



اثر تأخیر زمانی در کنترل سازه‌ها با روش تخصیص قطب‌ها

فریدون امینی^۱، طیبه ناظمی هرندی^۲
(تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۰۱)

چکیده

روش تخصیص قطب‌ها یکی از الگوریتم‌های محاسبه نیروی کنترل، در کنترل فعال سازه‌ها است. یکی از مشکلات سیستم‌های کنترلی، تأخیر زمانی ناشی از پردازش داده‌ها و وارد کردن نیروی کنترل به سازه است که باعث کاهش بازدهی الگوریتم خواهد شد. در این تحقیق اثر تأخیر زمانی در کنترل سازه‌ها به روش تخصیص قطب‌ها، و نیز روش کاهش اثر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور کاهش و یا حذف اثرات تأخیر زمانی، باید ترم تأخیر در ابتدای کار، در معادله اصلی وارد شود. این کار با بهره‌گیری از سری تیلور، و وارد کردن ترم تأخیر زمانی در ماتریس‌های سیستم انجام می‌شود. بدین ترتیب معادله اصلی سازه، ساده‌تر شده، و حل آن به سادگی حل یک معادله بدون تأخیر زمانی خواهد بود. معادله حاصل، با استفاده از روش تخصیص قطب‌ها بررسی شده و نیروی کنترل بهینه محاسبه می‌شود.

کلمات کلیدی

کنترل فعال سازه‌ها، تأخیر زمانی، روش تخصیص قطب‌ها

The Effect of Time Delay on Control of Structures with Pole Assignment Method

F. Amini, T. Nazemi Harandi

ABSTRACT

Pole assignment method is one of the algorithms for calculating the control force in active control of structures. One of the problems of control systems is time delay due to data processing and apply control force to structure that will reduce the efficiency of the control algorithm. In this study, the effects of time delay on pole assignment method for the control of structures, as well as how to reduce its effectiveness will be evaluated. In order to reduce or remove the effect of time delay, delay term will be considered in the original equation in the beginning of the affair. It is carried out by using the Taylor series, and importing the time delay term in the matrixes of the system. Thus, the equations of the structure are simplified and will be solved such as simple equations without time delay. The obtained equations are studied by using pole assignment method and the optimal control force is calculated.

KEYWORDS

Active control of structures, Time delay, Pole assignment method

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، famini@iust.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، t_nazemi@civleng.iust.ac.ir



روند رو به رشد بلند مرتبه سازی و ساخت و ساز در مناطق لرزه خیز و همچنین لزوم عملکرد مناسب سازه در برابر نیروهای ناشی از زمین لرزه و بادهای شدید، باعث شده تلاش‌ها و تحقیقات زیادی توسط مهندسين برای دستیابی به انواع روش‌های کنترلی جهت بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها انجام پذیرد. در واقع، به دلیل عملکرد محرک‌های الکترومکانیکی، یک تأخیر زمانی در اعمال نیروی کنترل حاصل می‌شود. با پیشرفت فناوری، اتلاف زمان ناشی از جمع‌آوری داده و محاسبات نیروی کنترلی آنلاین کاهش می‌یابد. به هر حال زمان ناشی از پردازش سیگنال‌ها و عکس‌العمل محرک‌ها - که تأخیر زمانی نام دارد - اثر زیان‌باری بر پایداری و عملکرد سیستم کنترل خواهد گذاشت. تحقیقات زیادی در زمینه تلاش برای کاهش، جبران و یا حذف اثرات آنها انجام شده است. بدین منظور از ابتدا در معادله حرکت سازه، تأخیر زمانی در بردار نیروی کنترل وارد و معادله بر این مبنا حل شده و نیروی کنترل به دست می‌آید. روش‌های مختلفی برای حل معادله با تأخیر زمانی پیشنهاد و بررسی شده که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند.

