



Research Article

The Optimal Hybrid Controller Based on Ground Acceleration for a Structure Equipped with MR Dampers

Hossein Ghaffarzadeh*, Samira Safikhanlou and Alireza Aran

Faculty of Civil Engineering of Tabriz University, Tabriz, Iran

* corresponding author: (ghaffar@tabrizu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 16 November 2024

Revised: 24 January 2025

Accepted: 5 February 2025

Keywords:

Semi-active control,
MR damper,
skyhook,
groundhook,
pattern search algorithm.

Abstract

Magnetorheological (MR) dampers demonstrate intelligent behavior when subjected to a magnetic field, with their structural response controlled by adjusting the magnetic field's intensity. Various control algorithms and laws have been proposed to implement these control systems. Among the fundamental control laws for semi-active systems, the Skyhook and Groundhook control laws are particularly notable. A hybrid approach combining both of them can be employed to enhance the performance of these control laws. However, determining the optimal contribution of each control law—Skyhook and Groundhook—within the hybrid control law presents a significant challenge. In this study, an eight-story structure equipped with MR dampers is analyzed under the excitation of three earthquakes, Bam, Loma-Prieta, and Northridge, to evaluate the effectiveness of the proposed hybrid control law. The objective is to optimize the hybrid control law using the pattern search algorithm. The hybrid control law for structures with MR dampers can be implemented in two ways: on-off and continuous. In the on-off method, the voltage applied to the MR dampers is restricted to two extreme values, whereas the continuous method allows for voltage adjustment across the entire range between these boundaries. Through an analysis of both on-off and continuous hybrid control laws, it is evident that their performance in reducing the structure's displacement, velocity, and acceleration responses is nearly identical. However, the continuous hybrid control law achieves comparable efficiency with significantly lower control forces. As a result, the continuous optimal hybrid control law emerges as a simple yet highly effective solution. Furthermore, by assuming the same weight of force and displacement in the cost function, it is shown that the participation percentage of the Skyhook control law in the hybrid control law is much higher than that of the Groundhook control law. The optimal participation rate of the Skyhook law is obtained to be approximately 0.95.

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

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Ghaffarzadeh, H., Safikhanlou, S. and Aran, A. 2026. The optimal hybrid controller based on ground acceleration for a structure equipped with MR dampers, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 3-16.
<https://doi.org/10.24200/30.2025.65523.3381>



کنترل ترکیبی بهینه مبتنی بر شتاب زمین برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی

حسین غفارزاده^{*}، سمیرا صفی‌خانلو و علیرضا آران

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

^{*}نویسنده مسئول (ghaffar@tabrizu.ac.ir)

چکیده

میراگرهای مغناطیسی به‌عنوان یکی از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال با قرارگرفتن در معرض میدان مغناطیسی، رفتار هوشمندی از خود نشان می‌دهند و با تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی، کنترل سازه انجام می‌شود. جهت پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی اخیر، الگوریتم‌ها و قوانین کنترل مختلفی، مانند قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک ارائه شده است. به‌منظور بهبود قوانین کنترل مذکور، ترکیبی از آن‌ها می‌تواند به دو روش دو حالت و پیوسته استفاده شود. تعیین سهم هر کدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی یک چالش است. هدف پژوهش حاضر، استفاده از الگوریتم جستجوی الگو به‌منظور بهینه‌سازی قانون کنترل ترکیبی است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که اگر در محاسبه‌ی تابع هزینه، وزن جابجایی از نیرو بیشتر در نظر گرفته شود، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی حدوداً ۹۵٪ به‌دست می‌آید. همچنین با مقایسه‌ی قانون کنترل ترکیبی دو حالت و پیوسته مشخص می‌شود که کاهش پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب در هر دو روش تقریباً یکسان است، اما نیروی کنترلی موردنیاز در قانون کنترل ترکیبی پیوسته کمتر است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

واژگان کلیدی:

کنترل نیمه‌فعال،

میراگر مغناطیسی،

اسکای‌هوک،

گروندهوک،

الگوریتم جستجوی الگو.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، کنترل ارتعاش سازه‌های تحت بارگذاری باد و زلزله به‌طور گسترده توسط بسیاری از پژوهشگران مطالعه شده است. بر این اساس، انواع مختلفی از دستگاه‌ها و الگوریتم‌های کنترلی با اهداف مختلف، مانند مقاوم‌سازی سازه‌ها توسعه یافته و استفاده شده‌اند.^[۱] یکی از روش‌های کنترل سازه، روش کنترل نیمه‌فعال^۱ است؛ که در آن، مشخصات سیستم از جمله سختی و میرایی در طول زمان بارگذاری قابلیت تغییر دارند و بر این اساس، سازه کنترل می‌شود. یکی از روش‌های کنترل نیمه‌فعال، استفاده از میراگرهای مغناطیسی (MR)^۲ است. میراگرهای مغناطیسی، دستگاه‌های قابل کنترل و هوشمندی هستند که مایع مغناطیسی دارند. ویژگی آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی قابلیت تغییر دارد. پس از اعمال میدان مغناطیسی، سیال در مدت زمان چند میلی‌ثانیه از حالت مایع به حالت نیمه‌جامد تغییر حالت می‌دهد و ذرات آهنی به دوقطبی‌های مغناطیسی تبدیل می‌شوند. بنابراین، دستگاه‌های میراگر مغناطیسی بدین روش اقدام به کنترل سازه می‌کنند. نیروی تولیدشده توسط سیستم پیستون و سیلندر در میراگرهای مغناطیسی، پایداری و قابلیت

اطمینان بالایی را نشان می‌دهد. تنظیم مشخصات و نیروی میراگر مغناطیسی با اعمال ولتاژ ورودی انجام می‌شود. هنگامی که ولتاژ ورودی به سیستم تغییر می‌کند، خواص مکانیکی سیال نیز دچار تغییر می‌شود.^[۲] ولتاژ ورودی موردنیاز سیستم می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌ها و قوانین کنترلی تعیین شود. از جمله قوانین کنترل^۳ پایه در روش کنترل نیمه‌فعال، قوانین کنترل اسکای‌هوک^۴ و گروندهوک^۵ است.^[۳]

قانون کنترل اسکای‌هوک، در ابتدا برای کاهش ارتعاش‌های واردشده از سطح جاده به بدنه‌ی خودرو استفاده می‌شده است.^[۴] پس از گذشت زمان، از قانون اخیر در سازه‌های عمرانی نیز استفاده شده است. خشنودیان و مهرپور (۲۰۱۳)،^[۵] تعمیم‌یافته‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک را برای سازه‌های مجهز به جداساز لرزه‌ای بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که رویکرد کنترل نیمه‌فعال با استفاده از قانون کنترل اسکای‌هوک، نتایج بهتری نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال دارد. بررسی ایشان نشان داده است که روش استفاده‌شده برای بهبود عملکرد اجزاء سازه‌ای و غیرسازه‌ای مؤثر است.^[۵]

^۴ Skyhook

^۵ Groundhook

^۱ Semi-active control

^۲ Magneto- Rheological dampers

^۳ Control laws

استناد به این مقاله:

غفارزاده، حسین، صفی‌خانلو، سمیرا و آران، علیرضا، ۱۴۰۵. کنترل ترکیبی بهینه مبتنی بر شتاب زمین برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)،

صص ۳-۱۶. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.65523.3381>



اسکای هوک و گروندهوک را در کنترل ترکیبی به روش دو حالت بررسی کرده‌اند.^[۱۷]

در پژوهش حاضر، ارزیابی قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته مبتنی بر تصمیم‌گیری براساس شتاب زمین برای سازهی مجهز به میراگر مغناطیسی صورت گرفته و با قوانین کنترل ترکیبی دو حالت، اسکای هوک، و گروندهوک دو حالت و پیوسته مقایسه شده‌اند. جهت بهینه‌سازی وزن هر کدام از قوانین کنترلی پایه، از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی الگو^۹ استفاده و به‌عنوان یک قانون کنترل ترکیبی بهینه معرفی شده است.

۲. قوانین کنترل

۱.۲. قوانین کنترل پایه

از الگوریتم‌ها و قوانین کنترل نیمه‌فعال جهت تعیین وضعیت سازه و کاهش ارتعاش‌های وارد بر آن استفاده می‌شود. یکی از قوانین کنترل نیمه‌فعال، قانون کنترل اسکای هوک است؛ که برای استفاده از آن برای سازه‌های ساختمانی، از سرعت مطلق طبقه بالا و سرعت نسبی دو طبقه مجاور برای تعیین وضعیت نیروی کنترلی استفاده می‌شود. دلیل نام‌گذاری قانون اخیر نیز استفاده از اطلاعات طبقه بالاتر است. قانون کنترل اسکای هوک به دو روش دو حالت و پیوسته به کار می‌رود. در روش دو حالت، دو مقدار مرزی حد بالا (High state) و حد پایین (Low state) در نظر گرفته می‌شوند؛ و در روش پیوسته، علاوه بر دو مقدار حدی مذکور، مقادیر مابین آن‌ها نیز می‌توانند لحاظ شوند. در صورت پیاده‌سازی قانون ذکرشده برای میراگرهای مغناطیسی، مقادیر مرزی حد بالا و پایین با بیشینه و کمینه ولتاژ قابل تنظیم میراگر مغناطیسی تعریف می‌شوند. در شکل ۱، وضعیت مختلف دو جرم مجاور مطابق قانون کنترل اسکای هوک مشاهده می‌شود.

