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

مرتضى قربانى عورى<sup>1</sup>، امين قلىزاد<sup>\*2</sup>، مونا شعاعى پرچين<sup>1</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی <sup>2</sup> استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

(دريافت: 00/00/00، پذيرش: 00/00/00، نشر آنلاين: 00/00/00)

## چکیدہ

انتكاتيك

کنترل ارتعاشات سازه با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی (MR) از جمله راهکارهای مؤثر در مستهلک کردن نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله می باشد. 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 می گردد. برای بهدست آوردن میزان ولتاژ اعمالی به MR جهت تولید نیروی کنترلی انتخاب یک الگوریتم کنترل مناسب ضروری می باشد. در میان الگوریتمهای رایچ، کنترل پیش بین مدل (MPC) از مزایایی هم چون سرعت و کارآیی محاسباتی، قابلیت اجرای برخط در زمان واقعی، جبران ذاتی تأخیر زمانی و ارضای قیود برخوردار است. این الگوریتم دارای پارامترهایی هم چون سرعت و کارآیی محاسباتی، قابلیت اجرای برخط در زمان واقعی، جبران ذاتی تأخیر زمانی و ارضای قیود برخوردار است. این الگوریتم دارای پارامترهایی هم چون مسیر مرجع، افق پیش بین (NP) و افق کنترل (N) می باشد که می تواند بر دقت و کارآیی الگوریتم MPC تأثیرگذار باشد. هدف این پژوهش مطالعه اثر هم زمان پارامترهای ۹ و ی در کارآیی کنترل (N) می اگر مجهز به میراگر MR است. سازههای مورد مطالعه در این تحقیق دو قاب برشی سه و پنج طبقه مجهز به میراگر MR می باشد 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 ۹۸ و ع۸ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه ازی اش مقاد مانه در این اصر (M) ی می دو بر ای ای و زمی حالتها و نیروی کنترلی تنظیم شده و سپس اثر توأم ۹۸ و ع۸ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه ازی ها نشان می دهد انتخاب مقدار 10 ± (DC) × (MO × 0) ≃ 0) ≃ ما می می در ملور در ساز می هراد رسی می و زمان احرای الگوریتم معلم می می در می می میرایر مواد. **کلیدواژهها:** افق پیش بین افق کنترل، الگوریتم پیش بین مهم باعث افزایش حجم محاسبات و زمان احرای الگوریتم کیش در می هرد.

#### 1– مقدمه

میراگرهای سیال مغناطیسی <sup>1</sup>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، 2002؛ Lenggana و همکاران، 2004) و پلها (Jung و همکاران، 2004؛ Roësset و همکاران، 2004) و پلها (Jung و همکاران، 2004

مطالعه پیشگام در مورد کاربرد میراگر MR برای کنترل پاسخ لرزهای سازه توسط اسپنسر و همکاران انجام شده است و Symans) و Constantinou، 1999). میراگرهای مگنتورئولوژیک از سیال هوشمند MR استفاده میکنند که

توسط رابینو در اواخر دهه 1940 میلادی در دفتر ملی استاندارد ایالات متحده کشف شد (Rabinow، 1948). این سیال به طور 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 به-طور متناظر تنظیم گردد. تحت میدان مغناطیسی، سیال MR در عرض چند میلی ثانیه از حالت جریان آزاد به حالت نیمه جامد تغییر می کند (Bagherkhani و Bagherkhani). این میراگرها ابزارهایی با رفتار غیرخطی می باشند که از میان مدلهای رفتاری بینگهام<sup>2</sup>، بوک-ون<sup>3</sup>، بوک-ون اصلاح شده<sup>4</sup> و

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bingham

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Bouc-Wen

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Magnetorheological Damper

امين قلىزاد؛ شماره تماس: 09122093480

آدرس ایمیل: mortaza.ghorbani@uma.ac.ir (مرتضی قربانی عوری)، gholizad@uma.ac.ir (امین قلیزاد)، monashoaei@uma.ac.ir (مونا شعاعی پرچین)

طرحی از کنترل پیش بین مدل توسعه یافته پیشنهاد شده است که مدل آماری تحریک زلزله را پیش بینی نموده و در معادلات

دخیل مینمایند (Bahrami-Rad و همکاران، 2021). در کنترل

ارتعاشات برج روتوایل 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 مي كند (Aguilar-Álvarez و همكاران، 2023).

نسخهی مقاوم الگوریتم پیش بین مدل (<sup>10</sup>RMPC) در برج مرتفع روتوایل در برابر ارتعاش ناشی از باد مورد مطالعه قرار گرفته است

(Koutsoloukas و همکاران، 2020). در پژوهشی یک طرح

کنترل کننده پیشبین مدل مبتنی بر تابع لاگر (<sup>11</sup>LOMPC)

پیشنهاد شده است و بر روی سازه سه طبقه مورد آزمایش قرار

گرفته است (Enríquez-Zárate و همكاران، 2020). مطالعه

(Lana) و 2008 ، Rotea و Lana و منجر به ارائه روشی شده است که

حساسیت عملکرد MPC به عدم دقت مدل را به حداقل می-

رساند. یک استراتژی کنترل پیش بین مدل در ارتباط با

الگوریتمهای کنترل نیمهفعال برای سازههای جداسازی شده 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-

Urquídez و همكاران، 2019) از الگوریتم بهینهسازی -NSGA

<sup>12</sup> 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 (Drgoňa 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 <sup>13</sup>MPCT استفاده شده و نشان داده

شده است که این الگوریتم هزینههای محاسباتی پایینتری در

یافتن پارامترهای تنظیم MPC دارد و با اختصاص قابلیت

تطبیق پذیری به الگوریتم آن را قادر میسازد تا با مسیر موردنظر

گاموتا فیلیسکو<sup>5</sup> استفاده از مدل بوک-ون اصلاحشده بهدلیل دقت قابل قبول در مدلسازی رفتار میراگر رایج تر میباشد.

