

EXTENDED ABSTRACT

Studying the Effect of Model Predictive Algorithm Parameters on Vibration Control of Structures

Mortaza Ghorbani-Uri, Amin Gholizad *, Mona Shoaee-Parchin

Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil 1313156199, Iran

Received: 16 October 2024; **Reviewed:** 05 May 2025; **Accepted:** 27 May 2025

Keywords:

Prediction horizon, Control horizon, Model Predictive Control (MPC), Structural vibration control, Magnetorheological damper.

1. Introduction

In this research, the simultaneous effect of the prediction horizon (N_p) and control horizon (N_c) parameters on the efficiency of MPC controller for the structure equipped with MR damper is studied. The model structures are two three- and five-story shear frames equipped with MR dampers that have been subjected to earthquake excitation. In the control process, in order to check the effect of the parameters, first the states and control force weight matrices have been adjusted and then the combined effect of the N_p and N_c has been investigated. The results of the simulations show that choosing the value of the N_p as $N_p \approx (10 \times \text{DOF}) \pm 10$ and the N_c as $N_c \approx (10 \times \text{DOF})$ has a better performance in terms of achieving the control goals, and choosing higher values only increases the calculations.

2. Methodology

At first stage, the formulation of the MPC is presented. In the following, the weight matrices of the controller are adjusted based on trial and error in the case of $N_p = N_c = 1$ and these weights are assumed to be fixed during the study. Programming is done in MATLAB software. A simple bang-bang control law is used to command the voltage to produce the required force in the MR damper. Next, with the aim of studying the effect of N_p and N_c parameters, different values of these parameters are applied and the MPC controller is designed for different combinations of N_p and N_c . The maximum values of displacement response and control force of the top floor are reported for different values of N_p and N_c . The effect of the N_c is bold on the amount of control force and its effect on the response values is insignificant. For this reason, in this research, the impact of the N_p has been studied first. Next, in order to check the effect of N_c values on the controller's performance, the value of N_p equal to the result obtained from the previous section is adopted and by keeping the N_p constant, different values of the N_c are used in the controller design.

3. Results and discussion

According to the results, for three-story structure, it can be seen that increasing the value of N_p from 40 does not lead to a significant change in the responses and only increases the amount of calculation (Table 1). In the case of five-story structure, the maximum displacement response did not decrease with the increase of the

prediction horizon from $N_p=70$, and therefore, in the five-story structure, $N_p=60$ seems suitable for the prediction horizon, and adopting larger values will increase the calculations (Table 2).

Table 1. The maximum responses and control force of top floor of the three-story structure for different N_p and N_c

Controller			Displacement (m)	Velocity (m/s)	Acceleration (m/s ²)	Control Force (kN)
Uncontrolled			0.0428	0.7796	15.0548	-
MPC	$N_c = 10$	$N_p = 20$	0.0204	0.3998	7.5888	1.5312
	$N_c = 15$	$N_p = 30$	0.0177	0.3625	6.9635	1.8940
	$N_c = 20$	$N_p = 40$	0.0158	0.3309	6.3991	1.9236
	$N_c = 25$	$N_p = 50$	0.0162	0.3294	6.3468	1.9453
	$N_c = 30$	$N_p = 60$	0.0158	0.3215	6.1425	1.9996
	$N_c = 35$	$N_p = 70$	0.0155	0.3179	5.9472	2.0461
	$N_c = 40$	$N_p = 80$	0.0153	0.3131	5.8769	2.0455

Table 2. The maximum responses and control force of top floor of the five-story structure for different N_p and N_c

Controller			Displacement (m)	Velocity (m/s)	Acceleration (m/s ²)	Control Force (kN)
Uncontrolled			0.0435	0.7963	18.9390	-
MPC	$N_c = 10$	$N_p = 20$	0.0256	0.4264	10.1431	4.1658
	$N_c = 15$	$N_p = 30$	0.0221	0.3809	8.2847	5.5466
	$N_c = 20$	$N_p = 40$	0.205	0.3772	7.8089	5.9954
	$N_c = 25$	$N_p = 50$	0.0197	0.3736	7.5677	6.3179
	$N_c = 30$	$N_p = 60$	0.0187	0.3650	7.1052	6.8813
	$N_c = 35$	$N_p = 70$	0.0188	0.3652	7.1235	6.8649
	$N_c = 40$	$N_p = 80$	0.0187	0.3642	7.0759	6.9557

Table 3. The maximum responses and control force of top floor of the three-story structure for different N_c

Controller			Displacement (m)	Velocity (m/s)	Acceleration (m/s ²)	Control Force (kN)
Uncontrolled			0.0428	0.7796	15.0548	-
MPC	$N_c = 10$	$N_p = 40$	0.0153	0.3249	6.3002	1.9813
	$N_c = 15$	$N_p = 40$	0.0153	0.3257	6.3244	1.9696
	$N_c = 20$	$N_p = 40$	0.0158	0.3309	6.3991	1.9236
	$N_c = 25$	$N_p = 40$	0.0163	0.3370	6.4812	1.8968
	$N_c = 30$	$N_p = 40$	0.0165	0.3397	6.5138	1.8925
	$N_c = 35$	$N_p = 40$	0.0165	0.3402	6.5191	1.8930

Table 4. The maximum responses and control force of top floor of the five-story structure for different N_c

Controller			Displacement (m)	Velocity (m/s)	Acceleration (m/s ²)	Control Force (kN)
Uncontrolled			0.0435	0.7963	18.9390	-
MPC	$N_c = 30$	$N_p = 60$	0.0187	0.3650	7.1052	6.8813
	$N_c = 35$	$N_p = 60$	0.0190	0.3671	7.2101	6.7609
	$N_c = 40$	$N_p = 60$	0.0190	0.3676	7.2414	6.7350
	$N_c = 45$	$N_p = 60$	0.0190	0.3677	7.2455	6.7277
	$N_c = 50$	$N_p = 60$	0.0191	0.3680	7.2617	6.7079
	$N_c = 55$	$N_p = 60$	0.0191	0.3681	7.2686	6.7007

Considering the desired goal, which is the simultaneous reduction of responses and control efforts, it can be stated that considering $N_c=30$ by achieving this goal can be the desired value for the control horizon in the design controller for three-story shear frame (Table 3). For the five-story structure, if the priority is to simultaneously reduce the dynamic response and control force, $N_c=50$ seems more reasonable and appropriate than other values (Table 4). The MPC has been successful in reducing the structural response compared to the uncontrolled state. By initially adjusting the weights and keeping them constant in the process of studying the effect of the prediction and control horizon, it was observed that the selection of the N_p value is about 10 times the number of dofs of the structure (with about ± 10 tolerance) and the N_c is ($10 \times \text{DOF}$) has a better performance in terms of achieving the control goals, and choosing higher values does not have better effect on improving the control performance and only increases the MPC calculations.

4. Conclusions

The results of this study are briefly presented below. The MPC algorithm has been successful in reducing the structural response compared to the uncontrolled state. By initially adjusting the weights and keeping them constant in the process of studying the effect of the N_p and N_c , it was observed that the selection of the N_p value is about 10 times the number of dofs of the structure (with about ± 10 tolerance) and the N_c is ($10 \times \text{DOF}$) has a better performance in terms of achieving the control goals, and choosing higher values does not have better effect on improving the control performance and only increases the amount of MPC calculations.

اثر پارامترهای الگوریتم پیش‌بین مدل در کنترل ارتعاشات سازه‌ها با میراگر MR

مرتضی قربانی عوری¹، امین قلی‌زاد^{2*}، مونا شعاعی پرچین¹

¹ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

² استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

دریافت: 1403/7/25، بازنگری: 1404/2/15، پذیرش: 1404/3/6، نشر آنلاین: 1404/3/6

چکیده

کنترل ارتعاشات سازه با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی (Magnetorheological Damper (MR)) از جمله راه‌کارهای مؤثر در مستهلک کردن نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله می‌باشد. عملکرد این ابزار در استهلاک انرژی مبتنی بر اعمال لحظه‌ای ولتاژ به میراگر است که در نتیجه نیروی کنترلی مورد نیاز در فرآیند کنترل نیز تأمین می‌گردد. برای به‌دست آوردن میزان ولتاژ اعمالی به MR جهت تولید نیروی کنترلی انتخاب یک الگوریتم کنترل مناسب ضروری می‌باشد. در میان الگوریتم‌های رایج، کنترل پیش‌بین مدل (MPC) از مزایایی همچون سرعت و کارایی محاسباتی، قابلیت اجرای برخط در زمان واقعی، جبران ذاتی تأخیر زمانی و ارضای قیود برخورددار است. این الگوریتم دارای پارامترهایی هم‌چون مسیر مرجع، افق پیش‌بین (N_p) و افق کنترل (N_c) می‌باشد که می‌تواند بر دقت و کارایی الگوریتم MPC تأثیرگذار باشد. هدف این پژوهش مطالعه اثر هم‌زمان پارامترهای N_p و N_c در کارایی کنترلر MPC برای سازه مجهز به میراگر MR است. سازه‌های مورد مطالعه در این تحقیق دو قاب برشی سه و پنج طبقه مجهز به میراگر MR می‌باشد که تحت تحریک زلزله قرار گرفته‌اند. در فرآیند کنترل جهت بررسی اثر پارامترها، ابتدا ماتریس‌های وزنی حالت‌ها و نیروی کنترلی تنظیم شده و سپس اثر توأم N_p و N_c مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد انتخاب مقدار $N_p \pm 10$ ($10 \times \text{DOF}$) و $N_c \pm 10$ ($10 \times \text{DOF}$) عملکرد مطلوب‌تری از حیث دستیابی به اهداف کنترل داشته و انتخاب مقادیر بالاتر تنها باعث افزایش حجم محاسبات و زمان اجرای الگوریتم MPC می‌شود.