در روش پیوسته قانون کنترل اسکای هوک، مقادیر ولتاژ ورودی به سیستم بین دو مقدار $V_{\min}$ و $V_{\max}$ می‌تواند متغیر باشند (رابطه ۱). به‌عنوان یک پیشنهاد، مقادیر مابین دو ولتاژ اخیر می‌توانند با استفاده از ضریب اصلاحی (MF)^{۱۰} تأمین شود، که عددی بین ۰ و ۱ است (رابطه ۲):

$$V_{\text{SkyHook}} = \begin{cases} V_{\max} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$MF = \frac{|\ddot{x}_{\text{زمین}}|}{\ddot{x}_{\text{مینا}}} \leq 1 \quad (2)$$

در پژوهش حاضر، $\ddot{x}_{\text{مینا}}$ یک درصد شتاب مبنای طرح برای پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (۰/۳۵g) در نظر گرفته شده است. در نتیجه، ولتاژ میراگرهای مغناطیسی براساس قانون کنترل اسکای هوک به روش پیوسته به‌صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$V_{\text{SkyHook}} = \begin{cases} V_{\min} + MF(V_{\max} - V_{\min}) & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

قانون کنترل گروندهوک، یکی دیگر از قوانین کنترل پایه است، که در سازه‌های

تعمیم قانون کنترل اسکای هوک به قوانین کنترل فاز^۱ ساده نیز انجام شده است.^[۶ و ۷] در قانون کنترل اسکای هوک، سرعت طبقه بالا و سرعت نسبی بین دو طبقه مجاور سازهی عمرانی، نقش اساسی در تعیین وضعیت سیستم دارند. با تعمیم قانون مذکور به قانون کنترل فاز، جابجایی و شتاب طبقه پایین می‌توانند جایگزین سرعت مطلق طبقه بالا شوند. از طرفی، سرعت مطلق بالا می‌تواند جایگزین سرعت نسبی دو طبقه مجاور شود. این فرایند با بررسی فاز حرکت سیستم یک درجه‌ای آزاد انجام می‌شود. آنالیز خارج از تنظیم، آنالیز حساسیت، تأثیر تأخیر زمانی، و پارامترهای بهینه‌ی سیستم کنترل نیمه‌فعال جرم تنظیم‌شونده برای قوانین کنترل فاز انجام شده است.^[۸] یو^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، نیز تأخیر زمانی و غیرخطی بودن رفتار میراگر مغناطیسی بر مبنای قانون کنترل اسکای هوک را بررسی کرده‌اند.^[۹] قانون کنترل اسکای هوک به دو روش خاموش- روشن^۳ (دو حالت) و پیوسته^۴ کاربرد دارد. در روش دو حالت، فقط دو مقدار حدی برای میرایی یا ولتاژ در نظر گرفته می‌شود؛ اما در روش پیوسته، علاوه بر مقادیر حدی میرایی یا ولتاژ، سایر مقادیر بین دو مقدار اخیر نیز در نظر گرفته می‌شوند. مقایسه‌ی قانون کنترل اسکای هوک با قانون کنترل تعادل^۵ در دو روش دو حالت و پیوسته انجام شده است.^[۱۰]

قانون کنترل گروندهوک برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال موردتوجه بوده است؛ که مشابه قانون کنترل اسکای هوک، در ابتدا برای کنترل ارتعاش‌های وارد بر خودرو به دو صورت گروندهوک مبتنی بر جابجایی و گروندهوک مبتنی بر سرعت استفاده شده است.^[۱۱] ژانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی برای سازه‌های بلند تحت بارگذاری باد، قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی و سرعت را با یکدیگر مقایسه کرده و عملکرد قانون کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی بهتر ارزیابی شده است.^[۱۲] با بررسی ترکیب قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی و سرعت و تعمیم‌یافته‌ی آن، عملکرد بهتری برای کنترل‌کننده به‌دست آمده است.^[۱۳] قانون کنترل گروندهوک نیز مانند قانون کنترل اسکای هوک به دو روش دو حالت و پیوسته کاربرد دارد. در تعریف پایه‌ی قانون کنترلی گروندهوک، تعیین وضعیت سیستم با استفاده از سرعت طبقه پایین و سرعت نسبی دو طبقه مجاور سازه انجام می‌شود. کو^۷ و همکاران (۲۰۰۴)، عملکرد قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی و سرعت را با استفاده از دو روش دو حالت و پیوسته مقایسه کرده‌اند.^[۱۴]

به‌منظور تکمیل قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک جهت تعیین وضعیت سیستم، قانون کنترل ترکیبی^۸، که تلفیقی از قوانین مذکور است، به کار گرفته شده است. ارزیابی قانون کنترل ترکیبی به روش دو حالت برای میراگرهای مغناطیسی صورت گرفته و عملکرد مناسب آن در مقایسه با قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک سنجیده شده است.^[۱۵] استفاده از ترکیب قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک مبتنی بر جابجایی به روش دو حالت در طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی، بهبود رفتار کنترل‌کننده‌ی معرفی شده را در مقایسه با قوانین اسکای هوک و گروندهوک نشان داده است.^[۱۶] وزن‌دهی بهینه‌ی قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی، مهم‌ترین بخش تعریف قانون کنترل برای سیستم کنترل نیمه‌فعال است. بدین منظور، جوادی‌نسب و همکاران (۲۰۱۴)، وزن بهینه‌ی هر کدام از قوانین

⁶ Zhang

⁷ Koo

⁸ Hybrid control law

⁹ Pattern search algorithm

¹⁰ Modify Factor

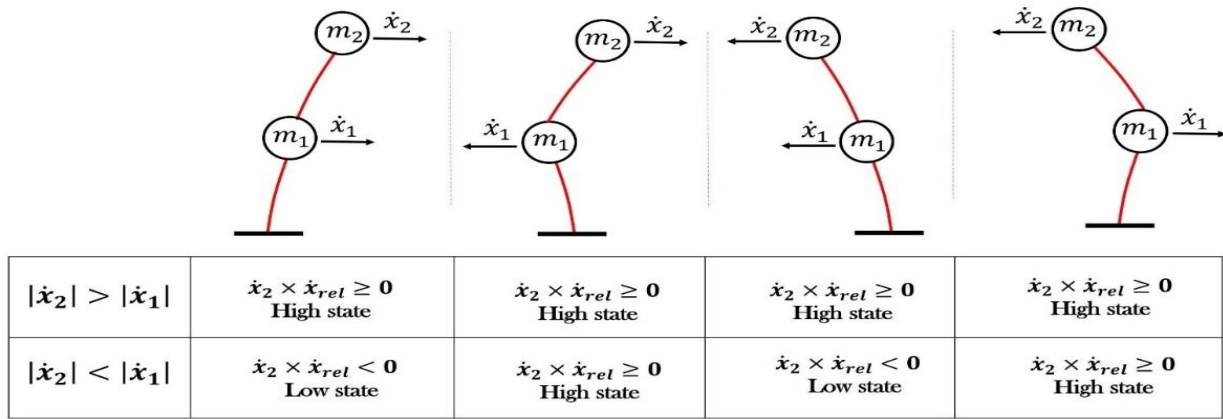
¹ Phase control laws

² Yu

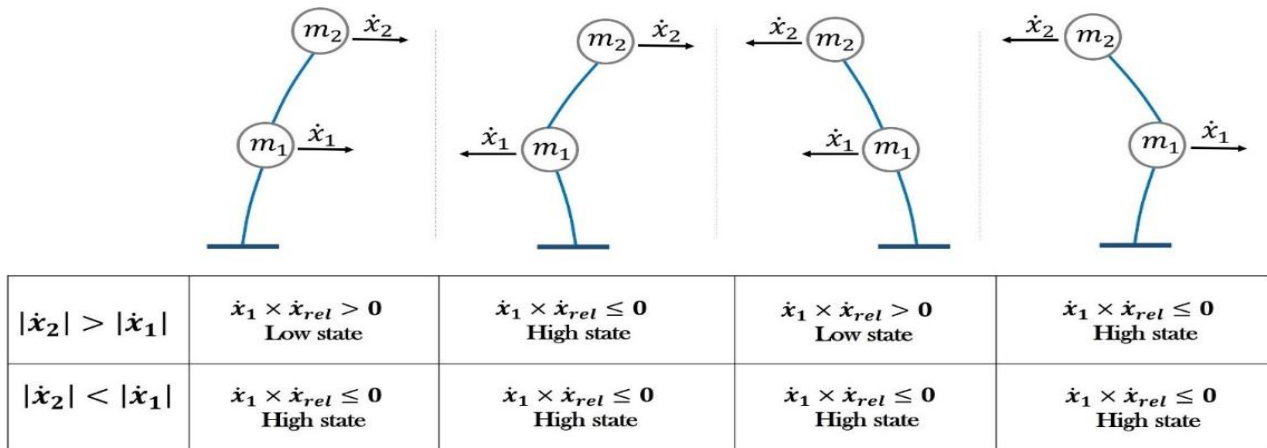
³ On-Off

⁴ Continuous

⁵ Balance control law



شکل ۱. توصیف حالت‌های مربوط به قانون کنترل اسکای‌هوک.



شکل ۲. توصیف حالت‌های مربوط به قانون کنترل گروند‌هوک.

ورودی میراگرهای مغناطیسی مبتنی بر قانون کنترل ترکیبی ارائه شده است.

$$V_{Hybrid} = \alpha V_{SkyHook} + (1-\alpha) V_{GroundHook} \leq V_{max} \quad (6)$$

که در آن، α بیانگر سهم قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی است. جهت ارائه قانون کنترل ترکیبی بهینه، ضریب α بهینه‌سازی شده است. به‌منظور بهینه‌سازی سهم هر کدام از قوانین اسکای‌هوک و گروند‌هوک در قانون کنترل ترکیبی، از الگوریتم جستجوی الگو می‌توان استفاده کرد. الگوریتم جستجوی الگو، یک بهینه‌ساز مقاوم^{۱۱} و سراسری^{۱۲} است؛ بنابراین، برای بهینه‌سازی قانون کنترل ترکیبی مناسب است. الگوریتم اخیر، دنباله‌ای از نقاط را محاسبه می‌کند تا به نقطه‌ی بهینه نزدیک شود. در هر مرحله، الگوریتم مجموعه‌ای از نقاط را که به‌عنوان مش شناخته می‌شوند، در اطراف نقطه‌ی فعلی جستجو می‌کند. با استفاده از الگوی مشخص، حرکات نقاط در اطراف مش دنبال می‌شود تا تابع هدف^{۱۳} بهبود یابد. اندازه‌ی مش پس از هر تکرار موفقیت‌آمیز افزایش می‌یابد و پس از هر تکرار ناموفق کاهش می‌یابد تا فرایند بهینه‌سازی به اتمام برسد. در طراحی کنترل‌کننده ترکیبی بهینه، ضریب α بین صفر و یک ($0 \leq \alpha \leq 1$) است، بنابراین، متغیر مسئله‌ی بهینه‌سازی مقید است. تابع هدف در طراحی کنترل‌کننده ترکیبی می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۷ تعریف شود:

$$Cost(f_1, f_2) = Wf_1 + (100 - W)f_2 \quad (7)$$

ساختمانی برای تعیین وضعیت نیروی کنترلی از سرعت مطلق طبقه‌ی پایین و سرعت نسبی دو طبقه‌ی مجاور استفاده می‌شود. در شکل ۲، وضعیت مختلف دو جرم مجاور مطابق قانون کنترل گروند‌هوک مشاهده می‌شود. قانون اخیر نیز به دو روش دو حالت و پیوسته به کار می‌رود، که به ترتیب در روابط ۴ و ۵ مشخص شده‌اند.

$$V_{GroundHook} = \begin{cases} V_{max} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0 \\ V_{min} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{GroundHook} = \begin{cases} V_{min} + MF(V_{max} - V_{min}) & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0 \\ V_{min} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

۲.۲. قانون کنترل ترکیبی بهینه

در قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروند‌هوک از سرعت مطلق یک طبقه استفاده می‌شود، که البته سرعت طبقه‌ی مجاور نیز در تعیین دستور کنترلی نقش مؤثری دارد. با توجه به اینکه استفاده از سرعت مطلق دو طبقه‌ی مجاور می‌تواند در تعیین دستور کلی موجب بهبود پاسخ‌های سازه شود، قانون کنترل ترکیبی به‌عنوان قانون جامع‌تر ارائه شده است. این قانون با ترکیب دو قانون کنترل پایه باعث منطقی‌تر شدن دستور کنترلی می‌شود. در ترکیب دو قانون مذکور، سهمی برای هر یک در نظر گرفته شده است. در رابطه‌ی ۶، نحوه‌ی محاسبه‌ی ولتاژ

