Journal of Safe City
Online ISSN: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir

Research Paper

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
[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

A R T I C L E I N F O

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

A B S T R A C T

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: sh.arefi@esfarayen.ac.ir)

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.

مجلـه شهـر ایمـن
شاپا الکترونیکی: 2676-556X
Journal Homepage: www.ispdrc.ir

مقاله پژوهشی

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

شاهین لعل عارفی *[1]، حسین حاتمی نژاد[2]، علیرضا غفوری زرندی [3]

۱-استادیار گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، خراسان شمالی، اسفراین، ایران
۲- استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشجوی دکتری، پردیس بین المللی کاسپین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت ؛ ۱۴۰۳/۰۷/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

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

واژگان کلیدی
کنترل سازه
خروج اضطراری
ساختمان
بار زلزله
روش AHP

چکیده

دومنظوره‌سازی در روش‌های کنترل سازه‌ای، که هم مقاومت در برابر زلزله و هم قابلیت خروج اضطراری را بهبود می‌بخشد، از اهمیت بالایی در طراحی ساختمان‌های ایمن برخوردار است. این مفهوم ترکیبی از مهندسی مقاوم‌سازی لرزه‌ای و برنامه‌ریزی تخلیه اضطراری است که می‌تواند منجر به کاهش خسارات جانی و مالی شود. یکی از چالش‌های اصلی در مهندسی زلزله، ارزیابی میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها و کنترل اثرات زلزله است. در دهه‌های اخیر، محققان در کشورهای زلزله‌خیز به توسعه فناوری‌های سازه‌های مقاوم در برابر زلزله متمرکز شده‌اند که توانایی پاسخگویی به محرک‌های خارجی مانند زلزله و باد را دارند. روش‌های متعددی برای کنترل ارتعاش سازه‌ها وجود دارد، اما یکی از چالش‌ها این است که طراحی این روش‌ها اغلب بر کاهش اثرات زلزله متمرکز است، در حالی که نیروی باد در ساختمان‌های بلندمرتبه نیز نیرویی تعیین‌کننده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده، میراگرهای ویسکوز، مخازن مایع در طبقات بالا، و جداگرهای لرزه‌ای اشاره کرد. استفاده از آونگ یا مخازن مایع، اگرچه جابجایی‌های ناشی از زلزله و باد را کاهش می‌دهد، وزن سازه را افزایش داده و نیروی زلزله را بیشتر می‌کند. این سیستم‌ها در برابر نیروی باد، که معمولاً به‌صورت دینامیکی و نوسانی عمل می‌کند، در صورت طراحی صحیح کارآمد هستند، اما طراحی نادرست ممکن است کارایی آن‌ها را کاهش دهد یا در شرایط خاص باعث تشدید ارتعاشات شود. استفاده از میراگرها و جداگرهای لرزه‌ای هزینه‌های اولیه ساخت را افزایش می‌دهد، اما در بلندمدت با کاهش خسارات ناشی از زلزله یا باد می‌توانند اقتصادی باشند. موضوع مهم دیگر، استفاده از روش‌های دو منظوره است که علاوه بر مقاومت در برابر بارهای زلزله و باد، امکان خروج اضطراری سریع و ایمن را فراهم کنند. این روش‌ها باید قابلیت نصب سریع و کم‌هزینه در سازه‌های موجود را داشته باشند، زیرا در هنگام زلزله، وجود مسیرهای خروج امن حیاتی است. دو منظوره‌سازی نه‌تنها عملکرد لرزه‌ای ساختمان را بهبود می‌بخشد، بلکه خروج اضطراری را تسهیل کرده و می‌تواند به‌عنوان یک اصل اساسی در طراحی‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

