

بررسی تأثیر میرایی در کاهش حساسیت سیستم‌های کنترل فعال سازه‌ی به تأخیر زمانی

بهروز رجیبی (رهبری)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبز

امید بهار* (استادیار)

بزهنگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف
دوری ۲-۱۳۹۰، شماره ۲، ص. ۹۹-۱۰۶ (پادداشت فنی)

یکی از مشکلات عمده در سیستم‌های کنترل فعال، وجود تأخیر زمانی است. تأخیر زمانی می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ی در عملکرد سازه در هنگام زلزله داشته باشد، به طوری که به ناپایداری کلی سازه نیز بیانجامد. در این نوشتار، ابتدا سازه‌ی موردنظر نسبت به تأخیر زمانی تحویل حساسیت شده و سپس مقدار بحرانی آن تعیین می‌شود. بررسی‌ها نشان دادند تأخیر زمانی بحرانی سازه به نوع زلزله‌ی ورودی حساس نیست و فقط به خصوصیات سازه و سیستم کنترلی ارتباط دارد. لذا برای مهار این پدیده و افزایش بازدهی سیستم کنترل، از ایده‌ی افزایش ظرفیت میراکنندگی سازه استفاده شد. افزایش میرایی به گونه‌ی انجام شد که فقط ظرفیت جذب انرژی سازه تغییر کند. الگوریتم مورد استفاده، الگوریتم کنترل گسسته‌ی بهینه‌ی آنی است. ارزیابی‌ها نشان داده‌اند افزایش میرایی می‌تواند تا اندازه‌ی زیادی حساسیت سازه و سیستم کنترل را نسبت به تأخیر زمانی محدود کند. به این شیوه می‌توان سازه‌های کنترلی را که با گذشت زمان کارایی خود را از دست داده‌اند، مجدداً احیا کرد.

behrooz.rajabibi@ia.usaghez.ac.ir
omidbahar@iiees.ac.ir

واژگان کلیدی: کنترل فعال، نیروی کنترلی، تأخیر زمانی، میرایی، الگوریتم کنترل.

۱. مقدمه

نیز تأخیر زمانی قسمت مکانیکی را تا حد زیادی کاهش داده است. اما از طرف دیگر، تغییرات حادث شده در طول زمان در سازه و سیستم کنترل باعث می‌شود این مسئله همچنان جزء جدایی‌ناپذیر سیستم‌های کنترلی باشد، که باید نگاه ویژه‌ی به آن داشت.

تا به امروز پژوهشگران تلاش‌های قابل‌ملاحظه‌ی جهت کاهش حساسیت سیستم‌های کنترلی نسبت به تأخیر زمانی انجام داده‌اند. بررسی حساسیت الگوریتم‌های کنترل فعال نسبت به تأخیر زمانی^[۱] ارائه‌ی رابطه‌ی حساسیت سیستم سازه‌ی کنترل شده به تأخیر زمانی با توجه به دوره‌ی تناوب سازه‌های یک درجه‌ی آزاد^[۲] و قیاس کنترل با بازخورد سرعت مثبت در مقابل کنترل با بازخورد سرعت منفی در محاسبه‌ی نیروی کنترلی با توجه به الگوریتم استفاده شده^[۳] از جمله فعالیت‌های صورت گرفته در بحث تأخیر زمانی هستند. در این نوشتار برای بررسی میزان حساسیت سیستم کنترلی به تأخیر زمانی، از الگوریتم کنترل گسسته‌ی بهینه‌ی آنی استفاده شده است. سیستم کنترل بدون تأثیر تأخیر زمانی (در تأخیر زمانی صفر) طراحی بهینه شده و عملکرد سیستم سازه‌ی در برابر بارهای لرزه‌ی ارزیابی شده است. برای ماتریس‌های وزن از ماتریس وزن پایدار استفاده شده است که با کوچک شدن گام‌های زمانی، مشکل ناپایداری عددی یا کاهش کارایی سیستم کنترل اتفاق نیافتد. به این ترتیب مشاهده‌ی هرگونه تغییر در عملکرد لرزه‌ی سیستم کنترلی، فقط ناشی از وجود تأخیر زمانی فزاینده است. میزان این تأثیر در افت کارایی سیستم کنترلی

یکی از مشکلات اساسی علم کنترل فعال سازه‌ی، وجود تأخیر زمانی در حلقه‌ی کنترل است.^[۱] این مسئله می‌تواند به مشکلاتی مانند افزایش ناخواسته‌ی پاسخ‌های سازه‌ی، کاهش سطح عملکرد، و گاه بروز ناپایداری کلی در سازه‌ی کنترل شده منجر شود. مفهوم تأخیر زمانی در سیستم‌های کنترل را می‌توان میزان زمان تلف شده از لحظه‌ی شروع اندازه‌گیری مقادیر پاسخ سازه و تحریک لرزه‌ی تا لحظه‌ی اعمال نیروی کنترل محاسبه شده به سازه بیان کرد. به بیان ساده‌تر، نیروی کنترلی مناسب باید به صورت آنی در همان لحظه‌ی اندازه‌گیری پاسخ به سازه اعمال شود تا بهترین بازدهی سیستم کنترلی به دست آید. تأخیر زمانی در حلقه‌ی کنترل را می‌توان طی سه مرحله شناسایی کرد: مرحله‌ی اول، از لحظه‌ی اندازه‌گیری مقادیر تحریک جانبی و پاسخ سازه تا انتقال داده‌ها به پردازشگر؛ مرحله‌ی دوم، از لحظه‌ی انتقال داده‌ها به پردازشگر تا لحظه‌ی محاسبه‌ی نیروی کنترلی؛ و مرحله‌ی سوم، از لحظه‌ی محاسبه‌ی نیروی کنترل تا اعمال آن به سازه. تأخیر زمانی به وجود آمده در حلقه‌ی کنترل نیز به دو بخش الکترونیکی و مکانیکی تقسیم‌بندی می‌شود. معمولاً تأخیر زمانی مرتبط با قسمت اول به واسطه‌ی بهره‌گیری از مدارهای پیشرفته‌ی الکترونیکی و رایانه‌های با قدرت پردازش بالا در قیاس با بخش مکانیکی بسیار ناچیز است. از طرفی با رشد فناوری، طراحی و ساخت سازوکارهای جدید با سرعت عکس‌العمل بالا

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۰/۵/۲، پذیرش ۱۳۹۰/۱۰/۱۰.

و سازه بررسی و در نهایت به منزله‌ی یک راه‌حل جبران‌کننده تلاش شده است تا با افزایش میرایی سازه، حساسیت سیستم کنترلی به کمترین حد برسد و از بیشینه‌ی کارایی آن استفاده شود. سازوکار کنترلی مورد استفاده، سیستم میراکننده‌ی جرم فعال (AMD) است.

