



Vibration control of stiffness irregular structures under near and far-field earthquakes by MR dampers and fuzzy controllers

M. R. Zamanian¹, A. Kheyroddin², A. Mortezaei¹

¹ Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

² Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ABSTRACT: With the increase in the population of cities and the lack of spaces for construction, the creation of diverse uses, architecture and beauty of structures, the need for irregular structures is increasing. One way to reduce the construction hazards is to use vibration control tools in them. In the present study, the performance of a magnetic damper with a fuzzy controller to reduce the vibrations of an irregular hard structure under near and far earthquakes has been investigated. In the present study, the performance of a magnetic damper with the fuzzy controller to reduce the vibrations of an irregular stiffness structure under near and far field earthquakes has been investigated. The capacity of the introduced magnetic damper is equal to 1000kN, which is installed in the first floor between the floor level and the ceiling level of the first floor. The fuzzy system is designed based on the relative speed of the two ends of the damper to determine the relative speed of the amount of voltage and, consequently the control force that enters the structure. Three different types of irregularities in height, including hardness irregularities with a coefficient of 60%, are used in a 10-story structure and are modeled in the OpenSees software. These irregularities have been investigated in three different elevation locations including the lower half of the structure height (floors 1 to 5), the lowest floor (1st floor) and the middle floor of the structure (5th floor). Based on the numerical analyzes performed for these structures under the excitation of near and far field earthquakes, the residual displacement is reduced by an average of 23.15% and 45.64%, respectively. In addition to the improvement of criteria such as maximum displacement, base shear and moment in both types of earthquakes, the most improvement occurred in the irregular structure of the first floor and the least for the middle floor. In addition to improving criteria such as maximum displacement, base shear, and moment in both types of earthquakes, the most improvement occurred for the irregular structure on the first floor and the least for the irregular structure in the middle floor.

Review History:

Received: May, 27, 2020

Revised: Jul. 27, 2021

Accepted: Jul. 28, 2021

Available Online: Aug. 10, 2021

Keywords:

Stiffness irregular structures

Semi-active control

Magnetorheological damper

Fuzzy controller

Far and near field earthquake

1- Introduction

The seismic design regulations always lead to regular constructions and the avoidance of any irregularities in structures. Still, nowadays, irregular constructions are inevitable for various reasons such as beauty, architecture and economy. Between different stages of analysis and design of a structure against incoming loads, decision-making about configuration, geometric characteristics of the structure such as dimensions in plan and height, the role of structural and non-structural components can lead to nonlinear deformation of the load and cause local or global destructions. The behavior of multi-story structures under strong earthquakes depends on the configuration of the structure. Irregularities in plan and in height are the main causes of the rupture of structures during an earthquake. The type, intensity as well as irregular position is important issues that should be considered in the designs.

One of the most challenging goals among researchers and engineers is to control and reduce the vibrations of

structures. As the damage to structures, loss of life and property following the recent earthquakes, the importance of controlling the vibrations of structures against earthquakes becomes more apparent. One way to reduce vibrations and potential hazards of structural damage is to use vibration control tools. One of these tools is MR magnetic dampers, which have intrinsic properties such as very fast response time, phase reversibility, immutability to environmental conditions and easy controllability, have been studied by many researchers [1-4].

In the present study, magnetic dampers will be used to reduce the vibrations of irregular structures in stiffness. One of the ambiguous points of previous studies is not paying attention to the characteristics of the studied structures in vibration control, because if there is the irregularity in the structure and its vibration control in one level of the structure, it can cause local stresses in other parts of the structure [5-8]. It can also behave differently in far and near field earthquakes separately because each of these

*Corresponding author's email:kheyroddin@semnan.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

loads is fundamentally different. On the other hand, fuzzy controllers, designed by experts in any field to make the necessary decisions at the moment, can be challenging for structures that behave more complexly than regular structures. Therefore, in order to eliminate the shortcomings in the studies conducted in this field, various variables such as the type of earthquake, irregularity of stiffness in different floors and the performance of the controller will be studied.

2- Studied structures

In order to evaluate the performance of the MR damper and the control system, a 10-storey structure with a floor height of 3m and width of 5m in each direction has been used [9]. The lateral system of the structure is defined in both directions, a special steel bending frame and a roof system of two-sided concrete slab type with a rigid diaphragm. The structure is designed for an area with a high relative seismic risk and a site with type II soil. The amount of extensive dead load is equal to 700 kg/m² and the live load of the floors is equal to 200 kg/m². To model irregularity in height, by applying changes in regular structure, irregular structures in height are modeled with different states of non-geometric irregularity. For this purpose, in a class of structure where an irregularity in height is to occur, the stiffness value is changed by applying an irregularity coefficient according to Equation (1). In order to keep the other variables constant and merely to study irregularly, the main characteristics of a regular and irregular structure, including the first mode cycle time, stiffness, and shear base of the yield point, are kept constant.

$$IF = \frac{K_I}{K_A} \quad (1)$$

where IF the coefficient of irregularity, K_I the stiffness of the irregular floor and K_A the stiffness of the adjacent upper floor.

3- MR damper modeling and fuzzy control system

This model consists of a Bouc-Wen element and a viscous damper that operate in parallel [10]. The specifications of the MR damper and fuzzy controller are such that it is not possible to model it directly by OpenSees software; Therefore, the force corresponding to this damper is calculated by MATLAB software and at each step, the level at which the damper is located is entered in the OpenSees software. This connection is created between OpenSees and MATLAB softwares through the TCP-IP method.

4- Earthquake records applied to structures

In this study, in order to evaluate the performance of MR damper and controlling algorithm in reducing structural responses, 7 far-field earthquakes and 7 near-field earthquakes have been used for excitation. Before analyzing the time history, the regulations require that the excitation

would be scaled. In the present study, the scale of maximum earthquake acceleration has been performed and incremental dynamic analysis has been performed. The maximum values of earthquake acceleration are from 0.1 g to 1.0 g. In order to evaluate the performance of MR dampers in reducing the vibrations of response and acceleration of the roof floor and base shear and bending moment of the structure in two controlled modes with MR dampers and uncontrolled are examined. For this purpose, 8 evaluation criteria, 4 of which are related to the maximum answers and the other 4 are related to the mean squared of the answers.

5- Conclusions

In the present study, MR magnetic dampers were used to control the vibrations of irregular structures in stiffness. To evaluate the performance of this control system on irregular structures in stiffness, a regular structure and three irregular structures that are similar in terms of the period of the first mode, stiffness and base shear yield are used as reference structures. Irregular structures are developed by reducing stiffness in different floors of regular structures. These irregularities have been applied to the first to fifth floors, the first floor and the fifth floor. These structures were subjected to 7 far-field earthquakes and 7 near-field earthquakes in order to separately examine the performance of the controlled structure. The magnetic damper used by the fuzzy controller, which determines the required voltage by receiving the relative velocity input by the sensors, controls the performance of the structures under consideration.

To evaluate the performance of the control system, the results of the residual displacements in the structures under different earthquakes were examined. The results of this study showed that the use of MR dampers, decreases residual displacement in different classes of regular structures, irregular structures with reduced stiffness in floors 1 to 5, irregular structures with reduced stiffness in floors 1 and irregular structures with reduced stiffness in floors 5, 21.19%, 17.85%, 38.34% and 15.24%, respectively, in the input excitation of far-field earthquakes, and 42.83%, 48.29%, 51.24% and 40.18%, respectively, in the input excitation of near-field earthquakes. Other defined criteria also showed that this control system, regardless of the irregularity in the structure, can significantly reduce the maximum displacement, base shear and bending moment of the structures.

References

- [1] Bathaei, A., Zahrai, S.M., and Ramezani, M., 2018. "Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms". *Journal of Vibration and Control*, 24(13), 2938-2953.
- [2] Mazza, F., 2018. "Seismic demand of base-isolated irregular structures subjected to pulse-type earthquakes". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 108, 111-129.
- [3] Oyguc, R., Toros, C., and Abdelnaby, A.E., 2018. "Seismic behavior of irregular reinforced-concrete structures under multiple earthquake excitations". *Soil*

- Dynamics and Earthquake Engineering, 104, 15-32.
- [4] Michalis, F., Dimitrios, V., and Manolis, P., 2006. "Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a nine-storey steel frame". Earthquake engineering & structural dynamics, 35(12), 1489-1509.
- [5] Le-Trung K., Lee, K., Lee, J., and Lee, D.H., 2012. "Evaluation of seismic behaviour of steel special moment frame buildings with vertical irregularities". The Structural Design of Tall and Special Buildings, 21(3), 215-232.
- [6] Bhaiya, V., Shrimali, M., Bharti, S., and Datta, T., 2019. "Modified semiactive control with MR dampers for partially observed systems". Engineering Structures, 191, 129-147.
- [7] Zhu, H., Rui, X., Yang, F., Zhu, W., and Wei, M., 2019. "An efficient parameters identification method of normalized Bouc-Wen model for MR damper". Journal of Sound and Vibration, 448, 146-158.
- [8] Su, H., Yang, X., Liu, L., and Lei, Y., 2018. "Identifying nonlinear characteristics of model-free MR dampers in structures with partial response data". Measurement, 130, 362-371.
- [9] Hoseini, M., Konaraki, H., 1396. "Application of OpenSees software in modeling and structural analysis". Azadeh publications, Tehran (in persian).
- [10] Ok, S.Y., Kim, D.S., Park, K.S., and Koh, H.M., 2007. "Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers". Engineering structures, 29(5), 776-788.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. R. Zamanian, A. Kheyroddin, A. R. Mortezaei, Vibration control of stiffness irregular structures under near and far-field earthquakes by MR dampers and fuzzy controllers, Amirkabir J. Civil Eng., 54(1) (2022) 43-46.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18497.6880](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18497.6880)





کنترل ارتعاشات سازه‌های نامنظم در سختی تحت بارگذاری زلزله‌های حوزه دور و نزدیک توسط میراگرهای مغناطیسی با کنترل کننده‌های فازی

محمدرضا زمانیان^۱، علی خیرالدین^{۲*}، علیرضا مرتضایی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

کلمات کلیدی:

سازه‌های نامنظم در سختی
کنترل نیمه فعال
میراگرهای مغناطیسی
الگوریتم کنترل فازی
زلزله‌های دور و نزدیک

خلاصه: با افزایش جمعیت شهرها و کمبود فضاهایی برای ساخت و ساز، ایجاد کاربری متنوع و معماری و زیبایی سازه‌ها، نیاز به سازه‌های نامنظم بالاجبار در حال افزایش است. یکی از راه‌کارهای کاهش خطرات ساخت و استفاده از این سازه‌ها، استفاده از ابزارهای کنترل ارتعاشات در آن‌ها است. در مطالعه حاضر عملکرد میراگر مغناطیسی با کنترل کننده فازی برای کاهش ارتعاشات سازه نامنظم سختی تحت زلزله‌های دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. ظرفیت میراگر مغناطیسی معرفی شده معادل ۱۰۰۰ کیلونیوتن است که در طبقه اول بین تراز کف و تراز سقف طبقه اول تعبیه شده است. سیستم فازی بر اساس سرعت نسبی دو سر میراگر طراحی شده است تا با مشخص شدن سرعت نسبی، مقدار ولتاژ و در نتیجه نیروی کنترلی که به سازه وارد می‌شود تعیین گردد. سه حالت مختلف نامنظمی غیرهندسی در ارتفاع که شامل نامنظمی سختی با ضریب نامنظمی ۶۰ درصد در یک سازه ۱۰ طبقه استفاده و در نرم‌افزار اپنسیس مدل‌سازی شده است. این نامنظمی‌ها در سه مکان متفاوت ارتفاعی شامل نیمه پایینی ارتفاع سازه (طبقات ۱ تا ۵)، پایین‌ترین طبقه (طبقه اول) و طبقه میانی سازه (طبقه ۵) مورد بررسی قرار گرفته است. بر مبنای تحلیل‌های عددی انجام گرفته برای این سازه‌ها تحت تحریک ورودی زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، تغییر مکان باقی‌مانده به طور میانگین به ترتیب ۲۳/۱۵٪ و ۴۵/۶۴٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر بهبود معیارهایی همچون حداکثر تغییر مکان، برش و لنگر پایه در هر دو نوع زلزله، بیشترین بهبود برای سازه نامنظم در طبقه اول و کمترین آن برای سازه نامنظم در طبقه میانی رخ داده است.