* نویسنده مسؤل: sh.arefi @esfarayen.ac.ir

۱- مقدمه

روش کنترل ارتعاشات روش پیشرفته ای در روند بهسازی‌سازه‌ها 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 سازه‌ای باشد با تعبیه وسایل وتجهیزات مناسبی در ساختمان باعث کاهش تغییرمکان و بهبود پاسخ دینامیکی سازه می‌شوند. با گسترش روشهای کنترل درسازه باید به دنبال روشهایی بود که با توجه به امکانات موجود در کشور به سادگی قابل اجرا بوده و از سوی دیگر تولید وکاربرد 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 مهم‌ترین مسائل در شهرها، توجه به تهدیدات طبیعی، از جمله زلزله است (Bitarafan et .al, 2023, Bitarafan et al., 2013). با توجه به این موضوع که از بیش از ۴۰ نوع سانحه طبیعی در دنیا ، ۳۱ نوع آن در ایران به ثبت رسیده است. از جمله این سوانح می‌توان به وقوع زمین لرزه های ویرانگر و سیل‌های مخرب اشاره نمود که ضرورت مطالعات شرایط غیر معمول را ایجاب می‌نماید.

یکی از مسائل چالش برانگیز در حوزه‌ی مهندسی زلزله، تعیین میزان آسیب سازه‌ها و نحوه کنترل و مقابله آن‌ها در هنگام وقوع زلزله است. شناسایی خطرات و آسیب‌های احتمالی ناشی از آن نقش مهمی در آمادگی برای مقابله و مقاومت در مناطق شهری ایفا می‌کند (Pourirahim et al, 2013). در این راستا در ده‌های اخیر نیاز به طراحی و ساخت سامانه‌هایی 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 سازه‌های موجود، کاربرد سامانه‌های سلامت سنجی سازه‌ها به نظر امری معقول می‌باشد زیرا این سامانه‌ها می‌توانند خرابی سازه ها، هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها و تلفات انسانی را را به شدت کاهش دهند (Annamdas, 2008، Arefi et al. 2020، Arefi & Gholizad, 2020). بهره گیری سامانه‌ها و سازه‌های هوشمند را می‌توان به سه حوزه‌ی مطالعاتی سلامت سنجی (SHM)، کنترل و تطبیق پذیری و هوش مصنوعی سازه‌ها دسته بندی نمود. تا کنون تحقیقات بسیاری بر روی این سه حوزه انجام شده است و سامانه‌هایی نیز بر اساس این پژوهش‌ها ساخته شده است که بیشتر آن‌ها تنها تمرکز بر یکی از سه حوزه بیان شده داشته‌اند.

همان‌گونه که اشاره گردید تحقیقات صورت گرفته درباره سامانه‌های هوشمند در سه حوزه سلامت سنج(SHM) ، کنترل و تطبیق پذیری و هوش مصنوعی سازه‌ها می‌باشد که در ادامه می‌توان 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 بار های رفت و برگشتی را در نظر می‌گیرد. این پژوهشگران در سال ۱۹۸۷ برنامه IDARC را برای تحلیل خسارت غیر ارتجاعی سازه‌های بتن مسلح تهیه کردند این نرم افزار می‌تواند در سلامت سنجی سازه‌ها 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. آن‌ها با بررسی رفتار هیسترزیس اولین مود، خسارت محلی و کلی را پیش بینی نمودند (Koyluoglu, 1997).

فرشاد تحقیقاتی را بر روی مصالح و سازه‌های 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 جربک و همکارانش روش جدیدی را برای بررسی تمرکز خسارت و اندازه گیری آن در قاب‌های 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 کم‌ترین فرکانس‌های ویژه با زمان‌های مختلف نیز باید مشخص می‌شد. طبقه بندی خسارت، هم از بازرسی چشمی و هم از آزمایش‌های آماری مقایسه گردید و نتیجه گیری شد که خصوصاً در حالاتی که خسارت در یک تراز معین از سازه متمرکز می‌گردد با استفاده از روش پیشنهادی، ارزیابی مناسبی از خسارت بدست می‌آید(Skjaerbaek,1997). چن و وو در سال ۲۰۰۱ به صورت آزمایشگاهی یک سازه سه طبقه اسکلت فلزی با نسبت 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 سال های۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ تحقیقاتی را بر روی Fiber Bragg Grating و سامانه‌های بازیابی 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 بهره گیری 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 بهره گیری از سنسورهای FBG انجام دادند (Kim et al. 2003a) .