یکی از چالشهای استفاده از میراگرهای MR توسعه یک الگوریتم کارآمد برای بهبود عملکرد میراگر میباشد. از جمله الگوریتمهای خطی میتوان به PID<sup>6</sup>، س<sup>8</sup>LQR <sup>7</sup>LQG و <sup>9</sup>MPC و <sup>9</sup>MPC اشاره نمود. در کنار الگوریتم پرکاربردی همچون LOR، کنترلر بهینهی پیشبین مبتنی بر مدل معرفی شده است که با اضافه کردن بخش پیشبینی پاسخ به معادلات LQR سعی در بهبود عملكرد اين الگوريتم دارد. اين الگوريتم عموماً در كنترل صنايع شیمیایی، خودروسازی و هوافضا به کار برده شده و بهندرت در مطالعات مهندسی سازه مورد استفاده قرار گرفته است. در مقاله (Holkar و Holkar، 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 می کند. در غیاب قیدهای نامساوی در سیستم، MPC معادل کنترل بهینه درجه دوم خطی بوده و در افقهای پیشبین طولانی، عملکرد آن به طرح کنترل H<sub>2</sub> نزدیک می شود (Mei و همکاران، 2002). طرح MPC همچنین مزایایی در سرعت و کارآیی 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 كنترل ارتعاشات سازه تحت تحريك باد استفاده نمودند (Mei و همكاران، 2004). الگوريتم كنترل پيشبين 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 درنظرگرفتن اشباع محرک برای سازههای بزرگمقیاس پیشنهاد شده و روش کنترل پیشبین مدل سریع و دقیق برای سازههای بزرگمقیاس توسط (Chen و همکاران، 2017) ارائه شده است. اثر تأخیر زمانی در الگوریتم MPC برروی سازه مجهز به میراگر MR مطالعه شده است (Xu و همکاران، 2011).

تعریف شده توسط کاربر سازگار شود.

<sup>7</sup> Linear Quadratic Gaussian

\_\_\_\_\_

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Robust Model Predictive Control

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Laguerre Functions and MPC

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Nondominated Sorting Genetic Algorithm II

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Model Predictive Control Tuning

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Modified Bouc-Wen <sup>5</sup> Gamota filisko

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Proportional-Integral-Derivative

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Linear Quadratic Regulator

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Model Predictive Control

مطالعات مختلفی برای بهبود عملکرد الگوریتم MPC صورت گرفته، اما در مورد تأثیر افق پیشبین (<sup>۱4</sup>Np) و افق کنترل (<sup>15</sup>Nc) که در محاسبهی پاسخها و نیروی کنترل نقش بسزایی دارند، تاكنون مطالعاتي انجام نپذيرفته است. تفاوت الگوريتم MPC با الگوریتم رایجی مانند LQR، بخش پیش بینی پاسخهای سازه در Np گام و محاسبه نیروی کنترلی در Nc گام میباشد که به موازات آن ابعاد ماتریسهای وزنی حالتها و نیروی کنترل افزایش می یابد؛ این مساله به صورت مستقیم در بهینه سازی تابع هدف و تعیین پاسخ سازه دخیل می باشد؛ لذا ضرورت مطالعه ی میزان تأثیر این پارامترهای طراحی در روند محاسبات کنترلر MPC دوچندان می شود. این مطالعه با هدف کنترل ارتعاشات سازههای مجهز به میراگر MR با الگوریتم MPC به مطالعهی تاثیر پارامترهای Np و Nc در کارایی کنترلر MPC می پردازد. بهمنظور 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<sub>p</sub> و N<sub>c</sub> در عملکرد کنترلر ارزیابی میگردد.

#### 2- روش تحقيق

# 2-1- الگوريتم كنترل پيشبين مدل

نمودار بلوکی سیستم کنترل مبتنی بر مدل و شمای کلی طرح MPC در شکل 1 نشان داده شده است. اگر حالتهای طرح MPC در شکل 1 نشان داده شده است. اگر حالتهای سیستم از گام صفر تا گام k-ام بر مبنای مشاهدات و اندازه-گیریها و همچنین تلاش کنترلی از گام صفر تا (k - 1)-ام بر مبنای محاسبات در دسترس باشند، هدف محاسبهی تلاشهای کنترلی از گام زمانی k + Np است به طوری که که خروجی سیستم در بازهی زمانی k + Np تا حد ممکن به خروجی مرجع نزدیک باشد. برای این کار باید خروجی سیستم از گام k + Np تا توجه به مشخص بودن مدل دینامیکی سیستم از گام k بیش بینی شده و در محاسبات نیروی کنترل به کار گرفته شود.