از میان الگوریتم‌های مختلفی که امروزه به منظور کنترل سازه‌ها به کار می‌روند، الگوریتم تخصیص قطب‌ها یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در کنترل سازه محسوب می‌شود و استفاده از آن به طور قابل ملاحظه‌ای در مطالعات و تحقیقات کنترل مرسوم می‌باشد. در این تحقیق اثر تأخیر زمانی در کنترل سازه‌ها به روش تخصیص قطب‌ها، و نیز روش کاهش اثر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

استفاده از روش تخصیص قطب‌ها برای کنترل ارتعاشات سازه‌های مهندسی عمران توسط Abdel-Rohman و Leipholtz [۱] و Amini [۲] مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است.

بررسی اثر تأخیر زمانی نیز در کارهای Abdel-Rohman [۳]، Chung و همکارانش [۴]، McGreevy و همکارانش [۵] و Soong [۶] مورد توجه قرار گرفته است.

۲- تأخیر زمانی

تأخیر زمانی در سیستم‌های کنترل برای سازه‌های تحت اثر زلزله ناشی از عوامل زیر است:

- زمان لازم برای اندازه‌گیری پاسخ‌های بردار حالت هنگام شتاب زمین و پردازش آنها توسط سیستم پردازنده مرکزی
 - محاسبه نیروی کنترلی مورد نیاز توسط سیستم کنترلی
 - تولید سیگنال لازم برای فعال کردن دستگاه‌های کنترل
 - تولید نیروی کنترل مورد نیاز و اعمال آن به سازه
- این تأخیر بین زمان مفروض برای اعمال نیروی کنترل و زمان واقعی اعمال، باعث تنزل بازدهی کنترل و یا حتی ناپایداری سیستم خواهد شد.
- مسأله تأخیر زمانی از دو جنبه قابل بررسی است:
- بررسی اثر تأخیر زمانی روی پایداری و عملکرد سیستم کنترلی
 - مطالعه روش‌های جبران تأخیر زمانی به منظور بهبود عملکرد سیستم کنترلی

۳- معادلات حرکت

معادلات حرکت برای یک سیستم n درجه آزادی را که در معرض نیروی خارجی و کنترل قرار دارد، می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = D u(t) + E f_e(t) \quad (1)$$

که در آن M ، C و K ، به ترتیب ماتریس‌های $n \times n$ بعدی جرم، میرایی و سختی می‌باشند. بردار x به جایی $x(t)$ برداری $n \times 1$ بعدی است که در آن x_i بردار x به جایی طبقه i ام نسبت به زمین است. $u(t)$ یک ماتریس $m \times n$ بعدی، نماینده نیروی کنترل تولید شده توسط محرک است؛ $f_e(t)$ بردار $n \times 1$ نیروی دینامیکی خارجی است؛ D و F ماتریس‌های $n \times m$ و $n \times r$ موقعیت هستند که به ترتیب مکان نیروی کنترل و نیروی خارجی را نشان می‌دهند [۷].



۴- معادلات حرکت در فضای حالت با در نظر گرفتن

تأخیر زمانی

برای وارد کردن اثر تأخیر زمانی در کنترل سازه‌ها از سری تیلور نیروی کنترل استفاده کرده و معادلات به شکل زیر بازنویسی می‌شوند:

$$u(t) = u(t-t_d) + t_d \times \ddot{u}(t-t_d) + \frac{t_d^2}{2} \times \dddot{u}(t-t_d) + \frac{t_d^3}{6} \times \overset{(4)}{u}(t-t_d) + \dots \quad (2)$$

اگر تأخیر زمانی در معادلات سازه وارد شود، معادلات به شکل زیر بازنویسی می‌شوند:

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = D u(t-d) + E fe(t) \quad (3)$$