کاون 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 درآمده بودند به وسیله یک میراگر جرمی نصب شده در تراز طبقه بام مدل سازی و مورد بررسی قرار دادند و به نتیجه¬ای 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 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 وتاثیر مطلوب آن را روی سازه‌هایی با میرایی کم مورد مطالعه قرار داده وتاثیرات 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 مغناطیسی‌رئولوژیکی (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 بهره گیری از سلامت سنجی سازه ها و 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 می کند و همچنین امکان نصب آن در سازه های موجود با هزینه معقول تر و

سرعت بالا وجود دارد. 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.

۲- روش شناختی اجرای مدل ارزیابی و تحلیل نتایج

در این پژوهش روش کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله با استفاده از منابع کتابخانه‌ای شناسایی گردید و سپس با مصاحبه با افراد خبره در زمینه‌ی 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، پرسشنامه‌ای جهت وزن دهی به شاخص‌های موثر و همچنین امتیاز دهی به هر یک از روش‌ها در معرض دید ۱۴ فرد خبره که آشنا به زمینه‌های سازه، زلزله و مدیریت ساخت بوده‌اند، قرار گرفت (مطابق جدول ۱). در ادامه از طریق به کارگیری روش تصمیم‌گیری گروهی بر اساس الگوی مقایسات زوجی درجه ضرورت وجودی هر یک از شاخص‌ها و همچنین روش‌ها در قالب یک مقیاس نه تایی لیکرت (معادل یک تا نه) بدست آمده است و سپس درخت سلسله مراتب تصمیم در سه سطح زوجی گزینه‌ها تشکیل شد و ضمن استخراج اولویت‌ها و تعیین وزن نهایی گزینه‌ها، چهار روش کنترل سازه ذکر شده در نرم افزار *Expert Choice* با یکدیگر مقایسه و گزینه‌ی بهینه تعیین گردید. برای بررسی اعتبار پرسشنامه‌ها نیز از تست آلفای کرون باخ استفاده شده است (*Carver&Nash,2009*). آلفای کرون باخ نتایج پرسشنامه‌های پر شده توسط جامعه خبرگان این تحقیق برابر ۷۷/۶۷ درصد می‌باشد که از ۷۵ درصد بالاتر بوده و قابل قبول است. همچنین جهت صحت سنجی ماتریس‌های زوجی در هر پرسشنامه سازگاری آن‌ها محاسبه گردید و ماتریس‌هایی که سازگاری بیشتر از یک دهم داشتند حذف شد و تنها ماتریس‌هایی 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 محاسبه‌ی اهمیت نسبی مجموعه‌ای از گزینه‌ها در یک تصمیم گیری چند معیاره است. با بهره گیری از این تکنیک می‌توان معیارها و شاخص‌های کیفی را به صورت معیارهایی کمی ارائه نمود (*Badri, 2001*). تکنیک *AHP* از سه بخش اصلی ساختار مدل، داوری تطبیقی از گزینه‌ها و معیارها و در نهایت ترکیب اولویت‌ها تشکیل شده است(*Da˘gdeviren, 2008*) .