۱- مقدمه

ضوابط موجود در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای همواره جامعه مهندسی را به سمت احداث سازه‌های منظم و اجتناب از بروز هرگونه نامنظمی در سازه‌ها سوق می‌دهند؛ اما امروزه به دلایل مختلفی همچون زیبایی، معماری و اقتصادی، احداث سازه‌های نامنظم اجتناب‌ناپذیر گردیده است. انتخاب پیکربندی سازه نظیر ابعاد در پلان و ارتفاع، نقش اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای و همچنین انتخاب روش تحلیل و طراحی سازه طی مراحل بارگذاری می‌تواند منجر به بروز تغییر شکل‌های غیرخطی در آن شده و موجبات تخریب موضعی و یا کلی سازه راه به همراه داشته باشد. مسئله نامنظمی ساختمان‌ها در ارتفاع، از سال ۱۹۷۰ مورد توجه محققان قرار گرفته است. مطالعات انجام گرفته بر روی سازه‌های نامنظم در ارتفاع در مقایسه با سازه‌های نامنظم در پلان کمتر می‌باشد؛ اما در چند سال گذشته تحقیقات در این زمینه رشد قابل توجهی داشته است. اکثر این مطالعات بر روی پاسخ

الاستیک سازه به خصوص سازه‌های با عقب رفتگی در ارتفاع و یا سازه‌های با طبقه نرم یا ضعیف در اولین طبقه انجام شده است. میچالیس و همکاران^۱ [۱] به ارزیابی سازه‌های نامنظم در ارتفاع بر اساس روش تحلیل دینامیکی فزاینده^۲ (IDA) پرداختند. آن‌ها با استفاده از پاسخ قاب فولادی ۹ طبقه معروف به LA۹ به بررسی هر چهار نوع نامنظمی در ارتفاع یعنی نامنظمی سختی، مقاومت، ترکیب سختی و مقاومت و جرم پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که اثرات نامنظمی در ارتفاع بر روی سطح عملکرد سازه بستگی به نوع نامنظمی، طبقه‌ای وقوع نامنظمی در آن و از همه مهم‌تر میزان شدت زلزله خواهد داشت. بر اساس نتایج این تحقیق بیشترین تأثیر نامنظمی بر پاسخ سازه به ترتیب مربوط به ترکیب سختی و مقاومت، مقاومت، سختی و جرم خواهد داشت. ترانگ و همکاران^۳ [۲] به بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی

- 1 Michalis et al.
- 2 Incremental Dynamic Analysis (IDA)
- 3 Trung et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kheyroddin@semnan.ac.ir



دارای قاب خمشی با نامنظمی در ارتفاع پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود فرض نمودند که تمامی سازه‌های مورد بررسی در شهر لس‌آنجلس واقع است که تحت زلزله‌های با سطح خطر 2% احتمال فرا گذشت در ۵۰ سال قرار دارند. آن‌ها در این مطالعه مدل‌سازی اتصالات تیر به ستون جهت ارزیابی تغییر شکل‌های چشمه را انجام دادند. علاوه بر این مدل اتصال شکل‌پذیر همراه با زوال مقاومت برای به دست آوردن نتایج دقیق در مدل‌سازی‌ها نیز در نظر گرفته شدند و این نتایج را با سازه منظم مقایسه نمودند. آن‌ها در ادامه هر سه نوع نامنظمی جرمی، سختی و مقاومت را نیز به عنوان نامنظمی در ارتفاع بررسی نموده و تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی بر روی این مدل‌ها انجام دادند.

مازا^۱ [۳] به قابلیت اعتماد سازه‌های نامنظم با به کارگیری سیستم‌های جداساز لرزه‌ای از پی پرداخت. او از یک قاب بتنی ۵ طبقه دارای عدم تقارن در پلان و دهانه‌های با طول‌های متفاوت استفاده نمود. تمرکز مطالعه ایشان بیشتر بر روی بارگذاری‌های لرزه‌ای دارای پالس و بدون پالس در زلزله‌های نزدیک گسل با خاک متوسط و نرم بوده است.

با توجه به اینکه زوال سختی و مقاومت دلیل اصلی آسیب‌ها در بارگذاری‌های لرزه‌ای محسوب می‌شود، اویگوک و همکاران^۲ [۴] به بررسی رفتار زوال سازه‌های بتنی تحت زلزله توهوکو^۳ پرداختند. آن‌ها از مدل‌های عددی سه بعدی، جهت شبیه‌سازی رفتار سه سازه بتنی نامنظم استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که نامنظمی می‌تواند گسترش آسیب در سازه‌ها را افزایش دهد.

یکی از اهداف چالش برانگیز در بین محققین و مهندسیین، کنترل و کاهش میزات ارتعاشات سازه‌ها می‌باشد. اهمیت کنترل ارتعاشات سازه در برابر زلزله‌ها، با گذشت زمان به دلیل بروز خسارات وارده به سازه‌ها و تلفات جانی و مالی ناشی از وقوع آن‌ها، آشکارتر شده است. یکی از راه‌های کاهش ارتعاشات و خطرات احتمالی تخریب سازه‌ها استفاده از ابزارهای کنترل ارتعاشات می‌باشد. یکی از این ابزارها، میراگرهای مغناطیسی^۴ MR بوده که دارای خصوصیات ذاتی مانند زمان پاسخ بسیار سریع، فاز برگشت‌پذیری، تغییرناپذیری در برابر شرایط محیطی و قابلیت کنترل آسان می‌باشد که در مطالعات بسیاری از محققین مورد توجه بوده است.

بطهای و همکاران^۵ [۵] با استفاده همزمان از کنترل نیمه‌فعال میراگر

جرمی و میراگر MR ارتعاشات یک سیستم با ۱۱ درجه آزادی را کنترل نمود. از آنجایی که میراگر جرمی از یک جرم، فنر و کمک‌فنر تشکیل می‌شود، در صورتی که متغیرهای این میراگر در حین زلزله تغییر نمایند، این میراگر به عنوان یک میراگر غیرفعال عملکرد خواهد داشت. نحوه عملکرد این میراگر بر اساس نیروی اینرسی ایجاد شده در جرم متمرکز خواهد بود. آن‌ها با اضافه کردن میراگر MR به میراگر جرمی مزبور قابلیت تطبیق‌پذیری آن را در حین ارتعاشات افزایش دادند. آن‌ها برای تصمیم‌گیری در مورد ولتاژ ورودی به میراگر MR از سیستم استنتاج فازی نوع ۱ و نوع ۲ استفاده نمودند. ورودی‌های سیستم استنتاج فازی بر مبنای شتاب و سرعت بالاترین تراز سازه و موقعیت قرارگیری میراگر در ترکیب با مفاهیم شتاب کند شونده و شتاب تند شونده انجام می‌پذیرفت. میراگر به کار برده شده برای کنترل ارتعاشات در بالاترین تراز سازه ۱۱ درجه آزادی قرار داده شده بود که توانایی تولید ۱۰۰۰ کیلو نیوتن- نیرو را داشت.

بپهایا و همکاران^۶ [۶] از یک سیستم کنترل نیمه فعال اصلاح شده توسط یک میراگر MR استفاده نمودند. سیستم کنترلی آن‌ها متغیرهای حالت را با دو متغیر فیلتر و گذراندن نوفه سفید از فیلترها برای به دست آوردن تحریک‌های لرزه‌ای مطلوب تقویت می‌کرد. آن‌ها همچنین با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی کوواریانس تحریک‌ها و نوفه‌ها مورد استفاده به عنوان ورودی فیلتر کالمن مناسب می‌باشند. این کار معمولاً به دلیل جلوگیری از ناپایداری‌های عددی سیستم کنترلی استفاده می‌شوند. آن‌ها برای این منظور از یک قاب ساختمانی ۱۰ طبقه تحت بارگذاری زلزله با به کارگیری سه میراگر MR کنترل شونده در الگوریتم پیشنهادی استفاده نمودند. نتایج تئوری به دست آمده از این الگوریتم با الگوریتمی که در آن تحریک‌های ورودی بدون فیلتر به سازه اعمال می‌شدند مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. آن‌ها همچنین اشاره نمودند که در شرایط تنظیم نامناسب پارامترهای کوواریانس تحریک‌ها و نوفه‌های ورودی با مقادیر مورد انتظار شتاب زمین، ناپایداری در سیستم سازه‌ای ایجاد می‌گردد.

زو و همکاران^۷ [۷] از مدل بوک-ون نرمال شده برای توصیف هیستریزس میراگر MR استفاده کردند. آن‌ها برای به دست آوردن پارامترهای مؤثر این میراگر از سه گام کلی پیروی نمودند. برای این منظور آن‌ها با در نظرگیری مفهوم فیزیکی مدل بوک-ون نرمال شده و استفاده از روش حداقل مربعات به شناسایی پارامترها پرداخته و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و توابع

6 Bhaiya et al.

7 Zhu et al.

1 Mazza
2 Oyguc et al.
3 Tohoku
4 Magneto rheological
5 Bathaei et al.

حوزه دور و نزدیک)، نامنظمی سختی موجود سازه به ازای طبقات مختلف و عملکرد کنترل کننده‌ها در بهبود پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا به اجمال عملکرد سیستم کنترلی روی چهار سازه متفاوت شامل یک سازه منظم و سه سازه با نامنظمی سختی که از نظر پیوند مود اول، سختی و برش پایه حد تسلیم مشابه یکدیگر بوده‌اند به عنوان سازه‌های مرجع بررسی و نتایج با همدیگر مقایسه گردیده‌اند. لازم به ذکر است که سازه‌های نامنظم موجود با اعمال تغییرات سختی به ازای طبقات مختلف سازه منظم اولیه ایجاد شده‌اند.