کلیدواژه‌ها: افق پیش‌بین، افق کنترل، الگوریتم پیش‌بین مدل، کنترل ارتعاشات سازه، میراگر سیال مغناطیسی.

1- مقدمه

Rabinow در اواخر دهه 1940 میلادی در دفتر ملی استاندارد ایالات متحده کشف شد (Rabinow, 1948). این سیال به‌طور معمول شامل ذرات میکرونی معلق در یک مایع ویسکوز با ویسکوزیته قابل تغییر است که در معرض میدان مغناطیسی قطبیده می‌شوند، با تغییر مقاومت میدان مغناطیسی از طریق یک الگوریتم از پیش تعیین شده، تنش تسلیم سیال تغییر پیدا کرده و نیروی کنترل تولید شده توسط میراگر MR می‌تواند به‌طور متناظر تنظیم گردد. تحت میدان مغناطیسی، سیال MR در عرض چند میلی‌ثانیه از حالت جریان آزاد به‌حالت نیمه‌جامد تغییر می‌کند (Bagherkhani و Baghlani, 2020). این میراگرها ابزارهایی با رفتار غیرخطی می‌باشند که از میان مدل‌های رفتاری

میراگرهای سیال مغناطیسی MR به‌دلیل قابلیت‌های مثبت و متمایزکننده نسبت به سایر ابزارهای کنترل در سال‌های گذشته به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف برای کنترل ارتعاش سازه‌های ساختمانی (Gordaninejad و همکاران، 2010؛ Jung و همکاران، 2004؛ Roësset و همکاران، 2002؛ Lenggana و همکاران، 2019) و پل‌ها (Jung و همکاران، 2004؛ Roësset و همکاران، 2002) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مطالعه پیشگام در مورد کاربرد میراگر MR برای کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه توسط Spencer و همکاران (1996) انجام شده است (Symans و Constantinou, 1999). میراگرهای مگنتورئولوژیک¹ از سیال هوشمند MR استفاده می‌کنند که توسط

1. Magnetorheological

است (Xu و همکاران، 2011). طرحی از کنترل پیش‌بین مدل توسعه‌یافته پیشنهاد شده است که مدل آماری تحریک زلزله را پیش‌بینی نموده و در معادلات دخیل می‌نماید (Bahrami-Rad و همکاران، 2021). در کنترل ارتعاشات برج روتوالی¹⁰ ناشی از باد از کنترل هیبریدی فعال- غیرفعال و الگوریتم MPC و LQR استفاده شده است که الگوریتم MPC در کاهش ارتعاشات دینامیکی عملکرد مطلوب‌تری داشته است (Koutsoloukas و همکاران، 2022).

در یک قاب سه طبقه برشی کوچک مقیاس برای کاهش ارتعاشات سازه از میراگر جرم فعال و نسخه‌ای از الگوریتم کنترلی MPC استفاده شده است که نیروهای کنترل را بر مبنای فرکانس‌های طبیعی سازه محاسبه می‌کند (Aguilar-Álvarez و همکاران، 2023). نسخه مقاوم الگوریتم پیش‌بین مدل (RMPC)¹¹ در برج مرتفع روتوالی در برابر ارتعاش ناشی از باد مورد مطالعه قرار گرفته است (Koutsoloukas و همکاران، 2020).

در پژوهشی یک طرح کنترل‌کننده پیش‌بین مدل مبتنی بر تابع لاگر (LOMPC)¹² پیشنهاد شده است و بر روی سازه سه طبقه مورد آزمایش قرار گرفته است (Enríquez-Zárate و همکاران، 2020).

مطالعه Lana و Rotea (2008) منجر به ارائه روشی شده است که حساسیت عملکرد MPC به عدم دقت مدل را به حداقل می‌رساند. یک استراتژی کنترل پیش‌بین مدل در ارتباط با الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال برای سازه‌های جداسازی‌شده از پایه با استفاده از میراگرهای سیال نیمه‌فعال در معرض بارهای زلزله (Oliveira و همکاران، 2014) پیشنهاد نموده است. برای انتخاب پارامترهای بهینه الگوریتم MPC، (Gutiérrez-Urquidez و همکاران، 2019) از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II¹³ استفاده نموده و توانسته‌اند زمان صرف‌شده برای تنظیم پارامترهای الگوریتم MPC را کاهش داده و عملکرد بهتری از این کنترلر را ارائه دهند. بر همین اساس (Dragoña و همکاران، 2020) انواع روش‌های بهینه‌سازی تابع هدف MPC را مورد بررسی قرار داده‌اند. در یک پژوهش (Giraldo و همکاران، 2022) برای تنظیم بهینه ماتریس‌های وزنی، افق پیش‌بین و افق کنترل از روشی موسوم به MPCT¹⁴ استفاده شده و نشان داده شده است که این الگوریتم هزینه‌های محاسباتی پایین‌تری در یافتن پارامترهای تنظیم MPC دارد و با اختصاص قابلیت تطبیق‌پذیری به الگوریتم آن را قادر می‌سازد تا با مسیر موردنظر تعریف شده توسط کاربر سازگار شود.

بینگهام²، بوک- ون³، بوک- ون اصلاح شده⁴ و گاموتا فیلیسکو⁵ استفاده از مدل بوک- ون اصلاح‌شده به دلیل دقت قابل قبول در مدل‌سازی رفتار میراگر رایج‌تر می‌باشد.

یکی از چالش‌های استفاده از میراگرهای MR توسعه یک الگوریتم کارآمد برای بهبود عملکرد میراگر می‌باشد. از جمله الگوریتم‌های خطی می‌توان به PID⁶، H_∞⁷، LQG⁷، LQR⁸ و MPC⁹ اشاره نمود. در کنار الگوریتم پرکاربردی همچون LQR، کنترلر بهینه پیش‌بین مبتنی بر مدل معرفی شده است که با اضافه کردن بخش پیش‌بینی پاسخ به معادلات LQR سعی در بهبود عملکرد این الگوریتم دارد. این الگوریتم عموماً در کنترل صنایع شیمیایی، خودروسازی و هوافضا به کار برده شده و به ندرت در مطالعات مهندسی سازه مورد استفاده قرار گرفته است.

در مقاله Holkar و Waghmare (2010) که شامل معرفی تکنیک‌های MPC است، رابطه MPC با کنترل درجه دوم خطی و عملکرد MPC در سیستم‌های غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. کنترل پیش‌بین مدل از یک مدل خطی و یک تابع هدف درجه دوم استفاده می‌کند. در غیاب قیدهای نامساوی در سیستم، MPC معادل کنترل بهینه درجه دوم خطی بوده و در افق‌های پیش‌بین طولانی، عملکرد آن به طرح کنترل H₂ نزدیک می‌شود (Mei و همکاران، 2002). طرح MPC هم‌چنین مزایایی در سرعت و کارایی محاسباتی، اجرای برخط در زمان واقعی، جبران ذاتی تأخیرهای زمانی و ارضای قیود ارائه می‌دهد.

الگوریتم MPC نخستین بار توسط Mei و همکاران در سال 1998 برای کنترل سازه‌های مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته است. (Mei و همکاران، 2001) کنترل پیش‌بین مدل بلادرنگ را برای کاهش پاسخ سازه تحت بارهای ناشی از زلزله معرفی نمودند، (Mei و همکاران، 2002) نسخه‌ای از MPC براساس بازخورد شتاب ارائه کرده و هم‌چنین از MPC برای کنترل ارتعاشات سازه تحت تحریک باد استفاده نمودند (Mei و همکاران، 2004). الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل اصلاح‌شده برای کاهش تعداد سنسورها در پیاده‌سازی واقعی توسط (Yang و همکاران، 2011) فرمول‌بندی گردیده است. در پژوهشی (Peng و همکاران، 2017) یک نسخه از کنترل پیش‌بین مدل سریع با در نظر گرفتن اشباع محرک برای سازه‌های بزرگ مقیاس پیشنهاد شده و روش کنترل پیش‌بین مدل سریع و دقیق برای سازه‌های بزرگ مقیاس توسط (Chen و همکاران، 2017) ارائه شده است. اثر تأخیر زمانی در الگوریتم MPC بر روی سازه مجهز به میراگر MR مطالعه شده

9. Model Predictive Control

10. Rottweil

11. Robust Model Predictive Control

12. Laguerre Functions and MPC

13. Nondominated Sorting Genetic Algorithm II

14. Model Predictive Control Tuning

2. Bingham

3. Bouc-Wen

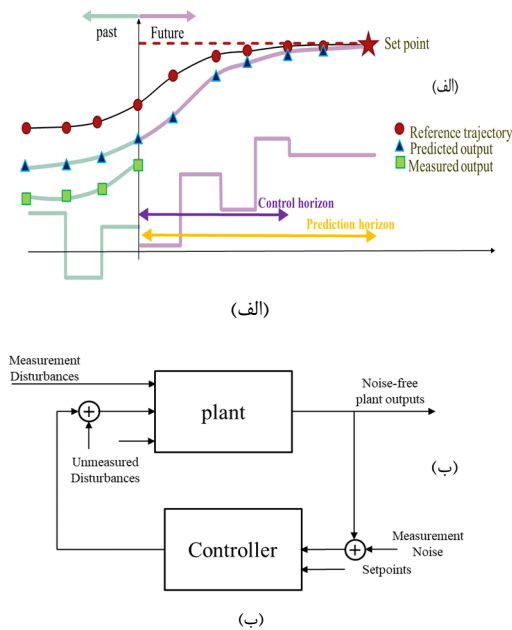
4. Modified Bouc-Wen

5. Gamota filisko

6. Proportional-Integral-Derivative

7. Linear Quadratic Gaussian

8. Linear Quadratic Regulator



شکل 1- الف) شمای کلی طرح MPC، ب) نمودار بلوکی سیستم کنترل مبتنی بر مدل

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = \Gamma u(t) - M_s \Lambda \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

در این رابطه، M_s ، C_s و K_s ماتریس‌های $(n \times n)$ جرم، میرایی و سختی سازه هستند. $\ddot{x}$ ، $\dot{x}$ و x به ترتیب بردارهای $(n \times 1)$ جابه‌جایی، سرعت و شتاب، Γ ماتریس $(n \times n)$ موقعیت میراگر در سازه، u بردار $(n \times 1)$ نیروی کنترلی، Λ بردار $(n \times 1)$ اثر نیروی خارجی و $\ddot{x}_g$ شتاب زمین می‌باشد. معادله (1) را در قالب فضای حالت (ss)¹⁸ می‌توان به شکل رابطه (2) نوشت.