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

از پژوهش‌های مهمی که اخیراً با این تکنیک انجام شده است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- بیطرفان و دانشجو در سال ۲۰۲۳ در ارزیابی انواع روش های اسکان موقت در برابر تهدیدات از روش *AHP* استفاده کردند.
- وانگ و ژانگ بر روی مکانیابی بهینه برای پروژه‌های ساختمانی با روش *AHP* مطالعاتی انجام دادند. (*Wang & Zhang,2023*)
-فورمیسانو و مزولانی از *AHP* برای انتخاب استراتژی‌های بهینه مقاوم‌سازی لرزه‌ای در ساختمان‌های موجود استفاده کرده است (*Formisano and Mazzolani, 2022*).
- دارکو و همکاران از روش *AHP* در انتخاب مصالح پایدار در پروژه‌های ساختمانی استفاده کردند (*Darko et al 2021*)
- حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی انواع دیوارهای خارجی در بازسازی مناطق زلزله زده با استفاده از روش *AHP* پرداختند.
- نخعی و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعاتی برای انتخاب بهترین تونل که بتوان به عنوان فضای امن استفاده کرد با استفاده از روش *AHP* انجام دادند.
- بیطرفان و همکاران در سال ۲۰۱۵ در انتخاب ترکیب بهینه فرم‌های معماری از روش *AHP* استفاده کردند.
- بیطرفان و همکاران در سال ۲۰۱۳ به ارزیابی اعضای اتصال سازه‌های فولادی سرد نورد شده در بازسازی مناطق زلزله‌خیز با استفاده از روش *AHP* پرداختند.
- دینکینه و همکاران (*Medineckiene et al.*) در سال ۲۰۱۰ از تکنیک *AHP* در ارزیابی ساختمان‌های پایدار استفاده کردند.
- پودوزکو و همکاران (*Podvezko et al.*) از تکنیک *AHP* در ارزیابی قراردادهای مالی استفاده کردند.
- سیلویلویکیس(*Sivilevicius*) از تکنیک *AHP* در مدل‌سازی سیستم حمل و نقل بهره گرفته است.

- سیلویلویکیس *(Sivilevicius)* از تکنیک *AHP* در ارزیابی تکنولوژی‌های نوین بهره گرفته‌اند.
- فولادگر و همکاران *(Fouladgar et al.)* از تکنیک *AHP* در اولویت بندی راهبردها بهره گرفته‌اند.

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 تصمیم‌گیرندگان 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 فوق‌العاده بیشتر	**۹**
مقادیر متوسط	۲،۴،۶،۸

در این مرحله تصمیم‌گیرندگان 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.

۳- انواع روش‌های کنترل سازه

روشهایی مختلفی جهت کنترل سازه ها 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 لرزه ای در پی سازه *(A4)*

۳-۱- روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی (A_1)

روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی *(A1)* سیستمی دو منظوره است که با استفاده از حسگرهای ارتعاش‌سنج 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 می کند و هرچه میان ارتعاش بیشتر باشد پالس قوی تری ایجاد می گردد.

- فعالگر

فعالگرها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که اگر شدت پالس الکترونیکی ایجاد شده توسط حسگر پیزو الکتریک بیش از ارتعاش ناشی از زلزله با بیش از سه ریشتر بود، وارد عمل شده و سامانه کنترلی را بکار می اندازد.

- سامانه کنترلی

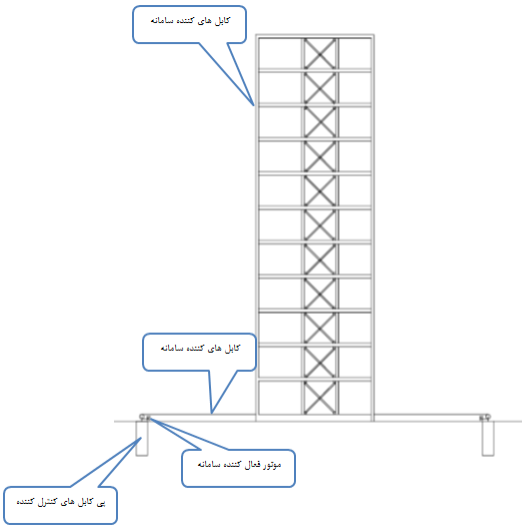
سامانه کنترلی شامل بخش های زیر می باشد:

- کابل های کنترلی
- اتصال دهنده های کابلها به سازه ساختمان
- فونداسیون سامانه کنترلی
- قفل کننده های کابلها
- موتور الکتریکی جمع کننده کابلها
- کابلهای جمع کننده کابلهای کنترلی

