

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

حسین غفارزاده^{*}، سمیرا صفی خانلو^۲، علیرضا آران^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- ghaffar@tabrizu.ac.ir

۲- s.safikhanelou@gmail.com

۳- a.aran@tabrizu.ac.ir

چکیده:

میراگرهای مغناطیسی به عنوان یکی از سیستم‌های کنترل نیمه فعال با قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی، رفتار هوشمندی از خود نشان می‌دهند و با تغییر اندازه میدان مغناطیسی، کنترل سازه انجام می‌شود. جهت پیاده‌سازی این سیستم‌های کنترلی، الگوریتم‌ها و قوانین کنترل مختلفی مانند قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک ارائه شده است. به منظور بهبود قوانین کنترل مذکور، ترکیبی از آن‌ها می‌تواند به دو روش دو حالته و پیوسته مورد استفاده قرار گیرد. تعیین سهم هر کدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی یک چالش می‌باشد. هدف این پژوهش، استفاده از الگوریتم جستجوی الگو به منظور بهینه‌سازی قانون کنترل ترکیبی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که اگر در محاسبه تابع هزینه وزن جابه‌جایی از نیرو بیشتر در نظر گرفته شود، سهم بهینه قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی حدوداً ۹۵٪ بدست می‌آید. همچنین با مقایسه قانون کنترل ترکیبی دو حالته و پیوسته مشخص می‌شود که کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب در هر دو روش تقریباً یکسان است، اما نیروی کنترلی مورد نیاز در قانون کنترل ترکیبی پیوسته کمتر می‌باشد.

واژگان کلیدی:

کنترل نیمه فعال، میراگر مغناطیسی، اسکای‌هوک، گروندهوک، الگوریتم جستجوی الگو.

^{*} حسین غفارزاده، استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز.

ایمیل: ghaffar@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

The optimal hybrid controller based on ground acceleration for a structure equipped with MR dampers

Hossein Ghaffarzadeh ^١, Samira Safikhanelou ^٢, Alireza Aran ^٣

^١- Professor, Faculty of Civil Engineering of Tabriz University, Tabriz, Iran

^٢- Master of science, Faculty of Civil Engineering of Tabriz University, Tabriz, Iran

^٣- PhD student., Faculty of Civil Engineering of Tabriz University, Tabriz, Iran.

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 ٠,٩٥.

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

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

در سال‌های اخیر، کنترل ارتعاش سازه‌های تحت بارگذاری باد و زلزله به طور گسترده توسط بسیاری از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس، انواع مختلفی از دستگاه‌ها و الگوریتم‌های کنترلی با اهداف مختلف مانند مقاوم‌سازی سازه‌ها توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند [۱]. یکی از روش‌های کنترل سازه، روش کنترل نیمه‌فعال^۱ می‌باشد. در این روش، 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^۲ (MR) می‌باشد. میراگرهای مغناطیسی دستگاه‌های قابل کنترل و هوشمندی می‌باشند که دارای مایع مغناطیسی هستند. ویژگی این میراگرها 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 از این طریق اقدام به کنترل سازه می‌کنند. نیروی تولید شده 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 می‌باشد [۳].

قانون کنترل اسکای‌هوک در ابتدا برای کاهش ارتعاشات وارد شده از سطح جاده به بدنه خودرو استفاده می‌شد [۴]. پس از گذشت زمان، از این قانون در سازه‌های عمرانی نیز استفاده شد. خشنودبان

و مهرپرور (۲۰۱۳) تعمیم‌یافته قانون کنترل اسکای‌هوک را برای سازه‌های مجهز به جداساز لرزه‌ای بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که رویکرد کنترل نیمه‌فعال با استفاده از قانون کنترل اسکای‌هوک نتایج بهتری نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال دارد. بررسی آن‌ها نشان داد که روش بکار گرفته شده برای بهبود عملکرد اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مؤثر است [۵]. تعمیم قانون کنترل اسکای‌هوک به قوانین کنترل فاز^۶ ساده نیز انجام شده است [۷ و ۶]. در قانون کنترل اسکای‌هوک، سرعت طبقه بالا و سرعت نسبی بین دو طبقه مجاور سازه عمرانی نقش اساسی را در تعیین وضعیت سیستم دارند. با تعمیم این قانون به قانون کنترل فاز، جابه‌جایی و شتاب طبقه پایین می‌تواند 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 درجه آزاد انجام می‌شود. آنالیز خارج از تنظیم، آنالیز حساسیت، تأثیر تأخیر زمانی و پارامترهای بهینه سیستم کنترل نیمه‌فعال جرم تنظیم شونده برای قوانین کنترل فاز انجام شده است [۸]. در پژوهش دیگری، تأخیر زمانی و غیرخطی بودن رفتار میراگر مغناطیسی بر مبنای قانون کنترل اسکای‌هوک بررسی شده است [۹]. قانون کنترل اسکای‌هوک به دو روش خاموش-روشن^۷ (دو حالت) و پیوسته^۸ 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 این دو مقدار نیز در نظر گرفته می‌شوند. مقایسه قانون کنترل اسکای‌هوک با قانون کنترل تعادل^۹ در دو روش روشن دو حالت و پیوسته انجام شده است [۱۰].

قانون کنترل گروندهوک برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال مورد توجه بوده است. این قانون نیز مشابه قانون کنترل اسکای‌هوک در ابتدا برای کنترل ارتعاشات وارد بر خودرو بکار گرفته شد [۱۱]. این قانون به دو صورت گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی و گروندهوک مبتنی بر سرعت استفاده شده است. در پژوهشی که برای سازه‌های

^۶ Phase control laws

^۷ On-Off

^۸ Continuous

^۹ Balance control law

^۱ Semi-active control

^۲ Magnetorheological dampers

^۳ Control laws

^۴ Skyhook

^۵ Groundhook

می‌شود. جهت بهینه‌سازی وزن هر کدام از قوانین کنترلی پایه، از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی الگو^۲ استفاده شده و به‌عنوان یک قانون کنترل ترکیبی بهینه معرفی می‌شود.

۲- قوانین کنترل

۲-۱- قوانین کنترل پایه

از الگوریتم‌ها و قوانین کنترل نیمه‌فعال جهت تعیین وضعیت سازه و کاهش ارتعاشات وارد بر آن استفاده می‌شود. یکی از این قوانین کنترل، قانون کنترل اسکای‌هوک می‌باشد. در استفاده از این قانون برای سازه‌های ساختمانی، از سرعت مطلق طبقه بالا و سرعت نسبی دو طبقه مجاور برای تعیین وضعیت نیروی کنترلی استفاده می‌شود. دلیل نامگذاری این قانون نیز استفاده از اطلاعات طبقه بالاتر می‌باشد. قانون کنترل اسکای‌هوک به دو روش دو حالتی و پیوسته بکار می‌رود. در روش دو حالتی دو مقدار مرزی حد بالا (High state) و حد پایین (Low state) در نظر گرفته می‌شوند و در روش پیوسته علاوه بر این دو مقدار حدی، مقادیر مابین آن‌ها نیز می‌توانند لحاظ شوند. در صورت پیاده‌سازی این قانون برای میراگرهای مغناطیسی، مقادیر مرزی حد بالا و پایین با ماکزیمم و مینیمم ولتاژ قابل تنظیم میراگر مغناطیسی تعریف می‌شوند. در شکل ۱ وضعیت مختلف دو جرم مجاور مطابق قانون کنترل اسکای‌هوک نمایش داده شده است.

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

در روش پیوسته قانون کنترل اسکای‌هوک، مقادیر ولتاژ ورودی به سیستم بین دو مقدار $V_{\min}$ و $V_{\max}$ می‌تواند متغیر باشد. به‌عنوان یک پیشنهاد، مقادیر مابین این دو ولتاژ می‌توانند با استفاده از ضریب اصلاحی^۳ (MF) تأمین شود. این ضریب عددی بین صفر و یک می‌باشد و در این پژوهش بصورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این پژوهش، $\ddot{x}_{\text{مین}}$ یک درصد شتاب مبنای طرح برای پهنه

بلند تحت بارگذاری باد انجام گرفت، قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی و سرعت با یکدیگر مقایسه شدند و عملکرد قانون کنترل گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی بهتر ارزیابی شد [۱۲]. با بررسی ترکیب قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی و سرعت و تعمیم‌یافته آن، عملکرد بهتری برای کنترل‌کننده بدست آمده است [۱۳]. قانون کنترل گروندهوک نیز مانند قانون کنترل اسکای‌هوک به دو روش دو حالتی و پیوسته کاربرد دارد. در تعریف پایه این قانون کنترلی، تعیین وضعیت سیستم با استفاده از سرعت طبقه پایین و سرعت نسبی دو طبقه مجاور سازه انجام می‌شود. کو و همکاران (۲۰۰۴) عملکرد قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی و سرعت را با استفاده از دو روش دو حالتی و پیوسته مقایسه کردند [۱۴].

به‌منظور تکمیل قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک جهت تعیین وضعیت سیستم، قانون کنترل ترکیبی^۱ که تلفیقی از قوانین مذکور است، بکار گرفته می‌شود. قانون کنترل ترکیبی به روش دو حالتی برای میراگرهای مغناطیسی مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد مناسب آن در مقایسه با قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک سنجیده شده است [۱۵]. ترکیب قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی به روش دو حالتی در طراحی کنترل‌کننده فازی مورد استفاده قرار گرفته و بهبود رفتار کنترل‌کننده معرفی شده در مقایسه با قوانین اسکای‌هوک و گروندهوک نشان داده شده است [۱۶]. وزن‌دهی بهینه قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی مهم‌ترین بخش تعریف قانون کنترل برای سیستم کنترل نیمه‌فعال است. بدین منظور، جوادی نسب و همکاران (۲۰۱۴) وزن بهینه هر کدام از قوانین اسکای‌هوک و گروندهوک را در کنترل ترکیبی به روش دو حالتی بررسی کردند [۱۷].

در این پژوهش، قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته مبتنی بر تصمیم‌گیری براساس شتاب زمین برای سازه مجهز به میراگر مغناطیسی مورد ارزیابی قرار گرفته و با قوانین کنترل ترکیبی دو حالتی، اسکای‌هوک و گروندهوک دو حالتی و پیوسته مقایسه

^۳ Modify factor

^۱ Hybrid control law

^۲ Pattern search algorithm

استفاده می‌شود. در شکل ۲ وضعیت مختلف دو جرم مجاور مطابق قانون کنترل گروندهوک نمایش داده شده است. این قانون نیز به دو روش دوحالته و پیوسته بکار می‌رود که به ترتیب در روابط زیر مشخص شده‌اند.