که در این رابطه t_d میزان تأخیر نیروی کنترل است. این معادله در فضای حالت به صورت زیر است:

$$\dot{q}(t) = A q(t) + B u(t) + H fe(t) \quad (4)$$

که پارامترهای آن با توجه به سری تیلور نیروی کنترل به صورت زیر است:

$$q(t) = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ u(t-t_d) \\ \dot{u}(t-t_d) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C & -M^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & \frac{-2}{T_d^2} & \frac{-2}{T_d^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2}{T_d^2} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$H = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

در این رابطه:

A ماتریس $n \times n$ بعدی سیستم، B ماتریس $n \times m$ بعدی مکان نیروی کنترل و H ماتریس مکان نیروی خارجی که $n \times r$ بعدی است. ماتریس‌های 0 و I ذکر شده ماتریس صفر و واحد به سائز $n \times n$ هستند. T_d ماتریس $n \times n$ شامل تأخیر زمانی کنترلرهای موجود در درجات آزادی سازه است.

شکل کلی معادله به صورت زیر است:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{u}(t-t_d) \\ \ddot{u}(t-t_d) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C & -M^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & \frac{-2}{T_d^2} & \frac{-2}{T_d^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ u(t-t_d) \\ \dot{u}(t-t_d) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2}{T_d^2} \end{Bmatrix} \{u(t)\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \{fe(t)\} \quad (9)$$

در مجموع تعداد n قطب وجود دارد که $2n$ قطب آن، با ضریب میرایی و فرکانس طبیعی سازه ارتباط داشته و $2n$ قطب دیگر مربوط به تأخیر زمانی موجود در درجات آزادی سازه می‌باشد. با در نظر گرفتن بردار نیروی کنترل، که در حالت کنترل خطی حلقه بسته به صورت تابعی خطی از بردار حالت در نظر گرفته می‌شود، خواهیم داشت:

$$u(t) = F.q(t) \quad (12)$$

۵- اعمال روش تخصیص قطب‌ها

مقادیر ویژه سیستم کنترل نشده، که مقادیر ویژه ماتریس A هستند برای هر مود به صورت زیر است:

$$\lambda_i^1, \lambda_i^2 = -\zeta_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} \quad (10)$$

$$\lambda_i^3, \lambda_i^4 = -\frac{1}{t_{di}} \pm j \frac{1}{t_{di}} \quad (11)$$



با جایگذاری در رابطه (۴) خواهیم داشت:

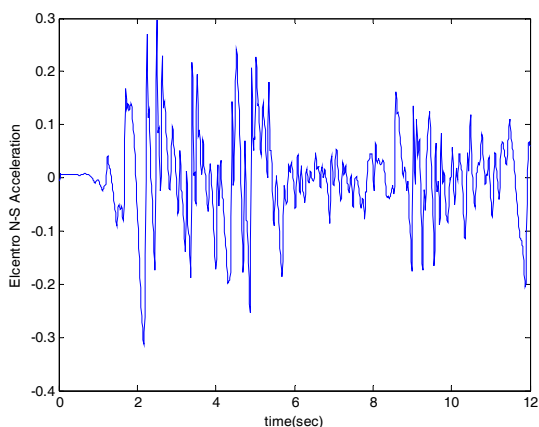
$$\dot{q}(t) = (A + B.F).q(t) + H.f_e(t) \quad (13)$$

روش تخصیص قطب‌ها، با انتخاب مقادیر ویژه برای ماتریس سیستم $A+B.F$ ماتریس بهره F را به گونه‌ای به دست می‌آورد که مقادیر ویژه مورد نظر را داشته باشد. در این تحقیق قسمت حقیقی $2n$ قطب اول ماتریس در یک ضریب ثابت، که با روش سعی و خطا به دست می‌آید ضرب شده و قسمت موهومی ثابت نگه داشته می‌شود. قسمت حقیقی و موهومی $2n$ قطب دوم نیز در یک ضریب ثابت ضرب می‌شود. ضرایب به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که پاسخ‌های سیستم اعم از جابجایی‌ها و شتاب‌ها، با اعمال نیروی کنترل در محدوده مجاز قرار بگیرند.

