025

Accepted:

15 July 2025

pp.82-97

ABSTRACT

structural control methods, which enhance both earthquake resistance and emergency evacuation, are critical for designing safe buildings. These methods integrate seismic retrofitting with evacuation planning to minimize human and material losses. A key challenge in earthquake engineering is assessing structural vulnerabilities and mitigating the effects of seismic and wind loads. Recent advancements in earthquake-prone regions have focused on technologies such as tuned mass dampers, viscous dampers, liquid tanks, and seismic isolators to reduce structural vibrations. However, while these systems effectively mitigate earthquake and wind-induced displacements, improper design may reduce their efficiency or amplify vibrations. Although seismic dampers and isolators increase initial construction costs, they can be cost-effective in the long term by reducing damage from earthquakes and wind. Dual-purpose systems not only improve seismic performance but also ensure safe and rapid evacuation routes, making them easily implementable in existing structures. These methods represent a fundamental principle for future building designs, enhancing both safety and resilience.

Corresponding author (Email: Shahin.arefi@yahoo.com)

Extended Abstract:

Introduction

Vibration control is an advanced method for improving structures and designing buildings resistant to dynamic loads that improves the response of the structure without reinforcing individual elements. This method, with appropriate equipment, reduces displacement and enhances dynamic response. Given the need for simple and economical methods in the country, the development of these systems is essential. Iran is faced with 31 types of natural disasters, especially earthquakes, which require the study of critical conditions. The main challenge of earthquake engineering is the identification and control of structural damage. Structural health monitoring (SHM) systems, control and adaptability, and artificial intelligence reduce failures, costs, and losses. This paper introduces a new system that uses SHM and vibration control to increase seismic resistance and facilitate emergency evacuation. This system can be installed in existing structures at a reasonable cost. Control methods were examined and the best method was selected using AHP.

Methodology

In this study, earthquake-resistant structural control methods were identified using library resources. Then, through interviews with experts in the fields of structures, earthquakes, and construction management, evaluation indicators for these methods were extracted. A questionnaire was provided to 14 experts to weight the indicators and score the methods. Using the group decision-making method and paired comparison on a nine-point Likert scale, the priority and final weight of the methods were determined. A decision hierarchy tree was formed at three levels and four structural control methods were compared in the Expert Choice software to select the optimal option. To examine the validity of the questionnaires, Cronbach's alpha was calculated, which was acceptable at 77.67 percent. Pairwise comparison matrices with a consistency of less than 0.1 were used, and incompatible matrices were eliminated. Finally, the optimal structural control method was determined.

Results and discussion

In this study, earthquake-resistant structural control methods were investigated with a dual-purpose approach (seismic resistance and facilitating emergency evacuation). First, by studying library resources, structural control methods were identified. Then, through interviews with experts in the fields of structure,

earthquake, and construction management, key evaluation indicators were extracted, including the level of earthquake and wind resistance, implementation cost, feasibility in existing buildings, implementation complexity, and implementation speed. A questionnaire was designed to weight these indicators and score structural control methods (active cable control, mass dampers, non-mass dampers, and seismic isolators) and was provided to 14 experts. Using the group decision-making method and paired comparison on a nine-point Likert scale, the final weight of the indicators was calculated in the Expert Choice software. The results showed that the earthquake and wind resistance index with a weight of 0.389 was the most important, followed by implementation cost (0.249), feasibility (0.159), implementation complexity (0.102), and implementation speed (0.054). Pairwise comparison matrices were formed for each method in each index. In the earthquake and wind resistance index, the active cable control method with a weight of 0.272 (earthquake) and 0.483 (wind) had the best performance. This method was also superior in the implementation cost (0.477), feasibility (0.627), implementation complexity (0.537), and implementation speed (0.506) indices. The non-mass dampers, seismic isolators, and mass dampers methods were ranked next, respectively. To ensure the validity of the questionnaires, Cronbach's alpha was calculated and confirmed with a value of 77.67% (above the acceptable limit of 75%). Also, the compatibility of the pairwise comparison matrices was examined and matrices with an inconsistency rate of more than 0.1 were eliminated. Finally, by multiplying the weights of the indicators by the scores of the methods, the final ranking was extracted, in which the active cable control method with an importance coefficient of 0.380 was recognized as the most optimal method, while mass dampers (0.148), non-mass dampers (0.245) and seismic isolators (0.227) were ranked next. These results indicate the superiority of the active cable control method in improving structural resistance and facilitating emergency evacuation.

Conclusion

Safety, time, and economy are key factors in the quality of Iran's construction industry, especially given the country's location in a seismically active region. The seismic safety of buildings is of particular importance due to the possibility of destructive earthquakes. Crisis management, including prediction, early warning, and response, plays an important role in reducing casualties and increasing safety. Smart building technology, especially active vibration control, is widely used in this

regard. Vibration control methods include mass dampers, viscous dampers, liquid tanks, pendulums, and seismic isolators. These methods are mainly designed to reduce the effects of earthquakes, but wind force is also important in tall buildings. The use of pendulums or liquid tanks, although reducing vibrations, increases the weight of the structure and increases the force of the earthquake. Improper design of these systems may exacerbate vibrations. The active cable control method was identified as the best method because it reduces vibrations, limits structural deformation, and maintains emergency escape routes. The non-mass dampers, seismic isolators, and mass dampers methods were ranked next.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.





ارزیابی روش های کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله با رویکرد دو منظوره سازی و استفاده از روش AHP

شاهین لعل عارفی* - استادیار گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، خراسان شمالی، اسفراین، ایران

حسین حاتمی نژاد - استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علیرضا غفوری زرنندی - دانشجوی دکتری، پردیس بین المللی کاسپین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2041500.1133>

