

مقایسه پاسخ‌های کنترل بهینه با کنترلر فازی و PD در ارتعاشات یک

ساختمان ۵ طبقه در تحریک و ارتعاش زلزله

محمد حسین صبور^۳

دانشکده علوم و فنون نوین
دانشگاه تهران

محمدباقر منهج^۲

دانشکده برق
دانشگاه امیرکبیر

سید حسام‌الدین مدنی^۱

دانشکده علوم و فنون نوین
دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۶)

چکیده

زلزله یکی از بلايا و فجایع طبیعی است که می‌تواند خسارات سنگینی را در پی داشته باشد. کشور ایران بر روی گسل‌های مختلفی از زلزله قرار گرفته است. راه‌های کاهش تلفات در زلزله‌های طبیعی، در مقاوم سازی ساختمان‌ها در برابر تحریک‌های ارتعاشی زمین متصور می‌باشد. یکی از راه‌های اصلی مقاوم‌سازی، استفاده از کنترلر ارتعاشات در ساختمان است که می‌تواند تا مقدار قابل توجهی ارتعاشات را خنثی کرده، دامنه آن را کم کند. کنترلر، یک دستگاه کنترل فعال یا غیرفعال است که برای یک سازه با چند درجه آزادی در برابر زلزله در نظر گرفته می‌شود تا بتواند اثرات مخرب ناشی از ارتعاشات ساختمان را کاهش دهد. در این مقاله در گام اول، ارتعاشات یک ساختمان ۵ طبقه تحت تحریک زلزله بدون کنترلر و با کنترلر غیرفعال PD (passive) بررسی شده و در گام بعد، با یک کنترلر فعال فازی تحلیل می‌گردد. در نهایت با کنترلر بهینه (طراحی عملکرد کنترلر بهینه) ارتعاشات ساختمان کنترل شده و با پاسخ‌های قبل مقایسه می‌گردد. دامنه و اندازه تحریک، به صورت تحلیلی در سیستم‌سازه مورد نظر، در یک ارتعاشات سینوسی زلزله (در جهت افقی) در مدت حدود ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی شده است. این نتایج نشان می‌دهد که کنترلر فازی، نسبت به PD دارای جواب‌های قابل قبول تری بوده، دامنه ارتعاشات بهبود می‌یابد. کنترلر بهینه نسبت به کنترلر فازی، دارای پاسخ‌های بهتری می‌باشد. نمودارها و پاسخ‌های سازه نشان می‌دهد که مزیت اصلی رویکرد کنترلر بهینه و فازی، نیرومندی و توانایی آنها در مهار کردن رفتارهای غیرخطی سیستم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کنترلر بهینه، فازی، جابه‌جایی، نیروی کنترلی

Comparison of Optimal Control Responses with Fuzzy Controller and PD Controller in Vibration of the Five Floors Building

S.H. Madani

New Sciences & Technologies
Department
University of Tehran

M.B. Menhaj

Electrical Engineering. Department.
Amirkabir University

M.H. Sabour

New Sciences & Technologies
Department.
University of Tehran

(Received: 10/January/2014; Accepted: 17/September/2014)

ABSTRACT

Earthquake is one of the natural disasters with the potential of catastrophic damages. One of the best reinforcement solutions in building is the usage of vibration controller that reduces the vibration and its displacement magnitude significantly. Controller could be an active or passive system that which is used in multi degree of freedom structures subjected to earthquake in order to control and reduce the vibrations. To investigate the behavior of the structure, a PD controller designed for a passive control. Also fuzzy and optimal controllers are designed for an active control device. The advantage of the optimal controller approach is its robustness and ability to handle the non-linear behavior of the system. The results showed that the optimal controller has better performance in comparison with fuzzy and PD controllers.

Keywords: Fuzzy Controller, PD Controller, Optimal Controller

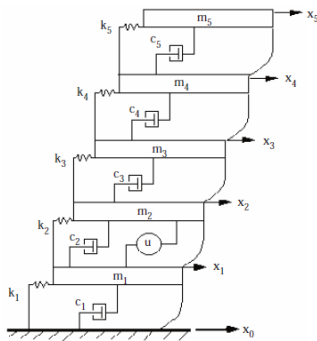
۱- دانشجوی دکتری: hesam_madani@ut.ac.ir

۲- استاد: mbmenhaj@yahoo.com

۳- استادیار (نویسنده پاسخگو): sabourmh@ut.ac.ir

۱- مقدمه

ارتعاشات در جهت افقی (x) می‌باشد، تنها این درجه آزادی لحاظ می‌شود. این سیستم مدل شده، شامل یک موتور کنترلر می‌باشد. سیستم تحلیلی در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه طبقه اول در تماس مستقیم با زمین قرار دارد حداکثر نیروی برشی، بین زمین و طبقه اول خواهد بود و اثر مخرب بر روی آن بسیار زیاد است. بنابراین کنترل فعال بر روی طبقه اول قرار می‌گیرد. m_1 جرم متحرک طبقه اول است و m_2 تا m_5 هم به ترتیب جرم طبقات ۲ تا ۵ است. x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 جابه‌جایی افقی طبقات بوده و x_0 نیز جابه‌جایی اغتشاشی ناشی از زلزله می‌باشد. همه فنرها و دمپرها در جهت افقی عمل می‌کنند. جرم‌های در نظر گرفته شده نیز شامل دیوارها و کف هر طبقه می‌باشد. این پارامترها با توجه به ساختمان ملاحظه شده، مشخص بوده و در پیوست داده شده است.



شکل (۱): مدل فیزیکی سیستم سازه تحلیلی ساختمان

پنج طبقه.