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = A_{ss} z(t) + B_{ss} u(t) \\ y(t) = C_{ss} z(t) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن A_{ss} ماتریس $(2n \times 2n)$ سیستم، B_{ss} ماتریس ورودی $(2n \times n)$ ، C_{ss} ماتریس $(3n \times 2n)$ خروجی و z بردار $(2n \times 1)$ حالت می‌باشد. در MPC از معادلات زمان-گسسته فضای حالت استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} z(k+1) = A_d z(k) + B_d u(k) \\ y(k) = C_d z(k) \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $z(k+1)$ بردار حالت $(2n \times 1)$ در گام $k+1$ ، A_d ماتریس سیستم $(2n \times 2n)$ در حالت گسسته، $x(k)$ بردار حالت $(2n \times 1)$ گام k ، B_d ماتریس گسسته ورودی $(2n \times n)$ ، $u(k)$ بردار نیروی کنترلی $(n \times 1)$ ، $y(k)$ بردار خروجی، C_d ماتریس خروجی گسسته سازه و T_s گام زمانی نمونه‌برداری است. رابطه

مطالعات مختلفی برای بهبود عملکرد الگوریتم MPC صورت گرفته، اما در مورد تأثیر افق پیش‌بین (N_p) ¹⁵ و افق کنترل (N_c) ¹⁶ که در محاسبه پاسخ‌ها و نیروی کنترل نقش بسزایی دارند، تاکنون مطالعاتی انجام نپذیرفته است. تفاوت الگوریتم MPC با الگوریتم رایجی مانند LQR، بخش پیش‌بینی پاسخ‌های سازه در N_p گام و محاسبه نیروی کنترلی در N_c گام می‌باشد که به موازات آن ابعاد ماتریس‌های وزنی حالت‌ها و نیروی کنترل افزایش می‌یابد؛ این مساله به صورت مستقیم در بهینه‌سازی تابع هدف و تعیین پاسخ سازه دخیل می‌باشد؛ لذا ضرورت مطالعه میزان تأثیر این پارامترهای طراحی در روند محاسبات کنترل MPC دوچندان می‌شود. این مطالعه با هدف کنترل ارتعاشات سازه‌های مجهز به میراگر MR با الگوریتم MPC به مطالعه تأثیر پارامترهای N_p و N_c در کارایی کنترل MPC می‌پردازد. به منظور بررسی عددی، دو قاب برشی سه و پنج طبقه مجهز به میراگر MR در تمام طبقات تحت تحریک زلزله کوبه قرار گرفته و سپس با تنظیم ماتریس‌های وزنی، تأثیر پارامترهای N_p و N_c در عملکرد کنترل ارزیابی می‌گردد.

2- روش تحقیق

2-1- الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل

نمودار بلوکی سیستم کنترل مبتنی بر مدل و شمای کلی طرح MPC در شکل (1) نشان داده شده است. اگر حالت‌های سیستم از گام صفر تا گام k -ام بر مبنای مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها و همچنین تلاش کنترلی از گام صفر تا $(k-1)$ -ام بر مبنای محاسبات در دسترس باشند، هدف محاسبه تلاش‌های کنترلی از گام زمانی k تا $k + N_p$ است به طوری که که خروجی سیستم در بازه زمانی $[k, k + N_p] \Delta t$ تا حد ممکن به خروجی مرجع نزدیک باشد. برای این کار باید خروجی سیستم از گام k تا $k + N_p$ با توجه به مشخص بودن مدل دینامیکی سیستم پیش‌بینی شده و در محاسبات نیروی کنترل به کار گرفته شود.

به پارامتر N_p افق پیش‌بین گفته می‌شود و در واقع تعداد گام بازه زمانی پیش‌بینی را نشان می‌دهد. در نتیجه عملیات پیش‌بینی، تلاش‌های کنترلی در طول افق کنترل محاسبه گردیده ولیکن اولین تلاش کنترلی محاسبه شده به سیستم اعمال می‌شود که به این قاعده، اصل افق کاهنده¹⁷ می‌گویند. رابطه (1) معادله دینامیکی حرکت یک سازه n درجه آزادی مجهز به مکانیزم کنترلی فعال را نمایش می‌دهد.

17. Receding Horizon

18. State-Space

15. Prediction Horizon

16. Control Horizon

$$F = [CA \quad CA^2 \quad CA^3 \quad \dots \quad CA^{N_p}]^T \quad (12)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (13)$$

در ادامه، تابع هزینه درجه دوم مطابق رابطه (14) تشکیل می‌گردد، پارامتر R_s مسیر مرجعی است که انتظار می‌رود پاسخ سیستم تحت کنترل تعقیب نماید که در فرآیند کنترل سازه به دلیل این که هدف مطلوب دستیابی به پاسخ صفر می‌باشد، بنابراین پارامتر مسیر مرجع مقدار صفر به خود می‌گیرد. $\bar{Q}$ ماتریس وزنی حالت و $\bar{R}$ ماتریس وزنی نیروی کنترل بوده و سنگینی کفه بهینه‌سازی به نفع حالت‌ها و یا نیروی کنترل را تعیین می‌نمایند. با جای‌گذاری عبارات معادل، تابع هزینه به شکل رابطه (15) درمی‌آید:

$$J = (R_s - Y)^T \bar{Q} (R_s - Y) + \Delta u^T \bar{R} \Delta u \quad (14)$$

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T \bar{Q} (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta u^T \Phi^T \bar{Q} (R_s - Fx(k_i)) \Phi + \Delta u^T (\Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{R}) \Delta u \quad (15)$$

سپس تابع هزینه برای به‌دست‌آوردن نیروی کنترلی کمینه می‌شود. برای به‌دست آوردن مینیمم J ابتدا اولین مشتق آن نسبت به Δu محاسبه شده و برابر صفر قرار می‌گیرد و در نهایت از حل معادله جبری ریکاتی، نیروی کنترلی مطابق رابطه (18) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = -2\Phi^T \bar{Q} (R_s - Fx(k_i)) + 2(\Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{R}) \Delta u \quad (16)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0 \quad (17)$$

$$\Delta U = (\Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T \bar{Q} (R_s - FX(k_i)) \quad (18)$$

2-2- مدل‌سازی رفتار میراگر مایع مغناطیسی MR

در این مطالعه از مدل بوک-ون اصلاح شده برای شبیه‌سازی رفتار میراگر MR استفاده می‌شود. شماتیک این مدل در شکل (2) نمایش داده شده است. نیروی غیرخطی F را می‌توان با استفاده از رابطه (19) به‌دست آورد که در آن مقدار λ از حل معادله درگیر موجود در روابط (20) و (21) به‌دست می‌آید (Spencer و همکاران، 1997):

بین فرم گسسته و فرم پیوسته ماتریس‌های فضای حالت به‌صورت زیر می‌باشد (Franklin و همکاران، 1998):

$$A_d = \left(I - \frac{A_{ss} T_s}{2} \right) \left(I - \frac{A_{ss} T_s}{2} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$B_d = \left(I - \frac{A_{ss} T_s}{2} \right)^{-1} B_{ss} \sqrt{T_s} \quad (5)$$

$$C_d = \sqrt{T_s} C_{ss} \left(I - \frac{A_{ss} T_s}{2} \right)^{-1} \quad (6)$$

برای این که خطای حالت ماندگار به صفر میل کند، ماتریس‌های افزوده¹⁹ (A و B) طبق رابطه (7) تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} z(k+1) = Az(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cz(k) \end{cases} \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_d & 0^T \\ C_d A_d & I \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_d \\ C_d B_d \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad I]$$

که در آن A ماتریس $((2n+3n) \times (2n+3n))$ سیستم، B ماتریس $((2n+3n) \times n)$ ورودی و C ماتریس $((2n+3n) \times (3n \times 3n))$ خروجی سازه در حالت افزوده می‌باشند. متغیرهای حالت گام بعدی (آینده) در MPC مطابق با مجموعه پارامترهای کنترل به‌صورت متوالی براساس رابطه (8) محاسبه می‌شوند:

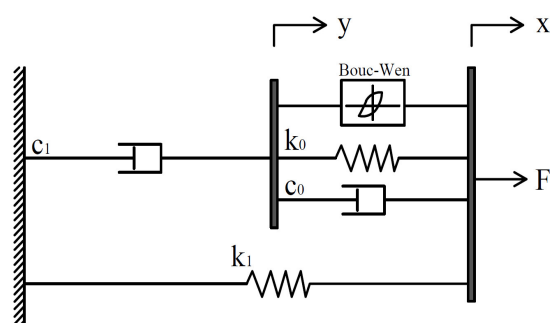
$$\begin{aligned} y(k_i+1|k_i) &= CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i) \\ y(k_i+2|k_i) &= CAx(k_i+1|k_i) + CB\Delta u(k_i) \\ &= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CB\Delta u(k_i+1) \\ &\vdots \\ y(k_i+N_p|k_i) &= CA^{N_p}x(k_i) + A^{N_p-1}B\Delta u(k_i) + \\ &\quad CA^{N_p-2}B\Delta u(k_i+1) + \dots + CA^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i+N_c-1) \end{aligned} \quad (8)$$

