

Research Paper

Evaluation of Type-2 Fuzzy Semi-Active Tuned Mass Damper Control of the Golden Gate Suspension Bridge under Near-Field Seismic Vibrations

Mohammad Taghi Khani¹, Mir Hamid Hosseini^{2*}, Hossein Hosseini Lavasani³, Pasha Javadi²

1- Ph.D. Candidate in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran



Citation: Hosseini, M.H., Hosseini Lavasani, S.H., Javadi Pasha, P., and Khani, M.T. (2026), "Evaluation of Type-2 Fuzzy Semi-Active Tuned Mass Damper Control of the Golden Gate Suspension Bridge under Near-Field Seismic Vibrations", *Journal of Steel and Structures*, 20(52), pp.57-70. (In Persian)

doi 10.22034/jss.2026.587110.1045

Article info:

Article History:

Received: 26 November 2025

Revised: 16 March 2026

Accepted: 28 March 2026

Published: 22 June 2026

Keywords:

Tuned Mass Damper
Fuzzy Logic
Fuzzy Control
Suspension Bridge
Golden Gate Bridge

ABSTRACT

Background: One innovative approach is the use of fuzzy control. With its robust logic, adaptability, and intelligence, fuzzy control offers promising prospects for application in the field of structural vibration control.

Methods: This study investigates Type-1 and Type-2 fuzzy algorithms for controlling the vibrations of the Golden Gate suspension bridge using a tuned mass damper (TMD). The bridge is modeled in 3D using ABAQUS software. A fuzzy logic algorithm implemented in MATLAB is utilized to adjust the damping, and the damper is modeled for active control within the MATLAB Simulink environment. To optimize performance for both active and passive control modes, the TMD's damping and frequency parameters (for the passive mode) and frequency parameter (for the active mode) are optimized across various mass ratios using a numerical search method; subsequently, the optimal mass ratio is selected for conducting analyses and comparing the control systems. To this end, a passive control system using a Tuned Mass Damper (TMD) was modeled in ABAQUS software. Following the finite element modeling of the Golden Gate suspension bridge, the implementation of fuzzy logic, and the optimization of TMD parameters, time-history analyses were conducted using seven near-field ground motion records.

Results: 3D modeling of the Golden Gate Bridge, incorporating a tuned mass damper at the mid-span, demonstrated that across all seismic records, the displacement of the bridge equipped with the damper was lower than that of the bridge without it. Furthermore, the seismic response under earthquake excitation differed between fuzzy control strategies A and B, indicating that the fuzzy control function is input-dependent.

Conclusion: The results demonstrate the high effectiveness of the Type-2 fuzzy control system (System B) in controlling seismic displacements. Based on displacement response control, System B (Type-2) outperformed System A (Type-1) by approximately 15 percent. Furthermore, seismic displacements and residual displacements of the Golden Gate Bridge under Type-2 fuzzy control (System B) were about fifty percent lower than those observed without any control system.

* Corresponding Author's E-mail: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir



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

Introduction

A suspension bridge is a type of flexible structural system; the suspended deck acts much like a natural isolation system, helping to reduce the transmission of seismic forces. However, these bridges face significant challenges regarding span length and the substantial displacements at girder ends during sudden earthquakes; such movements can easily lead to collisions between adjacent girders, potentially causing structural damage or even collapse. Consequently, appropriate control measures must be implemented. One innovative approach is the use of fuzzy control. With its robust logic, adaptability, and intelligence, fuzzy control offers promising prospects for application in the field of structural vibration control. In the design and modeling of suspension bridges, controlling structural vibrations under realistic earthquake conditions—specifically considering the simultaneous effects of horizontal and vertical seismic components—is of paramount importance. Furthermore, the concept of employing a semi-active tuned mass damper for structural control holds particular significance and forms the basis of the present study.

Methods

In this study, a numerical example is employed to evaluate the effectiveness of the proposed control method. The Golden Gate Bridge in San Francisco, USA, is analyzed, and a Type-2 fuzzy logic controller is utilized to generate control forces for a mass damper system. Two mass dampers are designed for the mid-span of the bridge, as displacement reaches its maximum at this location. The structure is subjected to excitation from seven near-field earthquakes. To formulate the dynamic equations of motion for the bridge-accounting for vertical and horizontal seismic accelerations applied as support excitations-finite element modeling using ABAQUS software is employed, and the

structure's stiffness and mass matrices are derived based on energy principles.

Results

This study investigates the seismic vibration control of suspension bridges using a semi-active tuned mass damper—controlled by Type-1 and Type-2 fuzzy logic systems—subjected to near-fault seismic records (using the Golden Gate Bridge as a case study); the results are presented below. As the function range in fuzzy control increases, the control current changes, and the bridge displacement response decreases with the increase in control current; however, if the control current range within the membership function is excessively large, it amplifies the structural acceleration response, thereby inducing a resonance phenomenon. 2- When comparing the two types of fuzzy control—Type A and Type B—the phenomenon of resonance must also be considered; however, the Type B fuzzy control demonstrated superior performance in reducing displacement, outperforming Type A by approximately 15 percent. Under the influence of seismic waves, the seismic response associated with fuzzy control strategies A and B is not identical, indicating that the fuzzy control function is input-dependent. The seismic displacement of the Golden Gate Bridge equipped with a mass damper was lower than that of the bridge without a mass damper across all near-field seismic records. 3D modeling of the Golden Gate Bridge structure in Abaqus software and the application of three-component near-fault seismic records have demonstrated the actual performance of the semi-active tuned mass damper within the bridge.

Conclusion

The results demonstrate the high effectiveness of the Type-2 fuzzy control system (System B) in controlling seismic displacements. Based on displacement response control, System B (Type-2)

outperformed System A (Type-1) by approximately 15 percent. Furthermore, seismic displacements and residual displacements of the Golden Gate Bridge under Type-2 fuzzy control (System B) were about 50 percent lower than those observed without any control system.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the writing, editing, or preparation of this manuscript. All parts of this paper, including conceptualization, data analysis, drafting of the text, and scientific revisions, were performed exclusively by the authors. The authors take full responsibility for the content and accuracy of the information presented herein.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

The author confirms sole responsibility for the conceptualization, structural modeling, data analysis, and the preparation of the entire manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. There is no conflict of interest associated with the publication of this manuscript.

Acknowledgments

The author received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. No specific grants from any funding agency in the public, commercial, or not sectors were provided for this research.

ارزیابی کنترل نیمه فعال میراگر جرمی تنظیم‌شونده فازی نوع دوم پل معلق گلدن گیت تحت ارتعاش‌های لرزه‌ای حوزه نزدیک

محمدتقی خانی^۱، میرحمید حسینی^{۲*}، حسین حسینی لواسانی^۳، پاشا جوادی^۴

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران، دانشکده عمران معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران



Citation: Hosseini, M.H., Hosseini Lavasani, S.H., Javadi Pasha, P., and Khani, M.T. (2026), "Evaluation of Type-2 Fuzzy Semi-Active Tuned Mass Damper Control of the Golden Gate Suspension Bridge under Near-Field Seismic Vibrations", *Journal of Steel and Structures*, 20(52), pp.57-70. (In Persian)

doi [10.22034/jss.2026.587110.1045](https://doi.org/10.22034/jss.2026.587110.1045)

چکیده

زمینه پژوهش: یکی از روش‌های نوین بهره‌برداری پل‌های کابلی در حین زلزله و پس از آن، استفاده از کنترل فازی است.

