



Ferdowsi  
University of  
Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: [civil-ferdowsi.um.ac.ir](http://civil-ferdowsi.um.ac.ir)



Iranian  
Concrete  
Institute



Pavement  
Engineering  
Association  
of Iran

## Semi-Active Control of Three-Story Benchmark Structure using a Wireless Sensor Network

Research Article

Hossein Fazaeli<sup>1</sup>, Abbas Karamodin<sup>2</sup>

DOI: [10.22067/jfcej.2023.79624.1195](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.79624.1195)

### 1. Introduction

Traditional active, semi-active, and hybrid structural control systems often use cables to communicate between sensors, controllers, and actuators. In such systems, installing wired sensors is usually very time-consuming and expensive. Moreover, it is difficult to establish such extensive cabling in large-scale civil structures. In order to reduce the financial and time costs of wire-based systems, new wireless communication technologies have been used in structures in academic and industrial research for wireless measurement and monitoring. Recently, wireless structural control has been introduced as an alternative method to wired control systems. Lower installation time and maintenance cost along with lower energy consumption make wireless control more attractive compared to classical control system.

In previous researches, the wireless control system has been studied on various structures. This study examined using a wireless sensor network and its implementation on a three-story benchmark structure, and designing controller. Moreover, fuzzy control trained by genetic algorithm was used to control the system considering time delay.

### 2. Statement of the problem

Figure 1 shows the general strategy of wireless control. In this model, together with base excitation, the sensors transmit their measured data to the controller through the network. The measured data of dampers in previous step is also sent to the controller by another wireless network. After determining the required voltage of the damper, the controller sends the data through another network to the sensors in the floors. All wireless networks transmit data with the collected noises to the source sensor.

### 3. Numerical modeling

For numerical study a three story benchmark building was selected. This structure is 36.58 m by 54.87 m in plan, and 11.89 m in elevation. The bays are 9.15 m on center, in both directions, with four bays in the north-south (N-S) direction and six bays in the east-west (E-W) direction.

The building's lateral load-resisting system is comprised of steel perimeter moment-resisting frames (MRFs) with simple framing between the two furthest south E-W frames. The interior bays of the structure contain simple framing with composite floors.

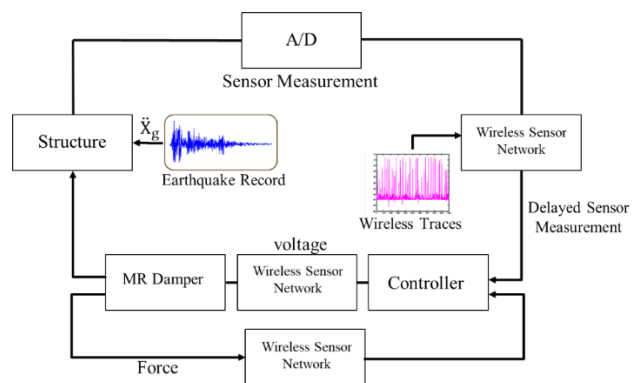


Figure 1. An overview of wireless benchmark model

The control strategy implemented is semi-active. Semi-active control has the advantages of both active and passive systems at the same time. Some prominent features such as good control, low cost, and low energy consumption make this system a high efficient one. In the control process, the control device can adjust its parameters using external energy. On the other hand, no additional energy is applied to the floors. As a result, the system is always stable.

In this structure, due to the limitation in MR damper capacity, three actuators in the first floor and two actuators in the second and third floors are installed. A phenomenological model of an MR damper, based on a Bouc-Wen element, is employed in the analysis. In order to evaluate proposed control strategies, four historical records are selected: i) El Centro; ii) Hachinohe; iii) Northridge; and iv) Kobe.

Six evaluation criteria related to the building responses were used. The first three criteria are based on peak inter-story drift ratio ( $J_1$ ), level acceleration ( $J_2$ ), and base shear

\*Manuscript received: November 19, 2022, Revised, April 30, 2022, Accepted, June 28, 2022.

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: [a-karam@um.ac.ir](mailto:a-karam@um.ac.ir)

( $J_3$ ). The next three criteria are based on normed building responses. The inter-story drift ( $J_4$ ), level acceleration ( $J_5$ ), and base shear ( $J_6$ ) are defined in their normed based forms.

The wireless network model is implemented in TOSSIM. To realistically simulate the wireless network, experimentally collected noise traces and received signal strength indication (RSSI) traces are utilized as inputs to TOSSIM. The network employs a TDMA protocol that divides time into time slots synchronized among all sensors, and each time slot can accommodate the transmission of a data package. WSN standards based on IEEE 802.15.4 radios commonly employ 10-ms time slot. The amount of time delay in the whole system is 30-ms.

### 3. Controller

The proposed controller of Fazaeli and Karamodin, which includes a linear LQG controller and an optimized fuzzy controller, was used. In the proposed system, the acceleration of the floors is selected as the input of the LQG linear controller, and then the output of the controller is the required force of the damper. The force of the LQG linear controller and the force generated by the MR damper in the previous step are the inputs of the Takagi-Sugeno fuzzy controller. The output parameters of the fuzzy model are calculated by the genetic algorithm in such a way that the desired objective function is minimized. The optimization criteria is to minimize peak inter-story drift ratio of controlled to uncontrolled structure. First, the controller is trained by genetic algorithm for 1.5 scale of El Centro earthquake by MATLAB software, and then the performance of the wireless controller is evaluated in other earthquakes with different intensities.

### 4. Conclusion

This study focused on developing a control system for the nonlinear 3-story benchmark building with wireless sensor network. The MR damper was controlled using a Fuzzy-Genetic algorithm that supplies continuously varying command voltages. In general, the use of wireless control caused a slight increase in the responses of the structure compared to the wireless mode due to longer time delay. Based on the numerical simulations, the following conclusions are drawn:

1. The results show that both wired and wireless controls have a suitable performance in reducing structural responses such as displacement and acceleration and have close performance to each other;
  2. Both types of wired and wireless control in El Centro and Hachinohe reduced the amount of relative displacement and acceleration of floors compared to the uncontrolled state;
  3. The acceleration values are close to the uncontrolled state in El Centro earthquake. However, wired control has a better performance at the first and second floors;
  4. The maximum relative displacement of the floors in the structure with wireless sensor decreased compared to the uncontrolled structure in Kobe earthquake;
  5. The performance of the wireless system was suitable in reducing the maximum acceleration of the floors in the Kobe earthquake and it was able to reduce the acceleration of the second and third floors compared to the wired control;
  6. Wireless control caused a 17% increase in first evaluation criteria ( $J_1$ ) compared to the wired mode;
  7. In the second evaluation criterion ( $J_2$ ), which shows the maximum acceleration of the floors of the controlled structure to the uncontrolled structure, the wireless control shows a 13% increase compared to the wired mode;
  8. The average maximum base shear of the controlled to uncontrolled structure ( $J_3$ ) in the wireless structure increased by 15% compared to the wired system.
-