واژگان کلیدی	چکیده
کنترل سازه خروج اضطراری ساختمان بار زلزله روش AHP	دو منظوره سازی در روش های کنترل سازه های، که هم مقاومت در برابر زلزله و هم قابلیت خروج اضطراری را بهبود می بخشد، از اهمیت بالایی در طراحی ساختمان های ایمن برخوردار است. این مفهوم ترکیبی از مهندسی مقاوم سازی لرزه ای و برنامه ریزی تخلیه اضطراری است که می تواند منجر به کاهش خسارات جانی و مالی شود. یکی از چالش های اصلی در مهندسی زلزله، ارزیابی میزان آسیب پذیری سازه ها و کنترل اثرات زلزله است. در دهه های اخیر، محققان در کشورهای زلزله خیز به توسعه فناوری های سازه های مقاوم در برابر زلزله متمرکز شده اند که توانایی پاسخگویی به محرک های خارجی مانند زلزله و باد را دارند. روش های متعددی برای کنترل ارتعاش سازه ها وجود دارد، اما یکی از چالش ها این است که طراحی این روش ها اغلب بر کاهش اثرات زلزله متمرکز است، در حالی که نیروی باد در ساختمان های بلندمرتبه نیز نیرویی تعیین کننده است. از جمله این روش ها می توان به استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده، میراگرهای ویسکوز، مخازن مایع در طبقات بالا، و جداگرهای لرزه ای اشاره کرد. استفاده از آونگ یا مخازن مایع، اگرچه جابجایی های ناشی از زلزله و باد را کاهش می دهد، وزن سازه را افزایش داده و نیروی زلزله را بیشتر می کند. این سیستم ها در برابر نیروی باد، که معمولاً به صورت دینامیکی و نوسانی عمل می کند، در صورت طراحی صحیح کارآمد هستند، اما طراحی نادرست ممکن است کارایی آن ها را کاهش دهد یا در شرایط خاص باعث تشدید ارتعاشات شود. استفاده از میراگرها و جداگرهای لرزه ای هزینه های اولیه ساخت را افزایش می دهد، اما در بلندمدت با کاهش خسارات ناشی از زلزله یا باد می تواند اقتصادی باشند. موضوع مهم دیگر، استفاده از روش های دو منظوره است که علاوه بر مقاومت در برابر بارهای زلزله و باد، امکان خروج اضطراری سریع و ایمن را فراهم کنند. این روش ها باید قابلیت نصب سریع و کم هزینه در سازه های موجود را داشته باشند، زیرا در هنگام زلزله، وجود مسیرهای خروج امن حیاتی است. دو منظوره سازی نه تنها عملکرد لرزه ای ساختمان را بهبود می بخشد، بلکه خروج اضطراری را تسهیل کرده و می تواند به عنوان یک اصل اساسی در طراحی های آینده مورد توجه قرار گیرد.
تاریخ دریافت:	
۱۴۰۳/۰۷/۰۲	
تاریخ بازنگری:	
۱۴۰۴/۰۳/۱۴	
تاریخ پذیرش:	
۱۴۰۴/۰۴/۲۴	
صص. ۸۲-۹۷	

مقدمه

همان گونه که اشاره گردید تحقیقات صورت گرفته درباره سامانه های هوشمند در سه حوزه سلامت سنج (SHM)، کنترل و تطبیق پذیری و هوش مصنوعی سازه ها می باشد که در ادامه می توان به منابع زیر اشاره نمود.

کی نیا با اشاره به اتفاق نظری که در زمینه مفید بودن TMD در کنترل لرزه ای سازه ها وجود دارد، تحقیقات خود را بر روی سیستم های الاستیک و غیر الاستیک TMD در برابر تحریکات زلزله و سنجش قابلیت پیش بینی مدل های تحلیل، بر پایه تئوری ارتعاشات تصادفی مختلف برای سیستم های الاستیک، متمرکز کرد و نتیجه گرفت که اثر اضافه کردن جاذب های انرژی را نمی توان به راحتی توسط یک ضریب کاهش پاسخ مشخص بیان کرد. (Keynia, 1981)

در سال ۱۹۸۵ پارک و همکارانش شاخص خسارتی را ارائه کردند که تأثیر حداکثر تغییر شکل و بارهای رفت و برگشتی را در نظر می گیرد. این پژوهشگران در سال ۱۹۸۷ برنامه IDARC را برای تحلیل خسارت غیر ارتجاعی سازه های بتن مسلح تهیه کردند این نرم افزار می تواند در سلامت سنجی سازه ها کاربرد داشته باشد. (Park et al. 1985)

در سال ۱۹۹۴ کویل اغلو و همکارانش یک شاخص خسارت نرم شدگی کلی را پیشنهاد نمود. شاخص مورد نظر بر مبنای تغییرات فرکانس ویژه اولین مود به واسطه کاهش سختی و مقاومت بود. آن ها با بررسی رفتار هیستریزیس اولین مود، خسارت محلی و کلی را پیش بینی نمودند. (Koyluoglu, 1997)

فرشاد تحقیقاتی را بر روی مصالح و سازه های هوشمند در سال ۱۹۹۵ انجام داد و در این تحقیق به دسته بندی مصالح هوشمند و حسگرهای مرتبط با این موضوع پرداخته است و در نهایت ساختاری از یک سامانه هوشمند ابتدایی در ساختمان را ارائه نموده است. (Farshad, 1995) در سال ۱۹۹۶ اس کی جریک و همکارانش روش جدیدی را برای بررسی تمرکز خسارت و اندازه گیری آن در قاب های بتن مسلح تحت اثر زلزله ارائه نمودند. در این روش حداقل به یک اندازه گیری پاسخ در سازه و شتاب زمین نیاز بود. علاوه بر آن دو تا از کم ترین فرکانس های ویژه با زمان های مختلف نیز باید مشخص می شد. طبقه بندی خسارت، هم از بازرسی چشمی و هم از آزمایش های آماری مقایسه گردید و نتیجه گیری شد که خصوصاً در حالاتی که خسارت در یک تراز معین از سازه متمرکز می گردد با استفاده از روش پیشنهادی، ارزیابی مناسبی از خسارت بدست می آید (Skjaerbaek, 1997). چن و وو در سال ۲۰۰۱ به صورت آزمایشگاهی یک سازه سه طبقه اسکلت فلزی با نسبت

روش کنترل ارتعاشات روش پیشرفته ای در روند بهسازی سازه ها و طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر بارهای دینامیکی است. این تفکر باعث کنترل پاسخ سازه تحت بارهای دینامیکی شده و بدون اینکه نیاز به مقاوم سازی تک تک عناصر مقاوم سازه ای باشد با تعبیه وسایل و تجهیزات مناسبی در ساختمان باعث کاهش تغییر مکان و بهبود پاسخ دینامیکی سازه می شوند. با گسترش روشهای کنترل در سازه باید به دنبال روشهایی بود که با توجه به امکانات موجود در کشور به سادگی قابل اجرا بوده و از سوی دیگر تولید و کاربرد آن برای ساختمانهای متعارف، از هر نظر اقتصادی باشد. در سال های اخیر تحقیقات زیادی بر روی سامانه ها و سیستم های کنترل در سازه ها صورت گرفته است. یکی از مهم ترین مسائل در شهرها، توجه به تهدیدات طبیعی، از جمله زلزله است. (Bitarafan et al, 2023). با توجه به این موضوع که از بیش از ۴۰ نوع سازه طبیعی در دنیا، ۳۱ نوع آن در ایران به ثبت رسیده است. از جمله این سوانح می توان به وقوع زمین لرزه های ویرانگر و سیل های مخرب اشاره نمود که ضرورت مطالعات شرایط غیر معمول را ایجاب می نماید.

یکی از مسائل چالش برانگیز در حوزه ی مهندسی زلزله، تعیین میزان آسیب سازه ها و نحوه کنترل و مقابله آن ها در هنگام وقوع زلزله است. شناسایی خطرات و آسیب های احتمالی ناشی از آن نقش مهمی در آمادگی برای مقابله و مقاومت در مناطق شهری ایفا می کند. (Pourirahim et al, 2013). در این راستا در ده های اخیر نیاز به طراحی و ساخت سامانه هایی که قابلیت تطبیق رفتار، ترکیب و شکل سازه را با شرایط محیط زیست داشته باشند، افزایش یافته است (Farshad, 1995). با توجه به موارد ذکر شده و همچنین فرسودگی سازه های موجود، کاربرد سامانه های سلامت سنجی سازه ها به نظر امری معقول می باشد زیرا این سامانه ها می توانند خرابی سازه ها، هزینه های تعمیر و نگهداری آنها و تلفات انسانی را به شدت کاهش دهند (Arefi & Arefi et al. 2020, Annamdas, 2008). Gholizad, 2020 بهره گیری سامانه ها و سازه های هوشمند را می توان به سه حوزه ی مطالعاتی سلامت سنجی (SHM)، کنترل و تطبیق پذیری و هوش مصنوعی سازه ها دسته بندی نمود. تا کنون تحقیقات بسیاری بر روی این سه حوزه انجام شده است و سامانه هایی نیز بر اساس این پژوهش ها ساخته شده است که بیشتر آن ها تنها تمرکز بر یکی از سه حوزه بیان شده داشته اند.