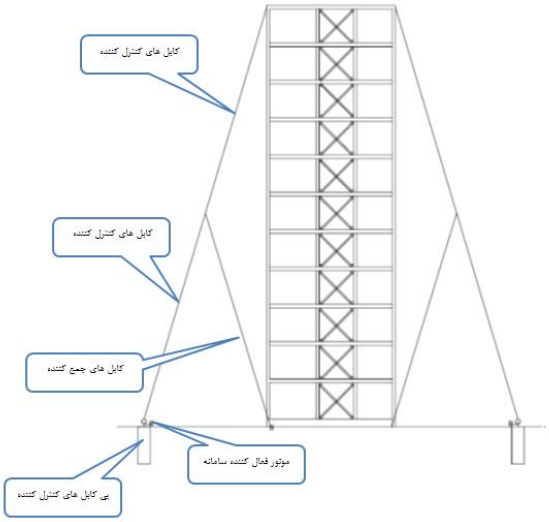
- کمربند های خروج اضطراری

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 به‌عنوان یک روش نوین در طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌های بلندمرتبه و عمومی در مناطق زلزله‌خیز با رویکرد دومنظوره سازی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل۱- شماتیک روش پیشنهادی کنترل فعال کابلی (ماخذ: نگارندگان)



شکل۲- حالت کابل های کنترل فعال پیش از زلزله یا باد (ماخذ: نگارندگان)

۲-۳- روش استفاده از میراگر جرمی در سازه (A_2)

استفاده از جرم‌های اضافی در نقاط بحرانی سازه برای کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله، میراگرهای جرمی تنظیم‌شده *(Tuned Mass Dampers)*نامیده می‌شود. تعداد، مقدار جرم، و مکان این میراگرها باید با دقت طراحی شود تا پاسخ مناسبی به تحریک‌های دینامیکی مانند زلزله یا باد ارائه دهد. طراحی این سیستم‌ها 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 می‌شوند. میراگرهای منفعل از جرم، فنر، و میراگر با مشخصات ثابت تشکیل شده و بدون نیاز به انرژی خارجی عمل می‌کنند، در حالی که میراگرهای فعال با استفاده از حسگرها، فعالگرها، و سیستم‌های کنترلی، سختی یا میرایی را به‌صورت دینامیکی تنظیم می‌کنند تا به‌طور مؤثرتری به ارتعاشات پاسخ دهند. *(Farshad, 1995)*

۳-۳- روش استفاده از میراگر غیر جرمی در سازه (A_3)

میراگرهای غیرجرمی بر اساس عملکرد آن‌ها به انواع اصطکاکی، فلزی(جاری شونده)، ویسکوز، ویسکوالاستیک، آلیاژهای حافظه دار شکلی (*SMA*) دسته بندی می‌گردند. (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 نشدنِ 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 پذیریِ اعضای فولادی پس از تسلیم متکی است. در بادبندها استفاده از میراگرهای فلزی تسلیمی متداول تر می باشد. این نوع میر اگرها اغلب از چند ورق فولادی موازی تشکیل می شوند و در ترکیب با یک سیستم بادبندی، نقش جذب و اتلاف انرژی را بر عهده م یگیرند . 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 حافظه‌دار شکلی (مانند نیکل-تیتانیوم یا نیتینول) ساخته می‌شوند که انعطاف‌پذیری بالایی داشته و به دلیل خاصیت سوپرالاستیک یا حافظه‌دار شکلی، پس از تغییر شکل‌های زیاد به حالت اولیه بازمی‌گردند. این آلیاژها مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارند و در مهاربندها یا اتصالات سازه‌ای استفاده می‌شوند.

در میراگرهای ویسکوز، انرژی از طریق حرکت سیال لزج (مانند روغن 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.

۴-۳- روش استفاده از جداگر لرزه ای در پی سازه (A_4)

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 منتقل‌شده به سازه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهند.