## کنترل نیمه فعال سازه سه طبقه محک به کمک شبکه سنسورهای بی سیم\*

مقاله پژوهشی

عباس کرم الدین<sup>(۱)</sup>

سیدحسین فضائلی حسینی نژاد<sup>(۲)</sup>

DOI: 10.22067/jfpei.2023.79624.1195

**چکیده** کنترل سازه‌ها به منظور جلوگیری از آسیب جدی به سازه‌ها، به یک موضوع برجسته در مهندسی زلزله تبدیل شده است. در سیستم‌های سنتی کنترل سازه از سیم برای ارتباط بین سنسورها، محرک‌ها، کنترل‌کننده‌ها و یکپارچه‌سازی کل سیستم به عنوان یک شبکه واحد استفاده می‌شود. بهره‌جویی از سنسورهای بی‌سیم به منظور اندازه‌گیری، ارتباط و کنترل در سازه‌ها با پیشرفت تکنولوژی افزایش یافته است. از مزایای دیگر این سیستم، سهولت در پیاده‌سازی و کاهش هزینه‌های نصب می‌باشد. در این مقاله سازه سه طبقه غیرخطی محک (Benchmark) به همراه میراگر مغناطیسی (MR) که به شبکه سنسورهای بی‌سیم مجهز شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. سازه تحت تحریک زلزله در محیط شبیه‌ساز متلب ۲۰۱۸، با یک شبکه ح سگر بی‌سیم شبیه‌سازی شده توسط TOSSIM ترکیب می‌شود. برای شبیه‌سازی واقعی شبکه از نویز و سیگنال‌های بی‌سیم جمع‌آوری شده از یک سازه واقعی استفاده شده است. در این شبکه از یک پروتکل دسترسی چندگانه تقسیم زمان TDMA استفاده شده است. این پروتکل به هر سنسور زمان خاصی برای ارسال اطلاعات اختصاص می‌دهد. برای کنترل پاسخ‌های سازه محک از یک کنترل‌کننده فازی-ژنتیک استفاده شده است. سپس سازه مجهز به سنسورهای بی‌سیم و با سیم، تحت تحریک زلزله‌های مختلف مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بررسی معیارهای ارزیابی و نمودارهای تاریخچه زمانی نشان از عملکرد مناسب سیستم بی‌سیم در کاهش پاسخ‌های سازه دارد. در عین حال سیستم بی‌سیم، باعث افزایش اندک میزان میانگین جابه‌جایی و شتاب طبقات نسبت به حالت باسیم شده است.

**واژه‌های کلیدی** سازه محک، سنسورهای بی‌سیم، سازه غیرخطی، میراگر مغناطیسی، کنترل نیمه فعال.

### Semi-active control of three-story benchmark structure using a wireless sensor network

Hossein Fazaeli

Abbas Karamodin

**Abstract** Control of structures in order to prevent serious damage to structures has become a prominent issue in earthquake engineering. In traditional structural control systems, wires were used to communicate between sensors, actuators, controllers and integrate the entire system as a single network. Using of wireless sensors for measurement, communication and control in structures has increased with the advancement of technology. The use of this technology has attracted the attention of engineers due to the reduction of installation costs and flexible system. In this article, the benchmark nonlinear three-story structure with magnetorheological damper (MR) equipped by wireless sensor network is investigated. The seismically excited building is combined with a wireless sensor network simulated by TOSSIM in the MATLAB 2018 simulator environment. For real network simulation, noise and wireless signals collected from a real structure have been used. In this network, a time division multiple access protocol (TDMA) is used. This protocol assigns a specific time to each sensor to send information. The benchmark structure is trained by a fuzzy-genetic controller. Then, the structure equipped with wire and wireless sensors was evaluated under the various earthquakes. Examining the evaluation criteria and time history charts shows the proper performance of the wireless system in reducing structural responses. At the same time, the wireless system has caused a slight increase in the average displacement and acceleration of floors compared to the wired mode.

**Keywords** Benchmark structure, Wireless sensor, nonlinear building, magnetorheological damper, Semi active control.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۷ می‌باشد

(۱) دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

## مقدمه

سیستم‌های سنتی کنترل سازه فعال، نیمه فعال و ترکیبی اغلب از کابل‌ها برای ارتباط بین سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها استفاده می‌کنند. در چنین سیستم‌هایی، نصب سنسورهای سیمی معمولاً بسیار وقت‌گیر و گران است. علاوه بر این، استقرار چنین کابل‌کشی گسترده در سازه‌های عمرانی در مقیاس بزرگ کاری دشوار است [1-3]. به منظور کاهش هزینه‌های مالی و زمانی سیستم‌های مبتنی بر سیم، فناوری‌های جدید ارتباطات بی‌سیم در سازه‌ها در تحقیقات دانشگاهی و صنعتی برای سنجش و نظارت بی‌سیم استفاده شده است. در سال‌های اخیر، علم کنترل سازه بی‌سیم به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های کنترل همراه با سیم معرفی شده است. کاهش زمان نصب، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری همراه با مصرف انرژی کم، کنترل بی‌سیم را در مقایسه با سیستم کنترل کلاسیک بسیار جذاب می‌کند. تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بسیاری بر روی سازه‌های مجهز به این نوع سنسورها صورت گرفته است. Wang و همکاران یک سازه سه طبقه مجهز به میراگر MR با مقیاس ۱/۵ را مورد تحلیل عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. هر دو نتایج تجربی و عددی نشان از کارایی کنترل بی‌سیم غیرمتمرکز برای سیستم‌های کنترل سازه‌ای دارد [4]. Lynch و همکاران [5] با هدف کنترل سازه بی‌سیم به کمک تعداد زیادی از سنسور، یک سیستم بی‌سیم غیرمتمرکز را مورد بررسی قرار دادند. آنها سه سیستم کنترل غیرمتمرکز را مورد بررسی قرار دادند. سیستم کنترلی غیرمتمرکز عملکرد بهتری نسبت به دو سیستم دیگر داشت. Sun و همکاران [6] یک سازه میراگر جرم فعال را به شبکه سنسورهای بی‌سیم مجهز کردند. آنها مدلی عددی را به عنوان سازه محک معرفی کرده تا محققان با کار بر روی این سازه مرجع بتوانند الگوریتم‌های کنترلی و مسائل سنسورهای بی‌سیم را مورد تحقیق و بررسی قرار دهند. شبکه بی‌سیم مورد استفاده در این پژوهش، مدل محک Sun و همکاران می‌باشد.

وجود کابل در یک سیستم کنترل بی‌سیم تا حد ممکن به حداقل رسیده است. با این وجود چالش‌های ذاتی در ارتباط با سیستم بی‌سیم مانند تأخیر زمانی و از بین رفتن داده‌ها وجود دارد. یکی از راه‌های کاهش این اثرات استفاده از استراتژی‌های کنترل غیر متمرکز (Decentralized control) یا تقریباً غیر متمرکز (Partially decentralized control) در سیستم‌ها است. از طرف دیگر، الگوریتم‌های کنترل سازه‌ای که این اثرات را در

نظر می‌گیرند، باید در سیستم پیاده‌سازی شوند. یک الگوریتم کنترل غیر متمرکز توسط Linderman بر روی یک سازه برشی مجهز به میراگر AMD یک طبقه در مقیاس کوچک اجرا شد. تأخیر ورودی با افزودن یک تأخیر زمان گسسته در فضای حالت لحاظ شد [7]. یک کنترل‌کننده غیر متمرکز H2/LQG با تأخیر زمانی بر روی مدل پل کابلی معیار توسط فلاح و تقی‌خانی، پیشنهاد و مورد مطالعه قرار گرفت. تأخیر زمان انتقال بی‌سیم به عنوان یک مرحله تأخیر در اندازه‌گیری سیستم زمان گسسته مدل می‌شود. کنترل‌کننده غیر متمرکز با حل سه معادله غیرخطی همراه با روش مبتنی بر گرادیان محاسبه می‌شود. کنترل غیر متمرکز با تأخیر زمانی می‌تواند به طور مؤثری پاسخ لرزه‌ای پل کابل معیار را کاهش دهد [8]. محققان دانشگاه میشیگان یک شبکه حسگر بی‌سیم (WSN) را در یک سازه برشی شش طبقه با دستگاه‌های کنترل نیمه فعال مستقر کردند. در پژوهش آنها یک کنترل‌کننده LQR با استراتژی تقریباً غیر متمرکز ارائه شده است که از تخمین حالت اضافی (Redundant state estimation) به عنوان ابزاری برای به حداقل رساندن نیاز به برقراری ارتباط داده‌های بین سنسورها استفاده می‌کند. این روش با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی از یک مدل ساختمان شش طبقه تحت تحریک زلزله صحت‌سنجی شد [9]. در پژوهش‌های پیشین، سیستم کنترل بی‌سیم بر روی سازه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از یک شبکه سنسورهای بی‌سیم بر روی یک سازه محک معتبر تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله استفاده از یک شبکه سنسور بی‌سیم و پیاده‌سازی آن روی سازه محک سه طبقه و همچنین طراحی یک کنترل‌کننده فازی - ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه نتایج آن با سنسورهای باسیم انجام شده است. همچنین برای جبران تأخیر زمانی، از یک کنترل فازی آموزش داده شده توسط الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در شکل (۱) راهبرد کلی کنترل بی‌سیم به نمایش در آمده است. در این مدل پس از تحریک پایه، سنسورها اطلاعات اندازه‌گیری شده خود را توسط شبکه به کنترل‌کننده منتقل می‌کنند. اطلاعات یک گام قبل میراگر نیز توسط شبکه دیگری به کنترل‌کننده فرستاده می‌شود. کنترل‌کننده پس از تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر، اطلاعات را توسط شبکه دیگری به سنسورهای موجود در طبقات می‌فرستد. تمامی شبکه‌های بی‌سیم، اطلاعات را همراه با نویزهای جمع‌آوری شده به