معرفی می‌کند و پارامترهای متغیر تحریک زمین را در تأثیرات کنترلی آن مورد بررسی قرار می‌دهد. وی از شتاب نگاشت بیست نوع زلزله متفاوت استفاده کرده و تأثیر مطلوب آن را روی سازه‌هایی با میرایی کم مورد مطالعه قرار داده و تأثیرات TMD روی این سازه‌ها را وابسته به فرکانس غالب، پهنای باند فرکانسی و زمان دوام زلزله می‌داند (Chandra, 2006).

در سال ۱۳۸۸ حسینی لواسانی تحقیقاتی بر روی ساختمان‌های هوشمند انجام داد. در این طرح، هدف طراحی سیستم کنترل فعال به منظور کاهش پاسخ ساختمان‌های بلند تحت اثر نیروی افقی زلزله در کلان شهر تهران می‌باشد. از آنجایی که منطق فازی در تعیین متغیرهای تصادفی دارای انعطاف‌پذیری خوبی است، مقادیر کنترل‌گر فعال با استفاده از منطق فازی بدست آورده می‌شود و این سیستم را به یک سیستم هوشمند تبدیل می‌کند. در نهایت، سیستم توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود (حسینی لواسانی، ۱۳۸۸).

آلدمیر و یانیک در سال ۲۰۲۲ به بررسی مدل‌سازی سازه‌ها و انواع دستگاه‌های کنترلی مانند میراگرهای جرمی و جداگرهای لرزه‌ای پرداخته است. با تمرکز بر استراتژی‌های کنترلی، این روش‌ها برای کاهش پاسخ دینامیکی ساختمان‌ها بهینه‌سازی شده‌اند. نتایج به بهبود طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله کمک کرده است (Aldemir and Yanik, 2022).

بزرگوار و زهرایی در سال ۲۰۲۱ از میراگرهای مغناطیسی رئولوژیکی (MR) برای کنترل نیمه‌فعال ارتعاشات ساختمان‌ها استفاده کرده است. با ترکیب AHP و الگوریتم‌های تطبیقی، عملکرد میراگرها بهینه‌سازی شده است. این روش به کاهش هزینه‌های کنترل و افزایش ایمنی سازه‌ها کمک می‌کند (Bozorgvar and Zahrai, 2004). الیاس و متساگر در سال ۲۰۲۳ کاربرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شده (TMD) را برای کنترل ارتعاشات در ساختمان‌های بلند بررسی کرده است. با استفاده از تحلیل‌های عددی، مکان و تنظیم بهینه میراگرها برای کاهش پاسخ دینامیکی مشخص شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود پایداری و راحتی ساکنان در برابر باد و زلزله است (Elias and Matsagar, 2004).

از توضیحات بالا مشهود است که استفاده از یک سیستم کارآمد که از یک طرف بتواند در برابر نیروی زلزله مقاوم باشد و از طرف دیگر نیز موضوع خروج اضطراری را در نظر داشته باشد کمتر توسعه یافته است. در این مقاله سامانه ای ارائه شده است که با بهره‌گیری از سلامت سنجی سازه‌ها و سیستم‌های کنترل ارتعاش، ساختمان را در برابر زلزله مقاوم نموده؛ در ضمن سامانه ای جهت خروج اضطراری ساکنین ساختمان در زمان بحران نیز محیا می‌کند و همچنین امکان نصب آن در سازه‌های موجود با هزینه معقول تر و سرعت بالا وجود دارد.

ابعادی ۱:۴ ساخته و به وسیله نصب دو TMD در طبقات مختلف وبا ترکیب‌های مختلف تأثیر آن‌ها را در کنترل ارتعاشات لرزه ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در ابتدا به کمک سه سری آزمایش ارتعاش اجباری فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی و مشخصات سازه را بدست آوردند و برای کنترل پاسخ‌های لرزه ای پارامترهای وزن و فرکانس و موقعیت میراگرهای TMD را مورد بررسی قرار دادند (Chen&Wu, 2001).

ریو و همکاران در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ تحقیقاتی را بر روی Fiber Bragg Grating و سامانه‌های بازایی و انتقال اطلاعات از این فیبرها به سامانه را انجام دادند (Ryu et al. 2001, Ryu and Hong 2002).

از تحقیقات دیگر می‌توان به تحقیقات کیم و همکارانش اشاره نمود که بر روی مقاوم سازی سازه‌های بتنی با بهره‌گیری از صفحات فیبر کربنی اشاره نمود آن‌ها سنسورهای FBG را جهت پایش رفتار سازه در صفحات کربنی استفاده نمود (Kim et al. 2003b).

کیم و همکاران در همان سال در تحقیقاتی دیگر بر روی عیب یابی سازه‌های حیاتی نیروگاه‌های هسته‌ای با بهره‌گیری از سنسورهای FBG انجام دادند (Kim et al. 2003a).

کاوان و چو از سنسورهای BOTDA که یکی از انواع سنسورهای فیبرهای نوری (OFS) می‌باشد در تحقیقات خود در سال ۲۰۰۴ جهت پایش تغییرات دمایی و اعلام حریق در ساختمان‌ها و زیرساخت‌های حیاتی استفاده کرده است (Kwon and Cho 2004).

رحیمیان و همکاران پاسخ لرزه ای سه سازه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه را که تحت اثر زلزله ال سنترو به ارتعاش درآمد بودند به وسیله یک میراگر جرمی نصب شده در تراز طبقه بام مدل سازی و مورد بررسی قرار دادند و به نتیجه ۱-۷ مشابه دیگر محققان دست یافتند و میزان کاهش برای سازه‌های بلندتر بیشتر مشهود بود (رحیمیان، ۱۳۸۴).

در سال ۲۰۰۵ آقای یون و همکاران تحقیقاتی را بر روی لایه‌های فعال که در آن‌ها صفحات پیزوالکتریک جاسازی شده بود جهت پایش عیب‌های موجود در تجهیزات صنعتی، سازه‌های فولادی و بتنی انجام دادند (Yoon et al. 2005).

از تحقیقات دیگر در زمینه‌ی کنترل سازه‌ها می‌توان به تحقیقات آقای پارک و همکاران در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ اشاره نمود که هدف اصلی آن‌ها شناسایی خرابی در اعضای سازه‌های فولادی با استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک بود (Park et al. 2005b, Park et al. 2006b).