<sup>14</sup> Prediction Horizon

<sup>15</sup> Control Horizon



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

به پارامتر N<sub>P</sub> افق پیش بین گفته می شود و در واقع تعداد گام بازه زمانی پیش بینی را نشان می دهد. در نتیجه ی عملیات پیش بینی، تلاش های کنترلی در طول افق کنترل محاسبه گردیده ولیکن اولین تلاش کنترلی محاسبه شده به سیستم اعمال می شود که به این قاعده، اصل افق کاهنده<sup>16</sup> می گویند. رابطه (1) معادله دینامیکی حرکت یک سازه n درجه آزادی مجهز به مکانیزم کنترلی فعال را نمایش می دهد.

$$M_{s}\ddot{x}(t) + C_{s}\dot{x}(t) + K_{s}x(t) = \Gamma u(t) - M_{s}\Lambda\ddot{x}_{g}(t) \quad (1)$$

در این رابطه،  $M_s$ ،  $C_s$ ،  $M_s$  و X ماتریسهای (n × n) جرم، میرایی و سختی سازه هستند. x،  $\dot{x}$  و  $\dot{x}$  به ترتیب بردارهای (n × 1) جابهجایی، سرعت و شتاب،  $\Gamma$  ماتریس (n × n) موقعیت میراگر در سازه، u بردار (n × 1) نیروی کنترلی،  $\Lambda$  بردار (× n میراگر در سازه، u بردار (1 × n) نیروی کنترلی،  $\Lambda$  بردار (× 1) (1) اثر نیروی خارجی و  $g\ddot{x}$  شتاب زمین میباشد. معادله (1) را در قالب فضای حالت (ss)

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

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

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

k + 1 که در آن (k + 1) بردار حالت  $(1 \times 2n)$  در گام (1 + k) بردار  $A_a$  ماتریس سیستم  $(2n \times 2n)$  در حالت گسسته، (k) بردار  $(2n \times 1)$  حالت  $(1 \times 2n)$  گام k -ام،  $B_a$  ماتریس گسسته ورودی  $(x \times 1)$  حالت  $(1 \times 2n)$  بردار خروجی،  $C_a$  را،  $(n \times 1)$  بردار خروجی گسسته سازه و  $T_s$  گام زمانی نمونهبرداری

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Receding Horizon

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> State-Space

در ادامه تابع هزینه درجه دوم مطابق رابطه (14) تشکیل می گردد، پارامتر  $R_s$  مسیر مرجعی است که انتظار می ود پاسخ سیستم تحت کنترل تعقیب نماید که در فرآیند کنترل سازه بهدلیل این که هدف مطلوب دستیابی به پاسخ صفر می باشد، بنابراین پارامتر مسیر مرجع مقدار صفر به خود می گیرد.  $\overline{Q}$ ماتریس وزنی حالت و  $\overline{R}$  ماتریس وزنی نیروی کنترل بوده و سنگینی کفهی بهینه سازی به نفع حالت ها و یا نیروی کنترل را تعیین می نمایند. با جایگذاری عبارات معادل، تابع هزینه به شکل رابطه (15) در می آید:

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

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

سپس تابع هزینه برای بهدست آوردن نیروی کنترلی کمینه می شود. برای بهدست آوردن مینیمم *I* ابتدا اولین مشتق آن نسبت به *Δu* محاسبه شده و برابر صفر قرار می گیرد و در نهایت از حل معادلهی جبری ریکاتی، نیروی کنترلی مطابق رابطهی (18) بهدست می آید:

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

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta u} = 0 \tag{17}$$

$$\Delta U = (\Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T \bar{Q} (R_s - FX(k_i))$$
(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  $\dot{y}$  از حل معادله درگیر موجود در روابط 20 و 21 بهدست میآید (Spencer و همکاران، 1997):

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

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

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

در روابط (19) الی (21)، F نیروی کنترلی تولید شده توسط میراگر R  $r_1$  ،MR تنظیم کننده رفتار غیرخطی میراگر در  $x_0$  میراگر،  $k_1$  سختی القاگر، x جابه جایی میراگر،  $x_0$ تغییر مکان اولیه فنر با سختی  $k_1$  و  $k_1x_0$  نیروی اسمی تولید شده توسط القاگر میباشد؛  $c_0$  میرایی ویسکوز در سرعتهای بزرگ،  $\alpha$  ضریب تکاملی، z متغیری برای شبیه سازی تغییر شکل است. رابطه بین فرم گسسته و فرم پیوسته ماتریسهای فضای حالت بهصورت زیر می باشد (Franklin) و همکاران، 1998):

$$A_{d} = \left(I - \frac{A_{ss}T_{s}}{2}\right) \left(I - \frac{A_{ss}T_{s}}{2}\right)^{-1}$$
(4)

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

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

برای اینکه خطای حالت ماندگار به صفر میل کند، ماتریسهای افزوده<sup>18</sup> (A، B و C) طبق رابطه (7) تعریف می شوند. z(k + 1) = Az(k) + Bu(k) y(k) = Cz(k)  $A = \begin{bmatrix} A_d & O^T \\ C_d A_d & I \end{bmatrix}$  (7)  $B = \begin{bmatrix} B_d \\ C_d B_d \\ C = [O \quad I]$   $C = [O \quad I]$  Z در آن A ماتریس ((2n + 3n) × (2n + 3n)) سیستم، B ماتریس ((2n + 3n) × (2n + 3n)) ورودی و C ماتریس ((2n + 3n) حرات) حروجی سازه در حالت افزوده می باشند. متغیرهای حالت × (3n + 3n)

کام بعدی (آینده) در MPC مطابق با مجموعه پارامترهای کنترا  
هصورت متوالی براساس رابطه (8) محاسبه میشوند:  
$$y(k_i + 1|k_i) = CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i)$$
  
 $y(k_i + 2|k_i) = CAx(k_i + 1|k_i) + CB\Delta u(k_i)$   
 $= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CB\Delta u(k_i + 1)$  (8)

$$y(k_{i} + N_{p}|k_{i}) = CA^{N_{p}}x(k_{i}) + A^{N_{p}-1}B\Delta u(k_{i}) + CA^{N_{p}-2}B\Delta u(k_{i} + 1) + \dots + CA^{N_{p}-N_{c}}B\Delta u(k_{i} + N_{c} - 1)$$