تمامی متغیرهای پیش‌بینی‌شده با در نظر گرفتن اطلاعات فعلی متغیر حالت $x(k_i)$ و تغییرات نیروی کنترلی $\Delta u(k_i+j)$ فرمول‌بندی می‌شوند و $j = 0, 1, \dots, N_c - 1$ می‌باشد. روابط فوق می‌توانند در فرم فشرده ماتریسی به‌صورت رابطه (9) ادغام گردند که در آن نحوه تشکیل هر یک از ماتریس‌ها در روابط (10) تا (13) ارائه شده است:

$$Y = FX + \Phi \Delta U \quad (9)$$

$$Y = [y(k_i+1|k_i) \quad \dots \quad y(k_i+N_p|k_i)]^T \quad (10)$$

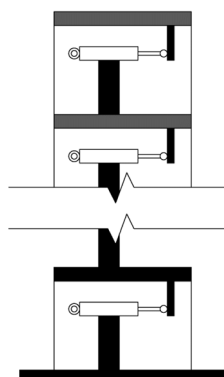
$$\Delta u = [\Delta u(k_i) \quad \dots \quad \Delta u(k_i+N_c-1)]^T \quad (11)$$



شکل 2- مدل بوک- ون اصلاح شده

3-2- سازه‌های مورد مطالعه

شماتیک قاب‌های برشی مورد مطالعه (Mei و همکاران، 2002؛ Li و Xu، 2011) به همراه مشخصات جرم، سختی و میرایی سازه‌های مذکور در شکل (3) نمایش داده شده است.



$$M_s = \begin{bmatrix} 6.0133 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6.0133 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.0133 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.0133 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.0133 \end{bmatrix} (ton)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} 62825 & -29093 & 0 & 0 & 0 \\ -29093 & 57714 & -28621 & 0 & 0 \\ 0 & -28621 & 53575 & -24954 & 0 \\ 0 & 0 & -24954 & 44013 & -19059 \\ 0 & 0 & 0 & -19059 & 19059 \end{bmatrix} \left(\frac{kN}{m} \right)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} 125 & -58 & 0 & 0 & 0 \\ -58 & 115 & -57 & 0 & 0 \\ 0 & -57 & 107 & -50 & 0 \\ 0 & 0 & -50 & 88 & -38 \\ 0 & 0 & 0 & -38 & 38 \end{bmatrix} \left(\frac{kN \cdot s}{m} \right)$$

$$M_s = \begin{bmatrix} 0.9740 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9740 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9740 \end{bmatrix} (ton)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} 2740 & -1640 & 370 \\ -1640 & 3020 & -1620 \\ 370 & -1620 & 1330 \end{bmatrix} \left(\frac{kN}{m} \right)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} 0.3827 & -0.0573 & 0.0616 \\ -0.0573 & 0.4567 & -0.0026 \\ 0.0616 & -0.0026 & 0.4373 \end{bmatrix} \left(\frac{kN \cdot s}{m} \right)$$

شکل 3- مشخصات قاب‌های برشی مورد مطالعه

$$F = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \quad (19)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} + (\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y)) \quad (20)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (21)$$

در روابط (19) تا (21)، F نیروی کنترلی تولید شده توسط میراگر MR، c_1 تنظیم‌کننده رفتار غیرخطی میراگر در سرعت‌های پایین، k_1 سختی القاگر، x جابه‌جایی میراگر، x_0 تغییر مکان اولیه فنر با سختی k_1 و $k_1 x_0$ نیروی اسمی تولید شده توسط القاگر می‌باشد؛ c_0 میرایی ویسکوز در سرعت‌های بزرگ، α ضریب تکاملی، Z متغیری برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های هیستریزس، $\dot{x}$ سرعت میراگر، k_0 کنترل سختی در سرعت‌های بزرگ و γ جابه‌جایی داخلی میراگر است. با تنظیم پارامترهای γ ، β ، A و n می‌توان شکل حلقه چرخه‌ای را کنترل نمود. پارامترهای c_0 ، c_1 و α از روابط (22) تا (24) و ولتاژ مؤثر از رابطه (25) تعیین می‌شود:

$$c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (22)$$

$$c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u \quad (23)$$

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (24)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (25)$$

قانون ساده کنترل bang-bang (Li و Xu، 2011) جهت دستور اعمال ولتاژ برای تولید نیروی مورد نیاز در میراگر MR با مشخصات مندرج در جدول (1) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$V_i(t) = \begin{cases} V_{max} & F_i(t) \cdot u_i(t) > 0, |F_i(t)| < u_i(t) \\ 0 & other \end{cases} \quad (26)$$

در رابطه (26)، V_{max} حداکثر ولتاژ اعمالی به میراگر MR، F_i نیروی کنترلی میراگر MR و u_i نیروی کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم می‌باشد.

جدول 1- پارامترهای مدل بوک- ون اصلاح شده

(Jung و همکاران، 2003)

$\alpha_a = 46200 \text{ N/m}$	$A = 1107.2$
$\alpha_b = 41200 \text{ N.v/m}$	$n = 2$
$c_{1a} = 8359200 \text{ N.s.v/m}$	$B = 164 \text{ m}^{-2}$
$c_{1b} = 7482900 \text{ N.s/m}$	$\Gamma = 164$
$c_{0a} = 11000 \text{ N.s.v/m}$	$\eta = 100 \text{ s}^{-1}$
$c_{0b} = 114300 \text{ N.s/m}$	$x_0 = 0 \text{ m}$
$k_1 = 9.7 \text{ N/m}$	$k_0 = 2 \text{ N/m}$

سازه و δ دریفت سازه بوده و رابطه (27) محاسبه جذر میانگین مربعات را ارائه می‌نماید:

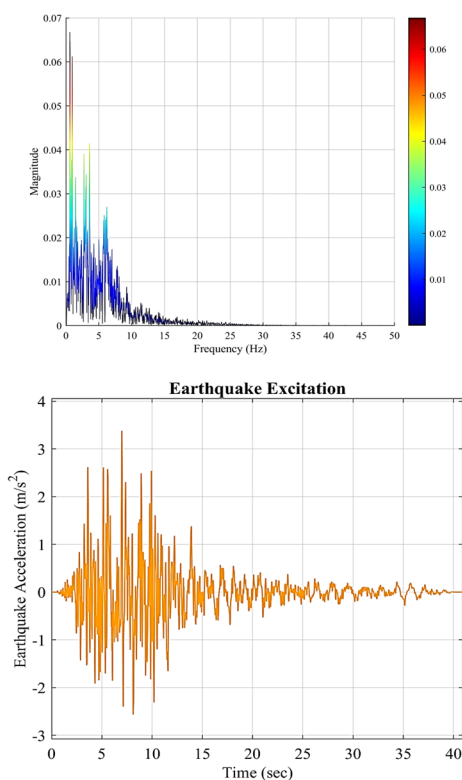
$$RMS(x) = \sqrt{\frac{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{tf}^2)}{tf}} \quad (27)$$

جدول 3- شاخص‌های عملکرد

$J_{1,f} = \frac{\max_{t,f} \delta_c(t_f) }{\max_{t,f} \delta_{uc}(t_f) }$	$J_{2,f} = \frac{\max_{t,f} \ddot{x}_c(t_f) }{\max_{t,f} \ddot{x}_{uc}(t_f) }$
$J_{3,f} = \frac{\max_{t,f} \dot{x}_c(t_f) }{\max_{t,f} \dot{x}_{uc}(t_f) }$	$J_{4,f} = \frac{\max_{t,f} x_c(t_f) }{\max_{t,f} x_{uc}(t_f) }$
$J_{5,f} = \frac{\max_{t,f} u_f }{W_f}$	$J_{6,f} = \frac{RMS_{t,f} \delta_c(t_f) }{RMS_{t,f} \delta_{uc}(t_f) }$
$J_{7,f} = \frac{RMS_{t,f} \ddot{x}_c(t_f) }{RMS_{t,f} \ddot{x}_{uc}(t_f) }$	$J_{8,f} = \frac{RMS_{t,f} \dot{x}_c(t_f) }{RMS_{t,f} \dot{x}_{uc}(t_f) }$
$J_{9,f} = \frac{RMS_{t,f} x_c(t_f) }{RMS_{t,f} x_{uc}(t_f) }$	$J_{10,f} = \frac{RMS_{t,f} u_f }{W_f}$

5-2- معرفی تحریک زلزله

در این مطالعه ارتعاشات سازه‌ها تحت تحریک زلزله کوبه با مشخصات جدول (4) کنترل می‌گردد. شکل (4) محتوای فرکانسی و تاریخچه زمانی زلزله کوبه را نمایش می‌دهد.



شکل 4- محتوای فرکانسی و تاریخچه زمانی زلزله کوبه

4-2- تنظیم ماتریس وزنی و ارزیابی عملکرد کنترلر

ماتریس‌های وزنی کنترلر MPC برای سازه سه و پنج طبقه در جدول (2) ارائه شده که Q_d ماتریس وزنی حالت‌های جابه‌جایی، Q_v ماتریس وزنی حالت‌های سرعت، N_p طول افق پیش‌بینی، N_c طول افق کنترل، q خروجی سیستم، c تعداد محرک کنترل و I ماتریس واحد می‌باشد.