چاندرا در مقاله‌ای تحت عنوان کنترل لرزه‌ای سازه‌ها به وسیله TMD، به تأثیر مطلوب این سیستم کنترلی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پرداخته و آن را به عنوان یک سیستم کاملاً موثر در کاهش پاسخ‌های ارتعاشی سازه‌ها تحت تحریکات باد و تحریک هارمونیک

جدول ۱- آمار جامعه خبرگان

تخصص	سطح تحصیلات	تعداد افراد
سازه	دکتری	۳
	کارشناسی ارشد	۲
زلزله	دکتری	۳
	کارشناسی ارشد	۳
مدیریت ساخت	دکتری	۲
	کارشناسی ارشد	۱

در ادامه هریک از روش های کنترل سازه توضیح داده شده و با بهره گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP با توجه به شاخص های مرتبط، بهترین روش انتخاب گردیده است.

روش شناختی اجرای مدل ارزیابی و تحلیل نتایج

در این پژوهش روش کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله با استفاده از منابع کتابخانه ای شناسایی گردید و سپس با مصاحبه با افراد خبره در زمینه سازه و زلزله و مدیریت ساخت کلیه محورهای مطرح برای ارزیابی روش کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله استخراج گردید، و در ادامه به منظور کسب نظر سنجی از خبرگان، پرسشنامه ای جهت وزن دهی به شاخص های موثر و همچنین امتیاز دهی به هر یک از روش ها در معرض دید ۱۴ فرد خبره که آشنا به زمینه های سازه، زلزله و مدیریت ساخت بوده اند، قرار گرفت (مطابق جدول ۱). در ادامه از طریق به کارگیری روش تصمیم گیری گروهی بر اساس الگوی مقایسات زوجی درجه ضرورت وجودی هر یک از شاخص ها و همچنین روش ها در قالب یک مقیاس نه تایی لیکرت (معادل یک تا نه) بدست آمده است و سپس درخت سلسله مراتب تصمیم در سه سطح زوجی گزینه ها تشکیل شد و ضمن استخراج اولویت ها و تعیین وزن نهایی گزینه ها، چهار روش کنترل سازه ذکر شده در نرم افزار *Expert Choice* با یکدیگر مقایسه و گزینه ی بهینه تعیین گردید. برای بررسی اعتبار پرسشنامه ها نیز از تست آلفای کرون باخ استفاده شده است (*Carver&Nash, 2009*). آلفای کرون باخ نتایج پرسشنامه های پر شده توسط جامعه خبرگان این تحقیق برابر ۷۷/۶۷ درصد می باشد که از ۷۵ درصد بالاتر بوده و قابل قبول است. همچنین جهت صحت سنجی ماتریس های زوجی در هر پرسشنامه سازگاری آن ها محاسبه گردید و ماتریس هایی که سازگاری بیشتر از یک دهم داشتند حذف شد و تنها ماتریس هایی در این پژوهش استفاده شد که سازگاری کمتر یک دهم داشتند.

روش سلسله مراتبی AHP اولین بار توسط آقای ساعتی (*Saaty*) ارائه گردید (*Saaty, 1980*). و این روش شامل سه کارکرد اصلی ساختاردهی به پیچیدگی، سنجش بر مبنای مقیاس نسبی و ترکیب است. کاربرد اصلی این روش در محاسبه ی اهمیت نسبی مجموعه ای از گزینه ها در یک تصمیم گیری چند معیاره است. با بهره گیری از این تکنیک می توان معیارها و شاخص های کیفی را به صورت معیارهایی کمی ارائه نمود (*Badri, 2001*). تکنیک AHP از سه بخش اصلی ساختار مدل، داوری تطبیقی از گزینه ها و معیارها و در نهایت ترکیب اولویت ها تشکیل شده است (*Dağdeviren, 2008*). از پژوهش های مهمی که اخیراً با این تکنیک انجام شده است می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وانگ و ژانگ بر روی مکانیابی بهینه برای پروژه های ساختمانی با روش AHP مطالعاتی انجام دادند. (*Wang & Zhang, 2023*)
- فورمیسانو و مزولانی از AHP برای انتخاب استراتژی های بهینه مقاوم سازی لرزه ای در ساختمان های موجود استفاده کرده است (*Formisano and Mazzolani, 2022*).
- دارکو و همکاران از روش AHP در انتخاب مصالح پایدار در پروژه های ساختمانی استفاده کردند (*Darko et al 2021*)
- دینکینه و همکاران (*Medineckiene et al.*) در سال ۲۰۱۰ از تکنیک AHP در ارزیابی ساختمان های پایدار استفاده کردند.
- پودوزکو و همکاران (*Podvezko et al.*) از تکنیک AHP در ارزیابی قراردادهای مالی استفاده کردند.
- سیلویویکیس (*Sivilevicius*) از تکنیک AHP در مدل سازی سیستم حمل و نقل بهره گرفته است.
- سیلویویکیس (*Sivilevicius*) از تکنیک AHP در ارزیابی تکنولوژی های نوین بهره گرفته اند.
- فولادگر و همکاران (*Fouladgar et al.*) از تکنیک AHP در اولویت بندی راهبردها بهره گرفته اند.

انواع روش‌های کنترل سازه

روش‌هایی مختلفی جهت کنترل سازه‌ها وجود دارند که در زیر به مهمترین آنها اشاره شده است:

- روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی (A1)
- روش استفاده از میراگر جرمی در سازه (A2)
- روش استفاده از میراگر غیر جرمی در سازه (A3)
- روش جداگر لرزه‌ای در پی سازه (A4)

روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی (A1)

روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی (A1) سیستمی دو منظوره است که با استفاده از حسگرهای ارتعاش سنج و فعالگرها، ارتعاشات ناشی از زلزله و باد را کنترل کرده و همزمان خروج اضطراری ایمن و سریع را برای ساکنان ساختمان فراهم می‌کند. این سامانه با تشخیص ارتعاشات و پاسخ به آن‌ها، ایمنی سازه و افراد را بهبود می‌بخشد.

اجزای تشکیل دهنده این سامانه عبارتند از:

- حسگر ارتعاشی

این حسگر از مواد پیزو الکتریک حساس به ارتعاش ساخته شده است که با ارتعاش زمین پالس الکترونیکی ایجاد می‌کند و هرچه میان ارتعاش بیشتر باشد پالس قوی تری ایجاد می‌گردد.

- فعالگر

فعالگرها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که اگر شدت پالس الکترونیکی ایجاد شده توسط حسگر پیزو الکتریک بیش از ارتعاش ناشی از زلزله یا بیش از سه ریشتر بود، وارد عمل شده و سامانه کنترلی را بکار می‌اندازد.

- سامانه کنترلی

سامانه کنترلی شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

- کابل‌های کنترلی
- اتصال دهنده‌های کابلها به سازه ساختمان
- فونداسیون سامانه کنترلی
- قفل کننده‌های کابلها
- موتور الکتریکی جمع کننده کابلها
- کابلهای جمع کننده کابلهای کنترلی

- کمربند های خروج اضطراری

این کمربند ها به گونه ای طراحی شده اند که قابلیت اتصال به کابل‌های سازه ای دارد و با سیستم اصطکاکی که در آنها در نظر گرفته شده است سرعت حرکت آنها بر روی کابلها کند بوده تا آسیبی به افراد وارد نشود.

