



## Investigation the effect of Different Types of Fuzzy Controllers in Relieving the Sensitivity to Seismic Excitation of an 11-Story Structure with an Active Mass Damper

K. Takin\*, R. Doroudi, S. Doroudi

Department of Civil Engineering, Safadasht Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** The application of active tuned mass damper (ATMD) has been considered to control the seismic responses of the building in recent years. LQR and PID are two common methods in classical structural control. Both methods are sensitive to the input signal (seismic excitation). Therefore, in this study, the efficiency and effectiveness of three approaches are investigated to estimate the control force of ATMD; (1) fuzzy-LQR, (2) fuzzy-PID, and (3) fuzzy logic controller. The first and second ones are the combination of the linear quadratic regulator (LQR), and proportional–integral–derivative (PID) with fuzzy logic controller (FLC). The Observer-Teacher-Learner-Based Optimization algorithm (OTBLO) is utilized to enhance the performance of FLC. The fuzzy membership functions for inputs are tuned and fuzzy rules are extracted to find out the proper control force to reduce the peak seismic response of a structure. In this study, five control criteria, including maximum displacement, maximum acceleration, maximum inter story drift, base shear force and base moment for the performance of each control system, are evaluated. An 11-story building which is equipped by ATMD with three active control systems including fuzzy-LQR, fuzzy-PID, and fuzzy logic controllers subjected to different earthquakes. The results show that, although three optimized controllers can effectively reduce the peak seismic response of the building, the performance of the fuzzy logic controller is slightly better than two other hybrid controllers to reduce seismic responses. The results show that the three active controllers reduce the structural responses by an average of 9 to 28% compared to the uncontrolled state in various earthquakes and can effectively reduce the seismic response of the building, while the performance of the fuzzy logic controller to reduce seismic responses is slightly better than the other two combined controllers.

### Review History:

Received: Aug. 03, 2021

Revised: Dec. 20, 2021

Accepted: Dec. 22, 2021

Available Online: Feb. 03, 2022

### Keywords:

Structural Control

Observer-Teacher-Learner-Based Optimization

Fuzzy Logic Controller

PID

ATMD

LQR

## 1- Introduction

Structural vibration control methods are the most recent strategies to protect civil structures from excessive vibration, caused by environmental dynamic loads (i.e., wind and earthquake). They are classified into several devices including active, semi-active, passive and hybrid systems [1].

For several years great efforts have been devoted to the study of using Tuned mass dampers (TMDs) to protect civil structures [2-4]. A key limitation of using TMDs is that correctly calculating the fundamental frequency of vibration in a structure is impossible because of the uncertainty in the specification of structural models. Also, the effectiveness of TMDs for reducing the structural response is in a narrow range of load frequencies. Therefore, converting them to an active or hybrid system can enhance their efficiency [5].

One case of active system is Active Tuned Mass Damper (ATMD) including TMD, sensors, and actuators to protect

structures against earthquake. Proportional–integral–derivative (PID) and linear quadratic regulator (LQR) are useful algorithms in modern control theory, which has been studied by several researchers to control an active control device [6-10]. The most drawback of LQR is that LQR algorithm performs based on an optimum value of Q and R for each earthquake. It means that the LQR algorithm is extremely sensitive for input signals (earthquakes). Previous studies indicate that the performance of PID generally depends on earthquakes as input signals for control systems. Since different earthquakes have different frequency spectrums, there is no guarantee to tune a PID controller for performing well under other earthquakes. Therefore, using fuzzy logic with PID as well as LQR algorithms can be useful to control structures under seismic excitations. Fuzzy Logic Controller (FLC) is one of the effective approaches to estimate the control force, generated by ATMD. It is used as a

\*Corresponding author's email: [omran@engineer.com](mailto:omran@engineer.com)



reference to adjust appropriate control force. One of the most significant considerations in designing FLC is the creation of the membership functions for each linguistic variable, as well as the rule base. In most available applications, the fuzzy rules are generated by an expert in the area, especially for control problems with only a few inputs, but with an increasing number of inputs and linguistic variables, it is too difficult for experts to describe a complete set of rules and associated membership functions for suitable application of Fuzzy Logic Controller [11]. Using optimizing algorithms is extremely effective in overcoming the mentioned difficulties, which contain tuning membership functions and rules.

In this study, an 11-story building equipped with one ATMD is investigated. To find out the control force generated by ATMD, three different controllers including fuzzy logic controller, LQR and PID are used. Also, fuzzy logic is applied to improve the performance of LQR and PID controllers. Observer-Teacher-Learner-Based Optimization (OTBLO) is utilized to optimize the membership functions and rules of FLC and hybrid fuzzy logic with both LQR and PID algorithms to enhance the performance of them. Fuzzy membership functions for inputs are tuned and fuzzy rules are extracted in order to find the appropriate control force to reduce the peak seismic response of the building.

## 2- Numerical study

The numerical simulations of the seismic responses of the structure are performed within MATLAB software. In this study, three different controllers including fuzzy logic controllers (FLC), hybrid fuzzy logic with LQR (fuzzy-LQR) and hybrid fuzzy logic with PID (fuzzy-PID) are employed to estimate the control force, which generated by ATMD. The Gaussian membership function is defined for input variables (displacement and velocity) in all three controllers and the triangle membership function is specified for output variable including the control force of ATMD, feedback gain matrix ( $k_c, k_i$  and  $k_d$ ) and feedback gain matrix for FLC, Fuzzy-PID and Fuzzy-LQR respectively. OTBLO is used to optimize the three controllers in an 11-story building, which is equipped with one ATMD. To reduce the peak seismic response of the building (maximum displacement), fuzzy membership functions (Gaussian MF) for input variables are tuned and fuzzy rules are extracted in order to find out the appropriate ATMD' force. Floor masses of the structure are identical and horizontal story stiffness is uniform as well. The structural parameters of the building are obtained from [12]. Rayleigh damping and TMD dynamic parameters are selected based on Purzeynali et al. research paper [12]. Four earthquakes are used to optimize FLC of all controllers based on minimization of the peak displacement value of the top floor of 11-story building, which one ATMD is installed at the top story under some earthquake excitations considered is calculated as follows,

$$\text{Minimize } Z = \frac{(z_2 - z_1)}{(z_1)} \quad (1)$$

where  $z_1$  and  $z_2$  are Root-Mean-Square Deviation (RMSD) of maximum uncontrolled displacement and maximum controlled displacement of the top story for different earthquakes.

## 3- Robustness of designed control systems

For verifying the robustness of the optimal control system, the structural responses, which obtained from different optimal control systems like as TMD, FLC, fuzzy-PID and fuzz-LQR. Five criteria are represented to estimate the performance of three control systems. The criteria are based on peak displacement, acceleration level, inter-story drift ratio, base shear and base moment, which compare controlled responses to uncontrolled ones.

The main point in the studies is that LQR and PID methods are very sensitive to the input signal (earthquake). To overcome this issue in this study, the optimized fuzzy controller is combined with two methods. Then several different earthquake records were applied to the 11-story structure with all control systems. With this approach, the sensitivity of LQR and PID methods to the input signal (earthquake record) is greatly reduced. This means that two hybrid systems with the fuzzy controller are able to decrease the structural responses, including peak displacement, acceleration level, inter-story drift ratio, base shear and base moment subjected to various earthquakes in comparison with the uncontrolled state. Finally, the fuzzy control system has a relatively better performance in reducing structural responses than other systems.

## 4- Conclusions

In this paper, the performance of Active Tuned Mass Damper was investigated in an 11-story building. Three different controllers including Fuzzy Logic Controller, Fuzzy-LQR and Fuzzy-PID were used to control the building. Fuzzy logic was combined with LQR and PID in order to find better feedback gain matrixes to improve the performance of them. The design of fuzzy system was carried out based on the displacement and velocity of the structure. To enhance the performance of the controllers OTBLO algorithm was used to optimize the parameters of FLCs including the membership function and fuzzy rule set. Then, five criteria including peak displacement, level acceleration, the inter-story drift ratio, base shear and base moment were considered. The most important results are listed as follow:

All control systems including Fuzzy Logic Controller, Fuzzy-LQR and Fuzzy-PID were slightly successful to mitigate top story displacement, acceleration, and the maximum inter-story drift ratio, base-shear, and base-moment of the building in comparison with uncontrolled responses. Furthermore, optimal TMD could mitigate the five defined criteria.

It has been found that although the performance of the FLC, which is optimized based on top story displacement, is better than other controllers for reducing displacement, Maximum Inter story drift and base shear of structure, Fuzzy-LQR is better than FLC for reducing Maximum acceleration and base moment of the 11-story building. Analytical and simulation results indicate that Fuzzy-PID is slightly successful in reducing five defined criteria. By using a suitable controller to reduce the seismic responses of the building, these responses can be reduced by up to 50% compared to the uncontrolled state. Also, the average response reduction for all controllers is between 9 and 28%.

## References

- [1] T.K. Datta Control of dynamic response of structures., in: In: Indo-US Symposium on Emerging Trends in Vibration and Noise Engineering, 1996, pp. 18–20.
- [2] F. Amini, R. Doroudi, Control of a building complex with magneto-rheological dampers and tuned mass damper, *Structural Engineering and Mechanics*, 36(2) (2010) 181-195.
- [3] S. Elias, V. Matsagar, T.K. Datta, Along-wind response control of chimneys with distributed multiple tuned mass dampers, *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1) (2019) e2275.
- [4] S. Elias, V. Matsagar, T.K. Datta, Dynamic Response Control of a Wind-Excited Tall Building with Distributed Multiple Tuned Mass Dampers, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(06) (2019) 1950059.
- [5] A.H. Heidari, S. Etedali, M.R. Javaheri-Tafti, A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(1) (2018) 44-57.
- [6] N. Djedoui, A. Ounis, M. Abdeddaim, Active Vibration Control for Base-Isolated Structures Using a PID Controller against Earthquakes, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 26 (2016) 99-110.
- [7] S. Etedali, S. Tavakoli, PD/PID Controller Design for Seismic Control of High-Rise Buildings Using Multi-Objective Optimization: A Comparative Study with LQR Controller, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(03) (2016) 1750009.
- [8] M. Shahi, M.R. Sohrabi, S. Etedali, Seismic Control of High-Rise Buildings Equipped with ATMD Including Soil-Structure Interaction Effects, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(03) (2018) 1850010.
- [9] M. Arif Şen, M. Tinkir, M. Kalyoncu, Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37(1) (2018) 107-127.
- [10] S.N. Deshmukh, N.K. Chandiramani, LQR Control of Wind Excited Benchmark Building Using Variable Stiffness Tuned Mass Damper, *Shock and Vibration*, 2014 (2014) 156523.
- [11] N. Siddique, H. Adeli, *Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*, John Wiley & Sons, 2013.
- [12] S. Pourzeynali, H.H. Lavasani, A.H. Modarayi, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, *Engineering Structures*, 29(3) (2007) 346-357.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

K. Takin, R. Doroudi, S. Doroudi, *Investigation the effect of Different Types of Fuzzy Controllers in Relieving the Sensitivity to Seismic Excitation of an 11-Story Structure with an Active Mass Damper*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 589-592.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20286.7405](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20286.7405)