روش پژوهش: در این پژوهش الگوریتم فازی نوع ۱ و ۲ برای کنترل ارتعاشات سازه پل معلق گلدن گیت به وسیله میراگر جرمی تنظیمی مورد بررسی قرار گرفته است. پل به صورت سه بعدی در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. برای تغییر میرایی از الگوریتم منطق فازی موجود در نرم افزار MATLAB بهره گرفته و میراگر مورد نظر در حالت کنترل فعال و غیرفعال، پارامترهای میرایی و فرکانس میراگر جرمی تنظیمی در حالت غیرفعال و پارامتر فرکانس در حالت فعال با استفاده از روش جست و جوی عددی، برای درصدهای جرمی مختلف بهینه سازی شده و درصد جرمی بهینه به منظور انجام تحلیل‌ها و مقایسه سیستم‌های کنترل انتخاب شده است. به همین منظور سیستم کنترل غیرفعال میراگر جرمی تنظیم‌شونده در نرم افزار ABAQUS مدل شده و پس از مدل سازی اجزای محدود سازه پل معلق گلدن گیت و پیاده سازی منطق فازی و تنظیم پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده، تحلیل‌های تاریخیچه زمانی تحت هفت رکورد حوزه نزدیک صورت گرفته است.

یافته‌ها: مدل سازی سه بعدی پل گلدن گیت به همراه میراگر جرمی در وسط دهانه پل نشان داد که در تمامی رکوردهای لرزه‌ای میزان تغییر مکان پل مجهز به میراگر جرمی کم‌تر از پل فاقد آن بوده است. همچنین تحت تأثیر امواج زلزله، اثر لرزه‌ای استراتژی‌های کنترل فازی A و B یکسان نیست؛ که نشان می‌دهد تابع کنترل فازی به ورودی وابسته است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشانگر کارایی بالای سیستم کنترل فازی نوع ۲ یا B در کنترل تغییر مکان‌های لرزه‌ای بوده است. بر اساس کنترل پاسخ تغییر مکان کنترل فازی نوع ۲، حدود ۱۵ درصد بهتر از کنترل فازی نوع ۱ یا A بوده است. تغییر مکان‌های لرزه‌ای و جابه‌جایی ماندگار پل گلدن گیت با کنترل فازی نوع ۲ در حدود ۵۰ درصد کم‌تر از تغییر مکان‌های لرزه‌ای پل مذکور بدون هر گونه کنترل است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۵ آذر ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۵ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۸ فروردین ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ تیر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم‌شونده، منطق فازی، کنترل فازی، پل معلق، پل گلدن گیت

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

پل معلق نوعی سیستم سازه ای انعطاف پذیر است و سیستم معلق عرشه پل، مشابه یک سیستم جداساز طبیعی برای کاهش انتقال نیروی زلزله استفاده می شود. با این حال، محدودیت طولی پل های کابلی با دهانه و جابه جایی ایجاد شده توسط انتهای تیرها در هنگام وقوع زلزله ناگهانی، نسبتاً زیاد است که باعث می شود برخورد به تیرهای مجاور به راحتی رخ دهد و در نتیجه سازه پل آسیب ببیند یا حتی فرو بریزد. بنابراین، باید اقدامات کنترلی مناسبی اجرا شود. یکی از روش های نوین، استفاده از کنترل فازی است. کنترل فازی، با منطق قوی، سازگاری و هوشمندی خود، چشم اندازهای کاربردی زیادی در زمینه کنترل ارتعاش سازه دارد. در طراحی و مدل سازی پل های معلق موضوع کنترل ارتعاشات سازه پل در شرایط واقعی زلزله و اثر هم زمان مؤلفه های افقی و قائم زلزله بسیار حائز اهمیت است؛ از سوی دیگر، ایده استفاده از میراگر جرمی تنظیمی نیمه فعال و کنترل سازه پل اهمیت ویژه ای دارد که مبنای پژوهش حاضر است.

۲- پیشینه تحقیق

در سال های اخیر، محققان داخلی و خارجی مطالعات مربوطه را بر اساس کنترل نیمه فعال فازی انجام داده اند. که از جمله جدیدترین این پژوهش ها می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

سلطانی و همکاران به ارائه روش تحلیل خستگی برای پل های معلق با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از هوش مصنوعی پرداختند که نشانگر دقت هوش مصنوعی در این نوع تحلیل های پیچیده است [۱].

لواسانی و همکاران روش کنترل لرزه ای سازه های بلندمرتبه با ترکیب فازی و مدل بهینه میراگر جرمی و میراگر مغناطیسی را ارائه نمودند که نتایج، بیانگر مؤثرتر بودن میراگر جرمی نسبت به میراگر مغناطیسی در کنترل لرزه ای سازه ها است [۲].

لواسانی و همکاران به بهینه سازی مدل میراگر جرمی نیمه فعال برای بهبود کنترل ارتعاشات پایه های سکوها های نفتی و فراساحلی با بهینه سازی چندهدفه پرداختند که نتایج نشان می دهد میراگر جرمی نیمه ارتعاشات پایه های سکوها های نفتی و فراساحلی را به میزان مناسبی کاهش داده است [۳].

لواسانی و همکاران در پژوهشی دیگر، کنترل لرزه ای سیستم برج و شمع را برای پل های معلق با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه تحت رکوردهای لرزه ای حوزه نزدیک گسل انجام

دادند؛ نتایج نشان می دهد در نظرگیری اثرات اندرکنشی خاک و سازه منجر به افزایش میرایی شده است [۴].

موسوی و همکاران در پژوهشی، کنترل غیرخطی سازه های فراساحلی با استفاده از میراگرهای جرمی نیمه فعال تحت اثرات ترکیبی موج و باد را بررسی نمودند که نتایج نشانگر رفتار مناسب میراگرهای جرمی نیمه فعال برای کنترل ارتعاشات حتی در برابر امواج دریا است [۵].

افشار و همکاران در پژوهشی، به مطالعه و توسعه ویژگی های انتخاب و تخمین پاسخ پل های معلق تحت اثرات ناشی از باد با استفاده از زبان برنامه نویسی و یادگیری سیستم پرداختند [۶].

لواسانی و همکاران به توسعه مدل آسیب پل هایی با دهانه طویل بر اساس روش یادگیری ماشین پرداختند [۷].

علیزاده و همکاران کنترل ارتعاشات پل های معلق با استفاده از میراگر جرمی تنظیمی بهینه سازی شده را مورد بررسی قرار دادند؛ که نتایج نشان دهنده اثر مثبت میراگرهای جرمی تنظیمی بهینه سازی شده در کنترل ارتعاشات پل معلق است [۸].

لواسانی و همکاران مدل کنترل غیرفعالی را برای پایه پل های معلق با دهانه بزرگ بر مبنای کاهش ارتعاشات پل با استفاده از میراگر جرمی تنظیمی ارائه دادند که نتایج نشان می دهد میراگر جرمی تنظیمی اثری مؤثر در کاهش ارتعاشات پل های معلق با دهانه بزرگ دارد [۹].

موسوی و همکاران در پژوهشی، به توسعه روشی برای کاهش ارتعاشات سازه های فراساحلی تحت اثر توأم امواج و نیروی باد با استفاده از مدل بهینه میراگر جرمی تنظیمی پرداختند [۱۰].

لواسانی و همکاران به توسعه مدل کنترل پل های معلق خرابی با استفاده از میراگر جرمی تنظیمی بر اساس بهینه سازی موقعیت میراگر جرمی پرداختند که نشان می دهد موقعیت قرارگیری میراگر جرمی در وسط دهانه، یک حالت بسیار بهینه است [۱۱].