۲. الگوریتم کنترل گسسته‌ی بهینه‌ی آنی

الگوریتم مورد استفاده در کنترل فعال سازه‌ها می‌تواند نقش بسیار مهمی در بهبود عملکرد و افزایش کارایی سیستم کنترلی ایفا کند. الگوریتم مورد استفاده در این نوشتار الگوریتم کنترل گسسته‌ی بهینه‌ی آنی است که محققان ارائه کرده‌اند.^[۵] این الگوریتم که اساساً برگرفته از الگوریتم کنترل بهینه‌ی آنی است، از معادلات حالات گسسته جهت تحلیل و تعیین پاسخ‌ها استفاده می‌کند. در این الگوریتم از فضای گسسته‌ی حالت و روابط کنترل دیجیتال به صورت رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شده است:

$$Z_{K+1} = A_d Z_K + B_d U_K + W_{1d} \ddot{X}_{ok} \quad (۱)$$

$$Z_K = \begin{bmatrix} x_k & \dot{x}_k \end{bmatrix}^T \quad (۲)$$

در رابطه ۱، \ddot{X}_{ok} شتاب زمین لرزه در هر مرحله و ماتریس‌های A_d ، B_d و W_{1d} ماتریس ضرایب حالت گسسته‌ی ماتریس‌های A ، B و W_1 است (رابطه‌های ۳ الی ۵).^[۵]

$$A = \begin{bmatrix} I_{n \times n} & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -M^{-1}D \end{bmatrix}^T \quad (۴)$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0 & e \end{bmatrix}^T \quad (۵)$$

M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی، و سختی سازه‌ی کنترل شده هستند؛ ماتریس D محل قرارگیری AMD در ارتفاع سازه؛ e ماتریسی یک بعدی که تأثیر شتاب زمین را بر روی جرم‌ها نشان می‌دهد. برای تبدیل ماتریس‌های فضای پیوسته به حالت گسسته از روابط ۶ الی ۹ استفاده می‌شود:

$$F = \int_0^{\Delta t} \exp(A\eta) d\eta \quad (۶)$$

$$A_d = \exp(A \Delta t) \quad (۷)$$

$$B_d = F B \quad (۸)$$

$$W_{1d} = F W_1 \quad (۹)$$

در این الگوریتم، نیروی کنترل (U_K) از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:^[۵]

$$U_K = -[R + B_d^T Q B_d]^{-1} B_d^T Q (A_d Z_k + W_{1d} \ddot{X}_{ok}) \quad (۱۰)$$

ماتریس‌های R و Q ماتریس‌های وزن نیروی کنترل و پاسخ سازه هستند. اصولاً در روش کنترل آنی نیروی کنترل به گام زمانی وابسته است. لذا با کاهش گام زمانی از کارایی سیستم کنترل کاسته می‌شود. مزیت استفاده از روش کنترل گسسته‌ی بهینه‌ی آنی در مهار این وابستگی است. به این ترتیب که با بهره‌گیری از روش پایداری لیاپانوف ماتریس‌های وزن پایدار برای سازه‌ی کنترل شده محاسبه می‌شود.

این ماتریس‌ها تضمین‌کننده‌ی رفتار پایدار و عملکرد بهینه‌ی سیستم کنترلی هستند. برای این سازه، ماتریس R برابر با 10^6 در نظر گرفته شده است؛ و ماتریس پایدار Q از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید که در آن ماتریس I_0 یک ماتریس نیمه قطعی مثبت اختیاری است که از خصوصیات خود سازه‌ی کنترل شده شکل می‌گیرد:^[۵]

$$A_d^T Q A_d - A_d^T Q B_d (R + B_d^T Q B_d)^{-1} B_d^T Q A_d - Q + I_0 = 0 \quad (۱۱)$$

$$I_0 = \begin{bmatrix} \alpha K_\gamma & 0_{9 \times 9} \\ 0_{9 \times 9} & \beta M \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$$K_\gamma = \begin{bmatrix} K_{11} (\lambda \times \lambda) & K_{12} (\lambda \times 1) \\ K_{21} (1 \times \lambda) & \gamma \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

مقادیر α ، β و γ ضرایب اصلاح نیروی کنترل برای دستیابی به یک کنترل پایدار و بهینه براساس برقراری تعادل میان پاسخ مناسب سازه‌ی و مصرف انرژی خارجی متعادل است. این ضرایب بدون در نظر گرفتن اثرات ناشی از تأخیر زمانی به ترتیب برابر 10^7 ، 10^4 و 10^2 در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه‌ی نیروی کنترلی از رابطه‌ی ۱۰ پاسخ‌های سیستم سازه و کنترل از معادله‌ی حالت محاسبه می‌شود.

۱.۲. الگوریتم کنترل گسسته‌ی بهینه‌ی آنی با وجود تأخیر زمانی

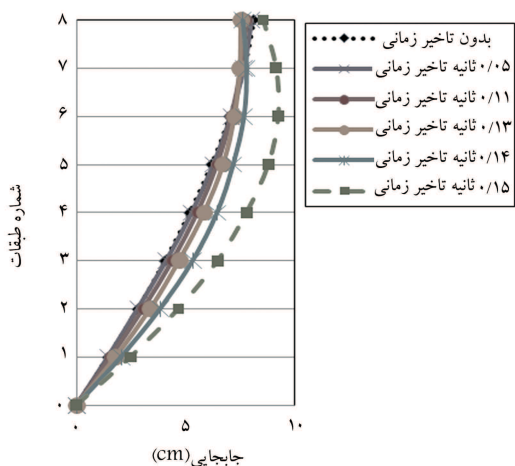
همان‌گونه که اشاره شد، نیروی بهینه‌ی کنترل برای حالت بدون تأخیر زمانی تنظیم شده است. لذا وجود مقادیر اندک تأخیر زمانی نیز می‌تواند روی کارایی سیستم کنترلی مؤثر باشد. با توجه به گسسته‌بودن الگوریتم مورد استفاده، به راحتی می‌توان تأخیر زمانی را به صورت ضریبی از گام‌های تحلیل در حلقه‌ی الگوریتم کنترل و تحلیل سیستم وارد و پاسخ‌های سازه و سیستم کنترلی را محاسبه کرد. با توجه به این که گام‌های تحلیل 10^6 ثانیه در نظر گرفته شده است، برای تأخیر زمانی 5×10^5 ثانیه، نیروی کنترل با 5 گام تأخیر به سازه اعمال می‌شود. بدین ترتیب رابطه‌ی فضای حالت به صورت رابطه‌ی ۱۴ اصلاح می‌شود:

$$Z_{K+1} = A_d Z_K + B_d U_{K-P} + W_{1d} \ddot{X}_{ok} \quad (۱۴)$$

مقدار P در رابطه‌ی اصلاح شده‌ی ۱۴، میزان تأخیر زمانی مورد نظر در حلقه‌ی کنترل را نشان می‌دهد؛ که پس از محاسبه‌ی نیروی کنترلی از رابطه‌ی ۱۰، مقدار به دست آمده در معادله‌ی اصلاح شده‌ی حالت (رابطه‌ی ۱۴) قرار می‌گیرد و پاسخ سیستم با وجود تأخیر زمانی در حلقه‌ی کنترل محاسبه می‌شود.

