

## Phase motion predictive control for a structure equipped with MR dampers

Hossein Ghaffarzadeh<sup>1\*</sup>, Alireza Aran<sup>2</sup>, Fatemeh Javadi Amoodizaj<sup>3</sup>

1- Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- PHD student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Master of science, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### ABSTRACT

*Semi-active control systems have attracted the attention of researchers due to their intelligent performance, high reliability, and the little energy needed to perform the control process. Magnetorheological (MR) dampers are one of the control tools of these systems, which lead to the reduction of structural responses by adjusting the damping at any moment. To make the control tools function properly, various algorithms and control laws have been presented. In this research, the skyhook, groundhook, phase control, and motion around equilibrium control laws were utilized to investigate the phase motion of the structure. In the proposed algorithm of this research, the control force required in the future time was estimated by predicting the phase motion of the structure in the current time. This was done by predicting the ground acceleration with constant and linear acceleration models. The proposed algorithm was tested on an 8-story structure equipped with MR dampers with the Bouc–Wen model, under the vibration of two specific records of the Loma-Prieta and Northridge earthquakes. The results of the investigation illustrated that the phase motion predictive algorithm is successful in reducing the responses of the structure. Also, due to providing expected results and less complexity, using the constant acceleration model is preferred compared to the linear acceleration model.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 April 2024

**Revise Date:** 06 August 2024

**Accept Date:** 17 September 2024

### Keywords:

*Semi-active Control  
MR Damper  
Skyhook  
Groundhook  
Phase Control  
Predictive Control*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.451732.3388](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388)

\*Corresponding author: Hossein Ghaffarzadeh

Email address: [ghaffar@tabrizu.ac.ir](mailto:ghaffar@tabrizu.ac.ir)

## کنترل پیش بین فاز حرکت برای سازه مجهز به میراگرهای MR

حسین غفارزاده<sup>۱\*</sup>، علیرضا آران<sup>۲</sup>، فاطمه جوادی عمودیزج<sup>۳</sup>

۱- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال به دلیل عملکرد هوشمند، قابلیت اطمینان بالا و نیازمندی به انرژی اندک برای انجام فرایند کنترل، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. میراگرهای مغناطیسی یکی از ابزارهای کنترل این سیستم‌ها می‌باشند که با تنظیم میرایی در هر لحظه، منجر به کاهش پاسخ‌های سازه می‌شوند. به منظور عملکرد مناسب ابزارهای کنترلی، الگوریتم‌ها و قوانین کنترل مختلفی به وجود آمده‌اند که در این پژوهش، قوانین کنترل تحت عناوین قانون کنترل اسکای‌هوک، گروندهوک، کنترل فاز و حرکت نسبت به تعادل با هدف بررسی فاز حرکت سازه مورد استفاده قرار گرفتند. در الگوریتم پیشنهادی این پژوهش، از طریق پیش‌بینی فاز حرکت سازه در زمان کنونی، نیروی کنترلی مورد نیاز در زمان آینده تخمین زده شد. این امر از طریق پیش‌بینی بر روی شتاب زمین با مدل شتاب ثابت و شتاب خطی انجام پذیرفت. الگوریتم پیشنهادی بر روی یک سازه ۸ طبقه مجهز به میراگرهای مغناطیسی با مدل رفتاری بوک ون، تحت تحریک دو رکورد مشخص از زلزله‌های لوماپریتا و نورث‌ریج مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی نشان دادند که الگوریتم پیش‌بین فاز حرکت در کاهش پاسخ‌های سازه موفق عمل می‌کند. همچنین به دلیل ارائه نتایج قابل انتظار و پیچیدگی کمتر، استفاده از مدل شتاب ثابت در مقایسه با مدل شتاب خطی ترجیح داده می‌شود.

کلمات کلیدی: کنترل نیمه‌فعال، میراگر مغناطیسی، اسکای‌هوک، گروندهوک، کنترل فاز، کنترل پیش‌بین

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388">10.22065/jsce.2024.451732.3388</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388</a>	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۲۷	۱۴۰۳/۰۶/۲۷	۱۴۰۳/۰۵/۱۶	۱۴۰۳/۰۲/۰۸
حسین غفارزاده					*نویسنده مسئول:	
<a href="mailto:ghaffar@tabrizu.ac.ir">ghaffar@tabrizu.ac.ir</a>					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بکارگیری سیستم‌های کنترلی به منظور کاهش ارتعاشات سازه‌ها یک رویکرد نوین در طراحی سازه‌های ساختمانی محسوب می‌شود. مفهوم کنترل پاسخ‌های سازه اولین بار در دهه ۱۹۵۰ مطرح گردید و تا به حال در قالب چهار روش کنترل غیرفعال، کنترل فعال، کنترل نیمه‌فعال و کنترل مرکب گسترش یافته است. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در طراحی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال و ارائه الگوریتم‌های کنترلی برای آن‌ها حاصل شده است. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال با قابلیت تنظیم مشخصات مکانیکی سیستم در زمان بارگذاری، شکل تکامل‌یافته‌ای از سیستم‌های کنترل غیرفعال هستند. با توجه به تغییر لحظه‌ای و هوشمند مشخصات مکانیکی سازه مانند سختی و میرایی، این سیستم‌های کنترلی در برابر طیف وسیعی از فرکانس‌های بارگذاری عملکرد مناسبی در مقایسه با سیستم‌های کنترل غیرفعال از خود نشان داده‌اند [۱ و ۲]. این سیستم‌ها، برخلاف سیستم‌های کنترل فعال نیازمند منبع بزرگ انرژی خارجی برای اعمال دستور کنترلی نبوده و بکار بردن منبع انرژی اندک، مانند باتری، کفایت می‌کند که این موضوع یک مزیت بسیار مهم برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال در مقایسه با سیستم‌های کنترل فعال به هنگام قطع برق در حین زلزله می‌باشد. از طرفی در این سیستم‌ها با توجه به عدم اعمال نیروی خارجی به سازه، قابلیت اعتماد سازه در برابر ناپایداری بالا بوده و حساسیت آن‌ها نسبت به عدم قطعیت‌ها کمتر می‌باشد.

میراگرهای مغناطیسی<sup>۱</sup> (MR) یکی از ابزارهای سیستم کنترل نیمه‌فعال سازه می‌باشند. این میراگرها از ذرات ریز مغناطیسی و معلق در مایع تشکیل شده‌اند. در حالت عادی، این ذرات در مایع روان هستند؛ اما زمانی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، دوقطبی شده و مایع به حالت نیمه‌جامد تبدیل می‌شود. در نتیجه مقاومت برشی مایع افزایش پیدا می‌کند [۳]. در زمان اعمال نیروی خارجی، نیروی میراگر مغناطیسی با تغییر میدان مغناطیسی براساس الگوریتم از پیش تعیین شده تغییر می‌کند. با تغییر ولتاژ ورودی میراگرهای مغناطیسی، میدان مغناطیسی تنظیم شده و پاسخ‌های سازه کنترل می‌شوند. عملکرد سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی تحت ارتعاش بار انفجار و زلزله نشان داده شده است [۴]. اولیویرا و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که بکارگیری سیستم کنترل نیمه‌فعال در کنترل پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه مؤثرتر از بکارگیری سیستم کنترل غیرفعال است [۵]. در طی پژوهشی عملکرد میراگرهای مغناطیسی نیمه‌فعال به منظور پیش‌بینی رفتارهای چند مدل سازه در زمان آینده مورد بررسی قرار گرفت و توانست در مهار تأخیر زمانی موفق عمل کند [۶]. در مطالعه دیگری، دو روش کنترل نیمه‌فعال به منظور بررسی عملکرد یک سازه مجهز به میراگر مغناطیسی پیشنهاد شد و تحت حالات متفاوت تحریک، نتایج مطلوبی از عملکرد میراگر حاصل گردید [۷].

در یک سازه مجهز به سیستم کنترل نیمه‌فعال، اطلاعات پاسخ‌های سازه توسط حسگرها دریافت می‌شوند، سپس این اطلاعات در کنترل‌کننده پردازش شده و دستور کنترلی مناسب صادر می‌شود. در نهایت، دستور کنترلی توسط ابزارهای کنترل به سازه اعمال شده و فرایند کنترل سازه صورت می‌پذیرد. در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، دستور کنترلی مطابق الگوریتم‌ها و قوانین کنترل<sup>۲</sup> تعیین می‌شود. الگوریتم‌های کنترلی به سرعت در حال توسعه بوده و در پژوهش‌های مختلف معرفی و ارزیابی شده‌اند [۸-۱۰]. قانون کنترل فاز<sup>۳</sup> از استراتژی‌های پایه در کنترل نیمه‌فعال است. ساده‌ترین شکل قوانین کنترل فاز حرکت، قوانین کنترل اسکای‌هوک<sup>۴</sup> و گروندهوک<sup>۵</sup> می‌باشند که اولین بار برای کنترل ارتعاشات وارد از سطح جاده به بدنه خودرو بکار گرفته شدند [۱۱ و ۱۲]. دستور کنترلی در قانون کنترل اسکای‌هوک براساس سرعت نسبی بین دو جسم و سرعت جسم بالایی تعیین می‌شود؛ درحالی‌که در قانون کنترل گروندهوک، دستور کنترلی مبتنی بر سرعت نسبی بین دو جسم و سرعت جسم پایینی است. عملکرد قانون کنترل اسکای‌هوک در مقایسه با الگوریتم بهینه فازی برای سازه‌های بلند مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. همچنین در پژوهشی اثر غیرخطی بودن و تأخیر زمانی در استفاده از میراگرهای مغناطیسی مبتنی بر قانون کنترل اسکای‌هوک بررسی شده و پارامترهای مؤثر بر پایداری سیستم ارزیابی شده‌اند [۱۴]. قانون کنترل گروندهوک به دو صورت مبتنی بر سرعت<sup>۶</sup> و مبتنی بر جابه‌جایی<sup>۷</sup> کاربرد دارد و در پژوهش Zhang و همکاران (۲۰۲۰)، عملکرد

1 Magnetherholigical dampers

2 Control laws

3 Phase control

4 Skyhook

5 Groundhook

6 Velocity based grounhook

7 Displacement based grounhook

قانون کنترل گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی نتایج بهتری نشان داده است [۱۵]. با ترکیب قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابه‌جایی، مبتنی بر سرعت و تعمیم‌یافته آن‌ها، عملکرد قانون کنترل گروندهوک بهبود یافته است [۱۶]. به‌منظور ارتقای عملکرد قوانین اسکای‌هوک و گروندهوک، ترکیبی از این قوانین با نام قانون کنترل ترکیبی<sup>۸</sup> ارائه شده است. در این قانون کنترلی، هر کدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک سهم مشخصی از دستور کنترل صادر شده دارند که مقدار بهینه این سهم توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی بدست می‌آید [۱۷].

