



عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه فعال در حفاظت لرزه ای تجهیزات حساس با استفاده از الگوریتم سختی منفی

محسن تهرانی‌زاده^۱، تورج تقی‌خانی^۲، آرش امان‌پور^{۳*}

۱، ۲، ۳- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*arash_amanpour@aut.ac.ir

خلاصه

یکی از مفیدترین راه‌های کنترل و کاهش ارتعاشات سازه، به کارگیری سیستم‌های جداسازی لرزه ای می باشد. برای افزایش کارایی جداسازهای لرزه ای می توان با استفاده از روش‌های کنترلی مختلف پارامترهای جداساز لرزه ای را تحت کنترل در آورده و با بهینه سازی آنها بهترین پاسخ را برای سیستم بدست آورد. برای هر یک از روش‌های کنترلی الگوریتم‌های مختلفی پیشنهاد شده که در این تحقیق از الگوریتم سختی منفی استفاده شده است. در واقع نتایج بدست آمده حکایت از قابلیت ممتاز به کارگیری این نوع سیستمها و الگوریتم به کار رفته در حفاظت دستگاه‌های حساس از جمله کنترل پاسخ شتاب دستگاه و جابجایی نسبی آن دارد.

کلمات کلیدی: جداسازی لرزه‌ای، کنترل نیمه فعال، الگوریتم LQR، الگوریتم PNS، میراگر

مقدمه

در عرض ۳۰ سال، جداسازی لرزه‌ای از یک مفهوم ریاضی به کاربرد گسترده در عمل تبدیل شده است [1]. امروزه جداسازی لرزه‌ای یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش خطر در برابر زلزله‌های قوی است. مکانیزم عمل اصلی سیستم جداساز دو قسمت است: اول؛ افزایش زمان تناوب اصلی سازه و دوم؛ میرایی اضافی ایجاد شده برای استهلاک انرژی زلزله [2]. در زلزله‌های حوزه نزدیک و از نوع پالس سرعت بالا، افزایش در تغییر مکان تکیه‌گاه غیرمطلوب است [3,4,5]. برای کاهش تغییر مکان بزرگ جداساز لرزه‌ای در مود اصلی، از جداساز غیر خطی از قبیل تکیه‌گاه لاستیکی-سربی، پاندول اصطکاکی و یا تکیه‌گاه لاستیکی با میرایی بالا استفاده می‌شود. مزیت این تجهیزات در کاهش نیروهای لرزه‌ای و ظرفیت میرایی کافی بطور همزمان در یک دستگاه است. اگرچه، نیروهایی را به سازه وارد می‌کند که شتاب سازه و تغییر مکان را در مودهای بالاتر افزایش می‌دهد و ممکن است تغییر مکان بین طبقه‌ای را افزایش دهد [6]. بنابراین، نیاز برای سیستم جداساز لرزه‌ای هوشمند جدید که بتواند سریعاً تنظیم شده و بازه وسیعی از حرکت حوزه نزدیک تا دور را بطور مؤثر و سالم فیلتر کند، الزامی است. این سیستمها از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای که از میراگرهای قابل کنترل فعال و نیمه‌فعال استفاده می‌کنند، تشکیل شده‌اند. سیستم جداساز غیرفعال دارای قابلیت محدود در تطبیق با تغییرات پاسخ سازه‌ای تحت زلزله است. همچنین، این سیستم تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب مطلق سازه را به هزینه افزایش تغییر مکان پایه کاهش می‌دهد. سیستم کنترل هم قادر به کاهش تغییر مکان بین طبقه‌ای و هم تغییر مکان پایه ماکزیمم است [7].

ارتعاش لرزه‌ای ممکن است منجر به خسارت به تجهیزات حساس در اثر تنش‌های بزرگ در اعضای آن گردد. بخصوص، اگر این تجهیزات در عملیات نجات بعد از زلزله نقش حیاتی داشته باشند، تبعات جانی و مالی آن بیشتر از خسارت خود آن خواهد شد که می‌توان به تجهیزات بیمارستانها و مراکز مخابراتی اشاره کرد. استراتژی سنتی کاهش خسارت عبارت از مهار جانی یا مهار به کف طبقه برای افزودن مقاومت تجهیزات در برابر ارتعاشات است ولی در واقع این روشها مسیر را بر وارد کردن شوک خسارت و ارتعاش بر این تجهیزات هموار می‌کنند. اتصالات هرچه صلب‌تر باشد، احتمال خسارت بر اعضای ترد و شکننده از قبیل لیزرهای نوری و ... بیشتر می‌شود. اخیراً، هدف عملکرد مطلوب "عملکرد بدون وقفه" تجهیزات حساس، مهندسی‌ن را مجبور به اتخاذ یک روش غیر معمول برای حفاظت این سیستم کرده است. جداسازی لرزه‌ای یکی از روشهایی است که پتانسیل زیادی برای نایل شدن به این اهداف عملکرد دارا می‌باشد [8].