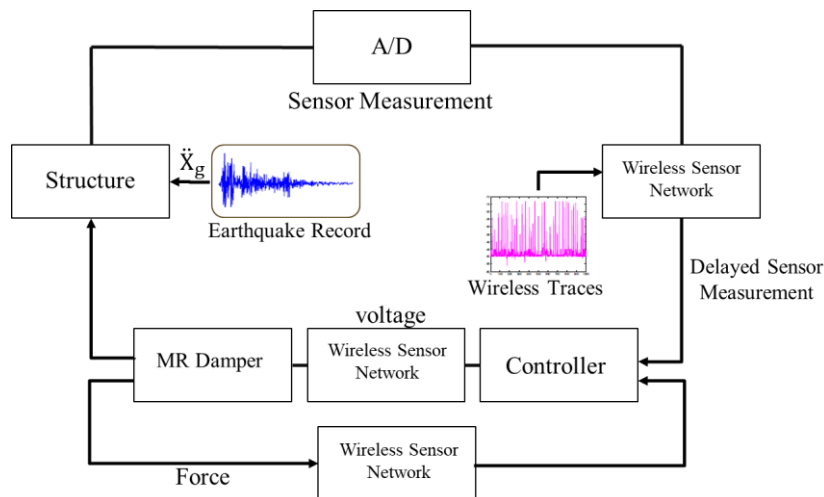
سنسور مبدأ انتقال می‌دهند.

### سازه محک

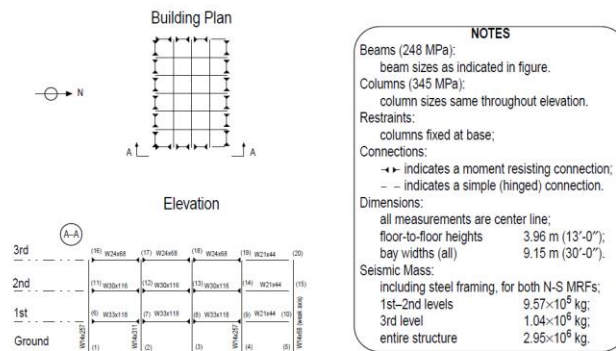
مدل مورد استفاده در این پژوهش یک سازه غیرخطی ۳ طبقه محک می‌باشد که در شکل (۲) به نمایش در آمده است. ابعاد پلان این سازه ۳۶/۵۸ متر در ۵۴/۸۷ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر و ارتفاع کلی ساختمان ۱۱/۹۶ متر می‌باشد. فاصله محور تا محور ستون‌ها ۹/۱۵ متر است. چهار دهانه در راستای شمال به جنوب و شش دهانه در راستای شرق به غرب وجود دارد. سیستم مقاوم جانبی سازه در دو جهت در قاب‌های پیرامونی از نوع خمشی و قاب‌های داخلی از نوع مفصلی می‌باشد [10].

با توجه به اینکه دو قاب پیرامونی در تحمل نیروهای زلزله نقش دارند، می‌توان با تقسیم نیروی زلزله به قسمت مساوی بین دو قاب، آن را به صورت یک قاب دویعدی مدل‌سازی و

مورد ارزیابی قرار داد. سازه دارای سه مود ارتعاشی با فرکانس‌های ۰/۹۹، ۳/۰۶ و ۵/۸۳ هرتز می‌باشد. مفصل‌های خمیری در دو انتهای عضو به صورت متمرکز مدل شده‌اند. در این سازه به دلیل محدودیت در ظرفیت میراگر MR، سه محرک در طبقه اول و دو محرک در طبقات دوم و سوم به کار گرفته شده است. در هر طبقه دو سنسور تعبیه شده که وظیفه اندازه‌گیری نیرو و شتاب طبقات را بر عهده دارند. سه کنترل‌کننده فازی در هر طبقه در نظر گرفته شده است که ورودی هر کنترل‌کننده نیروی گام قبل و نیروی تولید شده توسط کنترل‌کننده خطی در همان طبقه می‌باشد. قوانین کنترل‌کننده فازی برای سه طبقه یکسان است. سازه تحت تحریک ۴ شتاب‌نگاشت ال‌سترو، هاجینوهه، نورتریچ و کوبه قرار گرفته است.



شکل ۱ راهبرد کنترل بی‌سیم



شکل ۲ توصیف ساختمان ۳ طبقه محک برای ارزیابی در این مطالعه [10]

MR پیشنهاد شده است [11,12]. معادلات (۴-۱) معادلات حاکم بر مدل سازی این میراگر می باشند.

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۱)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (۲)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (۳)$$

$$\alpha = c_{0a} + c_{0b} u \quad (۴)$$

در این روابط  $x$  جابه جایی نسبی دو سر میراگر و  $z$  متغیر تکاملی وابسته به تاریخچه پاسخ می باشد. با استفاده از پارامترهای  $\alpha, \beta, \gamma$  می توان شیب رفتار خطی و همچنین انحنای ناحیه گذر از خطی به غیر خطی را تغییر داد. خروجی جریان مدار الکتریکی توسط رابطه (۵) تعیین می شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۵)$$

ظرفیت میراگر انتخاب شده ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و مشخصات مکانیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

### شبکه سنسورهای بی سیم

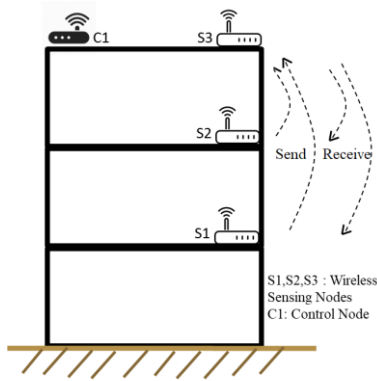
مدل سازی شبکه که شامل مسیره های نوین/سیگنال، توپولوژی بی سیم و پروتکل های شبکه می باشد، توسط شبیه ساز TOSSIM پیاده سازی شده است. برای شبیه سازی واقعی شبکه، نوزهای تجربی و شاخص قدرت مسیره های سیگنال دریافت شده (RSSI) (Redundant state estimation) به عنوان ورودی TOSSIM استفاده شده است. این مقادیر به صورت فیزیکی توسط دستگاه های خاصی اندازه گیری و به عنوان ورودی شبیه ساز استفاده شده است. این شاخص معیاری برای کیفیت سیگنالی است که می تواند از مسیریاب دریافت کند. این مسیره ها توسط دستگاه های Telosb که به رادیو TI CC2420 مجهز شده اند و طبق استاندارد IEEE 802.15.4 می باشند، در یک سازه پنج طبقه در دانشگاه واشنگتن مستقر شده اند.

در کنترل نیمه فعال با اعمال کنترل های فعال و مقاوم به طور هم زمان بر روی سازه به طور کامل از مزایای هر دو روش استفاده می شود. برخی ویژگی های بارز از جمله کنترل خوب، هزینه پایین، مصرف انرژی ناچیز و کاربرد آسان، این سیستم را به سیستمی با کارایی بالا تبدیل کرده است. با این حال، در فرایند کنترل، دستگاه کنترل می تواند به طور لحظه ای پارامترهای خود را با استفاده از انرژی خارجی تنظیم کند. در سویی دیگر انرژی مکانیکی اضافی به سیستم وارد نمی شود. در نتیجه می تواند پایداری سیستم را تضمین کند. به طور کلی، کنترل نیمه فعال به عنوان نوعی سیستم غیر فعال با قابلیت کنترل در نظر گرفته می شود. با قطع منبع انرژی این سیستم می تواند بلافاصله به سیستم کنترل غیر فعال تبدیل شود تا نقش کنترل کننده را ایفا کند. کنترل نیمه فعال در اصل نوعی کنترل کننده پارامتر است که با تغییر سختی یا میرایی سازه، ارتعاش سازه را کاهش می دهد. بنابراین این فناوری کاربردهای گسترده ای در علوم مهندسی دارد.