۲- سازه مورد بررسی

به منظور ارزیابی عملکرد میراگر MR و سیستم کنترل ارائه شده از یک سازه ۱۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۳ متر و دهانه ۵ متر در هر جهت استفاده شده است [۱۰]. سیستم باربر جانبی سازه در هر دو جهت، قاب خمشی فولادی ویژه و سیستم سقف از نوع دال بتنی دو طرفه با دیافراگم صلب تعریف شده است. سازه مورد نظر برای منطقه با خطر نسبی لرزه‌ای بسیار زیاد و سایت با خاک نوع دو طراحی شده است. میزان بار مرده گسترده برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده طبقات برابر با ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ شده است.

برای مدل‌سازی نامنظمی در ارتفاع، با اعمال تغییراتی در سازه منظم (شکل ۱)، سازه‌های نامنظم در ارتفاع با حالات مختلف نامنظمی غیرهندسی مدل‌سازی می‌گردد. برای این منظور در طبقه‌ای از سازه که قرار است نامنظمی در ارتفاع رخ دهد، مقدار سختی با اعمال ضریب نامنظمی تعریف شده در رابطه (۱) تغییر داده می‌شود. به منظور ثابت نگه داشتن سایر متغیرها و صرفاً مطالعه نامنظمی، خصوصیات اصلی سازه منظم و نامنظم شامل زمان تناوب مد اول، سختی و برش پایه حد تسلیم ثابت نگه داشته می‌شود. ضریب نامنظمی طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$IF = \frac{K_I}{K_A} \quad (1)$$

که در آن IF ضریب نامنظمی، K_I سختی طبقه نامنظم و K_A سختی طبقه بالایی مجاور می‌باشد.

حالات مختلف نامنظمی شامل ضریب نامنظمی ۶۰ درصد در سه مکان متفاوت ارتفاعی، نیمه پایینی ارتفاع سازه (طبقات ۱ تا ۵)، پایین‌ترین طبقه

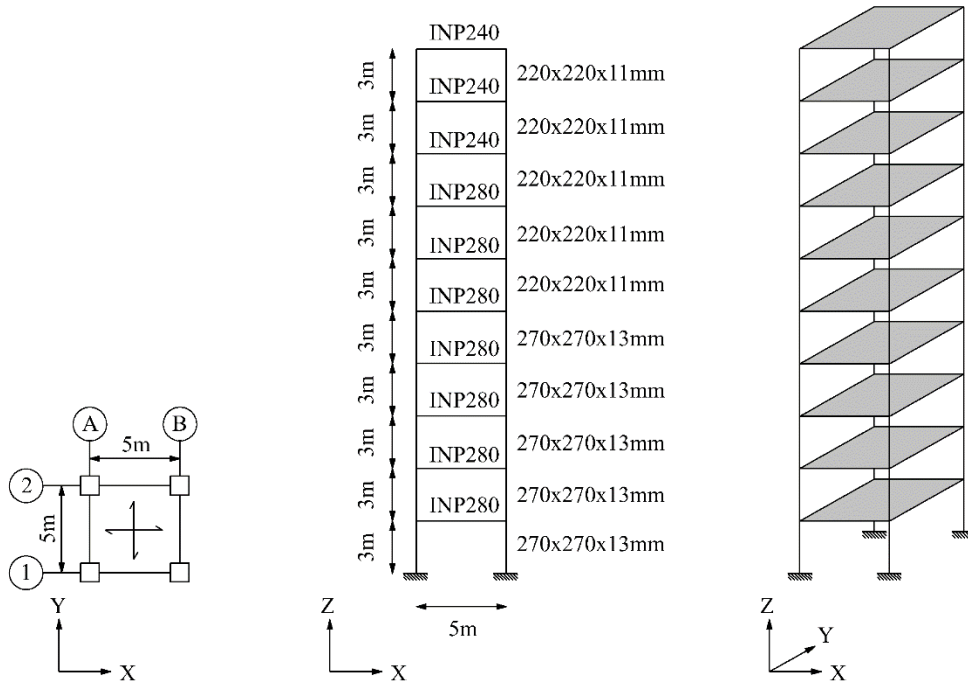
هدف مناسب پارامترهای باقی مانده را شناسایی می‌کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که روش ارائه شده نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتر و حساسیت کمتر نسبت به نوفه برخوردار می‌باشد.

فیلتر کالمن با ورودی نامشخص همچنین جهت شناسایی لحظه‌ای مشخصات سیستم‌های سازه‌ای توسط سو و همکاران^۱ [۸] مورد استفاده قرار گرفت. روش آن‌ها به هیچ کدام از اطلاعات سازه واقعی نیاز نداشته و قادر به شناسایی نیروهای بازگرداننده هیسترتیک میراگرهای MR با استفاده مستقیم از پاسخ دینامیکی اندازه‌گیری شده موجود سازه بود. آن‌ها برای اعتبار سنجی عملکرد روش ارائه شده از چندین مثال عددی مختلف نیز استفاده نمودند.

یوون و همکاران^۲ [۹] میراگر MR جدیدی را ارائه کردند که قادر به تولید نیروی میرا کننده کافی در مدت زمان بسیار اندک (میلی‌ثانیه) دارا می‌باشد. آن‌ها در ابتدا مکانیسم نیروی میرایی MR را بر اساس معادلات متعدد محاسبه کردند. آن‌ها در ادامه تحلیل جریان گردابه چندین مواد مختلف هسته را با لحاظ نمودن بیشترین تأثیر روی تأخیر زمانی میراگر MR انجام دادند. پس از تحلیل چندین مصالح هسته مغناطیسی منتخب، کامپوزیت مغناطیسی نرم^۳ را انتخاب نموده که از مقاومت الکتریکی نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشد.

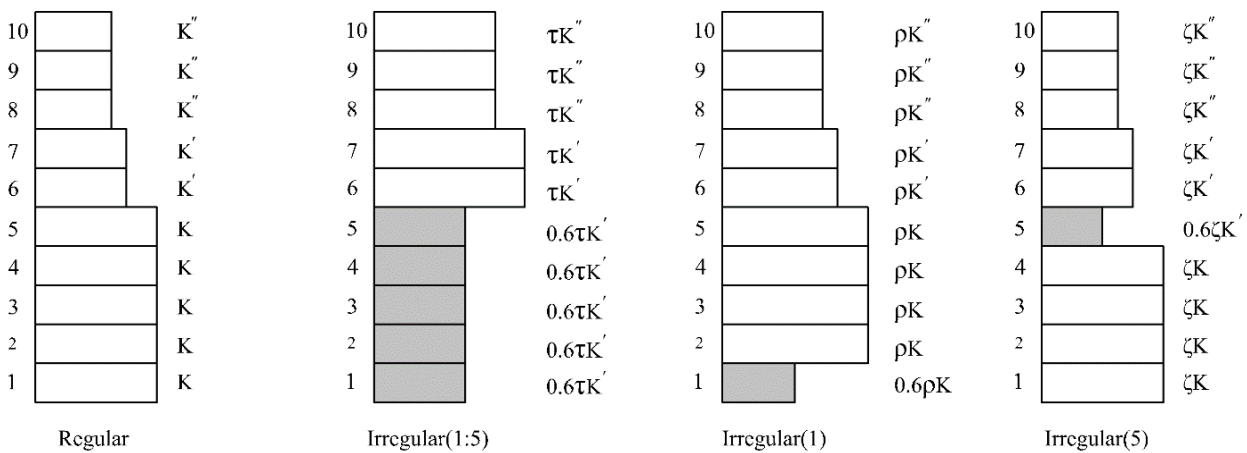
در مطالعه حاضر از میراگر مغناطیسی MR برای کاهش ارتعاشات سازه‌های با نامنظمی در سختی استفاده می‌شود. از نکات مبهم مطالعات پیشین عدم توجه به مشخصات سازه‌های مورد بررسی در کنترل ارتعاشات می‌باشد؛ چرا که در صورت وجود نامنظمی در سازه و عدم کنترل ارتعاشات آن در یک تراز از سازه، امکان بروز تنش‌های موضعی در دیگر نقاط آن سازه وجود خواهد داشت. این مسئله به خصوص در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به طور جداگانه می‌تواند رفتار متفاوتی را به همراه داشته باشد؛ چرا که هر کدام از این بارگذاری‌ها تفاوت‌های اساسی را با یکدیگر داشته و پاسخ متفاوتی را در سازه ایجاد می‌نمایند. از سوی دیگر به کارگیری کنترل کننده‌های فازی توسط متخصصین در مرحله طراحی سازه‌ها، می‌تواند برای سازه‌هایی دارای رفتار پیچیده‌تر نسبت به سازه‌های منظم با چالش همراه گردد. بنابراین به منظور برطرف نمودن کاستی‌های موجود در مطالعات انجام شده پیشین در این زمینه متغیرهای مختلفی نظیر نوع زلزله (شامل زلزله‌های

- 1 Su et al.
- 2 Yoon et al.
- 3 Soft Magnetic Composite



شکل ۱. نمای سه بعدی، مقاطع و پلان سازه مرجع

Fig.1. 3D view, plan and elevation of reference structure



شکل ۲. توزیع نامنظمی سختی در طبقات سازه‌ها

Fig.2. Irregular distribution of stiffness in floors of structures

۳- مدل‌سازی میراگر MR و سیستم کنترل فازی

به منظور مدل‌سازی میراگر MR از مدل بوک-ون [۱۱] استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این مدل از یک المان بوک-ون و یک میراگر ویسکوز که به صورت موازی عمل می‌کنند تشکیل شده است. مشخصات میراگر MR و کنترل‌کننده فازی به نحوی است که

(طبقه اول) و طبقه میانی سازه (طبقه ۵) مطابق شکل ۲ می‌باشد. مدل‌سازی این قاب در نرم‌افزار اپنسیس^۱ به صورت غیرخطی انجام شده است. در شکل ۲، ضرایب ζ ، τ به منظور ثابت نگه داشتن زمان تناوب مد اول، سختی و برش پایه حد تسلیم اعمال می‌شوند.