۳. سیستم سازه‌ی مورد بررسی

سازه‌ی مورد بررسی، یک سازه‌ی هشت طبقه‌ی دو بعدی با رفتار برشی است.^[۶] جرم، سختی، و میرایی سازه در کلیه‌ی طبقات یکسان و به ترتیب برابر با $345/6$ تن، 340400 کیلونیوتن بر متر و 2937 تن بر ثانیه است. این سازه مجهز به یک جرم میراگر فعال (AMD) است که در طبقه‌ی هشتم آن نصب شده است. سیستم کنترلی جرمی برابر با $29/63$ تن، بسامد ارتعاشی آن 9.8% بسامد مود اول ارتعاش سازه و همچنین میرایی آن 25 تن بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جهت تحریک جانبی سیستم از مؤلفه‌ی شمالی- جنوبی رکورد زلزله‌ی ال سنترو (1940) استفاده شده است. نمای کلی سازه‌ی مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. بیشینه‌ی جابجایی طبقات با تأخیرهای زمانی متفاوت.

جدول ۱. بیشینه‌ی پاسخ‌های طبقه‌ی هشتم با تأخیرهای زمانی متفاوت.

تغییر مکان (cm)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s ²)	
۸/۱	۰/۵۵۳۸	۴/۶	بدون تأخیر زمانی
۷/۷۸	۰/۶۰۹۴	۵/۴۸	۰/۱۱ ثانیه تأخیر زمانی
۸/۵۴	۰/۶۶۶۹	۶/۰۷	۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی

جدول ۲. بیشینه‌ی پاسخ‌های طبقه‌ی اول با تأخیرهای زمانی متفاوت.

تغییر مکان (cm)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s ²)	
۱/۴۴	۰/۱۲۴۹	۳/۹۹	بدون تأخیر زمانی
۱/۵۶	۰/۱۳۶۹	۴/۴۳	۰/۱۱ ثانیه تأخیر زمانی
۲/۴۷	۰/۱۹۴۲	۴/۸۳	۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی

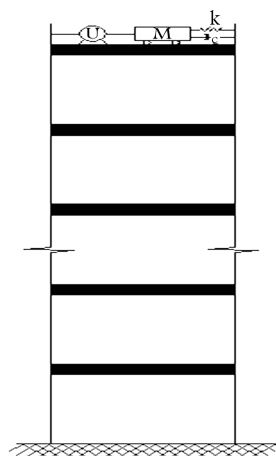
جدول ۳. بیشینه‌ی برش پایه و نیروی کنترلی با تأخیرهای زمانی متفاوت.

برش پایه (kN)	نیروی کنترلی (kN)	
۴۸۸۸	۶۲۳	بدون تأخیر زمانی
۵۳۲۰	۱۳۵۵	۰/۱۱ ثانیه تأخیر زمانی
۸۳۹۴	۲۷۶۱	۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی

۹ درصدی برش پایه و از تأخیر زمانی ۰/۱۱ ثانیه تا ۰/۱۵ ثانیه افزایش ۵۸ درصدی مشاهده می‌شود. در نیروی کنترلی نیز افزایش ۱۱۷ و ۱۰۴ درصدی به ترتیب در بازه‌های مشابه اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود کاهش کارایی سیستم کنترلی با بالارفتن انرژی مصرفی همراه است. به عبارت دیگر، لزوماً افزایش انرژی مصرفی در یک سیستم کنترل فعال، تضمین‌کننده‌ی عملکرد قابل قبول آن نیست.

۳.۴. بررسی پاسخ‌های سیستم کنترل سازه (AMD)

جهت دستیابی به یک سیستم کنترل منسجم، پاسخ‌های خود کنترل سیستم اهمیت بالایی دارد. لذا در این قسمت به بررسی پاسخ‌های AMD پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱. نمای شماتیک از سازه و سیستم کنترلی.

۴. تحلیل حساسیت سیستم به تأخیر زمانی

در ابتدا بر روی پاسخ سازه و سیستم کنترلی نسبت به حضور تأخیر زمانی در حلقه‌ی کنترل، تحلیل حساسیت انجام شده است. پس از انجام تحلیل‌های بسیار و ارزیابی رفتار سیستم با تأخیرهای زمانی متفاوت، سه بازه‌ی زمانی متفاوت شناسایی شد. فرض اصلی در این بررسی‌ها موجود بودن سیستم کنترل، رفتار بهینه براساس طراحی اولیه‌ی سیستم کنترل بدون تأخیر زمانی و حضور نامحسوس در این بازه‌هاست:

-- در بازه‌ی اول که حالت بدون تأخیر زمانی تا تأخیر زمانی ۰/۱۱ ثانیه را در بر می‌گیرد، پاسخ‌های سیستم تفاوت چشمگیری ندارند و عملاً سیستم به این میزان تأخیرهای زمانی حساسیتی نشان نمی‌دهد.

-- در بازه‌ی دوم، تأخیرهای زمانی بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۵ ثانیه را شامل می‌شود که پاسخ‌های سیستم به صورت فزاینده‌ی در حال افزایش است؛

-- در بازه‌ی سوم، تأخیرهای زمانی بزرگ‌تر از ۰/۱۵ ثانیه است که پاسخ‌های سیستم واگرا شده و سیستم کنترلی قادر به کنترل رفتار سازه نیست.

در ادامه، مقادیر به دست آمده برای سه حالت بدون تأخیر زمانی، ۰/۱۱ ثانیه، و ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی ارائه شده است.

۴.۱. بررسی پاسخ‌های طبقات انتخابی سازه

در این بخش تغییر مکان، سرعت، و شتاب طبقات در جداول ۱ و ۲ ارائه و بیشینه‌ی پاسخ جابجایی در شکل ۲ آورده شده است.