جدول 2- مقادیر ماتریس‌های وزنی حالت‌ها و نیروی کنترل

سازه	ماتریس وزنی نیروی کنترل $(\bar{R})$	ماتریس وزنی بردار حالت $(\bar{Q})$
سه طبقه	$10^{-1} \times I_{3 \times 3}$	$(Q_d = 1 \times I_{n \times n}, Q_v = 0.1 \times I_{n \times n})$
پنج طبقه	$10^{-2.48} \times I_{5 \times 5}$	

این ماتریس‌ها براساس آزمون و خطا در حالت $N_p = N_c = 1$ تعیین شده و جهت بررسی تأثیر پارامترهای N_p و N_c در طول مطالعه ثابت نگه داشته می‌شوند. در الگوریتم MPC برخلاف روش LQR (که به دلیل ماهیت الگوریتم پایداری پاسخ‌ها همیشه تضمین شده است)، تضمینی برای پایداری کنترلر طراحی شده تحت شرایط مختلف وجود ندارد. یکی از مواردی که پایداری MPC را تحت تأثیر قرار می‌دهد مقادیر ماتریس‌های وزنی هستند. به عبارتی دیگر گرچه در روش LQR وزن‌ها فقط با معیار برقراری توازن میان کاهش پاسخ‌ها و انرژی کنترلی تنظیم می‌شوند، در MPC علاوه بر این مورد، سعی و خطای انجام گرفته برای تنظیم وزن‌ها بایستی با نگاهی به مسئله پایداری انجام پذیرد. از آن جایی که هدف از طرح کنترلر کاهش پاسخ‌های سازه با صرف حداقل مقدار انرژی است، معیار اصلی در این مطالعه برای انتخاب وزن‌ها کاهش پاسخ جابه‌جایی و دریفت سازه بوده و با توجه به این که ممکن است سازه تحت زلزله‌های شدیدتری در طول عمر مفید خود قرار گیرد، تلاش گردیده تا از حداقل ظرفیت اعمال نیروی میراگر الحاقی به سازه استفاده گردد.

شاخص‌های ارزیابی کارایی کنترلر جهت بررسی عملکرد کنترلر MPC محاسبه و گزارش می‌شوند. در جدول (3)، J_1, J_2, J_3 و J_4 به ترتیب نسبت ماکزیمم دریفت، شتاب، سرعت، جابه‌جایی و نیروی کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم MPC به مقادیر کنترل‌نشده بوده و J_5 نسبت ماکزیمم نیروی کنترل به وزن سازه است. J_6, J_7, J_8 و J_9 نسبت جذر میانگین مربعات دریفت، شتاب، سرعت، جابه‌جایی و نیروی کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم MPC به مقادیر مشابه از سازه کنترل‌نشده و J_{10} نسبت RMS نیروی کنترل به وزن سازه می‌باشد. زیرنویس‌های c و uc به ترتیب مربوط به حالت کنترل شده و کنترل نشده هستند. f نماد طبقات

ماکزیمم تغییر مکان در حالت کنترل شده به شرایط کنترل نشده سازه به 50 درصد می‌رسد.

شکل‌های (7) و (8) رفتار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت میراگر مستقر در طبقات فوقانی سازه‌های مورد مطالعه و تاریخچه زمانی ولتاژ مورد نیاز را نمایش می‌دهد. مطابق با نمودارها، اتلاف انرژی در سازه‌های کنترل شده به نحو مناسبی صورت گرفته است. همچنین مشاهده می‌شود میراگرهای MR در حالت $v=0$ نیز قادر به استهلاک انرژی می‌باشند. حضور عامل میراکننده در ساختار میراگر MR سبب می‌شود این میراگر در حالت عدم اعمال ولتاژ (جهت عملکرد فعال)، به صورت غیرفعال و بدون حضور میدان مغناطیسی نیز قادر به استهلاک انرژی باشد. این ویژگی ذاتی میراگر MR بوده و استهلاک انرژی در تمام سازه‌های مجهز به میراگر MR در حالت ولتاژ صفر انجام می‌پذیرد. با توجه به دو نمودار شکل (7) و (8) مشاهده می‌گردد میزان اتلاف انرژی در حالت ولتاژ صفر در مقایسه با حالتی که میدان مغناطیسی بر میراگر اعمال می‌شود (ولتاژ غیر صفر) بسیار کمتر بوده و قابلیت اصلی استهلاک انرژی میراگر MR در شرایط اعمال ولتاژ فعال می‌شود.

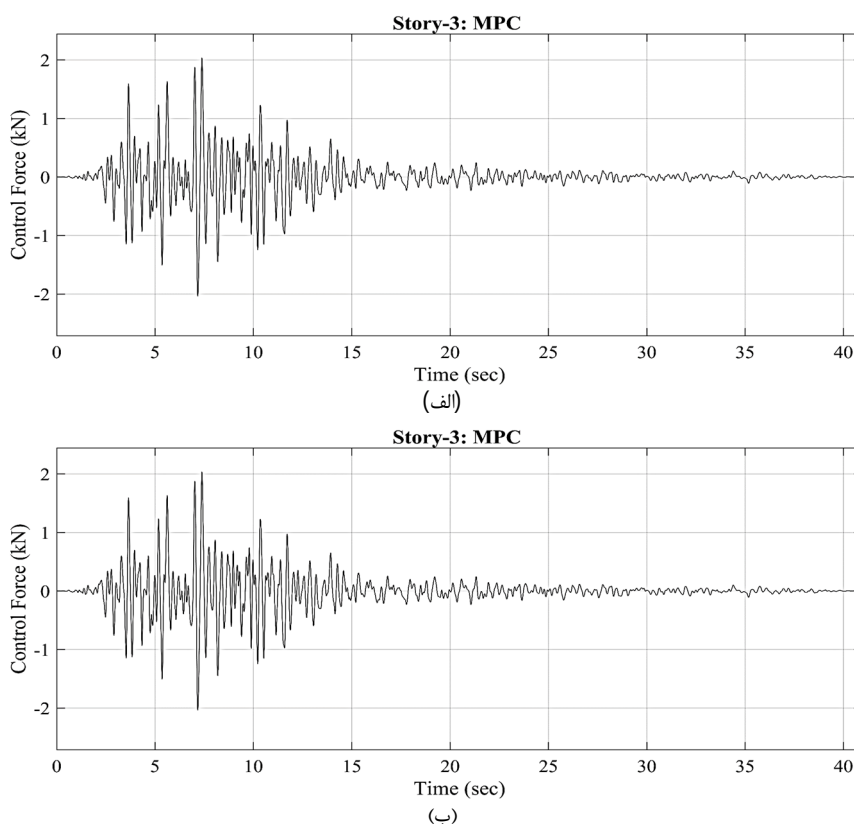
جدول 4- مشخصات زلزله کوبه

نام منطقه	تاریخ رخداد	مدت زمان	بزرگی Mw	عمق km	گام زمان نمونه برداری
کوبه ژاپن	17 جولای 1996	40/96	6/9	17/6	0/01

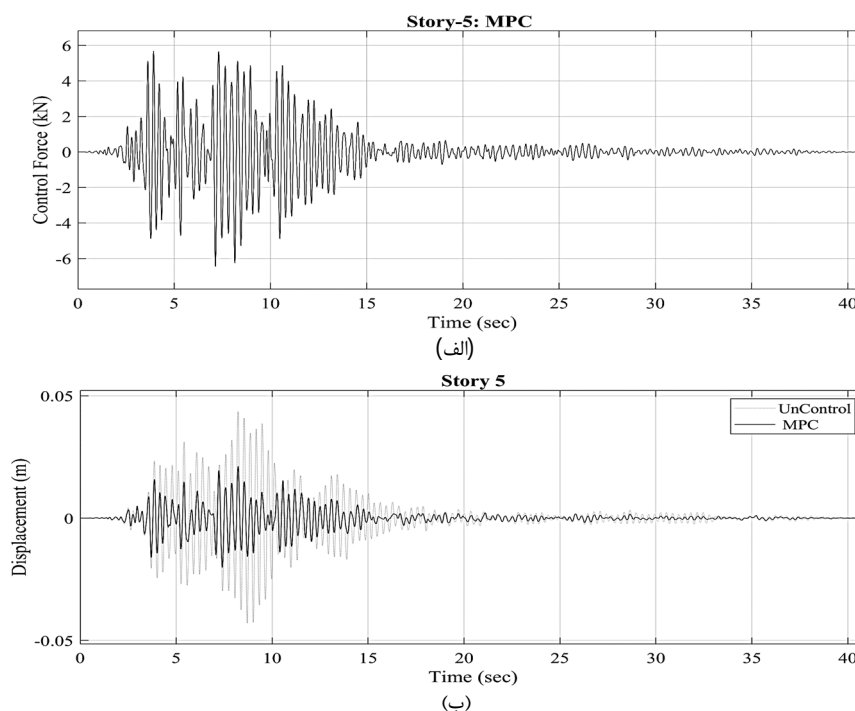
3- نتایج و بحث

این پژوهش با هدف بررسی اثر توأم پارامترهای الگوریتم MPC در کارایی کنترلر مبتنی بر آن انجام گردید. در این راستا ارتعاشات دو قاب برشی تحت تحریک زلزله کنترل می‌شوند. ماتریس‌های وزنی کنترلر براساس سعی و خطا و در حالت $N_p=N_c=1$ تنظیم گردیده و در طول مطالعه ثابت فرض می‌شوند. برنامه‌نویسی در محیط متلب انجام شده و از میان نتایج تحلیل، نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان، نیروی کنترل، رفتار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت و نمودار ولتاژ- زمان میراگر MR برای طبقات فوقانی سازه‌ها گزارش شده است.