معادله حرکت سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$M\ddot{\underline{x}} + C\dot{\underline{x}} + K\underline{x} = \underline{F}_d + \underline{F}_u \quad (1)$$

$$\underline{x} = [x_1 \quad \dots \quad x_5]^T$$

که، در معادلات بالا داریم:

$$\underline{F}_d = \begin{bmatrix} (c_1\dot{x}_0 + k_1x_0) \\ \vdots \\ 0 \\ -F_u \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\underline{F}_u = \begin{bmatrix} -F_u \\ \vdots \\ F_u \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

F_u نیروی ایجاد شده توسط موتور کنترلی، F_d هم نیروی ناشی از زلزله و K, M, C ماتریس جرم، سفتی و دمپینگ است.

با توجه به اینکه معادله‌های دستگاه معادلات بالا از درجه دوم بوده، خطی نیستند یک تغییر متغیر به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$x_6 = \dot{x}_1, \dots, x_{10} = \dot{x}_5,$$

با توجه به این تغییر متغیر، دو معادله درجه یک برای هر کدام از معادلات دستگاه معادله (۱) سیستم در فرم فضای حالت^۳ به صورت زیر تعریف می‌شود:

روش‌های مختلف فعال و غیرفعال در کنترل ارتعاشات سازه‌های مختلف استفاده می‌شود. برای مثال استفاده از مواد لاستیکی، تغییر در ضرایب دمپینگ و دیگر روش‌ها را کلی در سال ۱۹۹۶ با استفاده از یاتاقان‌های لاستیکی برای کنترل غیرفعال یک سازه ساختمانی ارائه داد [۱]. یوشیدا و فوجیو در سال ۱۹۹۹ روشی شبیه کلی را با تغییرات ضریب دمپینگ ویسکوز در کنترل ارتعاشات یک ساختمان در نظر گرفتند. در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ مطالعات زیادی روی کنترل ارتعاشات ساختمان با استفاده از روش‌های کنترل نیمه‌فعال^۱ و فعال مورد استفاده قرار گرفت. فوکوشیما در سال ۱۹۹۶ با استفاده از یک دمپر جرم کامپوزیتی فعال- غیرفعال توانست ارتعاشات ناشی از باد و زلزله در ساختمان‌های بسیار بلند را کاهش دهد [۲]. با توجه به عدم قطعیت‌های مختلف در سیستم‌های سازه‌ای و پارامترهای سیستم که ثابت نیستند روش‌های مختلفی در کنترل فعال سازه‌ها پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳]. در سال ۲۰۰۳ رحمی روش کنترلر فعال فازی را در ارتعاشات یک ساختمان چند طبقه ارائه و نشان داد که کنترلر فازی از قابلیت بهتری برخوردار بوده و می‌تواند ارتعاشات ناشی از تحریک زلزله زمین را به نحو بهتری نسبت به کنترلر PD کنترل نماید [۴]. در سال ۲۰۱۰ نیز روش کنترل ارتعاشات فعال یک ساختمان با استفاده از بازخوردهای کنترلی توسط ابراهیم‌نژاد و همکاران ارائه شد [۵]. در سال ۲۰۱۲ هادسون و رینولدز نشان دادند که ترکیب کنترلر ارتعاشی فعال (AVC) در طراحی سازه‌ها (ساختمان‌ها) به مقدار قابل ملاحظه‌ای ارتعاشات ناشی از زلزله را محدود می‌کند [۶].

در این مقاله، حرکت افقی زمین با تحریک آن به‌عنوان ورودی^۲ در سازه ساختمانی در نظر گرفته شده است. این ورودی، با توجه به زلزله‌های مختلف در ایران، به صورت سینوسی و در مدت حدود ۲۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

۳- مدل دینامیکی سیستم ۵ درجه آزادی

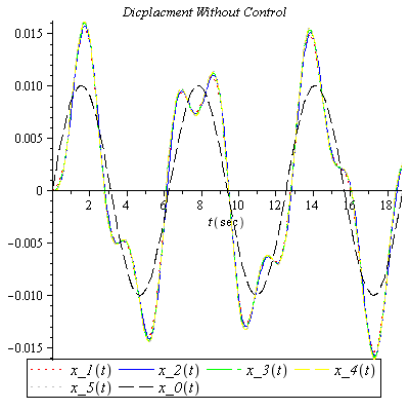
از آنجایی که در شهرهای ایران، متوسط طبقات ساختمان‌ها ۵ می‌باشد تعداد طبقات مدل ۵ در نظر گرفته شد. در نتیجه، سازه تحلیلی، ۵ درجه آزادی در جهت افقی دارد. از آنجایی که اثرات مخرب در این زلزله، نتیجه

1- Semi Active
2- Input

3- State Space

معادلات برحسب y ، معادلات دیفرانسیل از درجه یک است که به راحتی قابل حل بوده، با توجه به تغییر متغیر از y به x مسئله حل خواهد شد. شرایط اولیه مسئله (جابجایی و سرعت) صفر در نظر گرفته می‌شود یعنی $x_1 = \dots = x_{10} = 0$.

جابجایی طبقات با توجه به ورودی و عدم کنترل مطابق شکل ۲ خواهد بود:

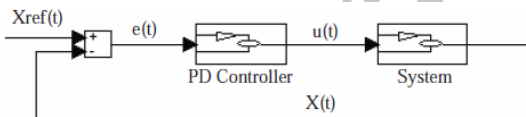


شکل (۲): نمودار جابجایی طبقات بدون کنترل.

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، نمودار جابجایی طبقات یک تا پنج، در طول تحریک تقریباً یکسان می‌باشد.