لواسانی و همکاران به توسعه کنترل فازی توسعه یافته ای برای میراگرهای جرمی تنظیمی فعال تحت انواع پالس های رکوردهای لرزه ای پرداختند [۱۲].

لواسانی و همکاران به توسعه روشی بر اساس بهینه سازی در حوزه زمان میراگرهای جرمی تنظیمی برای کاهش ارتعاشات پل های معلق پرداختند [۱۳].

لواسانی و همکاران در پژوهشی دیگر، به مطالعه و توسعه کنترل ارتعاشات پل های معلق تحت مؤلفه های قائم رکوردهای

حرکت دینامیکی سیستم است. با توجه به محاسبه انرژی پتانسیل کل هر المان، ماتریس سختی هر المان به دست می آید که با سرهم نمودن (Assembly) تمام ماتریس ها، ماتریس سختی کل پل به دست خواهد آمد و در نهایت معادله دینامیکی پل در مقابل زلزله به صورت زیر نوشته می شود [۶].

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (۱)$$

که $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، ماتریس میرایی و ماتریس سختی پل معلق هستند. ماتریس میرایی $[C]$ نیز متناسب با ماتریس های جرم و سختی سازه پل در نظر گرفته می شود که با استفاده از رابطه رابلی به صورت زیر نوشته می شود [۷]:

$$[C] = a_0[M] + b_0[K] \quad (۲)$$

$$a_0 = \xi_i \times \frac{2\omega_i \times \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (۳)$$

$$b_0 = \xi_j \times \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (۴)$$

که (a_0) و (b_0) به ترتیب ضریب تناسب جرم و سختی، (ω_i) و (ω_j) به ترتیب فرکانس مدهای نام و نام پل، و (ξ_i) و (ξ_j) به ترتیب درصد میرایی سازه ای این دو مود هستند. در این پژوهش، برای کاهش تغییر مکان قائم پل های معلق در مقابل حرکت های ناشی از شتاب قائم زلزله، از سیستم کنترل نیمه فعال میراگر جرمی استفاده شده است. این سیستم در ساده ترین حالت شامل یک جرم، فنر و میراگر به همراه یک سیستم اعمال نیروی فعال به جرم است که معمولاً در درجات آزادی وسط دهانه ها نصب می شود. با افزودن هریک از این سیستم های الحاقی به عرشه پل، در واقع یک درجه آزادی به پل اضافه می شود. در این حالت می توان معادله حرکت سیستم را به صورت زیر نوشت:

$$[M_{TB}]\{\ddot{u}\} + [C_{TB}]\{\dot{u}\} + [K_{TB}]\{u\} = -[M_{TB}]\{\ddot{u}_g(t)\} + \{D\}F \quad (۵)$$

که (F) نیروی فعال وارد به جرم TMD، $\{D\}$ بردار موقعیت است که محل تأثیر نیروی فعال F را نشان می دهد و مقدار آن در درجات آزادی محل اثر F در بازه محدوده فازی [۰ و ۱] است؛ تفاوت فازی نوع ۱ و نوع ۲ در اینجا است که مقدار بازه محدوده فازی [۰ و ۱] مربوط به فازی نوع ۲ و در محل اثر F ، یک و سایر

لرزه ای پرداختند که نتایج نشان می دهد مؤلفه های قائم اثر تخریبی شدیدتری بر روی پل های معلق نسبت به مؤلفه های افقی زلزله دارند [۱۴].

تاکین^۱ و همکاران در پژوهشی به مطالعه کنترل سازه با بهینه سازی مکان میراگرهای نیمه فعال جرمی و کنترل فازی پرداختند [۱۵].

در مطالعات و تحقیقات گذشته در رابطه با مدل سازی سه بعدی دقیق پل معلق تحت اثر توأم رکوردهای لرزه ای حوزه نزدیک به گسل، پژوهشی انجام نشده است؛ لذا در این پژوهش پل معلق گلدن گیت^۲ مجهز به میراگر جرمی تنظیمی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS با دقت بالایی مدل سازی و تحلیل شده است که با محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB در کنترل سازه پل به صورت توأم در ارتباط بوده که در نوع خود کم نظیر است.

۳- بررسی معادلات دینامیکی

در این پژوهش، برای بررسی مؤثر بودن روش کنترلی پیشنهادی، از یک مثال عددی استفاده شده است؛ یک پل معلق در سانفرانسیسکو آمریکا به نام گلدن گیت مورد ارزیابی قرار گرفته است و از یک کنترل کننده منطق فازی نوع ۲، برای تولید نیروی کنترل در میراگر جرمی استفاده شده است. در وسط دهانه پل، دو میراگر جرمی طراحی شده است؛ زیرا در وسط پل جابه جایی عرضی به حداکثر می رسد. سازه مذکور تحت اثر تحریک هفت زلزله حوزه نزدیک قرار گرفته است. برای نوشتن معادلات حرکت دینامیکی پل معلق گلدن گیت در سانفرانسیسکو آمریکا تحت اثر شتاب قائم و افقی زلزله که به صورت تحریکات تکیه گاهی به اجزای پل وارد می شود، از روش مدل سازی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده و بر اساس اصل انرژی، ماتریس های سختی و جرم سازه پل حاصل شده است. همه عرشه پل به صورت تیرهای دوسر مفصل ساده در نظر گرفته شده است که توسط تعدادی آویز معلق^۳ به کابل اصلی آویزان شده است و در محل برج ها که در واقع تکیه گاه های میانی هستند به صورت مفصلی تکیه داده می شوند. هر المان شامل دو گره و هر گره شامل دو درجه آزادی تغییر مکان قائم و تغییر مکان خمشی است؛ لذا ماتریس های جرم و سختی به صورت کوپله است. ماتریس جرم پل به صورت ماتریس جرم متمرکز در نظر گرفته خواهد شد، که در نهایت ماتریس جرم به صورت یک ماتریس $n \times n$ تبدیل می شود، که (n) تعداد درجات آزادی قائم آزاد پل در

¹ Takin

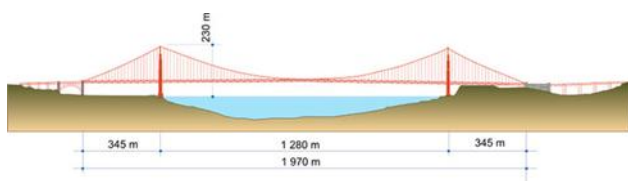
² Golden Gate

³ Hangers

در ادامه مشخصات پل کابلی گلدن گیت طبق جدول (۲) مدل سازی و تحلیل شده است.

جدول ۲- مشخصات پل گلدن گیت

طول کلی (m)	طول دهانه پل (m)	فاصله ستون پل تا تکیه گاه (m)	ارتفاع ستون پل (m)
۱۹۷۰	۱۲۸۰	۳۴۵	۲۳۰



شکل ۱- سازه واقعی پل گلدن گیت



شکل ۲- مدل سازی پل گلدن گیت در نرم افزار ABAQUS بر اساس ابعاد واقعی پل

پل گلدن گیت، به صورت سه بعدی مدل سازی شده که در شکل (۲) نشان داده شده است. یکی از چالش های مدل سازی در پل، قسمت سرهم بندی یا اسمبلی در نرم افزار است که با دقت بالایی و در طی چندین ماه این مدل سازی انجام شده است و اندرکنش ها نیز جزء سایر چالش های مدل سازی بوده اند که در نهایت با قید تماسی Tie قسمت هایی که به یکدیگر اتصال داشته اند مدل سازی شده تا زمان تحلیل کاهش قابل ملاحظه ای یابد.