گرفته است و نتایج حاصله را می‌توان با روش‌های ارائه شده در سایر مقالات مقایسه نمود. مدت زمان مورد بررسی ۱۲ ثانیه اول زلزله می‌باشد و گام زمانی آن 0.01 ثانیه است. منحنی این شتاب نگاشت در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

جدول (۱): مشخصات سازه‌ای مدل ۸ طبقه

$m_1=m_2=400 \text{ tons}$ $m_3=m_4=\dots=m_8=350 \text{ tons}$	جرم طبقه
$k_1=k_2=k_3=3 \times 10^5 \text{ kN/m}$ $k_4=k_5=k_6=2/5 \times 10^5 \text{ kN/m}$ $k_7=k_8=1/8 \times 10^5 \text{ kN/m}$	سختی الاستیک هر طبقه
$\zeta = 0.3$	ضریب میرایی تمام مودها

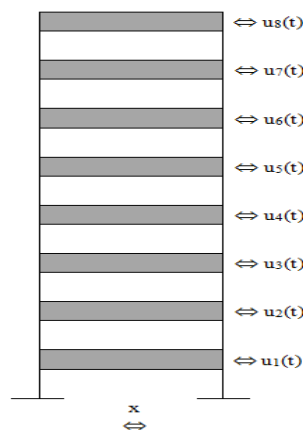


شکل (۲): نمودار شتاب نگاشت زلزله السترو

۶- مثال عددی

۶-۱- مشخصات سازه

شماتیکی از سازه مورد بررسی در شکل (۱) آورده شده است. مدل جرم متمرکزی برای یک ساختمان هشت طبقه مورد نظر می‌باشد [۸]. مشخصات سازه‌ای مدل برای انجام محاسبات به صورت جدول (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): سازه ۸ طبقه مفروض

۶-۲- کنترل سازه با تأخیر زمانی 0.05 ثانیه

برای سازه فوق و با در نظر گرفتن تأخیر زمانی 0.05 ثانیه، جابجایی مجاز 5 cm ، جابجایی نسبی مجاز از $1/22 \text{ cm}$ و شتاب مجاز $5/8 \text{ m/s}^2$ پاسخ‌های کنترل شده به دست آورده می‌شود.

پاسخ‌های کنترل شده سازه مذکور تحت چهار حالت زیر بیان شده‌اند:

۱- کنترل نشده

۲- کنترل شده با استفاده از روش موجود

۳- کنترل شده با تأخیر زمانی صفر

در این تحلیل از شتاب نگاشت زلزله السترو با جهت شمال-جنوب استفاده شده است که فرکانس غالب آن کم بوده و در تحقیقات کنترل سازه مورد توجه زیادی قرار



نیز، نیروهای کنترل به دست آمده از حالت ۳، با تأخیر زمانی، به سازه وارد می‌شوند. پاسخها در جدول‌های (۲) تا (۴) و شکل‌های (۳) تا (۶) آورده شده است.

۴- کنترل شده با تأخیر زمانی و بدون در نظر گرفتن آن در معادلات مقادیر ویژه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پاسخ‌های کنترل شده سیستم، در حالت ۲ و ۳ یکسان شوند. برای حالت ۴