تمامی متغیرهای پیش,بینی شده با درنظر گرفتن اطلاعات فعلی متغیر حالت  $x(k_i + j)$  و تغییرات نیروی کنترلی  $f = 0, 1, \dots, N_c$  و می می شوند و  $f = 0, 1, \dots, N_c$  می باشد. روابط فوق می توانند در فرم فشرده ماتریسی به صورت رابطه (9) ادغام گردند که در آن نحوه تشکیل هر یک از ماتریس ها در روابط 10 الی 13 ارائه شده است:

$$Y = FX + \Phi \Delta U \tag{9}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(k_i + 1|k_i) & \cdots & y(k_i + N_p|k_i) \end{bmatrix}^T$$
(10)

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

$$F = \begin{bmatrix} CA & CA^2 & CA^3 & \dots & CA^{N_p} \end{bmatrix}^T \tag{12}$$

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

<sup>18</sup> Augmented Matrix

های هیسترزیس،  $\dot{x}$  سرعت میراگر،  $k_0$  کنترل سختی در سرعتهای بزرگ و  $\gamma$  جابهجایی داخلی میراگر است. با تنظیم پارامترهای  $\gamma$ ،  $\beta$ ،  $\beta$  و n میتوان شکل حلقه چرخهای را کنترل نمود. پارامترهای  $c_0$ ،  $c_1$  و  $\alpha$  از روابط (22) تا (24) و ولتاژ مؤثر از رابطه (25) تعیین می شود:

$$c_0(u) = c_{0_a} + c_{0_b} u \tag{22}$$

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

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \tag{24}$$

$$\dot{u} = -\eta (u - \nu) \tag{25}$$

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

$$V_{i}(t) = \begin{cases} V_{max} & F_{i}(t) \cdot u_{i}(t) > 0, |F_{i}(t)| < u_{i}(t) \\ 0 & other \end{cases}$$
(26)

*F<sub>i</sub>* ،MR میراگر MR ولتاژ اعمالی به میراگر MR نیروی کنترلی محاسبه شده نیروی کنترلی میراگر MR و *u<sub>i</sub>* نیروی کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم میباشد.

# جدول 1- پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده (Jung و همکاران، 2003).

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



شكل 2- مدل بوك-ون اصلاح شده.

2-3- سازههای مورد مطالعه

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



شکل 3- مشخصات قابهای برشی مورد مطالعه.

# 2-4- تنظیم ماتریس وزنی و ارزیابی عملکرد کنترلر

ماتریسهای وزنی کنترلر MPC برای سازه سه و پنج طبقه در جدول 2 ارائه شده که  $\Omega_d$  ماتریس وزنی حالتهای جابه-جایی،  $\Omega_v$  ماتریس وزنی حالتهای سرعت،  $\Omega_p$  طول افق پیش-بین،  $\Omega_v$  ماتریس وزنی حالتهای سرعت،  $\eta$  طول افق پیش-بین،  $N_c$  طول افق کنترل، p خروجی سیستم، c تعداد محرک کنترلی و ا ماتریس واحد میباشد. این ماتریسها براساس آزمون و خطا در حالت Nc=Nc=1 تعیین شده و جهت بررسی تاثیر پارامترهای  $N_p$  و  $N_c$  در طول مطالعه ثابت نگه داشته میشوند. در الگوریتم  $N_p$  (که به دلیل ماهیت الگوریتم پایداری پاسخها همیشه تضمین شده است)، تضمینی برای پایداری کنترل طراحی شده تحت شرایط مختلف وجود

ندارد. یکی از مواردی که پایداری MPC را تحت تاثیر 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 پاسخ جابهجایی و دریفت سازه بوده و با توجه به اینکه 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.

جدول 2- مقادیر ماتریسهای وزنی حالتها و نیروی کنترل

$(Q_d =$	( <u>0</u> ) = 1 ×	حالت I <sub>n×n</sub>	ی بردار <sub>۱</sub> , Q <sub>v</sub>	م <i>اتر</i> يس وزنې = 0.1 × I <sub>n×n</sub> )	ماتریس وزنی نیروی کنترلی	سازه ن
diag[Q <sub>d</sub> Q <sub>v</sub> (	0	0 0	0.	$0 \downarrow $	$10^{-1} \times I_{3\times 3}$	سه طبقه
	Чd	$Q_{v}]_{(N_{p}\times q)\times(N_{p}\times q)}$	$\frac{10^{-2.48}}{\times I_{5\times 5}}$	پنج طبقه		

شاخصهای ارزیابی کارایی کنترلر جهت بررسی عملکرد  $J_3$   $J_2$   $J_1$   $J_2$   $J_1$   $J_2$   $J_1$   $J_2$   $J_2$   $J_3$   $J_2$   $J_3$   $J_2$   $J_1$   $J_2$   $J_2$   $J_3$   $J_4$   $J_4$  و  $J_4$  بهترتیب نسبت ماکزیمم دریفت، شتاب، سرعت، جایهجایی و نیروی کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم MPC به مقادیر کنترلنشده بوده و  $J_5$  نسبت ماکزیمم نیروی کنترل به وزن سازه است.  $J_6$   $J_7$   $J_8$   $J_2$   $J_1$  نسبت جذر میانگین مربعات دریفت، شتاب، سرعت، جایهجایی و نیروی کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم MPC به مقادیر مشابه از سازه کنترلنشده و  $J_1$  نسبت RMS نیروی کنترل به وزن سازه میباشد.