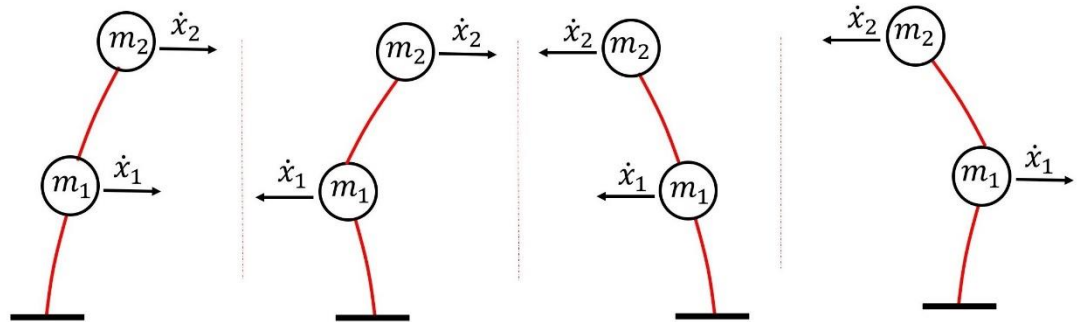
$$V_{\text{GroundHook}} = \begin{cases} V_{\max} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{\text{rel}} \leq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{\text{rel}} > 0 \end{cases} \quad (۴)$$

$$V_{\text{GroundHook}} = \begin{cases} V_{\min} + MF(V_{\max} - V_{\min}) & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{\text{rel}} \leq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{\text{rel}} > 0 \end{cases} \quad (۵)$$

با خطر نسبی خیلی زیاد مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (۰/۳۵g) در نظر گرفته شده است. در نتیجه، ولتاژ میراگرهای مغناطیسی براساس قانون کنترل اسکای‌هوک به روش پیوسته بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{\text{SkyHook}} = \begin{cases} V_{\min} + MF(V_{\max} - V_{\min}) & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0 \end{cases} \quad (۳)$$

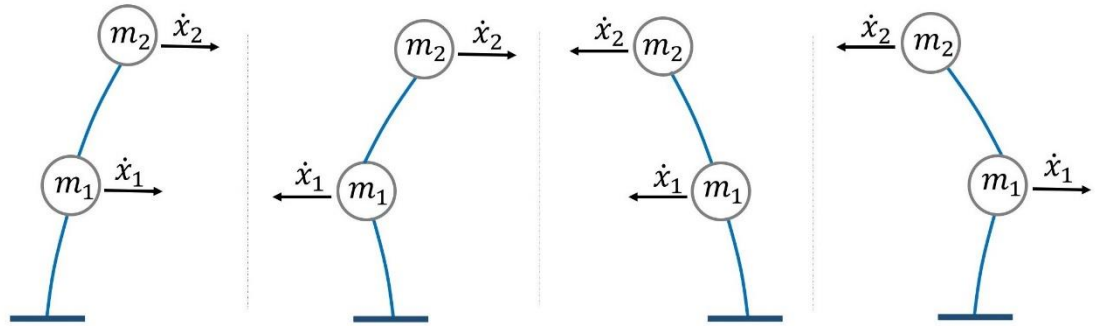
قانون کنترل گروندهوک یکی دیگر از قوانین کنترل پایه می‌باشد که در سازه‌های ساختمانی برای تعیین وضعیت نیروی کنترلی از سرعت مطلق طبقه پایین و سرعت نسبی دو طبقه مجاور



$ \dot{x}_2 > \dot{x}_1 $	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0$ High state	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0$ High state	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0$ High state	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0$ High state
$ \dot{x}_2 < \dot{x}_1 $	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0$ Low state	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0$ High state	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0$ Low state	$\dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0$ High state

شکل ۱- توصیف حالات مربوط به قانون کنترل اسکای‌هوک

Figure ۱- Description of the Skyhook control law



$ \dot{x}_2 > \dot{x}_1 $	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0$ Low state	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0$ High state	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0$ Low state	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0$ High state
$ \dot{x}_2 < \dot{x}_1 $	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0$ High state	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0$ High state	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0$ High state	$\dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0$ High state

شکل ۲- توصیف حالات مربوط به قانون کنترل گروندهوک

Figure ۲- Description of the Groundhook control law

۲-۲- قانون کنترل ترکیبی بهینه

قوانین اسکای هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی، از الگوریتم جستجوی الگو می‌توان استفاده کرد. الگوریتم جستجوی الگو یک بهینه‌ساز مقاوم^۱ و سراسری^۲ است؛ بنابراین برای بهینه‌سازی قانون کنترل ترکیبی مناسب است. این الگوریتم دنباله‌ای از نقاط را محاسبه می‌کند تا به نقطه بهینه نزدیک شود. در هر مرحله، الگوریتم مجموعه‌ای از نقاط که به عنوان مش شناخته می‌شوند را در اطراف نقطه فعلی جستجو می‌کند. با استفاده از الگوی مشخص، حرکات نقاط در اطراف مش دنبال می‌شود تا تابع هدف^۳ بهبود یابد. اندازه 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 $0 \leq \alpha \leq 1$ می‌باشد، بنابراین متغیر مسئله بهینه‌سازی مقید است. تابع هدف در طراحی کنترل‌کننده بهینه ترکیبی می‌تواند بصورت زیر تعریف شود:

$$\text{Cost}(f_1, f_2) = Wf_1 + (100 - W)f_2 \quad (۷)$$

در قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک از سرعت مطلق یک طبقه استفاده شده که البته سرعت طبقه مجاور نیز در تعیین دستور کنترلی نقش مؤثری دارد. باتوجه به اینکه استفاده از سرعت مطلق دو طبقه مجاور می‌تواند در تعیین دستور کلی موجب بهبود پاسخ‌های سازه شود، قانون کنترل ترکیبی به‌عنوان قانون جامع‌تر ارائه می‌شود. این قانون با ترکیب دو قانون کنترل پایه باعث منطقی‌تر شدن دستور کنترلی می‌شود. در ترکیب این دو قانون، سهمی برای هر یک در نظر گرفته می‌شود. در رابطه زیر، نحوه محاسبه ولتاژ ورودی میراگرهای مغناطیسی مبتنی بر قانون کنترل ترکیبی ارائه شده است.

$$V_{\text{Hybrid}} = \alpha V_{\text{SkyHook}} + (1 - \alpha) V_{\text{GroundHook}} \leq V_{\text{max}} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، α بیانگر سهم قانون کنترل اسکای هوک در قانون کنترل ترکیبی است. جهت ارائه قانون کنترل ترکیبی بهینه، ضریب α بهینه‌سازی می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی سهم هر کدام از

^۳ Cost function

^۱ Robust

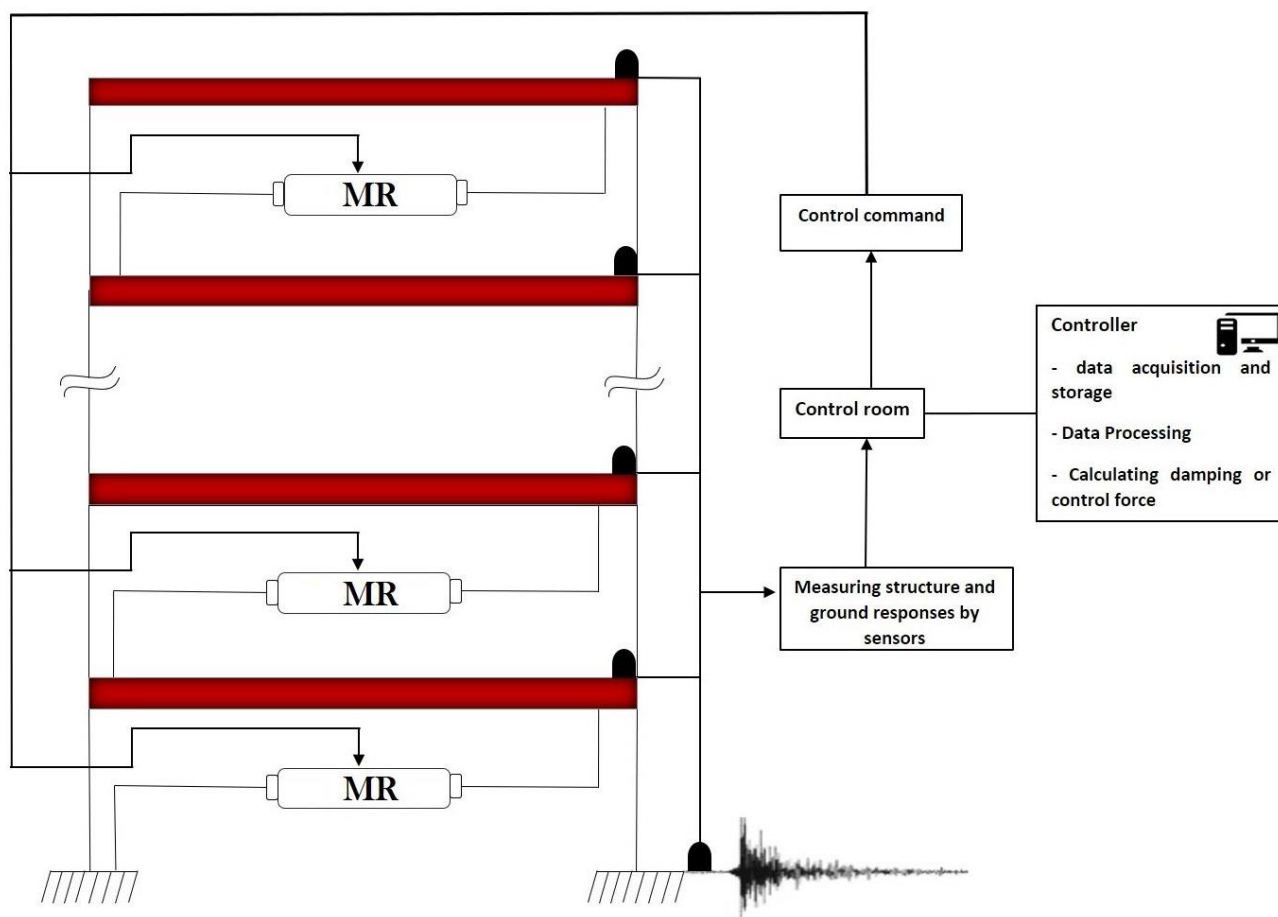
^۲ Global

دستگاه کنترل نیمه فعال (مانند میراگر مغناطیسی) بوجود آمده‌اند. وظیفه سنسورها در فرایند کنترل، اندازه‌گیری اطلاعات (مانند پاسخ سازه‌ها) می‌باشد. اطلاعات دریافت شده از سنسورها در کنترل کننده پردازش شده و باتوجه 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 می‌شود و فرایند کنترل سازه تکمیل می‌گردد. فرایند کنترل نیمه فعال سازه در شکل ۳ نشان داده شده است.

در رابطه f_1 و f_2 به ترتیب ترم مربوط به نیروی کنترلی و جابه‌جایی هستند که سهم هر کدام از آن‌ها در محاسبه تابع هزینه با پارامتر W مشخص می‌شود.

۳- پیاده‌سازی کنترل نیمه فعال برای سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی

سیستم‌های کنترل نیمه فعال به منظور کنترل سازه در برابر نیروهای وارده از اجزا و المان‌هایی تشکیل شده‌اند که هر کدام دارای وظیفه مشخصی هستند. این سیستم‌ها از سنسور، کنترل کننده و



شکل ۳- فرایند کنترل نیمه فعال سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی

Figure ۳- Semi-active control process of a structure equipped with MR dampers

۱-۳- معادلات حرکت

پاسخ‌های یک سازه ساختمانی که تحت نیروی ارتعاش زلزله قرار می‌گیرد را می‌توان از طریق حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر آن بدست آورد. یکی از روش‌های حل معادلات دیفرانسیل، روش فضای حالت^۱ می‌باشد. در این روش، معادله حرکت سازه ساختمانی که یک معادله مرتبه دوم است به معادله مرتبه اول با استفاده از متغیرهای حالت^۲ تبدیل می‌شود. معادله حرکت سازه ساختمانی جهت ایجاد فضای حالت بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} \dot{X}(t) \\ \ddot{X}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}_{2n \times r} F(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda \end{bmatrix}_{2n \times 1} \ddot{x}_g(t) \quad (۸)$$

در معادله فوق، M ، K و C به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی هستند و دارای ابعاد $n \times n$ می‌باشند که n بیانگر تعداد طبقات سازه است. $F(t)$ ماتریس نیروی میراگرهای مغناطیسی را نشان می‌دهد و ابعاد آن $r \times 1$ است که r بیانگر تعداد میراگرهای مغناطیسی است. $X(t)$ ، $\dot{X}(t)$ و $\ddot{X}(t)$ به ترتیب بردار جابه‌جایی، سرعت و شتاب طبقات سازه را مشخص می‌کنند و دارای ابعاد $n \times 1$ می‌باشند. $\ddot{x}_g(t)$ شتاب زمین و Λ نشان‌دهنده ضریب تأثیر زلزله با ابعاد $n \times 1$ می‌باشد. Γ ماتریس موقعیت میراگرها می‌باشد که از حاصلضرب $\bar{\Gamma}$ و θ بدست می‌آید. $\bar{\Gamma}$ یک ماتریس ثابت با ابعاد $n \times n$ است و θ وجود یا عدم وجود میراگر مغناطیسی در طبقه i ام را نشان می‌دهد و دارای ابعاد $n \times r$ است.

$$\Gamma = \bar{\Gamma}_{n \times n} \theta_{n \times n} \quad (۹)$$

$$\bar{\Gamma}_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -1 & i = j - 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (۱۰)$$

با استفاده از تغییر متغیر $\{Z(t)\} = \begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix}$ معادله ۸ بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{Z}(t) = [A]\{Z(t)\} + [B]F(t) - [D]\ddot{x}_g(t) \quad (۱۱)$$

۲-۳- مدل رفتاری میراگر مغناطیسی

میراگرهای مغناطیسی از جمله میراگرهای پرکاربرد هستند که با بهره‌گیری از مایعات کنترل‌پذیر، 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^۳ است. نیروی غیرخطی برای یک مدل ایده‌آل میراگر مغناطیسی را می‌توان از طریق معادله زیر بدست آورد.

$$F = C_0 \dot{x} + a z \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا، F ، $\dot{x}$ و C به ترتیب بیانگر نیرو، سرعت و میرایی هستند. z متغیری جهت توصیف تغییر شکل هیستریزس میراگرهای مغناطیسی است و بصورت معادله زیر تعریف می‌شود.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{z}| z^{n-1} - \beta |\dot{z}| z^n + A_0 \dot{x} \quad (۱۳)$$

در این رابطه γ و β پارامترهای شکی و A_0 شیب سیکل هیستریزس را نشان می‌دهد. درواقع نحوه انتقال رفتار خطی به غیرخطی توسط این پارامتر تعیین می‌شود.