میراگر MR از نوع میراگرهای با قابلیت کنترل سیال هستند. مایعات مگنتورئولوژیکال (MR) از مایعات چسبناک حاوی ذرات میکرونی شده از مواد مغناطیسی تشکیل شده است. هنگامی که مایع در معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرد، ذرات، ساختارهایی ستونی ایجاد می کنند که برای شروع جریان نیاز به اعمال حداقل تنش برشی دارند. این اثر برگشت پذیر و بسیار سریع است به طوری که زمان واکنش آن در حد میلی ثانیه می باشد. برخی از مایعات در میدان الکتریکی رفتار یکسانی دارند. این مایعات، الکتورئولوژیکال (ER) نامیده می شوند. با این حال، عملکرد آنها با توجه به امکان شکست میدان الکتریکی محدود است و در حال حاضر نسبت به میراگرهای MR کاربرد کمتری دارد. از چالش های مرتبط با این میراگرها مدل سازی دقیق رفتار چرخه ای غیرخطی آنها است. یک مدل ساده مکانیکی براساس مدل بوک-ون در کنار یک میراگر ویسکوز برای مدل سازی دقیق رفتار برشی میراگر

جدول ۱ مشخصات مکانیکی میراگر مغناطیسی MR

| parameter  | Value               | parameter | Value                  | parameter | Value              |
|------------|---------------------|-----------|------------------------|-----------|--------------------|
| $\alpha_a$ | 1.0872e5 N / m      | $c_{0b}$  | 44.0 N $\frac{s}{cmV}$ | $\gamma$  | 3 cm <sup>-1</sup> |
| $\alpha_b$ | 4.9616e5 N / (cm V) | A         | 1.2                    | $\beta$   | 3 cm <sup>-1</sup> |
| $c_{0a}$   | 4.4 N s / cm        | n         | 1                      | $\eta$    | 50 n <sup>-1</sup> |

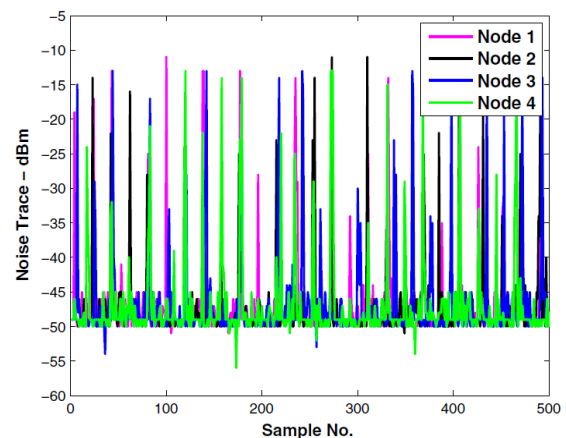


شکل ۴ نحوه ارتباط و قرارگیری سنسورها در سازه ۳ طبقه محک

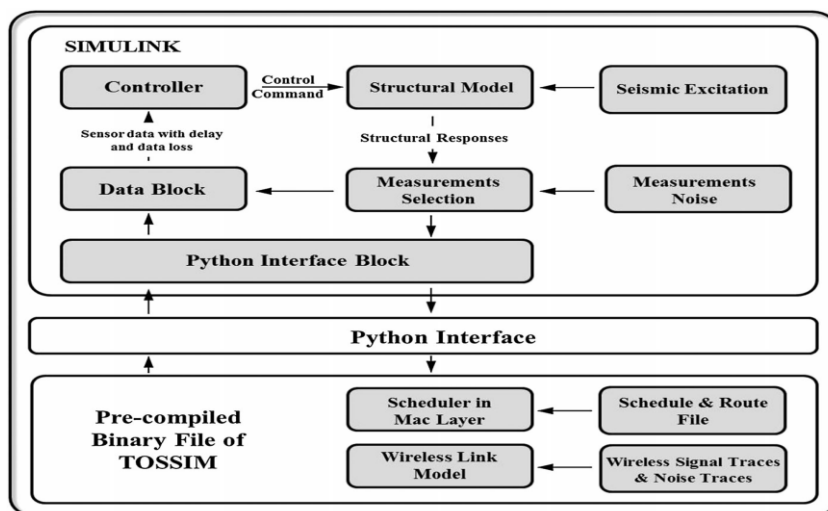
ساختار مدل محک کنترل بی سیم در شکل (۵) به نمایش در آمده است. مدل محک بی سیم در محیط متلب، شبیه سازی و اجرا می شود. انتقال داده ها از طریق شبکه بی سیم با استفاده از یک بلوک واسطه تعبیه شده برای ارتباط با پایتون انجام می شود. سپس برنامه پایتون ارتباط با TOSSIM را برقرار می کند. پس از تعیین مسیرها و برنامه انتقال که توسط ماژول مدیر شبکه تعیین شده است، TOSSIM ارتباط بی سیم نقطه به نقطه داده های سنسور را از سنسورها به ایستگاه مبنا شبیه سازی می کند و سپس تأخیر بسته را به بلوک رابط پایتون از طریق رابط پایتون باز می گرداند. اطلاعات سنسور همراه با اطلاعات تأخیر زمانی به «بلوک داده» فرستاده می شود. سپس داده های تأخیری سنسورها، به سنسور مبنا یا کنترل کننده ارسال می شود. مدت زمان تأخیر سنسورها در هر شبکه ۱۰ میلی ثانیه می باشد.

IEEE 802.15.4 CC2420 یک تراشه واقعی ۲/۴ گیگاهرتزی

است که برای اهداف با مصرف پایین و ولتاژ کم مورد استفاده قرار می گیرد. نویزهای اندازه گیری شده در شکل (۳) به نمایش در آمده است. در سازه محک سه طبقه، یک سنسور مبنا در بام، سه سنسور برای اندازه گیری شتاب طبقات و سه سنسور نیز برای اندازه گیری نیروی هر طبقه مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه استقرار و ارتباط این سنسورها با هم در شکل (۴) به نمایش در آمده است. این شبکه از پروتکل چندگانه تقسیم زمان TDMA بهره می برد که در آن زمان خاصی برای هر سنسور برای انتقال اطلاعات اختصاص می دهد. شبکه TDMA برای سیستم های کنترل، مطلوب است زیرا تأخیرهای تحت شبکه TDMA قطعی هستند. استاندارد شبکه مبتنی بر IEEE 802.15.4 معمولاً زمان ۱۰ میلی ثانیه را برای هر شیار در نظر می گیرد. میزان تأخیر زمانی در کل سیستم ۳۰ میلی ثانیه می باشد.



شکل ۳ نویزهای اندازه گیری شده سنسورها [6]



شکل ۵ ساختار مدل بی سیم [6]

## کنترل کننده LQG و فازی-ژنتیک

خروجی کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو بر دو نوع عدد ثابت و خطی می باشد. در این پژوهش به دلیل دقت بالا و عملکرد بهتر کنترل کننده از نوع خطی آن استفاده شده است. در این حالت ولتاژ خروجی ترکیبی از ورودی ها با یک عدد ثابت خواهد بود.

$$f_i = p_i a + q_i b + r_i \quad i = 1, 2, \dots, 25 \quad (6)$$

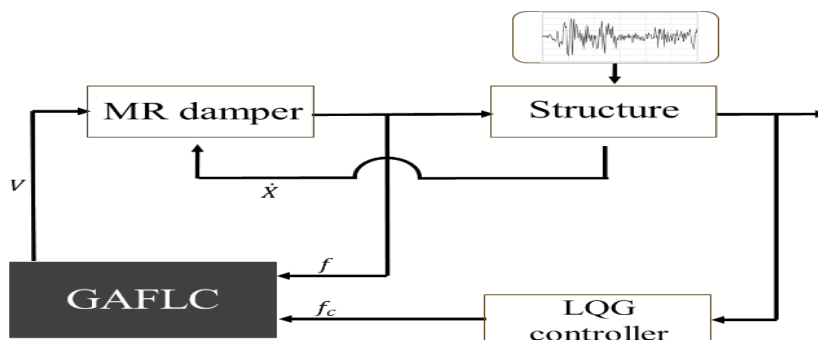
در معادله بالا مقادیر  $a$  و  $b$  مقادیر نیروی ورودی و ضرایب  $p, q$  و  $r$  ضرایب مجهول این معادلات خواهند بود. با توجه به ۲۵ حالت یاد شده در پایگاه قوانین، ۷۵ ضریب برای تعریف معادله فوق نیاز می باشد.