1 استاد

2 استادیار

3 دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله



جستجو برای توسعه سیستم جداساز که برای بازه وسیعی از تحریکات زمین مؤثر باشد، منجر به تحقیقات تعدادی از محققین روی سیستمهای مرکب شده است [9, 10, 11]. از مزایای سیستم جداساز مرکب به عملکرد بالا در کاهش ارتعاشات، توانایی تطابق با شرایط بارگذاری مختلف، کنترل چندین مد ارتعاشی سازه و غیره می توان اشاره کرد.

هدف عمده از کنترل سازه های عمران حداقل کردن خسارت است، که بصورت حداقل کردن مقدار تغییر مکان نسبی بین طبقه های بمنظور کاهش خسارت سازه های دائمی تفسیر می شود. در نتیجه، قسمت اعظم تحقیقات قبلی روی روشها و تحلیل آنها متمرکز شده است. با توجه باینکه خسارت داخلی و ایمنی ساکنین تقریباً متناسب با شتاب طبقه است، انتخاب استاندارد عملکرد مناسب آسان نیست [12]. مخصوصاً، ارتباط بین شتاب و تغییر شکل دائمی بعد از زلزله، بویژه برای زلزله های حوزه نزدیک که دارای مشخصه پالس بزرگ در شتاب زمین هستند، مسیر کاملاً متفاوتی برای مدیریت پاسخ سازه ایجاد کرده است.

پالسهای بزرگ موجود در زلزله های حوزه نزدیک با یک یا دو تغییر ناگهانی بزرگ در شتاب زمین مشخص شده و منجر به تغییر شکل دائمی قابل توجه و خسارت سازه های می شود. با توجه باینکه روش کنترل سازه بر اساس تغییر مکان می تواند منجر به شتاب طبقه حداکثر بزرگتر شود، توانایی کنترل شتاب کلی و بویژه نرخ تغییرات آن برای کاهش خسارت و مدیریت پاسخ مهم است [13]. همچنین، روش کنترل سازه بر اساس تغییر مکان، متمرکز بر مدیریت رفتار ارتعاشی معمول زلزله های حوزه دور برای زلزله های حوزه نزدیک از کارایی کمتری برخوردار هستند.

در این کار تحقیقی شتابنگاشت زلزله السنترو (Elcentro) بعنوان زلزله حوزه دور و شتابنگاشت زلزله کوبه (Kobe) بعنوان زلزله حوزه نزدیک انتخاب شده است و از مدل آزمایشگاهی Yoshioka و همکارانش برای تحلیل نتایج با استفاده از الگوریتم LQR استفاده شده است.

کنترل نیروی بهینه LQR

معادله حرکت یک سیستم سازه ای که در معرض زلزله قرار می گیرد، در فضای حالت بصورت معادله حالت در رابطه (۱) بیان می شود.

$$\dot{x} = Ax + Bu + E\ddot{x}_g \quad (1)$$

x : بردار حالت

u : نیروی کنترل

\ddot{x}_g : شتابنگاشت وارده به سیستم

A : بردار حالت

B : بردار مکان کنترلگر

E : بردار مکان نیروی خارجی

الگوریتم LQR برای هر دو نوع کنترل فعال و نیمه فعال قابل استفاده است. با کمک این الگوریتم نیروی کنترل بهینه ($u_{optimal}$) با حداقل کردن شاخص عملکرد در رابطه (۲) حاصل می شود.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (\{x\}^T [Q] \{x\} + \{u\}^T [R] \{u\}) dt \quad (2)$$

که $[Q]$ و $[R]$ ماتریسهای وزنی هستند و مقادیر آنها بستگی به اهمیت نسبی عبارات مختلف در سهم آنها از شاخص عملکرد J دارد. مقادیر بزرگ ماتریس $[Q]$ نشان دهنده خواسته ما برای نزدیک بودن بردار حالت به مبدأ در طول زمان دارد که حالت غیر اقتصادی است، در حالیکه مقادیر بزرگ ماتریس $[R]$ بر تأثیر کم کنترل دلالت دارد [14].