## تأثیر انواع مختلف کنترل گره‌های فازی در رفع حساسیت به تحریک لرزه‌ای یک سازه ۱۱ طبقه با میراگر جرمی تنظیم شده فعال

کامبیز تکین<sup>\*</sup>، روزبه درودی، سیامک درودی

دانشکده مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

### کلمات کلیدی:

کنترل سازه  
بهینه‌سازی مبتنی بر مبصر-معلم-  
دانش آموز  
کنترل کننده فازی  
الگوریتم PID  
میراگر جرمی تنظیم شده فعال  
الگوریتم LQR

**خلاصه:** در سال‌های اخیر، استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده فعال برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم‌های LQR و PID دو روش مرسوم در کنترل سازه‌ها می‌باشند که برای به دست آوردن نیروی کنترلی میراگر جرمی تنظیم شده فعال به کار برده می‌شوند. هر دو روش ذکر شده نسبت به سیگنال ورودی (تحریک لرزه‌ای) به سیستم حساس می‌باشند. برای حل مشکل بیان شده، در این بررسی هر دو روش با کنترل گر فازی ترکیب شده تا حساسیت آن‌ها نسبت به سیگنال ورودی کاهش یابد. لذا در این مطالعه، کارایی و اثربخشی سه روش برای تخمین نیروی کنترل میراگر جرمی تنظیم شده فعال بررسی شده است که شامل کنترل گر ترکیبی فازی-LQR، کنترل گر ترکیبی فازی-PID و کنترل کننده منطق فازی می‌باشند و ضمناً، از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر مبصر-معلم-دانش آموز (OTBLO) برای افزایش عملکرد FLC استفاده شده است. توابع عضویت فازی برای ورودی‌ها تنظیم شده و قوانین فازی برای یافتن نیروی کنترل مناسب برای کاهش پاسخ لرزه ای سازه استخراج شده است. در این مقاله پنج معیار کنترلی شامل حداکثر جابجایی، حداکثر شتاب، حداکثر جابجایی نسبی طبقات، نیروی برشی پایه و گشتاور پایه برای کارایی هر کدام از سیستم های کنترلی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین پاسخ‌های تاریخی زمانی سازه نیز مورد نظر قرار گرفته است. به عنوان مثال عددی ساختمان ۱۱ طبقه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده فعال که به منظور به دست آوردن نیروی کنترلی میراگر از کنترل کننده‌های مختلفی شامل کنترل گر ترکیبی فازی-LQR، کنترل گر ترکیبی فازی-PID، کنترل گر منطق فازی و همچنین کنترل گر غیرفعال میراگر جرمی تنظیم شده که در معرض زلزله های گوناگونی قرار گرفته است استفاده شده است. نتایج نشان می دهند که سه کنترل کننده بهینه فعال به طور میانگین بین ۹ تا ۲۸ درصد، پاسخ‌های سازه که شامل حداکثر جابجایی، حداکثر شتاب، حداکثر جابجایی نسبی طبقات، نیروی برشی پایه و گشتاور پایه را در مقایسه با حالت کنترل نشده در زلزله‌های گوناگون کاهش داده و می توانند به طور موثری از پاسخ لرزه‌ای ساختمان بکاهند، در عین حال عملکرد کنترل کننده منطق فازی برای کاهش پاسخ‌های لرزه ای کمی بهتر از دو کنترل کننده ترکیبی دیگر است.

### ۱- مقدمه

TMD ها سیستم‌های غیرفعال معمولی هستند که با فرکانس طبیعی سازه تنظیم می‌شوند. اگرچه TMD با افزایش میرایی سازه، پاسخ سازه را کاهش می‌دهد، ولی دستگاه‌های غیرفعال محدودیت‌های زیادی دارند. محدودیت اصلی استفاده از TMD بدین صورت است که محاسبه صحیح فرکانس طبیعی ارتعاش یک سازه به دلیل عدم اطمینان در مشخصات مدل‌های سازه‌ای غیرممکن است. همچنین، اثر بخشی این سیستم‌ها در کاهش پاسخ سازه در ناحیه محدودی از فرکانس‌ها می‌باشد. بنابراین، تبدیل آن‌ها به سیستم فعال یا ترکیبی می‌تواند کارایی آن‌ها را افزایش دهد [۱۰]. لازم به ذکر است که پارامترهای TMD را می‌توان برای کارایی بیشتر بهینه کرد

روش‌های کنترل ارتعاشات سازه‌ای جدیدترین استراتژی برای محافظت از سازه‌های عمرانی در برابر لرزش بیش از حد، ناشی از بارهای دینامیکی محیط (به عنوان مثال، باد و زلزله) است. آن‌ها به چندین دسته از جمله سیستم‌های فعال، نیمه فعال، غیرفعال و ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. در سال‌های اخیر تلاش زیادی برای مطالعه استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) برای محافظت از سازه‌های عمرانی انجام شده است [۹-۲].

### 1 Tuned Mass Damper

[۱۱].

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: omran@engineer.com



است. در بیشتر مسائل موجود، قوانین فازی توسط یک متخصص خبره در مسئله موجود ایجاد می‌شود، اما با افزایش تعداد ورودی‌ها و متغیرهای زبانی، توصیف یک مجموعه کامل از نظر متخصصان بسیار دشوار است. قوانین و توابع عضویت همراه باید متناسب با کنترل کننده منطقی فازی تنظیم شوند [۳۰].

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای غلبه بر مشکلات ذکر شده که شامل تنظیم پارامترها و قوانین عضویت است بسیار کارآمد است. رویکرد بهینه‌سازی به طور کلی یک رویکرد جستجو برای یافتن مجموعه بهینه تمام پارامترهای طراحی است [۳۰]. طراحی یک FLC می‌تواند به عنوان یک مسئله جستجو در یک فضای با ابعاد بالا فرموله شود که در آن هر نقطه از فضا نشان دهنده پارامترهای عملکرد عضویت و مجموعه قوانین پایه است. بنابراین، بسیاری از محققان FLC را برای تعیین نیروی کنترل تولید شده توسط ATMD بهینه کرده‌اند [۳۲ و ۳۱].

حتی اگر از الگوریتم‌های PID و LQR به طور مکرر برای کنترل سازه‌های تحت بارهای دینامیکی استفاده شده باشند، اشکال اصلی هر دو الگوریتم عدم کارایی در مسائل غیرخطی، مشکلات پیچیده و عدم قطعیت است. برای غلبه بر مشکلات بیان شده، از منطق فازی برای بهبود عملکرد الگوریتم‌های PID و LQR استفاده می‌شود. در این مقاله، یک ساختمان ۱۱ طبقه مجهز به یک ATMD مورد بررسی قرار گرفته است. برای محاسبه نیروی کنترل تولید شده توسط ATMD از سه کنترل کننده مختلف از جمله کنترل کننده منطق فازی، LQR و PID استفاده شده است. همچنین منطق فازی برای بهبود عملکرد کنترل‌گرهای LQR و PID اعمال شده است. بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم مبصر-معلم-دانش‌آموز (OTBLO<sup>۵</sup>) برای بهینه‌سازی توابع عضویت و قوانین کنترل کننده‌های فازی استفاده می‌شود. توابع عضویت فازی برای ورودی‌ها تنظیم شده و قوانین فازی استخراج می‌شوند تا نیروی کنترل مناسبی برای کاهش اوج پاسخ لرزه‌ای ساختمان پیدا شود. شکل ۱ نمودار انواع این سیستم‌های کنترل را نشان می‌دهد. شکل ۲ ساختمان ۱۱ طبقه را نشان می‌دهد که یک ATMD در طبقه بالای ساختمان نصب شده است.

## ۲- مدل سازه با استفاده از ATMD

برای بررسی تاثیر کنترل کننده‌ها بر روی سازه، یک جرم میراگر تنظیم شده فعال در طبقه بالای ساختمان نصب شده است. معادله حرکت برای این

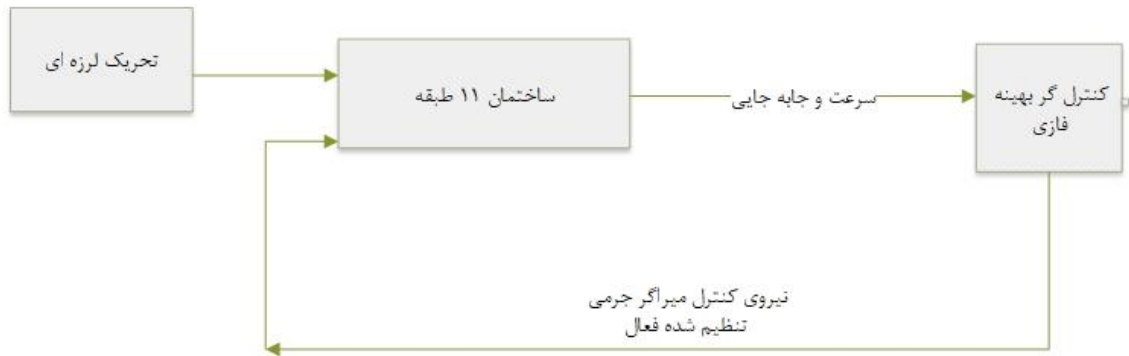
سیستم فعال روشی بسیار موثر برای کاهش آسیب ناشی از تحریک لرزه‌ای می‌باشد [۱۲]. اطلاعات مربوط به تحریک و پاسخ‌های سازه‌ای توسط حسگرها جمع‌آوری می‌شود و سپس رفتار میراگر بر اساس این اطلاعات اصلاح می‌شود تا عملکرد سیستم فعال را افزایش دهد. یک مورد از سیستم‌های فعال، ATMD<sup>۱</sup> که شامل TMD، سنسورها و محرک برای محافظت از سازه‌ها در برابر زلزله است. چندین الگوریتم کنترلی برای محاسبه نیروی کنترل تولید شده توسط ATMD ارائه شده است.

یکی از اساسی‌ترین الگوریتم‌های نظریه کنترل مدرن تنظیم کننده درجه دوم خطی (LQR<sup>۲</sup>) است. کنترل کننده LQR توسط تعداد زیادی از محققان برای کنترل سازه‌های تحت تحریکات لرزه‌ای استفاده شده است [۱۶-۱۳]. مشکل این روش بدین صورت است که الگوریتم LQR بر اساس مقدار بهینه  $Q$  و  $R$  (ماتریس‌های وزنی برای ورودی‌ها و حالت کنترلی) برای هر زلزله عمل می‌کند. این بدان معنی است که الگوریتم LQR به سیگنال‌های ورودی (زمین لرزه) بسیار حساس است. ترکیب منطق فازی با LQR به دلیل توانایی منطق فازی در مدیریت پدیده‌های غیرخطی و نامشخص در تحریکات زلزله‌ای، یک روش بسیار موثر برای حل مسئله ذکر شده است.