۴- صحت سنجی پل گلدن گیت در نرم افزار

به منظور صحت سنجی از مقاله آستانه اصل در خصوص پل گلدن گیت استفاده شده است [۱۶]. همان طور که در جدول (۳) دیده می شود تفاوت اندکی بین خروجی مودهای ارتعاشی و مدل سازی انجام شده توسط مرجع [۱۶] با این پژوهش وجود دارد؛ به دلیل همین اختلاف کم صحت مدل سازی در نرم افزار ABAQUS مورد تایید است.

درجات آزادی را صفر در نظر می گیرند (فازی نوع ۱)؛ $[M_{TB}]$ ، $[K_{TB}]$ و $[C_{TB}]$ به ترتیب ماتریس های جرم، سختی و میرایی مربوط به کل سیستم مرکب حاصل است که شامل خود سازه و سیستم میراگر جرمی است. همه ماتریس های مربعی به ابعاد $(n+m) \times (n+m)$ هستند که (n) تعداد درجات آزادی سازه و (m) تعداد میراگر جرمی است. برای حل معادلات مرتبه دوم (۱) و (۵) به منظور تعیین پاسخ های سازه در حالت کنترل شده و تعیین سیستم تک و چند درجه آزادی با رفتار دوطرفه الاستیک تحت ارتعاشات آزاد و رفتار الاستوپلاستیک کامل و سخت شونده تحت بار زلزله های حوزه نزدیک به گسل، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است و پاسخ های به دست آمده برای ولتاژ ورودی در میراگر جرمی تنظیم شونده به وسیله روش فازی نوع ۲، با حلگر ماتریسی و توابع عضویت تعریف شده در حالت های کنترل شده و کنترل نشده، تعریف و محاسبه شده است. مدل سازی رفتار غیرخطی و هیستریزس سازه پل معلق با در نظر گرفتن هفت رکورد لرزه ای حوزه نزدیک در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS به صورت سه بعدی مدل سازی شده است. در شکل (۱) سازه واقعی و ابعاد پل گلدن گیت دیده می شود. برای وارد نمودن رفتار تنش- کرنش در ABAQUS، باید از داده های مربوط به تست کشش استفاده کرد که توسط تست کشش مقادیر تنش و کرنش مهندسی به دست می آیند؛ در حالی که در ABAQUS باید مقادیر تنش و کرنش حقیقی در مازول خصوصیات مصالح وارد شود. برای تبدیل تنش- کرنش مهندسی به تنش- کرنش حقیقی از روابط زیر استفاده می شود:

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (6)$$

$$\sigma = S(1 + e) \quad (7)$$

با استفاده از روابط بالا تنش و کرنش مهندسی به تنش و کرنش حقیقی تبدیل شده و به نرم افزار ABAQUS معرفی شده است. در جدول (۱) خصوصیات غیرخطی فولاد پل گلدن گیت ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات غیرخطی فولاد پل گلدن گیت

Material	فولاد آلیاژی
Modulus of Elasticity E	2×10^5 (MPa)
Poisson's Ratio	0.3
Tensile Strength	520 (MPa)
Yield Strength	360 (MPa)

معادلات حرکت پل ساده سازی شده است؛ به همین علت مودهای ارتعاشی اندکی نسبت به مدل سازی های نرم افزاری در نرم افزار ABAQUS مقاله آستانه اصل و مدل سازی در نرم افزار ABAQUS پژوهش حاضر بیش تر است.

جدول ۵- مقایسه مودهای ارتعاشی پل گلدن گیت و صحت سنجی

مدل سازی	مقاله	گزارش شماره UBC/EERC 93	گزارش شماره
نرم افزاری مقاله	آستانه اصل	دانشگاه برکلی	۲۰/۵۶
حاضر در	(s) [۱۶]	در خصوص تحلیل	۱۲/۶۳
نرم افزار	ABAQUS (s)	طیف پاسخ پل	۱۲/۶۱
		گلدن گیت (s) [۱۷]	۱۱/۷۶
۱۶/۹	۱۷/۵		۸/۹
۹/۱	۹/۵		۷/۴
۸/۹	۹/۴		
۸/۳	۸/۷		
۷/۴	۷/۶		

با توجه به آن که در پژوهش های موجود تنها مودهای ارتعاشی تحلیل شده است؛ لذا برای صحت سنجی، این امر انجام گرفته است و اگر مدل های غیرخطی در مقالات وجود داشت، باید صحت سنجی بر آن مبنا انجام می گرفت که متأسفانه در تحقیقات مرجع، مدل سازی غیرخطی و تحلیل غیرخطی انجام نشده است.

۵- مدل سازی اجزای محدود پل گلدن گیت در نرم افزار ABAQUS

مدل سازی سه بعدی پل گلدن گیت با المان سالیید سه بعدی مطابق شکل (۳) صورت گرفته است.



شکل ۳- مدل سازی پل گلدن گیت در نرم افزار ABAQUS و اختصاص مصالح فولادی به آن

جدول ۳- صحت سنجی مودهای ارتعاشی در نرم افزار ABAQUS

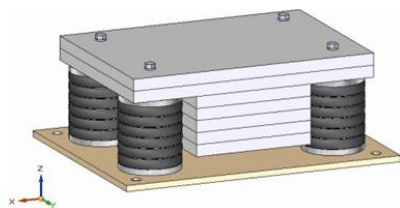
صحت سنجی	مرجع [۱۶]	مدل سازی در
مود ارتعاشی	نرم افزار ABAQUS	
مود اول ارتعاشی	ثانیه ۱۷/۵	ثانیه ۱۶/۹
مود دوم ارتعاشی	ثانیه ۹/۵	ثانیه ۹/۱
مود سوم ارتعاشی	ثانیه ۸/۹	ثانیه ۸/۳
مود چهارم ارتعاشی	ثانیه ۷/۴	ثانیه ۷/۴

جدول ۴- مشخصات مودهای ارتعاشی گزارش شماره

UBC/EERC 93 دانشگاه برکلی [۱۷]

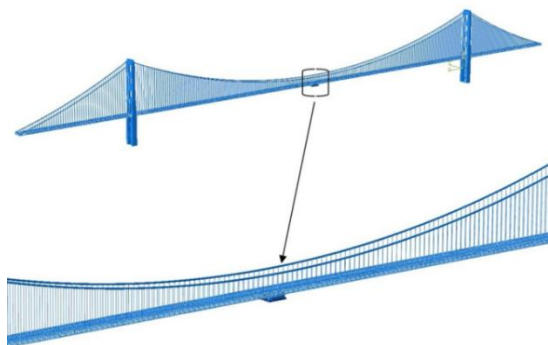
Mode	T (sec)	f (Hz)	ζ
1	20.563	0.0486	0.02
2	12.639	0.0791	0.0161
3	12.619	0.0792	0.016
4	11.763	0.0850	0.0158
5	8.942	0.1118	0.0156

که در جدول (۴)، (T) بیانگر مود ارتعاشی سازه بر حسب ثانیه و (f) بیانگر فرکانس سازه بر حسب هرتز و (ζ) نیز بدون واحد است. لازم به ذکر است برای دقت و کنترل مضاعف در صحت سنجی، از گزارش شماره 93 UBC/EERC دانشگاه برکلی در خصوص تحلیل طیف پاسخ پل گلدن گیت نیز که به روش حل معادلات ریاضی پل را تحلیل کرده، استفاده شده است [۱۷].