با تعمیم قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک، انواع مختلفی از قوانین کنترل فاز حرکت توسط محققان ارائه شدند. Moutinho (۲۰۱۵) با بررسی سازه یک درجه آزاد مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده نیمه‌فعال<sup>۹</sup> (SATMD) تحت ارتعاش بار هارمونیک نتیجه گرفت که جابه‌جایی و شتاب سازه با یکدیگر اختلاف فاز ۱۸۰° دارند. همچنین با بررسی سرعت سیستم دو درجه آزادی متوجه شد که سرعت جرم دوم (جرم تنظیم‌شونده) بسیار بیشتر از جرم اول می‌باشد و به همین منظور می‌توان بجای سرعت نسبی دو جرم، از سرعت جرم دوم استفاده کرد. براساس این مشاهدات، قانون کنترل فاز در دو مرحله تعمیم یافت [۱۸]. با تعمیم قانون کنترل اسکای‌هوک، قانون کنترل حرکت به سمت تعادل یا دور از تعادل<sup>۱۰</sup> بدست آمد. نتایج تحقیق در مورد این قانون کنترل نشان داد که عملکرد سیستم کنترلی در کاهش شتاب سازه موفق عمل کرده و در حفاظت از اعضای غیرسازه‌ای مؤثرتر است [۱۹].

الگوریتم‌های منطبق بر پیش‌بینی از الگوریتم‌های نوین کنترلی بشمار می‌آیند که می‌توانند در استراتژی‌های کنترل فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی بکار روند. روش کنترل پیش‌بین، یک روش مبتنی بر مدل است و دقت کنترل‌کننده به دقت مدل وابسته می‌باشد [۲۰]. کنترل پیش‌بین مدل<sup>۱۱</sup> (MPC) یکی از روش‌های کنترل پیش‌بین است که فرایند پیش‌بینی و کنترل در این روش براساس خواص دینامیکی سازه انجام می‌شود، درحالی‌که شتاب ورودی به سازه نیز می‌تواند در فرایند پیش‌بینی وضعیت آینده سازه نقش ایفا کند [۲۱]. با ارتقای روش کنترل پیش‌بین مدل به روش کنترل پیش‌بین مدل سریع<sup>۱۲</sup>، عملکرد سیستم کنترلی برای سازه‌ها در مقیاس بزرگ ارزیابی شده و عملکرد مناسب روش جدید نشان داده شده است [۲۲]. Liu (۲۰۰۴) ایده کنترل پیش‌بین را برای میراگرهای اصطکاکی نیمه‌فعال با تمرکز بر پیش‌بینی نیروی اصطکاک بحرانی<sup>۱۳</sup> بکار برد. در این روش، مقدار بحرانی نیروی اصطکاک پیش‌بینی می‌شود و با نگر داشتن نیروی لغزش کمی کمتر از آن، میراگر اصطکاکی حین بارگذاری در حالت لغزش باقی می‌ماند. بنابراین ظرفیت استهلاکی میراگر بالاتر می‌رود و انرژی بصورت پیوسته در هنگام زلزله با هر شدت و شکل موج، تلف می‌شود [۲۳]. بطحایی و زهرایی (۲۰۲۲) با طراحی کنترل‌کننده فازی و پیاده‌سازی ایده پیش‌بین برای سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی، مشکل تأخیر زمانی در ناپایداری سازه را تا حد زیادی رفع کردند [۶]. ایده پیش‌بین مبتنی بر انرژی<sup>۱۴</sup> برای سازه یک درجه آزاد و چند درجه آزاد مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده پیاده‌سازی شده است. در این روش، انرژی مکانیکی به‌عنوان پارامتر اصلی در نظر گرفته می‌شود و میرایی طوری تنظیم می‌گردد که منجر به کمینه شدن انرژی مکانیکی سازه اصلی شود [۲۴].

در این پژوهش، یک الگوریتم کنترلی ساده با بکارگیری ایده کنترل پیش‌بین و قوانین کنترل فاز حرکت معرفی شده است. باتوجه به اهمیت عدم قطعیت تأخیر زمانی<sup>۱۵</sup> در سیستم‌های کنترل هوشمند، این عدم قطعیت در الگوریتم‌نویسی در نظر گرفته شده تا بطور غیرمستقیم تأثیر نامطلوب آن بر پروسه کنترل به حداقل برسد. این الگوریتم بر روی یک سازه ۸ طبقه مجهز به میراگرهای مغناطیسی تحت ارتعاش زلزله پیاده‌سازی شده و کارایی هر یک از قوانین کنترل فاز حرکت در کاهش پاسخ‌های سازه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. درنهایت، نتایج بدست آمده برای سازه کنترل‌شده با سازه کنترل‌نشده بررسی شده و عملکرد سیستم کنترلی سنجیده شده است.

8 Hybrid control law

9 Semi-active tuned mass dampers

10 Motion towards or away from equilibrium

11 Model predictive control

12 Fast model predictive control

13 Critical friction force

14 Energy based predictive

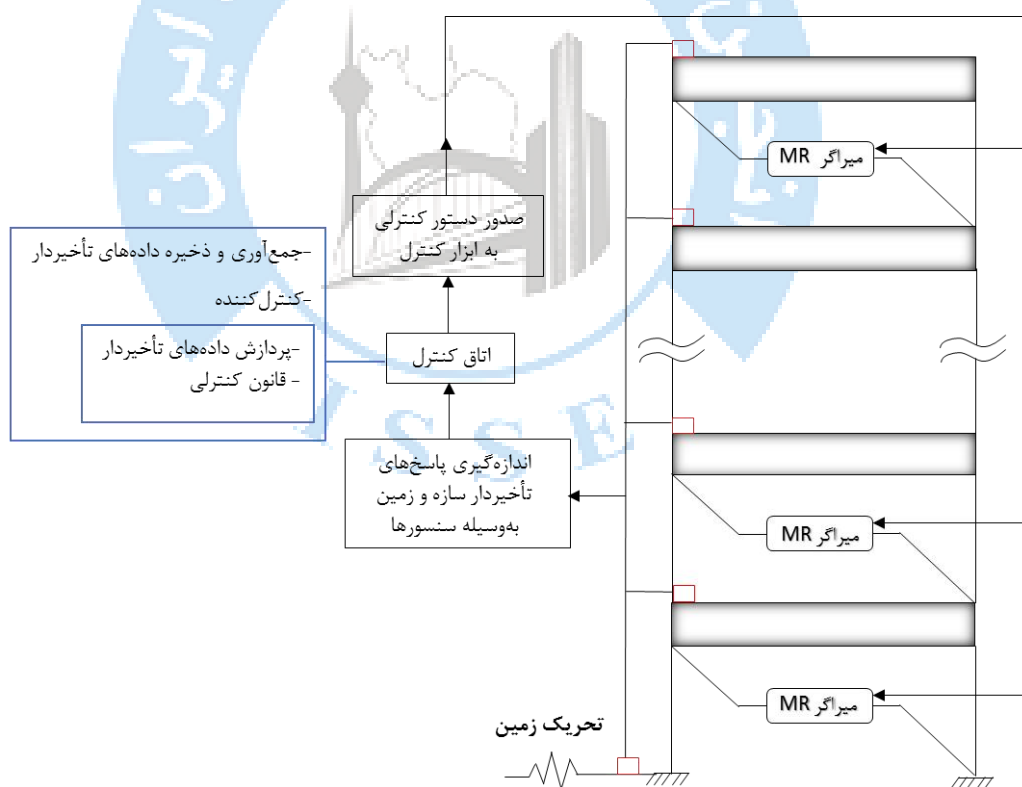
15 Time delay

## ۲- فرایند کنترل در سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی

یک سیستم کنترل نیمه فعال از سنسورها، کنترل کننده، محرک ها و ابزارهای کنترلی تشکیل شده است. اطلاعات تحریک یا پاسخ سازه توسط سنسورها اندازه گیری شده و به کنترل کننده ارسال می شوند تا پردازش روی داده ها انجام شود. پس از پردازش داده ها در کنترل کننده، دستور کنترلی مناسب برای محرک ارسال شده و رفتار ابزار کنترلی بکار رفته تنظیم می شود. میراگرهای مغناطیسی نوعی ابزار کنترلی هستند که با تنظیم ولتاژ، میرایی سیستم را تغییر می دهند. با توجه به وجود عدم قطعیت تأخیر زمانی، تنظیم میرایی در میراگرهای مغناطیسی دقیق نیست. تأخیر زمانی در سیستم های کنترل نیمه فعال می تواند ناشی از تأخیر در دریافت اطلاعات از سنسورها ( $\tau_{sensor}$ )، تأخیر در پردازش و انجام محاسبات ( $\tau_{calculation}$ ) و تأخیر در صدور دستور کنترلی و اعمال آن توسط محرک ها ( $\tau_{actuator}$ ) باشد. اگرچه تأخیر زمانی در حد چند میلی ثانیه است، اما تأثیر آن در عملکرد سیستم کنترلی می تواند قابل توجه باشد. تأخیر زمانی کل ( $\tau$ ) یا  $\tau_{total}$  سیستم کنترلی برابر خواهد بود با:

$$\tau = \tau_{sensor} + \tau_{calculation} + \tau_{actuator} \quad (1)$$

در شکل زیر فرایند کنترل در سیستم کنترل نیمه فعال مجهز به میراگرهای مغناطیسی با لحاظ عدم قطعیت تأخیر زمانی نمایش داده شده است.