بطور کلی این سامانه با ادغام کنترل فعال ارتعاش و تسهیل خروج اضطراری، می‌تواند به عنوان یک روش نوین در طراحی و مقاوم سازی

نخعی و همکاران مطالعاتی برای انتخاب بهترین تونل که بتوان به عنوان فضای امن استفاده کرد با استفاده از روش AHP انجام دادند. بیطرفان و همکاران به ارزیابی اعضای اتصال سازه‌های فولادی سرد نورد شده در بازسازی مناطق زلزله‌خیز با استفاده از روش AHP پرداختند.

بیطرفان و همکاران در انتخاب ترکیب بهینه فرم‌های معماری تر روش AHP استفاده کردند.

حسینی و همکاران به بررسی انواع دیوارهای خارجی در بازسازی مناطق زلزله زده با استفاده از روش AHP پرداختند.

اولین مرحله در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، تجزیه مسأله به ساختار سلسله مراتبی شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها است. این عوامل تصمیم گیری یک سلسله مراتب ساختار ایجاد می‌کنند شامل هدف در بالاترین نقطه، معیارها در وسط و گزینه‌ها در پایین‌ترین نقطه این سلسله مراتب قرار دارد. پس از آن در مرحله دوم با استفاده از ساختار ایجاد شده، مقایسات زوجی بین عناصر توسط تصمیم گیرندگان انجام می‌شود. ساعتی (Saaty) برای امتیازدهی قضاوتی بین دو عنصر مقیاس ۱ تا ۹ را بر اساس جدول ۲ پیشنهاد می‌کند.

جدول ۲- مقیاس نه تایی شدت اهمیت و توضیحات مربوطه

(Badri, 2001)

تعریف	میزان اهمیت
اهمیت برابر	۱
اهمیت نسبتاً بیشتر	۳
اهمیت با شدت بیشتر	۵
اهمیت با شدت خیلی بیشتر	۷
اهمیت فوق العاده بیشتر	۹
مقدار متوسط	۲،۴،۶،۸

در این مرحله تصمیم گیرندگان در هر بار قضاوت دو عنصر را نسبت به عنصر سطح بلافاصله بالاترشان مقایسه کرده و امتیازی را بر اساس جدول ۲ برای میزان برتری گزینه‌ی اول بر دوم ارائه می‌کنند.

در سومین بخش فرایند تشکیل ماتریس‌های توافقی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در مرحله‌ی قبل به عنوان مقدمه‌ی محاسبه اوزان در این مرحله انجام می‌شود.

ارزیابی روش های کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله با رویکرد دو منظوره سازی و استفاده از روش AHP

(Dampers نامیده می شود. تعداد، مقدار جرم، و مکان این میراگرها باید با دقت طراحی شود تا پاسخ مناسبی به تحریک های دینامیکی مانند زلزله یا باد ارائه دهد. طراحی این سیستم ها نیازمند تنظیم فرکانس میراگر با فرکانس طبیعی سازه است تا کارایی بهینه داشته باشد. میراگرهای جرمی به دو نوع منفعل (*Passive TMD*) و فعال (*Active TMD*) تقسیم می شوند. میراگرهای منفعل از جرم، فنر، و میراگر با مشخصات ثابت تشکیل شده و بدون نیاز به انرژی خارجی عمل می کنند، در حالی که میراگرهای فعال با استفاده از حسگرها، فعالگرها، و سیستم های کنترلی، سختی یا میرایی را به صورت دینامیکی تنظیم می کنند تا به طور مؤثرتری به ارتعاشات پاسخ دهند. (Farshad, 1995)

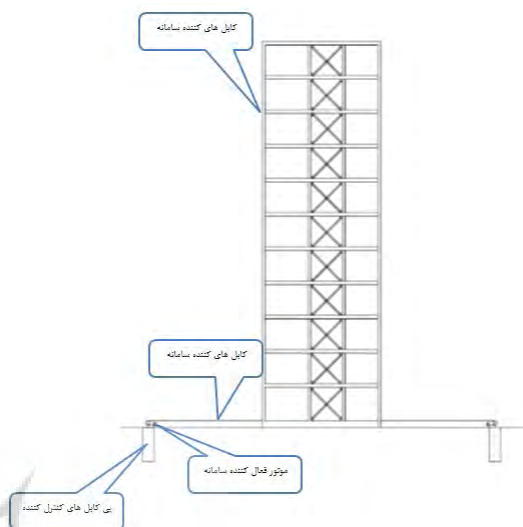
روش استفاده از میراگر غیر جرمی در سازه (A3)

میراگرهای غیرجرمی بر اساس عملکرد آنها به انواع اصطکاکی، فلزی (جاری شونده)، ویسکوز، ویسکوالاستیک، آلیاژهای حافظه دار شکلی (*SMA*) دسته بندی می گردند. (نشریه شماره ۵۲۴) در میراگرهای اصطکاکی انرژی زلزله صرف غلبه بر اصطکاک موجود در سطح تماس قطعات می شود. از ویژگی های دیگر این میراگرها می توان به عدم ایجاد خستگی در بارهای خدمت (به دلیل فعال نشدن میراگرها تحت این بارها) و وابسته نبودن عملکرد آنها به سرعت بارگذاری و دمای محیط می توان اشاره نمود. این میراگرها به موازات مهاربندها نصب می شوند.

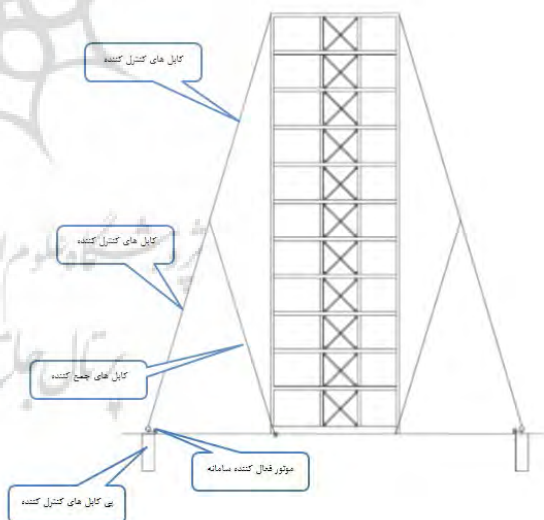
در میراگرهای تسلیمی از تغییر شکل غیرالاستیک فلزات شکل پذیری مانند فولاد و سرب جهت اتلاف انرژی استفاده می شود. در تمام سازه های معمولی اتلاف انرژی بر شکل پذیری اعضای فولادی پس از تسلیم متکی است. در بادبندها استفاده از میراگرهای فلزی تسلیمی متداول تر می باشد. این نوع میراگرها اغلب از چند ورق فولادی موازی تشکیل می شوند و در ترکیب با یک سیستم بادبندی، نقش جذب و اتلاف انرژی را بر عهده می گیرند. این قسمت از مهاربند به عنوان یک فیوز در سازه عمل نموده و با تمرکز رفتار غیر خطی در خود، مانع از بروز رفتار غیر خطی و آسیب در سایر اجزا اصلی و فرعی سازه می گردد.