کنترل کننده PID<sup>۳</sup> یکی دیگر از الگوریتم‌های مفید در تئوری کنترل مدرن است که توسط چندین محقق برای کنترل فعال سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۳-۱۷]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که عملکرد PID به طور کلی به زمین لرزه‌ها به عنوان سیگنال ورودی برای سیستم‌های کنترل بستگی دارد. از آنجایی که زلزله‌های مختلف طیف فرکانسی متفاوتی دارند، تضمینی برای تنظیم کنترل کننده PID برای عملکرد خوب تحت اثر زمین لرزه‌ها وجود ندارد. بنابراین استفاده از منطق فازی با الگوریتم PID مانند LQR می‌تواند برای کنترل سازه‌های تحت تحریکات لرزه‌ای مفید باشد.

کنترل کننده منطق فازی (FLC<sup>۴</sup>) یک روش موثر برای تخمین نیروی کنترل تولید شده توسط ATMD است. کنترل کننده فازی به عنوان مرجع برای تنظیم نیروی کنترل مناسب استفاده می‌شود [۲۴]. علاوه بر این، مزیت رویکرد فازی توانایی آن در مدیریت پدیده‌های غیرخطی و نامطمئن موجود در تحریکات زلزله است [۲۹-۲۵]. یکی از مهم‌ترین ملاحظات در طراحی FLC ایجاد توابع عضویت برای هر متغیر زبانی و همچنین قواعد

- 1 Active Tuned Mass Damper
- 2 Linear Quadratic Regulator
- 3 Proportional Integral Derivative
- 4 Fuzzy Logic Controller



الف) کنترل کننده فازی  
a) Fuzzy Logic Controller system



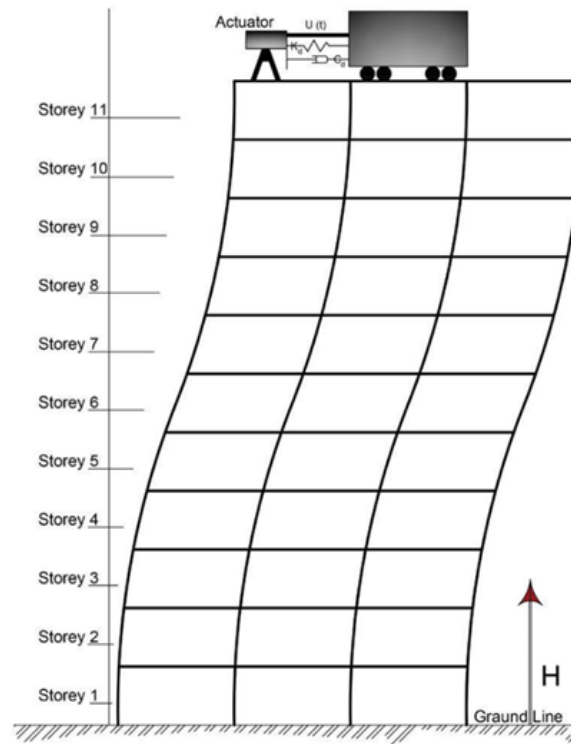
ب) کنترل کننده فازی و LQR  
b) Fuzzy-LQR control system



ج) کنترل کننده فازی و PID  
c) Fuzzy-PID control system

شکل ۱. مدل های سیستم های کنترلی به کار رفته برای کنترل ساختمان ۱۱ طبقه الف) کنترل کننده فازی ب) کنترل کننده فازی و LQR ج) کنترل کننده فازی و PID

Fig. 1. shows the diagram of the control systems of 11-story building a) Fuzzy Logic Controller system; b) Fuzzy-LQR control system; c) Fuzzy-PID control system



شکل ۲. سازه ۱۱ طبقه مجهز به ATMD

Fig. 2. 11-story building with one ATMD

سازه به شرح زیر است:

$$[M_{ATMD}] = \begin{bmatrix} [M] & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix},$$

$$[K_{ATMD}] = \begin{bmatrix} [K] & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix},$$

$$[C_{ATMD}] = \begin{bmatrix} [C] & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix}$$

(۲)

$$[M_{ATMD}] \{\ddot{x}(t)\} + [C_{ATMD}] \{\dot{x}(t)\} + [K_{ATMD}] \{x(t)\} = -[M_{ATMD}] \times \{r_{ATMD}\} \{\ddot{x}_g(t)\} + \{E_f\} f_{ATMD}(t) \quad (۱)$$

که در آن  $x(t)$ ،  $\dot{x}(t)$  و  $\ddot{x}(t)$  به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب سازه‌ای و  $\ddot{x}_g(t)$  بردار شتاب تک مؤلفه‌ای زمین با ابعاد  $(n+1) \times n$  که n درجه آزادی ساختمان است. ماتریس‌های  $[M_{ATMD}]$ ،  $[K_{ATMD}]$ ،  $[C_{ATMD}]$  که به ترتیب ماتریس‌های سختی، جرم و میرایی سیستم ترکیبی (شامل قاب و میراگر) هستند دارای ابعاد  $(n+1) \times (n+1)$  هستند.

که در آن  $m_d$ ،  $k_d$ ،  $c_d$  سختی، جرم و میرایی TMD هستند.  $[M]$  و  $[K]$  ماتریس‌های جرم و سختی برای سازه هستند که ابعاد آنها  $(n \times n)$  است.  $[C]$  یک ماتریس میرایی سازه‌ای است و طبق روش رایلی<sup>۱</sup> به شرح زیر محاسبه می‌شود:

1 Rayleigh



$$\{E_f\} = [0 \ 0 \ \dots \ -1 \ 1]^T \quad (۱۱)$$

### ۳- کنترل کننده LQR

کنترل کننده LQR یکی از اساسی‌ترین تکنیک‌ها در تئوری کنترل سازه‌ها است. این روش را می‌توان برای دستگاه‌های فعال مانند ATMD برای کنترل سازه‌های تحت تحریکات لرزه‌ای استفاده کرد. نمایش فضای حالت یک مدل ریاضی از یک سیستم فیزیکی به عنوان مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی، خروجی و حالت است که با معادلات دیفرانسیل مرتبه اول همراه است. معادلات حرکت در فضای حالت برای یک سازه چند درجه آزادی به شکل زیر می‌باشد:

$$\dot{z} = Az(t) + Bf_{ATMD}(t) + H\ddot{x}_g(t) \quad (۱۲)$$

که در آن  $A$ ،  $B$  و  $H$  ماتریس ثابت به شرح زیر هستند:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{(n+1) \times (n+1)} & I_{(n+1) \times (n+1)} \\ -M_{ATMD}^{-1} K_{ATMD} & -M_{ATMD}^{-1} C_{ATMD} \end{bmatrix}, \quad (۱۳)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{(n+1)} \\ M_{ATMD}^{-1} E_f \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0_{(n+1)} \\ r_{ATMD} \end{bmatrix}$$

همچنین  $z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}$  بردار حالت سیستم، بردار شتاب زمین و نیروی کنترل هستند.  $f_{ATMD}(t)$  به ترتیب

همچنین  $I$  و  $0$  ماتریس‌های یک‌ه و صفر با ابعاد  $(n+1) \times (n+1)$  می‌باشند.

در کنترل کننده LQR، نیروهای کنترل بهینه با به حداقل رساندن تابع زیر برآورد می‌شود:

$$J = \int_0^{t_d} [z^T(t) Q z(t) + \{f_{ATMD}(t)\}^T R \{f_{ATMD}(t)\}] \quad (۱۴)$$

که در آن  $t_d$  فاصله زمانی مورد نظر است. علاوه بر این، ماتریس‌های

$$[C] = d_1[M] + d_2[K] \quad (۳)$$

$$d_1 = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (۴)$$

$$d_2 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (۵)$$

که در آن  $\omega_i$  و  $\omega_j$  آمین و زامین فرکانس طبیعی ساختمان کنترل نشده هستند و  $\xi$  نسبت میرایی موده‌های فرض شده می‌باشد. بعد ماتریس  $[C]$  برابر  $(n) \times (n)$  است.

پارامترهای دینامیکی TMD شامل  $m_d$ ،  $k_d$ ،  $c_d$  و  $\omega_d$  می‌باشد که روابط آن به شرح زیر است:

$$m_d = \mu m_{e1} \quad (۶)$$

$$\omega_d = f_d \omega \quad (۷)$$

$$k_d = m_d \omega_d^2 \quad (۸)$$

$$c_d = 2m_d \xi_d \omega_d \quad (۹)$$

$\omega_d$ ،  $c_d$ ،  $m_d$ ،  $k_d$  به ترتیب سختی، جرم، میرایی و فرکانس TMD هستند.  $\omega$ ،  $m_{e1}$  و به ترتیب فرکانس مود اول ساختمان اصلی و جرم ساختمان اصلی در مود اول فرکانس هستند.

$\{r_{ATMD}\}$  بردار ضریب تاثیر زلزله  $\ddot{x}_g(t)$  با ابعاد  $(n+1) \times n$  است و به صورت زیر است:

$$\{r_{ATMD}\} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (۱۰)$$

$\{E_f\}$  بردار مکانی ATMD با ابعاد  $(n+1) \times n$  است.

وزن متقارن  $Q$  و  $R$  پارامترهای طراحی برای دستیابی به عملکرد اساسی هستند. نیروهای کنترل فعال به صورت زیر مشخص می‌شوند:

$$f_{ATMD}(t) = -Gz(t) \quad (15)$$

که  $G$  ماتریس بازخورد است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$G = R^{-1} B^T P \quad (16)$$

که در آن  $P$  ماتریس نیمه معین مثبت حاصل از معادله ریکاتی است. الگوریتم LQR یکی از محبوب‌ترین الگوریتم‌های کنترل بازخورد بهینه است که بیشتر به دلیل سادگی و سهولت به کار برده می‌شود. اگر چه می‌توان از LQR برای کاهش ارتعاشات استفاده کرد، اما یک محدودیت اساسی در این الگوریتم این است که دارای تعدادی کاستی اساسی است، از جمله اینکه در برابر عدم قطعیت پارامتر و خطای مدل‌سازی آسیب‌پذیر است [۳۱]. نقطه ضعف دیگر LQR این است که نمی‌تواند در برابر لرزش‌های مختلف مقاومت کند که فرکانس تحریک خارجی آن‌ها حتی کمی با فرکانس‌های طبیعی سازه متفاوت باشند [۳۱]. استفاده از منطق فازی با LQR یک روش موثر برای غلبه بر این کاستی‌های ذکر شده به دلیل توانایی منطق فازی در کنترل مسئله پیچیده با عدم اطمینان زیاد است. لذا در این مطالعه از منطق فازی برای افزایش عملکرد الگوریتم LQR استفاده شده است. تابع عضویت گوسی و تابع عضویت مثلثی به عنوان توابع عضویت به ترتیب برای ورودی (سرعت و جابجایی) و خروجی (ماتریس افزایش بازخورد) استفاده می‌شوند.