در الگوریتم کنترل LQR، نیروی کنترل بهینه ($u_{optimal}$) بصورت نیروی تقاضا در نظر گرفته می شود و میراگر با توجه به قیود، طوری کنترل می شود که تا حد ممکن نزدیک به نیروی تقاضا باشد و پارامترهای بهره کنترل بر اساس شبیه سازی عددی با توجه به ظرفیت میراگر تعیین می شود. راه حل بهینه برای حداقل کردن شاخص عملکرد در رابطه (۲) در رابطه (۳) آورده شده است [15].

$$\{u_{optimal}(t)\} = [G] \{x(t)\} = -[R]^{-1} [B]^T [P] \{x(t)\} \quad (3)$$

که $x(t)$ بردار حالت سیستم و $[G]$ ماتریس بهره بهینه است که با حل معادله کلاسیک ریگاتی بدست می‌آید:

$$[P][A] + [A]^T [P] - [P][B][R]^{-1}[B]^T [P] + [Q] = 0 \quad (۴)$$

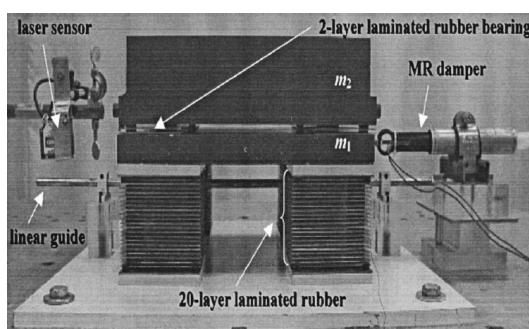
با جایگذاری (۳) در (۱) رفتار سازه کنترل بهینه شده توسط رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\{\dot{x}\} = ([A] + [B][G])\{x\} + \{E\}\ddot{x}_g \quad (۵)$$

همانطور که از معادله (۵) مشاهده می‌شود در اثر کنترل مدار بسته LQR یکی از خصوصیات سازه اصلاح می‌شود، بطوریکه ماتریس سیستم از $[A]$ (سیستم مدار باز) به $[A] + [B][G]$ (سیستم مدار بسته) تغییر می‌یابد [14].

مدل مطالعاتی

در این تحقیق از مدلی که Yoshioka و همکاران در زمینه جداسازی لرزه‌ای هوشمند در آزمایشگاه بررسی کرده‌اند، استفاده شده است [16]. بدین ترتیب که مدل آزمایشگاهی آنها بعنوان مدل مطالعاتی انتخاب شده و الگوریتم LQR بعنوان روشی از کنترل بهره برای کنترل این مدل استفاده شده است. در این کار محدودیت نیروی میراگر و همچنین اثر تأخیر زمانی در نظر گرفته نشده است. شکل (۱) مدل آزمایشگاهی را که Yoshioka و همکاران در آزمایشگاه استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهد.



شکل ۱ - نمونه مدل آزمایشی Yoshioka و همکاران [16]

مدل نشان داده شده در شکل (۱) یک مدل دو درجه آزادی است که روی تکیه‌گاه LRB قرار گرفته است. این مدل، مدل آزمایشگاهی یک سازه پنج درجه آزادی با دوره تناوب ۲ ثانیه است. جرم اول $(m_1 = 10.5 \text{ kg})$ متناظر با جرم سیستم جداساز لرزه‌ای است و جرم دوم $(m_2 = 57.5 \text{ kg})$ متناظر با جرم مدی اول روسازه است. سیستم LRB زیر جرم m_1 شامل بیست لایه است که هر لایه شامل سه صفحه نئوپرین به ارتفاع ۰٫۳ سانتیمتر و قطر ۱٫۱ سانتیمتر است. این سیستم در چهار گوشه سازه در پلان قرار گرفته است. مدول برشی لاستیک نئوپرین 0.11 N/mm^2 است. نسبت تشابهی بین مدل و سازه واقعی در مقیاس زمان، جرم و طول برابر است با:

$$\alpha = t' / t$$

$$\beta = m' / m$$

$$\gamma = x' / x$$

t, m, x بترتیب زمان، جرم و طول در سازه واقعی و t', m', x' بترتیب زمان، جرم و طول در مدل آزمایشگاهی هستند.