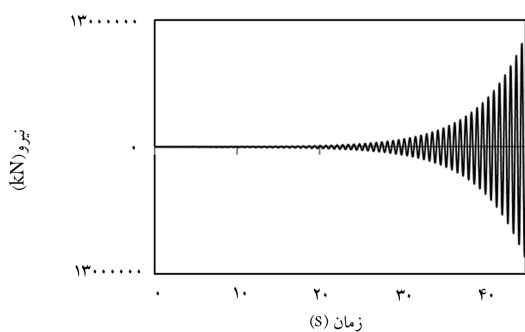
با بررسی شکل ۲ به نظر می‌رسد، به دلیل قرارگیری سیستم کنترلی در طبقه‌ی آخر، بیشترین تأثیر کنترل با تأخیر زمانی قابل ملاحظه نیز بر روی پاسخ آخرین طبقه‌ی سازه اتفاق افتاده است. این مسئله به نوعی اهمیت موقعیت قرارگیری سیستم کنترل را در وضعیت‌هایی با کارایی ضعیف نشان می‌دهد.

۴.۲. بررسی برش پایه‌ی سازه و نیروی کنترلی

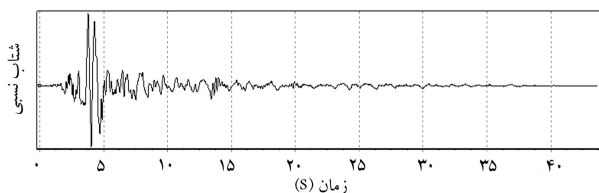
در این بخش برش پایه‌ی سازه و مقدار نیروی سیستم کنترلی با سه تأخیر زمانی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود برش پایه و نیروی کنترلی هر دو از تأخیر زمانی ۰/۱۱ تا ۰/۱۵ ثانیه به طور فزاینده‌ی افزایش می‌یابند. به طوری که از حالت بدون تأخیر زمانی تا تأخیر زمانی ۰/۱۱ ثانیه، افزایش

جدول ۴. بیشینه‌ی پاسخ‌های AMD با تأخیرهای زمانی متفاوت.

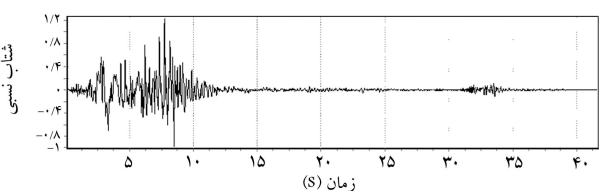
تغییر مکان (cm)	سرعت (m/s)	شتاب (m/s ²)	
۱,۳۵	۷,۷۱	۴۴,۵۵	بدون تأخیر زمانی
۱,۵	۸,۹۵	۶۹,۵۶	۱۱٪ ثانیه تأخیر زمانی
۲,۶۲	۱۸,۸۹	۱۵۷,۲	۱۵٪ ثانیه تأخیر زمانی



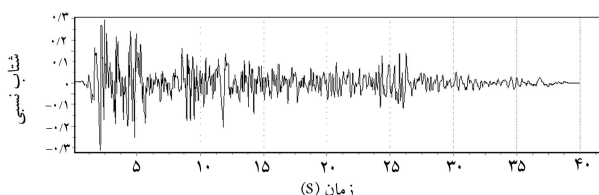
شکل ۳. واگرایی در پاسخ سیستم در تأخیر زمانی ۱۶٪ ثانیه.



شکل ۴. رکورد زلزله‌ی پارکفیلد.



شکل ۵. رکورد زلزله‌ی سان فرناندو.



شکل ۶. رکورد زلزله‌ی ال سنترو.

۶.۴. تحلیل حساسیت سیستم به دوره‌ی تناوب اصلی سازه

یکی از بارزترین مشخصات یک سازه، دوره‌ی تناوب اصلی آن است. در این قسمت به بررسی و تحلیل حساسیت سازه به تأخیر زمانی با در نظر گرفتن دوره‌ی تناوب اصلی سازه پرداخته شده است. این تغییرات به صورت افزایش سختی سازه بدون تغییر در میزان جرم طبقات حاصل شده است (جدول ۵).

جدول ۵. میزان حساسیت سیستم به تأخیر زمانی با توجه به دوره‌ی تناوب سازه.

نسبت مرز واگرایی به دوره‌ی تناوب اصلی	مرز واگرایی پاسخ‌ها (ثانیه)	دوره‌ی تناوب مود اول سازه (ثانیه)
۰,۱۴۲۱	۰,۱۸	۱,۲۶۵۹
۰,۱۴۷۴	۰,۱۶	۱,۰۸۴۹
۰,۱۷۱۳	۰,۱۴	۰,۸۱۷۲
۰,۱۷۹۱	۰,۱۲	۰,۶۷

نتایج به دست آمده حاکی از افزایش ۱۱ درصدی تغییر مکان AMD از حالت بدون تأخیر زمانی تا ۱۱٪ ثانیه تأخیر و افزایش ۷۵ درصدی تغییر مکان از تأخیر ۱۱٪ تا ۱۵٪ ثانیه است. افزایش ۱۶ و ۱۱۱ درصدی سرعت AMD و افزایش ۵۶ و ۱۲۵ درصدی شتاب برای بازه‌های مشابه به دست آمده است. این مقادیر به هیچ وجه برای یک سیستم کنترل فعال خوب طراحی شده، قابل پذیرش نیستند.

۴.۴. واگرایی پاسخ‌ها در سیستم

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته بر روی سازه و سیستم کنترلی و به دست آوردن نتایج در تأخیر زمانی ۱۶٪ ثانیه، پاسخ‌های سازه و سیستم کنترلی در تمامی قسمت‌ها واگرا شده است و سیستم کنترلی قادر به کنترل پاسخ‌ها نیست. دلیل این مسئله را می‌توان در خارج از فاز اعمال شدن نیروی کنترلی به سازه جویا شد. این تذکر لازم است، از آنجا که در هنگام محاسبه‌ی ماتریس وزن پایدار متناظر با پاسخ سازه، Q ، اثرات تأخیر زمانی منظور نشده است، امکان وجود ناپایداری در مقادیر بالای تأخیر زمانی وجود دارد. اما در حالت کلی می‌توان برای هر تأخیر زمانی یک ماتریس وزن پایدار یافت که مشکل ناپایداری سیستم سازه‌ی را برطرف سازد. این مقوله خارج از بحث این نوشتار است. شکل ۳ ناپایداری در پاسخ‌ها را نشان می‌دهد.

۵.۴. تحلیل حساسیت سیستم نسبت به زلزله‌ی ورودی

پس از بررسی‌های صورت گرفته بر روی سیستم و تعیین حساسیت آن نسبت به تأخیر زمانی در اعمال نیروی کنترلی، به بررسی حساسیت سیستم با وجود تأخیر زمانی در حلقه‌ی کنترلی، به نوع بار ورودی، و نوع تحریک جانبی پرداخته شده است. جهت تحلیل سیستم از سه رکورد زلزله‌ی ال سنترو، زلزله‌ی سان فرناندو و پارکفیلد استفاده شده که شتاب نگاشت‌های مربوط به آنها در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است.