در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب برای تعیین این پارامترها بر مبنای بهینه سازی پاسخ سازه استفاده می شود. معیار بهینه سازی کمینه کردن بیشینه جابه جایی نسبی طبقات سازه است. در ابتدا کنترل کننده به وسیله الگوریتم ژنتیک برای ۱/۵ برابر زلزله الاسترو توسط نرم افزار متلب آموزش داده شده و سپس عملکرد کنترل کننده بی سیم در سایر زلزله ها با شدت های مختلف مورد محاسبه قرار می گیرد.

در این پژوهش از کنترل کننده ترکیبی فضائی و کرم الدین، که شامل یک کنترل کننده خطی LQG و یک کنترل کننده فازی بهینه شده می باشد، استفاده شده است [13]. هدف استفاده از کنترل کننده فازی، تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر MR و جبران خطای موجود بین نیروی کنترل کننده خطی و سازه غیرخطی و همچنین جبران تأخیر زمانی سیستم بی سیم می باشد. مطابق شکل (۶) در این سیستم پیشنهادی شتاب طبقات وارد کنترل کننده خطی LQG شده و سپس نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه به دست می آید. نیروی کنترل کننده خطی LQG و نیروی تولید شده توسط میراگر MR در گام قبل وارد کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو می شود. هر طبقه کنترل کننده فازی مربوط به خود را دارد ولی قوانین برای هر سه ساختار فازی یکسان است. پارامترهای خروجی مدل فازی توسط الگوریتم ژنتیک به گونه ای تعیین می شوند که تابع هدف مورد نظر کمینه شود. معیار بهینه سازی، کمینه کردن بیشینه نسبت تغییر مکان سازه کنترل شده به کنترل نشده است. پس از آموزش سیستم، کارایی کنترل کننده بی سیم در زلزله های مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار می گیرد. پایگاه قوانین فازی در جدول (۲) به نمایش در آمده است.

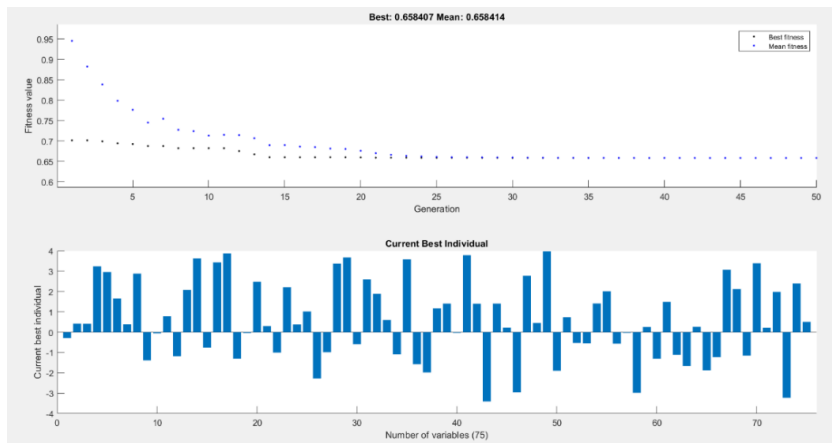
جدول ۲ پایگاه قوانین فازی

|                |    | LQG force |      |      |      |      |
|----------------|----|-----------|------|------|------|------|
|                |    | NL        | NE   | ZE   | PO   | PL   |
| Measured Force | NL | mf1       | mf2  | mf3  | mf4  | mf5  |
|                | NE | mf6       | mf7  | mf8  | mf9  | mf10 |
|                | ZE | mf11      | mf12 | mf13 | mf14 | mf15 |
|                | PO | mf16      | mf17 | mf18 | mf19 | mf20 |
|                | PL | mf21      | mf22 | mf23 | mf24 | mf25 |



شکل ۶ راهبرد کنترل فازی-ژنتیک [13]





شکل ۷ فرایند آموزش کنترل‌کننده فازی

شتاب طبقات، J3 حداکثر برش پایه، J4 حداکثر نرم جابه‌جایی نسبی طبقات، J5 حداکثر نرم شتاب طبقات و J6 حداکثر نرم برش پایه نسبت به سازه کنترل نشده هستند.

در روابط جدول،  $i$  شماره طبقات،  $d_i(t)$  جابه‌جایی نسبی طبقات،  $h_i$  ارتفاع طبقه،  $\delta^{\max}$  حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات تحت اثر زلزله‌های مختلف می‌باشد. شتاب طبقه با  $\ddot{x}_a^{\max}$ ،  $\ddot{x}_{ai}(t)$  حداکثر شتاب مطلق طبقات در حالت کنترل نشده،  $m_i$  جرم طبقه و  $F_b^{\max}$  حداکثر برش پایه زلزله در حالت کنترل نشده است. مقدار نرم از رابطه زیر حاصل می‌شود:

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

که در آن  $t_f$  مدت زمان زلزله و پس از آن می‌باشد به طوری که پاسخ سازه به صفر میل کند که این مقدار برای زلزله‌های ال‌سنترو، هاپچینوهه و نورث‌ریج ۱۰۰ ثانیه و برای زلزله کوبه ۱۸۰ ثانیه می‌باشد.

حداکثر نرم جابه‌جایی نسبی  $\| \delta^{\max} \|$ ، حداکثر نرم شتاب طبقات  $\| \ddot{x}_{ai}(t) \|$  و  $\| F_b^{\max} \|$  حداکثر نرم برش پایه در حالت کنترل نشده است.

مقایسه معیارهای ارزیابی سازه در دو حالت کنترل بی‌سیم و کنترل باسیم در جدول (۵) آورده شده است. مقدار میانگین معیار بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده (J1) در حالت باسیم و بی‌سیم به ترتیب ۰/۵۲۴ و ۰/۶۱۷ می‌باشد. در حالت کنترل بی‌سیم شاهد افزایش ۱۷

## نتایج عددی

در شکل (۷) فرایند آموزش کنترل‌کننده فازی در سازه ۳ طبقه بی‌سیم نشان داده شده است. در شکل (۹ و ۸) پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی و تاریخیچه زمانی شتاب طبقه سوم در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده به نمایش در آمده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو کنترل بی‌سیم و باسیم عملکرد مناسبی در کاهش پاسخ‌های سازه از جمله جابه‌جایی و شتاب دارند و عملکرد نزدیکی نسبت به یکدیگر دارند. به منظور مطالعه بیشتر مقادیر بیشینه جابه‌جایی نسبی و همچنین بیشینه شتاب طبقات در شکل (۱۰) به تصویر در آمده است. در دو زلزله ال‌سنترو و هاپچینوهه هر دو نوع کنترل باسیم و بی‌سیم مقدار جابه‌جایی نسبی و شتاب طبقات را نسبت به حالت کنترل نشده کاهش داده‌اند. در زلزله ال‌سنترو مقادیر شتاب به حالت کنترل نشده نزدیک شده است. در زلزله نورث‌ریج عملکرد کنترل بی‌سیم بسیار به کنترل باسیم نزدیک شده است. هر چند کنترل باسیم عملکرد بهتری در طبقات اول و دوم دارد. در زلزله کوبه نیز بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه مجهز به سنسور بی‌سیم نسبت به سازه کنترل نشده کاهش داشته است و عملکرد نزدیکی با کنترل باسیم دارد. عملکرد بیشینه شتاب طبقات در زلزله کوبه مناسب بوده و توانسته شتاب طبقات دوم و سوم را نسبت به کنترل باسیم کاهش دهد.