شکل ۱: فرایند کنترل در سیستم های کنترل نیمه فعال مجهز به میراگرهای مغناطیسی

## ۳- معادلات حرکت و مدل سازی سیستم مجهز به میراگرهای مغناطیسی

پاسخ‌های یک سازه تحت ارتعاش زلزله، از طریق حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر آن بدست می‌آید. از جمله روش‌های حل معادلات حرکت سازه، روش فضای حالت<sup>۱۶</sup> است که با تبدیل معادله مرتبه دوم به مرتبه اول با استفاده از متغیرهای حالت<sup>۱۷</sup>، حل آن را ساده‌تر می‌کند.

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Psi \end{bmatrix} \{F(t-\tau)\} - \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

در معادله فوق،  $M$ ،  $K$  و  $C$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه هستند و دارای ابعاد  $n \times n$  می‌باشند که  $n$  بیانگر تعداد طبقات سازه است.  $\{F(t-\tau)\}$  بردار نیروی میراگرهای مغناطیسی را نشان می‌دهد و ابعاد آن  $r \times 1$  است که  $r$  بیانگر تعداد میراگرهای مغناطیسی می‌باشد.  $x(t)$ ،  $\dot{x}(t)$  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  $\delta$  نشان‌دهنده ضریب تأثیر زلزله با ابعاد  $n \times 1$  بوده و  $\Psi$  ماتریس موقعیت میراگرها با ابعاد  $n \times r$  می‌باشد که وجود یا عدم وجود میراگرهای مغناطیسی در طبقات را نشان می‌دهد.

با استفاده از تغییر متغیر  $Z(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}$ ، رابطه ۲ بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [B]\{F(t-\tau)\} - [E]\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

که در آن ماتریس‌های  $A$ ،  $B$  و  $E$  بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

به منظور مدل‌سازی رفتار هیستریزس میراگرهای مغناطیسی، از مدل بوک-ون استفاده می‌شود که یکی از مدل‌های ریاضی پارامتریک می‌باشد و یک مدل دینامیکی با اجزاء مشخص و پارامترهای مربوطه را بر مبنای مفاهیم فیزیکی پیشنهاد می‌دهد. در مدل بوک-ون نیروی غیرخطی تولیدشده توسط میراگر مغناطیسی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$F = C_0 \dot{x} + \alpha z \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $F$ ،  $\dot{x}$  و  $C_0$  به ترتیب نیرو، سرعت پیستون و ضریب میرایی است. پارامتر  $\alpha$  مرتبط با تنش تسلیم مایع مغناطیسی بوده و پارامتر  $z$  برای توصیف تغییرشکل هیستریک میراگر مغناطیسی بکار می‌رود و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_0 \dot{x} \quad (8)$$

در این پژوهش، از روش رانگ-کوتای مرتبه چهار<sup>۱۸</sup> برای محاسبه پارامتر  $z$  استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از قانون تکرار و در طی گام‌های متوالی می‌توان به حل معادله پرداخت؛ بگونه‌ای که پاسخ در هر گام وابسته به پاسخ در گام قبلی و چهار پارامتر اساسی که مشخص کننده شیب در ابتدای هر گام هستند، می‌باشد.

در رابطه فوق  $\gamma$  و  $\beta$  پارامترهای شکی و  $A_0$  بیانگر شیب سیکل هیستریزس است و نحوه انتقال رفتار خطی به غیرخطی با این پارامتر توصیف می‌شود.

پارامترهای  $C_0$  و  $\alpha$ ، به ولتاژ اعمالی ( $u$ ) و پارامترهای ثابت  $C_{0a}$ ،  $C_{0b}$ ،  $\alpha_a$  و  $\alpha_b$  که از نتایج آزمایشگاه بدست آمده‌اند، وابسته‌اند و از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (9)$$

$$C_0 = C_{0a} + C_{0b} u \quad (10)$$

در روابط فوق، پارامتر  $u$  ولتاژ واقعی است، اما میراگرهای مغناطیسی قادر به اعمال تغییرات ولتاژ آنی نمی‌باشند. بنابراین مدت زمانی طول می‌کشد تا ولتاژ واقعی میراگر تنظیم شود. برای جبران تأخیر زمانی ناشی از ولتاژ ورودی، ولتاژ مؤثر ( $v$ ) با استفاده از فیلتر مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (11)$$

که در آن  $\eta$  پارامتر ثابت مطابق مشخصات میراگر مغناطیسی است. با تعیین مقادیر صحیح برای این پارامترها، مدل پیشنهادی مطابق با داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. در این پژوهش مقادیر مربوط به پارامترهای میراگرهای مغناطیسی از مشخصات یک مدل معین آزمایش شده استخراج شده و در بخش مثال‌های عددی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

#### ۴- الگوریتم کنترل پیشبین فاز حرکت

در فرایند طراحی سیستم‌های کنترلی، طراحی کنترل کننده براساس الگوریتم‌ها و قوانین کنترلی نقش مهمی دارد. الگوریتم‌ها و قوانین کنترلی پیشنهادی برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال با هدف کاهش پاسخ‌های سیستم با کمترین هزینه و نیرو ارائه شده‌اند. در سازه‌های ساختمانی مجهز به سیستم کنترلی، قابلیت اجرا و پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و قوانین کنترلی یک موضوع مهم در ارزیابی کارکرد سیستم تلقی می‌شوند. برای اینکه یک الگوریتم در عمل قابلیت اجرا داشته باشد، بایستی از داده‌هایی که در فرایند کنترل قابلیت اندازه‌گیری یا تخمین دارند، استفاده شود. در سازه‌های ساختمانی، معمولاً داده‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب اندازه‌گیری می‌شوند و در محاسبه نیروی کنترلی و صدور دستور کنترلی بکار می‌روند. از جمله قوانین کنترل ساده و پایه در کنترل نیمه‌فعال، قانون کنترل اسکای‌هوک، قانون کنترل گروندهوک، قانون کنترل مبتنی بر کنترل فاز و قانون کنترل حرکت نسبت به تعادل است.

## ۴-۱- قانون کنترل اسکای هوک

قانون کنترل اسکای هوک با هدف کاهش ارتعاشات طبقه بالایی بکار می‌رود. در این قانون کنترل، دستور کنترلی براساس سرعت نسبی ( $\dot{x}_{rel}$ ) دو طبقه مجاور و سرعت طبقه بالایی ( $\dot{x}_2$ ) صادر می‌شود. قانون کنترل اسکای هوک دو حالتی مبتنی بر سرعت برای سازه‌های مجهز به میراگرهای مغناطیسی بیان می‌کند که اگر سرعت نسبی دو طبقه مجاور و سرعت طبقه بالایی هم‌جهت باشند، ولتاژ ( $V$ ) بر روی بیشترین مقدار ( $V_{max}$ ) و اگر سرعت نسبی دو طبقه مجاور و سرعت طبقه بالایی در خلاف جهت هم باشند، ولتاژ بر روی کمترین مقدار ( $V_{min}$ ) تنظیم می‌شود.

$$\text{Controller ۱: } \begin{cases} \dot{x}_2 \times \dot{x}_{rel} < 0 & V=V_{min} \\ \dot{x}_2 \times \dot{x}_{rel} \geq 0 & V=V_{max} \end{cases} \quad (12)$$

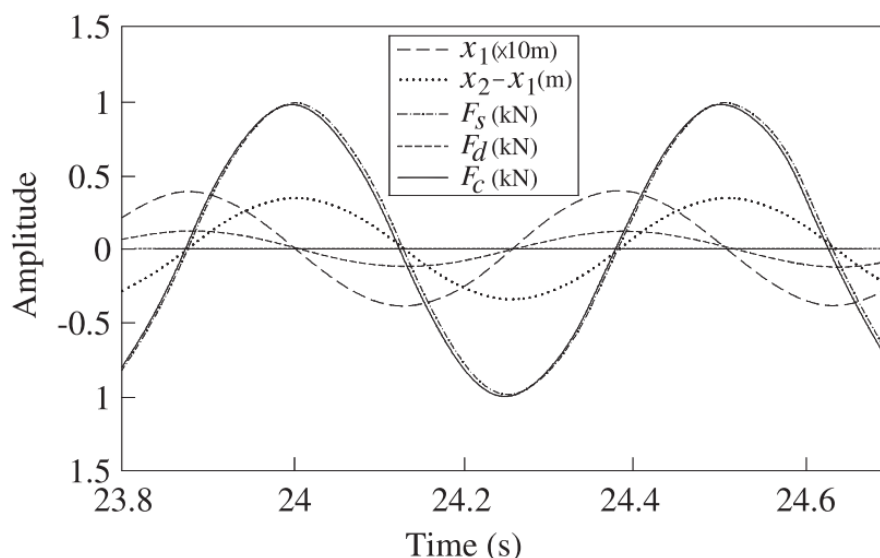
## ۴-۲- قانون کنترل گروندهوک

قانون کنترل گروندهوک که شباهت زیادی به قانون کنترل اسکای هوک دارد، با هدف کاهش ارتعاشات طبقه پایینی بکار می‌رود. در این قانون کنترل، دستور کنترلی براساس سرعت نسبی دو طبقه مجاور و سرعت طبقه پایینی ( $\dot{x}_1$ ) صادر می‌شود. قانون کنترل گروندهوک دو حالتی مبتنی بر سرعت برای سازه‌های مجهز به میراگرهای مغناطیسی بیان می‌کند که اگر سرعت نسبی دو طبقه مجاور و سرعت طبقه پایینی هم‌جهت باشند، ولتاژ بر روی کمترین مقدار و اگر سرعت نسبی دو طبقه مجاور و سرعت طبقه پایینی در خلاف جهت هم باشند، ولتاژ بر روی بیشترین مقدار تنظیم می‌شود.

$$\text{Controller ۲: } \begin{cases} \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0 & V=V_{min} \\ \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0 & V=V_{max} \end{cases} \quad (13)$$

## ۴-۳- قانون کنترل فاز

قانون کنترل فاز بر مبنای بازدارندگی بنا نهاده شده است. در واقع هدف این قانون، کنترل اصلاح وضعیت حرکتی سازه و کاهش پاسخ‌های آن می‌باشد. قوانین کنترل فاز با قانون کنترل اسکای هوک مقایسه شده و عملکرد مناسب آن‌ها نشان داده شده است [۱۸]. Moutinho (۲۰۱۵) مطابق شکل زیر برای سازه تک درجه آزاد مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده تحت اثر بار هارمونیک نشان داد که نیروی کنترلی با پاسخ جابه‌جایی جسم ۱ (پایینی) اختلاف فاز  $90^\circ$  دارد. این موضوع برای ترکیب‌های مختلف نسبت‌های فرکانسی و میرایی مختلف اثبات شد. از طرفی مطابق شکل زیر، مشخص می‌شود که پاسخ جابه‌جایی جسم ۱ با نیروی میرایی هم‌فاز است.