1 OpenSees

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|\dot{z}|^{s-1} - \beta\dot{x}|z|^s + A_m\dot{x} \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (4)$$

که در آن F_{MRD} نیروی متناظر با میراگر MR، x جابجایی میراگر، پارامترهای s ، γ ، β و A_m مقادیر ثابتی هستند (جدول ۱)، z متغیر تحولی^۲ است که طبق رابطه (۴) به دست می‌آید و پارامترهای C_0 و α را نیز می‌توان با استفاده از روابط زیر تعیین نمود:

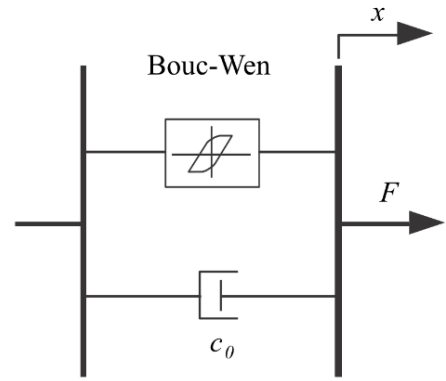
$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (5)$$

$$C_0 = C_0(u) = C_{0a} + C_{0b}u \quad (6)$$

که در آن u ولتاژ کنترل اعمالی^۳ و پارامترهای α_a ، α_b ، C_{0a} و C_{0b} مقادیر ثابت هستند که در جدول ۱ ارائه شده است. پس از محاسبه نیروی معادل میراگر MR طبق رابطه (۳)، این نیرو به ترازوی که میراگر در آنجا تعبیه شده است (بین تراز کف و سقف طبقه اول) وارد شده و ترم نیرو در رابطه (۲) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\begin{Bmatrix} F_1 + F_{MRD} \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix}_{n \times 1} \quad (7)$$

یکی از محدودیت‌های میراگرهای نیمه‌فعال و فعال بحث تأخیر زمانی است که باعث می‌شود بسته به مدت زمان صرف شده برای اعمال دستور صادر شده، از کارایی میراگرها کاسته شود. این مدت زمان در میراگر MR بسیار کوتاه و در حدود 0.02 s تا 0.1 s می‌باشد. با توجه به مکانیزم داخلی این میراگرها، ولتاژ دستوری به صورت آنی اعمال نمی‌شود. برای مدل‌سازی



شکل ۳. مدل رفتاری بوک-ون برای مدل‌سازی میراگر MR

Fig. 3. Bouc-Wen model for MR Damper Modelling

امکان مدل‌سازی مستقیم آن توسط نرم‌افزار اپنسیس وجود ندارد؛ بنابراین نیروی متناظر با این میراگر توسط نرم‌افزار متلب^۱ محاسبه شده و در هر گام زمانی به ترازوی که میراگر در آن قرار دارد در نرم‌افزار اپنسیس وارد می‌شود. این ارتباط بین دو نرم‌افزار اپنسیس و متلب از طریق روش TCP-IP ایجاد می‌گردد.

برای استفاده از این روش سازه چند درجه آزادی، تحت تحریک یک مرحله از بارگذاری قرار می‌گیرد. بنابراین برای یک سازه n درجه آزادی خواهیم داشت:

$$[M]_{n \times n} \{\ddot{u}\} + [c]_{n \times n} \{\dot{u}\} + [k]_{n \times n} \{u\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix}_{n \times 1} \quad (2)$$

به این ترتیب سرعت نسبی در ترازوی که میراگر MR در آن قرار دارد به دست خواهد آمد. سرعت نسبی به عنوان ورودی سیستم فازی مورد استفاده قرار گرفته تا مقدار ولتاژ متناسب توسط سیستم فازی از پیش طراحی شده، تعیین گردد.

با مشخص شدن ولتاژ مورد نیاز، نیروی میراگر MR مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

2 Evolutionary Variable
3 Applied Control Voltage

1 Matlab

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی میراگر MR

Table 1. Parameter used for MR damper modeling

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
α_a	1.0872×10^7 (N/m)	C_{0b}	4400 (Ns/m/V)	β	300 (m^{-1})
α_b	4.9616×10^7 (N/m/V)	A_m	1.2	γ	300 (m^{-1})
C_{0a}	440 (Ns/m)	s	1	η	50 (s^{-1})

مدت زمانی که به طول می‌انجامد تا ولتاژ اعمالی با ولتاژ دستوری^۱ برابر گردد به صورت زیر شبیه‌سازی می‌شود:

$$\alpha_i = \alpha_a + \alpha_b u_i \quad (12)$$

$$C_{0i} = C_{0a} + C_{0b} u_i \quad (13)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (8)$$

از طرفی رابطه ۴ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = (-\gamma |\dot{x}| z |\dot{z}|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_m \dot{x}) \quad (14)$$

$$z_i - z_{i-1} = (-\gamma |\dot{x}| z |\dot{z}|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_m \dot{x}) dt$$

که در آن η مقدار ثابتی است که در جدول ۱ مقدار آن ارائه شده و ولتاژ دستوری می‌باشد. رابطه ۸ را به صورت زیر نیز می‌توان بازنویسی نمود:

$$\frac{du}{dt} = \eta v - \eta u \quad (9)$$

در صورتی که مقدار s برابر ۱ در نظر گرفته شود رابطه ۱۴ برابر خواهد بود با:

$$z_i + \gamma |\dot{x}| z_i dt + \beta \dot{x} |z_i| dt = A_m \dot{x} dt + z_{i-1} \quad (15)$$

بنابراین مقدار z برابر خواهد بود با:

$$\text{if } z_i \geq 0 \Rightarrow z_i = \frac{A_m \dot{x} dt + z_{i-1}}{1 + \gamma |\dot{x}| dt + \beta \dot{x} dt} \quad (16)$$

$$\text{if } z_i < 0 \Rightarrow z_i = \frac{A_m \dot{x} dt + z_{i-1}}{1 + \gamma |\dot{x}| dt - \beta \dot{x} dt}$$

در پایان هر گام نیز مقدار u_i و z_i به u_{i-1} و z_{i-1} گام بعد تبدیل خواهد شد.

با ضرب طرفین تساوی در dt و بازنویسی du به صورت تفاضل دو مقدار متوالی خواهیم داشت:

$$u_i - u_{i-1} = \eta v dt - \eta u_i dt \quad (10)$$

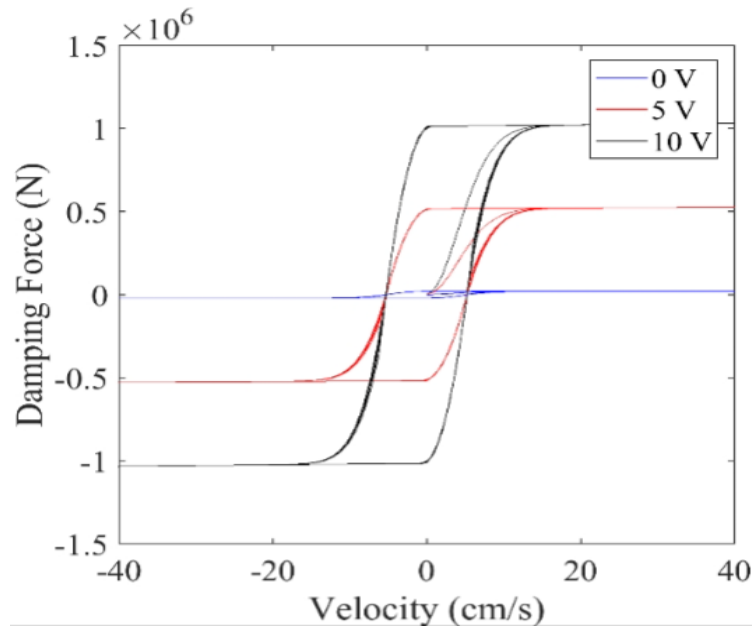
بنابراین با قرار دادن هر کدام از گام‌ها در طرفین تساوی، پاسخ ولتاژ اعمالی در گام i برابر خواهد بود با:

$$u_i + \eta u_i dt = \eta v dt + u_{i-1} \quad (11)$$

$$u_i = \frac{\eta v dt + u_{i-1}}{1 + \eta dt}$$

مقادیر α و C_0 نیز در هر گام مطابق روابط زیر به دست می‌آیند:

1 Command Voltage



شکل ۴. نمودار رفتاری میراگر MR به دست آمده از مطالعه حاضر

Fig. 4. Behavior of MR damper simulated in the present study

به صورت پیوسته بین دو مقدار حداقل و حداکثر و با قابلیت در نظریه عدم قطعیت‌ها، پیچیدگی‌ها و اثرات غیرخطی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه از الگوریتم کنترل فازی برای تعیین ولتاژ ورودی میراگر MR استفاده شده است. ساختار کنترل کننده فازی برای تعیین خروجی بر اساس ورودی‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است.

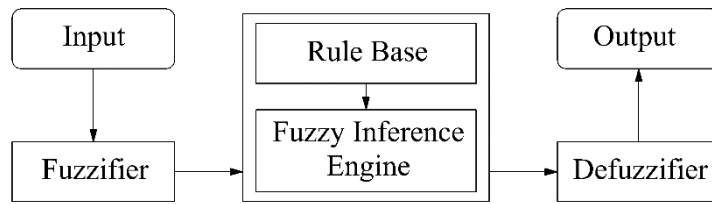
همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، مقادیر ورودی که در این مطالعه سرعت نسبی دو سر میراگر هستند، از طریق توابع عضویت به متغیرهای زبانی تبدیل می‌شوند. مجموعه قواعد فازی به شکل اگر و آن گاه و بر اساس متغیرهای زبانی نوشته شده است؛ بنابراین ورودی‌های تبدیل شده به متغیرهای زبانی بر اساس قواعد فازی ارزش‌گذاری می‌شوند تا سیستم استنتاج فازی مقدار خروجی را برحسب متغیر زبانی تعیین کند. با توجه به اینکه سیستم استنتاج فازی در نهایت باید مقدار عددی ولتاژ مناسب را تعیین کند تا بر اساس آن نیروی میراگر MR تعیین شود، در مرحله پایانی بخش غیرفازی‌سازی متغیرهای زبانی نتیجه‌گیری شده را به متغیرهای عددی تبدیل می‌کنند. در این مطالعه بر اساس سرعت نسبی دو سر میراگر که از طریق حسگرها ثبت می‌شوند مقدار ولتاژ در بازه ۰ تا ۱۰ ولت تعیین می‌شود. این مقدار ولتاژ نیز می‌تواند حداکثر نیروی ۱۰۰۰ ایجاد کند.

$$u_{i-1} = u_i \quad \text{and} \quad z_{i-1} = z_i \quad (17)$$

با توجه به روابط ارائه شده صحت سنجی مدل‌سازی این میراگر انجام شده که نتیجه آن در شکل ۴ نمایش داده شده است.