در این پژوهش از ۶ معیار ارزیابی (J1-J6) مطابق جدول (۳) برای بررسی رفتار کنترل‌کننده بی‌سیم و مقایسه ساده‌تر آن با حالت باسیم استفاده شده است. معیارهای سنجش پاسخ سازه شامل معیار J1 حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات، J2 حداکثر

در میانگین این معیار هستیم. سازه مجهز به سنسور بی سیم باعث افزایش چشم گیر میزان نرم تغییر مکان نسبی طبقات، نرم شتاب و نرم برش پایه شده است که نشان می دهد ارتعاش سازه در انتهای زمان زلزله نیز ادامه دار می باشد. در شکل (۱۰) نمودار میله ای مقادیر میانگین معیارهای ارزیابی به تصویر در آمده است. در جدول (۴) نیز پارامترهای توابع نتیجه کنترل کننده فازی در سازه ۳ طبقه آورده شده است.

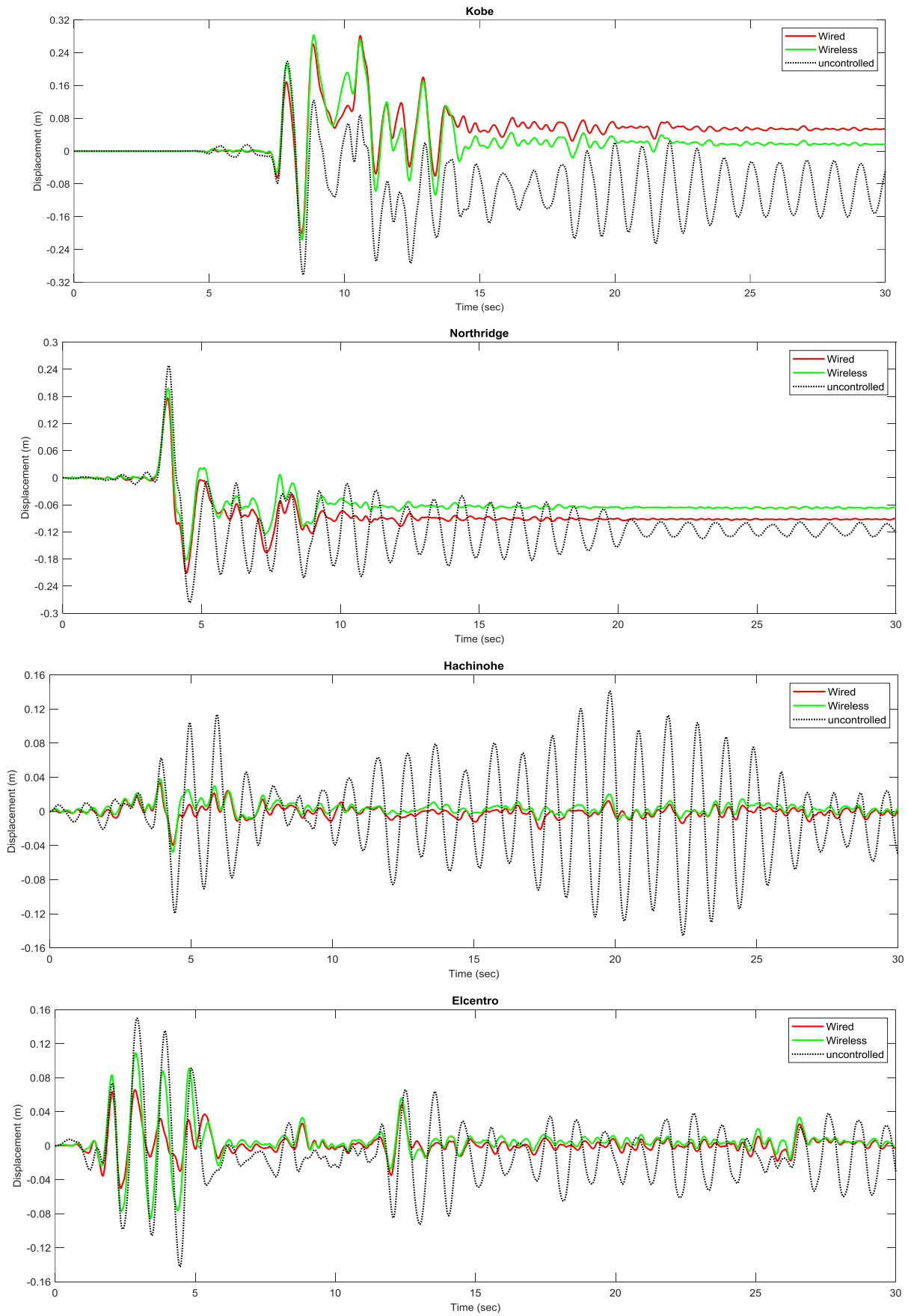
درصدی در میانگین این معیار هستیم. میانگین معیار ارزیابی  $J_2$  که نشان دهنده بیشینه شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده است، در کنترل با سیم  $0.793$  و در کنترل بی سیم  $0.896$  می باشد. مقدار افزایش در میانگین این معیار  $13$  درصد می باشد. میانگین بیشینه برش پایه سازه کنترل شده به کنترل نشده ( $J_3$ ) در سازه با سیم  $0.788$  و در سازه مجهز به سنسورهای بی سیم  $0.91$  می باشد که شاهد افزایش  $15$  درصدی

جدول ۳ معیارهای ارزیابی سازه [10]

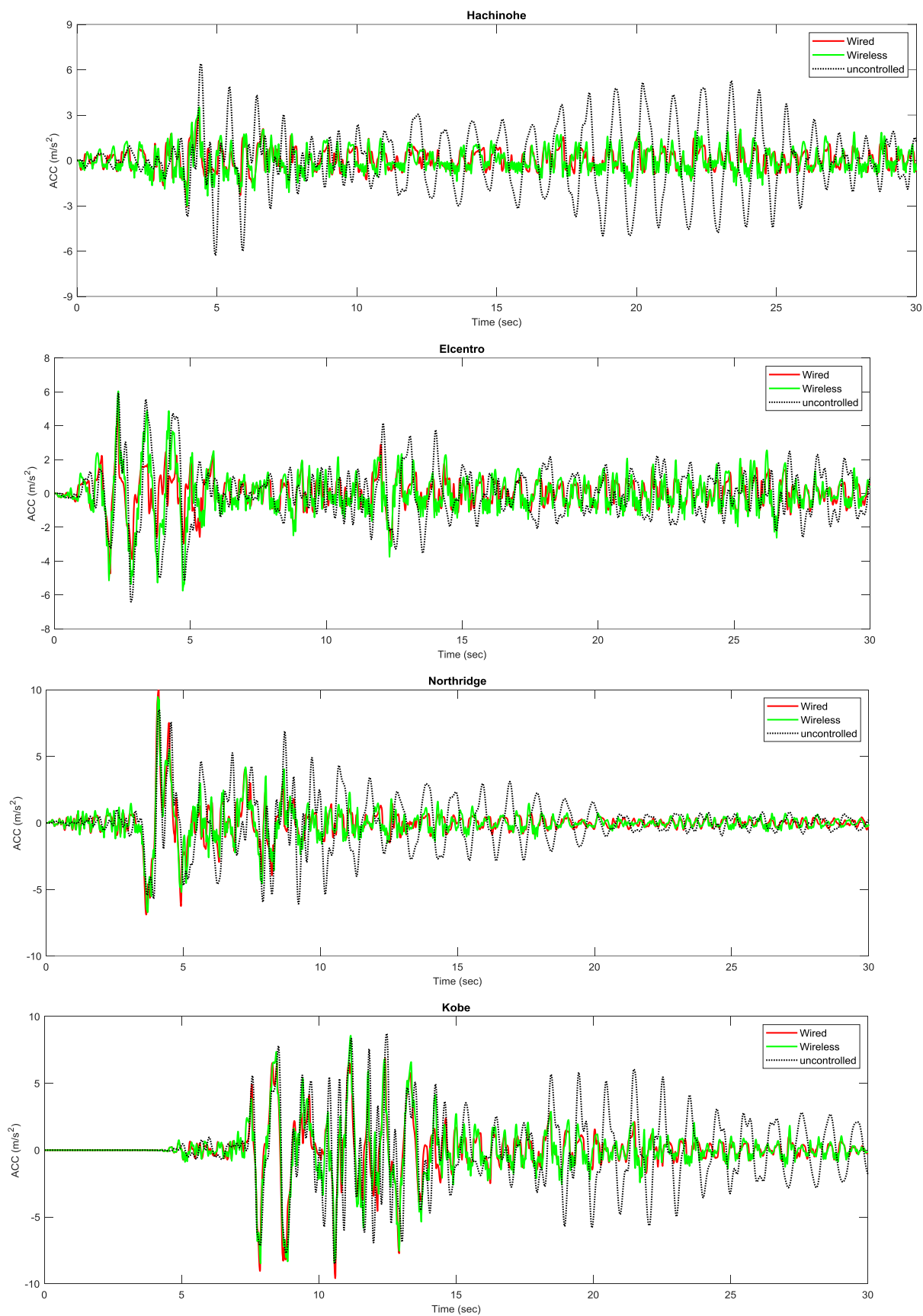
| Interstory drift ratio   | Level acceleration  | Base shear   |
|--|---|--|
| $J_1 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left  \frac{d_i(t)}{h_i} \right }{\delta^{\max}} \right\}$                    | $J_2 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left  \ddot{x}_{ai}(t) \right }{\ddot{x}_{ai}^{\max}} \right\}$                    | $J_3 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left  \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) \right }{F_b^{\max}} \right\}$                    |
| Normed interstory drift  | Normed Level acceleration   | Normed base shear  |
| $J_4 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\  \frac{d_i(t)}{h_i} \right\ }{\left\  \delta^{\max} \right\ } \right\}$ | $J_5 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\  \ddot{x}_{ai}(t) \right\ }{\left\  \ddot{x}_{ai}^{\max} \right\ } \right\}$ | $J_6 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\  \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) \right\ }{\left\  F_b^{\max} \right\ } \right\}$ |