شکل ۲: تاریخچه زمانی پاسخ‌های سیستم برای نسبت فرکانسی ۱ [۱۸]

مقدار نیروی میرایی با سرعت نسبی ارتباط مستقیم دارد. از طرفی مطابق نتایج فوق، نشان داده شد که نیروی میرایی با پاسخ جابه‌جایی جسم ۱ هم‌فاز است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$x_1 \times \dot{x}_{rel} \geq 0 \quad (14)$$

اگر جسم ۲ از فاز صحیح حرکت خارج شود، معادله (۱۴) برقرار نخواهد بود. پس فاز حرکت باید با استفاده از ابزارهای کنترلی اصلاح شود. بنابراین قانون کنترل بصورت زیر بدست می‌آید:

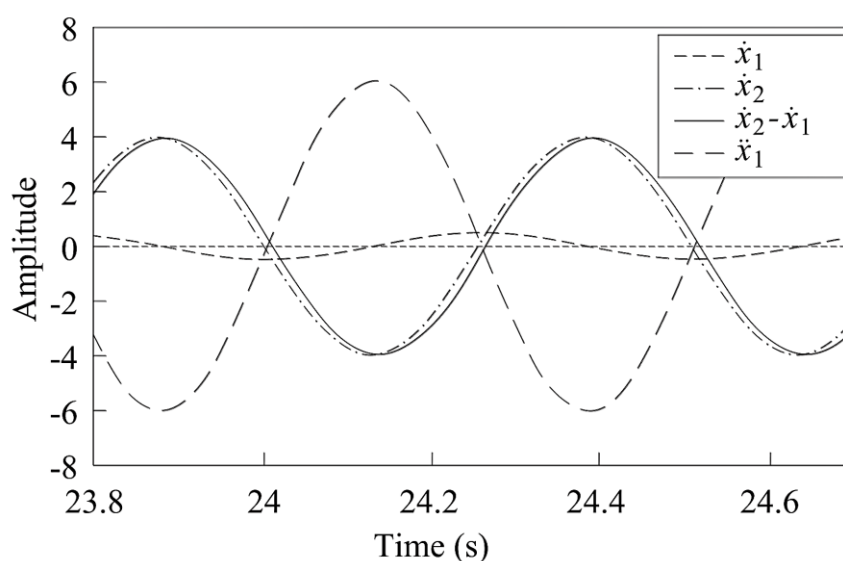
$$\text{Controller } 3: \begin{cases} x_1 \times \dot{x}_{rel} \geq 0 & V=V_{min} \\ x_1 \times \dot{x}_{rel} < 0 & V=V_{max} \end{cases} \quad (15)$$

باتوجه به دشواری‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی در سازه‌ها، پاسخ شتاب جسم ۱ ( $\ddot{x}_1$ ) را می‌توان جایگزین پاسخ جابه‌جایی کرد. تحت ارتعاش هارمونیک، جابه‌جایی و شتاب اختلاف فاز  $180^\circ$  دارند، بنابراین قانون کنترل بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Controller } 4: \begin{cases} \ddot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0 & V=V_{min} \\ \ddot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0 & V=V_{max} \end{cases} \quad (16)$$

Moutinho (۲۰۱۵) مطابق شکل زیر نشان داد که بین سرعت جسم ۱ و سرعت جسم ۲ اختلاف زیادی وجود دارد. از این‌رو، در قانون کنترل فاز می‌توان بجای سرعت نسبی از سرعت جسم ۲ استفاده کرد. بنابراین قانون کنترل فاز با تقریب‌ها و استنتاج‌های متوالی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Controller } 5: \begin{cases} \dot{x}_1 \times \dot{x}_2 \leq 0 & V=V_{min} \\ \dot{x}_1 \times \dot{x}_2 > 0 & V=V_{max} \end{cases} \quad (17)$$



شکل ۳: تاریخچه زمانی پاسخهای سرعت برای نسبت فرکانسی ۱ [۱۸]

در این پژوهش عملکرد هر سه قانون کنترل فاز برای سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی آزمایش شده و عملکرد آن‌ها در کاهش پاسخ ارتعاشات سیستم سنجیده می‌شود.

#### ۴-۴- قانون کنترل حرکت نسبت به تعادل

اساس قانون کنترل حرکت نسبت به تعادل، بررسی دقیق‌تر نحوه قرارگیری جسم ۱ و جسم ۲ نسبت به یکدیگر می‌باشد. محل اولیه جسم ۲ به عنوان نقطه تعادل در نظر گرفته شده و جابه‌جایی جسم ۱ نسبت به آن نقطه سنجیده می‌شوند. مطابق این قانون کنترل، اگر سرعت نسبی و جابه‌جایی نسبی بین دو طبقه سازه هم‌جهت باشند، بیشترین ولتاژ و اگر در خلاف جهت هم باشند، کمترین ولتاژ اعمال می‌شود. در نتیجه قانون کنترل بصورت زیر نوشته می‌شود:

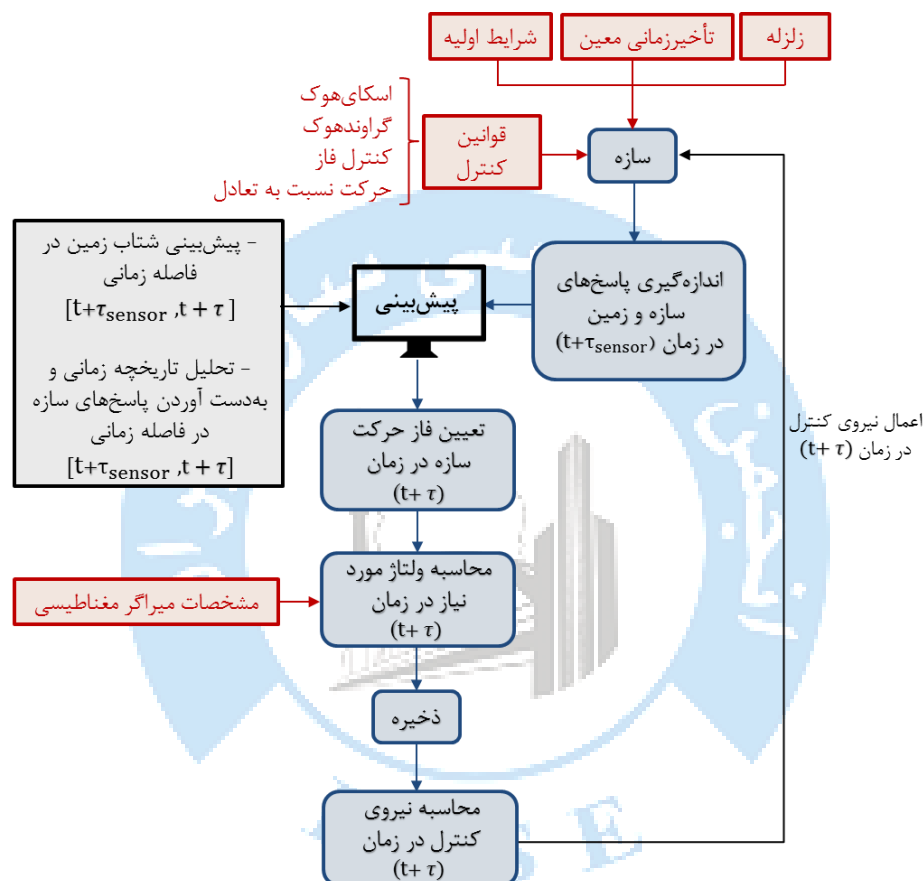
$$\text{Controller } \epsilon: \begin{cases} x_{rel} \times \dot{x}_{rel} < 0 & V = V_{min} \\ x_{rel} \times \dot{x}_{rel} \geq 0 & V = V_{max} \end{cases} \quad (18)$$

#### ۴-۵- پیش‌بینی فاز حرکت

بر اساس قوانین مبتنی بر فاز حرکت مانند قوانین اسکای‌هوک، گروند‌هوک، کنترل فاز و حرکت نسبت به تعادل، وضعیت حرکت سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی می‌تواند در آینده پیش‌بینی شود و ولتاژ موردنیاز محاسبه گردد. در این پژوهش، شتاب زمین در زمان وقوع زلزله اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از روش شتاب ثابت یا شتاب خطی، برای افق زمانی<sup>۱۹</sup> مشخص پیش‌بینی می‌شود. باتوجه به حضور اجتناب‌ناپذیر عدم قطعیت تأخیر زمانی، افق زمانی برابر با تأخیر زمانی کل سیستم می‌تواند در نظر گرفته شود. محدوده تأخیر زمانی اجزای مختلف مانند سنسورها، سیستم پردازش و محرک‌ها توسط شرکت سازنده تعیین می‌شود. باتوجه به وجود عدم قطعیت در تأخیر زمانی، در جهت اطمینان حداکثر تأخیر زمانی به عنوان افق پیش‌بینی<sup>۲۰</sup> لحاظ می‌شود.