پارامترهای C و a بصورت یک مدل خطی از ولتاژ مؤثر بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$a = \alpha_a + \alpha_b u \quad (۱۴)$$

$$C_0 = C_{0a} + C_{0b} u \quad (۱۵)$$

در روابط فوق، u ولتاژ واقعی می‌باشد. میراگرهای مغناطیسی باتوجه 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 در نظر گرفتن تأخیر زمانی با استفاده از فیلتر مرتبه اول بصورت زیر ارائه می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۱۶)$$

در این پژوهش جهت حل معادله ۱۳ و بدست آوردن پارامتر z ، از روش رانگ کوتا^۴ مرتبه چهار استفاده می‌شود.

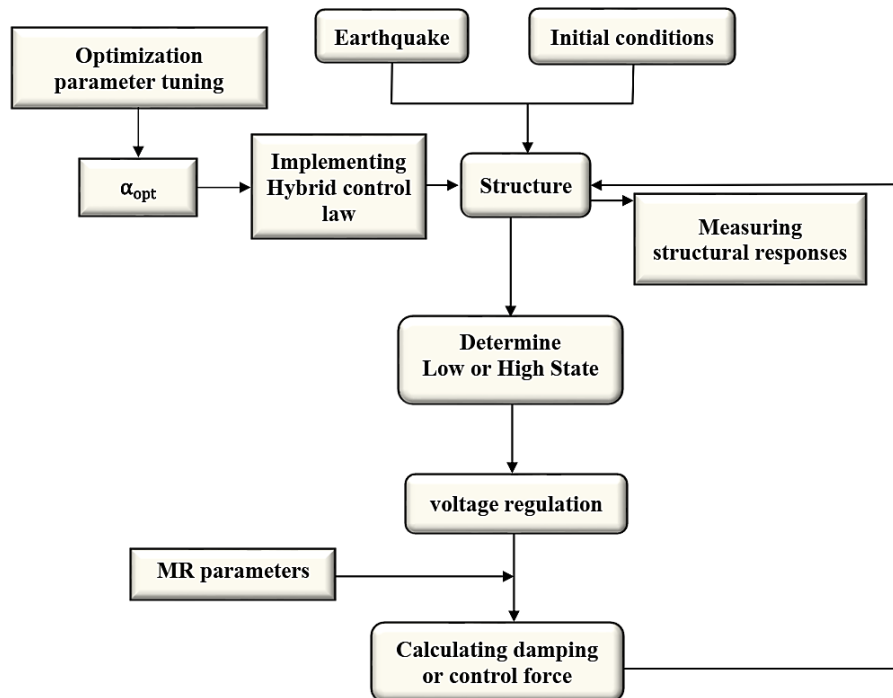
در شکل ۴ فلوچارت کنترل نیمه‌فعال سازه‌های مجهز به میراگر مغناطیسی براساس قانون کنترل ترکیبی بهینه نمایش داده شده است.

^۳ Bouc-Wen

^۴ Runge-Kutta

^۱ State space

^۲ State variable



شکل ۴- فلوچارت کنترل نیمه فعال سازه های مجهز به میراگر مغناطیسی براساس قانون کنترل ترکیبی بهینه

Figure ۴- Flowchart of semi-active structural control system equipped with MR dampers based on the optimal hybrid control law

۴- مثال های عددی

فرض شده است میراگرهای مغناطیسی با مشخصات مطابق جدول ۲ در تمامی طبقات سازه نصب شده اند. مقادیر بکار رفته برای مدل سازی میراگرهای مغناطیسی در این پژوهش براساس مدل معین آزمایش شده در دانشگاه ایالت واشنگتن انتخاب شده است [۱۹]؛ بطوریکه میراگرهای مغناطیسی تضمین می کنند تا در حد اشباع ولتاژ به مقدار ۵ ولت، تقریباً نیرویی معادل ۱۰۰ کیلونیوتن را تأمین کنند. بنابراین باتوجه به بکارگیری قوانین پایه و ترکیبی بصورت دوحالته و پیوسته، به ترتیب ولتاژها بصورت (۰ و ۵ ولت) و (۰ تا ۵ ولت) در نظر گرفته شده اند. در شکل ۵ صحت سنجی رفتار میراگرهای مغناطیسی جهت تولید نیروی کنترلی ۱۰۰ کیلونیوتن ارائه شده است.

در این بخش عملکرد پروسه کنترل پیشنهادی برای یک سازه هشت طبقه با مشخصات معلوم [۱۸] تحت ارتعاش دو زلزله لوما-پریتا و بم ارزیابی شده است. جرم، میرایی و سختی تمامی طبقات سازه به ترتیب ۱۵۵/۶ ton، ۱۰۹۷/۷ KN.s/m و ۱۰۹۷/۷ KN/m در نظر گرفته شده و مشخصات مربوط به سه زلزله لوما-پریتا، نورث ریج و بم در جدول ۱ ارائه شده است.

Table ۱- Characteristics of selected earthquakes

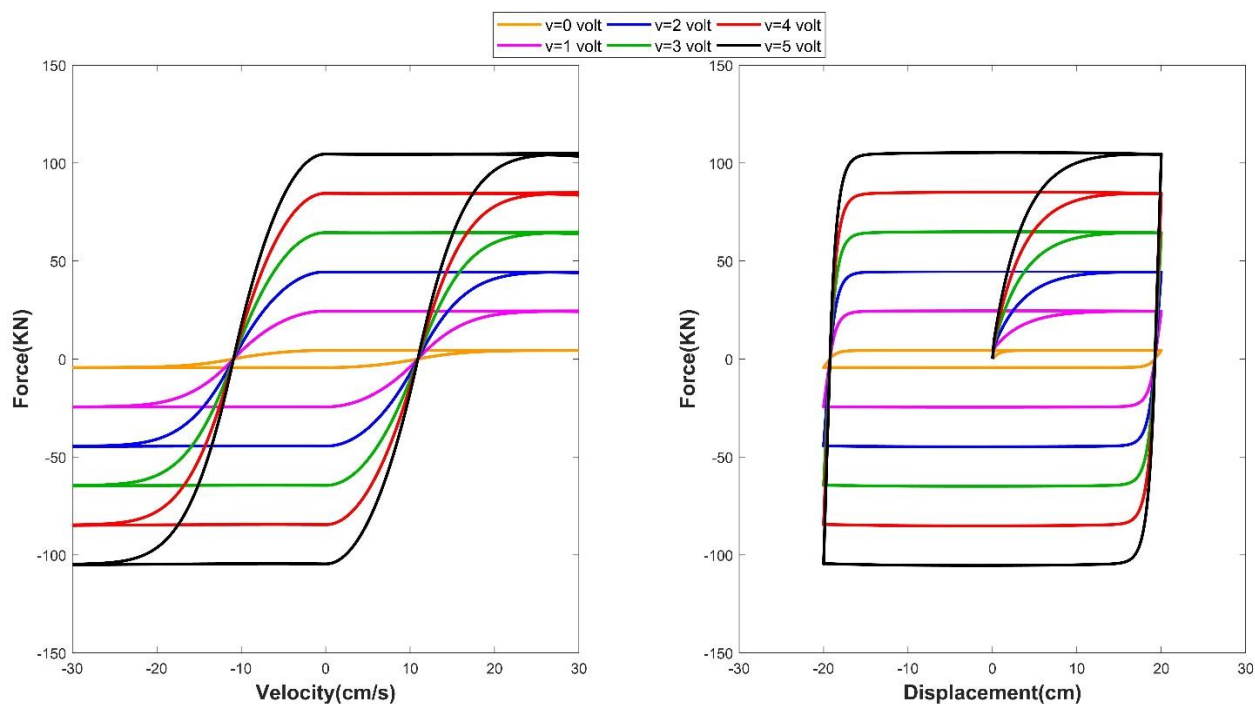
جدول ۱- مشخصات زلزله های انتخابی

Earthquake	Station	year	PGA(g)
Loma-prieta	Hollister	۱۹۸۹	۰.۳۷۰
Bam	Bam	۲۰۰۳	۰.۶۲۹
Northridge	Sylmar	۱۹۹۴	۰.۶۲۳

Table ۲- Modeling parameters of MR dampers

جدول ۲- پارامترهای مدل سازی میراگرهای مغناطیسی

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
α_a	$21744 \frac{N}{cm}$	$C_{0,b}$	$8.8 \frac{N.s}{cm.V}$	β	$3 cm^{-1}$
α_b	$99232 \frac{N}{cm.V}$	A.	۱,۲	η	$5.0 s^{-1}$
$C_{0,a}$	$0.88 \frac{N.s}{cm}$	γ	$3 cm^{-1}$	n	۱



شکل ۵- صحت‌سنجی میراگرهای مغناطیسی جهت تولید نیروی ۱۰۰ کیلو نیوتن

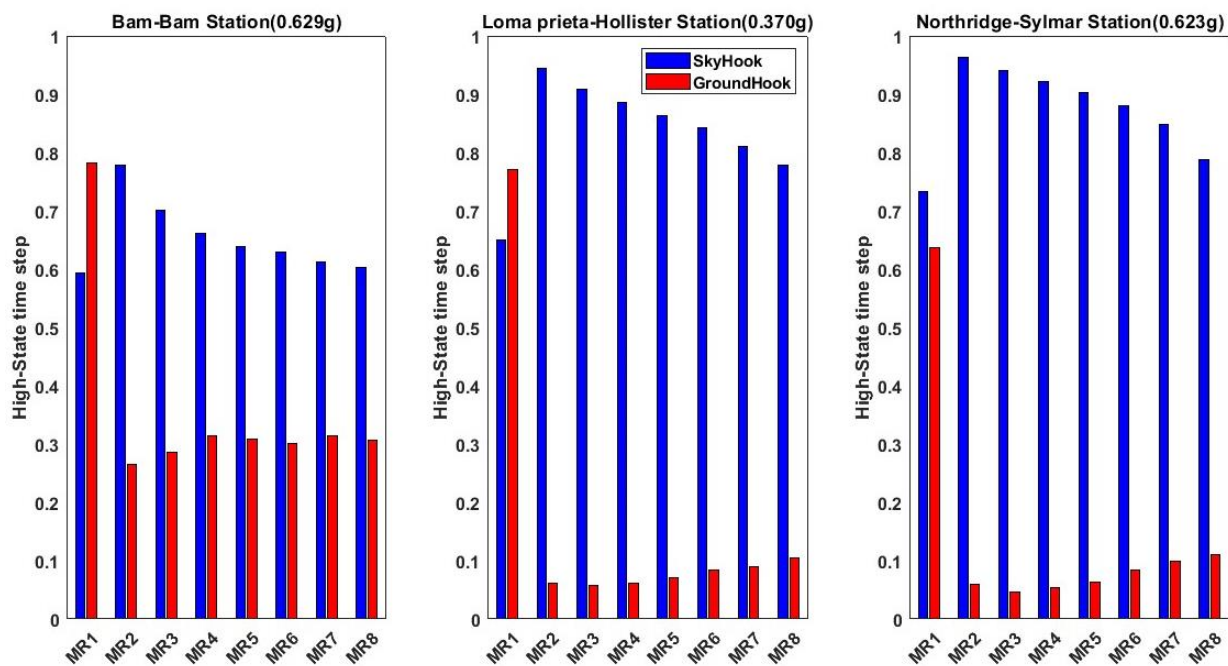
Figure ۵- Verification of MR dampers to produce ۱۰۰ kNs of force

۱-۴- ارزیابی عملکرد قوانین کنترل پایه

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 تاریخچه زمانی برای قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک، مطابق شکل‌های ۶ و ۷ مشخص شد که نسبت تعداد گام‌های زمانی که میراگرهای مغناطیسی در وضعیت High-State قرار می‌گیرند، در قانون کنترل اسکای‌هوک بیشتر از قانون کنترل گروندهوک است. از طرفی مطابق نتایج بدست آمده مشاهده شد که رفتار میراگر مغناطیسی طبقه اول با سایر طبقات متفاوت است؛ زیرا در تعیین وضعیت میراگر مغناطیسی طبقه 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 اسکای‌هوک برای میراگر طبقه اول نتیجه دهد.