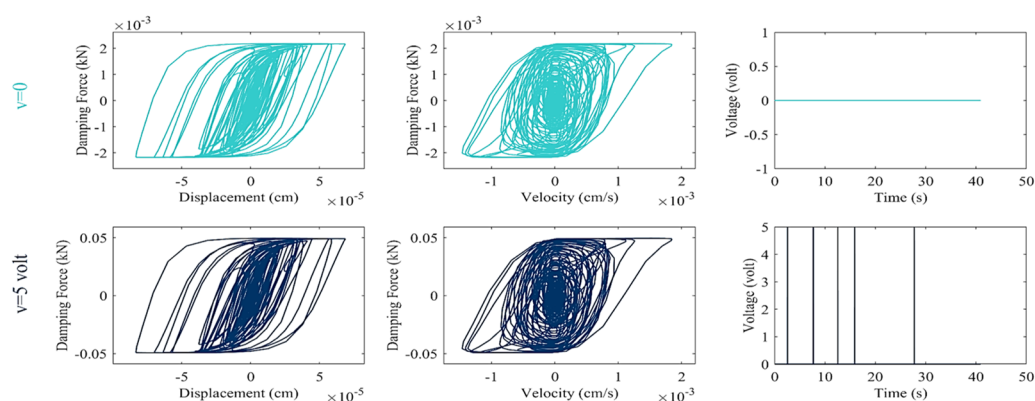
مطابق شکل‌های (5) و (6) با اعمال نیروی کنترل محاسبه شده توسط کنترلر MPC، مقادیر جابه‌جایی طبقه فوقانی هر دو سازه سه و پنج طبقه در حالت کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است؛ به طوری که نسبت



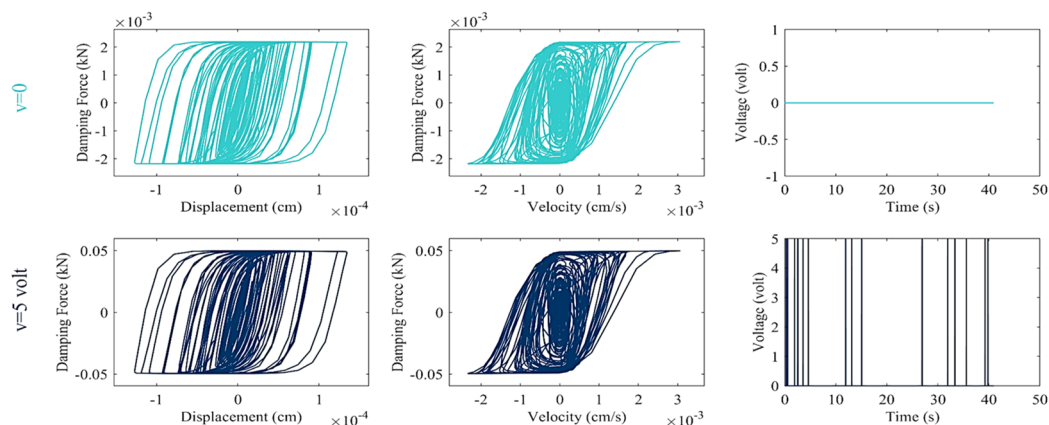
شکل 5- تاریخچه زمانی: الف) نیروی کنترل، ب) پاسخ تغییرمکان طبقه فوقانی سازه سه طبقه



شکل 6- تاریخچه زمانی: الف) نیروی کنترل، ب) پاسخ جابه‌جایی طبقه فوقانی سازه پنج طبقه



شکل 7- رفتار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت و نمودار ولتاژ- زمان میراگر MR مستقر در طبقه فوقانی سازه سه طبقه تحت زلزله کوبه



شکل 8- رفتار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی، نیرو- سرعت و نمودار ولتاژ- زمان میراگر MR مستقر در طبقه فوقانی سازه پنج طبقه تحت زلزله کوبه

جدول 6- مقادیر ماکزیمم پاسخ تغییر مکان و نیروی کنترلی طبقه فوقانی سازه سه طبقه به ازای مقادیر مختلف N_p و N_c

روش کنترل	جابه جایی (m)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s^2)	نیروی کنترل (kN)	
کنترل نشده	0/0428	0/7796	15/0548	-	
$N_c = 1$	$N_p = 2$	0/7730	11/2450	0/1408	
$N_c = 2$	$N_p = 5$	0/6743	10/0041	0/5870	
$N_c = 5$	$N_p = 10$	0/4725	9/1455	1/2881	
$N_c = 10$	$N_p = 20$	0/3998	7/5888	1/5312	
$N_c = 15$	$N_p = 30$	0/3625	6/9635	1/8940	
$N_c = 20$	$N_p = 40$	0/3309	6/3991	1/9236	
$N_c = 25$	$N_p = 50$	0/3294	6/3468	1/9453	
$N_c = 30$	$N_p = 60$	0/3215	6/1425	1/9996	
$N_c = 35$	$N_p = 70$	0/3179	5/9472	2/0461	
$N_c = 40$	$N_p = 80$	0/3131	5/8769	2/0455	
$N_c = 45$	$N_p = 90$	0/3158	5/8512	2/0231	
$N_c = 50$	$N_p = 100$	0/3178	5/9169	2/0287	
$N_c = 75$	$N_p = 150$	0/3157	5/9425	2/0592	
$N_c = 100$	$N_p = 200$	0/3182	5/9803	2/0525	
$N_c = 125$	$N_p = 250$	0/3180	5/9847	2/0518	
$N_c = 150$	$N_p = 300$	0/3180	5/9827	2/0502	

MPC

جدول 7- مقادیر ماکزیمم پاسخ و ماکزیمم نیروی کنترلی در طبقه فوقانی سازه پنج طبقه به ازای مقادیر مختلف N_p و N_c

روش کنترل	جابه جایی (m)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s^2)	نیروی کنترل (kN)	
کنترل نشده	0/0435	0/7963	18/9390	-	
$N_c = 1$	$N_p = 2$	0/7760	18/6794	0/5943	
$N_c = 2$	$N_p = 5$	0/6555	16/0010	2/1144	
$N_c = 5$	$N_p = 10$	0/4973	11/7854	3/4847	
$N_c = 10$	$N_p = 20$	0/4264	10/1431	4/1658	
$N_c = 15$	$N_p = 30$	0/3809	8/2847	5/5466	
$N_c = 20$	$N_p = 40$	0/3772	7/8089	5/9954	
$N_c = 25$	$N_p = 50$	0/3736	7/5677	6/3179	
$N_c = 30$	$N_p = 60$	0/3650	7/1052	6/8813	
$N_c = 35$	$N_p = 70$	0/3652	7/1235	6/8649	
$N_c = 40$	$N_p = 80$	0/3642	7/0759	6/9557	
$N_c = 45$	$N_p = 90$	0/3617	6/9876	7/1799	
$N_c = 50$	$N_p = 100$	0/3624	7/0089	7/1635	
$N_c = 75$	$N_p = 150$	0/3622	7/0117	7/3079	
$N_c = 100$	$N_p = 200$	0/3629	7/0353	7/3241	
$N_c = 125$	$N_p = 250$	0/3630	7/0397	7/3542	
$N_c = 150$	$N_p = 300$	0/3631	7/0449	7/3553	

MPC

مطابق نتایج مندرج در جدول (6) مشاهده می شود که به ازای $N_p=30, 40, 50$ ماکزیمم تغییر مکان کنترل شده نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب 59، 62 و 63 درصد و مقادیر شتاب به ترتیب 54، 57 و 58 درصد کاهش یافته است. براساس نتایج شبیه سازی - ها افزایش مقدار N_p از 40 منجر به تغییر قابل ملاحظه ای در مقادیر پاسخ ها نشده و تنها افزایش حجم محاسبات را سبب می شود. به - نظر می رسد که ماکزیمم پاسخ های جابه جایی و شتاب در $N_p=80$ نسبت به $N_p=40$ کاهش بیشتری دارند. درصد این کاهش ها در

نتایج اعمال کنترلر MPC بر سازه های مورد مطالعه عملکرد مناسب آن را در کاهش ارتعاشات در برابر تحریکات زلزله تأیید می نماید. در ادامه با هدف مطالعه تأثیر پارامترهای N_p و N_c ، مقادیر مختلفی از این پارامترها اختیار شده و کنترلر MPC برای ترکیب مختلفی از N_p و N_c طراحی می گردد. مقادیر ماکزیمم پاسخ تغییر مکان و نیروی کنترلی طبقه فوقانی سازه سه طبقه به - ازای مقادیر مختلف N_p و N_c در جدول (6) ارائه شده است.