۴- تعیین شاخص‌های تأثیرگذار بر انتخاب

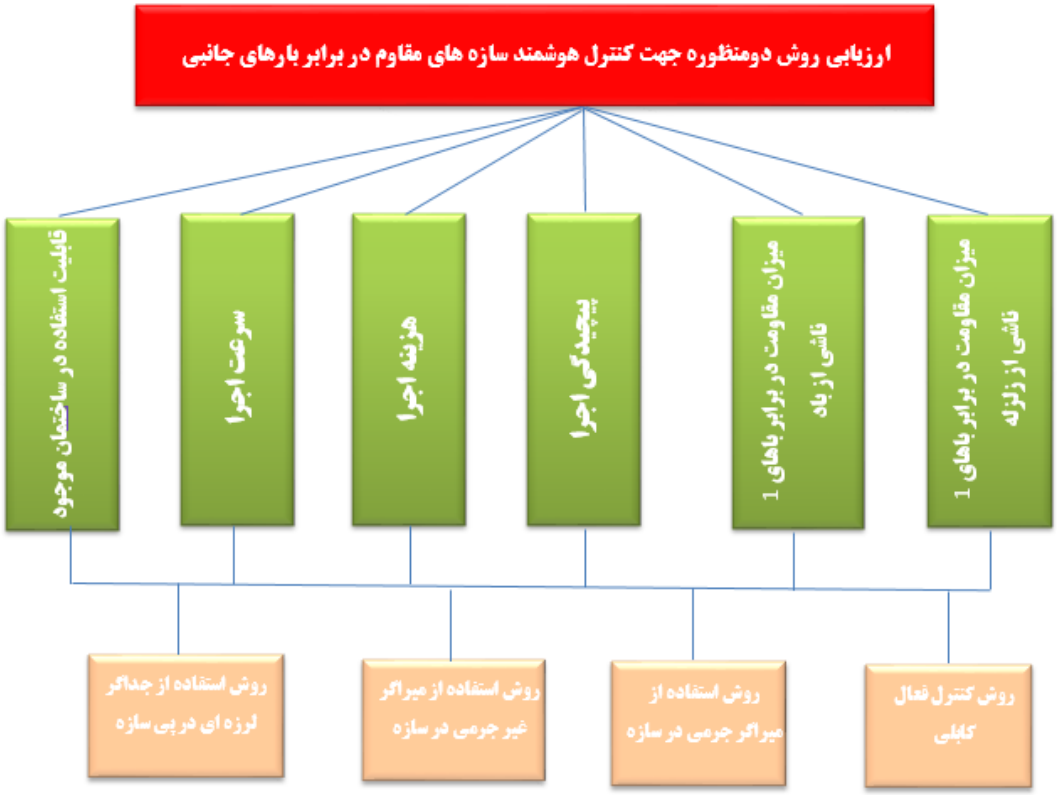
شاخص‌های تأثیرگذار بر انتخاب روش های کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله با رویکرد دو منظوره سازی با مصاحبه و نظرخواهی از خبرگان امر شناسایی گردیدند که شاخص‌های تصمیم گیری شامل مجموعه‌ای از خصوصیات اقتصادی و اجرایی است.

۱- میزان مقاومت در برابر باهای ناشی از زلزله *(X_1)*
۲- میزان مقاومت در برابر باهای ناشی از باد *(X_2)*
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 نشان داده شده است. این درخت شامل هدف، معیارها و گزینه‌های انتخاب است (Chandra, 2006).

۵- 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 ساختمان های موجود، پیچیدگی اجرا و سرعت اجرا به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.



شکل ۳- تصویر گرافیکی درخت سلسله مراتب ارزیابی روش های کنترل سازه های مقاوم در برابر زلزله (ماخذ: نگارندگان)

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

$IR=۰/۰۱$

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	وزن نهایی
X1	۱	۱.۸	۲.۵۶	۴.۲۳	۶.۴۵	۷.۱۲	۰.۳۸۹
X2		۱	۱.۸۹	۲.۵۷	۴.۱۹	۵.۴۴	۰.۲۴۹
X3			۱	۱.۹۸	۳.۷۶	۲.۵۶	۰.۱۵۹
X4				۱	۲.۳۵	۲.۵۴	۰.۱۰۲
X5					۱	۱.۴۶	۰.۰۵۴
X6						۱	۰.۰۴۷

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

$IR=۰/۰۱$

	A_1	A_2	A_3	A_4	وزن نهایی شاخص
A_1	۱	۱.۱۸	۱.۰۸	۱.۱۲	۰/۲۷۲
A_2		۱	۰.۸۱	۰.۸۶	۰/۲۱۸
A_3			۱	۱.۱	۰/۲۶۴
A_4				۱	۰/۲۴۵