¹³ Cost function

¹¹ Robust

¹² Global

که در آن، M, K, C و به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی، و میرایی هستند و ابعاد $n \times n$ دارند، که n بیانگر تعداد طبقات سازه است. $F(t)$ ماتریس نیروی میراگرهای مغناطیسی را نشان می‌دهد و ابعاد آن $r \times 1$ است (r بیانگر تعداد میراگرهای مغناطیسی است). $X(t), \dot{X}(t), \ddot{X}(t)$ به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت، و شتاب طبقات سازه را مشخص می‌کنند و ابعاد $n \times 1$ دارند. $\ddot{x}_g(t)$ شتاب زمین و Λ نشانگر ضریب تأثیر زلزله با ابعاد $n \times 1$ است. Γ ماتریس موقعیت میراگرهاست، که از حاصل ضرب $\bar{\Gamma}$ و θ به دست می‌آید. $\bar{\Gamma}$ یک ماتریس ثابت با ابعاد $n \times n$ است و θ وجود یا نبود میراگر مغناطیسی در طبقه‌ی i ام را نشان می‌دهد و ابعاد $n \times r$ دارد (رابطه‌های ۹ و ۱۰).

$$\Gamma = \bar{\Gamma}_{n \times n} \theta_{n \times r} \quad (9)$$

$$\bar{\Gamma}_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -1 & i = j-1 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

با استفاده از تغییر متغیر $\begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix} = \{Z(t)\}$ معادله‌ی ۸ به صورت معادله‌ی ۱۱ بازنویسی می‌شود:

$$\dot{\{Z(t)\}} = [A]\{Z(t)\} + [B]F(t) - [D]\ddot{x}_g(t) \quad (11)$$

۲.۳. مدل رفتاری میراگر مغناطیسی

میراگرهای مغناطیسی از جمله میراگرهای پر کاربرد هستند، که با بهره‌گیری از مایعات کنترل پذیر، در کسری از ثانیه تحت جریان مغناطیسی قرار می‌گیرند و با تغییر فاز، انرژی ورودی تلف می‌شود. یکی از روش‌های مدل‌سازی رفتار هیستریزس میراگرهای مغناطیسی، مدل بوک-ون^{۱۶} است. نیروی غیرخطی برای یک مدل ایده‌آل میراگر مغناطیسی را می‌توان از طریق معادله‌ی ۱۲ به دست آورد.

$$F = C_0 \dot{x} + a z \quad (12)$$

که در آن، $\dot{x}, F$ و C_0 به ترتیب بیانگر نیرو، سرعت، و میرایی هستند. Z متغیری جهت توصیف تغییر شکل هیستریزس میراگرهای مغناطیسی است، که به صورت معادله‌ی ۱۳ تعریف می‌شود.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{z}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_0 \dot{x} \quad (13)$$

که در آن، γ و β پارامترهای شکی و A_0 شیب سیکل هیستریزس را نشان می‌دهند. درواقع، نحوه‌ی انتقال رفتار خطی به غیرخطی توسط پارامتر اخیر تعیین می‌شود.

پارامترهای C_0 و a به صورت یک مدل خطی از ولتاژ مؤثر به صورت روابط ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شوند.

$$a = \alpha_a + \alpha_b u \quad (14)$$

$$C_0 = C_{0a} + C_{0b} u \quad (15)$$

که در آن‌ها، u ولتاژ واقعی است. میراگرهای مغناطیسی با توجه به ساختار داخلی آن‌ها قادر به اعمال آنی ولتاژ واقعی نیستند. به عبارت دیگر، مدت زمانی طول می‌کشد تا ولتاژ واقعی میراگر تنظیم شود. بنابراین، ولتاژ مؤثر برای

که در آن، f_1 و f_2 به ترتیب ترم مربوط به نیروی کنترلی و جابجایی هستند، که سهم هر کدام از آن‌ها در محاسبه‌ی تابع هزینه با پارامتر W مشخص می‌شود.

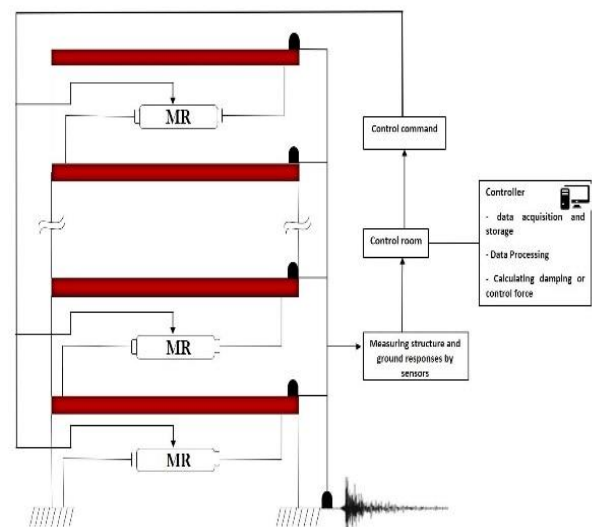
۳. پیاده‌سازی کنترل نیمه‌فعال برای سازهی مجهز به میراگرهای مغناطیسی

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال به منظور کنترل سازه در برابر نیروهای وارده از اجزا و المان‌هایی تشکیل شده‌اند، که هر کدام وظیفه‌ی مشخصی دارند. سیستم‌های مذکور از حس‌گر، کنترل کننده، و دستگاه کنترل نیمه‌فعال (مانند میراگر مغناطیسی) به وجود آمده‌اند. وظیفه‌ی حس‌گرها در فرایند کنترل، اندازه‌گیری اطلاعات (مانند پاسخ سازه‌ها) است. اطلاعات دریافت شده از حس‌گرها در کنترل کننده، پردازش می‌شود. سپس، با توجه به قوانین و الگوریتم‌های از پیش تعیین شده، نیرو یا میرایی مورد نیاز سازه در هر لحظه محاسبه می‌شود. دستور کنترلی دریافتی از کنترل کننده‌ها توسط دستگاه‌هایی مانند میراگرهای مغناطیسی به سازه اعمال و فرایند کنترل سازه تکمیل می‌شود. فرایند کنترل نیمه‌فعال سازه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۱.۳. معادله‌های حرکت

پاسخ‌های یک سازه‌ی ساختمانی که تحت نیروی ارتعاش زلزله قرار می‌گیرد، را می‌توان از طریق حل معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر آن به دست آورد. یکی از روش‌های حل معادله‌های دیفرانسیل، روش فضای حالت^{۱۴} است. در روش اخیر، معادله‌ی حرکت سازه‌ی ساختمانی، که یک معادله‌ی مرتبه‌ی دوم است، به معادله‌ی مرتبه‌ی اول با استفاده از متغیرهای حالت^{۱۵} تبدیل می‌شود. معادله‌ی حرکت سازه‌ی ساختمانی جهت ایجاد فضای حالت به صورت رابطه‌ی ۸ نوشته می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} \dot{X}(t) \\ \ddot{X}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}_{2n \times r} F(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda \end{bmatrix}_{2n \times 1} \ddot{x}_g(t) \quad (8)$$

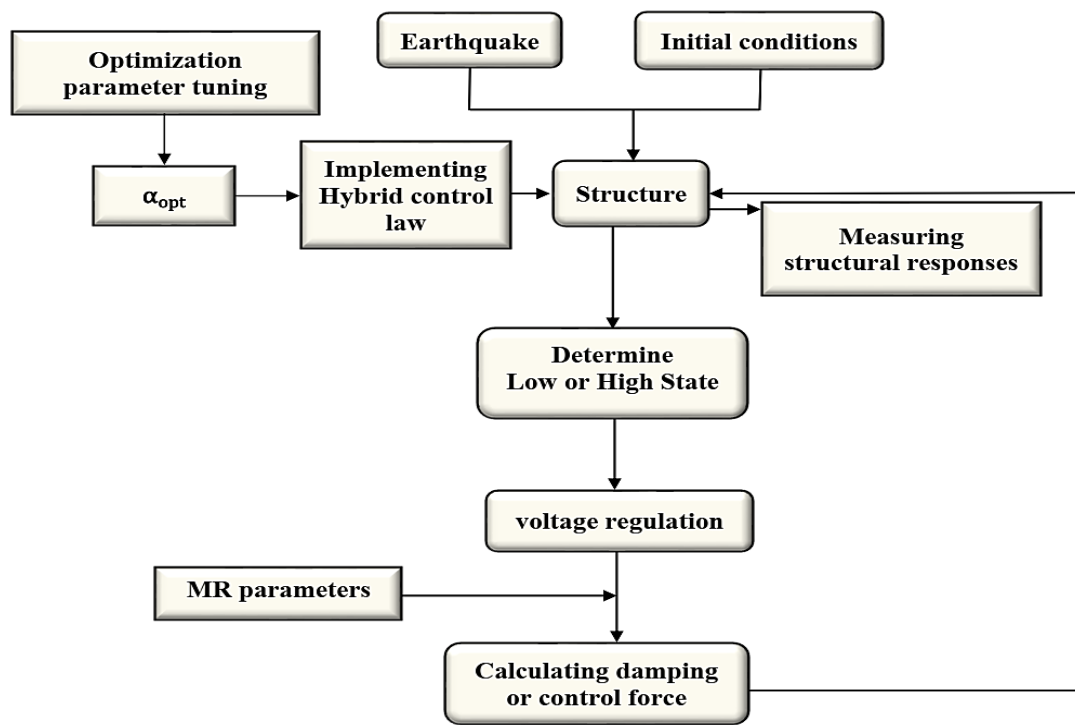


شکل ۳. فرایند کنترل نیمه‌فعال سازهی مجهز به میراگرهای مغناطیسی.

¹⁶ Bouc-Wen

¹⁴ State space

¹⁵ State variable



شکل ۴. فلوجارت کنترل نیمه‌فعال سازه‌های مجهز به میراگر مغناطیسی براساس قانون کنترل ترکیبی بهینه. جدول ۱. مشخصات زلزله‌های انتخابی.

Earthquake	Station	year	PGA(g)
Loma-Prieta	Hollister	1989	0.370
Bam	Bam	2003	0.629
Northridge	Sylmar	1994	0.623

جدول ۲. پارامترهای مدل‌سازی میراگرهای مغناطیسی.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
α_a	$21744 \frac{N}{cm}$	$C_b \frac{N.s}{cm.V}$	8.8	β	$3cm^{-1}$
α_b	$99232 \frac{N}{cm.V}$	A.	1.2	η	$50s^{-1}$
$C_{.a}$	$0.88 \frac{N.s}{cm}$	γ	$3cm^{-1}$	n	1

است. جرم، میرایی، و سختی تمامی طبقات سازه به ترتیب ۱۵۵/۶ ton، ۱۵۳۳۳۳ KN/m و ۱۰۹۷/۷ KN.s/m در نظر گرفته شده است. همچنین، مشخصات مربوط به سه زلزله‌ی لوما- پریتا، نورث‌ریج، و بم در جدول ۱ ارائه شده است.