جدول 3- شاخصهای عملکرد

$J_{1,f} = \frac{max_{t,f}  \delta_{c(tf)} }{max_{t,f}  \delta_{uc(tf)} }$	$J_{2,f} = \frac{max_{t,f}  \ddot{x}_{c(tf)} }{max_{t,f}  \ddot{x}_{uc(tf)} }$
$J_{3,f} = \frac{max_{t,f}  \dot{x}_{c(tf)} }{max_{t,f}  \dot{x}_{uc(tf)} }$	$J_{4,f} = \frac{max_{t,f}  x_{c(tf)} }{max_{t,f}  x_{uc(tf)} }$
$J_{5,f} = \frac{max_{t,f}  u_{(tf)} }{W_f}$	$J_{6,f} = \frac{RMS_{t,f} \left  \delta_{c(tf)} \right }{RMS_{t,f} \left  \delta_{uc(tf)} \right }$
$J_{7,f} = \frac{RMS_{t,f}  \ddot{x}_{c(tf)} }{RMS_{t,f}  \ddot{x}_{uc(tf)} }$	$J_{8,f} = \frac{RMS_{t,f}  \dot{x}_{c(tf)} }{RMS_{t,f}  \dot{x}_{uc(tf)} }$
$J_{9,f} = \frac{RMS_{t,f} \left  x_{c(tf)} \right }{RMS_{t,f} \left  x_{uc(tf)} \right }$	$J_{10,f} = \frac{RMS_{t,f} \left  u_{(tf)} \right }{W_f}$

زیرنویسهای c و uc بهترتیب مربوط به حالت کنترل شده و کنترل نشده هستند. f نماد طبقات سازه و  $\delta$  دریفت سازه بوده و رابطه (27) محاسبه ی جذر میانگین مربعات را ارائه می نماید:

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

# 5-2- معرفي تحريك 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.



جدول 4- مشخصات زلزله کوبه

گام زمان نمونەبردارى	عمق	بزرگی	مدت زمان	تاريخ رخداد	منطقه تأثير	ام زلزله
0.01	17.6 km	6.9 M <sub>w</sub>	40.96	17 جولای 1996	ژاپن	كوبه

# 3- نتايج 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 می شوند. ماتریس های وزنی کنترلر براساس سعی و خطا و در حالت Np=Nc=1 تنظیم گردیده و در طول مطالعه ثابت فرض می شوند. برنامه نویسی 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.



شكل 6- تاريخچه زمانی (الف) نيروی كنترل (ب) پاسخ جابهجایی طبقه فوقانی سازه پنج طبقه

مطابق شکلهای 5 و 6 با اعمال نیروی کنترل محاسبه شده توسط کنترلر MPC، مقادیر جابهجایی طبقه فوقانی هر دو سازه-ی سه و پنج طبقه در حالت کنترل شده نسبت به سازهی کنترل نشده کاهش قابل ملاحظهای یافته است؛ به طوری که نسبت ماکزیمم تغییر مکان در حالت کنترل شده به شرایط کنترل نشده-ی سازه به 50 در صد می رسد.

شکلهای 7 و 8 رفتار چرخهای نیرو-جابهجایی و نیرو-سرعت میراگر مستقر در طبقات فوقانی سازههای مورد مطالعه و تاریخچه زمانی ولتاژ موردنیاز را نمایش میدهد. مطابق با نمودارها، اتلاف انرژی در سازههای کنترلشده به نحو مناسبی صورت گرفته است. همچنین مشاهده میشود میراگرهای MR در حالت 0=۷ 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)، بهصورت 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 می-پذیرد. با توجه به دو نمودار شکل 7 و 8 مشاهده می گردد میزان اتلاف انرژی در حالت ولتاژ صفر در مقایسه با حالتی که میدان مغناطیسی بر میراگر اعمال می شود (ولتاژ غیر صفر) بسیار کمتر بوده و قابلیت اصلی استهلاک انرژی میراگر MR در شرایط اعمال ولتاژ فعال می شود.

نتایج اعمال کنترلر MPC بر سازههای مورد مطالعه عملکرد مناسب آن را در کاهش ارتعاشات در برابر تحریکات زلزله تایید مینماید. در ادامه با هدف مطالعهی تاثیر پارامترهای  $N_p e N_p e$ مقادیر مختلفی از این پارامترها اختیار شده و کنترلر MPC برای ترکیب مختلفی از  $N_p e N$  طراحی می گردد. مقادیر ماکزیمم پاسخ تغییرمکان و نیروی کنترلی طبقه فوقانی سازه سه طبقه به ازای مقادیر مختلف  $N_p R e N$  در جدول 6 ارائه شده است.



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 و نیرو-سرعت و نمودار ولتاژ-زمان میراگر MR مستقر در طبقه فوقانی سازه پنج طبقه تحت زلزله کوبه.

نیروی کنترل ( <b>k</b> N)	شتاب ( <b>(</b> m/s <sup>2</sup> )	سرعت (m/s)	جابەجايى (m)		روش کنترل	
-	15/0548	0/7796	0/0428		كنترلنشده	
0/1408	11/2450	0/7730	0/0421	Np = 2	Nc = 1	
0/5870	10/0041	0/6743	0/0348	Np = 5	Nc = 2	
1/2881	9/1455	0/4725	0/0247	Np = 10	Nc = 5	
1/5312	7/5888	0/3998	0/0204	Np = 20	Nc = 10	
1/8940	6/9635	0/3625	0/0177	Np = 30	Nc = 15	
1/9236	6/3991	0/3309	0/0158	Np = 40	Nc = 20	
1/9453	6/3468	0/3294	0/0162	Np = 50	Nc = 25	
1/9996	6/1425	0/3215	0/0158	Np = 60	Nc = 30	MDC
2/0461	5/9472	0/3179	0/0155	Np = 70	Nc = 35	MFC
2/0455	5/8769	0/3131	0/0153	Np = 80	Nc = 40	
2/0231	5/8512	0/3158	0/0157	Np = 90	Nc = 45	
2/0287	5/9169	0/3178	0/0158	Np = 100	Nc = 50	
2/0592	5/9425	0/3157	0/0159	Np = 150	Nc = 75	
2/0525	5/9803	0/3182	0/0160	Np = 200	Nc = 100	
2/0518	5/9847	0/3180	0/0160	Np = 250	Nc = 125	
2/0502	5/9827	0/3180	0/0160	Np = 300	Nc = 150	