مدل ریاضی برای تحلیل

یک مدل دو درجه آزادی بمنظور طرح کنترل در نظر گرفته شده است. رفتار سازه و تکیه‌گاه جداسازی شده، هر دو خطی فرض شده است. نمایش

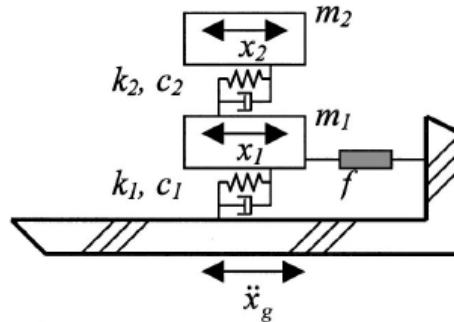


معادلات حرکت در فضای حالت برای سیستم جداسازی لرزه‌ای در شکل (۲) نشان شده است.

$$\dot{X} = AX + Bu + E\ddot{x}_g \quad (۶)$$

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2]^T$$

که x_1 و x_2 به ترتیب تغییر مکان پی و سازه نسبت به زمین، u و \ddot{x}_g نیروی کنترل اعمالی میراگر و شتاب زمین، m_1 ، m_2 ، k_1 ، k_2 ، c_1 و c_2 جرم، سختی و ضریب میرایی برای پی و سازه است.



شکل ۲- نمایش فضای حالت مدل

$$A = \begin{pmatrix} [0] & [I] \\ -\begin{bmatrix} \omega_1^2 + \omega_2^2 \mu & -\omega_2^2 \mu \\ -\omega_2^2 & \omega_2^2 \end{bmatrix} & -\begin{bmatrix} 2\zeta_1 \omega_1 + 2\zeta_2 \omega_2 \mu & -2\zeta_2 \omega_2 \mu \\ -2\zeta_2 \omega_2 & 2\zeta_2 \omega_2 \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 1/m_1 \quad 0]^T$$

$$E = [0 \quad 0 \quad -1 \quad -1]^T \quad (۷)$$

$$\mu = \frac{m_2}{m_1}, \quad \omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}, \quad \omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad 2\zeta_1 \omega_1 = \frac{c_1}{m_1}, \quad 2\zeta_2 \omega_2 = \frac{c_2}{m_2}$$

جدول ۱- نسبت تشابهی در مدل آزمایشگاهی

نسبت تشابهی	نمونه واقعی	مدل آزمایشگاهی	
$\alpha=1/3$	۳	۱	زمان
$\gamma=1/20,4$	۲۰,۴	۱	تغییر مکان
γ/α	۶,۸	۱	سرعت
γ/α^2	۲,۷۷	۱	شتاب
$1/\alpha$	۰,۴۷۳۲	۱,۴۱۹۷	فرکانس مُد اول (Hz)
$1/\alpha$	۳,۸۸۳۳	۱۱,۶۵	فرکانس مُد دوم (Hz)
۱	۱,۵۱	۱,۵۱	(%) میرایی مُد اول
۱	۲,۹۹	۲,۹۹	(%) میرایی مُد دوم
$\beta=0,0001$	۱۰۵۰۰۰	۱۰,۵	جرم پی m_1 (kg)
$\beta=0,0001$	۵۷۵۰۰۰	۵۷,۵	جرم سازه m_2 (kg)
$\beta=0,0001$	۶۸۰۰۰۰	۶۸	(kg) $m=m_1+m_2$



الگوریتم سختی منفی

الگوریتم کنترل سختی منفی توسط Pradono و Iemura در سال ۲۰۰۵ بعنوان یک روش عددی ساده جایگزین الگوریتم LQR پیشنهاد شده است. آنها یک نیروی کنترل ساده u_d را پیشنهاد کردند که تنها تابع تغییر مکان نسبی و سرعت دستگاه کنترل است. بنابراین، برخلاف کنترل LQR که الگوریتم کنترل متمرکز است، این الگوریتم پیشنهادی غیر متمرکز بوده و تنها به حالت دستگاه نیاز دارد.