فرض شده است میراگرهای مغناطیسی با مشخصاتی مطابق جدول ۲ در تمامی طبقات سازه نصب شده‌اند. مقادیر به کاررفته برای مدل‌سازی میراگرهای مغناطیسی در پژوهش حاضر، براساس مدل معین آزمایش شده در دانشگاه ایالت واشنگتن انتخاب شده است؛^[۱۹] به طوری که میراگرهای مغناطیسی تضمین می‌کنند تا در حد اشباع ولتاژ به مقدار ۵ ولت، تقریباً نیرویی معادل ۱۰۰ کیلونیوتن را تأمین کنند. بنابراین، با توجه به استفاده از قوانین پایه و

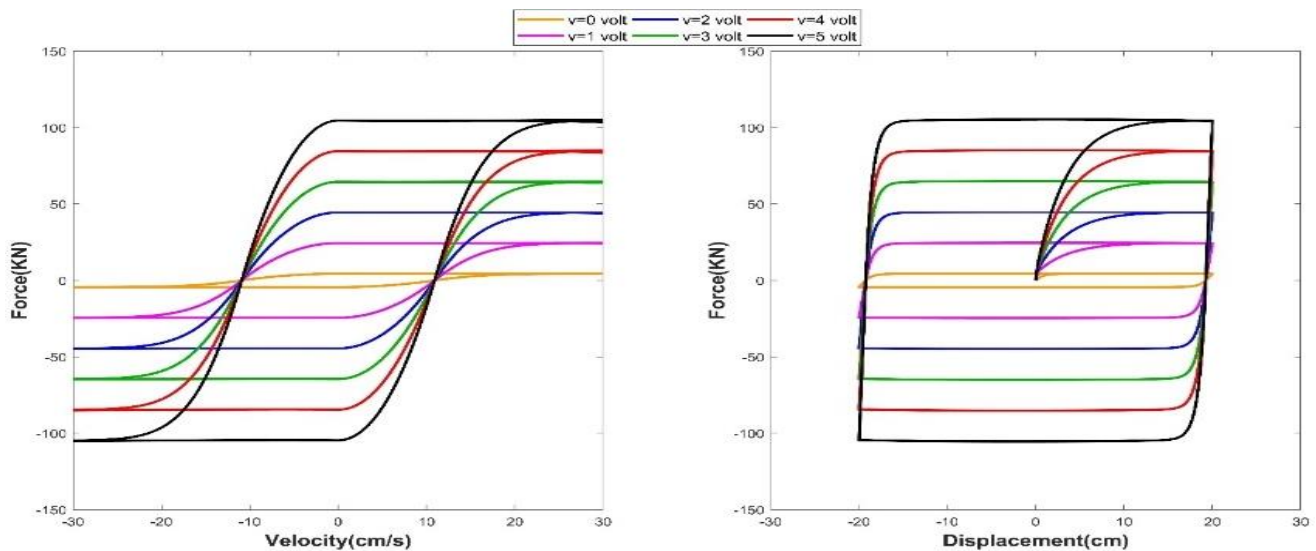
در نظر گرفتن تأخیر زمانی با استفاده از فیلتر مرتبه‌ی اول به صورت رابطه‌ی ۱۶ ارائه می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (16)$$

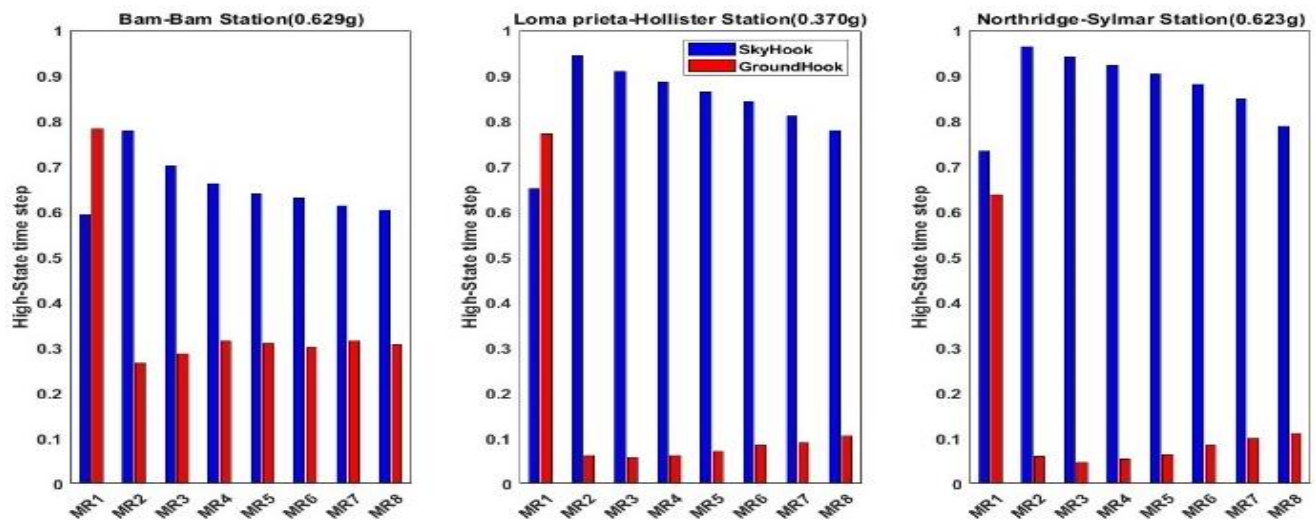
در پژوهش حاضر، جهت حل معادله‌ی ۱۳ و به دست آوردن پارامتر z ، از روش رانگ کوتا^{۱۷} مرتبه‌ی چهار استفاده شده است. در شکل ۴، فلوجارت کنترل نیمه‌فعال سازه‌های مجهز به میراگر مغناطیسی براساس قانون کنترل ترکیبی بهینه مشاهده می‌شود.

۴. مثال‌های عددی

در بخش حاضر، عملکرد پروسه‌ی کنترل پیشنهادی برای یک سازه‌ی ۸ طبقه با مشخصات معلوم،^[۱۸] تحت ارتعاش دو زلزله‌ی لوما- پریتا و بم ارزیابی شده



شکل ۵. راستی آزمایی میراگرهای مغناطیسی جهت تولید نیروی ۱۰۰ کیلونیوتن.



شکل ۶. مقایسهی نسبت گام‌های زمانی High-State برای قوانین کنترل پایه در روش دو حالت.

گسسته انجام پذیرد، تعداد گام‌های زمانی که در آن گام‌های میراگرهای مغناطیسی در وضعیت High-State قرار دارند، به راحتی قابل محاسبه است. با بررسی نسبت تعداد گام‌های با وضعیت High-State به تعداد کل گام‌های زمانی تحلیل تاریخچهی زمانی برای قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک، مطابق شکل‌های ۶ و ۷ مشخص شده است که نسبت تعداد گام‌های زمانی که میراگرهای مغناطیسی در وضعیت High-State قرار می‌گیرند، در قانون کنترل اسکای هوک بیشتر از قانون کنترل گروندهوک است. از طرفی، مطابق نتایج به دست آمده مشاهده شده است که رفتار میراگر مغناطیسی طبقه‌ی اول با سایر طبقات متفاوت است؛ زیرا در تعیین وضعیت میراگر مغناطیسی طبقه‌ی اول، از اطلاعات سرعت زمین استفاده می‌شود و این موضوع باعث می‌شود تا قانون کنترل گروندهوک تعداد گام‌های زمانی بیشتری را نسبت به قانون کنترل اسکای هوک برای میراگر طبقه‌ی اول نتیجه دهد.

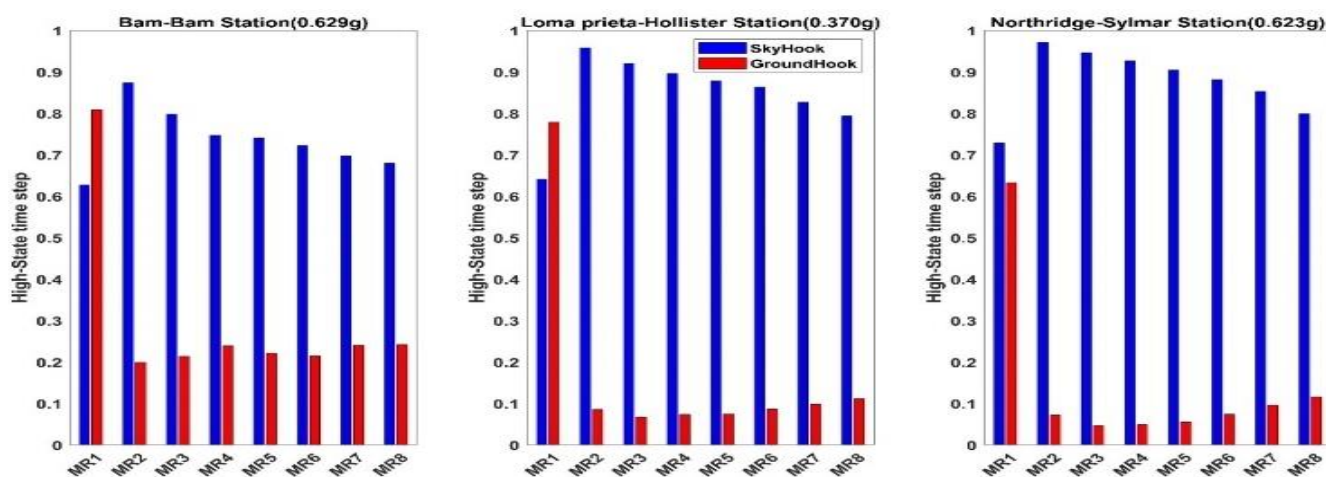
یکی از موضوعات مهم در سیستم‌های کنترل نیمه فعال مجهز به میراگرهای مغناطیسی، استفادهی بیشینه از ظرفیت میراگرهاست. با توجه به پارامترهای مدل سازی میراگرهای مغناطیسی در پژوهش حاضر، تأمین نیروی کنترل معادل ۱۰۰ کیلونیوتن توسط میراگرها در طول بارگذاری زلزله، مورد انتظار است. در شکل‌های ۸ الی ۱۳، تاریخچهی زمانی نیروی کنترلی میراگرهای

ترکیبی به صورت دو حالت و پیوسته، به ترتیب ولتاژها به صورت (۰ و ۵ ولت) و (۰ تا ۵ ولت) در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۵، راستی آزمایی رفتار میراگرهای مغناطیسی جهت تولید نیروی کنترلی ۱۰۰ کیلونیوتن ارائه شده است.