۵- پاسخ‌های جابجایی سازه با استفاده از کنترلر PD

کنترلرهای پیوسته باعث یک مود ارتعاشی اضافه می‌شوند. کنترلر PD به‌عنوان یکی از کنترلرهای قدیمی یا سنتی است که بسیار زیاد در صنعت استفاده شده است. نمودار حلقه بسته این کنترلر به صورت شکل ۳ می‌باشد.



شکل (۳): دیاگرام حلقه بسته با کنترلر PD.

در حلقه بالا، خروجی سیستم $x(t)$ و خطا $e(t)$ می‌باشد. خروجی کنترلر PD نیز از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$u(t) = K(e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (۷)$$

در معادله بالا مقادیر K, τ_d به ترتیب زمان مشتق و ثابت تناسب می‌باشند که در پیوست داده شده است [۴].

در شکل ۴ نمودار جابجایی طبقات نشان داده شده است.

$\dot{X} = f(x) + B * F_u + W$
 $X = [x_1 \dots x_6]^T$
 در $f(x)$ معادله بالا تابع برداری از معادله دیفرانسیل مرتبه اول می‌باشد که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$f_1(x) = x_6, f_2(x) = x_7, f_3(x) = x_8, f_4(x) = x_9, f_5(x) = x_{10}$$

$$f_6(x) = \frac{1}{m_1} [-(k_1 + k_2)x_1 + k_2x_2 - (c_1 + c_2)x_6 + c_2x_7]$$

$$f_7(x) = \frac{1}{m_2} [k_2x_1 - (k_2 + k_3)x_2 + k_3x_3 + c_2x_6 - (c_2 + c_3)x_7 + c_3x_8]$$

$$f_8(x) = \frac{1}{m_3} [k_3x_2 - (k_3 + k_4)x_3 + k_4x_4 + c_3x_7 - (c_3 + c_4)x_8 + c_4x_9]$$

$$f_9(x) = \frac{1}{m_4} [k_4x_3 - (k_4 + k_5)x_4 + k_5x_5 + c_4x_8 - (c_4 + c_5)x_9 + c_5x_{10}]$$

$$f_{10}(x) = \frac{1}{m_5} [k_5x_4 - k_5x_5 + c_5x_9 - c_5x_{10}]$$

B و W به ترتیب ماتریس نیروی کنترلر و ماتریس نیروی اغتشاش می‌باشند.

$$B = [0, 0, 0, 0, 0, \frac{-1}{m_1}, \frac{1}{m_2}, 0, 0, 0]^T \quad (۳)$$

$$W = [0, 0, 0, 0, 0, \frac{(c_1\dot{x}_0 + k_1x_0)}{m_1}, 0, 0, 0, 0]^T \quad (۴)$$

۴- پاسخ‌های جابجایی مدل بدون حضور کنترلر

با توجه به معادلاتی که بر سیستم حاکم است و در قسمت قبل ارائه شد، اگر هیچ موتور کنترلی وجود نداشته باشد باید معادله $\dot{X} = f(x) + W$ حل شود. این معادله می‌تواند به صورت زیر مرتب شود:

$$\dot{X} = AX + W \quad (۵)$$

$$w = [0, 0, 0, 0, 0, \frac{(c_1\dot{x}_0 + k_1x_0)}{m_1}, 0, 0, 0, 0]^T \quad (۶)$$

ماتریس A نیز با توجه به ضرایب x_1 تا x_{10} در معادله (۵) تعیین می‌شود.

برای حل این مسئله با توجه به ویژگی‌های ماتریس A و مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن می‌توان مسئله را به صورت زیر مدل کرد:

$$\dot{X} = AX + W$$

$$X = TY$$

$$T\dot{Y} = ATX + W \rightarrow \dot{Y} = T^{-1}ATX + T^{-1}W$$

در معادلات بالا T ماتریس بردارهای ویژه ماتریس A است که هر ستون آن یک بردار ویژه است.

همان‌طور که از خواص ماتریس بردارهای ویژه T معلوم است داریم:

$$T^{-1}AT = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_6 \end{bmatrix}$$

در ماتریس بالا λ_1 مقادیر ویژه ماتریس A است.

متغیرهای ادبی فازی مثل big و small و medium مورد استفاده قرار می‌گیرند تا دانش دامنه فازی را ارائه دهند. مقادیر عضویت یا membership نیز بین ۰ تا ۱ می‌باشد. به‌طور کلی و اساسی یک کنترلر منطق فازی از ۴ قسمت تشکیل شده است:

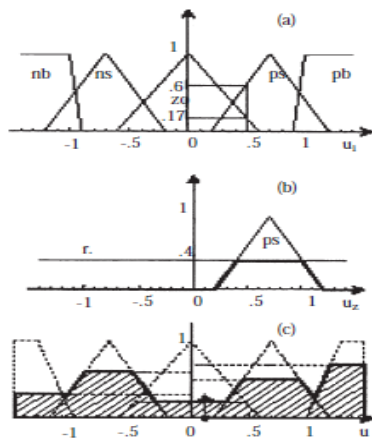
۱- فازی‌سازی مقادیر و تعیین اندازه متغیرها بر مبنای فازی (fuzzification).

۲- یک مرکز قوانین (rule base).

۳- منطق تصمیم‌گیری برای استنباط فازی براساس متغیرهای اندازه‌گیری شده (fuzzy reasoning engine) و

۴- تبدیل مقادیر فازی به مقادیر غیرفازی یا crisp (defuzzification).