#### ۴- کنترل کننده PID

کنترل کننده PID یک مکانیزم حلقه کنترل است که از یک کنترل کننده بازخورد استفاده می‌کند و به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. تابع انتقال یک کنترل کننده PID در دامنه فرکانس برای ATMD به شرح زیر مشخص شده است:

$$k_{PID}(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (17)$$

که در آن  $k_c$ ,  $\tau_i$  و  $\tau_d$  به ترتیب ضریب انتگرال، تناسبی و مشتق‌گیر هستند.

بردار نیروی کنترل  $u_{PID}(t)$  است، در حوزه زمان با معادله (۱۸) محاسبه می‌شود. پارامتر  $t$  مدت زمان وقوع یک زلزله است.

$$u_{PID}(t) = k_c [e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (18)$$

با فرض اینکه خروجی کنترل حلقه بسته، بردار سرعت طبقات می‌باشد و بردار بازخورد مورد نظر طبقات صفر باشد، سیگنال خطای سیستم کنترل  $e(t) = \dot{x}(t)$  است. از این رو بردار نیروی کنترل سازه و  $u_{PID}(t)$  را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$u_{PID}(t) = k_c [\dot{x}(t) + \frac{x(t)}{\tau_i} + \tau_d \ddot{x}(t)] = G_{PID} [\dot{x}(t), x(t), \ddot{x}(t)]^T \quad (19)$$

که در آن  $G_{PID}$  ماتریس بازخورد می‌باشد.

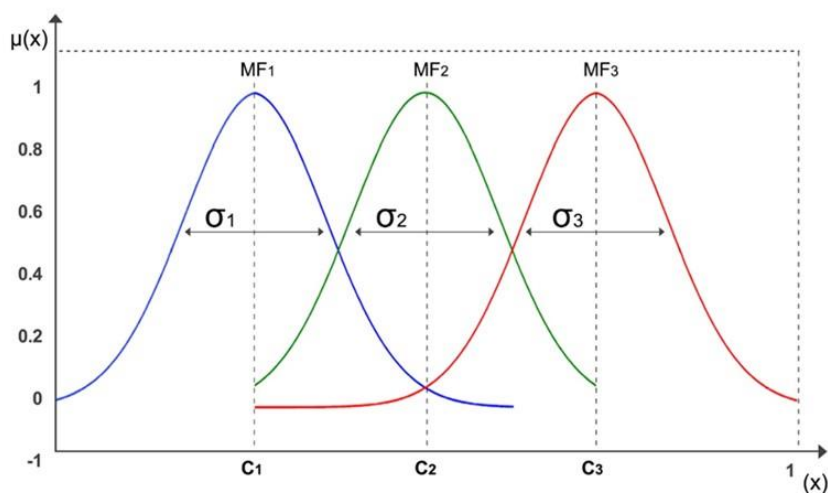
اشکال عمده این رویکرد عبارتند از: ضعف و محدودیت در مسائل غیرخطی، عدم قطعیت و فقط قادر به اندازه‌گیری ورودی‌های مختلف و محاسبه تفاوت بین آن‌ها است [۳۲]. لذا، ترکیب منطق فازی با PID می‌تواند سیستم کنترل ترکیبی را بهبود بخشد. در این مقاله، از تابع عضویت گوسی و مثلثی به ترتیب برای متغیرهای ورودی (سرعت و جابجایی) و خروجی (ماتریس بازخورد شامل  $k_d, k_I, k_p$ ) استفاده می‌شود.

#### ۵- طراحی کنترل کننده فازی

طراحی کنترل کننده فازی مناسب دارای دو قسمت اساسی است ۱- طراحی توابع عضویت ۲- طراحی قوانین فازی.

##### ۵-۱- طراحی توابع عضویت

فازی‌سازی در یک مجموعه فازی با توابع عضویت آن مشخص می‌شود. توابع عضویت صرف نظر از گسسته و یا پیوسته بودن، در یک مجموعه



شکل ۳. توابع عضویت گاوسی

Fig. 3. Gaussian membership functions

#### ۵-۲- طراحی قوانین فازی

کارایی FLC بیشتر به قوانین فازی بستگی دارد. قوانین فازی شامل قوانین if-then است که مبتنی بر دانش متخصص یا اپراتورهای ماهر موجود می‌باشند به این معنی که مجموعه قوانین فازی با توجه به دانش و تجربه طراح و آگاهی نسبی آن نسبت به موضوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به عبارت دیگر، مجموعه قانون روابط بین توابع خروجی و عضویت ورودی را تشکیل می‌دهند. همچنین، تعداد قوانین به تعداد توابع عضویت ورودی بستگی دارند. بنابراین، برای یک طراح که با متغیرهای ورودی/خروجی رو به رشد روبرو است، استخراج قوانین فازی مناسب دشوار خواهد بود [۳۰]. به همین ترتیب، تصحیح و تنظیم قوانین فازی برای حل مسئله بسیار موثر است. یک روش ارزشمند برای اصلاح و تنظیم قوانین فازی بدین گونه است که مقدار متغیر خروجی با مقادیر عددی صحیح نشان داده شود [۳۰]. در این مطالعه تعداد توابع عضویت برای متغیر خروجی پنج در نظر گرفته می‌شود در نتیجه ارزش متغیر خروجی از ۱ به ۵ است.

#### ۶- مدل بهینه

همانطور که در بالا ذکر شد، FLC ها از MF و مجموعه قوانین فازی تشکیل شده‌اند. بنابراین، انتخاب MF و یک قانون مربوط به قوانین فازی،

دسته‌بندی می‌شوند. توابع عضویت توسط نمایش‌های گرافیکی شکل می‌گیرند. نمایش‌های گرافیکی از اشکال مختلف تشکیل شده است. شکل توابع عضویت ممکن است معیار بسیار مهمی برای عملکرد موفق FLC باشد. اشکال مختلفی برای توابع عضویت وجود دارد که با فرمول‌بندی‌های ریاضی نشان داده می‌شوند. یکی از توابع عضویت قابل اجرا و روان، تابع عضویت گاوسی است. تابع عضویت گاوسی (MF) با دو پارامتر مشخص شده است.  $\{\sigma, c\}$

$$Gaussian(x, c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (20)$$

تابع عضویت گاوسی به طور کامل توسط  $\sigma$  و  $c$  مشخص می‌شود که  $c$  نشانگر مرکز MF است و  $\sigma$  عرض MF را تعیین می‌کند [۳۳]. شکل ۳ توابع عضویت گاوسی را نشان می‌دهد. در این مقاله، از توابع عضویت گاوسی و مثلثی استفاده شده است. متغیرهای ورودی سرعت و جابجایی و متغیرهای خروجی نیروی کنترل ATMD هستند.

روش تکرار به دست آمده‌اند پیشنهاد شده است. در نسل اول، مناسب‌ترین جمعیت راه حل به عنوان یک راه حل نخبه ذخیره می‌شوند. سپس با مقایسه با بهترین راه حل نتایج جدید بروز می‌شوند. جزئیات بیشتر OTLBO توسط شهروزی و دیگران ارائه شده است [۳۴].

#### ۷- مطالعه عددی

شبیه‌سازی عددی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود. در این مطالعه، سه کنترل کننده مختلف از جمله کنترل کننده‌های منطق فازی (FLC)، منطق فازی ترکیبی با (fuzzy-LQR) و منطق فازی ترکیبی با (fuzzy-PID) برای تخمین نیروی کنترل تولید شده توسط ATMD استفاده شده است. تابع عضویت گاوسی برای متغیرهای ورودی (جابجایی و سرعت) در هر سه کنترل کننده و تابع عضویت مثلثی برای متغیر خروجی شامل نیروی کنترل ATMD، ماتریس بازخورد  $(k_c, k_v, k_d)$  و ماتریس بازخورد به ترتیب برای FLC، Fuzzy-LQR و Fuzzy-PID هستند.

از OTLBO برای بهینه‌سازی سه کنترل کننده در یک ساختمان ۱۱ طبقه استفاده می‌شود که مجهز به یک دستگاه ATMD است. برای کاهش اوج پاسخ لرزه‌ای ساختمان (حداکثر جابجایی) توابع عضویت فازی (Gaussian MF) برای متغیرهای ورودی تنظیم شده و قوانین فازی استخراج می‌شود تا نیروی مناسب ATMD پیدا شود. منطق فازی شامل MF ها، قوانین و OTLBO در MATLAB کدگذاری شده است. ساختمان مورد استفاده یک سازه برشی است که در مرجع [۱۴] مشخصات دینامیکی آن بیان شده است. پارامترهای سازه‌ای ساختمان از مرجع [۱۴] که در جدول ۱ نشان داده شده است، استخراج گردیده است. پارامترهای طراحی کنترل کننده LQR، از سیستم حلقه بسته بازخورد کامل استفاده می‌شود. ماتریس  $Q$  با ابعاد  $24 \times 24$  با مشخصات زیر می‌باشد:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (22)$$

که در آن ماتریس‌های قطری  $Q_{11}$  و  $Q_{22}$  به ترتیب شامل جابجایی‌های نسبی و سرعت‌های نسبی هستند هرگونه تغییر در عناصر  $[Q]$  منجر به سطوح لغزش متفاوتی می‌شود [۱۴]. بنابراین، با مراجعه به مرجع [۱۴]، این

نقش مهمی در طراحی سیستم‌های فازی ایفا می‌کنند، که این کار توسط آزمون و خطا یا توسط متخصصان انجام می‌شود. مشکل این روش بدین صورت است که سیستم‌های فازی ساخته شده نتایج مناسبی برای تحقق راه حل مناسب برای یک مسئله پیچیده را ندارند. یک رویکرد بهینه‌سازی می‌تواند با فرمول‌بندی پارامترهای FLC به عنوان یک مسئله جستجو در یک فضای با ابعاد بالا که هر نقطه از فضا نشان دهنده پارامترهای تابع عضویت و مجموعه قوانین است، این مشکل را حل کند.

تابع هدف در این تحقیق به حداقل رساندن مقدار اوج جابجایی طبقه آخر سازه می‌باشد که یک دستگاه ATMD در طبقه بالا نصب می‌شود و تحت تحریکات زلزله در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

$$\text{Minimize}(Z) = \frac{(z_2 - z_1)}{z_1} \quad (21)$$

که  $z_1$  و  $z_2$  انحراف از جذر میانگین مربع حداکثر جابجایی حالت کنترل نشده و حداکثر جابجایی حالت کنترل شده از طبقه آخر برای زلزله‌های مختلف محاسبه شده که با حل معادله (۱) با استفاده از یک ATMD به دست می‌آیند. در این مطالعه برای بهینه‌سازی FLC ها از بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم مشاهده‌گر-معلم-یاد گیرنده (OTLBO) استفاده می‌شود. این الگوریتم توسط شهروزی و همکاران [۳۴] معرفی شده است.