میراگرهای آلیاژی از آلیاژهای حافظه دار شکلی (مانند نیکل-تیتانیوم یا نیتینول) ساخته می شوند که انعطاف پذیری بالایی داشته و به دلیل خاصیت سوپرالاستیک یا حافظه دار شکلی، پس از تغییر شکل های زیاد به حالت اولیه بازمی گردند. این آلیاژها مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارند و در مهاربندها یا اتصالات سازه ای استفاده می شوند. در میراگرهای ویسکوز، انرژی از طریق حرکت سیال لزج (مانند روغن

سازه های بلندمرتبه و عمومی در مناطق زلزله خیز با رویکرد دو منظوره سازی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱: شماتیک روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی (ماخذ: نگارندگان)



شکل ۲: حالت کابل های کنترل فعال پیش از زلزله یا باد (ماخذ: نگارندگان)

روش استفاده از میراگر جرمی در سازه (A2)

استفاده از جرم های اضافی در نقاط بحرانی سازه برای کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله، میراگرهای جرمی تنظیم شده (*Tuned Mass*)

۳- پیچیدگی اجرا (X_3)

۴- هزینه اجرا (X_4)

۵- سرعت اجرا (X_5)

۶- قابلیت استفاده در ساختمان موجود (X_6)

درخت سلسله مراتب انتخاب بهترین روش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. این درخت شامل هدف، معیارها و گزینه‌های انتخاب است (Chandra, 2006).

نتایج تحلیل سلسله مراتبی AHP

در این مرحله با استفاده از وزن‌های بدست آمده از نتایج حاصل از پرسش‌نامه‌های تکمیل شده توسط کارشناسان، ماتریس داوری مقایسه‌ای جفتی شاخص‌ها (جدول) در نرم افزار Expert Choice تشکیل گردید و در نهایت وزن نهایی هر شاخص به ترتیب اولویت بدست آمد که بر این اساس شاخص میزان مقاومت در برابر زلزله و باد بهترین و شاخص میزان هزینه اجرا، هزینه اجرا، قابلیت استفاده در ساختمان‌های موجود، پیچیدگی اجرا و سرعت اجرا به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

سیلیکون) در یک سیلندر مستهلک می‌شود. این میراگرها به دلیل سادگی نصب، انطباق با سایر اجزای سازه، و تنوع در ابعاد و ظرفیت‌ها، در طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌ها کاربرد گسترده‌ای دارند.

روش استفاده از جداگر لرزه ای در پی سازه (A4)

جداسازی لرزه‌ای (Seismic Isolation) روشی است که با قرار دادن جداگرها (Isolators) بین پی و سازه، انتقال نیروهای زلزله به سازه را کاهش می‌دهد. این جداسازها از طریق اصطکاک بین سطوح تماس انرژی زلزله را اتلاف کرده و شتاب پاسخ منتقل شده به سازه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند.

تعیین شاخص‌های تأثیرگذار بر انتخاب

شاخص‌های تأثیرگذار بر انتخاب روش‌های کنترل سازه‌های مقاوم در برابر زلزله با رویکرد دو منظوره سازی با مصاحبه و نظرخواهی از خبرگان امر شناسایی گردیدند که شاخص‌های تصمیم‌گیری شامل مجموعه‌ای از خصوصیات اقتصادی و اجرایی است.

۱- میزان مقاومت در برابر باهای ناشی از زلزله (X_1)

۲- میزان مقاومت در برابر باهای ناشی از باد (X_2)



شکل ۱- تصویر گرافیکی درخت سلسله مراتب ارزیابی روش‌های کنترل سازه‌های مقاوم در برابر زلزله (ماخذ: نگارندگان)

ارزیابی روش های کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله با رویکرد دو منظوره سازی و استفاده از روش AHP

جدول ۳- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی شاخص‌ها و معیارهای تأثیرگذار بر روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله با رویکرد دو منظوره سازی

$$IR=0.01$$

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	وزن نهایی
X1	1	1.8	2.56	4.23	6.45	7.12	0.389
X2		1	1.89	2.57	4.19	5.44	0.249
X3			1	1.98	3.76	2.56	0.159
X4				1	2.35	2.54	0.102
X5					1	1.46	0.054
X6						1	0.047

در ادامه ماتریس های داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از روش‌های کنترل هوشمند سازه ها نیز برای هر یک از شاخص‌ها استخراج گردید. در شاخص میزان مقاومت در برابر زلزله، بهترین نوع روش کنترل سازه ها استفاده از کنترل فعال کابلی بدست آمد و روش های استفاده از میراگرهای غیر جرمی، استفاده از جداگر های لرزه ای و در نهایت میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار گرفتند (جدول ۴).

جدول ۴- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از انواع روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله در شاخص میزان مقاومت در برابر زلزله

$$IR=0.01$$

	A1	A2	A3	A4	وزن نهایی شاخص
A1	1	1.18	1.08	1.12	0.272
A2		1	0.81	0.86	0.218
A3			1	1.1	0.264
A4				1	0.245

در شاخص میزان مقاومت در برابر باد، بهترین نوع روش کنترل سازه ها، روش کنترل فعال کابلی بدست آمد. روشهای استفاده از میراگرهای غیر جرمی، استفاده از جداگر های لرزه ای و در نهایت میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار گرفتند (جدول ۵). در شاخص هزینه اجرا، بهترین نوع روش کنترل سازه ها، استفاده از روش کنترل فعال کابلی بدست آمد. روشهای استفاده از جداگرهای لرزه ای، استفاده از میراگرهای غیر جرمی و در نهایت میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار گرفتند (جدول ۶).

جدول ۵- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از انواع روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله در شاخص میزان مقاومت در برابر باد

$$IR=0.02$$

	A1	A2	A3	A4	وزن نهایی شاخص
A1	1	7.64	1.76	3.12	0.483
A2		1	0.18	0.20	0.050
A3			1	1.43	0.272
A4				1	0.196

جدول ۶- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از انواع روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله در شاخص هزینه اجرا

$$IR=0.03$$

	A1	A2	A3	A4	وزن نهایی شاخص
A1	1	6.56	2.94	1.87	0.477
A2		1	0.25	0.19	0.057
A3			1	0.63	0.188
A4				1	0.279

جدول ۷- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله در شاخص قابلیت اجرا در ساختمان های موجود

$$IR=0.03$$

	A1	A2	A3	A4	وزن نهایی شاخص
A1	1	5.78	4.62	5.18	0.627
A2		1	0.65	1.82	0.125
A3			1	1.36	0.150
A4				1	0.098

در شاخص قابلیت اجرا در ساختمان های موجود، بهترین نوع روش کنترل سازه ها با رویکرد دومنظوره سازی، استفاده از روش کنترل فعال کابلی بدست آمد. روش های استفاده از میراگرهای غیر جرمی، استفاده از میراگرهای جرمی و در نهایت جداگرهای لرزه‌ای در رتبه های بعدی قرار گرفتند (جدول ۷).

جدول ۸- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی شاخص هر یک از انواع روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله در شاخص پیچیدگی اجرا

$$IR=0.01$$

وزن نهایی شاخص	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	۱	۶.۳۵	۳.۰۹	۳.۰۳
A ₂		۱	۰.۲۷	۰.۲۹
A ₃			۱	۱.۱۴
A ₄				۱

در شاخص پیچیدگی اجرا، بهترین نوع روش چند منظوره سازی، استفاده از کنترل فعال کابلی بدست آمد. رو شهای استفاده از میراگرهای غیرجرمی، استفاده از جداگر های لرزه ای و در نهایت میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار گرفتند (جدول ۸).