جدول 6- مقادیر ماکزیمم پاسخ تغییرمکان و نیروی کنترلی طبقه فوقانی سازه سه طبقه به ازای مقادیر مختلف N<sub>c</sub> و N

جدول 7- مقادیر ماکزیمم پاسخ و ماکزیمم نیروی کنترلی در طبقه فوقانی سازه پنج طبقه به ازای مقادیر مختلف N<sub>c</sub> و N

نیروی کنترل (kN)	شتاب (m/s²)	سرعت (m/s)	جابەجايى (m)		روش کنترل	
-	18/9390	0/7963	0/0435		كنترلنشده	
0/5943	18/6794	0/7760	0/0423	Np = 2	Nc = 1	
2/1144	16/0010	0/6555	0/0376	Np = 5	Nc = 2	-
3/4847	11/7854	0/4973	0/0294	Np = 10	Nc = 5	_
4/1658	10/1431	0/4264	0/0256	Np = 20	Nc = 10	_
5/5466	8/2847	0/3809	0/0221	Np = 30	Nc = 15	_
5/9954	7/8089	0/3772	0/0205	Np = 40	Nc = 20	_
6/3179	7/5677	0/3736	0/0197	Np = 50	Nc = 25	_
6/8813	7/1052	0/3650	0/0187	Np = 60	Nc = 30	MDC
6/8649	7/1235	0/3652	0/0188	Np = 70	Nc = 35	
6/9557	7/0759	0/3642	0/0187	Np = 80	Nc = 40	_
7/1799	6/9876	0/3617	0/0184	Np = 90	Nc = 45	_
7/1635	7/0089	0/3624	0/0185	Np = 100	Nc = 50	_
7/3079	7/0117	0/3622	0/0184	Np = 150	Nc = 75	
7/3241	7/0353	0/3629	0/0185	Np = 200	Nc = 100	_
7/3542	7/0397	0/3630	0/0185	Np = 250	Nc = 125	_
7/3553	7/0449	0/3631	0/0185	Np = 300	Nc = 150	-

محاسبات را سبب می شود. به نظر می رسد که ماکزیمم پاسخ-های جابه جایی و شتاب در Np = 80 نسبت به Np = 40 کاهش بیشتری دارند. درصد این کاهش ها در جابه جایی و شتاب به ترتیب 1 و 4 درصد هستند، در حالی که در Np = 80 نسبت به Np = 40 با افزایش دوبرابری زمان اجرای برنامه و اشغال حافظه بیشتر سیستم این مقادیر حاصل شده اند. بنابراین انتخاب = NP 80 به عنوان مقدار بهینه، منطقی به نظر نمی رسد.

مطابق نتایج مندرج در جدول 6 مشاهده می شود که به ازای Np = 30,40,50 ماکزیمم تغییرمکان کنترل شده نسبت به حالت کنترل نشده بهترتیب 50، 63 و 62 درصد و مقادیر شتاب به ترتیب 54، 57 و 58 درصد کاهش یافته است. براساس نتایج شبیه سازی ها افزایش مقدار Np از 40 منجر به تغییر قابل ملاحظه ای در مقادیر پاسخها نشده و تنها افزایش حجم

مقادیر ماکزیمم پاسخ تغییرمکان و نیروی کنترلی طبقه فوقانی سازه پنج طبقه به ازای مقادیر مختلف Np و Nc در جدول 7 ارائه شده است. در سازه پنج طبقه نیز به ازای = Np 50,60,70 تغییرمکان کنترلشده نسبت به شرایط کنترلنشده بەترتیب 54/7، 57/0 و 56/7 درصد و ماکزیمم شتاب به ترتیب 60/0، 2/44 و 62/3 كاهش يافته است. با مقايسه بين دو حالت Np = 60 و Np = 50 مشاهده می شود که پاسخهای تغییرمکان و شتاب بهترتيب 2/3 و 2/4 درصد و به ازاى Np = 70 و Np = 60 و برابر با 0/3 و 0/1 درصد بهبود یافتهاند. به بیان دیگر ماکزیمم پاسخ تغییرمکان و شتاب با افزایش Np از 70 روند کاهشی نداشته و بنابراین در سازه پنج طبقه، Np = 60 مناسب بهنظر میرسد و اتخاذ مقادیر بیشتر حجم محاسبات را افزایش خواهد داد. انتخاب دیگر می تواند Np = 150 باشد. اما با مقایسهی درصد كاهش پاسخ نسبت به Np = 60 در مقابل افزایش زمان اجرای برنامه و میزان حافظه ذخیره شده، انتخاب Np = 150 انتخاب بهینهای به نظر نمیرسد.