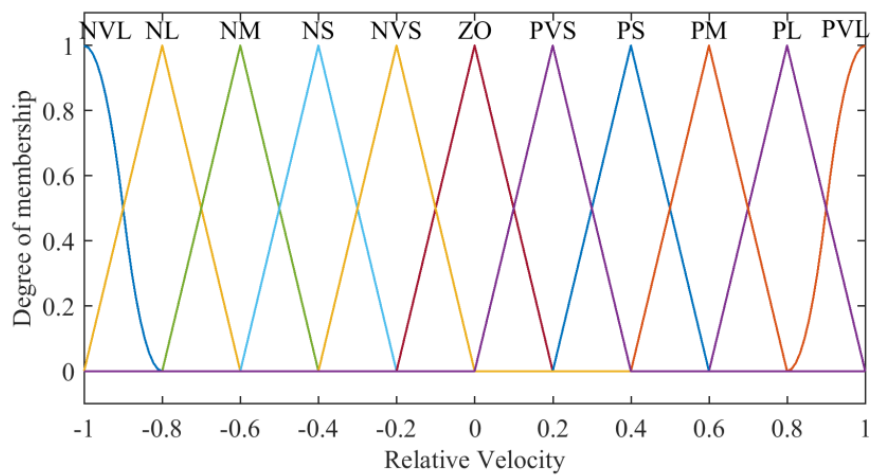
امروزه الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال بسیاری مانند اسکای-هوک^۱، گرند-هوک^۲، لیاپونو^۳ و ... ابداع و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. این الگوریتم‌های کلاسیک مقدار حداقل و حداکثر متغیر خروجی را در نظر می‌گیرند در حالی که تغییر از حالت حداقل به حداکثر و یا بالعکس نمی‌تواند سریعاً انجام شود. از سوی دیگر تغییر ناگهانی ولتاژ که در نتیجه آن منجر به ورود ناگهانی نیرو خواهد شد، می‌تواند باعث بروز آسیب‌های موضعی به سازه شود. با تغییراتی که توسط محققین در این الگوریتم‌ها انجام شد مقادیر متوسط نیز قابل دستیابی شد؛ اما این مقادیر متوسط بدون در نظرگیری اثرات غیرخطی سازه انجام می‌گرفت. الگوریتم کنترلی فازی با هدف تعیین خروجی

- 1 Sky-hook
- 2 Ground-hook
- 3 Lyapunov



شکل ۵. نحوه عملکرد کلی سیستم استنتاج فازی

Fig.5. Fuzzy inference system general function



شکل ۶. توابع عضویت متغیر ورودی (سرعت نسبی)

Fig. 6. Membership function of the input variable (relative velocity)

جدول ۲. مجموعه قواعد سیستم فازی

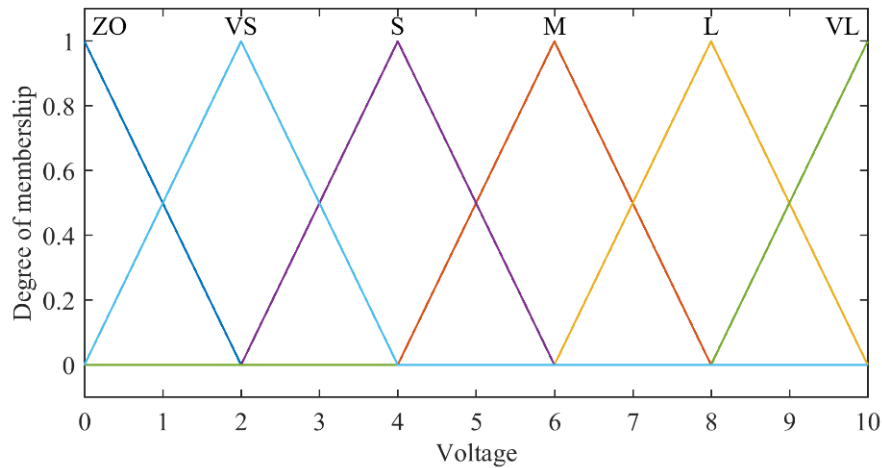
Table 2. Fuzzy system rules set

شدت متوسط										
NVL	NL	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PL	PVL
VL	L	M	S	VS	ZO	VS	S	M	L	VL

همان‌طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، سیستم فازی طراحی شده شامل ۹ تابع عضویت مثلثی و دو تابع عضویت گوسی برای متغیر ورودی و ۶ تابع عضویت مثلثی برای متغیر خروجی است.

مجموعه قواعد سیستم فازی در جدول ۲ ارائه شده است. با دقت در این قواعد مشاهده می‌شود که نحوی انتخاب ولتاژ به نحوی است که سازه در حالت تعادل بماند. سرعت سازه در لحظه نزدیک شدن به حالت تعادل و یا

ولتاژ



شکل ۷. توابع عضویت متغیر خروجی (ولتاژ)

Fig. 7. Membership function of the output variable (Voltage)

جدول ۴. متغیرهای زبانی تعریف شده برای مقادیر خروجی

Table 4. Linguistic variables for outputs

ولتاژ	متغیرهای زبانی
بسیار زیاد	VL
زیاد	L
متوسط	M
کم	S
بسیار کم	VS
صفر	ZO

جدول ۳. متغیرهای زبانی تعریف شده برای مقادیر ورودی

Table 3. Linguistic variables for inputs

ولتاژ	متغیرهای زبانی
بسیار زیاد (مثبت، منفی)	VL (N,P)
زیاد (مثبت، منفی)	L (N,P)
متوسط (مثبت، منفی)	M (N,P)
کم (مثبت، منفی)	S (N,P)
بسیار کم (مثبت، منفی)	VS (N,P)
صفر	ZO

حوزه نزدیک برای تحریک استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۵ و ۶ ارائه شده است. قبل از انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی آیین‌نامه‌ها لازم می‌دانند که شتاب‌نگاشت‌ها مقیاس گردند. در مطالعه حاضر مقیاس روی بیشینه شتاب زلزله انجام شده است و تحلیل دینامیکی افزایشی انجام گرفته است. که مقادیر بیشینه شتاب زلزله‌ها از $0.1g$ تا $1.0g$ انجام گرفته است. به منظور ارزیابی عملکرد میراگر MR در کاهش ارتعاشات پاسخ و شتاب طبقه بام و برش پایه و لنگر سازه در دو حالت کنترل شده با میراگر MR و کنترل نشده مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای این منظور از ۸ معیار ارزیابی که ۴ مورد آن مربوط به حداکثر پاسخ‌ها و ۴ مورد دیگر مربوط به میانگین

خارج شدن از حالت تعادل دارای بیشترین سرعت است، به همین دلیل نیاز است که از حداکثر ظرفیت میراگر MR استفاده شود تا سازه در حالت تعادل بماند. به این ترتیب در سرعت‌های نسبی متفاوت ولتاژ توسط سیستم فازی تصمیم‌گیری می‌شود. در جداول ۳ و ۴ تعریف متغیرهای زبانی مورد استفاده برای مقادیر ورودی و خروجی ارائه شده است.

۴- رکوردهای زلزله اعمال شده به سازه

در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد الگوریتم کنترل و میراگر MR در کاهش پاسخ‌های سازه از ۷ شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۷ شتاب‌نگاشت

جدول ۵. مشخصات زلزله‌های حوزه دور

Table 5. Characteristics of far-field earthquakes

شماره	ایستگاه ثبت رکورد	نام محلی رکورد	PGA(g)
۱	Beverly Hill	Northridge	۰/۵۲
۲	Canyon Country-	Northridge	۰/۴۸
۳	Bolu	Duzce, Turkey	۰/۸۲
۴	Hector	Hector Mine	۰/۳۴
۵	Delta	Imperial Valley	۰/۳۵
۶	El Centro Array #11	Imperial Valley	۰/۳۸
۷	Nishi-Akashi	Kobe, Japan	۰/۵۱

جدول ۶. مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 6. Characteristics of near-field earthquakes

شماره	ایستگاه ثبت رکورد	نام محلی رکورد	PGA(g)
۱	El Centro Array #6	Imperial Valley-06	۰/۴۴
۲	El Centro Array #7	Imperial Valley-06	۰/۴۶
۳	Sturno	Irpinia, Italy-01	۰/۳۱
۴	Parachute Test Site	Superstition Hills-	۰/۴۲
۵	Saratoga-Aloha	Loma Prieta	۰/۳۸
۶	Erzincan	Erzican, Turkey	۰/۴۹
۷	Petrolia	Cape Mendocino	۰/۶۳

در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگر MR با کنترل کننده فازی که تحت زلزله‌های حوزه دور با بیشینه شتاب $0.5g$ قرار دارند نمایش داده شده است. تصویر تغییر شکل باقی مانده در هر شکل، از چپ به راست مربوط به زلزله‌های ۱ تا ۷ مطابق جدول ۵ است. با دقت در این تصاویر مشاهده می‌گردد که در سازه‌های کنترل شده تغییر مکان باقی مانده در طبقه اول تقریباً ناچیز است در حالی که در حالت کنترل نشده در بسیاری از موارد حتی در طبقه اول نیز تغییر مکان باقی مانده وجود دارد. به‌طور میانگین استفاده از میراگر MR تغییر مکان باقی مانده در طبقات مختلف را هنگامی که سازه تحت زلزله حوزه دور قرار دارد، در سازه منظم $21/19\%$ ؛ در سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۱ تا ۵ به مقدار $17/85\%$ ؛ در سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۱ به مقدار $38/34\%$ و در سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۵ به مقدار $15/24\%$ بهبود داده است.

مجذور مربعات پاسخ‌ها می‌باشد. نحوه محاسبه معیارهای مورد بررسی در جدول ۷ ارائه شده است. در این معیارها x معرف جابجایی، \dot{x} شتاب، V برش پایه، M لنگر پایه و NS تعداد طبقات سازه است؛ همچنین اندیس u به معنی کنترل نشده و c کنترل شده است. در معیارهای J_5 تا J_8 ، $\|\cdot\|$ معرف نرَم پاسخ‌های سازه است که مطابق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

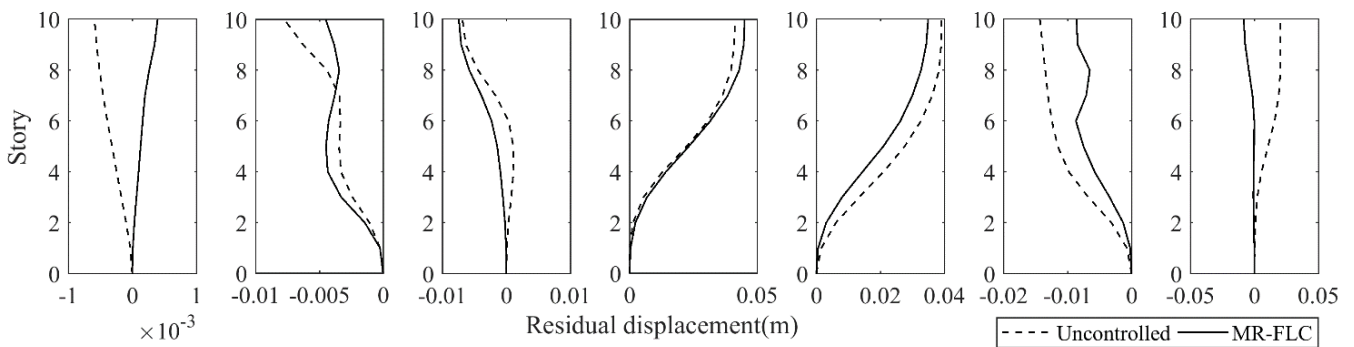
$$\|\cdot\| = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (\cdot)^2 dt} \quad (18)$$

که در آن t_f مدت زمان تحلیل است. در شکل‌های ۸ تا ۱۱ تغییر مکان باقی مانده سازه در طبقات مختلف