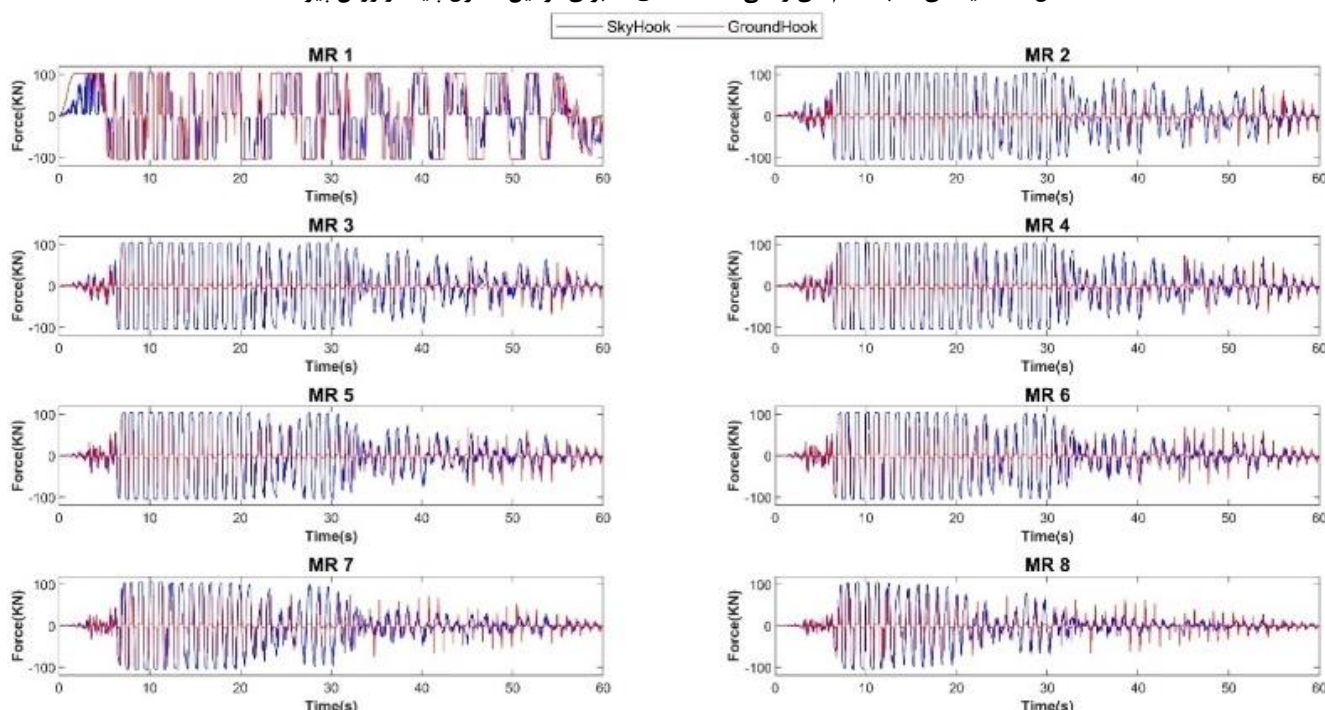
۱.۴. ارزیابی عملکرد قوانین کنترل پایه

برای سازهی در نظر گرفته شده، حس گرهای سرعت و شتاب تعبیه شده‌اند. سرعت سنج‌ها برای دریافت اطلاعات سرعت طبقات و زمین و استفاده از آن‌ها در تعیین وضعیت سازه طبق قوانین کنترلی، و شتاب سنج برای دریافت اطلاعات شتاب زمین جهت استفاده در قوانین کنترل پیوسته استفاده شده‌اند. در قانون کنترل دو حالت، قرار گرفتن میراگر مغناطیسی در وضعیت High-State به منزلهی تنظیم ولتاژ برابر با ۵ ولت است. اما در قانون کنترل پیوسته، قرار گرفتن میراگر مغناطیسی در وضعیت High-State، ولتاژ را در محدودهی ۰ تا ۵ ولت تنظیم می‌کند. در صورتی که میراگرهای مغناطیسی در وضعیت Low-State باشند، ولتاژ برابر با صفر ولت تنظیم می‌شود.

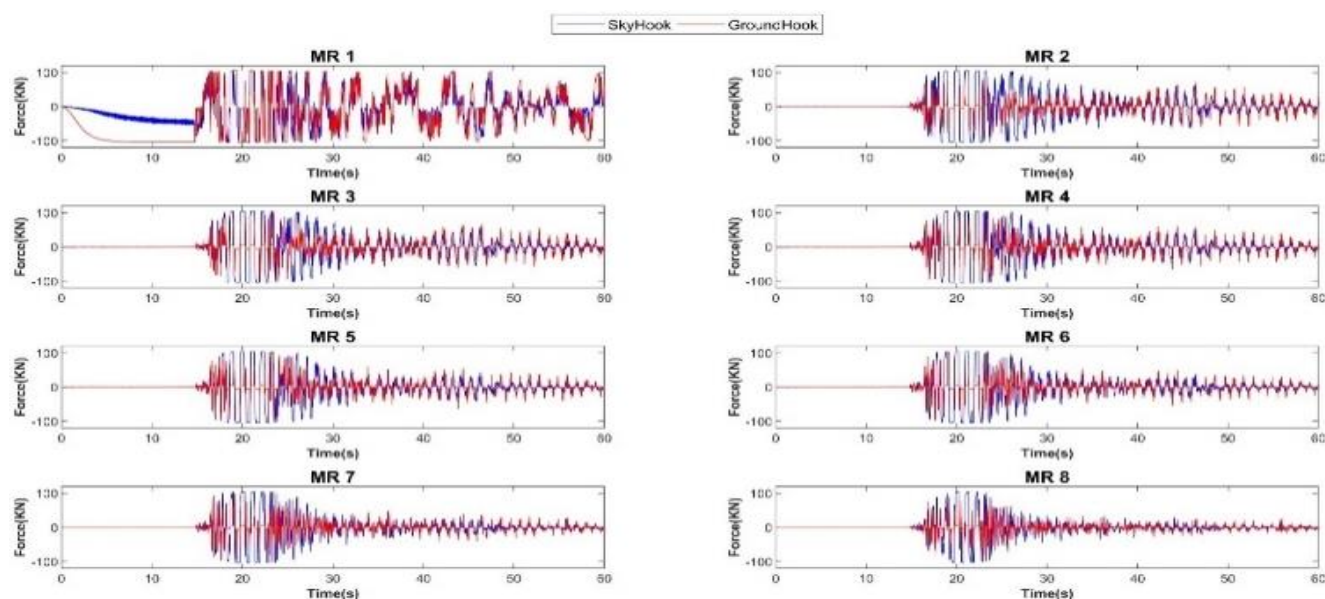
در تحلیل تاریخچهی زمانی سازه، تعیین وضعیت سازه در هر لحظه امکان پذیر است. در صورتی که تحلیل مطابق گام‌های زمانی رکورد شتاب زلزله به صورت



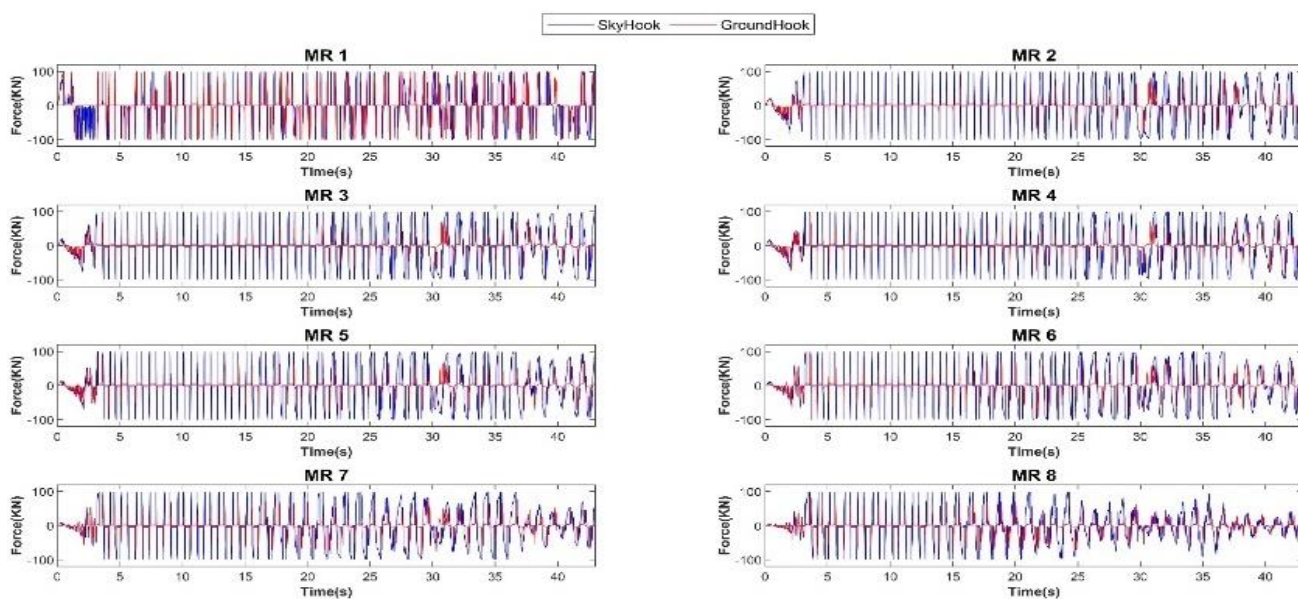
شکل ۷. مقایسه‌ی نسبت گام‌های زمانی High-State برای قوانین کنترل پایه در روش پیوسته.