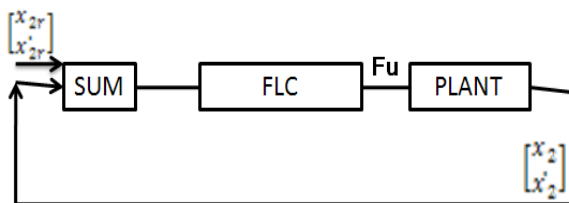
در شکل ۶ مراحل منطق فازی با توجه به چهار جزء آن نشان داده شده است.



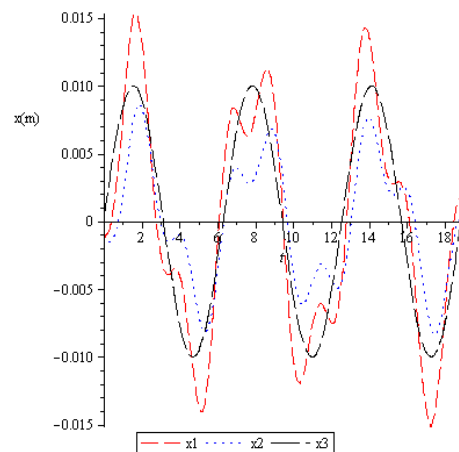
شکل (۶): روند منطق فازی پایه‌ای.

در قسمت ۴ منطق فازی یعنی تبدیل مقادیر فازی به مقادیر واقعی یا crisp روش مددانی که مرکز سطح زیر نمودار جواب را انتخاب می‌کند کاربرد زیادی دارد [۴].

در این تحقیق و مقاله، بسته toolbox فازی برنامه matlab مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از سیستم کنترل منطق فازی در سازه‌های تحلیلی، استفاده از خطاها می‌باشد. در این مقاله، خطا در حرکت طبقه دوم ($e = x_{r2} - x_2$) و مشتقات زمانی آنها (de/dt) به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده است. نیروی کنترلی (u) نیز به‌عنوان خروجی کنترلر می‌باشد. مقادیر مرجع برای x_{r2} و x_2 که در شکل ۷ نشان داده شده، صفر در نظر گرفته می‌شود.

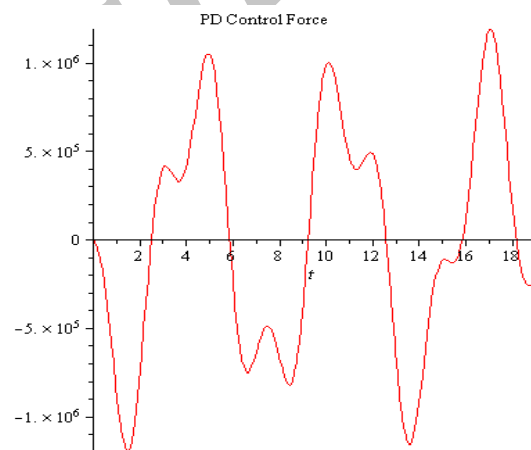


شکل (۷): مدل حلقه بسته با یک کنترلر منطق فازی.



شکل (۴): نمودار جابه‌جایی طبقات با استفاده از کنترلر

PD. نیروی کنترلر PD مطابق شکل ۵ می‌باشد.



شکل (۵): نیروی کنترلر PD.

توجه به این نکته ضروری است که با توجه به وجود کنترلر بین طبقه اول و دوم، جابه‌جایی طبقات دوم تا پنجم طبق شکل ۴ بهتر شده و مقدار و دامنه آن کاهش پیدا کرده است (جابه‌جایی طبقات دوم تا چهارم تقریباً یکسان می‌باشد).

۶- پاسخ‌های جابه‌جایی سازه با استفاده از کنترلر فازی

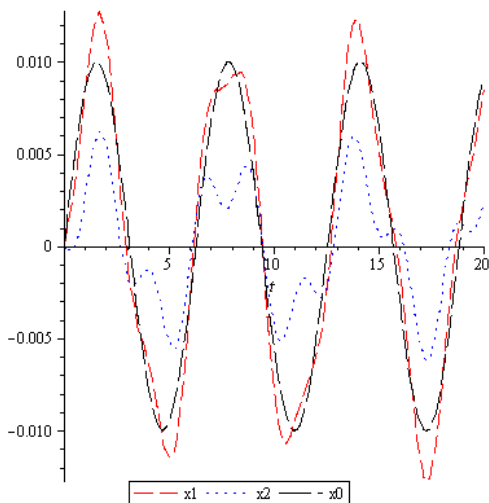
بهبود و توسعه در منابع و سنسورهای نیروی الکترومغناطیسی، کاربرد و اجرای منطق فازی را ممکن و میسر ساخته است. منطق فازی از سال ۱۹۶۵ توسط آقای دکتر زاده ارائه شده و بسیار به‌کار گرفته شده است. توجه بسیار زیادی که به منطق فازی شده است به‌دلیل محصولات مصرفی است که مورد استفاده عموم جامعه قرار گرفته است.

در شکل ۹ قوانین فازی در قسمت فازی کنترلر در نرم‌افزار MATLAB نشان داده شده است.

اولین قانون در پایگاه قانون که در بالا نیز نشان داده شده است به صورت زیر است:

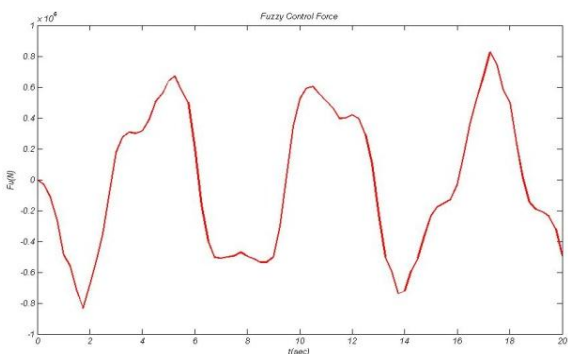
IF e is XNB and de/dt is VN THEN u is UNB.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای نیروی کنترلی با استفاده از کنترلر منطق فازی در شکل ۱۰، نمودار جابه‌جایی طبقات به صورت زیر به دست می‌آید.