$$u_d = K_d x + C_d \dot{x} \quad (8)$$

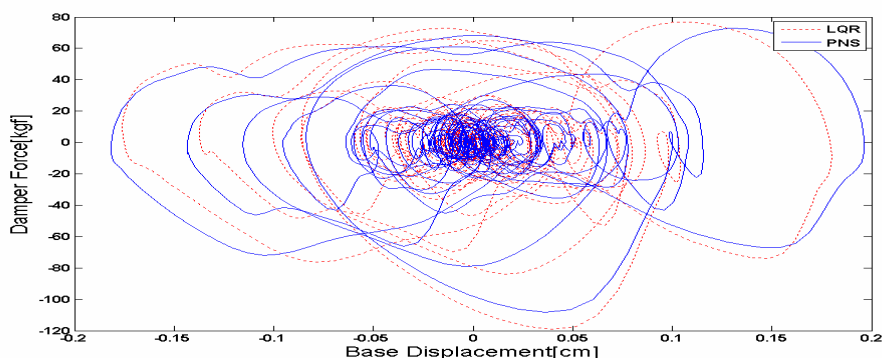
این الگوریتم ساده، الگوریتم کنترل سختی منفی و یا PNS نامیده شده است که K_d مقدار سختی منفی انتخاب شده و C_d ضریب میرایی انتخاب شده و x جابجایی میراگر است. پارامترهای K_d و C_d طوری تنظیم می‌شوند که حلقه‌های هیستریزیس الگوریتم جدید، حلقه‌های هیستریزیس LQR را دنبال کند.

در این مطالعه K_d و C_d توسط الگوریتم ژنتیک بدست می‌آید. در الگوریتم ژنتیک K_d و C_d طوری تعیین می‌شوند که اختلاف بین مساحت حلقه‌های هیستریزیس LQR و PNS حداقل شود.

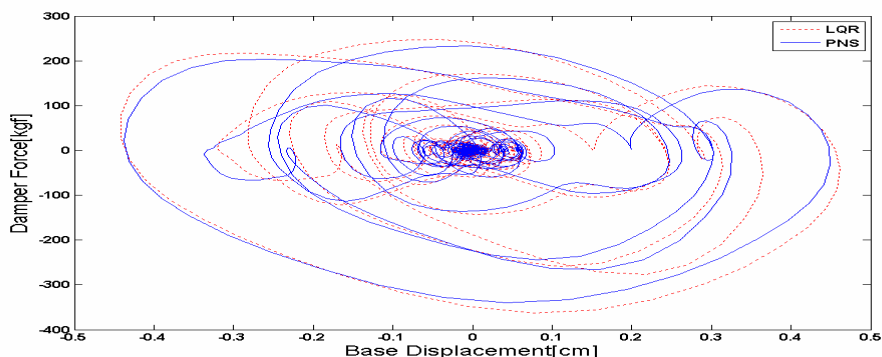
جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک برنامه Matlab برای حل K_d و C_d برای پیدا کردن دقیقترین تقریب عددی الگوریتم LQR استفاده شده است. بهترین نتیجه که دقیق بوده و جوابگوی هر دو نوع زلزله باشد عبارت است از:

$$K_d \approx 0 \text{ و } C_d \approx 383$$

در شکل‌های (۳) و (۴) حلقه‌های هیستریزیس سیستمهای کنترل شده با الگوریتم LQR و PNS نشان داده شده است. در هر دو زلزله، الگوریتم ساده PNS حلقه هیستریزیس LQR را با دقت خوبی دنبال می‌کند. در زلزله‌های سنترو و کوبه سطح حلقه هیستریزیس الگوریتم PNS بترتیب ۹۶٪ و ۹۵٪ نزدیک به الگوریتم LQR است.