جدول ۷. تعریف پارامترها و معیارهای عملکردی

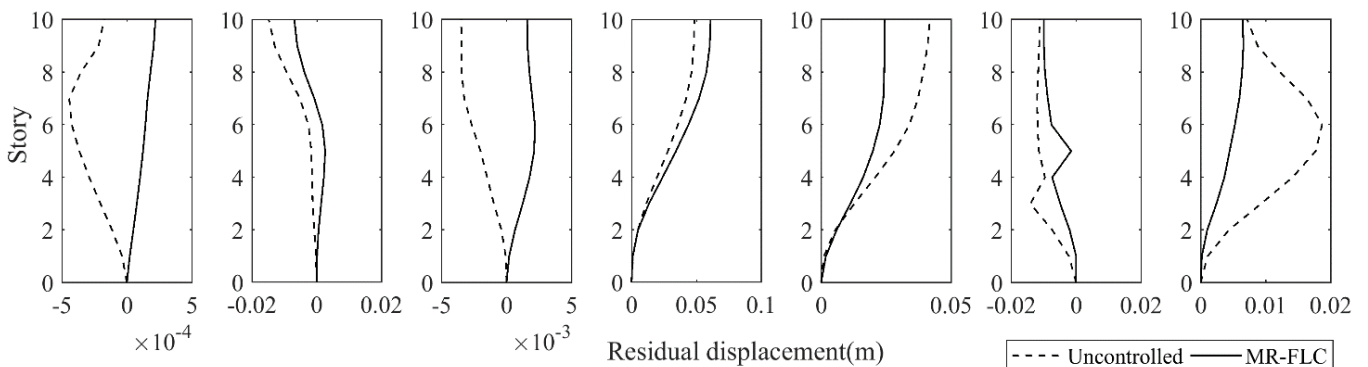
Table 7. Performance criteria definition

criteria	
$J_1 = \frac{\sum_{i=1}^{NS} \max x_c(t) }{\sum_{i=1}^{NS} \max x_u(t) }$	$J_5 = \frac{\sum_{i=1}^{NS} \max \ x_c(t)\ }{\sum_{i=1}^{NS} \max \ x_u(t)\ }$
$J_2 = \frac{\sum_{i=1}^{NS} \max \ddot{x}_c(t) }{\sum_{i=1}^{NS} \max \ddot{x}_u(t) }$	$J_6 = \frac{\sum_{i=1}^{NS} \max \ \ddot{x}_c(t)\ }{\sum_{i=1}^{NS} \max \ \ddot{x}_u(t)\ }$
$J_3 = \frac{\max \ V_c(t)\ }{\max \ V_u(t)\ }$	$J_7 = \frac{\max \ V_c(t)\ }{\max \ V_u(t)\ }$
$J_4 = \frac{\max \ M_c(t)\ }{\max \ M_u(t)\ }$	$J_8 = \frac{\max \ M_c(t)\ }{\max \ M_u(t)\ }$



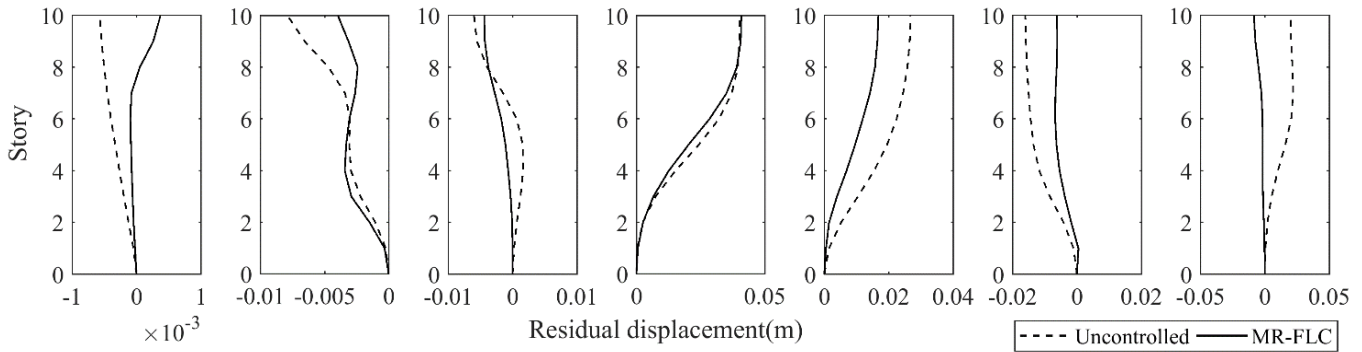
شکل ۸. تغییر مکان باقی مانده در طبقات مختلف در سازه منظم تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig. 8. Residual displacement of the floors in regular structures under far-field earthquakes



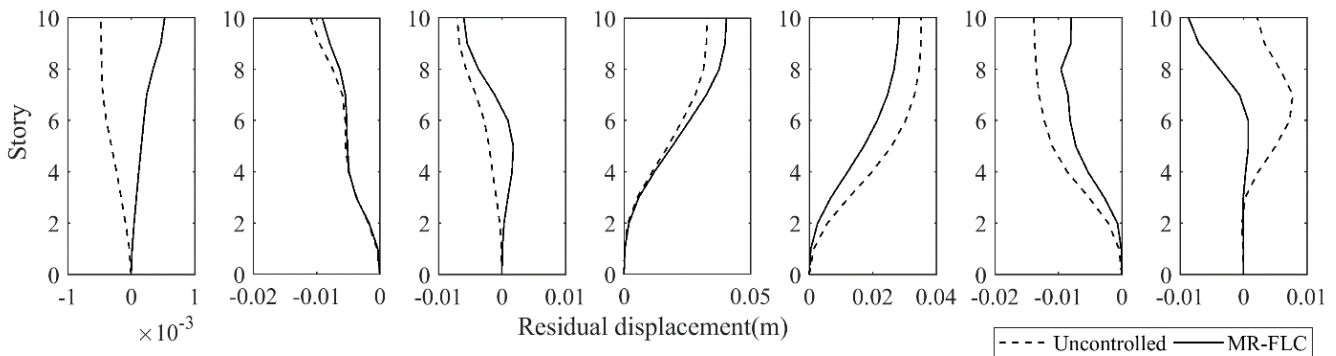
شکل ۹. تغییر مکان باقی مانده در طبقات مختلف در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقات ۱ تا ۵ تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig.9. Residual displacement of the floors in irregular structures under far-field earthquakes with reduced stiffness of 1st to 5th floor



شکل ۱۰. تغییر مکان باقی‌مانده در طبقات مختلف در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۱ تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig 10. Residual displacement of the floors in irregular structures under far-field earthquakes with reduced stiffness of 1st floor



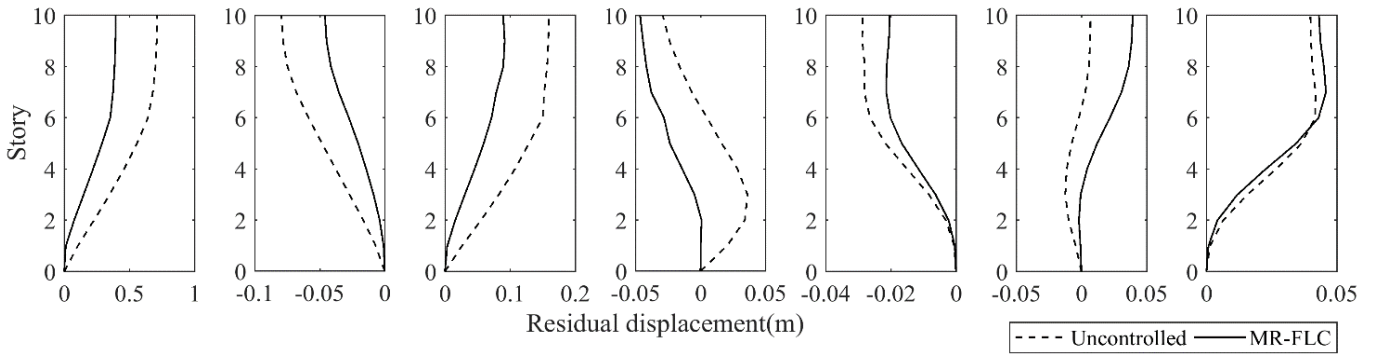
شکل ۱۱. تغییر مکان باقی‌مانده در طبقات مختلف در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۵ تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig. 11. Residual displacement of the floors in irregular structures under far-field earthquakes with reduced stiffness of 5th floor

تحت زلزله حوزه دور قرار دارد، در سازه منظم $42/83\%$ ؛ در سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۱ تا ۵ به مقدار $48/29\%$ ؛ در سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۱ به مقدار $51/24\%$ و در سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۵ به مقدار $40/18\%$ بهبود داده است.

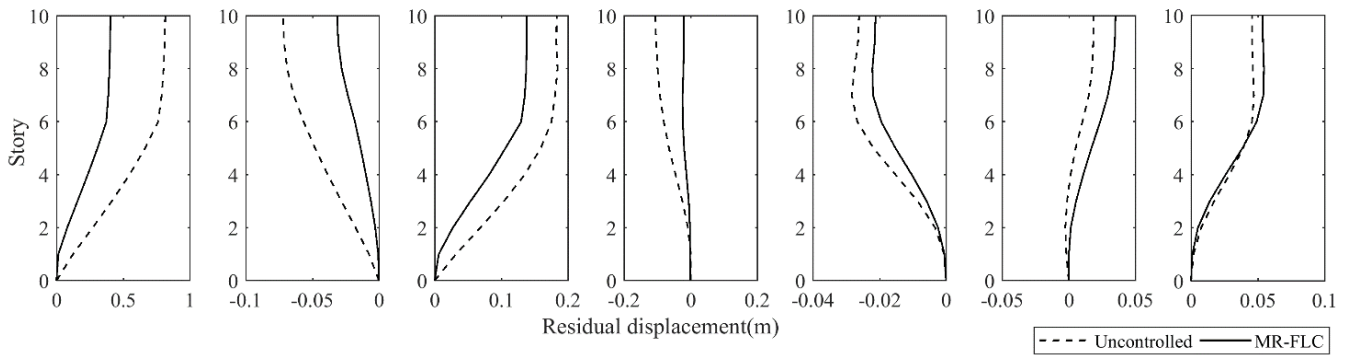
نتایج میانگین معیارهای معرفی شده برای سازه منظم، سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقات ۱ تا ۵، سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۱ و سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۵ که تحت زلزله‌های حوزه دور قرار داشتند در جدول‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده است. معیار J_1 بیانگر کارایی سیستم‌های کنترل برای کاهش جابجایی سازه می‌باشد. کاهش مؤثر این معیار، بیانگر کارایی بالای سیستم کنترل در تأمین پایداری سازه خواهد بود. با بررسی تحریک‌های حوزه دور در سازه منظم به طور میانگین معیار J_1 به مقدار $10/57\%$ در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقات ۱ تا ۵،

در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ تغییر مکان باقی‌مانده سازه در طبقات مختلف در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگر MR با کنترل کننده فازی که تحت زلزله‌های حوزه نزدیک قرار دارند نمایش داده شده است. تصویر تغییر شکل باقی‌مانده در هر شکل، از چپ به راست مربوط به زلزله‌های ۱ تا ۷ مطابق جدول ۶ است. با دقت در این تصاویر مشاهده می‌گردد اولاً تغییر مکان‌های باقی‌مانده سازه کنترل نشده نسبت به تغییر مکان‌های باقی‌مانده سازه کنترل نشده‌ای که تحت زلزله‌های حوزه دور قرار داشتند به مراتب بیشتر است ثانیاً در سازه‌های کنترل شده تغییر مکان باقی‌مانده در طبقه اول مشابه سازه‌های کنترل شده‌ای که تحت زلزله‌های حوزه دور قرار داشتند تقریباً ناچیز است در حالی که در حالت کنترل نشده در بسیاری از موارد حتی در طبقه اول نیز تغییر مکان باقی‌مانده وجود دارد. به طور میانگین استفاده از میراگر MR تغییر مکان باقی‌مانده در طبقات مختلف را هنگامی که سازه