شکل (۱۰): جابه‌جایی طبقات در حالت کنترلر فازی.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نیز نشان داده شده دامنه و اندازه جابه‌جایی طبقات در طبقه دوم تا پنجم بهبود بسیار خوبی پیدا کرده است (جابه‌جایی طبقات دوم تا چهارم تقریباً یکسان می‌باشد). در شکل ۱۱ نیروی کنترلر فازی نشان داده شده است.



شکل (۱۱): نیروی کنترلر فازی.

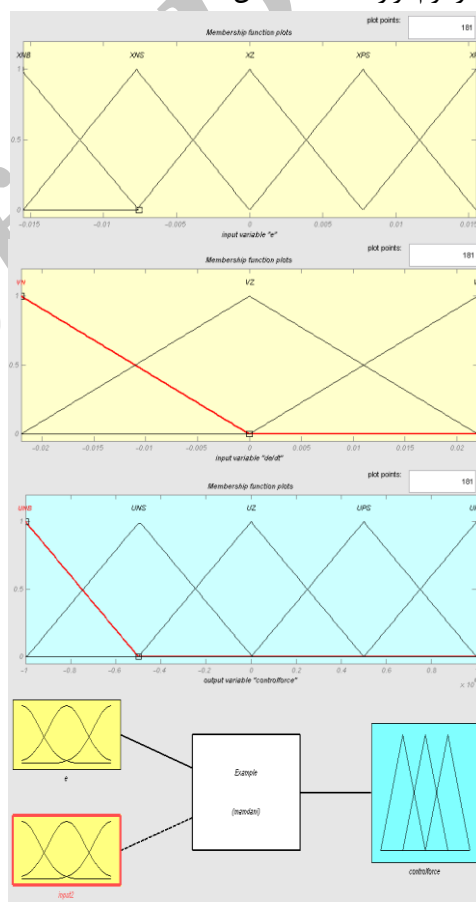
۷- پاسخ‌های جابه‌جایی سازه با استفاده از کنترلر بهینه

برای اینکه بتوانیم کنترلر بهینه برای این سیستم را به دست آوریم فرض می‌شود نیروی کنترلی به صورت زیر باشد:

$$F_u = K_{op}u(t)$$

پایگاه قانون یا مرکز قوانین برای یک مدل دو پایه‌ای ناشی از خطای جابه‌جایی و خطای سرعت طراحی شده است. P, N, Z, B, M, S به ترتیب مخفف کلمات positive, negative, zero, big, medium, Small می‌باشد. یک رویکرد آزمون و خطا با توابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شده تا یک کنترلر خوب با کارایی بالا بدست بیاید. حدود جابه‌جایی خطا (e) در حدود ۰/۰۱۵ m و برای حدود سرعت خطا (de/dt) ۰/۰۲۲ m/s در نظر گرفته می‌شود. در حالی که حدود نیروی کنترلی (u) برابر N ۱۰۰۰۰۰۰ می‌باشد [۴].

در شکل ۸ توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی در قسمت GUI در نرم‌افزار MATLAB نشان داده شده است.



شکل (۸): متغیرها و توابع عضویت ورودی و خروجی کنترلر فازی.

1. If (e is XNB) and (de/dt is VN) then (controlforce is UNB) (1)
2. If (e is XNB) and (de/dt is VZ) then (controlforce is UNB) (1)
3. If (e is XNB) and (de/dt is VP) then (controlforce is UNB) (1)
4. If (e is XNS) and (de/dt is VN) then (controlforce is UNS) (1)
5. If (e is XNS) and (de/dt is VZ) then (controlforce is UNS) (1)
6. If (e is XNS) and (de/dt is VP) then (controlforce is UZ) (1)
7. If (e is XZ) and (de/dt is VN) then (controlforce is UZ) (1)
8. If (e is XZ) and (de/dt is VZ) then (controlforce is UZ) (1)
9. If (e is XZ) and (de/dt is VP) then (controlforce is UPS) (1)
10. If (e is XPS) and (de/dt is VN) then (controlforce is UPS) (1)
11. If (e is XPS) and (de/dt is VZ) then (controlforce is UPS) (1)
12. If (e is XPS) and (de/dt is VP) then (controlforce is UPB) (1)
13. If (e is XPB) and (de/dt is VN) then (controlforce is UPB) (1)
14. If (e is XPB) and (de/dt is VZ) then (controlforce is UPB) (1)
15. If (e is XPB) and (de/dt is VP) then (controlforce is UPB) (1)

شکل (۹): قوانین فازی در پایگاه قانون کنترلر.