جدول (۲): پاسخ‌های سازه ۸ طبقه کنترل شده با استفاده از روش موجود

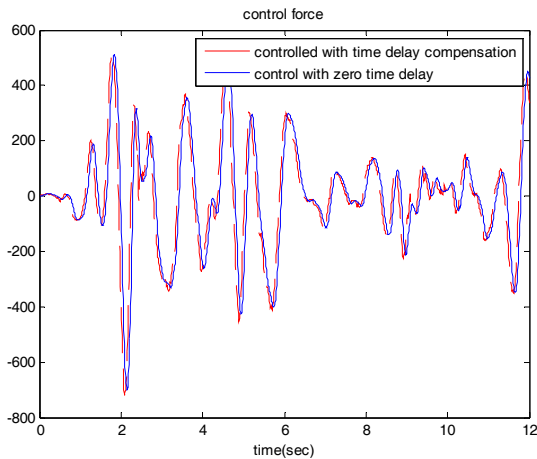
طَبَقَه	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
بیشینه جابجایی (m)	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۶۶	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۹۶	۰/۰۳۵۲	۰/۰۳۹۰	۰/۰۴۵۳	۰/۰۴۸۵
بیشینه جابجایی نسبی (m)	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۳۶
بیشینه سرعت (m/s)	۰/۰۰۸۸۵	۰/۱۵۸۶	۰/۲۱۳۹	۰/۲۶۷۸	۰/۳۱۰۲	۰/۳۳۳۴	۰/۳۸۰۹	۰/۴۰۴۷
بیشینه شتاب مطلق (m/s ²)	۴/۰۴۵۸	۴/۹۲۵۹	۴/۵۴۹۵	۳/۷۰۴۷	۴/۰۰۳۳	۴/۱۷۶۷	۴/۶۲۳۶	۴/۷۸۷۰
بیشینه نیروی کنترل (kN)	۱۴۷۳/۲۰	۱۰۵۱/۲۰	۵۶۶/۷۰	۶۴۹/۸۰	۷۷۷/۶۰	۹۷۱/۰۰	۷۲۰/۲۰	۷۱۹/۰۰
متوسط نیروی کنترل (kN)	۱۳۵/۱۴	۱۳۹/۲۲	۱۱۷/۴۳	۱۲۴/۸۷۶	۱۴۵/۸۱	۲۴۳/۷۸	۱۴۲/۷۷	۱۳۶/۶۹

جدول (۳): پاسخ‌های سازه ۸ طبقه کنترل شده با تأخیر زمانی صفر

طَبَقَه	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
بیشینه جابجایی (m)	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۶۶	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۹۶	۰/۰۳۵۲	۰/۰۳۹۰	۰/۰۴۵۳	۰/۰۴۸۵
بیشینه جابجایی نسبی (m)	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۳۶
بیشینه سرعت (m/s)	۰/۰۸۸۵	۰/۱۵۸۶	۰/۲۱۳۹	۰/۲۶۷۸	۰/۳۱۰۲	۰/۳۳۳۴	۰/۳۸۰۹	۰/۴۰۴۷
بیشینه شتاب مطلق (m/s ²)	۴/۰۴۵۸	۴/۹۲۵۹	۴/۵۴۹۵	۳/۷۰۴۷	۴/۰۰۳۳	۴/۱۷۶۷	۴/۶۲۳۶	۴/۷۸۷۰
بیشینه نیروی کنترل (kN)	۴۴۱/۴۲۰	۴۷۳/۰۵۰	۴۹۲/۵۳۰	۵۶۱/۲۷۴	۶۶۸/۸۰۰	۹۴۲/۱۵۰	۶۹۸/۴۸۰	۷۰۰/۱۷۰
متوسط نیروی کنترل (kN)	۷۲/۲۷۱	۱۰۲/۶۴۰	۱۰۲/۴۷۰	۱۱۶/۸۸۳	۱۳۷/۱۶۰	۲۳۸/۶۹۰	۱۳۸/۳۴۰	۱۳۳/۸۳۰

جدول (۴): پاسخ‌های سازه ۸ طبقه کنترل شده با تأخیر زمانی و بدون در نظر گرفتن آن در معادلات