الگوریتم فراابتکاری OTLBO با معرفی یک موتور جستجوی جدید تعبیه شده در فاز معلم، روش TLBO را بهبود می‌بخشد. عمدتاً بر اساس بهره‌برداری حافظه توسط اطلاعات تصادفی تبدیلی بین دانش آموزان ساختگی می‌باشد. در این فرآیند، اطلاعات هم‌کلاسی‌ها، موضوع به موضوع به صورت تصادفی از دانش آموزهای مختلف برای تولید راه حل جدید به نام مبصر گرفته می‌شود. در غیاب معلم در کلاس، این مبصر برای راهنمایی دانش آموزان جایگزین معلم می‌شود. در اینجا، زمان موجود به صورت مساوی بین معلم و مبصر تقسیم می‌شود. از آنجایی که این استراتژی یک فضای جستجوی اضافی ایجاد می‌کند، انتظار می‌رود که ظرفیت جستجوی تصادفی الگوریتم را بالا ببرد. به عبارت دیگر الگوریتم بهینه‌سازی مبصر-معلم-دانش آموز شامل این سه فاز می‌باشد که با به کار بردن فاز مبصر کارایی الگوریتم TLBO را برای جستجوی محلی و موضعی در فضای جستجو افزایش داده است. همچنین یک استراتژی نخبه‌گر برای جلوگیری از بین رفتن بهترین راه‌حل‌هایی که تاکنون از طریق

ماتریس‌ها به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$Q_{11} = \rho_1 \text{diag}(111111111111111111110.150.005) \quad (23)$$

$$Q_{22} = \rho_2 \text{diag}(111111111111111111110.150.005) \quad (24)$$

که در آن  $\rho_1$  و  $\rho_2$  ضریب وزن  $R$  (در معادله (۱۶)) هستند. هر سه ضریب به عنوان متغیرهای خروجی برای منطق فازی-LQR طراحی شده فرض می‌شوند. چهار رکورد زلزله از جدول ۲ برای به دست آوردن پارامترهای بهینه FLC انتخاب شده است که شامل دو رکورد گسل نزدیک به نام‌های Northridge Tarzana و Tabas و همچنین دو رکورد گسل دور به نام‌های Kobe KJMA و Cape Mendocino Petrolia می‌باشند. لازم به ذکر است پارامترهای مورد نیاز برای میراگر جرمی تنظیم شده بر اساس مرجع [۱۴] برابر مقادیر زیر است:

$$w_n = 1.2$$

$$m_u = 0.03 ; e_d = 0.07$$

که در آن  $m_u$  نسبت جرم TMD به جرم کل سازه،  $e_d$  نسبت میرایی TMD و  $\omega_n$  نسبت فرکانس TMD به فرکانس سازه در مود اول است.

شکل ۴ توابع عضویت گاوسی سه کنترل کننده را برای متغیرهای ورودی (جابجایی و سرعت) پس از آموزش و تنظیم توسط OTBLO نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، کنترل کننده‌ها بر اساس دو متغیر ورودی (جابجایی و سرعت طبقه بالای ساختمان) طراحی شده‌اند، هر کدام دارای سه تابع عضویت گوسی و متغیر خروجی (نیروی کنترل، ماتریس بازخورد برای Fuzzy-PID و ماتریس بازخورد برای Fuzzy-LQR) است که دارای پنج تابع عضویت مثلثی هستند. تعاریف متغیرهای فازی از تابع عضویت ورودی به شرح زیر است: N = منفی، Z = صفر و P = مثبت. تعاریف متغیرهای فازی از تابع عضویت خروجی به شرح زیر است: NL = منفی بزرگ، NS = منفی کوچک، ZE = صفر، PS =

= مثبت مثبت و PL = مثبت بزرگ.

همچنین، جدول ۳ قوانین سه FLC را برای متغیرهای ورودی (جابجایی و سرعت) پس از استخراج توسط OTBLO نشان می‌دهد. پایه قاعده فازی از ۹ قانون if-then (گزاره‌های شرطی فازی) تشکیل شده است. به عنوان مثال، قوانین FLC همراه با LQR به شرح زیر نشان داده شده است:

۱- اگر تابع عضویت ورودی (جابجایی) N است و تابع عضویت ورودی (سرعت) N است، تابع عضویت خروجی (نیروی کنترل) PL است.

:

۹- اگر تابع عضویت ورودی (جابجایی) P و تابع عضویت ورودی (سرعت) P است، تابع عضویت خروجی (نیروی کنترل) NL است.

### ۸- تحلیل کارایی سیستم‌های کنترل کننده

برای تأیید کارایی سیستم کنترل بهینه، پاسخ‌های سازه‌ای که از سیستم‌های کنترل بهینه مختلف مانند TMD، FLC، Fuzzy-PID و Fuzzy-LQR به دست آمده است. پنج معیار در جدول ۴ برای تخمین عملکرد سه سیستم کنترل ارائه شده است. معیارها بر اساس اوج جابجایی، شتاب حداکثر، نسبت دریافت بین طبقه‌ای، برش پایه و گشتاور پایه است که پاسخ‌های کنترل شده را با پاسخ‌های کنترل نشده مقایسه می‌شود.

جدول‌های ۵ و ۶ مقدار پنج معیار را برای سیستم‌های کنترلی مختلف را نشان می‌دهد که در معرض رکوردهای زمین لرزه جدول ۲ قرار گرفته‌اند. همچنین جدول ۷ عملکرد سیستم‌های کنترلی مورد استفاده در سازه را با در نظر گرفتن میانگین معیارهای کنترلی برای تمامی زلزله‌های وارد شده به سازه را نشان می‌دهد. مطابق جدول‌های ۵، ۶ و ۷، نتیجه پاسخ‌های کنترل شده و کنترل شده به شرح زیر است:

همه سیستم‌های کنترل شده تقریباً در کاهش جابجایی طبقه آخر یک سازه موفق هستند زیرا اولین معیار برای بیشتر زلزله‌ها با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز عددی در این جداول کمتر از یک است. جابجایی کنترل شده طبقات سازه در مقایسه با جابجایی کنترل نشده کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، FLC موفق‌ترین کنترل کننده برای کاهش جابجایی طبقه آخر نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها است. از آنجا که می‌تواند جابجایی جانبی همه زلزله‌ها را کاهش دهد، در حالی که سایر کنترلگرها نمی‌توانند اولین معیار را برای برخی از زمین لرزه‌های القایی مانند Northridge، ایستگاه Chi-Chi و Moorpark، ایستگاه TCU052 کاهش دهند. علاوه بر

جدول ۱. مشخصات دینامیکی سازه سازه ۱۱ طبقه [۱۴]

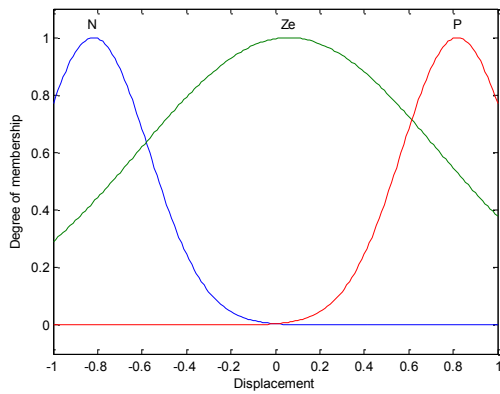
Table 1. Structural parameters and dynamic characteristics of 11-story building[14]

شماره طبقه و مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
جرم هر طبقه $10^5$ kg	2.15	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.03	2.03	2.03	1.76
سختی هر طبقه $10^8$ N/m	4.68	4.76	4.68	4.5	4.5	4.5	4.5	4.37	4.37	4.37	3.12
فرکانس طبیعی سازه (Hz)	1.05	3.08	5.01	6.78	8.42	9.95	11.34	12.61	13.64	14.39	14.92

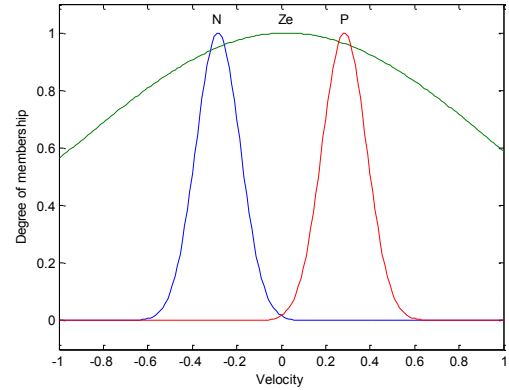
جدول ۲. داده‌های زلزله‌ای انتخابی

Table 2. Selected earthquake's data

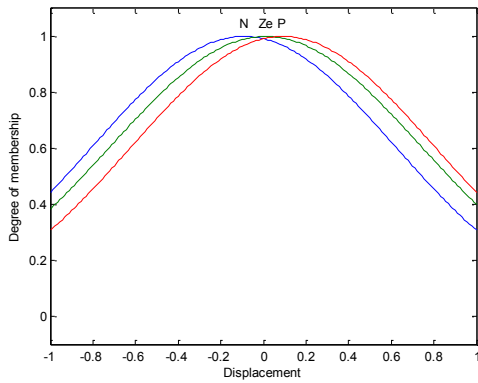
نوع	نام زلزله	ایستگاه	سال	فاصله تا گسل (km)	بزرگی زلزله	PGA(g) ( $\text{cm/s}^2$ )	مکانیزم گسل
گسل دور	Northridge	Moorpark	1994	26.4	6.69	189.3	Reverse
	Cape Mendocino	Petrolia	1992	35.1	7.01	431.1	Reverse
	Kern County	Taft	1952	36.2	7.36	152.7	Reverse
	El Centro	El Centro Array #9	1940	12.2	6.95	341.69	Strike-slip
	Chi-Chi	TCU052	1999	30.1	7.62	50.78	Reverse
	Northridge	Tarzana	1994	16.7	6.69	1744.5	Reverse
	Chi-Chi	TCU129	1999	24.8	7.62	182.1	Reverse
	Northridge	Rinaldi	1994	8.6	6.69	825.5	Reverse
	Bam	Bam	2003	1.7	6.6	778	strike slip
	Tabas	Tabas	1978	2.05	7.35	864.36	Reverse
گسل نزدیک	Northridge	Sylmar - Olive View Med	1994	8.6	6.69	840	Reverse
	Northridge	Newhall	1994	9.4	6.69	429.7	Reverse
	Imperial Valley	El Centro Array #6	1979	3.5	6.5	332.44	Strike-slip
	Imperial Valley	El Centro Array #5	1979	5.2	6.5	360.37	Strike-slip
	KOBE	KJMA	1995	1	6.9	805.45	Strike-slip



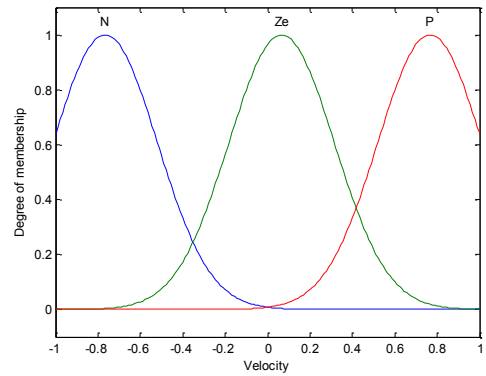
الف) توابع عضویت برای ورودی دوم (سرعت) کنترل کننده فازی  
**b) membership function of FLC for input displacement**