در شاخص میزان مقاومت در برابر باد، بهترین نوع روش کنترل سازه ها، روش کنترل فعال کابلی بدست آمد. روشهای استفاده از میراگرهای غیرجرمی، 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 غیرجرمی 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

$IR=۰/۰۲$

	A_1	A_2	A_3	A_4	وزن نهایی شاخص
A_1	۱	۷.۶۴	۱.۷۶	۳.۱۲	۰/۴۸۳
A_2		۱	۰.۱۸	۰.۲۰	۰/۰۵۰
A_3			۱	۱.۴۳	۰/۲۷۲
A_4				۱	۰/۱۹۶

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

$IR=۰/۰۳$

	A_1	A_2	A_3	A_4	وزن نهایی شاخص
A_1	۱	۶.۵۶	۲.۹۴	۱.۸۷	۰/۴۷۷
A_2		۱	۰.۲۵	۰.۱۹	۰/۰۵۷
A_3			۱	۰.۶۳	۰/۱۸۸
A_4				۱	۰/۲۷۹

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

$IR=۰/۰۳$

	A_1	A_2	A_3	A_4	وزن نهایی شاخص
A_1	۱	۵.۷۸	۴.۶۲	۵.۱۸	۰/۶۲۷
A_2		۱	۰.۶۵	۱.۸۲	۰/۱۲۵
A_3			۱	۱.۳۶	۰/۱۵۰
A_4				۱	۰/۰۹۸

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 غیرجرمی، 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

$IR=۰/۰۱$

	A_1	A_2	A_3	A_4	وزن نهایی شاخص
A_1	۱	۶.۳۵	۳.۰۹	۳.۰۳	۰/۵۳۷
A_2		۱	۰.۲۷	۰.۲۹	۰/۰۶۵
A_3			۱	۱.۱۴	۰/۲۰۷
A_4				۱	۰/۱۹۲

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 لرزهای 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

$IR=۰/۰۱$

	A_1	A_2	A_3	A_4	وزن نهایی شاخص
A_1	۱	۵.۷۱	۲.۵۹	۲.۴۸	۰/۵۰۶
A_2		۱	۰.۳۶	۰.۴۴	۰/۰۸۴
A_3			۱	۱.۱۱	۰/۲۱۴
A_4				۱	۰/۱۹۶

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).

در نهایت وزن نهایی شاخص‌های بدست آمده که بیانگر ضریب اهمیت هر شاخص نیز است در وزن‌های بدست آمده برای هر یک از روش ها ضرب کرده و امتیاز نهایی هر روش از مجموع آن‌ها در شاخص‌های دیگر بدست آورده شد. رتبه‌بندی نهایی روش‌های ارزیابی کنترل سازه ها با رویکرد دو منظوره سازی بر مبنای هر شاخص به طور خلاصه در ***Error! Reference source not found.*** آورده شده است.

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

۷- نتیجه‌گیری

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 لرزهای ساختمانها از اهمیت بسیاری برخوردار میباشد. در این راستا از مهمترین مراحل مدیریت بحران که نقش قابل توجهای 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 فناوریهایی 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.

روش‌های متعددی برای کنترل ارتعاش سازه‌ها وجود دارد. یکی از چالش‌های این روش‌ها این است که در بسیاری از موارد، طراحی آن‌ها بیشتر بر کاهش اثرات زلزله متمرکز است، در حالی که نیروی باد در ساختمان‌های بلندمرتبه نیز نیرویی تعیین‌کننده است و نیاز به توجه ویژه دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از انواع میراگرها (مانند میراگرهای جرمی تنظیم‌شده یا ویسکوز)، تعبیه آونگ‌های سنگین یا مخازن مایع در طبقات بالایی، و استفاده از جداگرهای لرزه‌ای اشاره کرد. استفاده از آونگ یا مخازن مایع در طبقات بالا، اگرچه می‌تواند جابجایی‌های ناشی از زلزله و باد را کاهش دهد، وزن سازه را افزایش داده و در نتیجه نیروی زلزله وارد بر سازه را بیشتر می‌کند. این سیستم‌ها در برابر نیروی باد، که اغلب به‌صورت دینامیکی و نوسانی (مانند اثر گردابه) عمل می‌کند، در صورت طراحی صحیح کارآمد هستند، اما طراحی نادرست ممکن است کارایی آن‌ها را کاهش داده یا در شرایط خاص باعث تشدید ارتعاشات و لنگر واژگونی شود. همچنین، استفاده از