طَبَقَه	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
بیشینه جابجایی (m)	۰/۰۱۴۲	۰/۰۲۶۹	۰/۰۳۵۶	۰/۰۴۲۶	۰/۰۴۹۳	۰/۰۵۶۱	۰/۰۶۸۷	۰/۰۷۴۵
بیشینه جابجایی نسبی (m)	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۱۴
بیشینه سرعت (m/s)	۰/۱۹۶۹	۰/۳۲۲۷	۰/۳۷۳۵	۰/۴۰۷۸	۰/۳۸۰۸	۰/۴۷۹۷	۰/۵۷۷۴	۰/۶۲۷۱
بیشینه شتاب مطلق (m/s ²)	۵/۶۹۹۶	۶/۸۰۷۷	۶/۸۹۶۹	۶/۰۳۶۷	۵/۰۰۷۷	۶/۷۴۶۸	۶/۶۲۴۲	۶/۶۳۳۶
بیشینه نیروی کنترل (kN)	۴۴۱/۴۲۰	۴۷۳/۰۵۰	۴۹۲/۵۳۰	۵۶۱/۲۷۴	۶۶۸/۸۰۰	۹۴۲/۱۵۰	۶۹۸/۴۸۰	۷۰۰/۱۷۰
متوسط نیروی کنترل (kN)	۷۲/۲۷۱	۱۰۲/۶۴۰	۱۰۲/۴۷۰	۱۱۶/۸۸۳	۱۳۷/۱۶۰	۲۳۸/۶۹۰	۱۳۸/۳۴۰	۱۳۳/۸۳۰



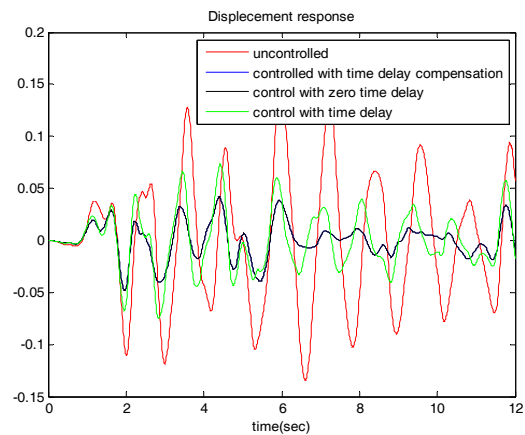
شکل (۶): نمودار نیروی کنترل طبقه هشتم سازه ۸ طبقه در حالات: کنترل شده با استفاده از روش موجود و کنترل شده با تأخیر زمانی صفر

نتایج نشان می‌دهند که روش موجود به خوبی قادر به کاهش پاسخ‌های سازه با وجود تأخیر زمانی می‌باشد. مقایسه متوسط نیروی کنترل نشان می‌دهد که هنگام وجود تأخیر زمانی ۰/۰۵ ثانیه در تمامی کنترلرها، به طور متوسط به میزان ۱۳/۷۶٪ نیروی بیشتری مورد نیاز است.

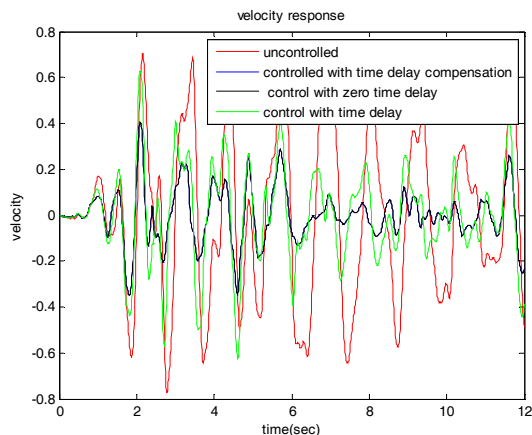
۳-۶- اثر میزان تأخیر زمانی در الگوریتم کنترل

برای بررسی اثر میزان تأخیر زمانی روی الگوریتم کنترل، تأخیرهای زمانی مختلف در نظر گرفته شده و نمودار میزان نیروی کنترل بر حسب تأخیر در شکل (۷) و (۸) رسم شده است. قطب‌های سیستم کنترلی به نحوی انتخاب شده‌اند که بیشینه پاسخ‌های سازه اعم از جابجایی، سرعت و شتاب به ازای همه تأخیرهای زمانی به مقدار یکسانی برسند. با توجه به روش استفاده شده در این تحقیق و وارد شدن ترم تأخیر زمانی در ماتریس سیستم، با فرض یکسان بودن قطب‌ها، ماتریس‌های بهره مختلف و در نتیجه نیروهای کنترل متفاوت به دست خواهد آمد.