شکل ۳- حلقه هیستریزیس سیستم برای زلزله سنترو

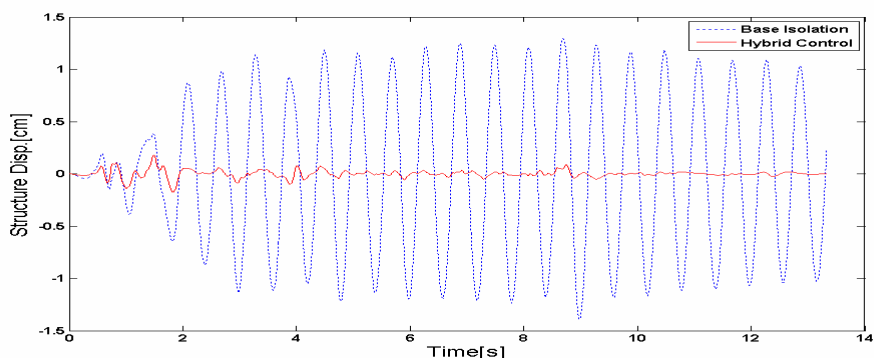


شکل ۴- حلقه هیستریزیس سیستم برای زلزله کوبه

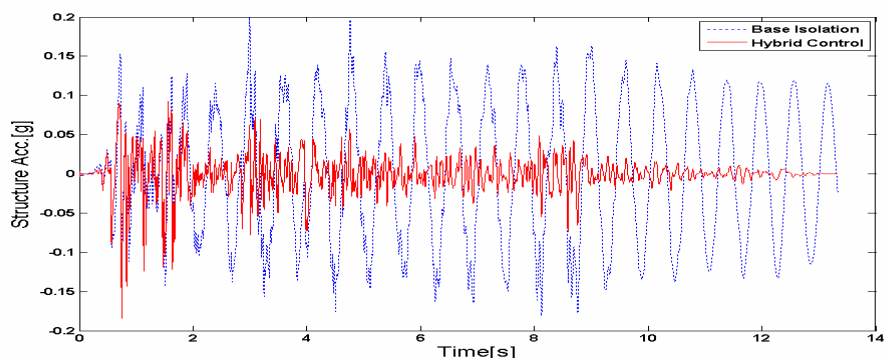


شبیه سازی عددی

در این مطالعه شتابنگاشت سنترو و کوبه برای مدل سازی دینامیکی استفاده شده است. شتابنگاشت سنترو بعنوان زلزله حوزه دور و شتابنگاشت کوبه بعنوان زلزله حوزه نزدیک انتخاب شده اند. سیستم جداسازی لرزه ای با ایجاد طبقه نرم باعث افزایش دوره تناوب سیستم شده و مود اول، مود غالب می شود. مدل شامل دو درجه آزادی است و سیستم جداساز لرزه ای در پایه طبقه نرم ایجاد کرده و باعث می شود تغییر مکان سازه نزدیک به تغییر مکان پایه شود یعنی سازه نسبت به پایه حرکت تقریباً صلیبی خواهد داشت. بنابراین، در سیستم جداسازی لرزه ای، سازه تحت تأثیر نیروی کمی خواهد بود که باعث تنشهای کم در اعضای سازه خواهد شد. ولی در سیستم جداساز لرزه ای تغییر مکان پایه بزرگ است بنابراین، برای ارتقای عملکرد سیستم جداساز لرزه ای کنترل فعال نیز در پایه مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین، ترکیب سیستم جداساز لرزه ای و کنترل فعال که کنترل مرکب نامیده می شود برای کاهش نیروی انتقالی زلزله به سازه تغییر مکان سازه مورد مطالعه قرار گرفت. الگوریتم سختی منفی (PNS) بعنوان الگوریتم کنترل در این مطالعه استفاده شده است.