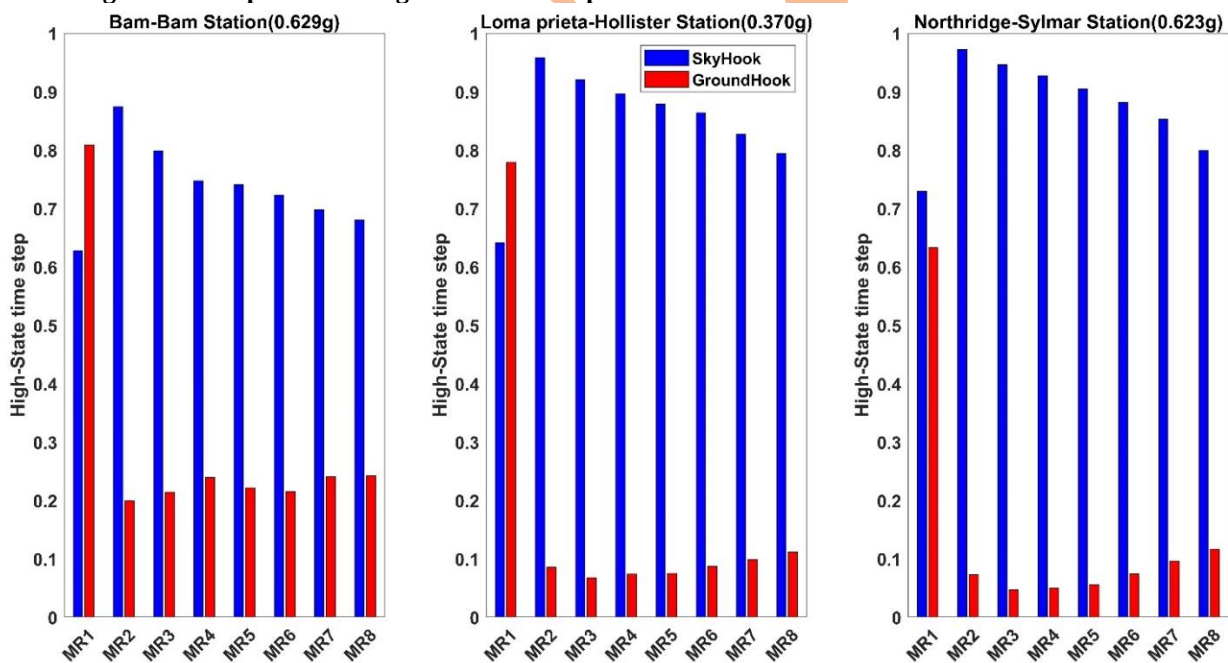
برای سازه در نظر گرفته شده سنسورهای سرعت و شتاب تعبیه می‌شوند. سرعت‌سنج‌ها برای دریافت اطلاعات سرعت طبقات و زمین و استفاده از آن‌ها در تعیین وضعیت سازه طبق قوانین کنترلی، و شتاب‌سنج برای دریافت اطلاعات شتاب زمین جهت استفاده در قوانین کنترل پیوسته بکار گرفته شده‌اند. در قانون کنترل دوحالتی، قرار گرفتن میراگر مغناطیسی در وضعیت High-State به منزله تنظیم ولتاژ برابر با ۵ ولت می‌باشد. اما در قانون کنترل پیوسته، قرار گرفتن میراگر مغناطیسی در وضعیت High-State، ولتاژ را در محدوده 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 تاریخچه زمانی سازه، تعیین وضعیت سازه در هر لحظه امکان‌پذیر است. در صورتی که تحلیل مطابق گام‌های زمانی رکورد شتاب زلزله بصورت گسسته انجام پذیرد، تعداد گام‌های



شکل ۶- مقایسه نسبت گام‌های زمانی High-State برای قوانین کنترل پایه در روش دو حالته

Figure ۶- Comparison of High-State time step ratios for basic control laws in the on-off method

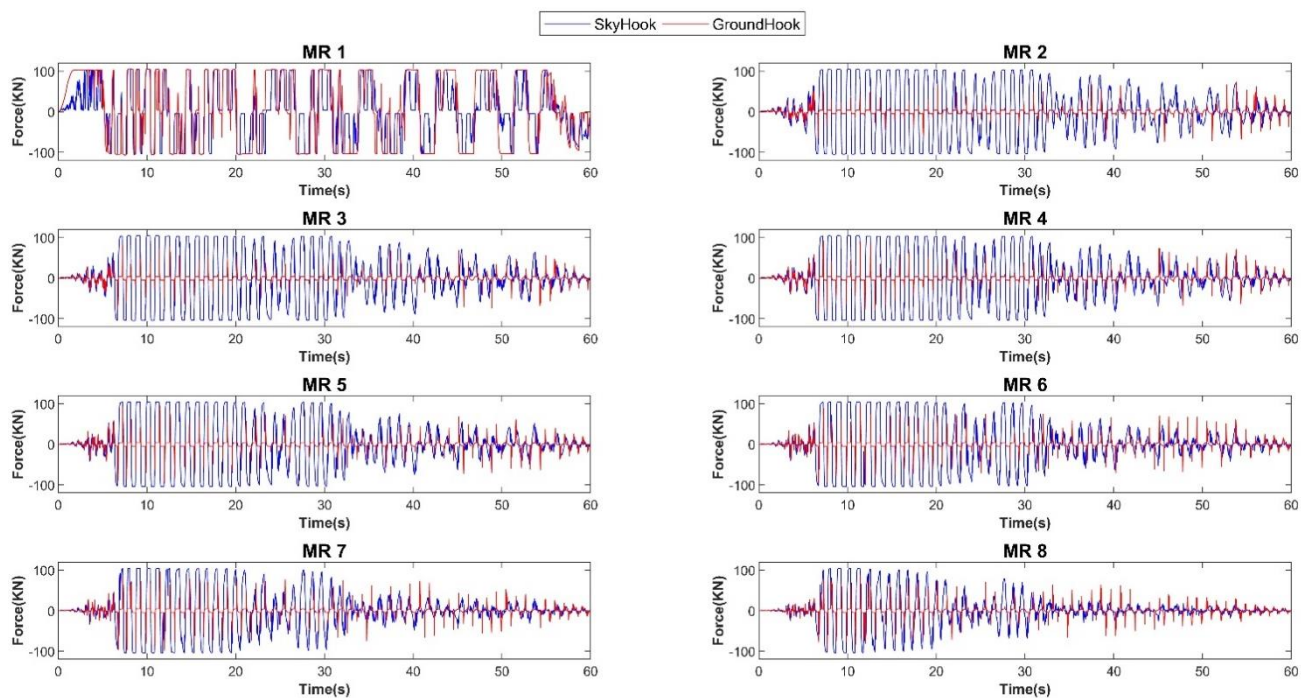


شکل ۷- مقایسه نسبت گام‌های زمانی High-State برای قوانین کنترل پایه در روش پیوسته

Figure ۷- Comparison of High-State time step ratios for basic control laws in the continuous method

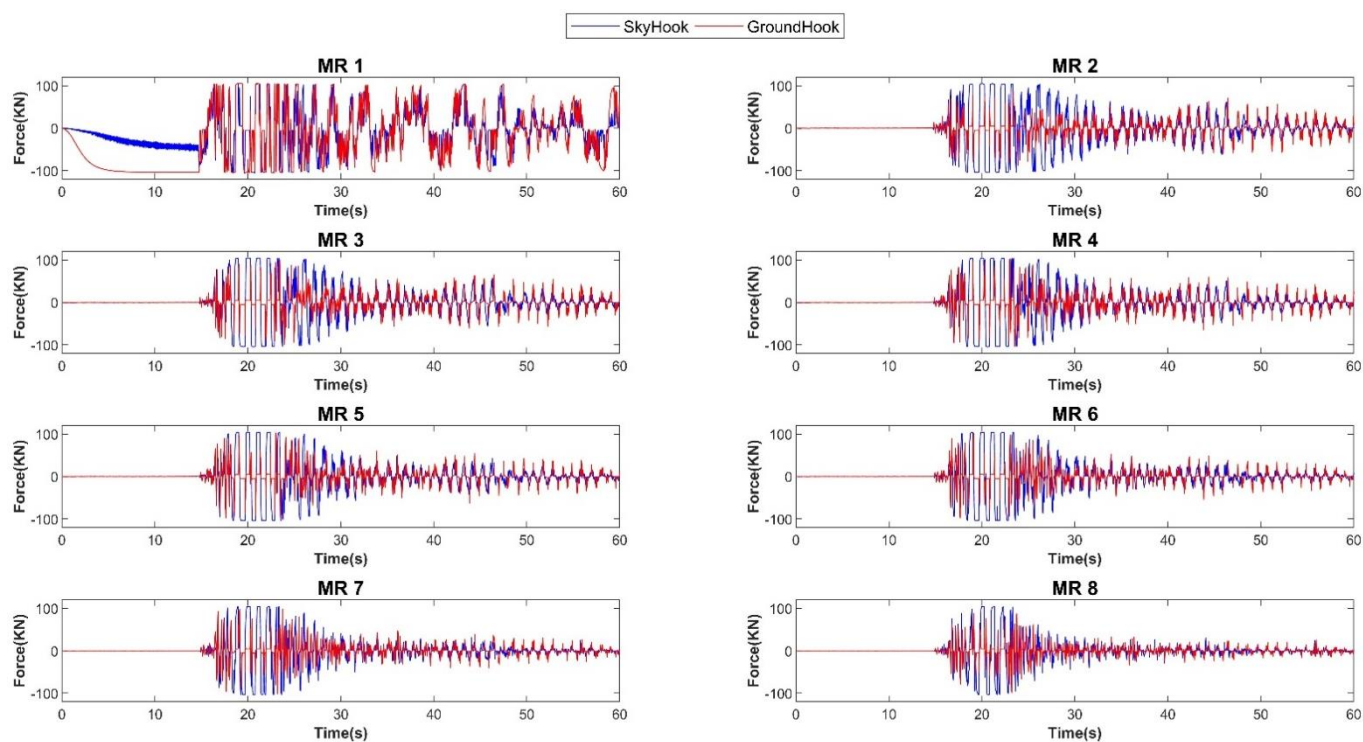
داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که برخلاف قانون گروند هوک، در قانون اسکای هوک از ظرفیت اسمی (۱۰۰ کیلونیوتن) تمامی میراگرها استفاده شده است. عملکرد میراگرهای تعبیه شده در طبقات، به جاییگیری آنها، سرعت طبقه و پارامترهای مدل بستگی دارد. بنابراین باتوجه به استفاده از سرعت زمین در محاسبه نیروی کنترلی میراگر طبقه اول، رفتار متفاوت این میراگر محسوس است.