جدول ۴ پارامترهای توابع نتیجه کنترل کننده فازی

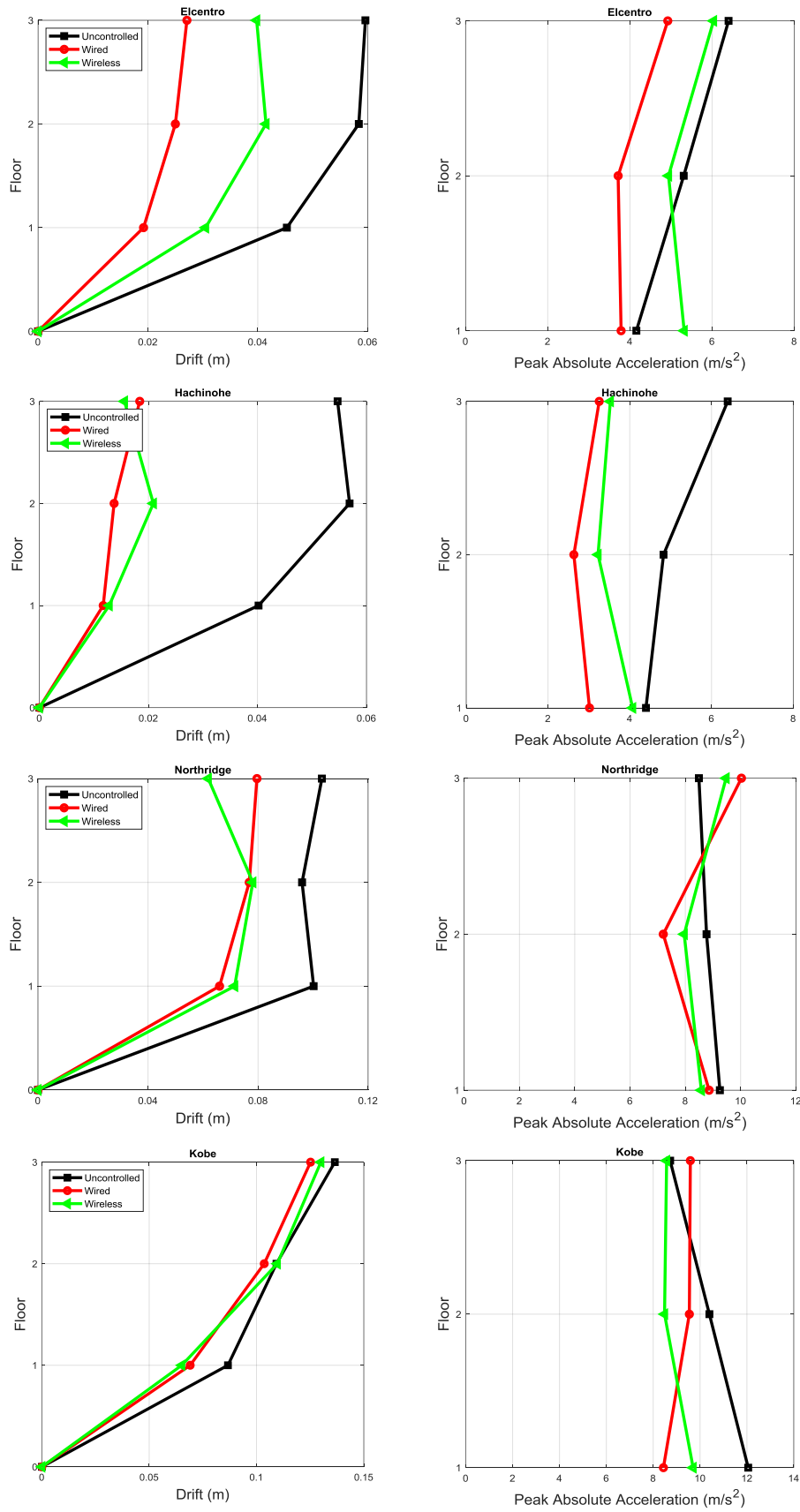
|      | $p_i$  | $q_i$  | $r_i$  |      | $p_i$  | $q_i$  | $r_i$  |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| mf1  | -0.282 | 0.421  | 0.414  | mf14 | -0.029 | 3.788  | 1.397  |
| mf2  | 3.234  | 2.959  | 1.656  | mf15 | -3.405 | 1.404  | 0.227  |
| mf3  | 0.388  | 2.880  | -1.378 | mf16 | -2.951 | 2.777  | 0.459  |
| mf4  | -0.051 | 0.790  | -1.182 | mf17 | 3.972  | -1.894 | 0.735  |
| mf5  | 2.077  | 3.627  | -0.758 | mf18 | -0.525 | -0.544 | 1.410  |
| mf6  | 3.437  | 3.875  | -1.294 | mf19 | 2.013  | -0.561 | -0.029 |
| mf7  | -0.035 | 2.480  | 0.302  | mf20 | -2.977 | 0.257  | -1.297 |
| mf8  | -1.003 | 2.211  | 0.381  | mf21 | 1.488  | -1.111 | -1.660 |
| mf9  | 1.022  | -2.272 | -0.981 | mf22 | 0.265  | -1.867 | -1.220 |
| mf10 | 3.375  | 3.673  | -0.592 | mf23 | 3.070  | 2.124  | -1.152 |
| mf11 | 2.598  | 1.887  | 0.606  | mf24 | 3.390  | 0.222  | 1.980  |
| mf12 | -1.092 | 3.578  | -1.575 | mf25 | -3.219 | 2.393  | 0.508  |
| mf13 | -1.974 | 1.171  | 1.406  |      |        |        |        |