میراگرها و جداگرهای لرزه‌ای معمولاً هزینه‌های اولیه ساخت را افزایش می‌دهد، اما با کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله یا باد، می‌توانند در بلندمدت از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشند، به‌ویژه در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا یا برای ساختمان‌های حساس.

در نتیجه همانگونه که از نتایج پیداست روش کنترل فعال کابلی بهترین روش بوده و روشهای استفاده از میراگرهای غیر جرمی، جداگرهای لرزهای و میراگرهای جرمی در رتبه های بعدی قرار میگیرند. روش کنترل فعال کابلی با کاهش ارتعاشات سازه، از تغییر شکل‌های بزرگ در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای (مانند دیوارها و درها) جلوگیری می‌کند، که می‌تواند مسیرهای خروج را باز نگه دارد. در واقع استفاده از کابل‌های کنترل فعال که هم‌زمان برای کنترل ارتعاشات سازه و هم به‌عنوان وسیله‌ای برای خروج اضطراری انسان‌ها از طریق اتصال سازه به زمین خارج ساختمان به کار روند می تواند راهکاری خلاقانه و جدید باشد.

۷- منابع

1- 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

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- 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

4- 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

5- 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

6- Bitarafan, A., & Daneshjoo, K. (2023). Evaluating the Various Methods of Temporary Shelter in Crisis Situations Using the AHP Method. *Safe City*, *5*(4), 21-37.

7- 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.

8- 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

9- 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

10- Bitarafan, M., Zolfani, S. H., Arefi, S. L., & Zavadskas, E. K. (2012). Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G. *Archives of civil and mechanical engineering*, *12*(3), 360-367.

11- 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

12- Carver, R. H., & Gradwohl Nash, J. (2009). Doing Data Analysis with SPSS Version 18. United States: Cengage Learning.

13- Chandra M.S., (2006). Earthquake structural response control using a TMD, Proc. of conf. 4WCSCM, San Diageo, USA.

14- Chen G., Wu J. (2001). Seismic performance of MTMDs in suppressing multimode response of building structures, Smart Struct. & Materials, 4330.

15- Da˘gdeviren , 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

16- 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

17- 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.jobe.2022.105492

18- Farshad, M. (1995). Intelligent Materials and Structures. Scientia Iranica, 2(1).

19- 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

20- 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

21- Guide to methods and methods of seismic improvement of existing buildings and implementation details; (2009), Publication No. 524, Vice President Planning and Strategic Supervision

22- 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

23- 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.

24- 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

25- Kaynia, A.M., Venerziano, D., Biggs, J.M., (1981). Seismic effectivness of tuned mass dampers, J. of Struct. Div. ASCE, 107, 8, 1465-1484. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005760

26- 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.

27- 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

28- 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.

29- 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/jeelm.2010.14

30- 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

31- 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

32- 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

33- 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)

34- Podvezko, V., Mitkus, S., & Trinkuniene, 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

35- 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.

36- 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.

37- 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

38- 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

39- Saaty, L. T. (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw Hill Company.

40- Saaty, L. T., & Vargas, L. G. (2001). *Models, methods, concepst & applications of analytic hierarchy process.* Boston, USA: Kluwer Academic Publishers Group.

41- Sivilevicius, H. (2011a). Modeling the Interaction of Transport System Elements. Transport, 26(1), 20-34. https://doi.org/10.3846/16484142.2011.560366

42- 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

43- Skjaerbaek, P.S.,.Nielsen, S.R.K.,.Kirkegaard, P.H., Cakmak, A.S. (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

44- 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

45- 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