



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



A Kalman Filter-based model predictive control scheme with actuator saturation consideration for active control of a nine-story benchmark SAC building

Afshin Bahrami Rad¹, Mahdi Nouri², Javad Katebi^{3*}, Seyyed Arash Mousavi Ghasemi²

1- Ph.D candidate in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3 -Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Model predictive control is one of the optimal control methods for systems based on their behavior on future horizons. One of the salient features of this control method is the optimal consideration of control constraints in the system control process. Accurate states are required to perform an optimal control performance with this technique. On the other hand, state sensors are unable to provide accurate states due to the uncertainty in their structures. This shortcoming causes problems in the optimal control process. In this study, a discrete-time Kalman filter-based model predictive control scheme with actuator saturation consideration is presented. As a state estimator, Kalman filter is able to provide more accurate states. On the other hand, the application of performance constraints in the control process causes the saturation of the actuators to be optimally regarded. In the present study, to investigate the effectiveness of the proposed control method in reducing seismic responses, a nine-story benchmark steel structure (SAC) under seismic excitation is utilized. Then, the results obtained from the proposed method considering three different control force constraint scenarios are compared with the results of uncontrolled case. The results of numerical studies demonstrate the appropriate performance of the proposed control process in reducing seismic responses. Also, the replacement of low-capacity actuators with high-capacity ones, while making the control process more economical, do not significantly change the other responses quantity. For example, the highest change in the Drift Ratio Index (J1) for the controlled case with control force constraints to the controlled case without control force constraints for the Elcentro earthquake is by up to 4%, while the same conditions for the maximum control force index (J12) is 78%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 May 2020

Revise Date: 25 September 2020

Accept Date: 27 September 2020

Keywords:

Model Predictive Control
Kalman Filter
Actuator Saturation
Benchmark Building (SAC)
State Sensor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.229742.2135>

*Corresponding author: Javad Katebi
Email address: jkatebi@tabrizu.ac.ir

کنترل پیش‌بینی مبتنی بر فیلتر کالمن و ملاحظه اثر اشباع عملگر در کنترل فعال ساختمان نه طبقه مبنای SAC^۱

افشین بهرامی راد^۱، مهدی نوری^۲، جواد کاتبی^{۳*}، سید آرش موسوی قاسمی^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

کنترل پیش‌بین یک الگوریتم کنترل بهینه‌ای می‌باشد که نیروی کنترلی به دست آمده از این روش با حل یک مسئله بهینه‌یابی در حضور محدودیت‌های سخت و نرم حاصل می‌شود. به دلیل وجود عدم قطعیت در معادله فرآیند و همچنین ساختار حسگرهای حالت و از طرفی وجود محدودیت‌هایی در ظرفیت عملگرهای کنترلی نیاز به ایجاد یک فرآیند کنترلی می‌باشد که همه این شرایط و محدودیت‌ها را به نحو مطلوبی در خود بگنجاند. به همین جهت، در این پژوهش، یک روش کنترل پیش‌بین گسسته مبتنی بر فیلتر کالمن و ملاحظه اثر اشباع عملگر ارائه می‌شود. فیلتر کالمن به عنوان یک تخمین زنده حالت قادر است، حالت‌های نزدیک‌تر به واقعیت را ارائه نماید. از سویی اعمال محدودیت‌های عملکردی در فرآیند کنترل باعث می‌شود تا اشباع عملگرها نیز به صورت بهینه ملاحظه گردند. در تحقیق حاضر، برای بررسی کارایی روش کنترلی پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای از یک سازه نه طبقه فولادی مبنا (SAC) تحت بارگذاری لرزه‌ای استفاده شده است. سپس، نتایج به دست آمده از روش ارائه شده با ملاحظه سه سناریوی محدودیت نیروی کنترلی مختلف با نتایج حالت کنترل نشده مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج مطالعات عددی حاکی از عملکرد مناسب فرآیند کنترلی پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای بودند. همچنین جایگزینی عملگرهای با ظرفیت پایین به جای عملگرهای با ظرفیت بالا ضمن اقتصادی‌تر کردن فرآیند کنترل، از لحاظ پاسخ‌ها تغییر قابل توجهی در کاهش نسبت پاسخ‌های سیستم کنترل شده به کنترل نشده ایجاد نکردند. برای نمونه بیشترین تغییرات شاخص عملکردی نسبت دریافت (JI) برای حالت کنترل شده با محدودیت کنترلی به حالت کنترل نشده بدون محدودیت کنترلی برای زلزله السنترو برابر با ۴ درصد بود، در حالیکه همین شرایط برای شاخص حداکثر نیروی کنترلی (JI2) برابر با ۷۸ درصد بود.