یکی از موضوعات مهم در سیستم‌های کنترل نیمه فعال مجهز به میراگرهای مغناطیسی، استفاده حداکثری از ظرفیت میراگرها است. باتوجه به پارامترهای مدل سازی میراگرهای مغناطیسی در این پژوهش، تأمین نیروی کنترل معادل ۱۰۰ کیلونیوتن توسط میراگرها در طول بارگذاری زلزله مورد انتظار است. در شکل ۸ تا ۱۳ تاریخچه زمانی نیروی کنترلی میراگرهای مغناطیسی برای قوانین کنترل اسکای هوک و گروند هوک نمایش



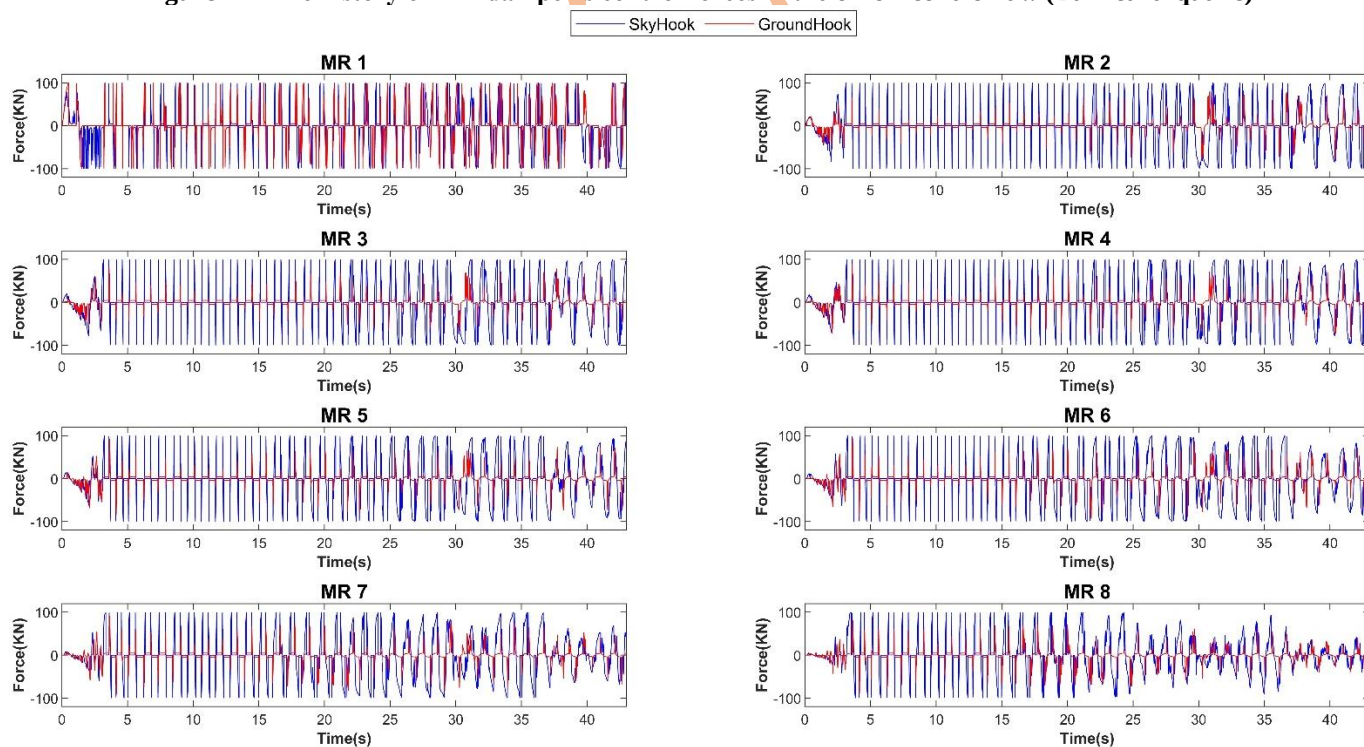
شکل ۸- تاریخچه زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دوحالتی قوانین کنترل (زلزله لوما-پریتا)

Figure ۸- Time history of MR damper's control forces in the on-off control law (Loma-Prieta earthquake)



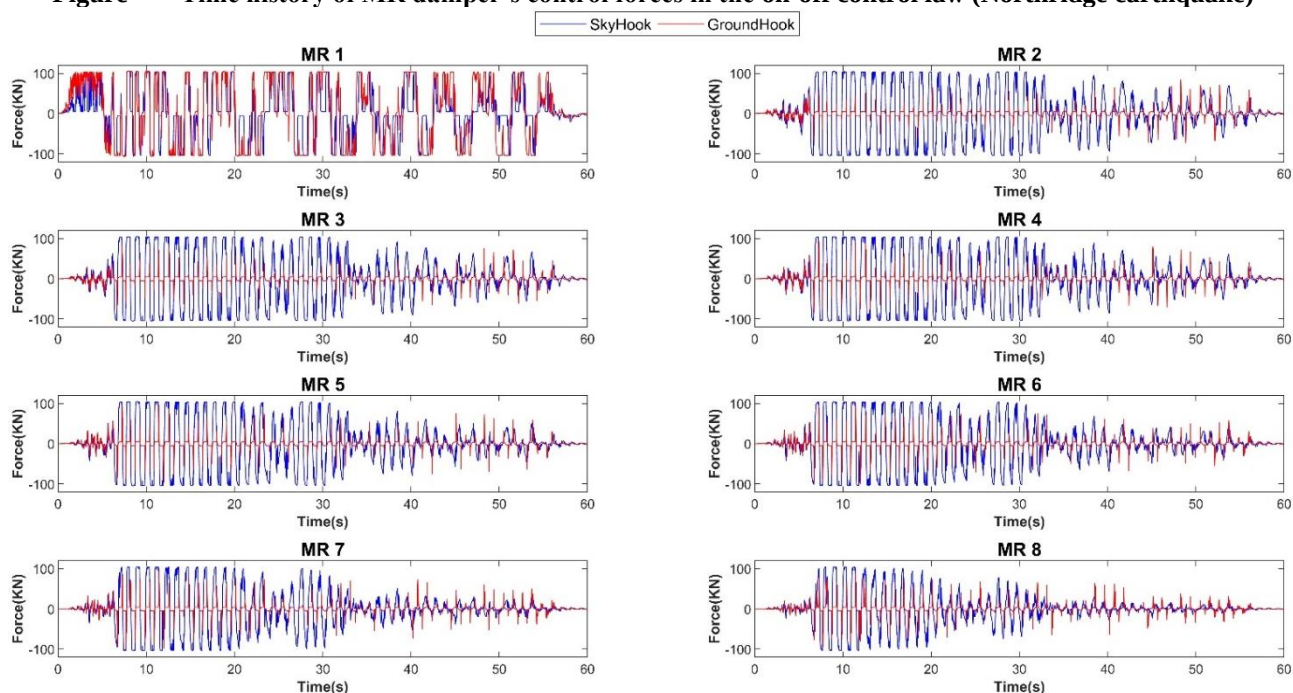
شکل ۹- تاریخچه زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دوحالته قوانین کنترل (زلزله بم)

Figure ۹- Time history of MR damper's control forces in the on-off control law (Bam earthquake)



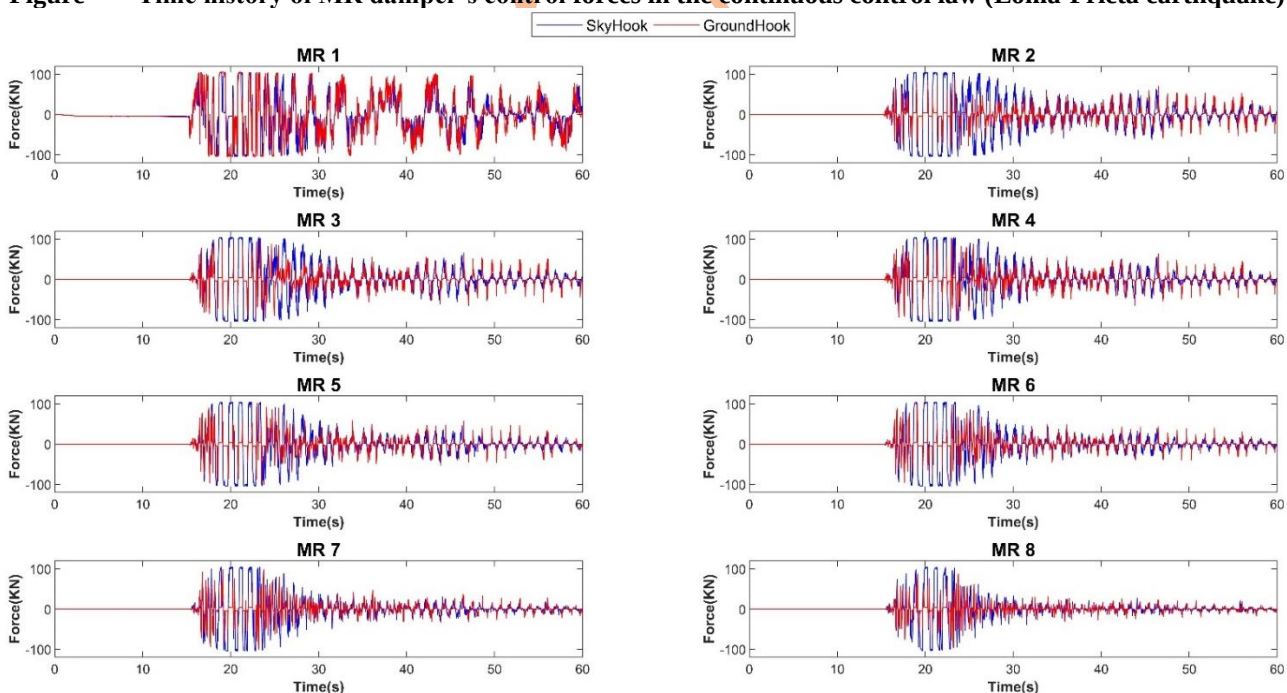
شکل ۱۰- تاریخچه زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دوحالته قوانین کنترل (زلزله نورثریج)

Figure ۱۰- Time history of MR damper's control forces in the on-off control law (Northridge earthquake)



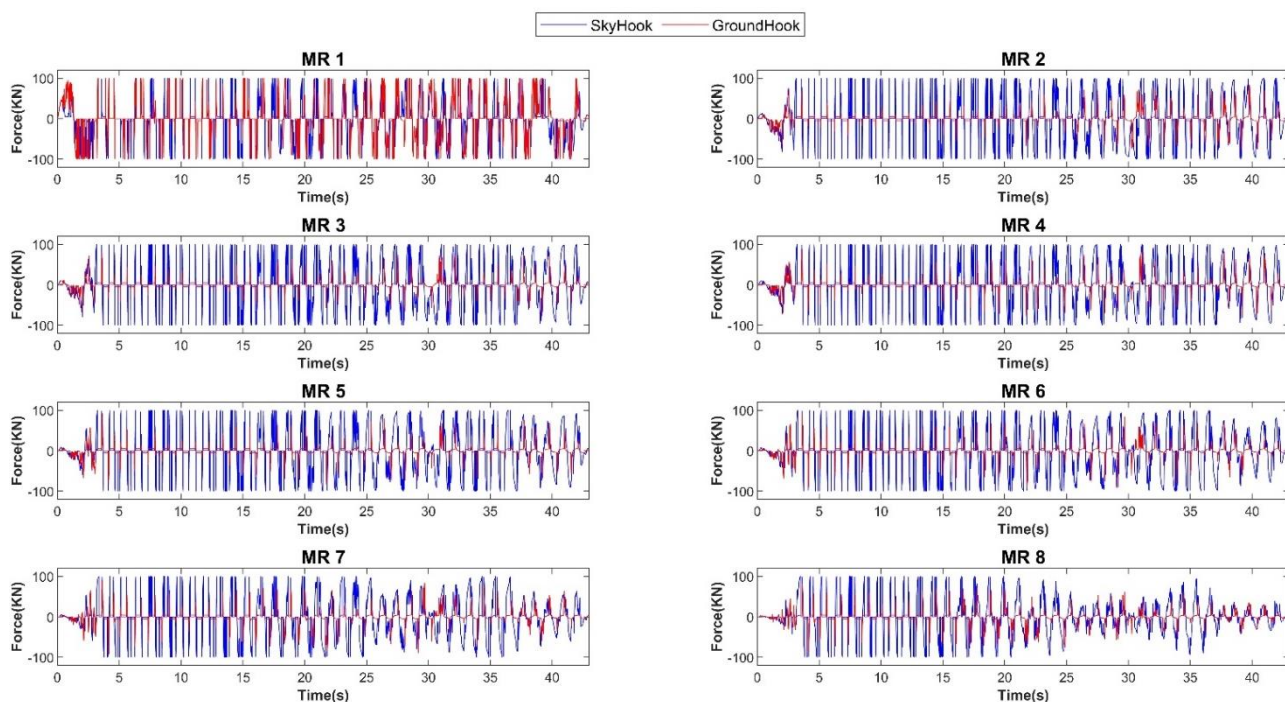
شکل ۱۱- تاریخچه زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته قوانین کنترل (زلزله لوما-پریتا)

Figure ۱۱- Time history of MR damper's control forces in the continuous control law (Loma-Prieta earthquake)



شکل ۱۲- تاریخچه زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته قوانین کنترل (زلزله بم)

Figure ۱۲- Time history of MR damper's control forces in the continuous control law (Bam earthquake)



شکل ۱۳- تاریخچه زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته قوانین کنترل (زلزله نورتریج)

Figure ۱۳- Time history of MR damper's control forces in the continuous control law (Northridge earthquake)