19 Time horizon  
20 Prediction horizon

در سیستم طراحی شده مطابق الگوریتم کنترل پیش‌بین فاز حرکت، تأخیر زمانی معین و قانون کنترلی به سیستم معرفی می‌شوند. سازه تحت ارتعاش هارمونیک قرار می‌گیرد، پاسخ‌های تأخیردار سازه و زمین توسط سنسورها اندازه‌گیری شده و فرایند پیش‌بینی آغاز می‌شود. با تخمین شتاب زمین برای زمان آینده مطابق مدل شتاب ثابت یا شتاب خطی، تحلیل تاریخچه زمانی روی سازه انجام می‌گیرد. پاسخ‌های احتمالی سازه در آینده تخمین زده شده و فاز حرکت سازه مشخص می‌شود. با استفاده از قانون کنترل از پیش تعریف شده، ولتاژ مورد نیاز میراگرهای مغناطیسی پیش‌بینی و ذخیره می‌شوند تا در زمان آینده تنظیم شوند. خلاصه فرایند کنترل سازه براساس روش کنترل پیش‌بین فاز حرکت در شکل زیر ارائه شده است.



شکل ۴: فلوجارت فرایند کنترل براساس پیش‌بینی فاز حرکت

## ۵- مثال عددی

در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک سازه برشی ۸ طبقه که جرم، میرایی و سختی تمامی طبقات آن به ترتیب ۱۵۵/۶ ton، ۱۰۹۷/۷ KN.s/m و ۱۵۳۳۳۳ KN/m می‌باشد، در نظر گرفته شده است. در همه طبقات سازه میراگرهای مغناطیسی تعبیه شده‌اند و مشخصات مربوط به آن‌ها از یک مدل معین از میراگر مغناطیسی که در دانشگاه واشنگتن مورد آزمایش قرار گرفته است، استخراج می‌گردد [۱۳]. مشخصات ارائه شده در جدول (۱) به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که تأمین‌کننده نیرویی در حدود ۱۰۰ کیلونیوتن با ولتاژ مورد نیاز ۵ ولت باشند. بنابراین بیشینه و کمینه ولتاژ میراگرهای مغناطیسی به ترتیب ۵ و صفر ولت در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۱: پارامترهای میراگرهای مغناطیسی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\alpha_a$	۲۱۷۴۴ N/cm	$C_{0a}$	۰/۸۸ N.s/cm	$\beta$	$3 \text{ cm}^{-1}$
$\alpha_b$	۹۹۲۳۲ N/cm.V	$C_{0b}$	۸/۸ N.s/cm.V	$\eta$	$50 \text{ s}^{-1}$
$A_0$	۱/۲	$\gamma$	$3 \text{ cm}^{-1}$	$n$	۱

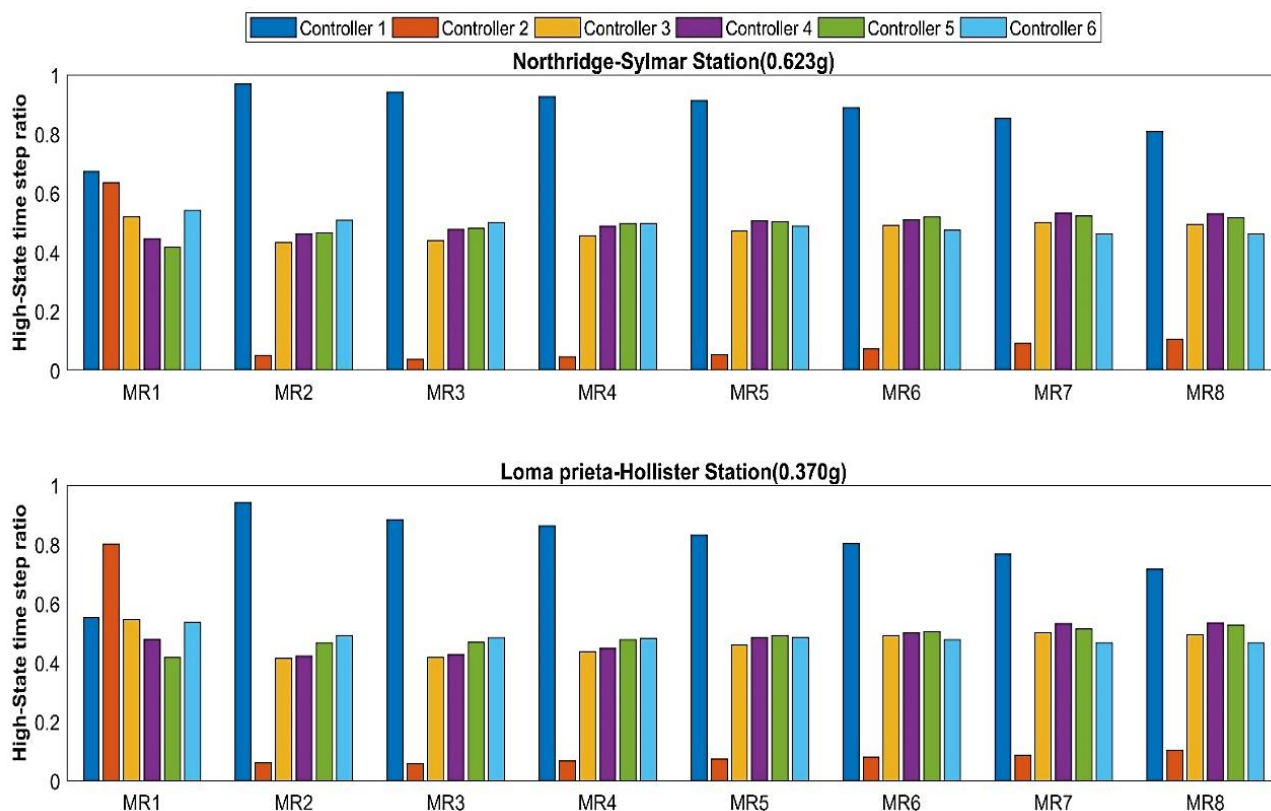
مدل سازه‌ای مدنظر تحت تحریک دو رکورد زلزله‌های لوماپریتا<sup>۲۱</sup> و نورثریج<sup>۲۲</sup> قرار گرفته و با به کارگیری قوانین کنترل فاز حرکت، عملکرد کنترل پیش‌بین بر روی آن بررسی می‌گردد. مشخصات مربوط به این دو زلزله در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول ۲: مشخصات رکوردهای زلزله

زلزله	ایستگاه	سال	PGA(g)	PGV(cm/s)	PGD(cm)
نورثریج	Sylmar	۱۹۹۴	۰/۶۲۳	۱۱۶/۲۵	۳۹/۴۴
لوماپریتا	Hollister	۱۹۸۹	۰/۳۷۰	۶۲/۹۹	۳۲/۳۱

### ۵-۱- عملکرد سیستم کنترل نیمه‌فعال بدون اعمال پیش‌بینی

با انجام تحلیل تاریخچه زمانی سازه تحت تحریک‌های دو زلزله معین، می‌توان نمودارهایی برای هر قانون کنترل ترسیم نمود که نسبت تعداد گام‌های زمانی High State (تعداد گام‌های زمانی که ولتاژ حداکثر اعمال می‌شود) به تعداد کل گام‌های زمانی در هر میراگر مغناطیسی را نمایش می‌دهد. این شاخص مشخص می‌کند که برای هر میراگر در چند گام زمانی تحلیل، ولتاژ حداکثر در نظر گرفته شده است. قوانین کنترل با عناوین کنترل کننده ۱ (قانون کنترل اسکای‌هوک)، کنترل کننده ۲ (قانون کنترل گروندهوک)، کنترل کننده ۳ تا ۵ (قوانین کنترل فاز) و کنترل کننده ۶ (قانون کنترل حرکت نسبت به تعادل) در نمودارها مشخص شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در میراگرهای تعبیه‌شده در طبقات ۲ الی ۸، کنترل کننده اسکای‌هوک با اختلاف زیادی نسبت به دیگر قوانین کنترل در وضعیت High State قرار می‌گیرد. در مقابل، کنترل کننده گروندهوک در تعداد کمی از گام‌های زمانی در وضعیت High State قرار می‌گیرد. کنترل کننده‌های ۳ تا ۶ وضعیت نسبتاً متعادل و مشابهی را از نظر تعداد گام‌های زمانی High State تجربه می‌کنند. لازم به ذکر است میراگر تعبیه‌شده در طبقه اول رفتار متفاوتی نسبت به دیگر میراگرها داراست؛ زیرا در آن از پاسخ‌های سرعت زمین در ارزیابی فاز حرکت سازه استفاده شده است. با صرف نظر از نتایج طبقه اول می‌توان نتیجه گرفت که قانون کنترل اسکای‌هوک، بیش‌ترین و قانون کنترل گروندهوک کم‌ترین نیروی کنترل را در کاهش پاسخ‌های سازه مصرف می‌کنند.



شکل ۵: مقایسه تعداد گام‌های زمانی بحرانی در قوانین کنترل

## ۵-۲- عملکرد سیستم کنترل نیمه‌فعال با اعمال پیش‌بینی

در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، حضور تأخیر زمانی به‌عنوان یک عدم قطعیت اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش تأخیر زمانی سنسورها بین ۵ الی ۲۰ میلی‌ثانیه و تأخیر زمانی کل بین ۱۰ الی ۵۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب تحت تحریک زلزله‌های معین، شتاب زمین و پاسخ‌های سازه برای زمان آینده پیش‌بینی شده و براساس قوانین کنترل مشخص، با تنظیم ولتاژ میراگر مغناطیسی نیروی کنترل لازم محاسبه می‌شود و در زمان مربوطه اعمال می‌گردد. پیش‌بینی شتاب زمین برطبق دو مدل پیش‌بینی شتاب ثابت و شتاب خطی انجام می‌گیرد. براساس نتایج حاصل از تحلیل، نمودارهایی برحسب نسبت پاسخ‌های سازه به دست می‌آیند که نمایانگر عملکرد قوانین کنترل در الگوریتم پیشنهادی هستند.