برای $u(t)$ طبق معادله برای هر دو حالت (ضریب تأثیر ۱۰ و ۱۰۰) به دست می‌آید:

$$u(t) = \frac{400}{7} \lambda_6(t) - 80 \lambda_7(t)$$

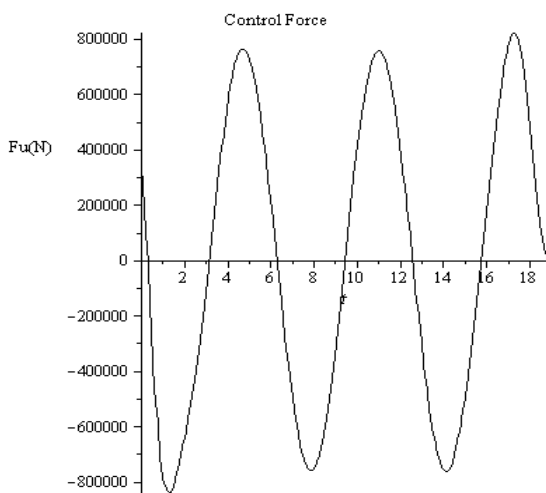
با توجه به ۲۰ معادله دیفرانسیل مرتبه اول، ۲۰ شرط مرزی با توجه به شرایط ابتدایی و انتهایی مسئله به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$X(0) = \underline{0} \rightarrow x_i = 0 \quad \text{معادله 10}$$

$$X(20) = \text{Free} \rightarrow \lambda_i(t_f) = \lambda_i(6\pi) = 0 \quad \text{معادله 10}$$

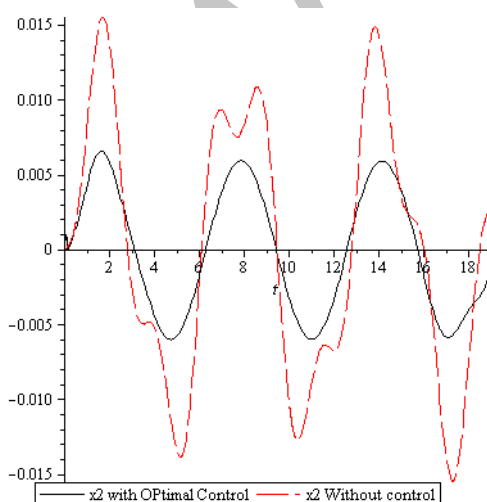
با توجه به معادلات سنگینی که در معادلات دیفرانسیل وجود دارد، روند حل مسئله دستگاه ۲۰ معادله بالا با استفاده از بردارهای ویژه می‌باشد.

با توجه به حل معادلات و روند بهینه‌سازی ارائه شده، تابع نیروی کنترل مطابق شکل ۱۲ به دست می‌آید.



شکل (۱۲): تابع نیروی کنترل بهینه با ضریب ۱۰.

در شکل ۱۳ نمودار جابه‌جایی طبقه دوم همراه با کنترلر و بدون کنترلر نشان داده شده است.



شکل (۱۳): نمودار اختلاف جابه‌جایی طبقه دوم در حالت بدون کنترلر و با کنترلر بهینه در طبقه دوم با ضریب ۱۰.

که در معادله بالا، K_{Op} ضریب تناسب می‌باشند که در پیوست داده شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی فرایند کلی به صورت زیر است:

(۱) مدل ریاضی مسئله باید معلوم شود. در قسمت‌های قبل معادلات حاکم به دست آمد.

(۲) شاخص اجرایی یا P.I باید مشخص شود که در اینجا

$$\begin{aligned} \text{شاخص اجرایی به این صورت تعریف می‌گردد [۸]:} \\ J = \int_0^{20} (V(x_1, \dots, x_5, u)) dt = \int_0^{20} \frac{1}{2} (X^T M X + U^T N U) dt \quad (۸) \\ = \int_0^{20} (\alpha [x_1(t)^2 + \dots + x_5(t)^2] \\ + u(t)^2) dt \end{aligned}$$

در معادله فوق، α ضریب تأثیر جابه‌جایی طبقات در شاخص اجرایی است که ۱۰ و ۱۰۰ فرض می‌شود. با بالا رفتن مقدار α در معادله (۸) سهم هر یک از جابه‌جایی‌ها در کمینه کردن شاخص اجرایی کمتر شده، به تبع آن، سهم نیروی کنترلی بیشتر می‌شود. همان‌طور که در معادله (۸) معلوم شده است، مقدار جابه‌جایی در طبقات و تابع جابه‌جایی نیروی کنترل باید کمینه شود که این شاخص، از لحاظ تجربی، عملی و اقتصادی شاخصه اجرایی مهمی در کنترل ارتعاشات ساختمان می‌باشد.

(۳) شرایط مرزی و قیود مسئله و کنترلر باید در نظر گرفته شود.

همان‌طور که معلوم است کنترلر بهینه در فرایندی در حدود ۲۰ ثانیه است که زمان و نقطه ابتدایی و زمان نهایی معلوم و مقدار نهایی آزاد می‌باشد یعنی:

$$\begin{aligned} X(0) &= \underline{0} \\ X(6\pi) &= \text{Free} \end{aligned}$$

برای حل این مسئله تابع همیلتون به صورت زیر تشکیل می‌گردد [۹]:

$$\begin{aligned} \mathcal{H} &= \mathcal{H}(x_1, \dots, x_{10}, u, \lambda_1, \dots, \lambda_{10}, t) \\ &= V(x_1, \dots, x_5, u) + \lambda_1^T(t) f(X, u(t)) \quad (۸) \\ & \text{در واقع معادلات طرف دوم رابطه (۸) می‌باشد.} \end{aligned}$$

روش بهینه‌سازی برای به دست آوردن تابع کنترلر بهینه $u(t)$

الف) تشکیل ۱۰ معادله به صورت زیر:

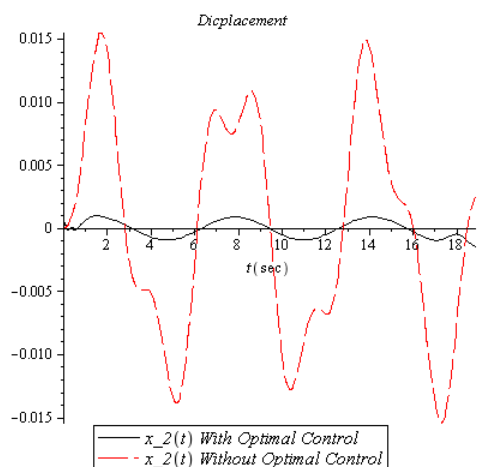
$$\dot{x}_i(t) = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \lambda_i}, \quad i = 1..10 \quad (۹)$$

ب) تشکیل ۱۰ معادله دیگر به صورت زیر:

$$-\dot{\lambda}_i(t) = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x_i}, \quad i = 1..10 \quad (۱۰)$$

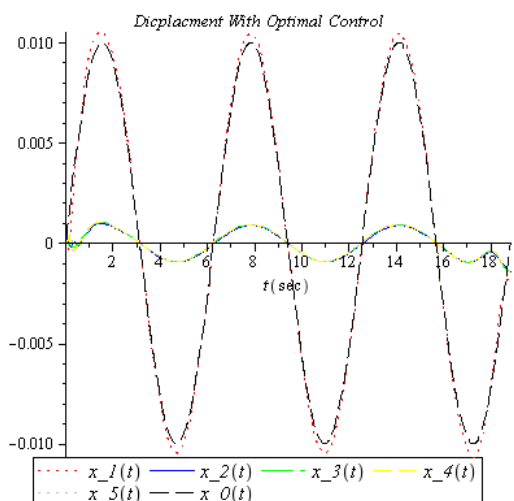
ج) تشکیل معادله تابع کنترلر بهینه:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial u} = 0$$



شکل (۱۶): نمودار اختلاف جابه‌جایی طبقات در حالت بدون کنترل و با کنترل بهینه در طبقه دوم با ضریب ۱۰۰.

در شکل ۱۶ جابه‌جایی طبقه دوم بدون کنترل، با کنترلر بهینه با ضریب ۱۰۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، جابه‌جایی طبقه دوم کاهش بسیار مناسبی در دامنه و رزونانس‌ها داشته است.



شکل (۱۷): نمودار جابه‌جایی طبقات با کنترل بهینه با ضریب ۱۰۰.

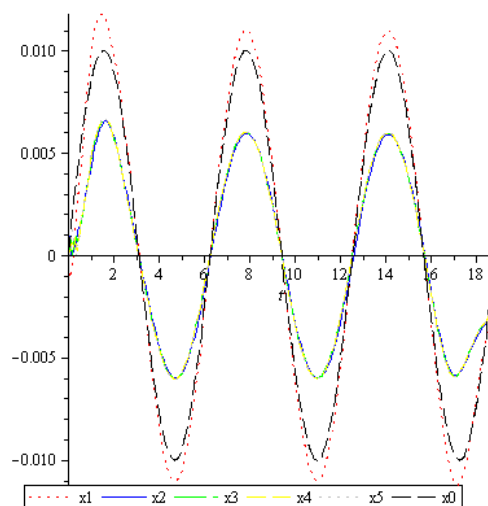
در شکل ۱۷ جابه‌جایی طبقات اول تا پنجم همراه با جابه‌جایی زلزله با استفاده از کنترلر بهینه با ضریب ۱۰۰ نشان داده شده است.

۸- نمودارهای کلی جابه‌جایی و نیروی کنترلی

در شکل ۱۸ جابه‌جایی طبقه دوم (جابه‌جایی طبقه دوم تا پنجم در همه حالات تقریباً یکسان است) در تمامی حالات نشان داده شده است.

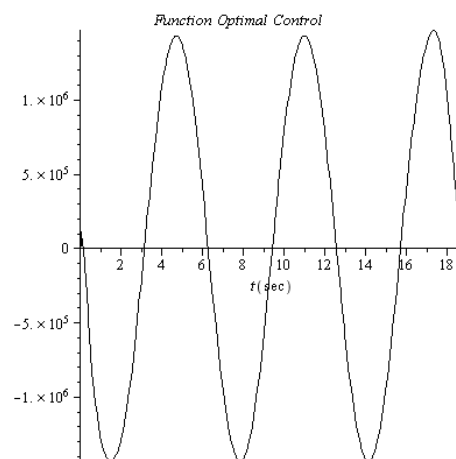
همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودار جابه‌جایی طبقات (دوم تا پنجم) همراه با کنترل بهینه، بسیار مطلوب‌تر از حالت بدون کنترل بوده، در واقع ارتعاشات و رزونانس‌ها را میرا کرده و دامنه آنها را کاهش داده است.

نمودار جابه‌جایی طبقات اول تا پنجم در تحریک زلزله در این حالت در شکل ۱۴ نمایش داده شده است:



شکل (۱۴): نمودار جابه‌جایی طبقات با کنترل بهینه با ضریب ۱۰.

اگر روند بالا برای ضریب تأثیر ۱۰۰ تکرار شود، برای نیروی کنترلر بهینه در شکل ۱۵ داریم:



شکل (۱۵): تابع نیروی کنترل بهینه با ضریب ۱۰.

همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، مقدار نیروی کنترلر بهینه در حالت ضریب تأثیر ۱۰۰ از ضریب تأثیر ۱۰ بزرگتر می‌باشد که این قابل انتظار بوده است.

بررسی شد، پاسخ‌های جابه‌جایی طبقات، همراه با کنترلر بهینه، دامنه بهتری داشته، خسارات ناشی از زلزله را کاهش خواهد کرد. باید به این نکته نیز توجه داشت که نیروی کنترلر در حالت بهینه، نسبت به فازی و PD بیشتر بوده، پاسخ نیز بهبود یافته است. جابه‌جایی با استفاده از کنترلر فازی، نسبت به کنترلر PD بهبود داده، همچنین نیروی کمتری برای کنترلر مورد نیاز است.