تأثیر N_c عموماً بر روی میزان نیروی کنترل بوده و اثر آن بر مقادیر پاسخ‌ها ناچیز است. به همین دلیل در این پژوهش، ابتدا تأثیر N_p مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه جهت بررسی تأثیر مقادیر N_c بر عملکرد کنترلر، مقدار N_p برابر با نتیجه حاصل از بخش قبل اتخاذ شده و با ثابت نگه داشتن N_p ، مقادیر مختلف N_c در طراحی کنترلر به کار گرفته می‌شود. نتایج این بخش از مطالعات در جداول (8) و (9) گزارش شده است. نقش N_p و N_c در کنترلر MPC همان تأثیر ماتریس‌های وزنی در کنترلر LQR است؛ با این تفاوت که ماتریس‌های وزنی بر روی فیدبک‌های حالت سازه و مقادیر نیروی کنترل محاسبه شده اعمال گردیده و موازنه-ای بین مقادیر مشاهده شده و موجود پاسخ‌ها و تلاش‌های کنترلی ایجاد می‌نمایند؛ اما در کنترلر MPC با افزوده شدن امتیاز پیش-بینی به محاسبات، N_p و N_c نقش پیش‌بینی پاسخ‌ها و نیروی کنترلی گام‌های آینده را در موازنه بین کاهش پاسخ و کاهش نیروی کنترل ایفا می‌کنند. با در نظر گرفتن هدف مطلوب که کاهش هم‌زمان پاسخ‌ها و تلاش‌های کنترلی است، با توجه به جدول (8) می‌توان اظهار داشت که در نظر گرفتن $N_c=30$ با دستیابی به این هدف می‌تواند مقدار مطلوب برای N_c در کنترلر طراحی شده برای سازه سه طبقه مورد مطالعه تلقی گردد.

جابه‌جایی و شتاب به ترتیب 1 و 4 درصد هستند، در حالی که در $N_p=80$ نسبت به $N_p=40$ با افزایش دو برابری زمان اجرای برنامه و اشغال حافظه بیشتر سیستم این مقادیر حاصل شده‌اند. بنابراین انتخاب $N_p=80$ به عنوان مقدار بهینه، منطقی به نظر نمی‌رسد. مقادیر ماکزیمم پاسخ تغییر مکان و نیروی کنترلی طبقه فوقانی سازه پنج طبقه به ازای مقادیر مختلف N_p و N_c در جدول (7) ارائه شده است. در سازه پنج طبقه نیز به ازای $N_p=50, 60, 70$ ، تغییر مکان کنترل شده نسبت به شرایط کنترل نشده به ترتیب $54/7$ ، $57/0$ و $56/7$ درصد و ماکزیمم شتاب به ترتیب $62/4$ ، $60/0$ و $62/3$ کاهش یافته است. با مقایسه بین دو حالت $N_p=60$ و $N_p=50$ مشاهده می‌شود که پاسخ‌های تغییر مکان و شتاب به ترتیب $2/3$ و $2/4$ درصد و به ازای $N_p=70$ و $N_p=60$ برابر با $0/3$ و $0/1$ درصد بهبود یافته‌اند. به بیان دیگر ماکزیمم پاسخ تغییر مکان و شتاب با افزایش N_p از 70 روند کاهشی نداشته و بنابراین در سازه پنج طبقه، $N_p=60$ مناسب به نظر می‌رسد و اتخاذ مقادیر بیشتر حجم محاسبات را افزایش خواهد داد. انتخاب دیگر می‌تواند $N_p=150$ باشد. اما با مقایسه درصد کاهش پاسخ نسبت به $N_p=60$ در مقابل افزایش زمان اجرای برنامه و میزان حافظه ذخیره شده، انتخاب $N_p=150$ انتخاب بهینه‌ای به نظر نمی‌رسد.

جدول 8- مقادیر ماکزیمم پاسخ و ماکزیمم نیروی کنترلی در طبقه فوقانی سازه سه طبقه به ازای مقادیر مختلف N_c

روش کنترل	جابه‌جایی (m)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s^2)	نیروی کنترل (kN)
کنترل نشده	0/0428	0/7796	15/0548	-
$N_c = 1$ $N_p = 40$	0/0127	0/2612	5/6102	2/0386
$N_c = 5$ $N_p = 40$	0/0141	0/3079	6/1162	1/9524
$N_c = 10$ $N_p = 40$	0/153	0/3249	6/3002	1/9813
$N_c = 15$ $N_p = 40$	0/0153	0/3257	6/3244	1/9696
$N_c = 20$ $N_p = 40$	0/0158	0/3309	6/3991	1/9236
$N_c = 25$ $N_p = 40$	0/0163	0/3370	6/4812	1/8968
$N_c = 30$ $N_p = 40$	0/0165	0/3397	6/5138	1/8925
$N_c = 35$ $N_p = 40$	0/0165	0/3402	6/5191	1/8930
$N_c = 39$ $N_p = 40$	0/0165	0/3402	6/5196	1/8930

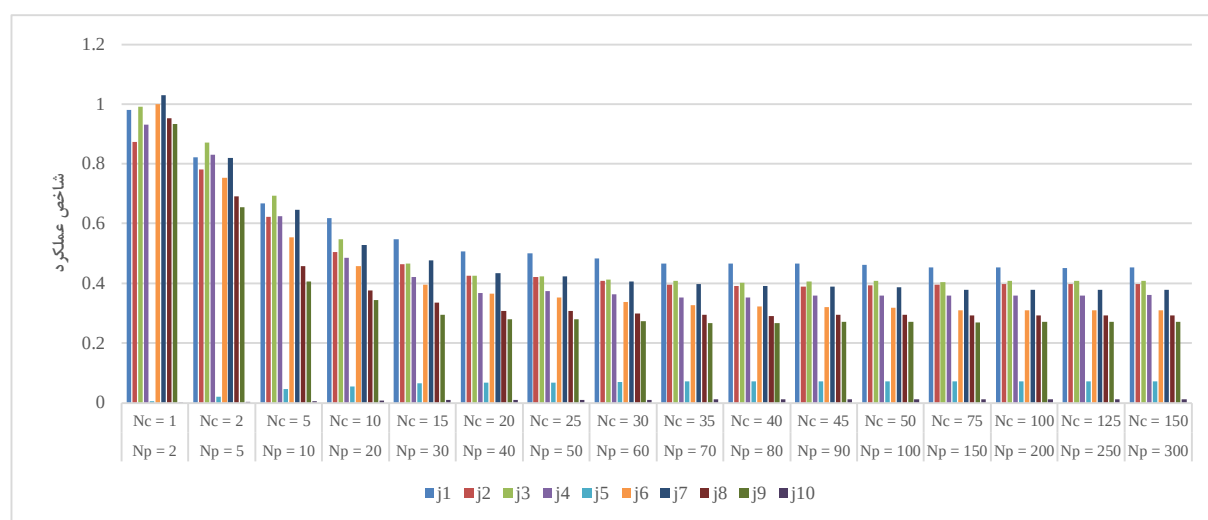
جدول 9- مقادیر ماکزیمم پاسخ و ماکزیمم نیروی کنترلی در طبقه فوقانی سازه پنج طبقه به ازای مقادیر مختلف N_c

روش کنترل	جابه‌جایی (m)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s^2)	نیروی کنترل (kN)
کنترل نشده	0/0435	0/79663	18/9390	-
$N_c = 1$ $N_p = 60$	0/0171	0/3428	6/4328	7/9645
$N_c = 5$ $N_p = 60$	0/0178	0/3537	6/7537	7/4571
$N_c = 10$ $N_p = 60$	0/0179	0/3551	6/8099	7/4053
$N_c = 15$ $N_p = 60$	0/0183	0/3588	6/8881	7/2075
$N_c = 20$ $N_p = 60$	0/0186	0/3632	7/0232	6/9904
$N_c = 25$ $N_p = 60$	0/0186	0/3638	7/0561	6/9690
$N_c = 30$ $N_p = 60$	0/0187	0/3650	7/1052	6/8813
$N_c = 35$ $N_p = 60$	0/0190	0/3671	7/2101	6/7609
$N_c = 40$ $N_p = 60$	0/0190	0/3676	7/2414	6/7350
$N_c = 45$ $N_p = 60$	0/0190	0/3677	7/2455	6/7277
$N_c = 50$ $N_p = 60$	0/0191	0/3680	7/2617	6/7079
$N_c = 55$ $N_p = 60$	0/0191	0/3681	7/2686	6/7007
$N_c = 59$ $N_p = 60$	0/0191	0/3681	7/2690	6/7003

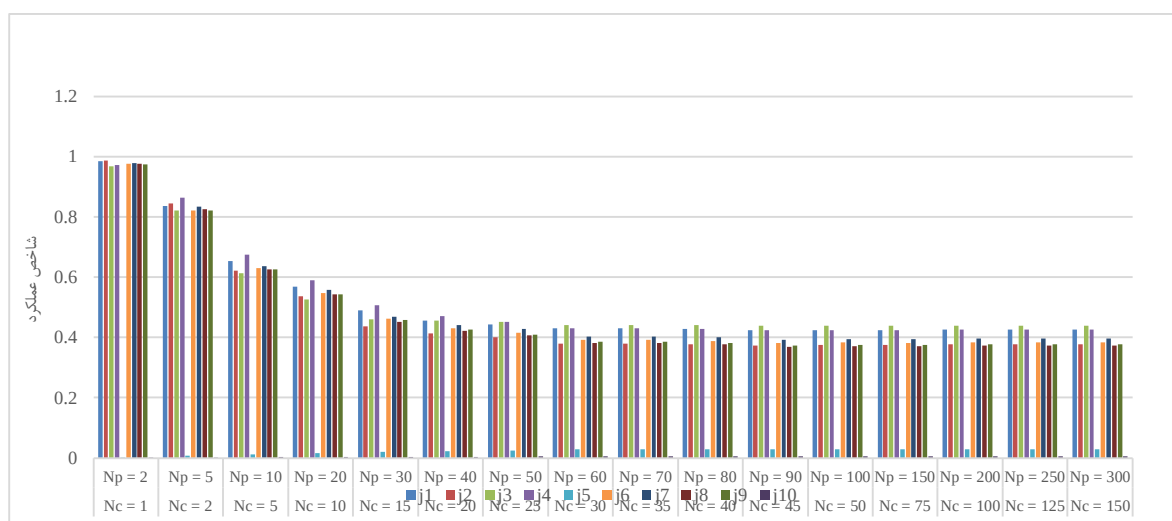
اتفاق افتاده است. به جز حالت $Np=2$ مقادیر شاخص‌ها از 1 کمتر بوده و کنترلر عملکرد بهتری از حالت کنترل نشده از خود نشان داده است. نمودار میله‌ای شاخص‌های عملکرد شکل (9) حاکی از آن است که برای مقادیر بیشتر از $Np=40$ کاهش چشم‌گیری در کاهش پاسخ‌ها برای سازه سه طبقه مشاهده نمی‌شود. همچنین نمودارهای میله‌ای شکل (10) نیز نتایج به‌دست آمده برای انتخاب $Np=60$ را برای سازه پنج طبقه تأیید می‌نماید. در نهایت مطالعه انجام شده تحت تحریک زلزله ال‌سنترو نیز انجام گرفت که نتیجه‌گیری مشابه با زلزله کوبه در انتخاب پارامترهای Nc و Np حاصل گردید.