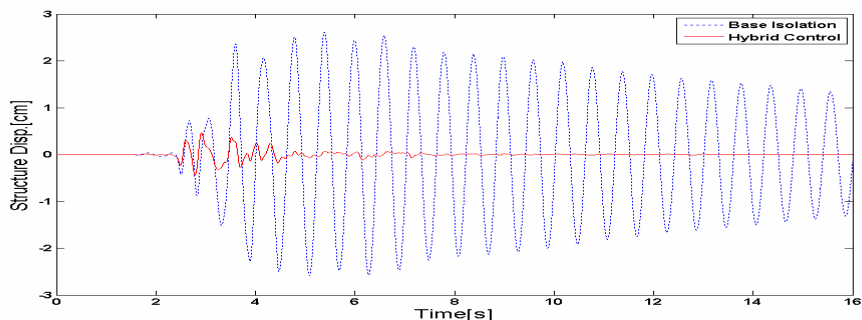


شکل ۵- پاسخ تغییر مکان سیستم برای زلزله سنترو

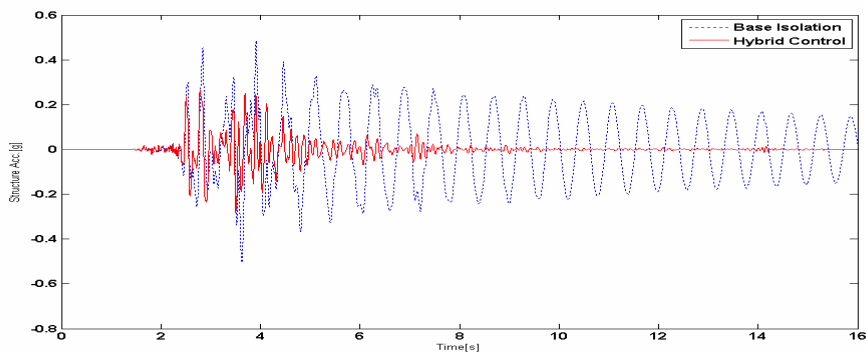


شکل ۶- پاسخ شتاب سیستم برای زلزله سنترو

در شکل (۵) نشان داده شده است که سیستم کنترل فعال قادر به کاهش قابل توجه تغییر مکان سیستم جداساز لرزه ای است بنابراین، کنترل فعال می تواند عملکرد سیستم جداساز لرزه ای را ارتقا دهد. برای زلزله سنترو بعنوان زلزله حوزه دور، تغییر مکان حداکثر ۸۲٫۴٪ کاهش نشان می دهد. شکل (۶) نشان می دهد که کنترل مرکب اثر کمی در پاسخ شتاب دارد ولی این موضوع نگران کننده نیست، چرا که بیشترین مزیت سیستم جداساز لرزه ای در کاهش پاسخ شتاب سیستم است. بنابراین می توان گفت سیستم مرکب مورد مطالعه یکی از بهترین روشهای کاهش پاسخ تغییر مکان و شتاب است.



شکل ۷- پاسخ شتاب سیستم برای زلزله سنترو



شکل ۸- پاسخ شتاب سیستم برای زلزله السنترو

شکل (۷) نشان می‌دهد که کنترل فعال همچنین قادر است عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای را برای زلزله‌های حوزه نزدیک نیز ارتقا دهد. مقایسه بین نتایج پاسخهای زلزله حوزه دور و نزدیک نشان می‌دهد که بطور کلی نتایج برای هر دو نوع زلزله مشابه است. در زلزله حوزه نزدیک مشابه حوزه دور پاسخ تغییر مکان کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد و لی پاسخ شتاب کاهش خیلی کمی دارد که قابل اغماض است که قبلاً توضیح داده شد. در زلزله کوبه بعنوان زلزله حوزه نزدیک حداکثر تغییر مکان ۰.۷۵٪ کاهش نشان می‌دهد. از پاسخ کنترل مرکب و جداساز لرزه‌ای می‌توان نتیجه گرفت که:

- الگوریتم سختی منفی (PNS) یک روش ساده و مؤثر برای شبیه سازی الگوریتم LQR بعنوان یک استراتژی کنترل بهینه است.
- در کنترل مرکب بعنوان کنترل هوشمند پاسخ تغییر مکان در مقایسه با جداساز لرزه‌ای غیر فعال کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند که مشکل اصلی جداساز لرزه‌ای است. بنابراین کنترل هوشمند یکی از روشهای مؤثر برای بهبود عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای است.
- در زلزله حوزه دور پاسخ تغییر مکان نسبت به زلزله حوزه نزدیک کاهش بیشتری نشان می‌دهد ولی پاسخ شتاب برعکس بوده یعنی پاسخ شتاب زلزله حوزه نزدیک نسبت به زلزله حوزه دور کاهش بیشتری نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه پاسخ سیستم به زلزله حوزه دور و نزدیک

		السنترو	کوبه
شتاب زمین (g)		۰,۱۳۷۸	۰,۳۶۱۸
شتاب پایه (g)	جداسازی لرزه ای	۰,۲	۰,۵۰۳۴
	کنترل مرکب	۰,۱۷۱۴	۰,۳۲۶
تغییر مکان طبقه (cm)	جداسازی لرزه ای	۱,۳۸۹۴	۲,۶۰۸۸
	کنترل مرکب	۰,۲۴۴۹	۰,۶۵۲۵



نتیجه گیری

جداسازی لرزه‌ای پاسخ شتاب لرزه‌ای سیستم را کاهش می‌دهد که باعث کاهش خسارت شدید در طول زلزله می‌شود اما در این سیستم تغییر مکان پایه بزرگ است که پاسخ نامطلوب محسوب می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش تغییر مکان پایه در سیستم‌های جداساز لرزه‌ای و ارتقای عملکرد آنها، کنترل هوشمند است.