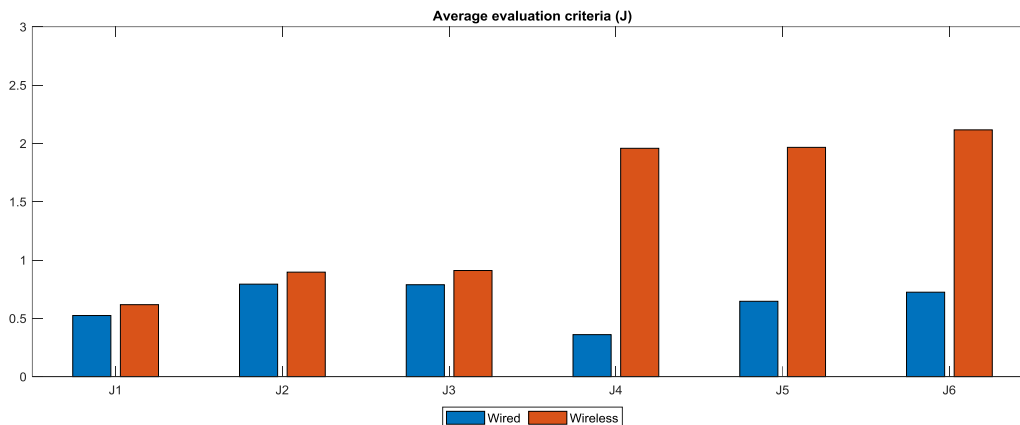
شکل ۸ تاریخچه جابه‌جایی طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۹ تاریخچه شتاب طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۱۰ بیشینه جابه‌جایی نسبی و بیشینه شتاب مطلق طبقات سازه در سه حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۱۱ نمودار میله‌ای میانگین معیارهای ارزیابی J1 تا J6 در سازه ۳ طبقه در دو حالت کنترل باسیم و بی‌سیم

جدول ۵ مقایسه معیارهای ارزیابی سازه سه طبقه در دو حالت کنترل باسیم و بی‌سیم

|    | Controller | Elcentro |       |       | Hachinohe |       |       | Northridge |       | Kobe  |       | AVG   |
|----|------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|
|    |            | 0.5      | 1     | 1.5   | 0.5       | 1     | 1.5   | 0.5        | 1     | 0.5   | 1     |       |
| J1 | Wired      | 0.313    | 0.454 | 0.641 | 0.211     | 0.319 | 0.406 | 0.435      | 0.793 | 0.799 | 0.864 | 0.524 |
|    | Wireless   | 0.343    | 0.697 | 0.660 | 0.187     | 0.364 | 0.515 | 0.578      | 0.779 | 1.149 | 0.898 | 0.617 |
| J2 | Wired      | 0.595    | 0.752 | 1.010 | 0.568     | 0.496 | 0.735 | 0.855      | 1.045 | 1.080 | 0.795 | 0.793 |
|    | Wireless   | 0.718    | 0.923 | 1.15  | 0.668     | 0.628 | 0.988 | 1.041      | 0.988 | 1.050 | 0.806 | 0.896 |
| J3 | Wired      | 0.519    | 0.799 | 0.961 | 0.397     | 0.627 | 0.801 | 0.693      | 0.982 | 1.035 | 1.064 | 0.788 |
|    | Wireless   | 0.544    | 1.028 | 1.242 | 0.511     | 0.695 | 0.976 | 0.938      | 1.042 | 1.053 | 1.072 | 0.910 |
| J4 | Wired      | 0.229    | 0.294 | 0.281 | 0.099     | 0.127 | 0.167 | 0.193      | 0.818 | 0.794 | 0.604 | 0.360 |
|    | Wireless   | 0.938    | 1.558 | 1.698 | 0.424     | 0.517 | 0.695 | 0.345      | 2.715 | 6.267 | 1.428 | 1.958 |
| J5 | Wired      | 0.549    | 0.562 | 0.574 | 0.345     | 0.333 | 0.361 | 1.187      | 1.422 | 0.498 | 0.629 | 0.646 |
|    | Wireless   | 1.910    | 2.373 | 2.314 | 1.185     | 0.157 | 1.318 | 1.933      | 2.041 | 2.557 | 2.874 | 1.966 |
| J6 | Wired      | 0.605    | 0.615 | 0.615 | 0.375     | 0.365 | 0.398 | 1.408      | 1.606 | 0.543 | 0.706 | 0.724 |
|    | Wireless   | 2.114    | 2.492 | 2.377 | 1.256     | 1.236 | 1.407 | 2.19       | 2.266 | 2.693 | 3.131 | 2.116 |

### نتیجه‌گیری

سیستم کنترل بی‌سیم پیشنهاد شده در این مقاله، به خوبی توانسته است پاسخ‌های سازه را کنترل کند. به طور کلی استفاده از کنترل بی‌سیم به دلیل تأخیر زمانی بیشتر باعث افزایش اندک پاسخ‌های سازه نسبت به حالت باسیم شده است. برای ارزیابی بهتر از ۶ معیار ارزیابی بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه شتاب و بیشینه برش پایه و نرم آنها بهره‌جویی شده است. کنترل بی‌سیم باعث افزایش ۱۷ درصدی در مقدار میانگین معیار

این مطالعه پتانسیل استفاده از ارتباطات بی‌سیم را برای کنترل سازه‌های محک بررسی می‌کند. بر اساس مدل محاسباتی بی‌سیم در سازه، هر دو روش کنترل بی‌سیم و کنترل باسیم برای کنترل یک سازه فولادی ۳ طبقه با میراگر MR در هر طبقه تحت تحریک زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

بی سیم برش پایه را نیز نسبت به مدل باسیم، کمتر کاهش داده است. کنترل بی سیم میزان بیشینه برش پایه را در سازه ۳ طبقه نسبت به حالت کنترل نشده، ۱۲ درصد کمتر کاهش داده است. کنترل بی سیم باعث افزایش چند برابری میزان نرم تغییر مکان نسبی طبقات، نرم بیشینه شتاب طبقات و نرم بیشینه برش پایه نسبت به مدل کنترل باسیم شده است.

### سیاسگزاری

بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده (J1) نسبت به حالت باسیم شده است. در معیار ارزیابی J2 که نشان دهنده بیشینه شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده است، کنترل بی سیم ۱۳ درصد را نسبت به حالت باسیم به ثبت رسانده است. میانگین بیشینه برش پایه سازه کنترل شده به کنترل نشده (J3) در سازه بی سیم نسبت به سیستم باسیم نیز ۱۵ درصد افزایش یافته است. کنترل بی سیم، میانگین بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات و میانگین بیشینه شتاب طبقات در سازه را نسبت به سازه کنترل نشده به ترتیب، ۹ و ۱۰ درصد کمتر کاهش داده است. کنترل

### مراجع

1. C.-H. Loh et al., "Experimental verification of a wireless sensing and control system for structural control using MR dampers," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, no. 10, pp. 1303-1328, 2007.
2. C. R. Farrar, G. Park, D. W. Allen, and M. D. Todd, "Sensor network paradigms for structural health monitoring," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 13, no. 1, pp. 210-225, 2006.
3. J. P. Lynch and K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," *Shock and vibration digest*, vol. 38, no. 2, pp. 91-130, 2006.
4. Y. Wang, R. A. Swartz, J. P. Lynch, K. H. Law, K.-C. Lu, and C.-H. Loh, "Application of Decentralized Wireless Sensing and Control in Civil Structures," in *US-Taiwan Workshop on Smart Structural Technology for Seismic Hazard Mitigation*, Taipei, Taiwan, 2006.
5. J. P. Lynch and K. H. Law, "Decentralized control techniques for large-scale civil structural systems," in *Proc. of the 20th Int. Modal Analysis Conference (IMAC XX)*, pp. 406-413, February 4, 2002.
6. Z. Sun, B. Li, S. J. Dyke, C. Lu, and L. Linderman, "Benchmark problem in active structural control with wireless sensor network," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, no. 1, pp. 20-34, 2016.
7. L. E. Linderman, *Smart wireless control of civil structures*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
8. A. Y. Fallah and T. Taghikhany, "Time-delayed decentralized H2/LQG controller for cable-stayed bridge under seismic loading," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 20, no. 3, pp. 354-372, 2013.
9. R. A. Swartz and J. P. Lynch, "Strategic network utilization in a wireless structural control system for seismically excited structures," *Journal of structural engineering*, vol. 135, no. 5, pp. 597-608, 2009.
10. Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, and S. Dyke, "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings," *Journal of engineering mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 366-385, 2004.

11. S. J. Dyke, F. Yi, S. Frech, and J. D. Carlson, "Application of Magnetorheological Dampers to Seismically Excited Structures, 361," in *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, vol. 3727, p. 410, March 1999.
12. B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, and J. Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.
13. H. Fazaeli Hosseini Nejad and A. Karamodin, "Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 107-123, 2022 .(in Persian)