تاثیر Nc عموما بر روی میزان نیروی کنترل بوده و اثر آن بر مقادیر پاسخها ناچیز است. به همین دلیل در این پژوهش ابتدا تاثیر Np مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه جهت بررسی

تاثیر مقادیر Nc بر عملکرد کنترلر، مقدار Np برابر با نتیجهی حاصل از بخش قبل اتخاذ شده و با ثابت نگه داشتن Np، مقادیر مختلف Nc در طراحی کنترلر به کار گرفته می شود. نتایج این بخش از مطالعات در جداول 8 و 9 گزارش شده است. نقش Np و Nc در کنترلر MPC همان تاثیر ماتریسهای وزنی در کنترلر LQR است؛ با این تفاوت که ماتریسهای وزنی بر روی فیدبک-های حالت سازه و مقادیر نیروی کنترل محاسبه شده اعمال گردیده و موازنهای بین مقادیر مشاهده شده و موجود پاسخها و تلاشهای کنترلی ایجاد مینمایند؛ اما در کنترلر MPC با افزوده شدن امتیاز پیشبینی به محاسبات، Np و Nc نقش پیشبینی پاسخها و نیروی کنترلی گامهای آینده را در موازنهی 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 می توان اظهار داشت که در نظر گرفتن Nc=30 با دستیابی به این هدف می تواند مقدار مطلوب برای Nc در کنترلر طراحی شده برای سازهی سه طبقه مورد مطالعه تلقى گردد.

نادیر مختلف Nc	زه سه طبقه به ازای مة	ی در طبقه فوقانی سا	خ و ماکزیمم نیروی کنترل	جدول 8- مقادير ماكزيمم پاس
نیروی کنترل (N	شتاب <b>(m</b> /s²)	سرعت (m/s)	جابەجايى (m)	روش كنترل

	روش کنترل		جابەجايى (m)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s²)	نیروی کنترل (kN)
	كنترلنشده		0/0428	0/7796	15/0548	-
_	Nc = 1	Np = 40	0/0127	0/2612	5/6102	2/0386
_	Nc = 5	Np = 40	0/0141	0/3079	6/1162	1/9524
_	Nc = 10	Np = 40	0/153	0/3249	6/3002	1/9813
_	Nc = 15	Np = 40	0/0153	0/3257	6/3244	1/9696
MPC	Nc = 20	Np = 40	0/0158	0/3309	6/3991	1/9236
_	Nc = 25	Np = 40	0/0163	0/3370	6/4812	1/8968
	Nc = 30	Np = 40	0/0165	0/3397	6/5138	1/8925
_	Nc = 35	Np = 40	0/0165	0/3402	6/5191	1/8930
	Nc = 39	Np = 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 Nc

نیروی کنترل (kN)	شتاب <b>(m</b> /s²)	سرعت (m/s)	جابەجايى (m)		روش كنترل	
-	18/9390	0/79663	0/0435		كنترلنشده	
7/9645	6/4328	0/3428	0/0171	Np = 60	Nc = 1	
7/4571	6/7537	0/3537	0/0178	Np = 60	Nc = 5	_
7/4053	6/8099	0/3551	0/0179	Np = 60	Nc = 10	-
7/2075	6/8881	0/3588	0/0183	Np = 60	Nc = 15	
6/9904	7/0232	0/3632	0/0186	Np = 60	Nc = 20	_
6/9690	7/0561	0/3638	0/0186	Np = 60	Nc = 25	_
6/8813	7/1052	0/3650	0/0187	Np = 60	Nc = 30	MPC
6/7609	7/2101	0/3671	0/0190	Np = 60	Nc = 35	
6/7350	7/2414	0/3676	0/0190	Np = 60	Nc = 40	_
6/7277	7/2455	0/3677	0/0190	Np = 60	Nc = 45	_
6/7079	7/2617	0/3680	0/0191	Np = 60	Nc = 50	
6/7007	7/2686	0/3681	0/0191	Np = 60	Nc = 55	-
6/7003	7/2690	0/3681	0/0191	Np = 60	Nc = 59	-

برای سازه پنج طبقه نیز اگر اولویت کاهش همزمان پاسخ دینامیکی و نیروی کنترلی باشد، NC = 50 منطقی تر و مناسب تر از دیگر مقادیر بهنظر می سد. در انتخاب مقدار مطلوب برای NC نیز زمان اجرای، حجم محاسبات و فضای ذخیره سازی مدنظر قرار گرفته است؛ به طوری که انتخاب مقادیر NC بیشتر از مقادیر تعیین شده برای سازه سه و پنج طبقه تنها باعث افزایش موارد ذکر شده می شود.

در ادامه شاخصهای عملکرد برای کنترلهای طراحی شده محاسبه شده و نتایج آن ارائه می گردد. هر چه شاخصهای عملکرد کنترلر از عدد یک فاصله بگیرد کاهش پاسخ به نحو مطلوبتری اتفاق افتاده است. به جز حالت Np = 2

شاخصها از 1 کمتر بوده و کنترلر عملکرد بهتری از حالت کنترلنشده از خود نشان داده است. نمودار میلهای شاخصهای عملکرد شکل 9 حاکی از آن است که برای مقادیر بیشتر از 40 = N کاهش چشم گیری در کاهش پاسخها برای سازه سه طبقه مشاهده نمی شود. هم چنین نمودارهای میلهای شکل 10 نیز نتایج به دست آمده برای انتخاب 60 = Np را برای سازه پنج طبقه تأیید می نماید. در نهایت مطالعه انجام شده تحت تحریک زلزله ال سنترو نیز انجام گرفت که نتیجه گیری مشابه با زلزله کوبه در انتخاب پارامترهای NP و NC حاصل گردید.