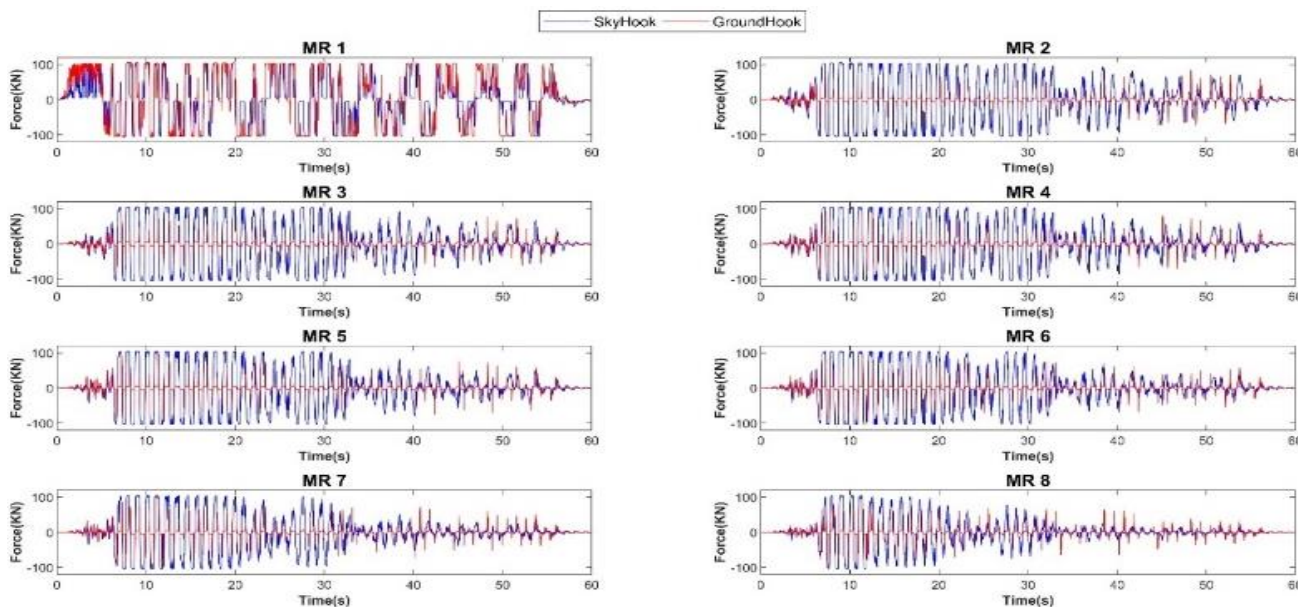
شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دو حالتی قوانین کنترل (زلزله‌ی لوما-پریتا).



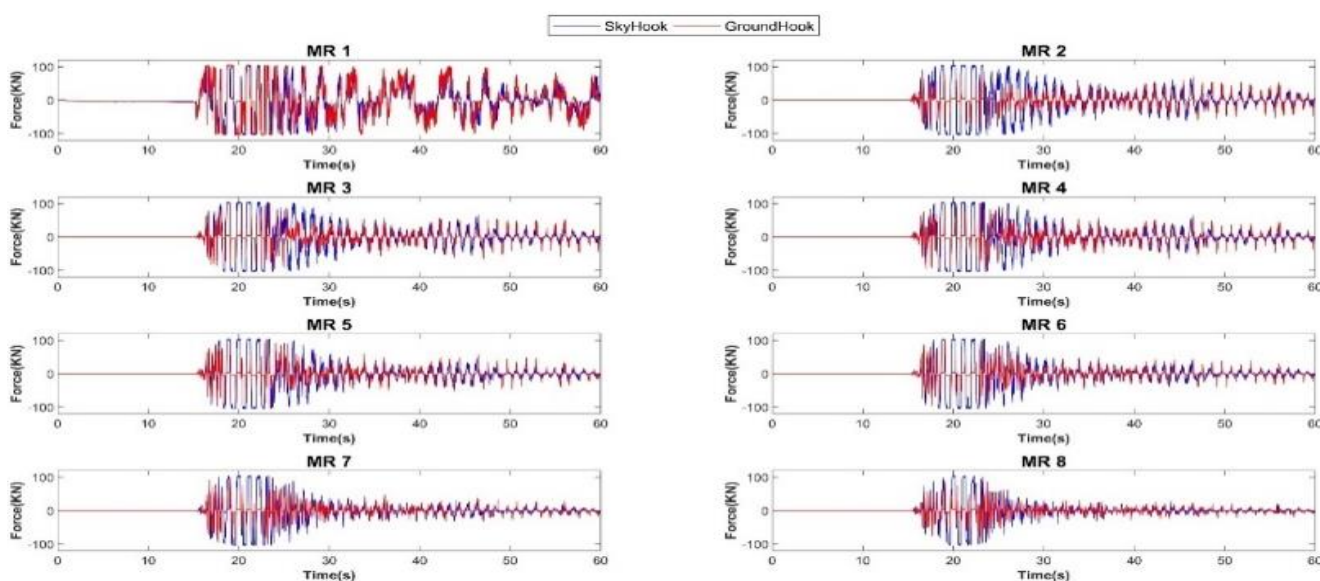
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دو حالتی قوانین کنترل (زلزله‌ی بم).



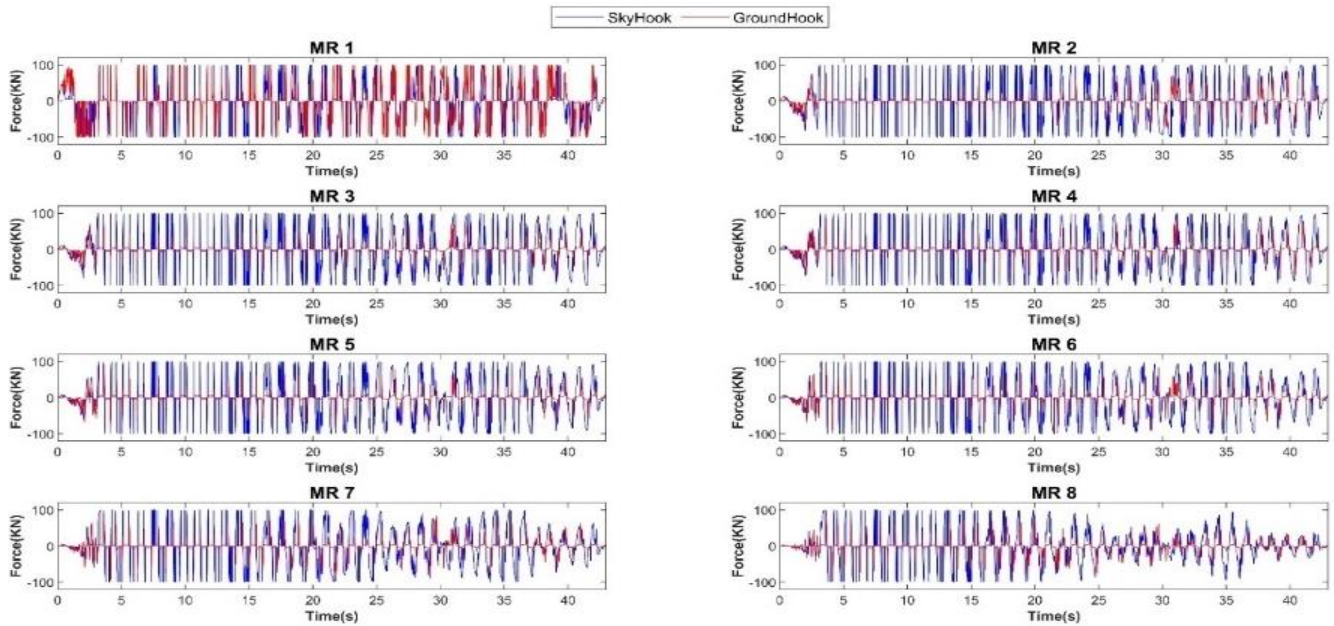
شکل ۱۰. تاریخچه نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دو حالتی قوانین کنترل (زلزله‌ی نورث‌ریج).



شکل ۱۱. تاریخچه نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته‌ی قوانین کنترل (زلزله‌ی لوما-پریتا).



شکل ۱۲. تاریخچه نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته‌ی قوانین کنترل (زلزله‌ی بم).



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته‌ی قوانین کنترل (زلزله‌ی نورتریج).

$$FRR = \frac{\sum_{i=1}^r (RMS_f)_c(i)}{\sum_{i=1}^r CMR(i)} \quad (20)$$

که در آن‌ها، اندیس‌های C و uc به ترتیب برای سازه‌های کنترل شده و کنترل نشده به کار رفته‌اند. از طرفی، اندیس‌های f ، a ، v ، و d به ترتیب بیانگر نیرو، شتاب، سرعت، و جابجایی هستند.

میانگین پاسخ‌های جابجایی، سرعت، شتاب، و نیروی کنترلی با استفاده از جذر میانگین مربعات $(RMS)^{19}$ محاسبه شده‌اند. جهت محاسبه‌ی نسبت پاسخ نیروی کنترلی، نرمال‌سازی با استفاده از مجموع ظرفیت میراگرهای مغناطیسی $(CMR)^{20}$ انجام شده است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نسبت پاسخ‌های سازه بر حسب سهم متفاوت قانون کنترل اسکای‌هوک مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، نسبت پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب تا حد زیادی نزدیک به هم به دست آمده‌اند و با افزایش مقدار α تا محدوده‌ی مشخصی (در حدود $0.9 \sim 1$)، کاهش یافته‌اند. اما در مقابل، نسبت نیروی کنترلی تا محدوده‌ی اخیر افزایش یافته است. بنابراین، مفهوم بهینه‌سازی سهم هر یک از قوانین اسکای‌هوک و گروندهوک و یافتن α_{opt} با در نظر گرفتن تابع هزینه‌ی متشکل از نیرو و جابجایی معنا پیدا می‌کند.

با بهینه‌سازی سهم قانون کنترل اسکای‌هوک (پارامتر α) در قانون کنترل ترکیبی براساس توابع هزینه با وزن‌دهی متفاوت بین نیرو و جابجایی، α_{opt} و مقدار تابع هزینه‌ی متناظر محاسبه شده است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، تغییرات تابع هزینه بر حسب دو پارامتر α و W مشاهده می‌شوند؛ که مطابق نمودارهای مذکور، با افزایش وزن نیرو (W) در محاسبه‌ی تابع هزینه، مقدار تابع هزینه کاهش یافته است. در واقع، در یک α ثابت، با افزایش مقدار W تابع هزینه کاهش یافته است. زمانی که وزن جابجایی در بهینه‌سازی بیشتر در نظر گرفته

مغناطیسی برای قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، برخلاف قانون گروندهوک، در قانون اسکای‌هوک از ظرفیت اسمی (۱۰۰ کیلو نیوتن) تمامی میراگرها استفاده شده است. عملکرد میراگرهای تعبیه‌شده در طبقات، به جای‌گیری آن‌ها، سرعت طبقه، و پارامترهای مدل بستگی دارد. بنابراین، با توجه به استفاده از سرعت زمین در محاسبه‌ی نیروی کنترلی میراگر طبقه‌ی اول، رفتار متفاوت میراگر اخیر محسوس است.