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

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

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

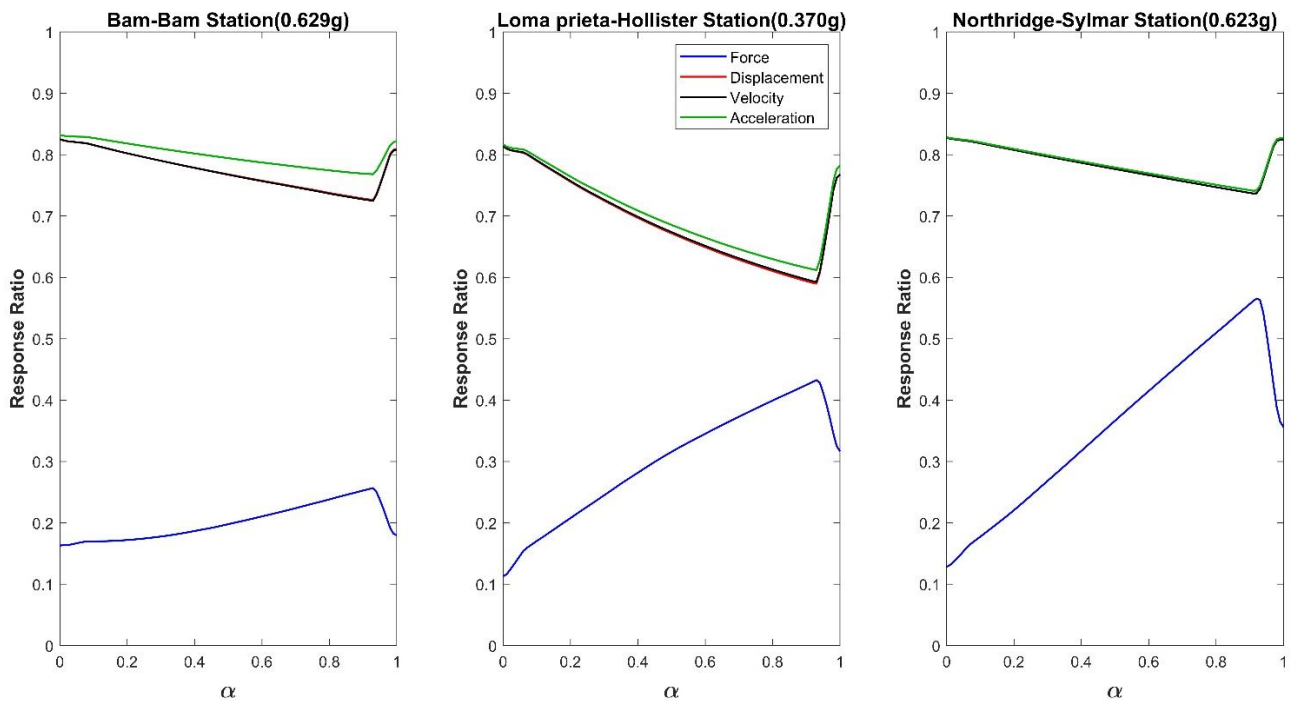
۲-۴- ارزیابی عملکرد قانون کنترل ترکیبی بهینه

در استفاده از قانون کنترل ترکیبی، با ترکیب قوانین پایه اسکای هوک و گروندهوک عملکرد سیستم کنترلی می‌تواند بهبود یابد. تفاوت در انتخاب سهم هریک از قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک موجب تغییر رفتار سازه و سیستم کنترلی می‌شود. با تعریف نسبت‌های پاسخ^۱ جابه‌جایی (DRR)، سرعت (VRR)، شتاب (ARR) و نیروی کنترلی (FRR)، عملکرد قانون کنترل ترکیبی با مقدار ضریب α قابل ارزیابی است. نسبت‌های پاسخ سازه بصورت زیر تعریف شدند:

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

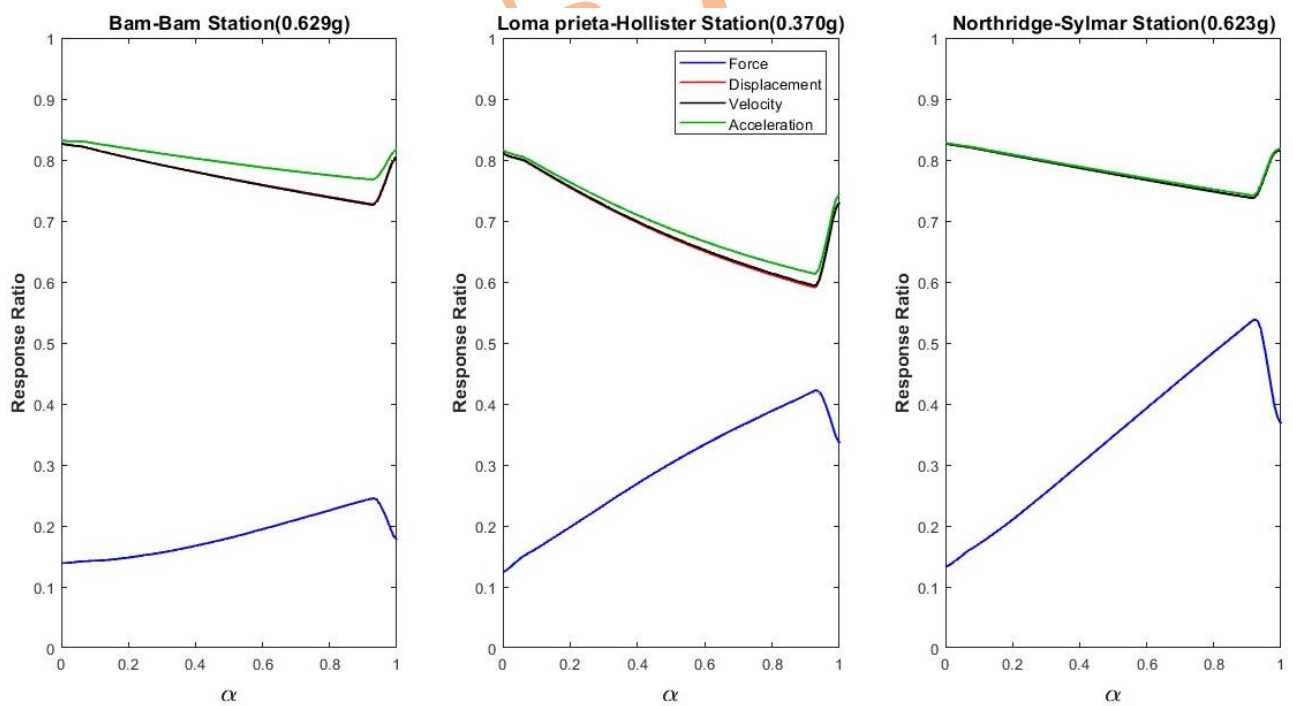
^۱ Response ratio

در روابط فوق، اندیس‌های C و UC به ترتیب برای سازه کنترل شده و کنترل نشده بکار رفته‌اند. از طرفی اندیس‌های a, f, v و d به ترتیب بیانگر نیرو، شتاب، سرعت و جابه‌جایی هستند.



شکل ۱۴- تغییرات نسبت‌های پاسخ سازه برحسب α برای قانون کنترل ترکیبی دوحالته

Figure ۱۴- Variations of structural response ratios in terms of α for the on-off hybrid control law

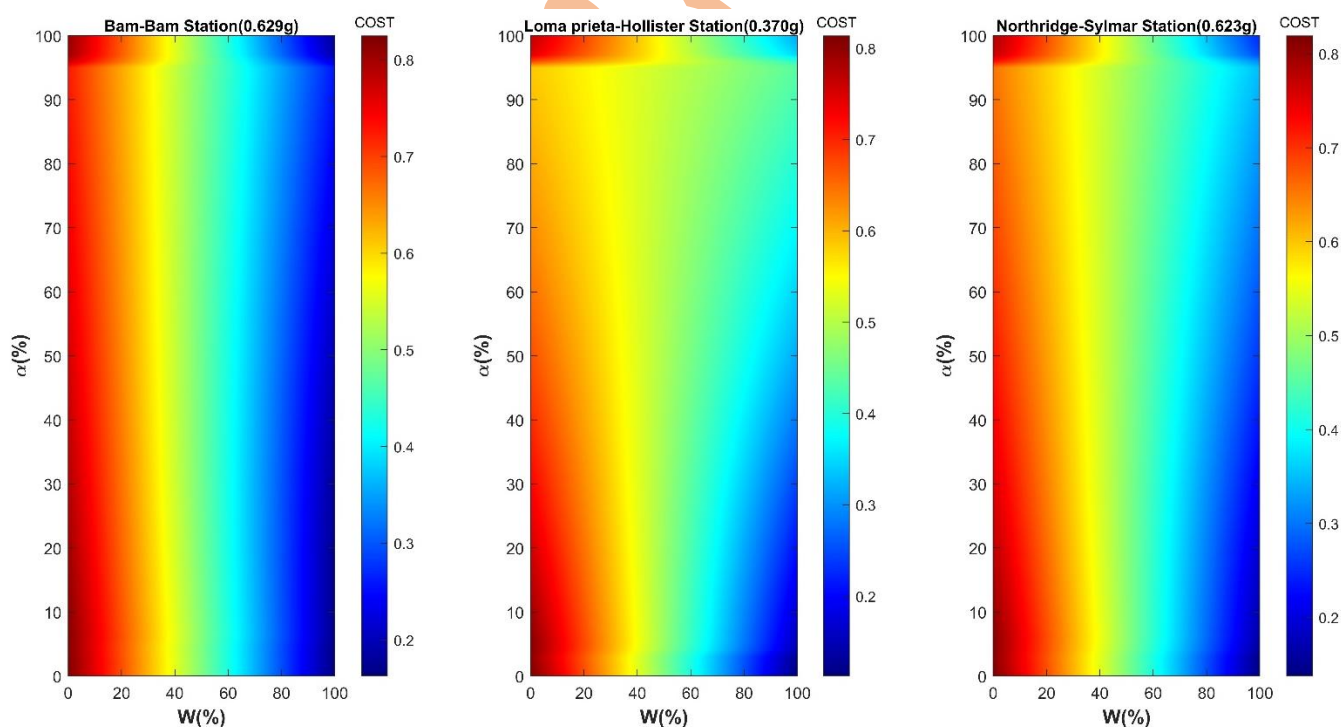


شکل ۱۵- تغییرات نسبت‌های پاسخ سازه برحسب α برای قانون کنترل ترکیبی پیوسته

Figure ۱۵- Variations of structural response ratios in terms of α for the continuous hybrid control law

و ۱۷ تغییرات تابع هزینه برحسب دو پارامتر α و W نشان داده شده است. مطابق این نمودارها، با افزایش وزن نیرو (W) در محاسبه تابع هزینه، مقدار تابع هزینه کاهش می‌یابد. در واقع در یک α ثابت، با افزایش مقدار W تابع هزینه کاهش می‌یابد. زمانی که وزن جابه‌جایی در بهینه‌سازی بیشتر در نظر گرفته می‌شود، در یک وزن ثابت، مقدار تابع هزینه با افزایش α ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، اما این روند زمانی که وزن نیرو در بهینه‌سازی بیشتر است، برعکس می‌شود. از طرفی، در حالتی که وزن جابه‌جایی در تابع هزینه بیشتر در نظر گرفته می‌شود، سهم بهینه قانون کنترل اسکای‌هوک در حدود ۹۵٪ می‌باشد. اما زمانی که وزن نیرو در تابع هزینه افزایش پیدا می‌کند، سهم بهینه قانون کنترل اسکای‌هوک نزولی و سهم بهینه قانون کنترل گروندهوک صعودی می‌شود. بنابراین نتیجه می‌شود قانون کنترل اسکای‌هوک در کنترل جابه‌جایی سازه مؤثر است ولی در قانون کنترل گروندهوک نیروی کنترلی کمتری نسبت به قانون کنترل اسکای‌هوک مصرف می‌شود.