جدول ۹- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی شاخص هر یک از انواع روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله در شاخص سرعت اجرا

$$IR=0.01$$

وزن نهایی شاخص	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	۱	۵.۷۱	۲.۵۹	۲.۴۸
A ₂		۱	۰.۳۶	۰.۴۴
A ₃			۱	۱.۱۱
A ₄				۱

در شاخص سرعت اجرا، بهترین نوع روش کنترل سازه ها، روش کابلی بدست آمد. رو شهای استفاده از میراگرهای غیرجرمی، استفاده از جداگرهای لرزه ای و در نهایت میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار گرفتند (جدول ۹).

رتبه بندی روش های ارزیابی کنترل سازه ها با در نظر گرفتن خروجی اضطراری بدست آمده بر مبنای هر شاخص به طور خلاصه در **Error! Reference source not found.** نهایت وزن نهایی شاخص های بدست آمده که بیانگر ضریب اهمیت هر شاخص نیز است در وزن های بدست آمده برای هر یک از روش ها ضرب کرده و امتیاز نهایی هر روش از مجموع آن ها در شاخص های دیگر بدست آورده شد (**Error! Reference source not found.**).

جدول ۱۰- رتبه بندی روش کنترل سازه های مقاوم در برابر بارهای زلزله با رویکرد دو منظوره سازی

روش کنترل فعال	ضریب اهمیت
روش کنترل فعال کابلی	۰.۳۸۰
روش استفاده از میراگر جرمی	۰.۱۴۸
روش استفاده از میراگر غیر جرمی	۰.۲۴۵
روش استفاده از جداگر لرزه ای	۰.۲۲۷

نتیجه گیری

ایمنی، زمان و اقتصاد سه محور مهم و تاثیرگذار بر کیفیت صنعت ساختمان سازی در کشور میباشند که با توجه به قرار گرفتن ایران در یکی از مناطق لرزه خیز جهان و احتمال وقوع زلزله های مخرب در همه نقاط کشور ایمنی لرزه های ساختمانها از اهمیت بسیاری برخوردار میباشد. در این راستا از مهمترین مراحل مدیریت بحران که نقش قابل توجهی در کاهش تلفات انسانی و ایمنی ساختمانها دارد می توان به مرحله پیش بینی و هشدار اولیه و همچنین مرحله پاسخگویی اشاره نمود. یکی از فناوریهای که در مراحل ذکر شده کاربرد فراوانی دارد فناوری سازه های هوشمند در شرایط بروز بحران می باشد. حدود سه دهه است که جامعه مهندسان عمران با فن آوری کنترل فعال ارتعاش سازه ها به ویژه در برابر زلزله آشنا شده است.

روش های متعددی برای کنترل ارتعاش سازه ها وجود دارد. یکی از چالش های این روش ها این است که در بسیاری از موارد، طراحی آن ها بیشتر بر کاهش اثرات زلزله متمرکز است، در حالی که نیروی باد در ساختمان های بلندمرتبه نیز نیرویی تعیین کننده است و نیاز به توجه ویژه دارد. از جمله این روش ها می توان به استفاده از انواع میراگرها (مانند میراگرهای جرمی تنظیم شده یا ویسکوز)، تعبیه آونگ های سنگین یا مخازن مایع در طبقات بالایی، و استفاده از جداگرهای لرزه ای اشاره کرد. استفاده از آونگ یا مخازن مایع در طبقات بالا، اگرچه می تواند جابجایی های ناشی از زلزله و باد را کاهش دهد، وزن سازه را افزایش داده و در نتیجه نیروی زلزله وارد بر سازه را بیشتر می کند. این سیستم ها در برابر نیروی باد، که اغلب به صورت دینامیکی و نوسانی (مانند اثر گردابه) عمل می کند، در صورت طراحی صحیح کارآمد هستند، اما طراحی نادرست ممکن است کارایی آن ها را کاهش داده یا در شرایط خاص باعث تشدید ارتعاشات و لنگر واژگونی شود. همچنین، استفاده از میراگرها و جداگرهای لرزه ای معمولاً هزینه های اولیه ساخت را افزایش می دهد، اما با کاهش آسیب های ناشی از زلزله

یا باد، می توانند در بلندمدت از نظر اقتصادی توجیه پذیر باشند، به ویژه در مناطق با خطر لرزه ای بالا یا برای ساختمان های حساس. در نتیجه همانگونه که از نتایج پیداست روش کنترل فعال کابلی بهترین روش بوده و روشهای استفاده از میراگرهای غیر جرمی، جداگرهای لرزه ای و میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار میگیرند. روش کنترل فعال کابلی با کاهش ارتعاشات سازه، از تغییر شکل های بزرگ در اجزای سازه ای و غیرسازه ای (مانند دیوارها و درها) جلوگیری می کند، که می تواند مسیرهای خروج را باز نگه دارد. در واقع استفاده از کابل های کنترل فعال که هم زمان برای کنترل ارتعاشات سازه و هم به عنوان وسیله ای برای خروج اضطراری انسان ها از طریق اتصال سازه به زمین خارج ساختمان به کار روند می تواند راهکاری خلاقانه و جدید باشد.