بیشینه‌ی شتاب شتاب نگاشت‌های ثبت شده‌ی زلزله‌های ال سنترو، سان فرناندو، و پارکفیلد به ترتیب برابر با $۰,۳۱۳g$ ، $۱,۲۲۶g$ و $۰,۴۱۷g$ است. سیستم کنترلی و سازه‌ی مفروض تحت اثر هر ۳ رکورد مورد بررسی است. نتایج به دست آمده حاکی از عدم حساسیت سیستم به بار لرزه‌ی است. بدین صورت که پاسخ‌های سازه و سیستم کنترلی در کلیه‌ی حالت‌های مذکور در تأخیر زمانی ۱۶٪ ثانیه واگرا می‌شوند. در واقع از مبانی پایداری می‌دانیم که تأمین و تضمین رفتار پایدار در یک سیستم سازه‌ی به خصوصیات بار بستگی پیدا نمی‌کند. اما مسئله‌ی حائز اهمیت در این بررسی این است که ناپایداری ناشی از حضور تأخیر زمانی نیز از جنس ناپایداری کلی سازه و سیستم کنترلی آن است. به عبارت دیگر، این بررسی نشان می‌دهد برای هر سازه‌ی که به صورت فعال کنترل شده است، یک حد نهایی تأخیر زمانی ذاتی قابل تعریف است که از ابتدا می‌توان کارایی سیستم کنترل را براساس آن طراحی کرد.

پایه ی سازه حتی از مقدار اولیه بدون وجود تأخیر زمانی شود. البته باید توجه کرد که افزایش میرایی برای جبران کاهش کارایی سیستم کنترل فعال در حضور تأخیر زمانی زیاد تعریف شده است. به عبارت دیگر، زمانی که تأخیر زمانی مرتبط با انجام محاسبه ی نیروی کنترل و اعمال آن به سازه اجتناب ناپذیر باشد، این شیوه می تواند مورد نظر قرار گیرد. مثلاً در دو حالت میرایی ۲/۴۹ و ۱۲/۴۵ در صورت عدم وجود تأخیر زمانی در سیستم کنترل فعال با افزایش میرایی، شاهد کاهش ۱۶ درصدی پاسخ هستیم. مقایسه ی پاسخها در دو حالت ۰/۱۱ و ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی نیز کاهش ۲۱ و ۴۲ درصدی برش پایه را نشان می دهد. همچنین با قیاس برش پایه ی به دست آمده در حالت میراشده ی ۱۲/۴۵ درصدی مود اول ارتعاش با تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه که مرز واگرایی سیستم اولیه است و حالت ایده آل یک سیستم کنترلی یعنی عدم وجود تأخیر زمانی در اعمال نیروی کنترلی به سازه با میرایی ۲/۴۹ درصد که در سازه ی اولیه وجود دارد، می توان اذعان کرد که اثر تأخیر زمانی در حلقه ی کنترل فعال مهار شده است.

۳.۵. تغییر مکان AMD و نیروی کنترلی

بیشینه ی مقادیر تغییر مکان و نیروی کنترلی AMD در جدول های ۷ و ۸ ارائه شده است.

نتایج نشان می دهند که افزایش تأخیر زمانی در یک میرایی مشخص، بیشینه ی جابجایی و نیروی کنترل سیستم فعال را افزایش می دهد و این همراه با کاهش کارایی سیستم کنترل است. اما با افزایش میرایی سازه در یک تأخیر زمانی ثابت در حالی که کارایی سیستم کنترل فعال نیز افزایش یافته است، در مقادیر بیشینه ی جابجایی و نیروی کنترل، کاهش قابل ملاحظه یی مشاهده می شود. برای نمونه در قیاس دو حالت میرایی ۲/۴۹ و ۱۲/۴۵ درصد برای تأخیرهای زمانی ۰/۱۱ و ۰/۱۵ ثانیه، کاهش بیشینه ی تغییر مکان AMD به ترتیب برابر ۴۲ و ۵۱ درصد است.

جدول ۷. بیشینه ی نیروی کنترل (kN) با میرایی مختلف در تأخیرهای زمانی متفاوت.

میرایی (%)			
۱۲/۴۵	۷/۴۷	۲/۴۹	
۴۵۸	۵۱۵	۶۲۳	بدون تأخیر زمانی
۸۷۶	۱۰۶۶	۱۳۵۵	۰/۱۱ ثانیه تأخیر زمانی
۱۰۷۹	۱۶۰۸	۲۷۶۱	۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی

جدول ۸. بیشینه ی جابجایی AMD (m) با میرایی مختلف در تأخیرهای زمانی متفاوت.

میرایی (%)			
۱۲/۴۵	۷/۴۷	۲/۴۹	
۰/۸۶	۱/۰۷	۱/۳۵	بدون تأخیر زمانی
۰/۹۵	۱/۱۸	۱/۵	۰/۱۱ ثانیه تأخیر زمانی
۱/۲۸	۱/۷۶	۲/۶۲	۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی

با توجه به نتایج جدول ۵ و همچنین عدم حساسیت سازه به مشخصه های بار ورودی، می توان نتیجه گرفت که حساسیت نسبت به تأخیر زمانی به مشخصات سازه و سیستم کنترلی آن مربوط می شود. بدین ترتیب می توان میزان حساسیت سیستم به تأخیر زمانی را کمتری از دوره ی تناوب مود اول ارتعاشی سازه برآورد کرد. با توجه به نتایج جدول ۵، این ضریب می تواند عددی بین ۶ تا ۷ باشد، اما بررسی های جامع تری را می طلبد.

۵. کنترل فعال سیستم با افزایش میرایی

در بخش های پیشین مشاهده شد که با افزایش تأخیر زمانی، کارایی سیستم کنترل فعال کاهش می یابد و در مقداری که آن را تأخیر زمانی بحرانی نامیدیم، سازه به ناپایداری می رسد. در این بخش برای مهار اثر ناشی از تأخیر زمانی در سازه یی که سیستم کنترلی آن با کاهش کارایی مواجه شده است، تغییر میرایی سازه بررسی شده است. یک سیستم میرایی غیرفعال به گونه یی به سازه افزوده شده است که قدرت جذب انرژی سازه افزایش یابد، بدون اینکه تغییری در سختی سازه رخ دهد. به این ترتیب میرایی های مختلفی برای مود اول سازه قابل تعریف شدن است در حالی که خصوصیات سیستم کنترل از جمله میرایی آن ثابت نگه داشته شده است. در ادامه، مجدداً تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر تأخیر زمانی انجام پذیرفت. مقدار میرایی های مورد بررسی برای مود اول ارتعاش سازه به ترتیب ۲/۴۹، ۷/۴۷ و ۱۲/۴۵ درصد است.