شکل ۶- میراگر جرمی مدل سازی شده در نرم افزار ABAQUS

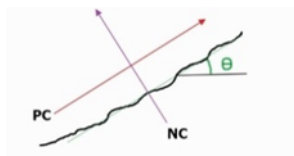
در شکل (۷) محل قرارگیری میراگر جرمی در پل گلدن گیت نشان داده شده است.



شکل ۷- محل قرارگیری میراگر جرمی

۶- هم پایه سازی رکورد لرزه ای حوزه نزدیک

در این روش از دستورالعمل ASCE 41-23 استفاده شده است ابتدا مؤلفه های نرمال (NC) و موازی (PC) زلزله تعیین می شوند و اثر زاویه گسلش یعنی θ در شتاب نگاشت ها طبق رابطه های (۸) و (۹) اعمال می شود [۱۸]. در شکل (۸) مشخصات نحوه هم پایه سازی رکوردهای لرزه ای حوزه نزدیک گسل ارائه شده است.



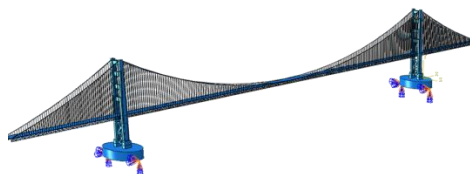
شکل ۸- هم پایه سازی رکوردهای لرزه ای حوزه نزدیک

$$X = PC \cdot \cos\theta - NC \cdot \sin\theta \quad (8)$$

$$Y = PC \cdot \sin\theta + NC \cdot \cos\theta \quad (9)$$

سپس طیف پاسخ به دست آمده با طیف 1/5AB هم پایه سازی و ضریب مقیاس هر زلزله تعیین می شود. بر اساس مطالب ذکر شده و به منظور انجام تحلیل دینامیکی برای مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی معادل قاب های مورد نظر، از ۱۴ زمین لرزه (هفت زوج) پرقدرت استفاده شده است؛ این

در شکل (۴) شرایط تکیه گاهی گیردار به دو انتهای ستون ها اختصاص پیدا کرده است.

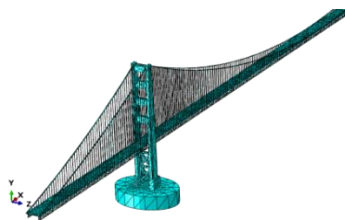


شکل ۴- اعمال شرایط تکیه گاهی و بارگذاری

چون المان مدل سازی از نوع Solid و سه بعدی بوده، لذا مش بندی از نوع سه بعدی انتخاب شده است. برای به دست آوردن مش بندی بهینه، باید یک بار ثابت ۱ به قسمتی از سازه وارد شود و به ترتیب با افزایش تعداد مش ها، میزان تغییرات تنش ها بررسی شود. اگر میزان تغییرات خیلی کم باشد می توان مش بندی بهینه را تعیین نمود. در شکل (۵) مش بندی بهینه پل گلدن گیت ارائه شده است. نوع مش بندی، یکی از موضوعات مهم در دقت خروجی ها است؛ لذا در این مدل سازی از دو نوع المان مش بندی طبق جدول (۶) استفاده شده و مش بندی از نوع بهینه است. برای مدل سازی کابل ها و آویزها از المان Wire استفاده شده است. برای اعمال نیروی پیش تنیدگی در کابل ها در ماژول Load نرم افزار ABAQUS از قسمت Predefined Field نیروهای پیش تنیدگی لحاظ شده است.

جدول ۶- نوع المان مش بندی

نوع المان مدل سازی	روش مش بندی
المان ۱۰ گرهی	C3D10
المان ۸ گرهی	C3D8R
مدل سازی کابل ها	T3D2

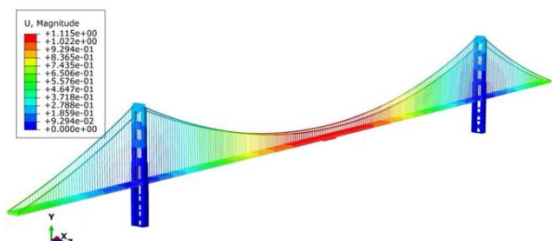


شکل ۵- المان بندی پل گلدن گیت در نرم افزار ABAQUS

در شکل (۶) میراگر جرمی ۲۵ تنی مدل سازی شده در نرم افزار ABAQUS مشاهده می شود که در میانه دهانه پل گلدن گیت قرار گرفته است.

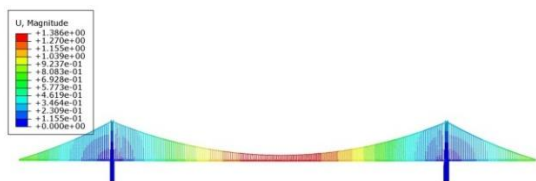
۷- خروجی رکوردهای لرزه‌ای

پس از اعمال رکورد لرزه‌ای، خروجی حاصل از نرم‌افزار ABAQUS به دست خواهد آمد. در شکل (۱۰) خروجی تغییر مکان لرزه‌ای در وسط دهانه پل مشاهده می‌شود که واحد آن به متر است. لازم به ذکر است میراگر جرمی در کاهش تغییر مکان لرزه‌ای نقش مؤثری به میزان متوسط ۱۵ درصد داشته است.

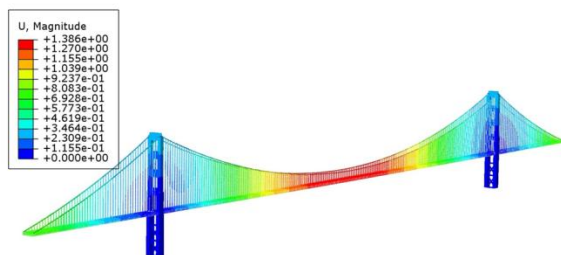


شکل ۱۰- خروجی تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت با میراگر جرمی در مرکز پل از نمای سه بعدی

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) خروجی تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت بدون میراگر جرمی مشاهده می‌شود. که این میزان تغییر مکان بیش‌تر از حالتی است که پل فاقد میراگر جرمی است.



شکل ۱۱- خروجی تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت بدون میراگر جرمی از نمای دو بعدی



شکل ۱۲- خروجی تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت بدون میراگر جرمی از نمای سه بعدی

۸- فاز یک (A) و فاز دو (B)

با استفاده از پاسخ جابه‌جایی پل کابلی اصلی و مقدار مطلق شتاب لرزه‌ای به عنوان متغیرهای ورودی و جریان به عنوان متغیر

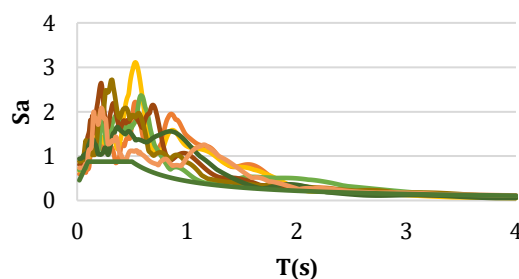
زمین‌لرزه‌ها از پایگاه اطلاعاتی PEER استخراج شده‌اند [۱۹]. مبنای انتخاب این زمین‌لرزه‌ها، جدید بودن زمان وقوع آن‌ها (زلزله‌های اخیر)، پر قدرت بودن آن‌ها، نزدیک بودن محل ثبت نسبت به گسل و مشابه بودن نوع ساخت‌گاه آن‌ها بوده است. خلاصه اطلاعات مربوط به این زمین‌لرزه‌ها در جدول (۷) مشخص شده است.