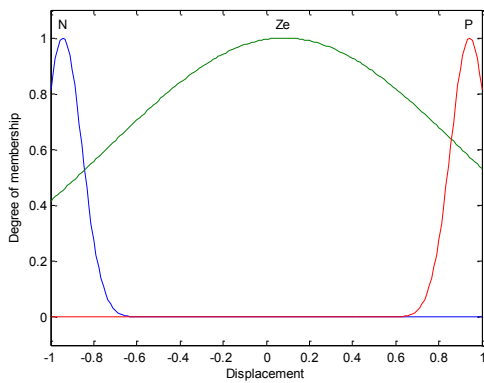
ب) توابع عضویت برای ورودی اول (جابجایی) کنترل کننده فازی  
**a) membership function of FLC for input velocity**



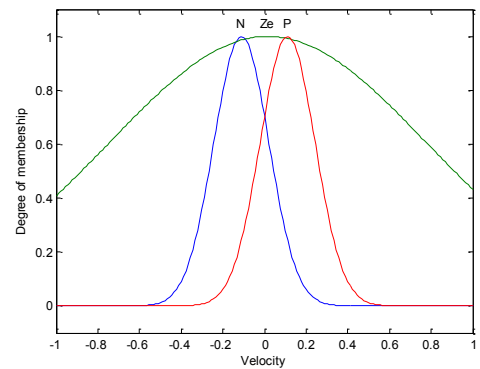
ج) توابع عضویت برای ورودی دوم (سرعت) fuzzy-PID  
**d) membership function of fuzzy-PID for input displacement**



د) توابع عضویت برای ورودی اول (جابجایی) fuzzy-PID  
**c) membership function of fuzzy-PID for input velocity**



ه) توابع عضویت برای ورودی دوم (سرعت) fuzzy-LQR  
**f) membership function of fuzzy-LQR for input displacement**



و) توابع عضویت برای ورودی اول (جابجایی) fuzzy-LQR  
**e) membership function of fuzzy-LQR for input velocity**

شکل ۴. توابع عضویت گاوسی سه کنترل کننده را برای متغیرهای ورودی

**Fig. 4. membership function of three controllers for inputs variable**

جدول ۳. قوانین کنترل کننده‌های فازی را برای متغیرهای ورودی (جابجایی و سرعت)

Table 3. demonstrates rules base of the three FLCs for the input variables

سیستم کنترلی					
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	PL	PS		ZE
	Z	PS	PL		NL
P	ZE	NL	NS		
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	PS	NS		NL
	Z	NS	ZE		PL
P	NL	PL	NS	Output number one( $\rho_1$ )	
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	PS	PS		ZE
	Z	PS	PL		PS
P	ZE	PS	NS	Output number two( $\rho_2$ )	
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	PL	NS		ZE
	Z	NS	PL		PS
P	ZE	PS	NL	Output number three( $R$ )	
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	ZE	NS		ZE
	Z	NS	NS		ZE
P	ZE	ZE	NS	Output number one( $k_p$ )	
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	ZE	PS		PL
	Z	PS	NS		PL
P	PL	PL	NL	Output number two( $k_I$ )	
Displacement	Velocity			قوانین فازی	
		N	Z		P
	N	ZE	PS		NS
	Z	PS	PL		NL
P	NS	NL	ZE	Output number three( $k_D$ )	

Fuzzy-LQR

Fuzzy-PID



جدول ۴. معیارهای عملکرد به عنوان نسبت حداکثر پاسخ‌های سیستم کنترل شده به سیستم کنترل نشده

Table 4. The performance criteria as ratio of maximum responses of controlled system to that of uncontrolled system

عنوان	رابطه	معیار
حداکثر جابجایی طبقه ۱۱	$\frac{\max  x_c(t) }{\max  x_u(t) }$	$J_1$
حداکثر شتاب طبقه ۱۱	$\frac{\max  \ddot{x}_c(t) }{\max  \ddot{x}_u(t) }$	$J_2$
حداکثر جابجایی نسبی	$\frac{\max  d_{ci}(t) / h_i }{\max  d_{ui}(t) / h_i }$	$J_3$
نیروی برشی پایه	$\frac{ v_c(t) }{ v_u(t) }$	$J_4$
گشتاور پایه	$\frac{ m_c(t) }{ m_u(t) }$	$J_5$

جدول ۵. معیارهای عملکرد برای سیستم‌های کنترل TMD و FLC در سازه که در معرض زلزله‌های مختلف است استفاده می‌شود

Table 5. The performance criteria for Type 1 control systems used in the structure which is subjected to different earth quacks

TMD					FLC					زلزله	
$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$		
<b>1.16</b>	0.96	1.11	0.97	0.92	0.88	0.98	1.03	0.91	0.87	Moorpark	Northridge
<b>0.85</b>	0.87	0.73	0.88	0.83	0.72	0.76	0.65	0.72	0.73	Petrolia	Cape Mendocino
<b>0.83</b>	0.79	0.86	0.85	0.78	0.78	0.96	0.78	0.80	0.82	El Centro Array #6	Imperial Valley
<b>0.82</b>	0.71	0.85	0.88	0.79	0.69	1.30	1	1.23	1.20	Taft	Kern County
<b>0.69</b>	0.72	0.71	0.87	0.75	0.37	0.60	0.37	0.61	0.61	El Centro Array #9	El Centro
<b>0.82</b>	0.71	0.81	0.83	0.72	0.69	0.62	0.70	0.65	0.62	Rinaldi	Northridge
<b>0.81</b>	0.91	0.58	0.98	0.95	0.73	0.82	0.52	0.81	0.82	Tarzana	Northridge
<b>0.71</b>	0.70	0.71	0.82	0.72	0.51	0.53	0.57	0.63	0.60	KJMA	KOBE
<b>0.93</b>	0.79	0.88	0.94	0.86	0.83	0.74	0.86	0.91	0.92	Bam	Bam
<b>0.84</b>	1.17	0.78	1.03	0.98	0.69	1.05	0.69	0.76	0.91	Tabas	Tabas
<b>0.99</b>	0.91	0.87	0.94	0.91	0.90	0.82	0.79	0.82	0.81	Sylmar - Olive View Med	Northridge
<b>0.87</b>	0.81	0.80	0.90	0.81	0.73	0.94	0.80	0.98	0.98	Newhall	Northridge
<b>1.18</b>	1.04	1.13	1.1	1.02	1.03	0.92	1.03	0.95	0.90	TCU052	Chi-Chi
<b>0.82</b>	0.83	1.14	0.96	0.92	0.70	1.04	0.95	0.85	0.88	TCU129	Chi-Chi
<b>0.83</b>	0.75	0.88	0.86	0.74	0.62	0.91	0.67	0.69	0.74	El Centro Array #5	Imperial Valley

جدول ۶. معیارهای عملکرد سیستم‌های کنترل Fuzzy-LQR و Fuzzy-PID مورد استفاده در سازه، که تحت زلزله‌های مختلف قرار دارد

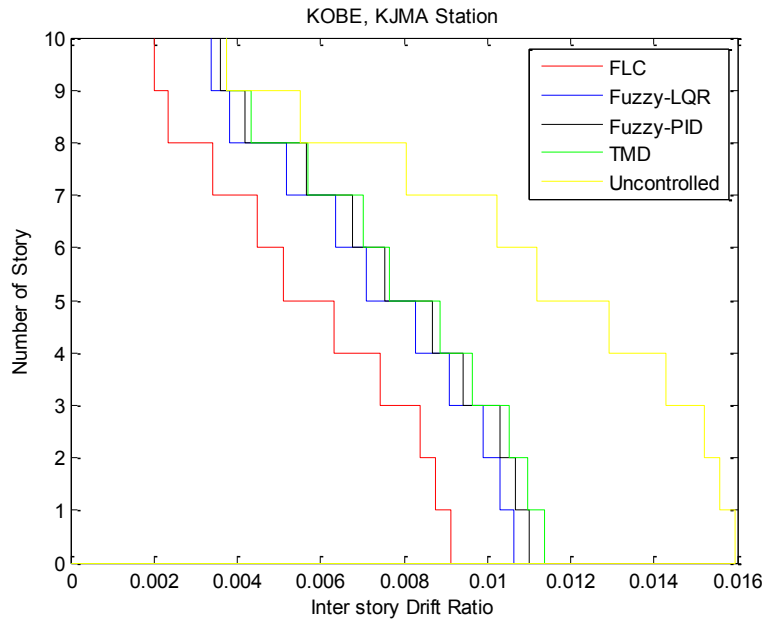
**Table 6. The performance criteria for Type 1 control systems used in the structure which is subjected to different earth quacks**

Fuzzy-PID					Fuzzy-LQR					زلزله	
$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$		
<b>1.12</b>	1.49	1.07	1.09	1.10	1.08	0.88	1.12	0.84	0.84	Moorpark	Northridge
<b>0.80</b>	0.80	0.69	0.73	0.76	0.77	0.77	0.70	0.72	0.74	Petrolia	Cape Mendocino
<b>0.81</b>	1.15	0.87	0.82	0.84	0.76	0.73	0.82	0.72	0.70	El Centro Array #6	Imperial Valley
<b>0.80</b>	1.78	0.85	1.13	1.20	0.78	0.66	0.9	0.76	0.73	Taft	Kern County
<b>0.53</b>	0.86	0.58	0.82	0.78	0.64	0.68	0.70	0.76	0.71	El Centro Array #9	El Centro
<b>0.82</b>	0.62	0.83	0.69	0.65	0.74	0.64	0.78	0.68	0.65	Rinaldi	Northridge
<b>0.75</b>	0.81	0.57	0.87	0.86	0.70	0.82	0.55	0.86	0.86	Tarzana	Northridge
<b>0.69</b>	0.65	0.68	0.67	0.65	0.65	0.65	0.70	0.68	0.66	KJMA	KOBE
<b>0.93</b>	0.76	0.93	0.82	0.81	0.85	0.71	0.94	0.81	0.79	Bam	Bam
<b>0.84</b>	1.18	0.82	0.91	0.93	0.78	1.08	0.77	0.89	0.90	Tabas	Tabas
<b>0.94</b>	0.85	0.78	0.84	0.84	0.91	0.84	0.78	0.82	0.83	Sylmar - Olive View Med	Northridge
<b>0.81</b>	0.84	0.77	0.78	0.76	0.79	0.73	0.77	0.74	0.75	Newhall	Northridge
<b>1.24</b>	0.99	1.11	0.98	0.98	1.08	0.95	1.09	0.93	0.94	TCU052	Chi-Chi
<b>1.04</b>	1.45	1.26	0.89	0.95	0.80	0.76	1.06	0.86	0.84	TCU129	Chi-Chi
<b>0.83</b>	0.80	0.88	0.72	0.69	0.77	0.68	0.87	0.73	0.70	El Centro Array #5	Imperial Valley

جدول ۷. عملکرد سیستم‌های کنترلی مورد استفاده در سازه با در نظر گرفتن میانگین معیارهای کنترلی برای تمامی زلزله‌های وارد شده به سازه