۱.۵. مقادیر تأخیر زمانی بحرانی

تحلیل های حساسیت مقادیر تأخیر زمانی را به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۱۷ و ۰/۱۸ ثانیه برآورد کرده است. به عبارت دیگر افزایش میرایی تأثیر قابل ملاحظه یی بر مهار اثر ناپایداری ناشی از تأخیر زمانی نداشته است. این مسئله به نوعی دیگر می تواند وابستگی تأخیر زمانی بحرانی به دوره ی تناوب اصلی سازه را نشان دهد، چرا که ماتریس های وزن و مشخصه های بسامد نامیرای سیستم سازه یی تغییری نداشته اند.

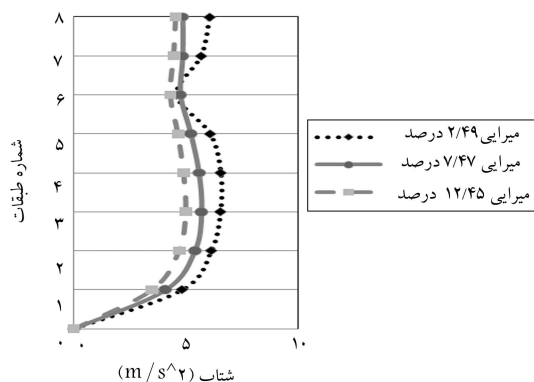
۲.۵. برش پایه

مقادیر بیشینه ی برش پایه برای سه مقدار متفاوت میرایی با وجود تأخیرهای زمانی در حلقه ی کنترل فعال به دست آمده است (جدول ۶).

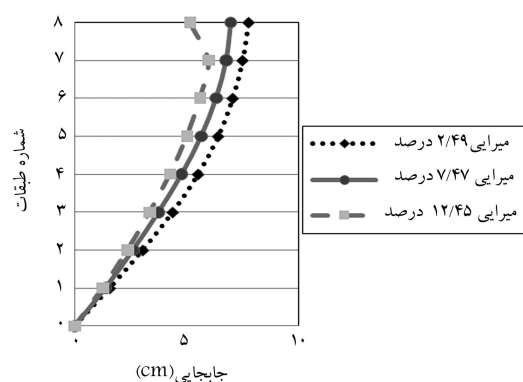
نتایج جدول ۶ نشان می دهد که افزایش میرایی مود اول سازه نه فقط توانسته اثرات ناشی از تأخیر زمانی را جبران کند، بلکه موفق به کاهش برش

جدول ۶. بیشینه ی برش پایه (kN) با میرایی های مختلف در تأخیرهای زمانی متفاوت.

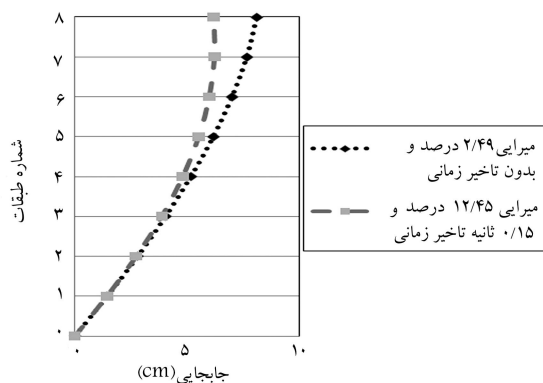
میرایی (%)			
۱۲/۴۵	۷/۴۷	۲/۴۹	
۴۱۳۱	۴۴۸۵	۴۸۸۸	بدون تأخیر زمانی
۴۲۱۰	۴۶۶۴	۵۳۲۰	۰/۱۱ ثانیه تأخیر زمانی
۴۸۶۶	۵۹۹۸	۸۳۹۴	۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی



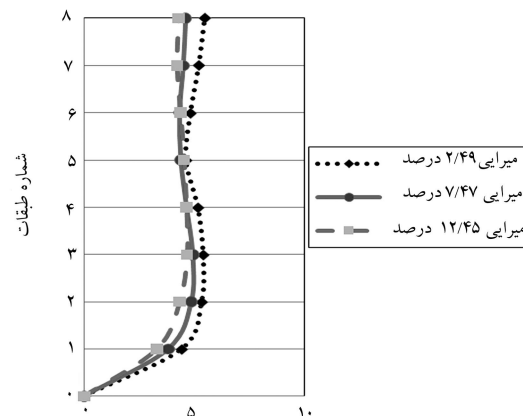
شکل ۶. بیشینه‌ی شتاب طبقات در حالت تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه.



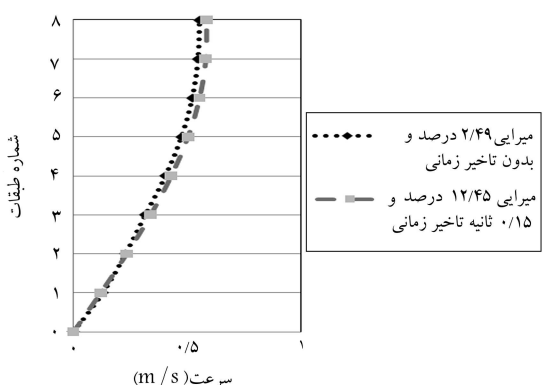
شکل ۷. بیشینه‌ی جابجایی طبقات در حالت تأخیر زمانی ۰/۱۱ ثانیه.



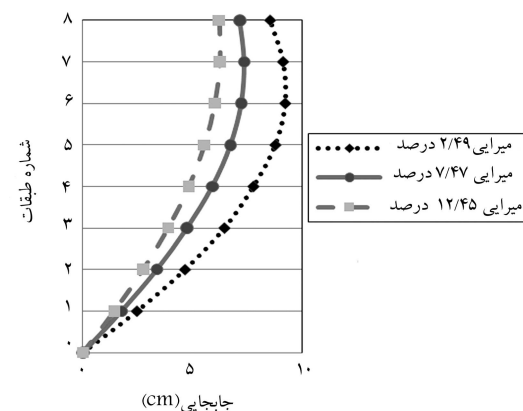
شکل ۱۱. مقایسه‌ی بیشینه‌ی جابجایی طبقات بین سازه‌ی نامیرایی اولیه و بدون تأخیر زمانی با سازه‌ی با میرایی ۱۲/۴۵٪ و ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی.



شکل ۸. بیشینه‌ی شتاب طبقات در حالت تأخیر زمانی ۰/۱۱ ثانیه.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی بیشینه‌ی سرعت طبقات بین سازه‌ی نامیرایی اولیه و بدون تأخیر زمانی با سازه‌ی با میرایی ۱۲/۴۵٪ و ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی.