۲.۴. ارزیابی عملکرد قانون کنترل ترکیبی بهینه

در استفاده از قانون کنترل ترکیبی، با ترکیب قوانین پایه‌ی اسکای‌هوک و گروندهوک، عملکرد سیستم کنترلی می‌تواند بهبود یابد. تفاوت در انتخاب سهم هر یک از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک موجب تغییر رفتار سازه و سیستم کنترلی می‌شود. با تعریف نسبت‌های پاسخ^{۱۸} جابجایی (DRR) ، سرعت (VRR) ، شتاب (ARR) ، و نیروی کنترلی (FRR) ، عملکرد قانون کنترل ترکیبی با مقدار ضریب α قابل ارزیابی است. نسبت‌های پاسخ سازه به صورت روابط ۱۷ الی ۲۰ تعریف می‌شوند:

$$DRR = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_d)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_d)_{uc}(i)} \quad (17)$$

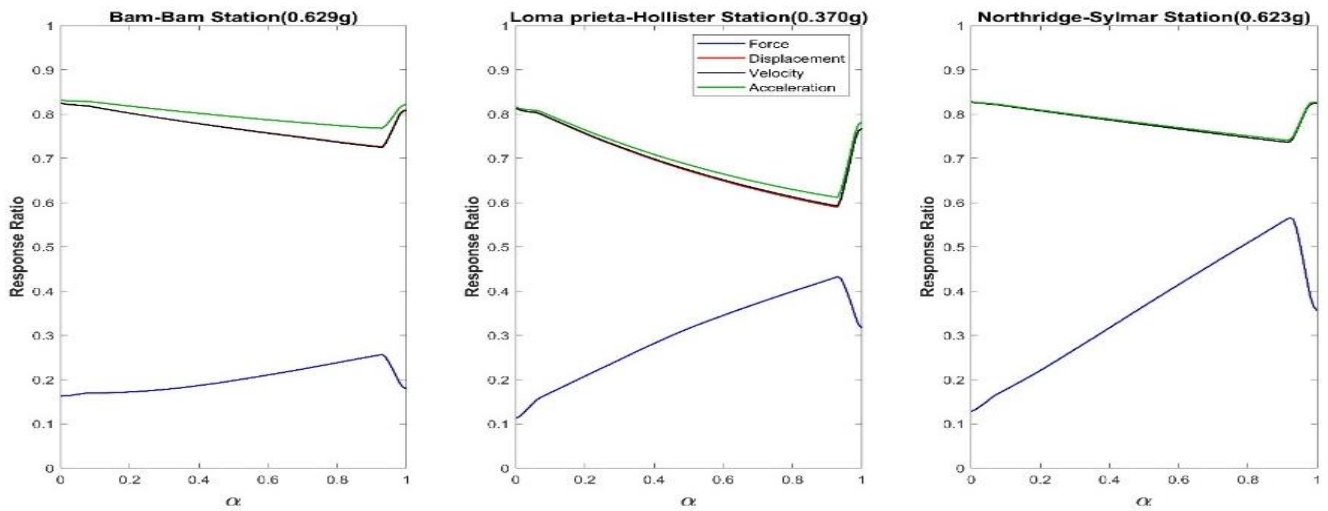
$$VRR = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_v)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_v)_{uc}(i)} \quad (18)$$

$$ARR = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_a)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_a)_{uc}(i)} \quad (19)$$

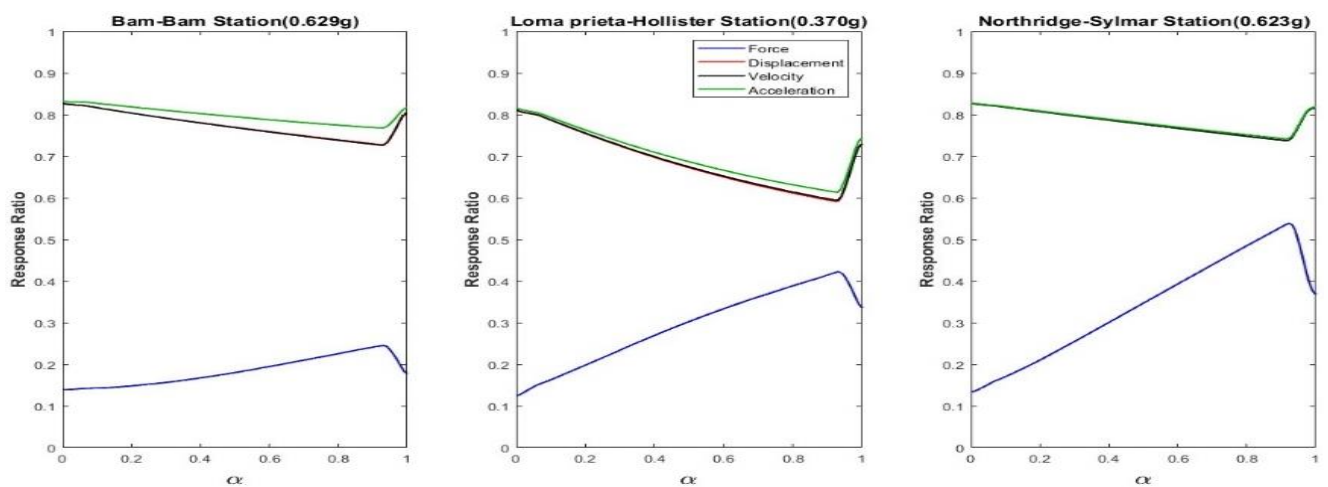
²⁰ Capacity of MR Dampers

¹⁸ Response ratio

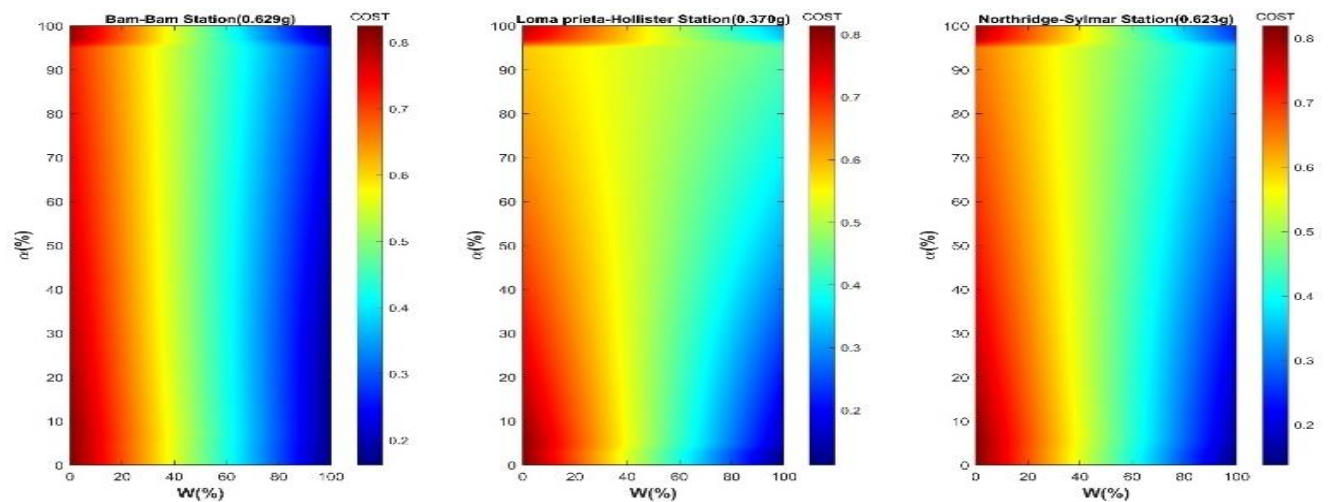
¹⁹ Root Mean Square



شکل ۱۴. تغییرات نسبت‌های پاسخ سازه بر حسب α برای قانون کنترل ترکیبی دو حالت.



شکل ۱۵. تغییرات نسبت‌های پاسخ سازه بر حسب α برای قانون کنترل ترکیبی پیوسته.

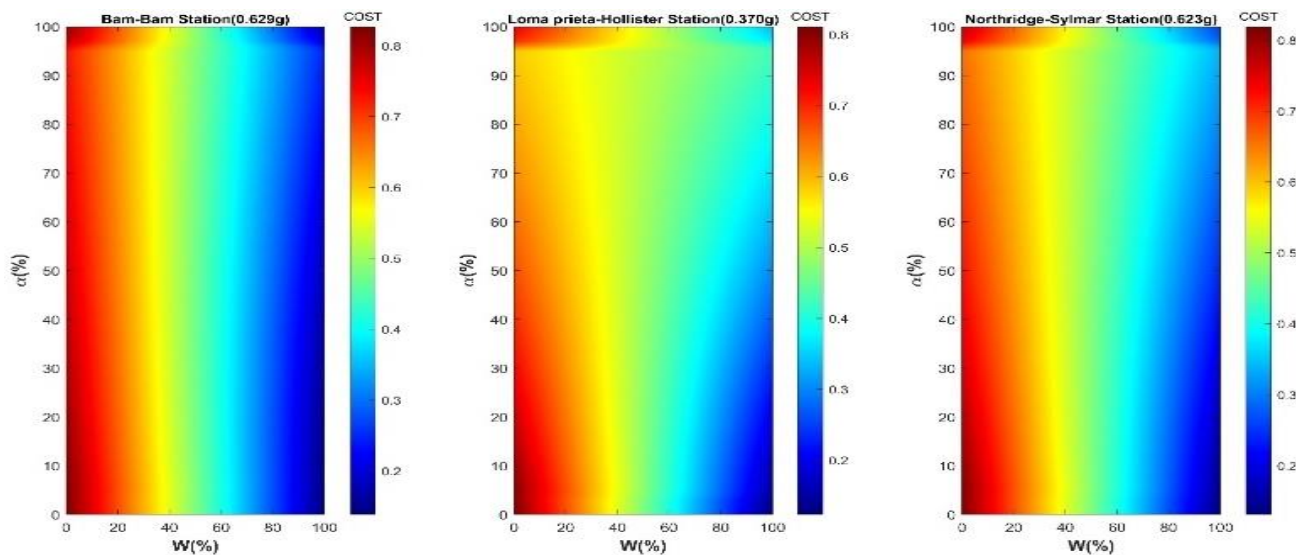


شکل ۱۶. تغییرات تابع هزینه براساس پارامترهای W و α در قانون کنترل ترکیبی دو حالت.

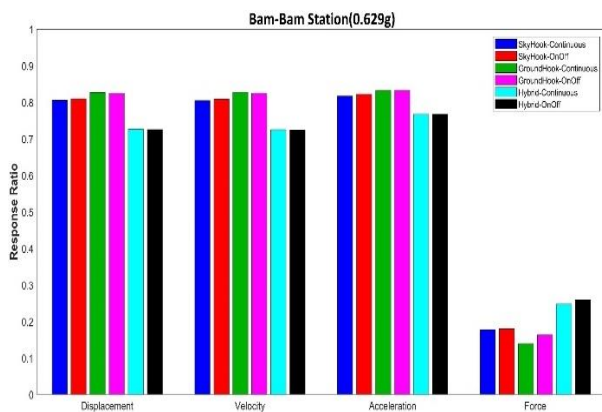
صعودی می‌شود. بنابراین، نتیجه می‌شود قانون کنترل اسکای‌هوک در کنترل جابجایی سازه مؤثر است؛ ولی در قانون کنترل گروندهوک، نیروی کنترلی کمتری نسبت به قانون کنترل اسکای‌هوک مصرف می‌شود.