نسبت پاسخ‌های جابجایی و شتاب سازه با شاخص‌های ارزیابی DRR و ARR معرفی می‌شوند که از تقسیم  $RMS^{23}$  پاسخ‌های جابجایی و شتاب سازه در حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده به دست می‌آیند. مقادیر مربوط به نسبت پاسخ‌های جابجایی به صورت کیفی و کمی و مقادیر مربوط به نسبت پاسخ‌های شتاب تنها به صورت کمی در نتایج مربوطه ارائه شده‌اند.

$$\text{Displacement Response Ratio (DRR)} = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_d)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_d)_{uc}(i)} \quad (19)$$

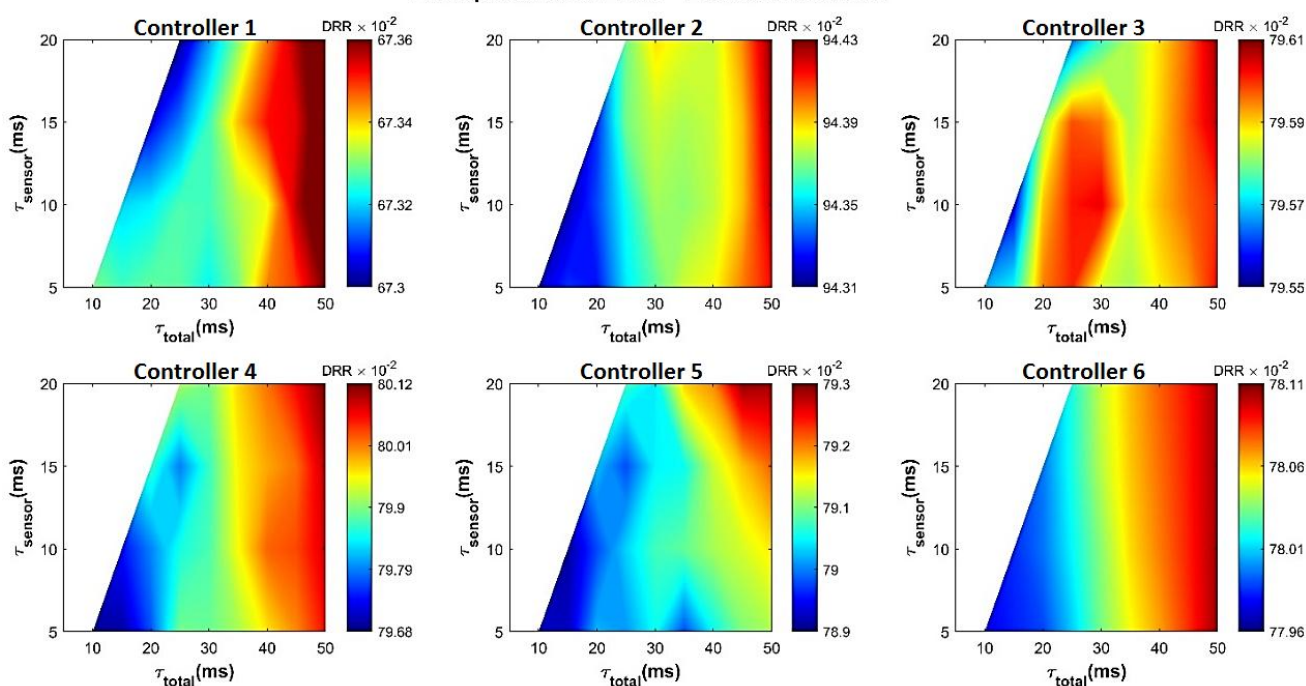
$$\text{Acceleration Response Ratio (ARR)} = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_a)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_a)_{uc}(i)} \quad (20)$$

23 Root-Mean-Square

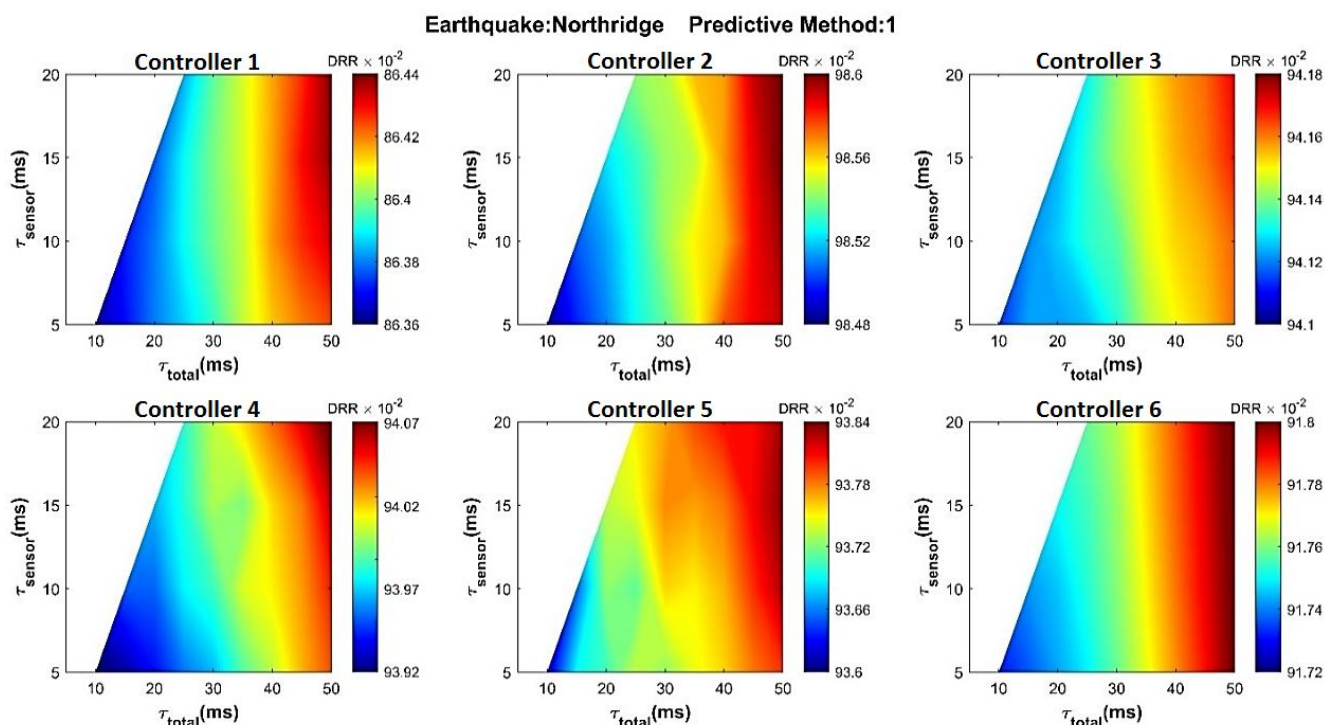
با در نظر گرفتن مدل پیش‌بینی شتاب ثابت (مدل پیش‌بینی ۱)، نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه تحت تحریک زلزله لوماپریتا و نورتریج در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. با مشاهده مقادیر کمی نسبت پاسخ‌های جابجایی می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی تحت قوانین کنترل موفق به کاهش نسبت پاسخ‌های سازه تحت زلزله‌های معین شده است. کنترل‌کننده اسکای‌هوک بیش‌ترین کاهش و کنترل‌کننده گروندهوک کم‌ترین کاهش مقادیر نسبت پاسخ‌ها را در بین قوانین کنترل دارند. کنترل‌کننده‌های ۴، ۲، ۱ و ۶ الگوی رفتاری قابل پیش‌بینی در هردو زلزله دارند؛ به گونه‌ای که با افزایش تأخیر زمانی کل، نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه افزایش می‌یابد. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که این کنترل‌کننده‌ها دارای یک الگوی رفتاری مشخص و قابل انتظار در برابر زلزله‌ها می‌باشند. هم‌چنین، در یک تأخیر زمانی کل ثابت مشاهده می‌شود که با افزایش تأخیر زمانی سنسور، تغییر چندانی در نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه رخ نمی‌دهد و این بدان معناست که قوانین کنترل مذکور، نسبت به تأخیر زمانی سنسور حساس نمی‌باشند. با توجه به الگوی رفتاری متفاوت در قوانین کنترل ۳ و ۵ تحت دو زلزله معین، نمی‌توان اظهار نظر قطعی درباره وضعیت آن‌ها نمود؛ اما به طور کلی محدوده کاهش نسبت پاسخ‌های جابجایی در قوانین کنترل ۳ الی ۵ نزدیک به یکدیگر می‌باشد و تفاوت چندانی بین عملکرد قوانین کنترل فاز که تعمیم یافته از یکدیگر می‌باشند، وجود ندارد.



Earthquake: Loma Prieta Predictive Method: 1



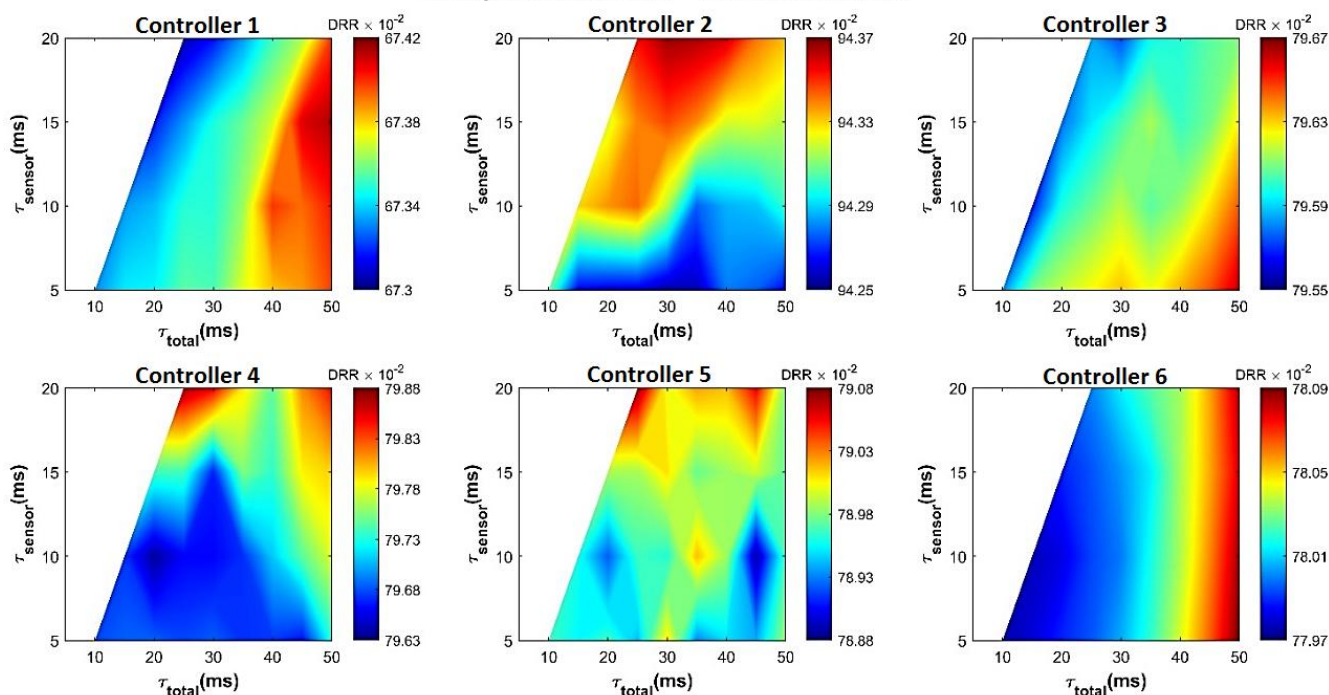
شکل ۵: نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه تحت زلزله لوماپریتا در مدل پیش‌بینی ۱