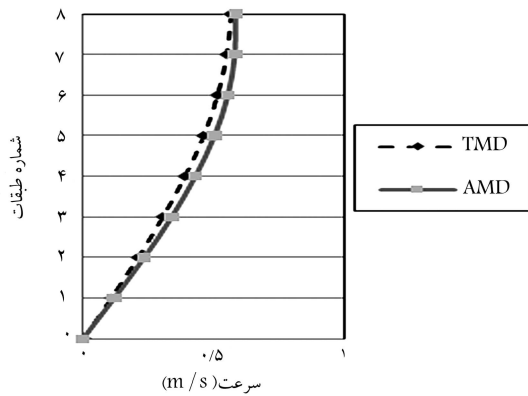
شکل ۹. بیشینه‌ی جابجایی طبقات در حالت تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه.

کارایی سیستم کنترل بسیار ضعیف شده است، افزایش میرایی هم در کنترل جابجایی طبقات (شکل ۹)، و هم در کنترل شتاب طبقات (شکل ۱۰)، بسیار مؤثر عمل کرده است.

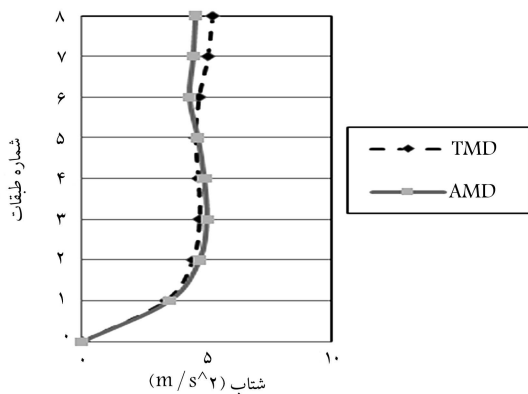
در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، پاسخ‌های بیشینه‌ی تغییر مکان، سرعت، و شتاب طبقات سازه برای حالت ایده‌آل یک سیستم کنترلی بدون تأخیر زمانی در مقایسه با حالت سازه با نسبت میرایی مود اول ۱۲/۴۵٪ و ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی که بیشینه‌ی تأخیر زمانی ممکن و مرز واگرایی سیستم اولیه است، مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیستم کنترلی با بیشینه‌ی تأخیر زمانی ممکن با

۴.۵. پاسخ طبقات سازه

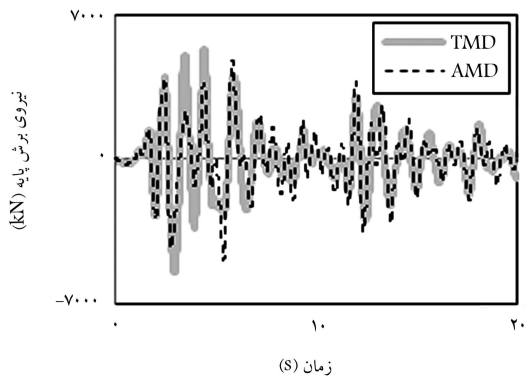
در این قسمت، بیشینه‌ی تغییر مکان و شتاب طبقات سازه در تأخیرهای زمانی ۰/۱۱ و ۰/۱۵ ثانیه با میرایی‌های متفاوت، در شکل‌های ۷ الی ۱۰ آورده شده است. در شکل ۷، بیشینه‌ی جابجایی در تأخیر زمانی ۰/۱۱ ثانیه به ازای میرایی‌های مختلف مود اول سازه ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش میرایی کارایی سیستم کنترلی در کاهش جابجایی طبقات قابل‌ملاحظه است. اما همین تأثیر در شتاب طبقات در شکل ۸ مشاهده نمی‌شود. اما در تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه که



شکل ۱۵. مقایسه‌ی سرعت طبقات: کنترل فعال با تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه با میرایی ۱۲/۴۵٪ (AMD)، و کنترل غیر فعال با میرایی ۱۲/۴۵٪ (TMD).



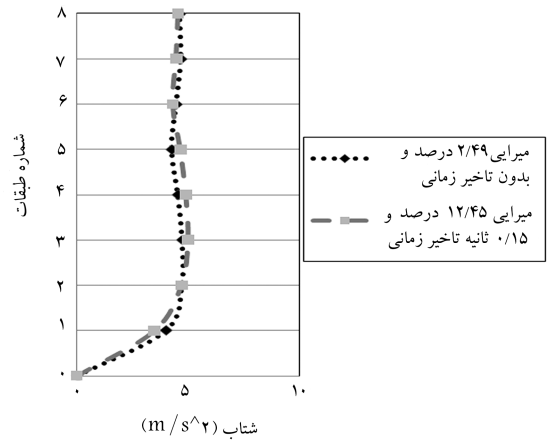
شکل ۱۶. مقایسه‌ی شتاب طبقات: کنترل فعال با تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه با میرایی ۱۲/۴۵٪ (AMD)، و کنترل غیر فعال با میرایی ۱۲/۴۵٪ (TMD).



شکل ۱۷. مقایسه‌ی نیروی برش پایه‌ی سیستم کنترل فعال با ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی (AMD) و میرایی ۱۲/۴۵٪ با سیستم کنترلی غیر فعال و میرایی ۱۲/۴۵٪ (TMD).

۶. نتیجه‌گیری

حساسیت سیستم‌های کنترل فعال سازه‌یی به تأخیر زمانی در اعمال نیروی کنترلی به سازه، به ۳ بازه تقسیم می‌شود: ۱. بازه‌ی عدم حساسیت سیستم، ۲. تشدید حساسیت سیستم با افزایش تأخیر زمانی، و ۳. مرز ناپایداری سیستم. ارزیابی‌ها برای یک سازه‌ی خاص نشان داده است که مقدار تأخیر زمانی بحرانی، که مرز ناپایداری

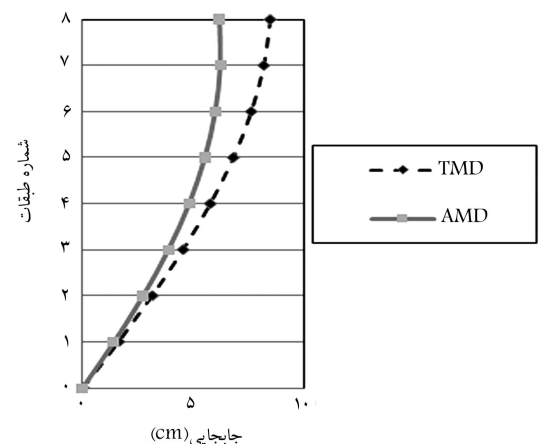


شکل ۱۳. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب طبقات بین سازه‌ی نامیرایی اولیه و بدون تأخیر زمانی با سازه‌ی با میرایی ۱۲/۴۵٪ و ۰/۱۵ ثانیه تأخیر زمانی.