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



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

- Drgoňa, J., et al., *All you need to know about model* predictive control for buildings. Annual Reviews in Control, 2020. **50**: p. 190-232.
- Enríquez-Zárate, J., et al., *Efficient predictive vibration* control of a building-like structure. Asian Journal of Control, 2020. **22**(4): p. 1411-1421.
- Franklin, Gene F., J. David Powell, and Michael L. Workman. *Digital control of dynamic systems*. Vol. 3. Menlo Park: Addison-wesley, 1998.
- Gordaninejad, F., et al., *Modular high-force seismic magneto-rheological fluid damper.* Journal of structural engineering, 2010. **136**(2): p. 135-143.
- Gutiérrez-Urquídez, R., et al. On the Selection of Tuning Parameters in Predictive Controllers Based on NSGA-II. in Numerical and Evolutionary Optimization–NEO 2017. 2019. Springer.
- Giraldo, S.A., P.A. Melo, and A.R. Secchi, *Tuning of model* predictive controllers based on hybrid optimization. Processes, 2022. **10**(2): p. 351.
- Holkar, K. and L.M. Waghmare, *An overview of model* predictive control. International Journal of control and automation, 2010. **3**(4): p. 47-63.
- Jung, H.-J., et al., *State-of-the-art of semiactive control* systems using MR fluid dampers in civil engineering applications. Structural Engineering and Mechanics, 2004. **17**(3-4): p. 493-526.
- Koutsoloukas, L., N. Nikitas, and P. Aristidou, *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): p. e1941.
- Koutsoloukas, L., et al., Control law and actuator capacity effect on the dynamic performance of a hybrid mass damper; the case of rottweil tower. 2020.
- Lenggana, B.W., et al., *Performance prediction of a novel modular magnetorheological damper for seismic building.* Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2019. **58**(2): p. 275-286.
- Lana, C. and M. Rotea, *Desensitized model predictive* control applied to a structural benchmark problem. IFAC Proceedings Volumes, 2008. **41**(2): p. 13188-13193.
- Mei, G., A. Kareem, and J.C. Kantor, *Model predictive* control of structures under earthquakes using acceleration feedback. Journal of engineering Mechanics, 2002. **128**(5): p. 574-585.
- Mei, G., A. Kareem, and J.C. Kantor, *Real-time model* predictive control of structures under earthquakes. Earthquake engineering & structural dynamics, 2001. **30**(7): p. 995-1019.
- Mei, G., A. Kareem, and J.C. Kantor, *Model predictive* control of wind-excited building: Benchmark study. Journal of engineering mechanics, 2004. **130**(4): p. 459-465.
- Oliveira, F., P. Morais, and A. Suleman, *Predictive* control for earthquake response mitigation of buildings using semiactive fluid dampers. Shock and Vibration, 2014. **2014**: p. 1-14.

#### 4- نتيجەگىرى

در این مطالعه اثر پارامترهای طراحی الگوریتم MPC با مدلسازی 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 ماتریسهای وزنی حالتها و یروی کنترلی تنظیم شده و اثر ترکیبات مختلفی از NP و Nc بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است.

- الگوریتم MPC در کاهش پاسخ سازهای با NP و Nc های مختلف نسبت به حالت کنترلنشده عملکرد موفقی داشته است.
- با توجه به نتایج حاصل از جداول و نمودارها مشاهده گردید که انتخاب 10  $\pm$  (DOF  $\times$  10)  $\simeq$  N عملکرد مطلوب تری از حیث دستیابی به اهداف کنترل (از نظر کاهش پاسخ جابه -جیث 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 (DOF × 10) ≃ Nc عملکرد مطلوبتری از حیث دستیابی به اهداف کنترل داشته که در این انتخاب نیز کاهش ماکزیمم پاسخهای سازه با حداقل نیروی کنترلی و کاهش حجم محاسبات دخیل بوده است.
- انتخاب پارامترهای NP و Nc بیشتر از مقدار توصیه شده تاثیر ناچیزی در کاهش پاسخها و نیروی کنترلی داشته و نهتنها باعث افزایش حجم محاسبات شده، بلکه زمان اجرای الگوریتم را نیز افزایش میدهد.
- در نهایت مطالعه انجام شده با انتخاب زلزله السنترو به-عنوان تحریک ورودی صورت گرفت که نتایج بهدست آمده با نتایج حاصل از زلزله کوبه از نقطه نظر الگوی انتخاب پارامترهای NP و Nc مطابقت داشت.

#### 5- مراجع

- Aguilar-Álvarez, P., et al., 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): p. 873-885.
- Jung, Hyung-Jo, Billie F. Spencer Jr, and In-Won Lee. "Control of seismically excited cable-stayed bridge employing magnetorheological fluid dampers." Journal of Structural Engineering 129.7 (2003): 873-883.
- Bagherkhani, A. and A. Baghlani. *Structure-MR damper* reliability analysis using weighted uniform simulation method. in *Structures.* 2020. Elsevier.
- Chen, Y., et al., *A novel fast model predictive control for large-scale structures*. Journal of Vibration and Control, 2017. **23**(13): p. 2190-2205.

- Peng, H., et al., A novel fast model predictive control with actuator saturation for large-scale structures. Computers & Structures, 2017. **187**: p. 35-49.
- Roësset, J.M. and J.T. Yao, *State of the art of structural engineering.* Journal of Structural Engineering, 2002. **128**(8): p. 965-975.
- Rabinow, J., *The magnetic fluid clutch*. Electrical Engineering, 1948. **67**(12): p. 1167-1167.
- Rad, A.B., et al., A developed model predictive control scheme for vibration attenuation of building structures. Smart Structures and Systems, 2021. 27(4): p. 691-703.
- Symans, M.D. and M.C. Constantinou, *Semi-active* control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. Engineering structures, 1999. **21**(6): p. 469-487.
- Spencer Jr, BrnF, et al. "Phenomenological model for magnetorheological dampers." Journal of engineering mechanics 123.3 (1997): 230-238.
- Xu, L.-H. and Z.-X. Li, Model predictive control strategies for protection of structures during earthquakes. Structural engineering and mechanics: An international journal, 2011. 40(2): p. 233-243.
- Yang, C.S.W., et al., *Modified predictive control of structures with direct output feedback.* Structural Control and Health Monitoring, 2011. **18**(8): p. 922-940.