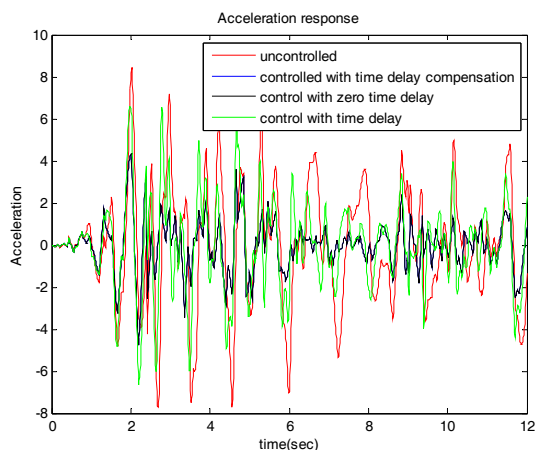
اگر میزان بیشینه نیروی کنترل را حدود ۵-۳٪ وزن سازه در نظر بگیریم، نمودارهای (۷) و (۸) نشان می‌دهند که الگوریتم موجود، به خوبی قادر به کنترل سازه مذکور تا تأخیر زمانی حدود ۰/۰۵ ثانیه می‌باشد. از این تأخیر زمانی



شکل (۳): نمودار جابجایی مطلق طبقه هشتم سازه ۸ طبقه در ۴ حالات: (۱) کنترل نشده، (۲) کنترل شده با استفاده از روش موجود (۳) کنترل شده با تأخیر زمانی صفر (۴) کنترل بهینه با تأخیر زمانی و بدون در نظر گرفتن آن در معادلات



شکل (۴): نمودار سرعت طبقه هشتم سازه ۸ طبقه در ۴ حالت



شکل (۵): نمودار شتاب مطلق طبقه هشتم سازه ۸ طبقه در ۴ حالت

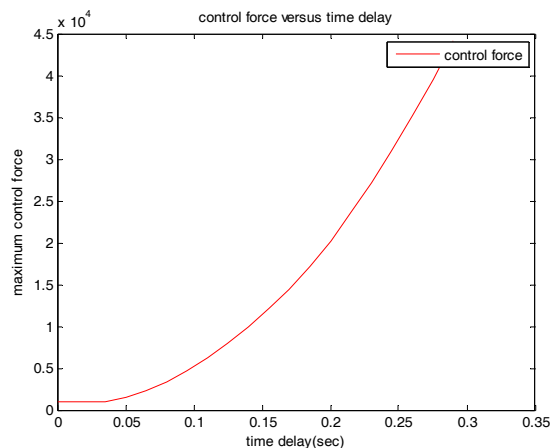


زمانی در کنترل سازه‌ها به روش تخصیص قطب‌ها، و نیز روش کاهش اثر آن مورد بررسی قرار گرفت. اعمال روش پیشنهادی روی یک سازه متعارف نشان داد که تأخیر زمانی باعث کاهش بازدهی الگوریتم کنترل می‌شود. در نظر نگرفتن تأخیر در روند محاسبه نیروی کنترل، ممکن است منجر به ناپایداری سازه شود. همچنین، وارد کردن تأخیر زمانی در الگوریتم محاسبه نیروی کنترل، می‌تواند تا حد زیادی از کاهش بازدهی جلوگیری کند. البته میزان تأخیری که می‌توان در الگوریتم کنترل وارد کرده، و پاسخ‌های قابل قبولی گرفت، محدود است و این میزان برای سازه‌های مختلف، تفاوت دارد. برای سازه هشت طبقه که در این تحقیق بررسی شد، تا حدود ۰/۰۵ ثانیه، می‌توان با نیروی کنترل متعارف، به پاسخ‌های مجاز دست یافت. به طور کلی، وجود تأخیر زمانی، میزان نیروی کنترل مورد نیاز را افزایش می‌دهد. هرچه میزان تأخیر بیشتر شود، افزایش نیروی کنترل ادامه داشته، تا جاییکه به ازای یک مقدار از آن، نیروی کنترل از حد مجاز فراتر می‌رود.