افزایش میرایی سیستم، پاسخ‌های بهتری را نسبت به سیستم اولیه و بدون تأخیر زمانی تجربه می‌کند.

۵.۵. مقایسه‌ی سیستم‌های کنترل فعال و غیر فعال

در این قسمت با ثابت نگه‌داشتن نسبت میرایی در مود اول سازه روی مقدار ۱۲/۴۵٪، کارایی یک سیستم فعال با بیشترین مقدار تأخیر زمانی با همان سیستم هنگامی که به صورت غیر فعال عمل کند، مقایسه و ارزیابی شده است. در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶، مقایسه‌ی بیشینه‌ی پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب سازه‌ی کنترل شده و در شکل ۱۷، تاریخچه‌ی زمانی برش پایه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که سیستم کنترل فعال با وجود تأخیر زمانی بحرانی که عملکرد آن را به شدت کاهش داده است، در مهار جابجایی طبقات بهتر از سیستم کنترل غیر فعال مشابه کار کرده است. این بدان معنی است که می‌توان سیستم‌های کنترل فعالی که درست طراحی شده‌اند اما به دلیل وجود تأخیر زمانی کارایی خود را از دست داده‌اند، را به دو صورت با کارآمدی مجدد کرد: خاموش کردن نیروی کنترل و استفاده از آن‌ها به صورت یک سیستم جرم میراگر تنظیمی، یا افزودن میرایی مود اول آن‌ها.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی تغییر مکان طبقات: کنترل فعال با تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه با میرایی ۱۲/۴۵٪ (AMD) و کنترل غیر فعال با میرایی ۱۲/۴۵٪ (TMD).

شد. ارزیابی‌ها نشان دادند هر چه تأخیر زمانی بیشتر باشد، میزان تأثیرگذاری افزایش نسبت میرایی مدی سازه نیز بیشتر است. هم‌چنین نشان داده شد که افزایش میرایی حتی در حالت تأخیر زمانی بحرانی نیز می‌تواند کاهش بازدهی سیستم کنترل فعال را کاملاً جبران کند. اما این تصور نیز وجود دارد که می‌توان ماتریس‌های وزن پایداری برای محاسبه‌ی نیروی کنترل یافت که نسبت به تأخیر زمانی ذاتی سازه‌ی کنترل شده حساس نباشند.

سیستم را تعیین می‌کند، از بارهای لرزه‌یی و تغییرات میرایی مود اول سازه تأثیر نمی‌پذیرد و می‌تواند به صورت ضریبی از دوره‌ی تناوب مود اول سازه‌ی کنترل شده در نظر گرفته شود. در این تحقیق ضریب $\frac{1}{\rho}$ الی $\frac{1}{\rho}$ به عنوان ضریبی از دوره تناوب مود اول برآورد شده است. البته نیاز به پژوهش‌های بیشتر توصیه می‌شود. در ادامه، برای مهارکاهش کارایی سیستم کنترل فعال که به دلیل تأخیر زمانی قابل ملاحظه در مرز ناپایداری قرار گرفته است از سیستم‌های میرایی غیرفعال استفاده

منابع (References)

1. Soong, T.T. "Active structural control in civil engineering", *Eng. Structures*, **10**, pp. 74-84 (1988).
2. Yang, J.N., Akbarpour, A. and Askar, G. "Effect of time delay on control on seismic-excited buildings", *J. of Structural Eng.*, **116**(10), pp. 2801-2814 (1990).
3. Soong, T.T., *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific, Essex, U.K. (1990).
4. Phohomsiri, P., Udwadia, F.E. and Von Bremen, F.H. "Time-delayed positive velocity feedback control design for active control of structures", *J. of Eng. Mechanics*, **132**(6), pp. 690-703 (2006).
5. Bahar, O., Mahzoon, M., Banan, M.R. and Kitagawa, Y. "Discrete instantaneous optimal control method", *Iranian J. of Science & Technology*, Transaction B., **28**(B1), pp. 9-20 (2004).
6. Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghmi, P. "Optimal control algorithms for earthquake-excited buildings", *Structural Control*, Leipholz, Ed., Publisher Springer Netherlands, pp. 748-761 (1985).

EFFECT OF DAMPING ON SENSITIVITY REDUCTION OF ACTIVE STRUCTURAL CONTROL TO TIME DELAY

B. Rajabi

behrooz.rajabi@iausaghez.ac.ir

Saghez Branch, Islamic Azad University

O. Bahar (corresponding author)

omidbahar@iiees.ac.ir

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 99-106, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 15 February 2011; received in revised form 24 July 2011; accepted 31 December 2011.

Abstract

Time delay is a major problem in active structural control, which may lead to an inactive control performance or even result in instability of the whole structure. Sensitivity of structures to time delay may refer to characteristics of the building, the control system, and/or external loadings. If a control system is designed based on the ideal parameters of the building and control mechanism, it may be inefficient, because it does not take note of the practical problems encountered in reality. But, if a control system is perfectly designed, it may suffer from some changes in structure and/or control parameters. Hence, time delay may always affect the performance of a controlled structure. In this paper, in order to evaluate the influence of this effect, sensitivity analysis of an eight-story model building, with respect to time delay, is carried out. The control system is an active mass damper/driver (AMD) installed on the top floor. The control algorithm is the discrete instantaneous optimal control (DIOC) method, previously presented by the second author. This algorithm is powered using stable matrices to overcome the time step problems that the instantaneous optimal control methods confront.

First, a critical time delay is recognized, in which the controlled structure is unstable. By changing input excitation (strong ground motion), the effect of input seismic load on critical time delay is examined. Using different earthquake loads: El Centro, Parkfield, and San Fernando, results in the same critical time delay for the mentioned buildings. Then, the stiffness of the building stories are increased without changing the mass of the floors. It is recognized that there is a relation between critical time delay and the first period of the controlled building. The proposed coefficient is about $\frac{1}{7}$ to $\frac{1}{6}$ of the fundamental period of the controlled building.

Second, by introducing passive dampers in such a manner that the capacity of the energy absorption of the building is increased without increasing its stiffness, crit-

ical time delay is evaluated, again. There is no change in critical time delay, but extensive results show that increasing damping to a large extent may alleviate the sensitivity of the controlled building to time delay. In other words, increasing the damping of the first mode of the controlled building may extensively increase the efficiency of the control system. Hence, this may be a good solution for older active control buildings, which suffer from time delay effects.

Key Words: Active control, time delay, passive damping, control algorithm, stability, discrete instantaneous optimal control, DIOC.