منابع

- [1] Farshad, M. (1995). Intelligent Materials and Structures. Scientia Iranica, 2(1).
- [2] ANNAMDAS, V.G.M., YANG, Y., LIU, H.; (2008). Current development in fiber Bragg grating sensors and their applications, SPIE, Vol. 6932 69320D-1. <https://doi.org/10.1117/12.775715>
- [3] Kaynia, A.M., Venerziano, D., Biggs, J.M., (1981). Seismic effectiveness of tuned mass dampers, J. of Struct. Div. ASCE, 107, 8, 1465-1484. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005760>
- [4] Park, Y.J., and Ang, A.H.S., (1985). Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, p.722-739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
- [5] H.U.Koyluoglu, S.R.K.Nielsen, A.S.Cakmak and P.H.Kirkegaard; (1998). Prediction of global and localized damage and future reliability for RC structures subject to earthquake, Engineering and Structural Dynamics, 26. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199704\)26:4<463::AID-EQE653>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199704)26:4<463::AID-EQE653>3.0.CO;2-N)
- [6] P.S.Skjaerbaek, S.R.K.Nielsen, P.H.Kirkegaard and A.S.Cakmak; (1998). Damage localization and quantification of earthquake excited RC-frames, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199809\)27:9<903::AID-EQE757>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199809)27:9<903::AID-EQE757>3.0.CO;2-C)
- [7] Chen G., Wu J.; (2001). Seismic performance of MTMDs in suppressing multimode response of building structures, Smart Struct. & Materials, 4330.
- [8] Ryu, H., Lee, H., and Kim, K.S., (2001). An economical and multiple fiber grating system with a rapid response using code division multiple access. Measurement Science and Technology, 12, 906-908. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/7/327>
- [9] Ryu, C.Y. and Hong, C.S., (2002). Development of fiber Bragg grating sensor system using wavelength-swept fiber laser. Smart Materials and Structures, 11 (3), 468-473. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/3/401>
- [10] Kim, K.S., Chung, C., and Kim, H.J., (2003b). Fiber optic structural monitoring of concrete beam retrofitted by composite patches. In: Proceedings of SPIE 10th international symposium on smart structures and materials, San Diego, USA.
- [11] Kim, K.S., Song, Y.C., Pang, G.S., and Yoon, D.J., (2005). Study on the application of fiber Bragg grating sensors for the containment structures of nuclear power plants. Proceedings of the SPIE, Volume 5765, p. 584-590. <https://doi.org/10.1117/12.601146>
- [12] Kwon, I.B. and Cho, S.B., (2004). Strain and temperature measurements using fiber optic BOTRA sensor. In: Proceedings of the US-Korea workshop on smart structure technology, Seoul, Korea.
- [14] Yoon, D.J., Lee, S.I., and Lee, Y.S., (2005). Characteristics of patch type smart-piezo-sensor for smart structures. Key Engineering Materials, 297-300, 2010-2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.297-300.2010>
- [15] Park, S.H., Yun, C.B., Roh, Y., and Lee, J.J., (2005b). Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches. Smart Structures and Systems, 1 (4), 339-353. <https://doi.org/10.12989/sss.2005.1.4.339>
- [16] Park, S.H., Yun, C.B., Roh, Y., and Lee, J.J., (2006b). PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components. Smart Materials and Structures, 15 (4), 957-966. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/4/009>
- [17] Chandra M.S., (2006). Earthquake structural response control using a TMD, Proc. of conf. 4WCSCM, San Diego, USA.
- [19] Carver, R. H., & Gradwohl Nash, J. (2009). Doing Data Analysis with SPSS Version 18. United States: Cengage Learning.
- [20] Saaty, L. T. (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw Hill Company.

- [21] Badri, M. A. (2001). A combined AHP-GP model for quality control systems. *International Journal of Production Economics*, 19(4), 27–40. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00077-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00077-3)
- [22] Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(4), 397–406. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7>
- [23] Medineckiene, M., Turskis, Z., & Zavadskas, E. K. (2010). Sustainable Construction Taking Into Account the Building Impact on the Environment. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 18(2), 118-127. <https://doi.org/10.3846/jeel.2010.14>
- [24] Podvezko, V., Mitkus, S., & Trinkunienė, E. (2010). Complex evaluation of contracts for construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(2), 287–297. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.33>
- [25] Sivilevicius, H. (2011a). Modeling the Interaction of Transport System Elements. *Transport*, 26(1), 20-34. <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.560366>
- [26] Sivilevicius, H. (2011b). Application of Expert Evaluation Method to Determine the Importance of Operating Asphalt Mixing Plant Quality Criteria and Rank Correlation. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 6(1), 48-58. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2011.07>
- [27] Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., & Zavadskas, E. K. (2011). An integrated model for prioritizing strategies of the Iranian mining sector. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(3), 459-484. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.603173>
- [29] Saaty, L. T., & Vargas, L. G. (2001). *Models, methods, concepts & applications of analytic hierarchy process*. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers Group.
- [30] Rahimian M., Kamrani Moghadam B., Ghorbani Tanha S.A.K., (2004), Controlling the vibrations of structures using a mass-adjusted damper, the first conference on seismic strengthening, Amirkabir University, Tehran.
- [31] Guide to methods and methods of seismic improvement of existing buildings and implementation details; (2009), Publication No. 524, Vice President Planning and Strategic Supervision
- [32] Hosseini Lavasani, Seyed Hossein; (2008), Smart retrofitting of high-rise buildings in Tehran metropolis, case study: 37-story building of Irtoya Tower located in District 13 of Tehran Municipality, PhD Thesis, Tarbiat Modares University.
- [33] Aldemir, U., & Yanik, A. (2022). Advances in modeling and vibration control of building structures. *Automation in Construction*, 139, 104267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104267>
- [34] Bozorgvar, M., & Zahrai, S. M. (2021). Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive control strategies. *Journal of Vibration and Control*, 27(15-16), 1812-1826. <https://doi.org/10.1177/1077546320949088>
- [35] Elias, S., & Matsagar, V. (2023). Optimal tuned mass damper placement for vibration control in high-rise buildings under wind and seismic excitations. *Journal of Building Engineering*, 63, 105492. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105492>
- [36] Wang, X., & Zhang, L. (2023). Evaluating sustainability in urban construction projects using AHP and fuzzy logic. *Sustainable Development*, 31(2), 456-468. <https://doi.org/10.1002/sd.2389>
- [37] Formisano, A., & Mazzolani, F. M. (2022). AHP-based decision-making for seismic retrofitting of existing buildings. *Structures*, 37, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.067>
- [38] Darko, A., Chan, A. P. C., & Owusu, E. K. (2021). An empirical study on the selection of sustainable building materials using the analytic hierarchy process (AHP). *Sustainable Cities and Society*, 73, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103123>
- [39] Arefi, S.L., Gholizad, A., & Seyedpoor, S. M. (2020). Damage detection of structures using modal strain energy with guyan reduction method. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(4), 47-60. <https://doi.org/10.22075/jrce.2020.19803.1384>

- [40] Arefi, S. L., & Gholizad, A. (2020). Damage identification of structures by reduction of dynamic matrices using the modified modal strain energy method. *Struct. Monit. Maint*, 7(2), 125-147. <https://doi.org/10.12989/smm.2020.7.2.125>
- [41] Hosseini, S. T., Lale Arefi, S., Bitarafan, M., Abazarlou, S., & Zavadskas, E. K. (2016). Evaluation types of exterior walls to reconstruct Iran earthquake areas (Ahar Heris Varzeqan) by using AHP and fuzzy methods. *International Journal of Strategic Property Management*, 20(3), 328-340. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2016.1190794>
- [42] Nakhaei, J., Bitarafan, M., & Lale Arefi, S. (2015). Choosing the best urban tunnels as safe space in crisis using AHP method: a case study in Iran. *Journal of Architecture and Urbanism*, 39(2), 149-160. <https://doi.org/10.3846/20297955.2015.1056439>
- [43] Bitarafan, M., Hossainzadeh, Y., & Yaghmayi, S. (2013). Evaluating the connecting members of cold-formed steel structures in reconstruction of earthquake-prone areas in Iran using the AHP methods. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 711-716. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.07.007>
- [44] Bitarafan, M., Hosseini, S. B., Abazarlou, S., & Mahmoudzadeh, A. (2015). Selecting the optimal composition of architectural forms from the perspective of civil defense using AHP and IHWP methods. *Architectural Engineering and Design Management*, 11(2), 137-148. <https://doi.org/10.1080/17452007.2013.802982>
- [45] Pouri Rahim, A. A., Bitarafan, M., & Arefi, S. L. (2013). Evaluation of types of shapes of building roof against explosion. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(1), 1.
- [46] Bitarafan, M., Amini Hosseini, K., & Hashemkhani Zolfani, S. (2023). Evaluating natural hazards in cities using a novel integrated MCDM approach (case study: Tehran city). *Mathematics*, 11(8), 1936.