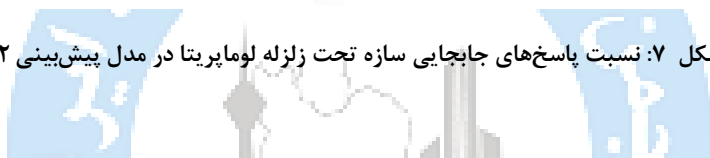
شکل ۶: نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه تحت زلزله نورتریج در مدل پیش‌بینی ۱

با در نظر گرفتن مدل پیش‌بینی شتاب خطی (مدل پیش‌بینی ۲) و انجام تحلیل، نمودارهای جدیدی مربوط به نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه تحت دو زلزله معین به دست می‌آیند. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده اسکای‌هوک با بیش‌ترین میزان کاهش نسبت پاسخ‌های جابجایی، بهترین عملکرد را در میان قوانین کنترل داراست. در مقابل، کنترل‌کننده گروندهوک با کم‌ترین میزان کاهش نسبت پاسخ‌های جابجایی دارای بدترین عملکرد می‌باشد. قوانین کنترل فاز (کنترل‌کننده‌های ۳ الی ۵) تحت تحریک هر دو زلزله، عملکرد مشابهی را از نظر محدوده و میزان کاهش نسبت پاسخ‌های جابجایی دارند. به جز کنترل‌کننده اسکای‌هوک، بقیه کنترل‌کننده‌ها در مدل پیش‌بینی ۲ الگوی رفتاری پراکنده‌ای تحت دو زلزله از خود نشان می‌دهند و از نظر کیفی نمایانگر رابطه خاصی بین نسبت پاسخ‌ها و تأخیرهای زمانی نمی‌باشند. بنابراین در مدل پیش‌بینی شتاب خطی تحت تحریک زلزله و نتایج حاصل از نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه، نمی‌توان الگوی رفتاری ثابت و مشخصی از کنترل‌کننده‌ها انتظار داشت.

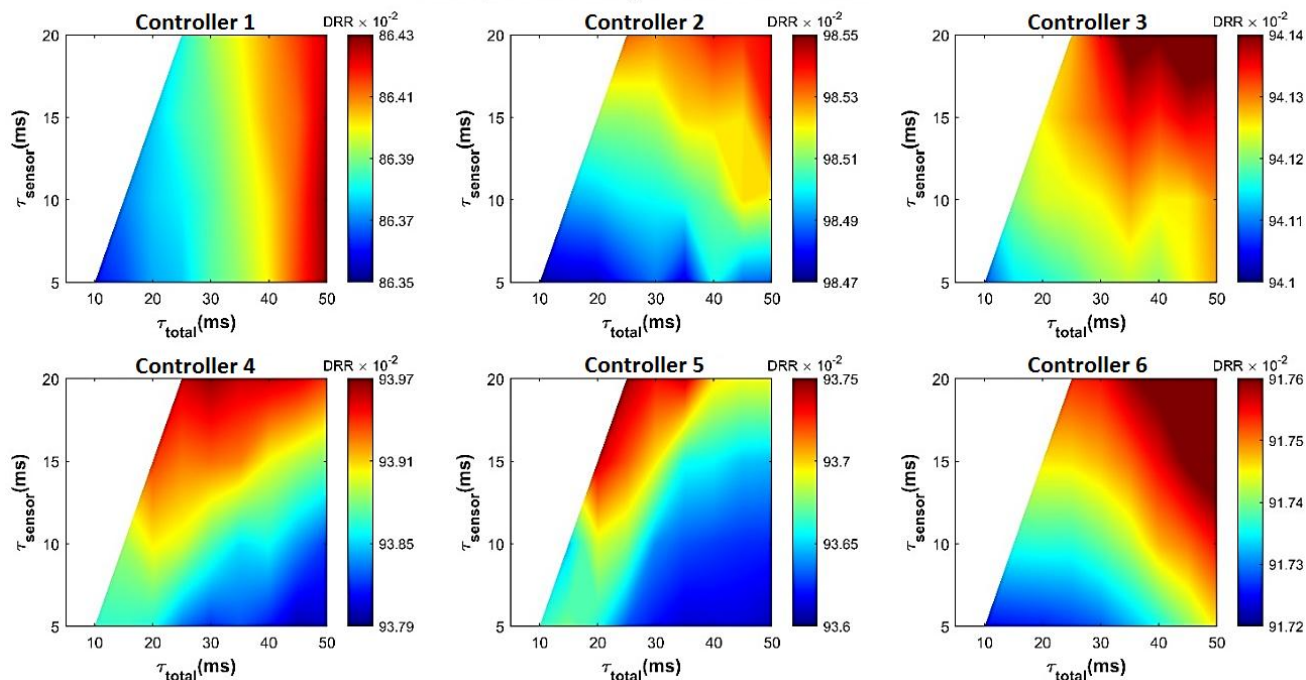
Earthquake:Loma Prieta Predictive Method:2



شکل ۷: نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه تحت زلزله لوماپریتا در مدل پیش‌بینی ۲



Earthquake:Northridge Predictive Method:2



شکل ۸: نسبت پاسخ‌های جابجایی سازه تحت زلزله نورثریج در مدل پیش‌بینی ۲

لازم به ذکر است با استخراج این نمودارها برای نسبت پاسخ‌های شتاب سازه، از نظر کیفی الگوهای رفتاری تقریباً مشابهی تحت مدل‌های پیش‌بینی ۱ و ۲ به دست می‌آید و الگوریتم پیشنهادی تحت هر شش قانون کنترل قادر به کاهش نسبت پاسخ‌های شتاب نیز می‌باشد.

محدوده مقادیر نسبت‌های پاسخ جابجایی و شتاب برای هر شش قانون کنترلی و تحت زلزله‌های لوماپریتا و نورث‌ریج در جداولی تنظیم شده‌اند. با مشاهده مقادیر کمی می‌توان دریافت که بهترین عملکرد از نظر کاهش نسبت پاسخ‌ها به ترتیب متعلق به کنترل‌کننده‌های اسکای‌هوک، حرکت نسبت به تعادل و در نهایت قوانین کنترل فاز می‌باشد. کنترل‌کننده گراوندهوک با کمترین میزان کاهش پاسخ‌ها بدترین عملکرد را در بین کنترل‌کننده‌ها دارا می‌باشد. قوانین کنترل فاز (کنترل‌کننده‌های ۳ الی ۵) با دارا بودن مقادیر کاهش پاسخ‌های نزدیک به هم، دارای عملکرد مشابهی می‌باشند.

جدول ۳- محدوده نسبت پاسخ جابه‌جایی سازه تحت زلزله لوماپریتا ( $10^{-2} \times$ )

مدل پیش‌بینی	کنترل‌کننده ۱	کنترل‌کننده ۲	کنترل‌کننده ۳	کنترل‌کننده ۴	کنترل‌کننده ۵	کنترل‌کننده ۶
۱	۶۷/۳۰~۶۷/۳۶	۹۴/۳۱~۹۴/۴۳	۷۹/۵۵~۷۹/۶۱	۷۹/۶۸~۸۰/۱۲	۷۸/۹۰~۷۹/۳۰	۷۷/۹۶~۷۸/۱۱
۲	۶۷/۳۰~۶۷/۴۲	۹۴/۲۵~۹۴/۳۷	۷۹/۵۵~۷۹/۶۷	۷۹/۶۳~۷۹/۸۸	۷۸/۸۸~۷۹/۰۸	۷۷/۹۷~۷۸/۰۹

جدول ۴: محدوده نسبت پاسخ جابه‌جایی سازه تحت زلزله نورث‌ریج ( $10^{-2} \times$ )

مدل پیش‌بینی	کنترل‌کننده ۱	کنترل‌کننده ۲	کنترل‌کننده ۳	کنترل‌کننده ۴	کنترل‌کننده ۵	کنترل‌کننده ۶
۱	۸۶/۳۶~۸۶/۴۴	۹۸/۴۸~۹۸/۶۰	۹۴/۱۰~۹۴/۱۸	۹۳/۹۲~۹۴/۰۷	۹۳/۶۰~۹۳/۸۴	۹۱/۷۲~۹۱/۸۰
۲	۸۶/۳۵~۸۶/۴۳	۹۸/۴۷~۹۸/۵۵	۹۴/۱۰~۹۴/۱۴	۹۳/۷۹~۹۳/۹۷	۹۳/۶۰~۹۳/۷۵	۹۱/۷۲~۹۱/۷۶

جدول ۵: محدوده نسبت پاسخ شتاب سازه تحت زلزله لوماپریتا ( $10^{-2} \times$ )