جدول ۷- رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک مورد استفاده در

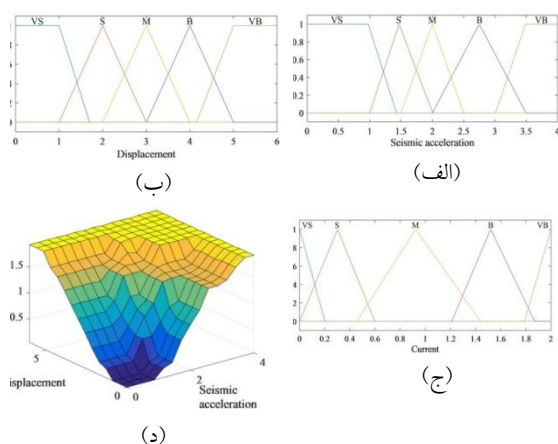
تحلیل‌های غیرخطی

ضرایب هم‌پایه‌سازی	سال	ایستگاه ثبت	بزرگا	رکورد لرزه‌ای
شماره	رکورد			
1.98	1994	Beverly Hills - Mulhol	6.7	Northridge
2.08	1995	Rinaldi Sta	6.9	Cape mendocino
2.37	1999	Duzce	7.5	Kocaeli
2.97	1992	Yermo	7.3	landers
2.57	1989	Capitola	6.9	Loma prieta
1.99	1995	Akashi LA -	6.8	Kobe
2.51	1971	Hollywood Stor	6.6	San fernando

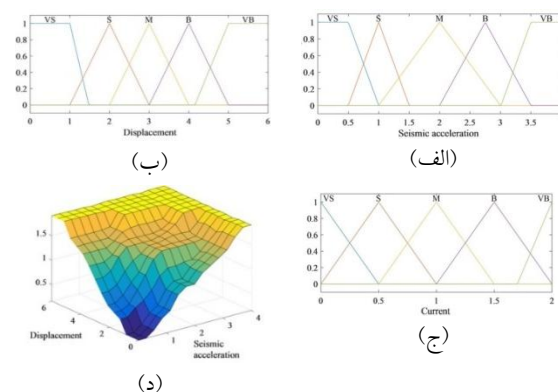
اکنون شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده باید مقیاس شوند؛ یعنی تغییراتی بر روی تاریخچه زمانی‌های انتخاب شده برای داشتن سطح مشخصی از سازگاری با طیف طرح استاندارد طرح اعمال شود. بدین منظور از روش پیشنهاد شده در گزارش FEMA P356 استفاده می‌شود با این تفاوت که از طیف طرح موجود در استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) به جای طیف موجود در آن گزارش استفاده شده است و همچنین به جای مقیاس کردن جذر مجموع مربعات تمام شتاب‌نگاشت‌ها، زوج شتاب‌نگاشت‌ها هر کدام جداگانه مقیاس شده‌اند [۲۰ و ۲۱]. در شکل (۹) هم‌پایه‌سازی رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل نشان داده شده است.



شکل ۹- هم‌پایه‌سازی رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک



شکل ۱۳- (الف) تابع عضویت شتاب لرزه ای کنترل فازی نوع A؛ (ب) تابع عضویت تغییر مکان کنترل فازی نوع A؛ (ج) تابع عضویت ولتاژ کنترل فازی نوع A؛ (د) گراف تابع فازی نوع A



شکل ۱۴- (الف) تابع عضویت شتاب لرزه ای کنترل فازی نوع B؛ (ب) تابع عضویت تغییر مکان کنترل فازی نوع B؛ (ج) تابع عضویت ولتاژ کنترل فازی نوع B؛ (د) گراف تابع فازی نوع B

در شکل (۱۵) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله نورتریج^۲ توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. در ابتدای زلزله که شدت زلزله کم بوده، هر سه حالت بدون کنترل و کنترل فازی نوع A و B بر یکدیگر منطبق بوده است؛ اما با افزایش شدت زلزله، تغییرات زیاد شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود است. کنترل فازی نوع B عملکرد بهتری در کاهش تغییر مکان های لرزه ای نسبت به کنترل فازی نوع A داشته است که این عملکرد بهتر، در لحظات پالس های زلزله و همچنین تکانه های شدید مشهود است. به طور کلی در هر دو حالت کنترل فازی نوع A و B در حدود ۳۵ درصد تغییر مکان های پل کمتر از حالتی است که سازه فاقد هر

خروجی، حالت های فازی بر اساس موتور استنتاج فازی سوگنو^۱ تعریف شده است؛ که حالت های متغیرهای ورودی و متغیرهای خروجی با مقادیر خیلی کوچک، کوچک، متوسط، بزرگ و خیلی بزرگ و مقادیر فازی مربوطه در معادله (۱۰) نشان داده شده اند.

$$\{\text{input variable/output variable}\} = \{\text{VS, S, M, B, VB}\} \quad (10)$$

دامنه فازی متغیرهای ورودی و خروجی بر اساس محدوده مقدار مطلق شتاب لرزه ای و پاسخ جابه جایی تعیین می شود. در جدول (۸) مشخصه های فازی نشان داده شده است.

جدول ۸- جدول مشخصه های فازی

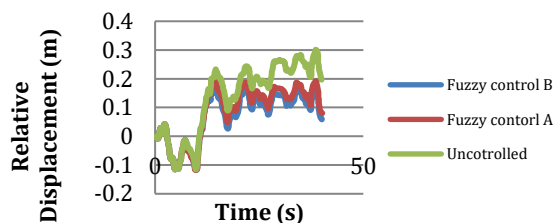
جریان	شتاب زلزله				
	VS	S	M	B	VB
تغییر مکان	VS	S	M	B	VB
تغییر مکان	S	S	M	B	VB
تغییر مکان	M	M	B	VB	VB
تغییر مکان	B	B	B	VB	VB
تغییر مکان	VB	VB	VB	VB	VB

دامنه فازی شتاب بین (۰ و ۰.۴)، دامنه فازی تغییر مکان بین (۰ و ۶) و دامنه فازی جریان نیز بین (۰ و ۲) در نظر گرفته شده است. استفاده از میراگر جرمی نیمه فعال فرکانس را بالا برده است. از آنجایی که شتاب لرزه ای و تغییر مکان بسیار مهم هستند، لذا بررسی شدند و در شکل (۱۳) تابع عضویت شتاب لرزه ای کنترل فازی نوع یک مشاهده می شود. در مراحل اولیه شتاب لرزه ای، جابه جایی سازه، کوچک است؛ بنابراین تغییرات کنترل های فازی نوع یک و نوع دو مشهود نیست. اما با افزایش شدت زلزله، میراگر جرمی وارد عمل شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود می شود. تفاوت اصلی در کنترل فازی نوع A و B در تابع عضویت ولتاژ است. در شکل (۱۴) توابع عضویت شتاب لرزه ای و تغییر مکان و تابع عضویت ولتاژ کنترل فازی نوع A به همراه گراف مربوطه نشان داده شده است.

² Northridge

¹ Sugeno Fuzzy Inference System

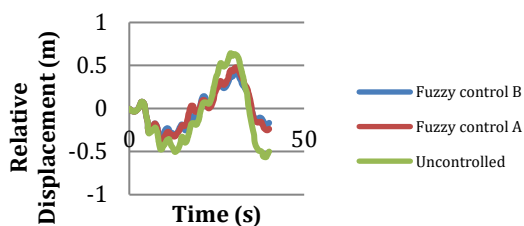
لرزه‌ای با استفاده از سیستم کنترل فازی نوع A و B نسبت به پل فاقد سیستم کنترل، کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۷- پاسخ تغییر مکان نسبی مرکز عرشه پل گلدن گیت تحت اثر

زلزله کوچعلی توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

در شکل (۱۸) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله لندرز^۲ توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد کنترل فازی نوع A و B در کاهش تغییر مکان‌های لرزه‌ای نسبت به پل بدون هرگونه سیستم کنترل سازه، به‌طور متوسط در حدود ۵۰ درصد بوده است.