برای سازه پنج طبقه نیز اگر اولویت کاهش هم‌زمان پاسخ دینامیکی و نیروی کنترلی باشد، $Nc=50$ منطقی‌تر و مناسب‌تر از دیگر مقادیر به‌نظر می‌رسد. در انتخاب مقدار مطلوب برای Nc نیز زمان اجرای، حجم محاسبات و فضای ذخیره‌سازی مدنظر قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که انتخاب مقادیر Nc بیشتر از مقادیر تعیین شده برای سازه سه و پنج طبقه تنها باعث افزایش موارد ذکر شده می‌شود.

در ادامه شاخص‌های عملکرد برای کنترل‌های طراحی شده محاسبه شده و نتایج آن ارائه می‌گردد. هرچه شاخص‌های عملکرد کنترلر از عدد یک فاصله بگیرد کاهش پاسخ به‌نحو مطلوب‌تری



شکل 9- شاخص‌های عملکرد کنترلر سازه سه طبقه به‌ازای مقادیر مختلف Np



شکل 10- شاخص‌های عملکرد کنترلر سازه پنج طبقه به‌ازای مقادیر مختلف Np

4- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر پارامترهای طراحی الگوریتم MPC با مدل سازی دو قاب برشی سه و پنج طبقه که در همه طبقات مجهز به میراگر MR هستند، تحت تحریک زلزله کوبه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا ماتریس های وزنی حالت ها و نیروی کنترلی تنظیم شده و اثر ترکیبات مختلفی از N_p و N_c بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است.

- الگوریتم MPC در کاهش پاسخ سازه ای با N_p و N_c های مختلف نسبت به حالت کنترل نشده عملکرد موفقی داشته است.

- با توجه به نتایج حاصل از جداول و نمودارها مشاهده گردید که انتخاب $10 \pm (10 \times \text{DOF}) \leq N_p$ عملکرد مطلوب تری از حیث دستیابی به اهداف کنترل (از نظر کاهش پاسخ جابه جایی و شتاب) داشته که در این بین تعادل بین کاهش حجم محاسبات و کاهش ماکزیمم پاسخ نیز مدنظر قرار گرفته است.

- انتخاب $(10 \times \text{DOF}) \leq N_c$ عملکرد مطلوب تری از حیث دستیابی به اهداف کنترل داشته که در این انتخاب نیز کاهش ماکزیمم پاسخ های سازه با حداقل نیروی کنترلی و کاهش حجم محاسبات دخیل بوده است.

- انتخاب پارامترهای N_p و N_c بیشتر از مقدار توصیه شده تاثیر ناچیزی در کاهش پاسخ ها و نیروی کنترلی داشته و نه تنها باعث افزایش حجم محاسبات شده، بلکه زمان اجرای الگوریتم را نیز افزایش می دهد.

- در نهایت مطالعه انجام شده با انتخاب زلزله ال سنتر و به عنوان تحریک ورودی صورت گرفت که نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از زلزله کوبه از نقطه نظر الگوی انتخاب پارامترهای N_p و N_c مطابقت داشت.

5- مراجع

- control for buildings", *Annual Reviews in Control*, 2020, 50, 190-232.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001>
- Enríquez-Zárate J, Valencia-Palomo G, López-Estrada FR, Silva-Navarro G, Hoyo-Montaño JA, "Efficient predictive vibration control of a building-like structure", *Asian Journal of Control*, 2020, 22 (4), 1411-1421. <https://doi.org/10.1002/asjc.2015>
- Franklin GF, Powell JD, Workman ML, *Digital control of dynamic systems*, Menlo Park: Addison-wesley, 1998, 3.
- Gordaninejad F, Wang X, Hitchcock G, Bangrakulur K, Ruan S, Siino MJ, "Modular high-force seismic magneto-rheological fluid damper", *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136 (2), 135-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2010\)136:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(135))
- Gutiérrez-Urquidez RC, Valencia-Palomo G, Rodríguez-Elías OM, López-Estrada FR, Orrante-Sakanassi JA, On the Selection of Tuning Parameters in Predictive Controllers Based on NSGA-II. In: *Numerical and Evolutionary Optimization*. Cham: Springer International Publishing, 2017, 138-157. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96104-0_7
- Giraldo SA, Melo PA, Secchi AR, Tuning of model predictive controllers based on hybrid optimization. *Processes*, 2022, 10 (2), 351. <https://doi.org/10.3390/pr10020351>
- Holkar KS, Waghmare LM, "An overview of model predictive control", *International Journal of Control and Automation*, 2010, 3 (4), 47-63.
- Jung HJ, Spencer Jr BF, Ni YQ, Lee IW, "State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications", *Structural Engineering and Mechanics*, 2004, 17 (3-4), 493-526. https://doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.493
- Jung HJ, Spencer Jr BF, Lee IW, "Control of seismically excited cable-stayed bridge employing magnetorheological fluid dampers", *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129 (7) 873-883. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(873\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(873))
- Koutsoloukas L, Nikitas N, Aristidou P, "Robust structural control of a real high-rise tower equipped with a hybrid mass damper", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2022, 31 (12), e1941. <https://doi.org/10.1002/tal.1941>
- Koutsoloukas L, Nikitas N, Aristidou P, Meinhardt C, "Control law and actuator capacity effect on the dynamic performance of a hybrid mass damper; the case of rottweil tower", 2020. 10.47964/1120.9115.19241
- Lana C, Rotea M, "Desensitized model predictive control applied to a structural benchmark problem", *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41 (2), 13188-13193. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02234>
- Lenggana BW, Ubaidillah U, Imaduddin F, Widyarso W, Purnomo ED, Utami D, Mazlan SA, "Performance prediction of a novel modular magnetorheological damper for seismic building", *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2019, 58 (2), 275-286.
- Aguilar-Álvarez P, Valencia-Palomo G, Enríquez-Zárate J, Morales-Valdez J, Hernández-González O, "Vibration control using a positive position feedback-based predictive controller applied to a one-bay three-story scaled shear frame", *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2023, 11 (3), 873-885. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42417-022-00613-w>
- Bagherkhani A, Baghlani A, "Structure-MR damper reliability analysis using weighted uniform simulation method in Structures", 2020, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.013>
- Chen Y, Zhang S, Peng H, Chen B, Zhang H, "A novel fast model predictive control for large-scale structures. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23 (13), 2190-2205. <https://doi.org/10.1177/1077546315610033>
- Drgoña J, Arroyo J, Figueroa IC, Blum D, Arendt K, Kim D, Ollé EP, Oravec J, Wetter M, Vrabie DL, Helsen L, "All you need to know about model predictive

- Mei G, Kareem A, Kantor JC, "Model predictive control of structures under earthquakes using acceleration feedback", *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128 (5), 574-585.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:5\(574\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:5(574))
- Mei G, Kareem A, Kantor JC, "Real-time model predictive control of structures under earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30 (7), 995-1019.
<https://doi.org/10.1002/eqe.49>
- Mei G, Kareem A, Kantor JC, "Model predictive control of wind-excited building: Benchmark study", *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130 (4), 459-465.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:4\(459\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(459))
- Oliveira FS, Morais P, Suleman A, "Predictive control for earthquake response mitigation of buildings using semiactive fluid dampers", *Shock and Vibration*, 2014, 2014, 1-14.
<https://doi.org/10.1155/2014/670683>
- Peng H, Li F, Zhang S, Chen B, "A novel fast model predictive control with actuator saturation for large-scale structures", *Computers & Structures*, 2017, 187, 35-49.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.03.014>
- Roësset JM, Yao JT, "State of the art of structural engineering", *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128 (8), 965-975.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:8\(965\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:8(965))
- Rabinow J, "The magnetic fluid clutch", *Electrical Engineering*, 1948, 67 (12), 1167-1167.
10.1109/EE.1948.6444497
- Rad AB, Nouri M, Katebi J, Ghasemi SA, "A developed model predictive control scheme for vibration attenuation of building structures", *Smart Structures and Systems*, 2021, 27 (4), 691-703.
<https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.4.691>
- Spencer Jr B, Dyke SJ, Sain MK, Carlson J, "Phenomenological model for magnetorheological dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123 (3), 230-238.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230))
- Symans MD, Constantinou MC, "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review", *Engineering structures*, 1999, 21 (6), 469-487. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00225-3)
- Xu LH, Li ZX, "Model predictive control strategies for protection of structures during earthquakes", *Structural Engineering and Mechanics: An International Journal*, 2011, 40 (2), 233-243.
<https://doi.org/10.12989/sem.2011.40.2.233>
- Yang CS, Chung LL, Wu LY, Chung NH, "Modified predictive control of structures with direct output feedback", *Structural Control and Health Monitoring*, 2011, 18 (8), 922-940.
<https://doi.org/10.1002/stc.411>