با توجه به اهمیت کاهش جابجایی سازه با کمینه‌ی نیروی کنترلی ممکن، معمولاً وزن نیرو و جابجایی یکسان فرض می‌شوند. با فرض یکسان بودن وزن

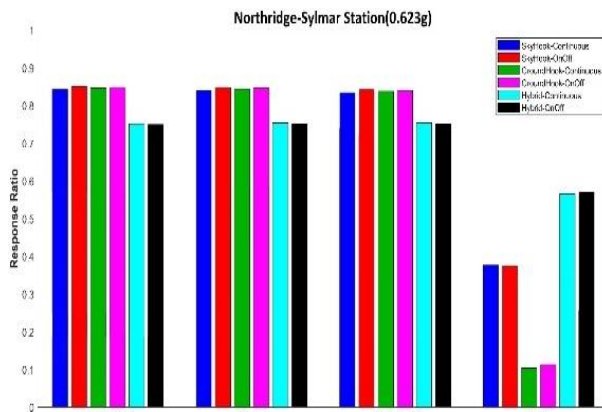
می‌شود، در یک وزن ثابت، مقدار تابع هزینه با افزایش α ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد؛ اما روند اخیر زمانی که وزن نیرو در بهینه‌سازی بیشتر است، برعکس می‌شود. از طرفی، در حالت‌هایی که وزن جابجایی در تابع هزینه بیشتر در نظر گرفته می‌شود، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در حدود ۹۵٪ است. اما زمانی که وزن نیرو در تابع هزینه افزایش پیدا می‌کند، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک نزولی و سهم بهینه‌ی قانون کنترل گروندهوک



شکل ۱۷. تغییرات تابع هزینه براساس پارامترهای W و α در قانون کنترل ترکیبی پیوسته.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله‌ی بم.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله‌ی نورتریج.

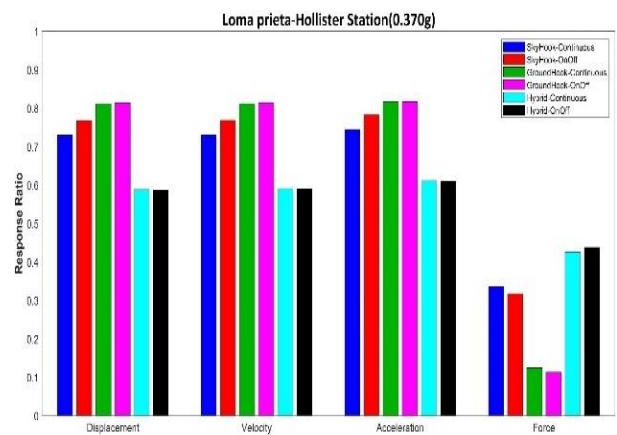
جابجایی، سرعت، و شتاب سازه تقریباً مشابه است؛ اما قانون کنترل ترکیبی پیوسته می‌تواند با نیروی کنترلی کمتری چنین نتیجه‌ای را به‌دست دهد. بنابراین، قانون کنترل ترکیبی بهینه به روش پیوسته می‌تواند به‌عنوان یک قانون کنترل ساده و سودمند استفاده شود.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بررسی ترکیب بهینه از قوانین کنترل پایه در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی صورت گرفته و

جدول ۳. مقادیر بهینه‌ی پارامتر α .

Hybrid control law	Earthquake	α_{opt}
on-off	Loma-prieta	94.83%
	Bam	94.75%
	Northridge	95.51%
Continuous	Loma-prieta	94.68%
	Bam	95.03%
	Northridge	94.89%



شکل ۱۸. مقایسه‌ی نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله‌ی لوما پریتا.

نیرو و جابجایی ($W=0.5$) در محاسبه‌ی تابع هزینه، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی دو حالت و پیوسته در جدول ۳ ارائه شده است.

با مقایسه‌ی قوانین کنترل اسکای‌هوک، گروندهوک، و ترکیبی به دو روش دو حالت و پیوسته مطابق شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ نتیجه می‌شود که قانون کنترل ترکیبی در کاهش پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب سازه می‌تواند مؤثر واقع شود. اگرچه نیروی کنترلی مصرفی در قوانین کنترلی مذکور بیشتر از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک است، اما میراگرهای مغناطیسی به‌کاررفته، ظرفیت تأمین چنین نیرویی را دارند. با مقایسه‌ی روش‌های دو حالت و پیوسته در قانون کنترل ترکیبی مشخص می‌شود که عملکرد آن‌ها در کاهش پاسخ‌های

گروندهوک است. در مورد قانون کنترل ترکیبی به روش‌های پیوسته و دو حالت نشان داده شده است که اگر در محاسبه‌ی تابع هزینه، وزن جابجایی از نیرو بیشتر در نظر گرفته شود، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی در حدود ۹۵٪ به دست می‌آید. با مقایسه‌ی پاسخ‌های سازه در استفاده از قانون کنترل ترکیبی به روش‌های دو حالت و پیوسته مشخص شد که قانون کنترل ترکیبی پیوسته می‌تواند با نیروی کنترلی کمتری نسبت به قانون کنترل ترکیبی دو حالت، پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب را کاهش دهد.

عملکرد مناسب آن برای سازه‌های ساختمانی ارزیابی شده است. یک سازه‌ی ۸ طبقه تحت ارتعاش سه زلزله‌ی لوما- پریتا، بم، و نورث‌ریچ بررسی شده است. الگوریتم کنترل سازه با استفاده از قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته، قانون کنترل ترکیبی به روش دو حالت، و قوانین پایه‌ی اسکای‌هوک و گروندهوک به روش‌های دو حالت و پیوسته تعریف شده است. سهم هر کدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی با استفاده از الگوریتم جستجوی الگو بهینه‌سازی و قانون کنترل ترکیبی بهینه و پیوسته برای سازه‌ی موردنظر ارائه شده است. نتایج نشان داده‌اند که قانون کنترل اسکای‌هوک در کاهش پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب مؤثر است و بهتر از قانون کنترل

References- منابع

1. Rousta, A.M., 2023. Seismic retrofitting of steel moment-resisting frames (SMRFs) using steel pipe dampers. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 87(1), pp.69-84. DOI: [10.12989/sem.2023.87.1.069](https://doi.org/10.12989/sem.2023.87.1.069)
2. Ghaffari, A.H. and Ghaffarzadeh, H., 2023. Mine blast-induced ground motion response reduction using semi-active devices. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 32(8-9), p.e2005. DOI: [10.1002/tal.2005](https://doi.org/10.1002/tal.2005)
3. Casciati, F., Magonette, G. and Marazzi, F., 2006. Technology of semiactive devices and applications in vibration mitigation. *John Wiley & Sons*. DOI: [10.1002/0470022914](https://doi.org/10.1002/0470022914)
4. Sohn, H.C., Hong, K.S. and Hedrick, J.K., 2000, September. Semi-active control of the Macpherson suspension system: hardware-in-the-loop simulations. In *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications*. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37162) (pp. 982-987). IEEE. DOI: [10.1109/CCA.2000.897600](https://doi.org/10.1109/CCA.2000.897600)
5. Khoshnoudian, F. and Mehrparvar, B., 2013. A new control algorithm to protect nonlinear base-isolated structures against earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(18), pp.1376-1389. DOI: [10.1002/tal.1012](https://doi.org/10.1002/tal.1012)
6. Moutinho, C., 2015. Testing a simple control law to reduce broadband frequency harmonic vibrations using semi-active tuned mass dampers. *Smart Materials and Structures*, 24(5), p.055007. DOI: [10.1088/0964-1726/24/5/055007](https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055007)
7. Ghaffarzadeh, H., Aran, A. and Javadi Amoodizaj, F., 2024. Phase motion predictive control for a structure equipped with MR dampers. *Journal of Structural and Construction Engineering*. DOI: [10.22065/jsce.2024.451732.3388](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388)
8. Ferreira, F., Moutinho, C., Cunha, Á. and Caetano, E., 2018. Proposal of optimum tuning of semiactive TMDs used to reduce harmonic vibrations based on phase control strategy. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(4), p.e2131. DOI: [10.1002/stc.2131](https://doi.org/10.1002/stc.2131)
9. Yu, H., Sun, X., Xu, J. and Zheng, P., 2016. The time-delay coupling nonlinear effect in sky-hook control of vibration isolation systems using Magneto-Rheological Fluid dampers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, pp.4157-4166. DOI: [10.1007/s12206-016-0827-9](https://doi.org/10.1007/s12206-016-0827-9)
10. Liu, Y., Waters, T.P. and Brennan, M., 2005. A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances. *Journal of sound and vibration*, 280(1-2), pp.21-39. DOI: [10.1016/j.jsv.2003.11.048](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.048)
11. Valášek, M., Novak, M., Šika, Z. and Vaculin, O., 1997. Extended ground-hook-new concept of semi-active control of truck's suspension. *Vehicle system dynamics*, 27(5-6), pp.289-303. DOI: [10.1080/00423119708969333](https://doi.org/10.1080/00423119708969333)
12. Zhang, Y., Schauer, T., Wernicke, L., Wulff, W. and Bleicher, A., 2020. Facade-integrated semi-active vibration control for wind-excited super-slender tall buildings. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), pp.8395-8400. DOI: [10.1016/j.ifacol.2020.12.1585](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1585)
13. Viet, L.D., Nghi, N.B., Hieu, N.N., Hung, D.T., Linh, N.N. and Hung, L.X., 2014. On a combination of ground-hook controllers for semi-active tuned mass dampers. *Journal of Mechanical Science and*

- Technology*, 28, pp.2059-2064. DOI: [10.1007/s12206-014-0109-3](https://doi.org/10.1007/s12206-014-0109-3)
14. Koo, J.H., Ahmadian, M., Setareh, M. and Murray, T., 2004. In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers. *Journal of Vibration and Control*, 10(2), pp.163-174. DOI: [10.1177/1077546304032020](https://doi.org/10.1177/1077546304032020)
15. Kim, G.C. and Kang, J.W., 2011. Seismic response control of adjacent building by using hybrid control algorithm of MR damper. *Procedia Engineering*, 14, pp.1013-1020. DOI: [10.1016/j.proeng.2011.07.127](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.127)
16. Kim, H.S. and Kang, J.W., 2012. Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm. *Engineering Structures*, 41, pp.242-257. DOI: [10.1016/j.engstruct.2012.03.038](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.038)
17. Javadinasab, H.S., Salari, S. and Ghorbani-Tanha, A., 2014. Optimization of combination of sky-hook and ground-hook algorithms in semi-active control of steel frames. In *Proc., 6th World Conf. on Structural Control and Monitoring. Barcelona, Spain: International Center for Numerical Methods in Engineering*.
18. Rashidi, H., Khanlari, K., Zarfam, P. and Ghafory-Ashtiany, M., 2021. A novel approach of active control of structures based on the critically damped condition. *Journal of Vibration and Control*, 27(13-14), pp.1511-1523. DOI: [10.1177/1077546320944300](https://doi.org/10.1177/1077546320944300)
19. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D., 2001. Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers. *Journal of engineering Mechanics*, 127(11), pp.1152-1164. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:11\(1152\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:11(1152))