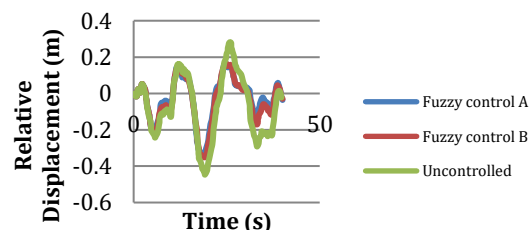


شکل ۱۸- پاسخ تغییر مکان نسبی مرکز عرشه پل گلدن گیت تحت اثر

زلزله لندرز توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

در شکل (۱۹) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله لوما پریتا^۳ توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. در ابتدای زلزله که شدت زلزله کم بوده، هر سه حالت بدون کنترل و کنترل فازی نوع A و B بر یکدیگر منطبق بوده، اما با افزایش شدت زلزله، تغییرات زیاد شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود است. از نکات حائز اهمیت در بررسی این زلزله، مطابق با شکل (۱۹) اثرات تغییر شکل ماندگار در انتهای زلزله است که با استفاده از کنترل فازی نوع A و B تغییر شکل ماندگار انتهایی نسبت به پل فاقد آن در حدود ۴۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

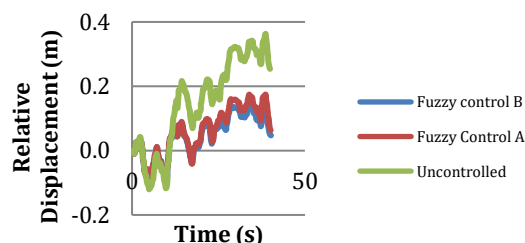
گونه کنترل است و این نشان‌دهنده عملکرد مثبت کنترل فازی نوع A و B در کاهش مؤثر تغییر مکان‌های لرزه‌ای است. از طرف دیگر، مطابق شکل (۱۵) در تکان‌های شدید، کنترل فازی وارد عمل شده و فاز تغییر مکان در جهت مخالف حالت بدون کنترل است که این نیز دلیل دیگری بر عملکرد بسیار مناسب کنترل فازی نیمه‌فعال میراگر جرمی تنظیمی در کاهش تغییر مکان‌های لرزه‌ای پل گلدن گیت بوده است.



شکل ۱۵- پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله

نورثریچ توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

در شکل (۱۶) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله کیپ مندوسینو^۱ توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. در ابتدای زلزله که شدت زلزله کم بوده، هر سه حالت بدون کنترل و کنترل فازی نوع A و B بر یکدیگر منطبق بوده اما با افزایش شدت زلزله، تغییرات زیاد شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود است.



شکل ۱۶- پاسخ تغییر مکان نسبی مرکز عرشه پل گلدن گیت تحت اثر

زلزله کیپ مندوسینو توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

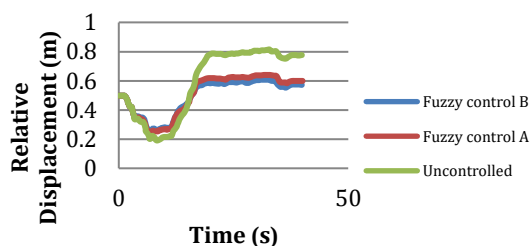
در شکل (۱۷) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله کوچعلی توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. در ابتدای زلزله که شدت زلزله کم بوده، هر سه حالت بدون کنترل و کنترل فازی نوع A و B بر یکدیگر منطبق بوده اما با افزایش شدت زلزله، تغییرات زیاد شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود است. در حدود ۴۰ درصد تغییر مکان‌های

² Landers

³ Loma Prieta

¹ Cape Mendocino

در شکل (۲۱) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله سن فرناندو^۲ توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. در ابتدای زلزله که شدت زلزله کم بوده، هر سه حالت بدون کنترل و کنترل فازی نوع A و B بر یکدیگر منطبق بوده اما با افزایش شدت زلزله، تغییرات زیاد شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود است. همان طور که در شکل (۲۱) دیده می شود، کنترل فازی نوع B در کاهش تغییر مکان لرزه ای بهتر از کنترل فازی نوع A بوده است.



شکل ۲۱- پاسخ تغییر مکان نسبی مرکز عرشه پل گلدن گیت تحت اثر زلزله سن فرناندو توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

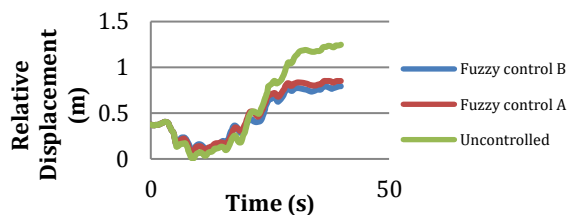
۹- نتیجه گیری

در این پژوهش کنترل ارتعاشات لرزه ای پل های معلق با کنترل نیمه فعال میراگر جرمی تنظیم شونده تحت رکوردهای لرزه ای حوزه نزدیک به گسل با استفاده از کنترل فازی نوع ۱ و ۲ (مطالعه موردی پل گلدن گیت) انجام شده است و نتایج پژوهش به شرح زیر است:

۱- با افزایش بازه تابع در کنترل فازی، جریان کنترل تغییر کرده و پاسخ تغییر مکان پل با افزایش جریان کنترل، کاهش پیدا می کند؛ اما اگر بازه جریان کنترل در تابع عضویت بیش از حد بزرگ باشد، موجب تقویت پاسخ شتاب سازه خواهد شد که پدیده تشدید را ایجاد می کند.

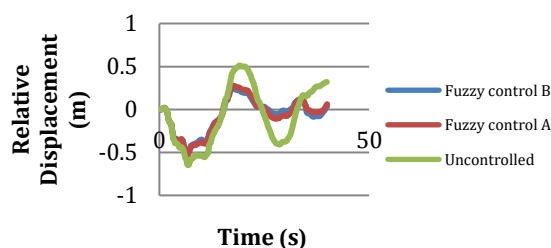
۲- در بین دو نوع کنترل فازی نوع یک (A) و نوع دوم (B) باید به پدیده تشدید نیز توجه نمود؛ اما اثر کنترل فازی نوع B بر کاهش جابه جایی بهتر از اثر کنترلی فازی نوع A در حدود ۱۵ درصد بوده است.

۳- تحت تأثیر امواج زلزله، اثر لرزه ای استراتژی های کنترل فازی A و B یکسان نیست؛ که نشان می دهد تابع کنترل فازی به ورودی وابسته است.