میانگین پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نیروی کنترلی با استفاده از جذر میانگین مربعات^۱ (RMS) محاسبه شدند. جهت محاسبه نسبت پاسخ نیروی کنترلی، نرمال‌سازی با استفاده از مجموع ظرفیت میراگرهای مغناطیسی^۲ (CMR) انجام شد. در شکل ۱۴ و ۱۵، نسبت پاسخ‌های سازه برحسب سهم متفاوت قانون کنترل اسکای‌هوک نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نسبت پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب تا حد زیادی به هم نزدیک بدست آمده‌اند و با افزایش مقدار α تا محدوده مشخصی (در حدود ۱/۹~۰)، کاهش می‌یابند. اما در مقابل، نسبت نیروی کنترلی تا این محدوده افزایش می‌یابد. بنابراین مفهوم بهینه‌سازی سهم هریک از قوانین اسکای‌هوک و گروندهوک و یافتن α_{opt} با در نظر گرفتن تابع هزینه متشکل از نیرو و جابه‌جایی معنا پیدا می‌کند. با بهینه‌سازی سهم قانون کنترل اسکای‌هوک (پارامتر α) در قانون کنترل ترکیبی براساس توابع هزینه با وزن‌دهی متفاوت بین نیرو و جابه‌جایی، α_{opt} و مقدار تابع هزینه متناظر محاسبه شد. در شکل ۱۶

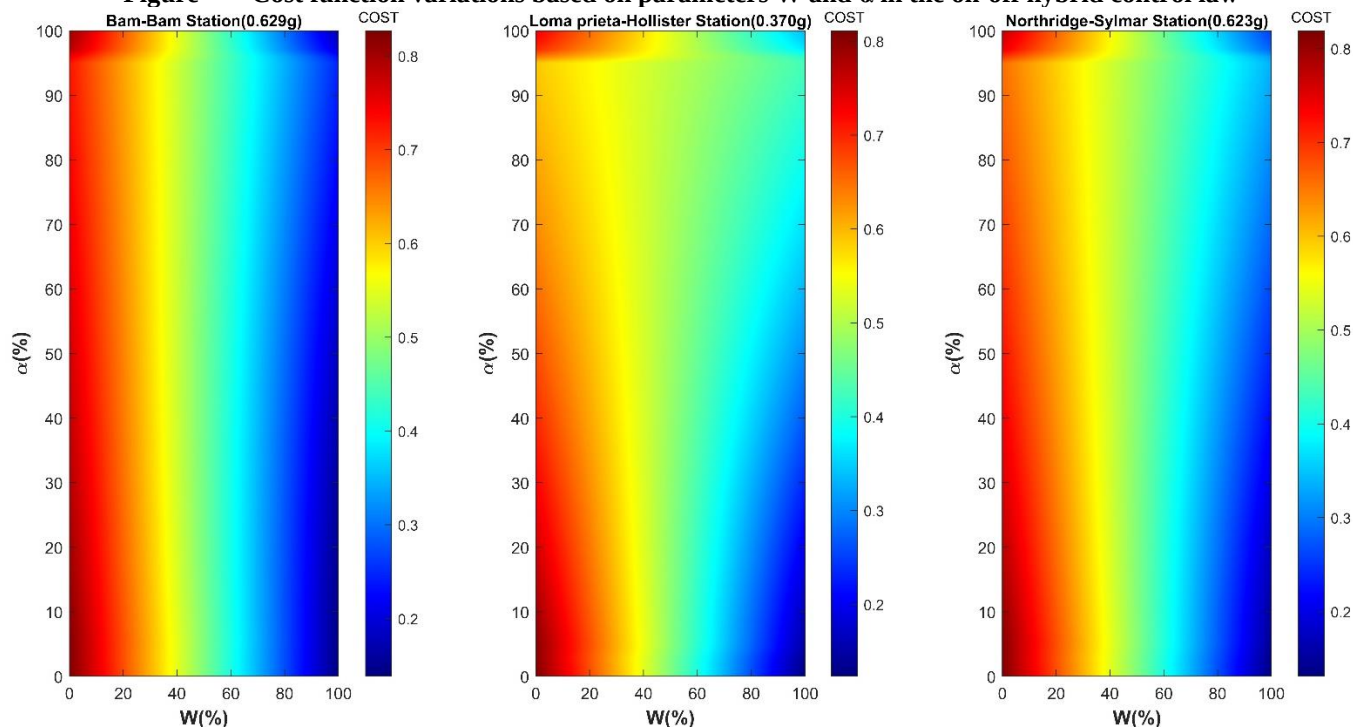


شکل ۱۶- تغییرات تابع هزینه براساس پارامترهای W و α در قانون کنترل ترکیبی دو حالته

^۲ Capacity of MR Dampers

^۱ Root Mean Square

Figure ۱۶- Cost function variations based on parameters W and α in the on-off hybrid control law



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

Figure ۱۷- Cost function variations based on parameters W and α in the continuous hybrid control law

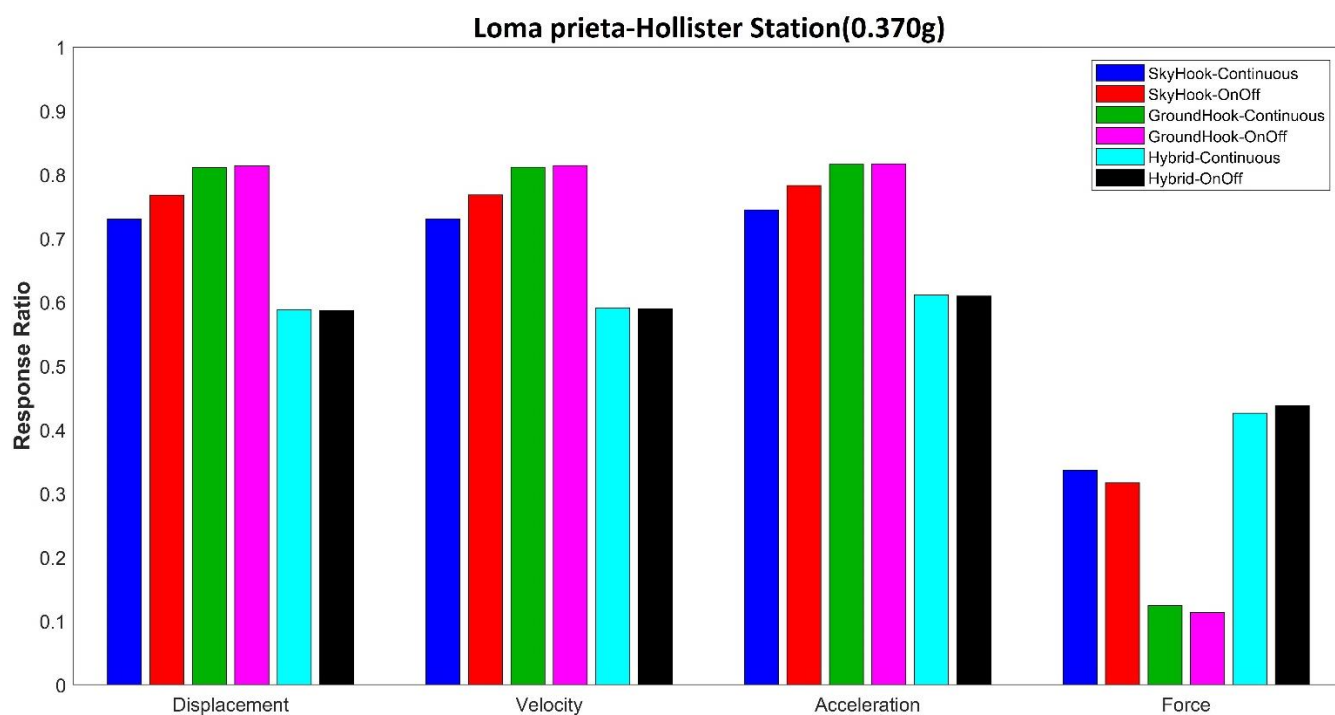
با مقایسه قوانین کنترل اسکای هوک، گروندهوک و ترکیبی به دو روش دوحالته و پیوسته مطابق شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نتیجه می‌شود که قانون کنترل ترکیبی در کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه می‌تواند مؤثر واقع شود. اگرچه نیروی کنترلی مصرفی در این قوانین کنترلی بیشتر از قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک است، اما میراگرهای مغناطیسی بکار رفته ظرفیت تأمین چنین نیرویی را دارند. با مقایسه روش دوحالته و پیوسته در قانون کنترل ترکیبی مشخص می‌شود که عملکرد آن‌ها در کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه تقریباً مشابه است، اما قانون کنترل ترکیبی پیوسته می‌تواند با نیروی کنترلی کمتری چنین نتیجه‌ای را بدست دهد. بنابراین قانون کنترل ترکیبی بهینه به روش پیوسته می‌تواند به‌عنوان یک قانون کنترل ساده و سودمند مورد استفاده قرار گیرد.

باتوجه به اهمیت کاهش جابه‌جایی سازه با حداقل نیروی کنترلی ممکن، معمولاً وزن نیرو و جابه‌جایی یکسان فرض می‌شوند. با فرض یکسان بودن وزن نیرو و جابه‌جایی ($W=0.5$) در محاسبه تابع هزینه، سهم بهینه قانون کنترل اسکای هوک در قانون کنترل ترکیبی دوحالته و پیوسته در جدول ۳ ارائه شده است.

Table ۳- Optimal values of parameter α

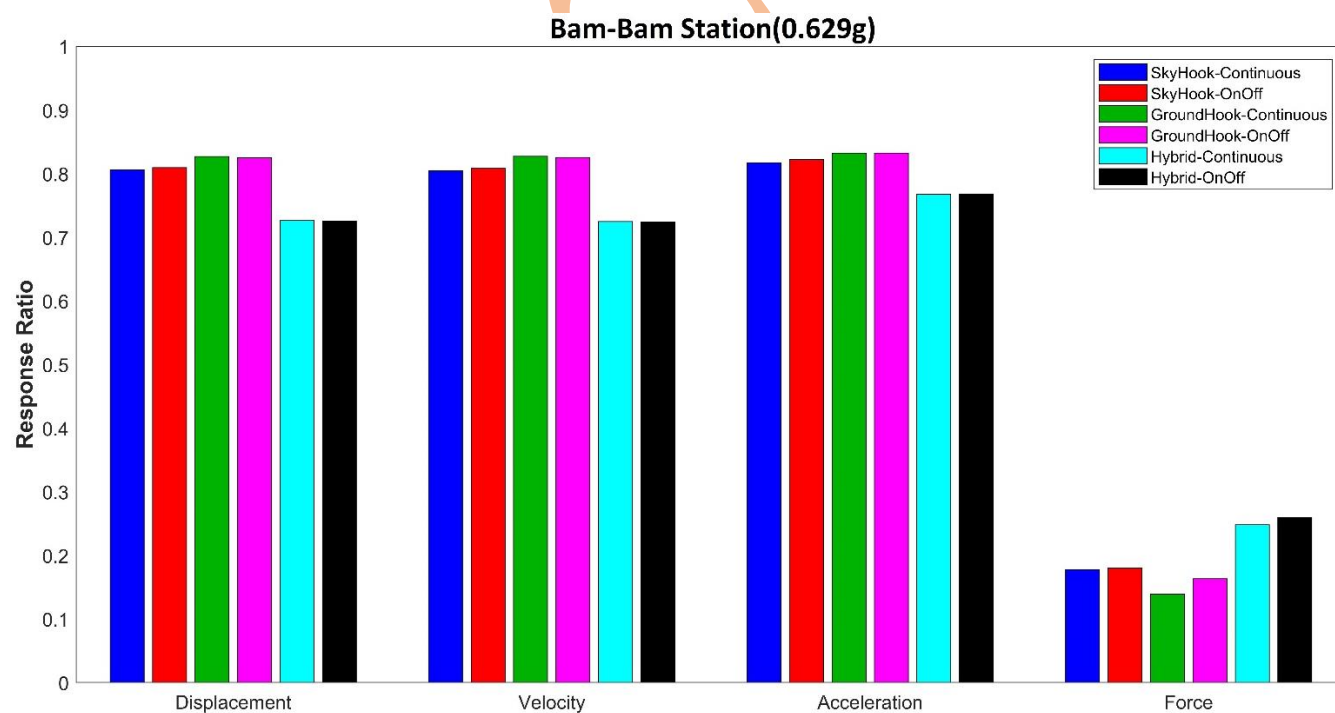
جدول ۳- مقادیر بهینه پارامتر α

Hybrid control law	Earthquake	α_{opt}
on-off	Loma-prieta	۹۴.۸۳٪
	Bam	۹۴.۷۵٪
	Northridge	۹۵.۵۱٪
Continuous	Loma-prieta	۹۴.۶۸٪
	Bam	۹۵.۰۳٪
	Northridge	۹۴.۸۹٪