توجه به این نکته ضروری است که باید کنترلی وجود داشته باشد که بتواند این نیروهای کنترلی را ایجاد نماید. همان‌طور که نشان داده شد، هرچه ضریب α بیشتر باشد جابه‌جایی طبقات کمتر، ولی نیروی بیشتری برای کنترلر مورد نیاز است که با توجه به موتور کنترلی، باید مورد توجه قرار گیرد.

۹- مراجع

1. Kelly, J.M., "Earthquake Resistant Design with Rubber", Book, Springer-Verlag, London, 1996.
2. Fukushima, I., Kobori, T. and Sakamoto, M. "Vibration Control of a Tall Building Using Active-Passive Composite Tuned Mass Damper", Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, September, pp. 1-6, 1996.
3. Nishimura, H., Ohkubo, Y., and Nonami, K., "Active Isolation Control for Multi-Degree-of-Freedom Structural System", Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, September, pp. 82-87, 1996.
4. Rahmi, A.G, "Fuzzy Logic Control of Vibrations of Analytical Multi-Degree-of-Freedom Structural Systems", Turkish Journal Engineering, Environ. Sci. Vol. 27, pp. 157-167, 2003.
5. Ebrahimnejad, M., Davoodi, M. and Vaseghi-Amiri, J. "Active Vibration Control of Smart Building Frames by Feedback Controllers", Civil Engineering., Vol. 1, No. 1, pp. 73-83, 2010.
6. Hudson, M.J. and Reynolds P. "Implementation Considerations for Active Vibration Control in the Design of Floor Structures", Engineering Structures, Vol. 44, November, pp. 334-358, 2012.
7. Rao, M.V.C., and Prahlad, V.A. "Tunable Fuzzy Logic Controller for Vehicle-Active Suspension Systems", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 85, pp. 11-21, 1997.
8. Ye Liu, "Dynamics and Control of Mechanical and Biomechanical Systems", Thesis, University of Iowa, 2011.
9. Menhaj, M.B. "Advanced Mathematics, Optimizatoin", Book, Tehran Polytechnic Press, 2012.

پیوست

ماتریس‌های جرم و سفتی مدل و پارامترهای طبقات.

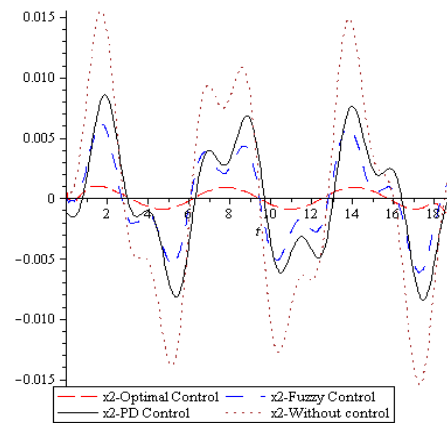
$$m_1 = 35, m_2 = \dots = m_5 = 20 \text{ (ton.kg)}$$

$$c_1 = 1, c_2 = \dots = c_5 = 20 \left(\frac{\text{ton.Ns}}{\text{m}} \right)$$

$$k_1 = 1000, k_2 = \dots = k_5 = 15000 \left(\frac{\text{ton.N}}{\text{m}} \right)$$

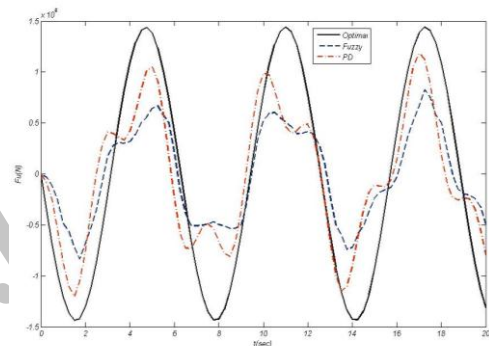
ورودی‌های کنترل و پارامترهای کنترلر PD

$$K = 700 \times 10^5 \text{ N/m}, \tau_d = 1.5 \text{ s}, K_{op} = 200 \times 10^5 \text{ N/m}$$



شکل (۱۸): مقایسه جابه‌جایی طبقه دوم در تمامی حالات.

در شکل ۱۹ نیروهای کنترلی در سه حالت کنترلر بهینه، فازی و PD نشان داده شده است.



شکل (۱۹): مقایسه نیروهای کنترلی در سه حالت کنترلی.

همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، مقدار نیروی کنترلی در حالت بهینه، نسبت به فازی و PD بیشتر می‌باشد.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارتعاشات یک ساختمان ۵ طبقه تحت جابه‌جایی سینوسی افقی زمین برای حدود ۲۰ ثانیه، در حالت‌های بدون کنترل، با کنترلر PD، با کنترلر فازی و با کنترلر بهینه بررسی و جابه‌جایی افقی زمین به عنوان ورودی در نظر گرفته شد.

در این مقاله روشی کارا و بهینه برای کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از زلزله با استفاده از روش‌های کنترل فعال ارائه شده است. نمودار جابه‌جایی طبقات در حالت بدون کنترلر و در سه حالت با کنترلر ارائه و با یکدیگر مقایسه شدند. به‌کارگیری کنترلر بهینه نسبت به کنترلر فازی و همچنین کنترلر فازی نسبت به PD باعث بهبود پاسخ‌های جابه‌جایی طبقات می‌شود. همان‌طور که در این مقاله