شکل ۱۹- پاسخ تغییر مکان نسبی مرکز عرشه پل گلدن گیت تحت اثر زلزله لوما پریتا توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

در شکل (۲۰) پاسخ تغییر مکان نسبی پل گلدن گیت تحت اثر زلزله کوبه^۱ توسط میراگر جرمی و کنترل فازی نوع A و B نشان داده شده است. در ابتدای زلزله که شدت زلزله کم بوده، هر سه حالت بدون کنترل و کنترل فازی نوع A و B بر یکدیگر منطبق بوده، اما با افزایش شدت زلزله، تغییرات زیاد شده و اثرات کنترل فازی نوع A و B مشهود است. به طور کلی کنترل فازی نوع B عملکرد بهتری نسبت به کنترل فازی نوع A در کاهش تغییر مکان های لرزه ای داشته است. مطابق با شکل (۲۰)، رفتار رفت و برگشتی ناشی از رکورد لرزه ای کوبه قابل مشاهده است؛ در پل که فاقد هرگونه سیستم کنترلی است، میزان تغییر مکان به طور متوسط در حدود ۵۰ درصد بیش تر از پل با کنترل فازی نوع A و B می باشد؛ به عبارت دیگر کنترل فازی نیمه فعال میراگر جرمی تنظیم شونده توانسته است در حدود ۵۰ درصد تغییر مکان های لرزه ای ناشی از زلزله کوبه را کاهش دهد و این عدد بسیار قابل توجهی است که بیانگر عملکرد بسیار مثبت کنترل فازی نوع A و B در کنترل تغییر مکان های لرزه ای است. در مقایسه بین دو کنترل فازی نوع A و B نیز به طور کلی عملکرد کنترل فازی نوع B در حدود ۱۵ درصد بهتر از عملکرد کنترل فازی نوع A است. از سوی دیگر نکته مهم در کنترل فازی، حذف قابل ملاحظه تغییر مکان ماندگار نسبت به حالت فاقد آن است.



شکل ۲۰- پاسخ تغییر مکان نسبی مرکز عرشه پل گلدن گیت تحت اثر زلزله کوبه توسط میراگر جرمی با کنترل فازی نوع A و B

² San Fernando

¹ Kobe

۴- تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت مجهز به میراگر جرمی در تمامی رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک کم‌تر از تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت فاقد میراگر جرمی بوده است.

۵- مدل‌سازی سه‌بعدی سازه پل گلدن گیت در نرم‌افزار ABAQUS و اعمال سه مؤلفه‌ای رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل منجر به نشان‌دادن عملکرد واقعی میراگر جرمی تنظیمی نیمه‌فعال در پل شده است.

۶- با مقایسه خروجی تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت فاقد کنترل فاز با حالت‌های کنترل فاز نوع A و B، مشخص شده است که کنترل فاز نوع A و B توانسته تغییر مکان‌های لرزه‌ای و جابه‌جایی ماندگار پل گلدن گیت را به‌طور مؤثری حتی تا میزان ۵۰ درصد کاهش دهد و این بیانگر عملکرد بسیار مثبت کنترل فاز نوع A و B در کاهش تغییر مکان‌های لرزه‌ای است.

- Inertia's Optimum Configuration", Engineering Structures, 268, pp.114774.
- [12] Hosseini Lavasani, H., Ebadijalal, M., and Shahrouzi, M. (2022), "Interpretation of Simultaneously Optimized Fuzzy Controller and Active Tuned Mass Damper Parameters under Pulse-Type Ground Motions", Engineering Structures, 261, pp.114286.
- [13] Alizadeh, H., and Hosseini Lavassani, S.H. (2021), "Flutter Control of Long Span Suspension Bridges in Time Domain using Optimized TMD", International Journal of Steel Structures, 21(2), pp.731-742.
- [14] Lavasani, S.H.H., Alizadeh, H., Doroudi, R., and Homami, P. (2020), "Vibration Control of Suspension Bridge Due to Vertical Ground Motions" Advances in Structural Engineering, 23(12), pp.2626-2641.
- [15] Takin, K., Doroudi, R., and Doroudi, S. (2021), "Vibration Control of Structure by Optimizing the Placement of Semi-Active Dampers and Fuzzy Logic Controllers" Australian Journal of Structural Engineering, 22(3), pp.222-235.
- [16] Astaneh-Asl, A. (2017), "Preservation of Historical Bridges in USA: Golden Gate Bridge and the Albion River Bridge Cases", Preservation, 12, pp.15.
- [17] Nakamura, Y., Der Kiureghian, A., and Liu, D. (1993), "Multiple Support Response Spectrum Analysis of the Golden Gate Bridge" Report No. UBC/EERC-93/05. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley.
- [18] American Society of Civil Engineers. (2023), Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-23). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [19] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (2026) PEER Ground Motion Database. University of California, Berkeley. Available at: PEER Ground Motion Database.
- [20] American Society of Civil Engineers (2000), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 356. Prepared for the Federal Emergency Management Agency. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- [21] Standard 2800 (2015), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (4th edition)", Road, Housing and Urban Development Research Center. (in Persian)
- [1] Soltani, H., Nouri, G., and Hosseini Lavasani, H. (2025), "Buffeting-Induced Fatigue in Suspension Bridges: Time-Domain Analysis with AI Techniques", International Journal of Fatigue, 203, pp.109280.
- [2] Hosseini Lavasani, H., and Homami, P. (2025), "Seismic Control of High-Rise Buildings by Combining Fuzzy Logic and Higher-Order Fractional-Order Controllers Using an Optimized MR+TMD", Journal of Structural Design and Construction Practice, 30(4), pp.04025098.
- [3] Hosseini Lavasani, H., Doroudi, R., and Mousavi Gavvani, A. (2025), "Optimization of Semi-Active Tuned Mass Damper Inerter for Enhanced Vibration Control of Jacket Platforms Using Multi-Objective Optimization Due to Environmental Load", Structures, 78, pp.109305.
- [4] Hosseini Lavassani, S.H., Alizadeh, H., and Doroudi, R. (2025), "Seismic Control of Tower-Pile System of Suspension Bridges Considering Soil-Structure Interaction under Near-Field Ground Motions", Structural Engineering International, 35(4), pp.707-722.
- [5] Mousavi Gavvani, A., Hosseini Lavasani, H., and Bekdaş, G. (2025), "Control of Nonlinear Offshore Platforms Using Semi-Active Tuned Mass Damper Inerter under Combined Wave and Wind Loads", Applied Ocean Research, 154, pp.104428.
- [6] Afshar, A., Nouri, G., and Hosseini Lavasani, H. (2024), "Feature Selection and Response Prediction on a Suspension Bridge Due to Wind Effect by Machine Learning", Structures, 71, pp.107945.
- [7] Doroudi, R., Hosseini Lavasani, H., and Shahrouzi, M. (2024), "Damage Detection for Long-Span Bridges through Support Vector Machine, Wavelet Transform, and Multivariate Empirical Mode Decomposition", International Journal of Structural Engineering, 14(2), pp.164-185.
- [8] Alizadeh, H., Lavasani, H.H., Gharehbaghi, V., Yang, T.T., and Farsangi, E.N. (2023), "Smart Control of Flutter of Suspension Bridges Using Optimized Passive Tuned Mass Damper", In Automation in Construction toward Resilience: Robotics, Smart Materials, and Intelligent Systems, CRC Press, pp.523-534.
- [9] Hosseini Lavasani, H., Penelope, P., Kontoni, N., and Alizadeh, H. (2023), "Passive Control of Ultra-Span Twin-Box Girder Suspension Bridges under Vortex-Induced Vibration Using Tuned Mass Dampers: A Sensitivity Analysis", Buildings, 13(5), pp.1279.
- [10] Mousavi Gavvani, A., and Hosseini Lavasani, H. (2024), "Vibration Mitigation of Offshore Structures Subjected to Wave and Wind Loads Using Optimum Semi-Active Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)", Ocean Engineering, 297, pp.117110.
- [11] Hosseini Lavasani, H., Alizadeh, H., and Gharehbaghi, V. (2022), "Flutter Control of Truss-Type Suspension Bridges with a Tuned Mass Damper Based on the Mass Polar Moment of