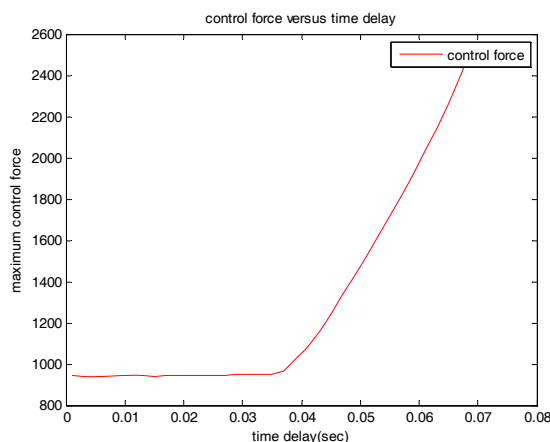
۹- مراجع

- [1] Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H.E. (1978), "Structural Control by Pole Assignment Method", ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 104, No. 5, pp. 1159-1175.
- [2] Amini F. (1982), "Active Control of Multistory Structures by Pole Assignment Method", Ph.D. Dissertation, Polytechnic Institute of New York.
- [3] Abdel-Rohman, M. (1985), "Structural Control Considering Time Delay Effect", Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 224-227.
- [4] Chung, L., Reinhorn, A.M. and Soong, T.T. (1986), "An Experimental Study of Active Structural Control", in Dynamic Response of Structures, (eds G.C. Hart and R.B. Nelson), ASCE, New York, Vol. 10, pp. 795-802.
- [5] McGreevy, S., Soong, T.T. and Reinhorn A.M. (1988), "An Experimental Study of Time Delay Compensation in Active Structural Control", In Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference-IMAC, Orlando, FL, pp. 733-739.
- [6] Soong, T.T. (1990), "Active Structural Control: Theory and Practice", England: Longman Scientific & Technical, England, U.K.

به بعد، شیب نمودار نیروی کنترل با اضافه شدن زمان تأخیر، به سرعت افزایش می‌یابد و با توجه به محدودیت‌های موجود برای بیشینه نیروی کنترل اعمالی توسط دستگاه‌های موجود، از ارزش الگوریتم خواهد کاست.



شکل (۷): نمودار نیروی کنترل بر حسب تأخیر زمانی



شکل (۸): نمودار نیروی کنترل بر حسب تأخیر زمانی

با بزرگ‌نمایی بخش اولیه

۷- نتیجه گیری

روش تخصیص قطب‌ها یکی از الگوریتم‌های محاسبه نیروی کنترل، در کنترل فعال سازه‌ها است. یکی از مشکلات سیستم‌های کنترلی، تأخیر زمانی ناشی از پردازش داده‌ها و وارد کردن نیروی کنترل به سازه است که باعث کاهش بازده الگوریتم خواهد شد. در این تحقیق اثر تأخیر



[۷] مدیری، ف. (۱۳۹۱)، "کنترل لحظه‌ای سازه‌های آسیب دیده و نامنظم به روش تخصیص قطب‌ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[۸] رضوانیان، ا. (۱۳۷۸)، "روشی برای بهینه کردن تعیین قطب-ها در کنترل فعال سازه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