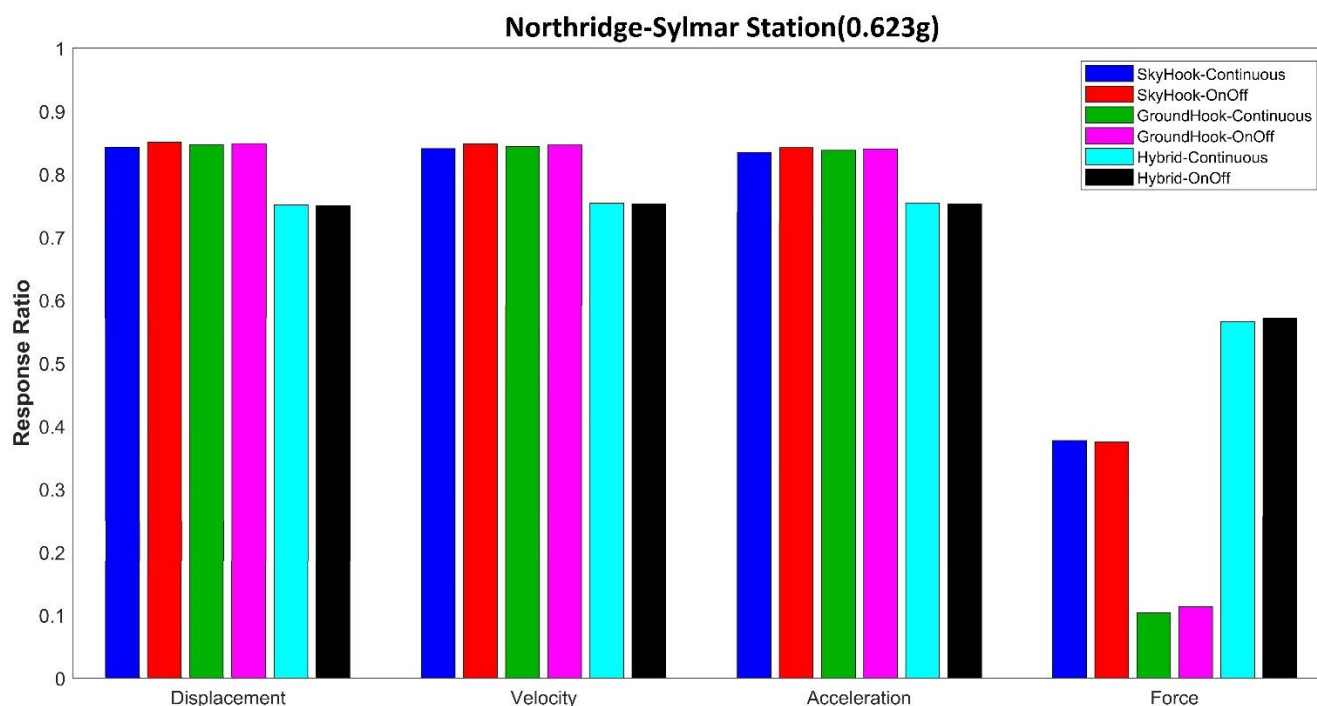
شکل ۱۸- مقایسه نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله لوما-پریتا

Figure ۱۸ - Comparison of structural response ratios under Loma-Prita earthquake vibration



شکل ۱۹- مقایسه نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله بم

Figure ۱۹ - Comparison of structural response ratios under Bam earthquake vibration



شکل ۲۰- مقایسه نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله نورث‌ریج

Figure ۲۰ - Comparison of structural response ratios under Northridge earthquake vibration

و پیوسته برای سازه مورد نظر ارائه شد. نتایج نشان دادند که قانون کنترل اسکای‌هوک در کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب مؤثر است و بهتر از قانون کنترل گروندهوک است. درمورد قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته و دوحالتی نشان داده شد که اگر در محاسبه تابع هزینه وزن جابه‌جایی از نیرو بیشتر در نظر گرفته شود، سهم بهینه قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی در حدود ۹۵٪ بدست می‌آید. با مقایسه پاسخ‌های سازه در استفاده از قانون کنترل ترکیبی به روش دوحالتی و پیوسته مشخص شد که قانون کنترل ترکیبی پیوسته می‌تواند با نیروی کنترلی کمتر نسبت به قانون کنترل ترکیبی دوحالتی، پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب را کاهش دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ترکیب بهینه از قوانین کنترل پایه در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال برای سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد مناسب آن برای سازه‌های ساختمانی ارزیابی شد. یک سازه هشت طبقه تحت ارتعاش سه زلزله لوما-پریتا، بم و نورث‌ریج بررسی شد. الگوریتم کنترل سازه با استفاده از قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته، قانون کنترل ترکیبی به روش دوحالتی و قوانین پایه اسکای‌هوک و گروندهوک به روش دوحالتی و پیوسته تعریف شد. سهم هرکدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی با استفاده از الگوریتم جستجوی الگو بهینه‌سازی شد و قانون کنترل ترکیبی بهینه

منابع

[۱] Roustae, A.M., ۲۰۲۳. Seismic retrofitting of steel moment-resisting frames (SMRFs) using steel pipe dampers. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 87(۱), pp. ۶۹-۸۴. DOI: [10.12989/sem.2023.87.1.069](https://doi.org/10.12989/sem.2023.87.1.069)

- [۲] Ghaffari, A.H. and Ghaffarzadeh, H., ۲۰۲۳. Mine blast-induced ground motion response reduction using semi-active devices. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 32(۸-۹), p.e۲۰۰۰. DOI: [۱۰,۱۰۰۲/tal.۲۰۰۰](https://doi.org/10.1002/tal.۲۰۰۰)
- [۳] Casciati, F., Magonette, G. and Marazzi, F., ۲۰۰۶. Technology of semiactive devices and applications in vibration mitigation. *John Wiley & Sons*. DOI: [۱۰,۱۰۰۲/۰۰۰۰۰۰۰۰.۰۰۰۰۰۰۰۰](https://doi.org/10.1002/۰۰۰۰۰۰۰۰.۰۰۰۰۰۰۰۰)
- [۴] Sohn, H.C., Hong, K.S. and Hedrick, J.K., ۲۰۰۰, 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. ۰۰CH۳۷۱۶۲) (pp. ۹۸۲-۹۸۷). IEEE. DOI: [۱۰,۱۱۰۹/CCA.۲۰۰۰,۸۹۷۶۰۰](https://doi.org/10.1109/CCA.۲۰۰۰.۸۹۷۶۰۰)
- [۵] Khoshnoudian, F. and Mehrparvar, B., ۲۰۱۳. A new control algorithm to protect nonlinear base-isolated structures against earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(۱۸), pp.۱۳۷۶-۱۳۸۹. DOI: [۱۰,۱۰۰۲/tal.۱۰۱۲](https://doi.org/10.1002/tal.۱۰۱۲)
- [۶] Moutinho, C., ۲۰۱۵. Testing a simple control law to reduce broadband frequency harmonic vibrations using semi-active tuned mass dampers. *Smart Materials and Structures*, 24(۵), p.۰۵۰۰۰۷. DOI: [۱۰,۱۰۸۸/۰۹۶۴-۱۷۲۶/۲۴/۵/۰۵۰۰۰۷](https://doi.org/10.1088/۰۹۶۴-۱۷۲۶/۲۴/۵/۰۵۰۰۰۷)
- [۷] Ghaffarzadeh, H., Aran, A. and Javadi Amoodizaj, F., ۲۰۲۴. Phase motion predictive control for a structure equipped with MR dampers. *Journal of Structural and Construction Engineering*. DOI: [۱۰,۲۲۰۶۰/jsce.۲۰۲۴,۴۵۱۷۳۲,۳۳۸۸](https://doi.org/10.۲۲۰۶۰/jsce.۲۰۲۴.۴۵۱۷۳۲.۳۳۸۸)
- [۸] Ferreira, F., Moutinho, C., Cunha, Á. and Caetano, E., ۲۰۱۸. Proposal of optimum tuning of semiactive TMDs used to reduce harmonic vibrations based on phase control strategy. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(۴), p.e۱۱۳۱. DOI: [۱۰,۱۰۰۲/stc.۲۱۳۱](https://doi.org/10.1002/stc.۲۱۳۱)
- [۹] Yu, H., Sun, X., Xu, J. and Zheng, P., ۲۰۱۶. 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.۴۱۵۷-۴۱۶۶. DOI: [۱۰,۱۰۰۷/s۱۲۲۰۶-۰۱۶-۰۸۲۷-۹](https://doi.org/10.1007/s۱۲۲۰۶-۰۱۶-۰۸۲۷-۹)
- [۱۰] Liu, Y., Waters, T.P. and Brennan, M., ۲۰۰۵. A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances. *Journal of sound and vibration*, 280(۱-۲), pp.۲۱-۳۹. DOI: [۱۰,۱۰۱۶/j.jsv.۲۰۰۳,۱۱,۰۴۸](https://doi.org/10.1016/j.jsv.۲۰۰۳.۱۱.۰۴۸)
- [۱۱] Valášek, M., Novak, M., Šika, Z. and Vaculin, O., ۱۹۹۷. Extended ground-hook-new concept of semi-active control of truck's suspension. *Vehicle system dynamics*, 27(۵-۶), pp.۲۸۹-۳۰۳. DOI: [۱۰,۱۰۸۰/۰۰۴۲۳۱۱۹۷.۰۸۹۶۹۳۳۳](https://doi.org/10.1080/۰۰۴۲۳۱۱۹۷.۰۸۹۶۹۳۳۳)
- [۱۲] Zhang, Y., Schauer, T., Wernicke, L., Wulff, W. and Bleicher, A., ۲۰۲۰. Facade-integrated semi-active vibration control for wind-excited super-slender tall buildings. *IFAC-PapersOnLine*, 53(۲), pp.۸۳۹۵-۸۴۰۰. DOI: [۱۰,۱۰۱۶/j.ifacol.۲۰۲۰,۱۲,۱۵۸۵](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.۲۰۲۰.۱۲.۱۵۸۵)
- [۱۳] Viet, L.D., Nghi, N.B., Hieu, N.N., Hung, D.T., Linh, N.N. and Hung, L.X., ۲۰۱۴. On a combination of ground-hook controllers for semi-active tuned mass dampers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28, pp.۲۰۵۹-۲۰۶۴. DOI: [۱۰,۱۰۰۷/s۱۲۲۰۶-۰۱۴-۰۱۰۹-۳](https://doi.org/10.1007/s۱۲۲۰۶-۰۱۴-۰۱۰۹-۳)
- [۱۴] Koo, J.H., Ahmadian, M., Setareh, M. and Murray, T., ۲۰۰۴. In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers. *Journal of Vibration and Control*, 10(۲), pp.۱۶۳-۱۷۴. DOI: [۱۰,۱۱۷۷/۱.۷۷۵۴۶۳.۴.۳۲.۰۲](https://doi.org/10.11۷۷/۱.۷۷۵۴۶۳.۴.۳۲.۰۲)
- [۱۵] Kim, G.C. and Kang, J.W., ۲۰۱۱. Seismic response control of adjacent building by using hybrid control algorithm of MR damper. *Procedia Engineering*, 14, pp.۱۰۱۳-۱۰۲۰. DOI: [۱۰,۱۰۱۶/j.proeng.۲۰۱۱,۰۷,۱۲۷](https://doi.org/10.1016/j.proeng.۲۰۱۱.۰۷.۱۲۷)
- [۱۶] Kim, H.S. and Kang, J.W., ۲۰۱۲. Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm. *Engineering Structures*, 41, pp.۲۴۲-۲۵۷. DOI: [۱۰,۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۱۲,۰۳,۰۳۸](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.۲۰۱۲.۰۳.۰۳۸)
- [۱۷] Javadinasab, H.S., Salari, S. and Ghorbani-Tanha, A., ۲۰۱۴. 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*.
- [۱۸] Rashidi, H., Khanlari, K., Zarfam, P. and Ghafory-Ashtiany, M., ۲۰۲۱. A novel approach of active control of structures based on the critically damped condition. *Journal of Vibration and Control*, 27(۱۳-۱۴), pp.۱۵۱۱-۱۵۲۳. DOI: [۱۰,۱۱۷۷/۱.۷۷۵۴۶۳۲.۹۴۴۳۰۰](https://doi.org/10.11۷۷/۱.۷۷۵۴۶۳۲.۹۴۴۳۰۰)
- [۱۹] Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D., ۲۰۰۱. Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers. *Journal of engineering Mechanics*, 127(۱۱), pp.۱۱۵۲-۱۱۶۴. DOI: [۱۰,۱۰۶۱/\(ASCE\)۰۷۳۳-۹۳۹۹\(۲۰۰۱\)۱۲۷:۱۱\(۱۱۵۲\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۹۹(۲۰۰۱)۱۲۷:۱۱(۱۱۵۲))