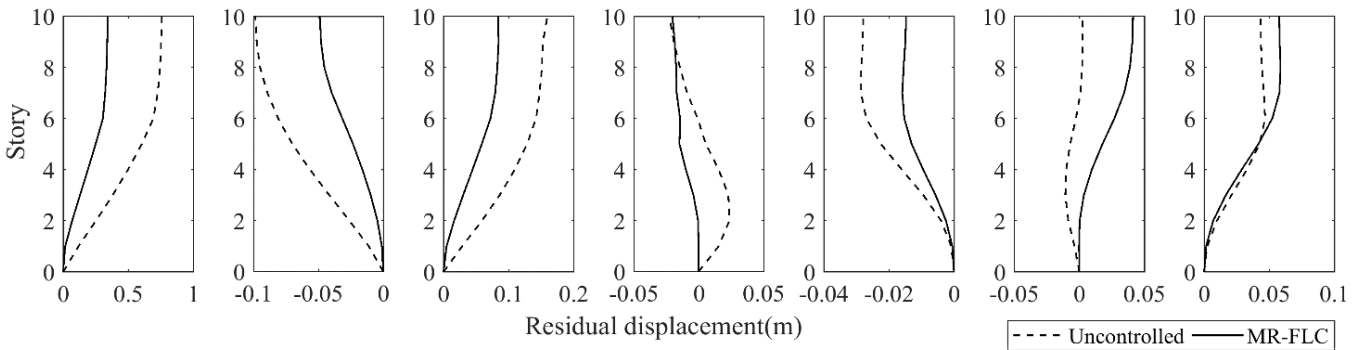
شکل ۱۲. تغییر مکان باقی مانده در طبقات مختلف در سازه منظم تحت زلزله های حوزه نزدیک

Fig. 12. Residual displacement of the floors in regular structures under near-field earthquakes



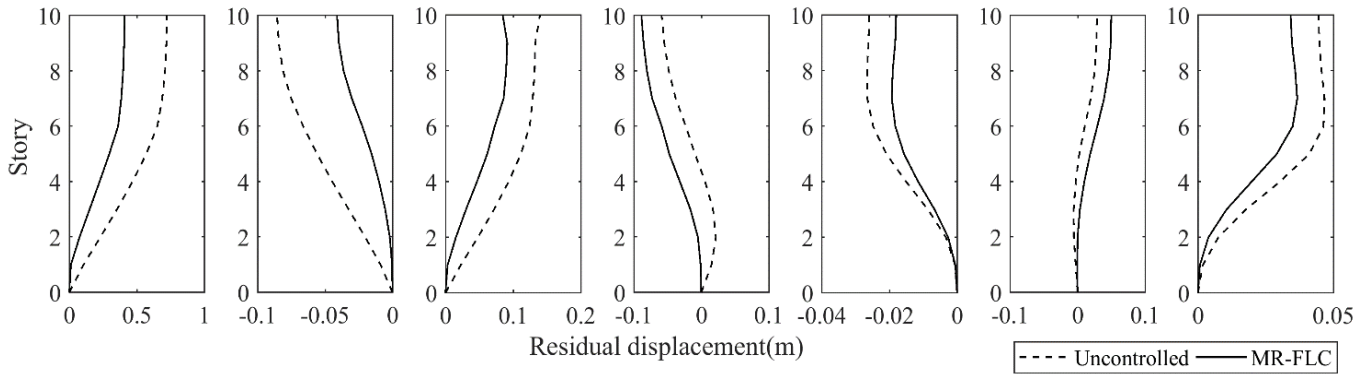
شکل ۱۳. تغییر مکان باقی مانده در طبقات مختلف در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقات ۱ تا ۵ تحت زلزله های حوزه نزدیک

Fig. 13. Residual displacement of the floors in irregular structures under near-field earthquakes with reduced stiffness of 1st to 5th floor



شکل ۱۴. تغییر مکان باقی مانده در طبقات مختلف در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۱ تحت زلزله های حوزه نزدیک

Fig.14. Residual displacement of the floors in irregular structures under near-field earthquakes with reduced stiffness of 1st floor



شکل ۱۵. تغییر مکان باقی‌مانده در طبقات مختلف در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۵ تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 15. Residual displacement of the floors in irregular structures under near-field earthquakes with reduced stiffness of 5th floor

جدول ۸. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه منظم تحت زلزله‌های حوزه دور

Table 8. Performance criteria of the proposed control systems for regular structures under far-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.9248	0.8925	0.8738	0.8864	0.8983	0.9067	0.8922	0.8795	0.8899	0.8990
J_2	1.0196	1.0091	1.0024	0.9950	0.9964	0.9937	0.9978	1.0003	0.9974	0.9925
J_3	0.2417	0.2703	0.3123	0.3276	0.3504	0.3797	0.4016	0.4189	0.4279	0.4158
J_4	0.2738	0.3131	0.3447	0.3603	0.3836	0.3982	0.4121	0.4298	0.4372	0.4573
J_5	0.8642	0.8217	0.7635	0.7729	0.8092	0.8194	0.8061	0.8029	0.8187	0.8217
J_6	1.0100	0.9819	0.9565	0.9651	0.9805	0.9863	0.9903	0.9926	0.9950	0.9973
J_7	0.1836	0.1952	0.2117	0.2391	0.2703	0.2947	0.3104	0.3188	0.3232	0.3255
J_8	0.2140	0.2327	0.2463	0.2741	0.3048	0.3274	0.3469	0.3624	0.3852	0.4111

می‌گردد که بهبود قابل ملاحظه‌ای در این معیار صورت نگرفته است. معیار J_3 و J_4 بیان‌گر میزان کارآمدی سیستم کنترل برای کاهش برش و لنگر پایه می‌باشد. کاهش مؤثر این معیارها می‌تواند موجب کاهش میزان برش و لنگر پایه و نیروهای ایجاد شده بر اثر زلزله در اعضای سازه‌ای شود. با دقت در این معیارها مشاهده می‌شود که با افزایش بیشینه شتاب عملکرد سیستم کنترلی با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. معیار J_5 نیز مشابه J_1 بیان‌گر کارایی سیستم‌های کنترل برای کاهش جابجایی سازه می‌باشد؛ با این تفاوت که نرم پاسخ‌ها را معیار سنجش قرار می‌دهد. کاهش مؤثر این معیار، بیان‌گر

در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۱، $۱۵/۵۱\%$ ، در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۵، $۹/۳۲\%$ و هنگامی که این سازه‌ها تحت زلزله‌های حوزه نزدیک قرار می‌گیرند این معیار به ترتیب $۱۰/۷۳\%$ ، $۱۱/۵۸\%$ ، $۱۴/۰۲\%$ و $۱۰/۱۶\%$ بهبود می‌یابد. با مقایسه این معیار تحت PGA ها مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش شتاب عملکرد سیستم کنترلی کاهش نامحسوسی دارد اما در شتاب‌های بالاتر دوباره این عملکرد بهبود می‌یابد. معیار J_2 بیان‌گر توانایی سیستم کنترل در کاهش شتاب می‌باشد با دقت در این مقادیر در سازه‌ها و تحریک‌های مختلف مشاهده

جدول ۹. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقات ۱ تا ۵ تحت زلزله‌های حوزه دور

Table 9. Performance criteria of the proposed control systems for irregular structures with reduced stiffness in 1st to 5th floors under far-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.9127	0.8744	0.8546	0.8488	0.9052	0.9187	0.9326	0.9042	0.8881	0.8889
J_2	1.0369	1.0222	1.0107	1.0060	1.0107	1.0122	1.0100	1.0100	1.0103	1.0112
J_3	0.2554	0.2988	0.3331	0.3755	0.3961	0.4137	0.4397	0.4495	0.4500	0.4595
J_4	0.2436	0.2914	0.3281	0.3638	0.4013	0.4223	0.4313	0.4410	0.4444	0.4559
J_5	0.8733	0.8104	0.7361	0.7316	0.7832	0.8051	0.8293	0.8274	0.8244	0.8140
J_6	1.0237	0.9881	0.9552	0.9590	0.9695	0.9785	0.9852	0.9906	0.9942	0.9976
J_7	0.2183	0.2236	0.2327	0.2594	0.2836	0.3042	0.3194	0.3307	0.3419	0.3488
J_8	0.1876	0.2098	0.2230	0.2518	0.2833	0.3079	0.3345	0.3519	0.3724	0.3964

جدول ۱۰. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۱ تحت زلزله‌های حوزه دور

Table 10. Performance criteria of the proposed control systems for irregular structures with reduced stiffness in the 1st floor under far-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.8599	0.8150	0.8394	0.8556	0.8698	0.5034	0.8534	0.8372	0.8471	0.8646
J_2	1.0507	1.0391	1.0250	1.0238	1.0205	1.0129	1.0130	1.0133	1.0114	1.0090
J_3	0.3064	0.3152	0.3535	0.3841	0.4215	0.4328	0.4405	0.4468	0.4578	0.4482
J_4	0.1841	0.2339	0.2774	0.3057	0.3381	0.3572	0.3661	0.3754	0.3920	0.4103
J_5	0.9067	0.8291	0.7416	0.7466	0.7645	0.7759	0.7620	0.7557	0.7563	0.7764
J_6	1.0748	1.0249	0.9834	0.9887	0.9937	0.9946	0.9976	1.0119	1.0020	1.0043
J_7	0.2954	0.2811	0.2706	0.2898	0.3164	0.3370	0.3529	0.3635	0.3677	0.3715
J_8	0.1406	0.1690	0.1851	0.2171	0.2505	0.2783	0.3025	0.3211	0.3368	0.3633

دقت در نتایج این معیار ملاحظه می‌شود که کاهش این معیار در زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک بیشتر است. معیار J_7 و J_8 نیز مشابه معیار J_4 و J_3 بیان‌گر میزان کارآمدی سیستم کنترلی برای کاهش برش و لنگر پایه می‌باشد؛ با این تفاوت که نرم پاسخ‌ها را معیار سنجش قرار می‌دهد. با دقت در نتایج این معیارها ملاحظه می‌شود که با افزایش بیشینه شتاب عملکرد سیستم کنترلی برای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک کاهش می‌یابد اما نرخ این کاهش عملکرد در زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از زلزله‌های حوزه دور می‌باشد.