در سیستم جداساز لرزه‌ای، با افزایش انعطاف پذیری شتاب سازه کاهش یافته و سیستم کنترلی خصوصیات سازه را طوری اصلاح می‌کند که در نهایت هر دو پاسخ شتاب و تغییر مکان به سطح مطلوبی کاهش می‌یابند. نتیجه تحلیل سیستم نشان داد که الگوریتم PNS بعنوان یک روش ساده برای تقریب الگوریتم LQR برای هر دو زلزله حوزه دور و نزدیک جوابگو خواهد بود.

مراجع

1. Luco, E. J. "Response of a double-wedge base isolation device"; *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 33, p.p.1271-1286, 2004.
2. Fragiaco M., Rajgelj S., Cimadom F. "Design of bilinear hysteretic isolation systems"; *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 32, p.p.1333-1352, 2003.
3. Nagarajaiah S., Sahasrabudhe S; "Seismic response control of smart sliding isolated buildings using variable stiffness systems: An experimental and numerical study", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 35, p.p.177-197, 2006
4. Hall J.F., Heaton T.H., Halling M.W., Wald D.J.; "Near source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra*, 11(4), p.p. 569–605, 1995.
5. Nagarajaiah S, Sun X; "Base-isolated FCC building: impact response during Northridge earthquake", *Journal of Structural Engineering*, 127(9), p.p.1063 –1074. 2001
6. Bani-Hani A. K., Sheban A. M.; "Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 35, p.p. 1119-1144, 2006.
7. Ribakov Y., Gluck J.; "Selective controlled base isolation system with magnetorheological dampers", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 31, p.p. 1301-1324, 2002.
8. Iemura H., Taghikhany T.; "Optimum design of resilient sliding isolation system for seismic protection of equipments", *Bull Earthquake Eng.*, Springer, 5, p.p.85–103, 2007.
9. Kelly, J. M., Leitmann, G., and Soldatos, A. G.; "Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation", *J. Opt.*, 53(2), p.p. 159–181, 1987.
10. Nagarajaiah S., Riley, M. A., and Reinhorn, A.; "Control of sliding-isolated bridge with absolute acceleration feedback", *J. Eng. Mech.*, 119(11), p.p. 2317–2332, 1993.
11. Yang, J. N., et al.; "Control of sliding-isolated buildings using sliding-mode control". *J. Struct. Eng.*, 122(2), p.p. 179–186, 1996.
12. Spencer BF Jr, Suhardjo J, Sain MK.; "Frequency domain optimal control strategies for aseismic protection", *Journal of Engineering Mechanics(ASCE)*, 120(1), p.p. 135–159, 1994.
13. Malhotra PK. "Response of buildings to near-field pulse-like ground motions". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(11), p.p. 1309 –1326, 1999.
14. Tsang H.H., Su R.K.L, Chandler A.M.; "Simplified inverse dynamics models for MR fluid dampers". *Journal of Engineering Structures*. 28, p.p. 327–341, 2006.
15. Yang, J. N., Li, Z., and Vongchavalitkul, S.; "A generalization of optimal control theory: Linear and nonlinear control", Technical Rep. NCEER-92-26, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y. 1992.
16. Yoshioka H., Ramallo J. C., Spencer Jr. B. F.; "Smart Base Isolation Strategies Employing Magnetorheological Dampers", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 128(5), p.p. 540-551, 2002.
17. Lee, T. Y., and Kawashima, K.; "Effectiveness of seismic displacement response control for nonlinear isolated bridge", *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, JSCE, 808/I-74, p.p. 1–15. 2006.
18. Lee T. Y., Kawashima K. "Semiactive Control of Nonlinear Isolated Bridges with Time Delay", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 133(2), p.p. 235-241, 2007.