مدل پیش‌بینی	کنترل‌کننده ۱	کنترل‌کننده ۲	کنترل‌کننده ۳	کنترل‌کننده ۴	کنترل‌کننده ۵	کنترل‌کننده ۶
۱	۷۰/۱۴~۷۰/۲۶	۹۴/۸۶~۹۵/۰۲	۸۲/۲۶~۸۲/۳۲	۸۳/۳۶~۸۳/۸۰	۸۲/۰۶~۸۲/۳۸	۸۰/۶۰~۸۰/۷۶
۲	۷۰/۱۳~۷۰/۲۹	۹۴/۷۹~۹۴/۹۵	۸۲/۲۶~۸۲/۳۸	۸۳/۳۱~۸۳/۳۵	۸۲/۰۶~۸۲/۲۲	۸۰/۶۱~۸۰/۷۳

جدول ۶: محدوده نسبت پاسخ شتاب سازه تحت زلزله نورث‌ریج ( $10^{-2} \times$ )

مدل پیش‌بینی	کنترل‌کننده ۱	کنترل‌کننده ۲	کنترل‌کننده ۳	کنترل‌کننده ۴	کنترل‌کننده ۵	کنترل‌کننده ۶
۱	۸۶/۹۰~۸۶/۹۸	۹۸/۵۶~۹۸/۷۲	۹۴/۳۰~۹۴/۳۸	۹۴/۳۰~۹۴/۵۰	۹۳/۸۷~۹۴/۰۷	۹۲/۴۰~۹۲/۴۸
۲	۸۶/۹۰~۸۶/۹۸	۹۸/۵۶~۹۸/۶۴	۹۴/۲۶~۹۴/۳۴	۹۴/۲۳~۹۴/۳۸	۹۳/۸۷~۹۳/۹۹	۹۲/۳۸~۹۲/۴۴

مطابق نتایج جداول فوق نتیجه می شود که اختلاف فاحشی بین مقادیر به دست آمده تحت مدل پیش بینی شتاب ثابت و شتاب خطی وجود ندارد و از طرفی الگوهای رفتاری مورد انتظاری در مدل پیش بینی شتاب ثابت وجود دارند؛ بنابراین در روند پیش بینی شتاب زمین، می توان شتاب را بین زمان کنونی و آینده ثابت در نظر گرفت که ساده ترین مدل پیش بینی می باشد. همچنین ملاحظه می شود که با افزایش تأخیر زمانی سنسور و کل، نسبت های پاسخ تغییر چندانی نمی کنند. بنابراین الگوریتم پیشنهادی در برابر عدم قطعیت تأخیر زمانی عملکرد مناسبی دارد.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد الگوریتم پیش بین فاز حرکت بر روی یک سازه ۸ طبقه مجهز به میراگر مغناطیسی تحت تحریک زلزله های لوماپریتا و نورث ریج مورد بررسی قرار گرفت و بر روی شش قانون کنترل ارزیابی گردید. به منظور پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی و انجام عمل پیش بینی، تأخیرهای زمانی معینی برای سیستم سازه ای لحاظ گردید و برای پیش بینی شتاب زمین از دو مدل پیش بینی شتاب ثابت و شتاب خطی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل پاسخ های سازه در حالت کنترل شده با الگوریتم پیشنهادی نسبت به حالت کنترل نشده موارد زیر را نشان دادند.

(۱) الگوریتم پیشنهادی اعمالی بر روی شش قانون کنترل، با لحاظ نمودن تأخیرهای زمانی معین در کاهش نسبت پاسخ های جابجایی و شتاب سازه نسبت به حالت کنترل نشده موفق عمل نمود.

(۲) قوانین کنترل اسکای هوک، نسبت به تعادل و کنترل فاز به ترتیب بیش ترین میزان کاهش و قانون کنترل گراوندهوک کمترین میزان کاهش نسبت پاسخ های جابجایی و شتاب سازه را در بین قوانین کنترل دارند.

(۳) قوانین کنترل فاز (کنترل کننده های ۳ الی ۵) که دارای یک مفهوم مشترک بوده و از یکدیگر استنتاج می شوند، دارای نتایج تقریباً مشابهی از نظر کاهش نسبت پاسخ های سازه تحت الگوریتم پیشنهادی بودند، بنابراین می توان آن ها را به جای یکدیگر به کار گرفت.

(۴) باتوجه به عملکرد مشابه مدل های پیش بینی شتاب ثابت و شتاب خطی، می توان در روند پیش بینی شتاب زمین از مدل پیش بینی شتاب ثابت که ساده ترین مدل است، استفاده نمود و شتاب زمین را در طول افق پیش بینی ثابت در نظر گرفت. این امر حجم محاسبات و پیچیدگی آن را کاهش می دهد.

(۵) در نتایج حاصل از نسبت پاسخ های سازه مشاهده گردید که مدل پیش بینی شتاب ثابت الگوی رفتاری مشخصی از کنترل کننده ها تحت تحریک هردو زلزله ارائه می دهد که نتایج را قابل انتظار می کند. به همین دلیل استفاده از مدل پیش بینی شتاب ثابت به جای مدل پیش بینی شتاب خطی توصیه می گردد.

(۶) با توجه به اینکه افق پیش بینی در این پژوهش برابر با حداکثر تأخیر زمانی در نظر گرفته شده است، بدیهی است با افزایش افق پیش بینی یا تأخیر زمانی، دقت در نتایج به دست آمده کاهش می یابد؛ هم چنین تحت مدل پیش بینی شتاب ثابت مشاهده می شود که با افزایش تأخیر زمانی، نسبت پاسخ های سازه چندان تغییر نمی کند و الگوریتم پیشنهادی عملکرد مطلوبی در برابر تأخیر زمانی دارد.

(۷) الگوریتم پیشنهادی در مدل پیش بینی شتاب ثابت تحت قوانین کنترل اسکای هوک، گراوندهوک و حرکت نسبت به تعادل نسبت به افزایش تأخیر زمانی سنسورها حساس نمی باشد، زیرا در یک تأخیر زمانی کل ثابت، با افزایش تأخیر زمانی سنسورها نسبت پاسخ های شتاب و جابجایی سازه تغییر فاحشی ندارند.

## مراجع

- [1] El-Khoury, O., & Adeli, H. (2013). *Recent advances on vibration control of structures under dynamic loading*. Archives of Computational Methods in Engineering, 20, 353-360.
- [2] Hosseini, P., Hosseini, M., & Omranizadeh, S. M. (2019). *The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Nonlinear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators*. Civil Infrastructure Researches, 5(1), 35-49.
- [3] Spaggiari, A. (2013). Properties and applications of Magnetorheological fluids. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 7(23), 48-61.
- [4] Ghaffari, A. H., & Ghaffarzadeh, H. (2023). *Semi-active control of structures with MR and Orifice dampers subjected to underground blast-induced vibration*. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(2), 5-5.
- [5] Oliveira, F., Botto, M. A., Morais, P., & Suleman, A. (2018). *Semi-active structural vibration control of base-isolated buildings using magnetorheological dampers*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 37(3), 565-576.
- [6] Bathaei, A., & Zahrai, S. M. (2022). *Compensating time delay in semi-active control of a SDOF structure with MR damper using predictive control*. Structural Engineering and Mechanics, 82(4), 445-458.
- [7] Bitaraf, M., Ozbulut, O. E., Hurlebaus, S., & Barroso, L. (2010). *Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers*. Engineering Structures, 32(10), 3040-3047.
- [8] Bozorgvar, M., & Zahrai, S. M. (2019). *Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive neural-fuzzy intelligent controller optimized with genetic algorithm*. Journal of Vibration and Control, 25(2), 273-285.
- [9] Fazaeli Hosseini Nejad, H., & Karamodin, A. (2022). *Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system*. Journal of Structural and Construction Engineering, 9(5), 107-123.
- [10] Wani, Z. R., & Tantray, M. (2022). *Study on integrated response-based adaptive strategies for control and placement optimization of multiple magneto-rheological dampers-controlled structure under seismic excitations*. Journal of Vibration and Control, 28(13-14), 1712-1726.
- [11] Sohn, H. C., Hong, K. S., & 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.
- [12] Valasek, M., & Novak, M. (1996, January). *Ground hook for semi-active damping of truck's suspension*. In Proc. of CTU Workshop (Vol. 96, pp. 467-468).
- [13] Kim, H. S., & Kang, J. W. (2012). *Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi objective genetic algorithm*. Engineering Structures, 41, 242-257.
- [14] Yu, H., Sun, X., Xu, J., & 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, 4157-4166.
- [15] Zhang, Y., Schauer, T., Wernicke, L., Wulff, W., & Bleicher, A. (2020). *Facade-integrated semi-active vibration control for wind-excited super-slender tall buildings*. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 8395-8400.
- [16] Viet, L. D., Nghi, N. B., Hieu, N. N., Hung, D. T., Linh, N. N., & Hung, L. X. (2014). *On a combination of ground-hook controllers for semi-active tuned mass dampers*. Journal of Mechanical Science and Technology, 28, 2059-2064.
- [17] Javadinasab, S., Salari, S., & Ghorbani-Tanha, A. K. *Optimization of Combination of Sky-Hook and Ground-Hook Algorithms in Semi-Active Control of Steel Frames*.

- [18] 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).
- [19] Naderi, A. A., Bkhshinezhad, S., & Rezaei, S. (2022). *Probabilistic performance assessment of seismically excited buildings with semi-active fluid viscous dampers*. Numerical Methods in Civil Engineering, 7(1), 16-27.
- [20] Khodabandehlou, H., Pekcan, G., Fadali, M. S., & Salem, M. M. (2018). *Active neural predictive control of seismically isolated structures*. Structural Control and Health Monitoring, 25(1), e2061.
- [21] Katebi, J., Rad, A. B., & Zand, J. P. (2022). *A novel multi-feature model predictive control framework for seismically excited high-rise buildings*. Structural Engineering and Mechanics, 83(4), 537-549.
- [22] Chen, Y., Zhang, S., Peng, H., Chen, B., & Zhang, H. (2017). *A novel fast model predictive control for large-scale structures*. Journal of Vibration and Control, 23(13), 2190-2205.
- [23] Lu, L. Y. (2004). *Predictive control of seismic structures with semi-active friction dampers*. Earthquake engineering & structural dynamics, 33(5), 647-668.
- [24] Zelleke, D. H., & Matsagar, V. A. (2019). *Energy-based predictive algorithm for semi-active tuned mass dampers*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 28(12), e1626.