کارایی بالای سیستم کنترلی در تأمین پایداری سازه خواهد بود. بهبود این معیار به معنی میرا شدن سریع‌تر ارتعاشات سازه است. تفاوت عمده عملکرد سیستم کنترلی تحت تحریک‌های حوزه دور و حوزه نزدیک در این معیار اتفاق می‌افتد. مطابق این معیار در زلزله‌های حوزه دور با افزایش بیشینه شتاب عملکرد سیستم کنترلی به طور نامحسوسی کاهش می‌یابد در حالی که در زلزله‌های حوزه نزدیک با افزایش بیشینه شتاب عملکرد سیستم کنترلی افزایش می‌یابد و منجر به میرا شدن ارتعاشات جابجایی سیستم می‌گردد. معیار J_6 نیز مشابه معیار J_2 بیان‌گر توانایی سیستم کنترلی در کاهش شتاب سازه می‌باشد؛ با این تفاوت که نرم پاسخ‌ها را معیار سنجش قرار می‌دهد. با

جدول ۱۱. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۵ تحت زلزله‌های حوزه دور

Table 11. Performance criteria of the proposed control systems for irregular structures with reduced stiffness in the 5th floor under far-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.9324	0.9010	0.8892	0.9009	0.9095	0.9208	0.9103	0.8957	0.9007	0.9074
J_2	1.0147	1.0048	0.9975	0.9887	0.9897	0.9876	0.9886	0.9909	0.9915	0.9903
J_3	0.2229	0.2528	0.2950	0.3208	0.3472	0.3745	0.3986	0.4207	0.4258	0.4195
J_4	0.2838	0.3299	0.3695	0.3833	0.4049	0.4290	0.4379	0.4451	0.4583	0.4820
J_5	0.8732	0.8320	0.7745	0.7887	0.8287	0.8481	0.8347	0.8252	0.8349	0.8266
J_6	1.0103	0.9840	0.9639	0.9694	0.9811	0.9863	0.9907	0.9939	0.9963	0.9977
J_7	0.1612	0.1773	0.1985	0.2254	0.2566	0.2817	0.2990	0.3100	0.3137	0.3170
J_8	0.2318	0.2467	0.2587	0.2862	0.3166	0.3401	0.3602	0.3768	0.3994	0.4291

جدول ۱۲. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه منظم تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 12. Performance criteria of the proposed control systems for regular structures under near-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.8996	0.8835	0.8760	0.9045	0.9060	0.8786	0.8832	0.8919	0.8994	0.9042
J_2	0.9869	0.9924	1.0013	0.9835	0.9864	0.9944	0.9958	0.9961	0.9976	0.9989
J_3	0.2530	0.3781	0.4185	0.4299	0.4095	0.4023	0.3908	0.3940	0.4013	0.4162
J_4	0.3158	0.4041	0.4569	0.5487	0.6119	0.6426	0.6643	0.6845	0.6991	0.7098
J_5	0.8949	0.8584	0.9048	0.8791	0.8545	0.7862	0.7736	0.7832	0.7909	0.8108
J_6	0.9988	0.9873	0.9982	1.0052	1.0015	1.0019	1.0028	1.0034	1.0059	1.0099
J_7	0.1939	0.2660	0.3064	0.3343	0.3416	0.3425	0.3384	0.3370	0.3357	0.3355
J_8	0.2531	0.3364	0.4139	0.4776	0.4944	0.5149	0.5502	0.6047	0.6489	0.6837

جدول ۱۳. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقات ۱ تا ۵ تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 13. Performance criteria of the proposed control systems for irregular structures with reduced stiffness in 1st to 5th floors under near-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.9001	0.8625	0.8512	0.8845	0.9096	0.8719	0.8794	0.8837	0.8925	0.9063
J_2	0.9966	0.9814	1.0137	0.9947	0.9859	0.9844	0.9846	0.9890	0.9987	1.0112
J_3	0.2736	0.3949	0.4632	0.4864	0.4530	0.4154	0.4100	0.4101	0.4117	0.4117
J_4	0.2968	0.3977	0.4682	0.5722	0.6171	0.6350	0.6498	0.6709	0.6882	0.7012
J_5	0.8887	0.8296	0.8577	0.8245	0.8271	0.7987	0.7681	0.7533	0.7775	0.8102
J_6	0.9816	0.9511	0.9750	0.9976	1.0036	1.0031	1.0012	1.0039	1.0076	1.0115
J_7	0.2374	0.2950	0.3304	0.3552	0.3585	0.3506	0.3500	0.3504	0.3538	0.3541
J_8	0.2390	0.3246	0.4001	0.4620	0.4935	0.5152	0.5519	0.5917	0.6423	0.6833

جدول ۱۴. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۱ تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 14. Performance criteria of the proposed control systems for irregular structures with reduced stiffness in the 1st floor under near-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.8681	0.8236	0.8237	0.8786	0.8785	0.8497	0.8549	0.8645	0.8731	0.8830
J_2	0.9984	1.0051	1.0128	0.9941	0.9938	0.9985	0.9986	0.9975	1.0058	1.0206
J_3	0.3087	0.4276	0.4745	0.4932	0.4584	0.4369	0.4156	0.4033	0.4065	0.4150
J_4	0.2444	0.3564	0.4233	0.5175	0.5732	0.6116	0.6363	0.6556	0.6725	0.6858
J_5	0.8400	0.7919	0.8636	0.8401	0.8198	0.7497	0.7072	0.7120	0.7316	0.7671
J_6	1.0084	0.9903	0.9966	1.0077	1.0037	1.0048	1.0052	1.0058	1.0093	1.0161
J_7	0.2804	0.3288	0.3647	0.3895	0.3869	0.3808	0.3748	0.3739	0.3723	0.3712
J_8	0.1808	0.2935	0.3720	0.4405	0.4669	0.4860	0.5142	0.5487	0.5966	0.6395

جدول ۱۵. بررسی عملکرد سیستم کنترلی در سازه نامنظم با کاهش سختی در طبقه ۵ تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 15. Performance criteria of the proposed control systems for irregular structures with reduced stiffness in the 5th floor under near-field earthquakes

	PGA (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
J_1	0.9053	0.8894	0.8807	0.8962	0.9136	0.8864	0.8902	0.8980	0.9068	0.9179
J_2	0.9878	0.9910	1.0013	0.9880	0.9927	0.9909	0.9941	0.9956	1.0008	1.0044
J_3	0.2347	0.3616	0.4098	0.4263	0.3948	0.3879	0.3790	0.3853	0.4012	0.4156
J_4	0.3275	0.4184	0.4702	0.5677	0.6244	0.6517	0.6738	0.6927	0.7088	0.7179
J_5	0.9016	0.8670	0.8902	0.8660	0.8543	0.8068	0.7812	0.7946	0.8059	0.8410
J_6	1.0016	0.9924	0.9970	1.0054	1.0025	1.0015	1.0027	1.0036	1.0064	1.0114
J_7	0.1789	0.2579	0.2953	0.3247	0.3314	0.3312	0.3286	0.3281	0.3291	0.3303
J_8	0.2692	0.3557	0.4291	0.4894	0.5042	0.5279	0.5639	0.6205	0.6617	0.6914

۵- نتیجه‌گیری

تا به صورت جداگانه عملکرد سیستم کنترلی مورد بررسی قرار گیرد. میراگر مغناطیسی مورد استفاده توسط کنترل کننده فازی که با دریافت ورودی سرعت نسبی توسط حسگرها، ولتاژ مورد نیاز را تعیین می‌کند سازه‌های مورد بررسی را کنترل می‌کند.

برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی نتایج تغییر مکان‌های باقی‌مانده در سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان داد استفاده از میراگر MR، تغییر مکان‌های باقی‌مانده در طبقات مختلف سازه منظم، سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۱ تا ۵، سازه نامنظم با سختی کاهش یافته در طبقه ۱ و سازه نامنظم با سختی کاهش

در مطالعه حاضر به منظور کنترل ارتعاشات سازه‌های نامنظم در سختی از میراگر مغناطیسی MR استفاده شده است. برای بررسی عملکرد این سیستم کنترلی روی سازه‌های نامنظم در سختی از یک سازه منظم و سه سازه نامنظم که از نظر پیوند مود اول، سختی و برش پایه حد تسلیم مشابه یکدیگر هستند به عنوان سازه‌های مرجع استفاده شده است. سازه‌های نامنظم با کاهش سختی در طبقات مختلف سازه منظم ایجاد شده است. این نامنظمی‌ها در طبقات اول تا پنجم، طبقه اول و طبقه پنجم اعمال شده است. این سازه‌ها تحت ۷ زلزله حوزه دور و ۷ زلزله حوزه نزدیک قرار گرفتند

seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, *Journal of Vibration and Control*, 24(13) (2018) 2938-2953.

- [6] V. Bhaiya, M. Shrimali, S. Bharti, T. Datta, Modified semiactive control with MR dampers for partially observed systems, *Engineering Structures*, 191 (2019) 129-147.
- [7] H. Zhu, X. Rui, F. Yang, W. Zhu, M. Wei, An efficient parameters identification method of normalized Bouc-Wen model for MR damper, *Journal of Sound and Vibration*, 448 (2019) 146-158.
- [8] H. Su, X. Yang, L. Liu, Y. Lei, Identifying nonlinear characteristics of model-free MR dampers in structures with partial response data, *Measurement*, 130 (2018) 362-371.
- [9] D.-S. Yoon, Y.-J. Park, S.-B. Choi, An eddy current effect on the response time of a magnetorheological damper: Analysis and experimental validation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 127 (2019) 136-158.
- [10] M. Hoseini, H. Konaraki, Application of OpenSees software in modeling and structural analysis, Azadeh publications, Tehran, 1396 (in persian).
- [11] S.-Y. Ok, D.-S. Kim, K.-S. Park, H.-M. Koh, Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers, *Engineering structures*, 29(5) (2007) 776-788.
- [12] H.-S. Kim, J.-W. Kang, Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm, *Engineering Structures*, 41 (2012) 242-257.

یافته در طبقه ۵ در صورتی که تحریک ورودی زلزله‌های حوزه دور باشند به ترتیب به مقدار ۰/۲۱/۱۹٪، ۰/۱۷/۸۵٪، ۰/۳۸/۳۴٪ و ۰/۱۵/۲۴٪ و در صورتی که تحریک ورودی زلزله‌های حوزه نزدیک باشند به ترتیب به مقدار ۰/۴۲/۸۳٪، ۰/۴۸/۲۹٪، ۰/۵۱/۲۴٪ و ۰/۴۰/۱۸٪ کاهش پیدا می‌کند. معیارهای دیگر تعریف شده نیز نشان می‌دهد که این سیستم کنترلی فارغ از وجود نامنظمی در سازه می‌تواند حداکثر جابجایی، برش و لنگر پایه و همچنین نرم این پاسخ‌ها را به طور چشمگیری کاهش دهد.

منابع

- [1] F. Michalis, V. Dimitrios, P. Manolis, Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a nine-storey steel frame, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(12) (2006) 1489-1509.
- [2] K. Le-Trung, K. Lee, J. Lee, D.H. Lee, Evaluation of seismic behaviour of steel special moment frame buildings with vertical irregularities, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(3) (2012) 215-232.
- [3] F. Mazza, Seismic demand of base-isolated irregular structures subjected to pulse-type earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 108 (2018) 111-129.
- [4] R. Oyguc, C. Toros, A.E. Abdelnaby, Seismic behavior of irregular reinforced-concrete structures under multiple earthquake excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104 (2018) 15-32.
- [5] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Zamanian, A. Kheyroddin, A. R. Mortezaei, *Vibration control of stiffness irregular structures under near and far-field earthquakes by MR dampers and fuzzy controllers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 191-208.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18497.6880