**Table 7. performance of all control systems considering average of criteria for all subject earth quacks**

$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	سیستم کنترلی
<b>14.44</b>	15.33	18.52	7.58	15.07	<b>TMD</b>
<b>21.13</b>	22.70	24.55	21.99	22.33	<b>Fuzzy-LQR</b>
<b>9.02</b>	13.20	19.89	18.23	18.88	<b>Fuzzy-PID</b>
<b>28.21</b>	20.16	28.52	21.62	20.99	<b>FLC</b>



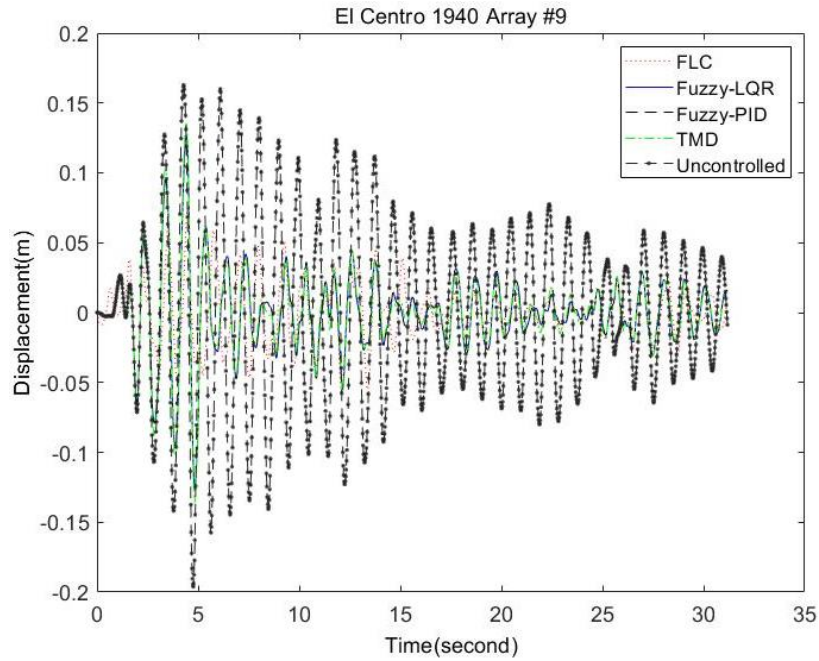
شکل ۵. جابجایی نسبی طبقات برای زلزله ایستگاه KJMA

Fig. 5. Inter story Drift Ratio for KOBE, KJMA station earthquake

این، تمام سیستم‌های کنترل شده تقریباً موفق به کاهش معیار دوم (حداکثر شتاب طبقه آخر) برای بیشتر زمین لرزه‌ها می‌باشند. اگر چه Fuzzy-LQR نمی‌تواند همه زلزله‌های القا شده را کاهش دهد، اما عملکرد آن برای کاهش معیار دوم بهترین در مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها است. بر اساس نتایج تحلیلی در جدول‌های ۵، ۶ و ۷، تمام سیستم‌های کنترلی توانایی کاهش حداکثر جابجایی نسبی کنترل شده در بین طبقات در مقایسه با حالت کنترل نشده را دارند. همچنین FLC بهترین کنترل کننده برای کاهش معیار سوم است. همچنین برای معیار چهارم، کاهش برش پایه سازه با استفاده از سیستم‌های کنترلی در مقایسه با حالت کنترل نشده برای همه زمین لرزه‌ها سیستم‌های کنترلی FLC و Fuzzy-LQR دارای بهترین عملکرد می‌باشند. بر طبق جدول ۷، سه کنترل کننده بهینه در کاهش برش پایه سازه در مقایسه با کنترل کننده غیرفعال (میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال) کمی موثرتر هستند. نتایج عددی نشان می‌دهد سیستم‌های کنترلی توانایی کاهش معیار پنجم در تمام زمین لرزه‌ها را دارند. و بر طبق جدول ۷ هر دو کنترل کننده FLC و Fuzzy-LQR بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها دارند.

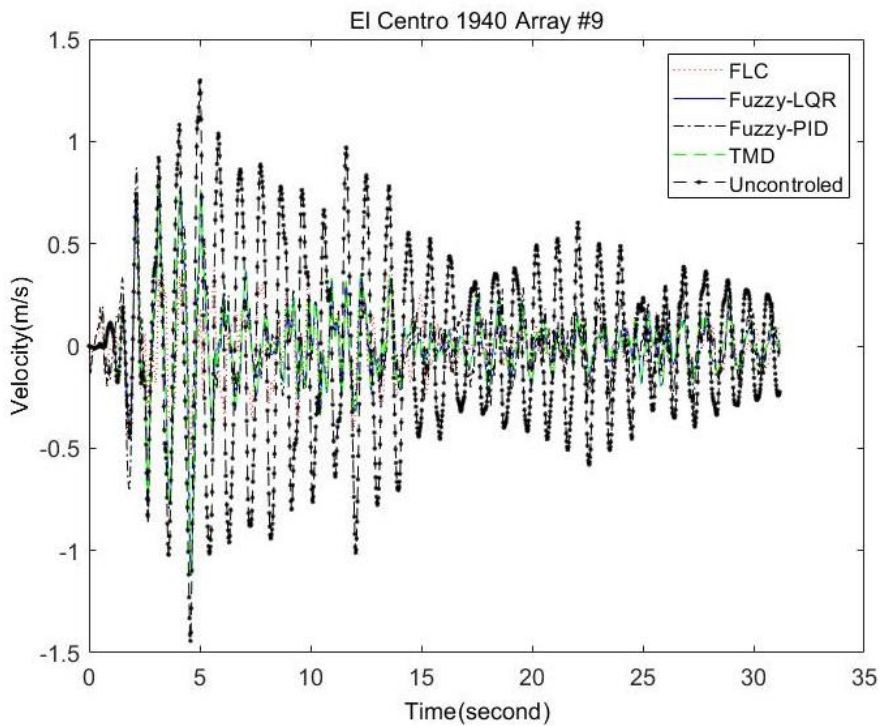
معیارهای کاهش پاسخ‌های سازه برای FLC در مقایسه با Fuzzy-LQR در همه زمین لرزه‌ها به صورت میانگین  $۸/۹۷$ ،  $-۳/۲۸$ ،  $۵/۲۶$  و  $۰/۵۴$  و  $-۱/۷۲$  درصد به ترتیب برای معیارهای برای  $J_1$ ،  $J_2$ ،  $J_3$ ،  $J_4$  و  $J_5$  و میانگین کاهش معیارهای Fuzzy-LQR در مقایسه با Fuzzy-PID  $۱۰/۹۵$ ،  $۶/۲۳$ ،  $۵/۸۱$ ،  $۳/۲۶$  و  $۴/۲۵$  برای  $J_1$ ،  $J_2$ ،  $J_3$ ،  $J_4$  و  $J_5$  است. همچنین کاهش معیارهای FLC در مقایسه با Fuzzy-PID  $۱۴/۶۴$ ،  $۸/۲۱$ ،  $۱۰/۷۶$ ،  $۴/۱۳$  و  $۲/۶۰$  برای معیارهای  $J_1$ ،  $J_2$ ،  $J_3$ ،  $J_4$  و  $J_5$  است با این حال تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که FLC نسبت به سه کنترل کننده دیگر در کاهش جابجایی، جابجایی نسبی طبقات و برش پایه سازه موفق‌تر است، محدودیت اصلی نتیجه این است که عملکرد FLC بهینه برای کاهش حداکثر شتاب و گشتاور پایه در ساختمان ۱۱ طبقه بهتر از Fuzzy-LQR نیست. لذا دو معیار کاهش حداکثر شتاب و گشتاور پایه باید بیشتر مورد بررسی قرار بگیرند.

شکل ۵ جابجایی نسبی بین طبقه‌ای ساختمان برای زلزله‌های KOBE، ایستگاه KJMA و دره امپریال، ایستگاه شماره ۵ El Centro را نشان می‌دهد. شکل‌های ۸ تا ۶ پاسخ‌های تاریخچه زمانی در زلزله شماره El Centro 1940 را نشان می‌دهند. عملکرد کلیه سیستم‌های کنترل برای کاهش پاسخ‌های سازه‌ای یک ساختمان از جمله تغییر مکان، سرعت و شتاب قابل قبول است. بر طبق اشکال ۸ تا ۶ بهترین عملکرد را کنترل کننده فازی برای کاهش پاسخ‌های سازه را در مقایسه با دیگر سیستم‌های کنترلی دارد



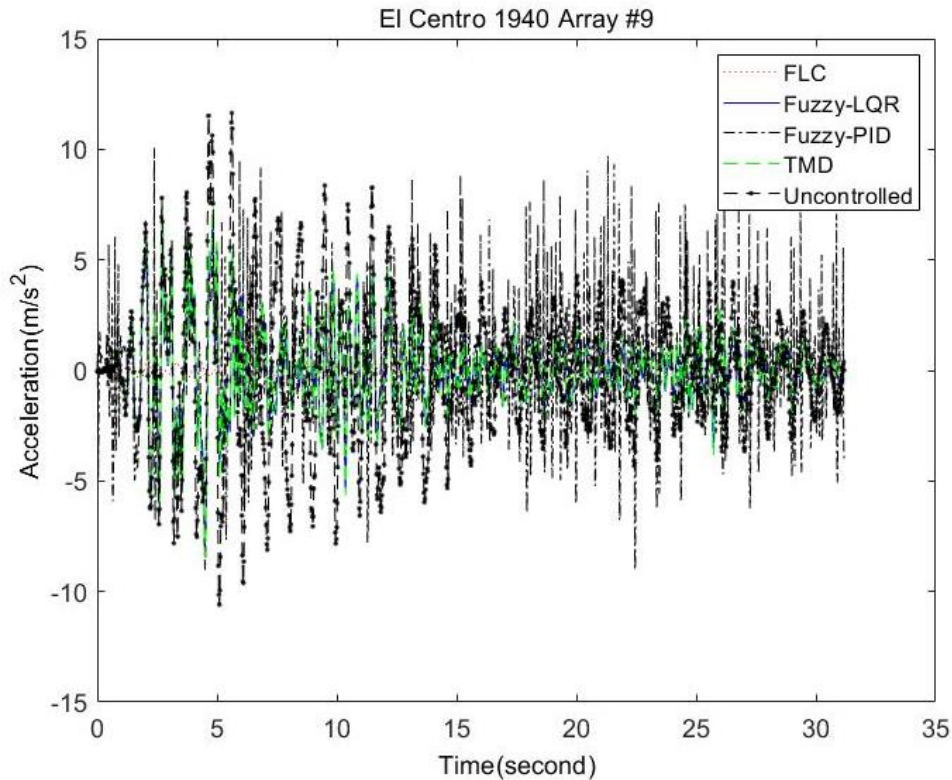
شکل ۶. جابجایی طبقه آخر سازه برای زلزله El Centro ۱۹۴۰

Fig. 6. Displacement of top story for different control systems for El Centro 1940 Array #9 earthquake



شکل ۷. سرعت طبقه آخر سازه برای زلزله El Centro ۱۹۴۰

Fig. 7. Velocity of top story for different control systems for El Centro 1940 Array #9 earthquake



شکل ۸. شتاب طبقه آخر سازه برای زلزله El Centro ۱۹۴۰

Fig. 8. Acceleration of top story for different control systems for El Centro 1940 Array #9 earthquake

به سازه ۱۱ طبقه با تمام سیستم‌های کنترلی اعمال گردیده است. با این رویکرد تا حدی زیادی از حساسیت دو روش LQR و PID نسبت به سیگنال ورودی (رکورد زلزله) کاسته شد. بدین معنی که دو سیستم ترکیبی با کنترل گر فازی توانستند پاسخ‌های سازه شامل جابجایی، سرعت، شتاب، ممان پایه، برش پایه و ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات سازه را که در معرض زلزله‌های گوناگون قرار دارند را نه تنها نسبت به حالت کنترل نشده بلکه در مقایسه با سیستم کنترلی غیرفعال TMD نیز کاهش دهند. در نهایت سیستم کنترلی فازی در مقایسه با دیگر سیستم‌ها نسبتاً عملکرد بهتری برای کاهش پاسخ‌های سازه دارد.

#### ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده فعال در یک ساختمان ۱۱ طبقه بررسی شد. برای کنترل ساختمان علاوه بر میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال از سه کنترل کننده مختلف از جمله Fuzzy Logic Con-

در حالی که کنترل‌گرهای Fuzzy-LQR و Fuzzy-PID نیز تا حد مطلوبی توانایی کاهش پاسخ سازه را در مقایسه با حالت کنترل نشده را دارند. همچنین سیستم کنترلی غیرفعال (TMD) نیز در مقایسه با حالت کنترل نشده می‌تواند تا حدی پاسخ‌های سازه اعم از جابجایی، سرعت و شتاب سازه را کاهش دهد.

نکته اصلی در بررسی‌های انجام شده این است که روش‌های LQR و PID نسبت به سیگنال ورودی بسیار حساس می‌باشند و پارامترهای تاثیرگذار آن‌ها که شامل ماتریس‌های وزنی  $R$  و  $Q$  برای الگوریتم LQR و ضرایب  $k_p, k_d, k_i$  برای روش PID برای هر سیگنال ورودی (رکورد زلزله) باید تنظیم و مقدار مناسب آن‌ها به دست آیند. برای غلبه بر آن در این بررسی، کنترل کننده فازی با دو روش مذکور ترکیب شده و برای بهینه کردن کنترل کننده فازی از ۴ رکورد زلزله استفاده شده است تا مقادیر مناسب برای پارامترهای موثر کنترل کننده فازی که شامل قوانین و توابع عضویت می‌باشند، به دست آیند و سپس چندین رکورد زلزله مختلف دیگر

- Annual Reviews in Control, 44 (2017) 129-156.
- [4] S. Elias, V. Matsagar, Wind response control of tall buildings with a tuned mass damper, *Journal of Building Engineering*, 15 (2018) 51-60.
- [5] S. Elias, V. Matsagar, Wind response control of tall buildings with flexible foundation using tuned mass dampers, in: *Wind engineering for natural hazards: modeling, simulation, and mitigation of windstorm impact on critical infrastructure*, 2018, pp. 55-78.
- [6] S. Elias, V. Matsagar, Seismic vulnerability of a non-linear building with distributed multiple tuned vibration absorbers, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(8) (2019) 1103-1118.
- [7] S. Elias, V. Matsagar, T.K. Datta, Along-wind response control of chimneys with distributed multiple tuned mass dampers, *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1) (2019) e2275.
- [8] S. Elias, V. Matsagar, T.K. Datta, Dynamic Response Control of a Wind-Excited Tall Building with Distributed Multiple Tuned Mass Dampers, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(06) (2019) 1950059.
- [9] F. Amini, N. Tourani, P. Ghaderi, Performance evaluation of phase-controlled semiactive resettable TMD (PCRTMD) with the stiffness retuning ability under strong seismic motions, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(16) (2018) e1502.
- [10] A.H. Heidari, S. Etedali, M.R. Javaheri-Tafti, A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(1) (2018) 44-57.
- [11] S. Elias, V. Matsagar, Optimum tuned mass damper for wind and earthquake response control of high-rise building, in: *Advances in structural engineering*, Springer, 2015, pp. 1475-1487.
- [12] F.Y. Cheng, *Smart structures: innovative systems for seismic response control*, CRC press, 2008.
- [13] N. Yang Jann, K. Agrawal Anil, B. Samali, J.-C. Wu, Benchmark Problem for Response Control of

troller، Fuzzy-LQR و Fuzzy-PID استفاده شد. منطق فازی با LQR و PID ترکیب شد تا ماتریس‌های بازخورد بهتری برای بهبود عملکرد آن‌ها پیدا شود. طراحی سیستم فازی بر اساس تغییر مکان و سرعت سازه انجام گردید. به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده‌ها، از الگوریتم OTBLO برای بهینه‌سازی پارامترهای FLC از جمله توابع عضویت و مجموعه قوانین فازی استفاده شد. سپس چهار مدل سازه‌ای مجهز به سه کنترل کننده و TMD بهینه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس، پنج معیار شامل اوج جابجایی، شتاب، جابجایی نسبی طبقات، برش پایه و گشتاور پایه در نظر گرفته شد. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر ذکر می‌گردد،

همه سیستم‌های کنترل از جمله کنترل کننده منطق فازی، Fuzzy-LQR و Fuzzy-PID برای کاهش جابجایی طبقات، شتاب و حداکثر جابجایی نسبی طبقات، برش پایه و ممان پایه ساختمان در مقایسه با حالت کنترل نشده تا حد قابل قبولی موثر بوده‌اند. علاوه بر این، TMD بهینه می‌تواند تمامی این موارد را کاهش دهد.

مشخص شده است که اگر چه عملکرد FLC، که بر اساس تغییر مکان طبقات بهینه شده است، برای کاهش جابجایی نسبی طبقات و برش پایه ساختار بهتر از سایر کنترل کننده‌ها است، اما تاثیر Fuzzy-LQR برای کاهش حداکثر شتاب و ممان پایه ساختمان ۱۱ طبقه بهتر از FLC می‌باشد.

نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که Fuzzy-PID در کاهش پنج معیار تعریف شده تا حد قابل قبولی موفق می‌باشد.

با استفاده از کنترل کننده مناسب برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان، می‌توان این پاسخ‌ها را حداکثر تا ۵۰ درصد نسبت به ساختمان کنترل نشده کاهش داد. همچنین میانگین کاهش پاسخ برای تمامی کنترل کننده‌ها بین ۹ تا ۲۸ درصد می‌باشد.

## منابع

- [1] T.K. Datta Control of dynamic response of structures., in: *In: Indo-US Symposium on Emerging Trends in Vibration and Noise Engineering*, 1996, pp. 18-20.
- [2] F. Amini, R. Doroudi, Control of a building complex with magneto-rheological dampers and tuned mass damper, *Structural Engineering and Mechanics*, 36(2) (2010) 181-195.
- [3] S. Elias, V. Matsagar, Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers,

- active tuned mass dampers of buildings: A simple control option, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4) (2015) 620-632.
- [24] A. Ramaswamy, S.F. ALI, Semi-active structural control using MR dampers: nonlinear control algorithms and benchmark applications, VDM Publishing, 2010.
- [25] R. Guclu, H. Yazici, Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers, *Journal of Sound and Vibration*, 318(1) (2008) 36-49.
- [26] Z. Li, S. Zuo, Y. Liu, Fuzzy sliding mode control for smart structure with ATMD, in: *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, 2014, pp. 21-25.
- [27] E. Nazarimofrad, S.M. Zahrai, Fuzzy control of asymmetric plan buildings with active tuned mass damper considering soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115 (2018) 838-852.
- [28] S.H.H. Lavasani, R. Doroudi, Meta heuristic active and semi-active control systems of high-rise building, *International Journal of Structural Engineering*, 10(3) (2020) 232-253.
- [29] S.H.H. Lavasani, H. Alizadeh, R. Doroudi, P. Homami, Vibration control of suspension bridge due to vertical ground motions, *Advances in Structural Engineering*, 23(12) (2020) 2626-2641.
- [30] N. Siddique, H. Adeli, *Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*, John Wiley & Sons, 2013.
- [31] N.R. Fisco, H. Adeli, Smart structures: Part II — Hybrid control systems and control strategies, *Scientia Iranica*, 18(3) (2011) 285-295.
- [32] W. Yu, S. Thenozhi, *Active structural control with stable fuzzy PID techniques*, Springer, 2016.
- [33] T.J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*, John Wiley & Sons, 2005.
- [34] M. Shahrouzi, M. Aghabaglou, F. Rafiee, Observer-teacher-learner-based optimization: An enhanced meta-heuristic for structural sizing design, *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 62(5) (2017) 537-550.
- Wind-Excited Tall Buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4) (2004) 437-446.
- [14] S. Pourzeynali, H.H. Lavasani, A.H. Modarayi, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, *Engineering Structures*, 29(3) (2007) 346-357.
- [15] Y.M. Kim, K.P. You, J.Y. You, S.Y. Paek, B.H. Nam, LQR Control of Along-Wind Response of a Tall Building, *Applied Mechanics and Materials*, 421 (2013) 767-771.
- [16] S.N. Deshmukh, N.K. Chandiramani, LQR Control of Wind Excited Benchmark Building Using Variable Stiffness Tuned Mass Damper, *Shock and Vibration*, 2014 (2014) 156523.
- [17] R. Guclu, A. Sertbas, Evaluation of Sliding Mode and Proportional-Integral-Derivative Controlled Structures with an Active Mass Damper, *Journal of Vibration and Control*, 11(3) (2005) 397-406.
- [18] R. Guclu, Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake, *Mathematical and Computer Modelling*, 44(1) (2006) 210-217.
- [19] N. Djedoui, A. Ounis, M. Abdeddaim, Active Vibration Control for Base-Isolated Structures Using a PID Controller against Earthquakes, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 26 (2016) 99-110.
- [20] S. Etedali, S. Tavakoli, PD/PID Controller Design for Seismic Control of High-Rise Buildings Using Multi-Objective Optimization: A Comparative Study with LQR Controller, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(03) (2016) 1750009.
- [21] M. Shahi, M.R. Sohrabi, S. Etedali, Seismic Control of High-Rise Buildings Equipped with ATMD Including Soil-Structure Interaction Effects, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(03) (2018) 1850010.
- [22] M. Arif Şen, M. Tinkir, M. Kalyoncu, Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37(1) (2018) 107-127.
- [23] D. Demetriou, N. Nikitas, K.D. Tsavdaridis, Semi

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*K. Takin, R. Doroudi, S. Doroudi, Investigation the effect of Different Types of Fuzzy Controllers in Relieving the Sensitivity to Seismic Excitation of an 11-Story Structure with an Active Mass Damper, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 2895-2914.*

**DOI:** [10.22060/mej.2019.15465.6128](https://doi.org/10.22060/mej.2019.15465.6128)