کلمات کلیدی: کنترل پیش‌بین، فیلتر کالمن، اشباع عملگر، سازه مبنا (SAC)، حسگر حالت

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.229742.2135	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.229742.2135	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۶	۱۳۹۹/۰۷/۰۶	۱۳۹۹/۰۷/۰۴	۱۳۹۹/۰۳/۱۱
		جواد کاتبی			*نویسنده مسئول:	
		jkatebi@tabrizu.ac.ir			پست الکترونیکی:	

¹ SAC is a joint venture of three non-profit organizations: The Structural Engineers Association of California (SEAOC), the Applied Technology Council (ATC) and California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE). SAC Steel Project Technical Office, 1301 S. 46th Street, Richmond, CA 94804-4698. <http://quiver.eerc.berkeley.edu:8080/>.

۱- مقدمه

کنترل پیش‌بین یکی از روش‌های کنترل بهینه سیستم‌ها بر اساس رفتار آنها در افق‌های آینده است. هدف اصلی کنترل پیش‌بین محاسبه خط‌سیر رفتاری سیستم در افق‌های آینده و گنجاندن این اطلاعات در فرآیند بهینه‌یابی جهت استخراج نیروی کنترلی بهینه است. مسئله بهینه‌یابی در داخل یک چارچوب زمانی محدود با در نظر گرفتن اطلاعات سیستم کنترلی در نقطه شروع آن چارچوب زمانی، حل می‌شود [۱].

کنترل پیش‌بین امروزه به دلیل قابلیت‌های منحصر به فردی نظیر ملاحظه محدودیت‌های کنترلی و پیش‌بینی رفتار آینده سیستم به یکی از جذاب‌ترین روش‌های کنترلی در زمینه‌ها و رشته‌های مختلف تبدیل شده است. در حوزه مهندسی عمران نیز این فرآیند کنترلی بارها توسط محققین مختلف مورد توجه و ارزیابی قرار گرفته است. Mei و همکارانش در سال ۲۰۰۱ [۲]، ترکیبی از کنترل پیش‌بین و استراتژی پسخور-پیشخور^۲ را برای کنترل پاسخ‌های سازه‌ای تحت تحریکات لرزه‌ای به کار بردند. در مطالعه دیگری Mei و همکارانش در سال ۲۰۰۲ [۳]، فرآیند کنترل پیشگو با بازخورد شتاب در کنترل سازه تحت تحریکات لرزه‌ای را فرمول‌بندی کردند.

کاربرد فرآیند کنترل پیش‌بین در کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه تحت تحریک باد نیز توسط Mei و همکارانش در سال ۲۰۰۴ [۴]، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. Rotea و Lana در سال ۲۰۰۸ [۵]، یک طرح کنترل پیش‌بین مقاوم را بر اساس خط‌سیر حالت سیستم در برابر پارامترهای دارای عدم قطعیت به دست آوردند. Yang و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۶]، یک فرآیند کنترل پیش‌بین اصلاح شده را با مفهوم حالت جزئی بازخورد خروجی مستقیم جهت کاهش تعداد حسگرها برای اجرا در شرایط واقعی فرمول‌بندی کردند. یک روش نوآورانه کنترل پیش‌بین سریع برای حفاظت سازه‌های مهندسی بزرگ‌مقیاس از خطرات طبیعی توسط Chen و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۷]، ارائه گردید. در تحقیقی دیگر یک روش کنترل پیش‌بین جدید و سریع با در نظر گرفتن اشباع عملگرهای کنترلی در سازه‌های بزرگ‌مقیاس توسط Peng و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۸]، مطرح شد. در مطالعه دیگری آقای Peng و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [۹]، یک فرآیند کنترل پیش‌بین عملی را با در نظر گرفتن تاخیر چند ورودی برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های بزرگ‌مقیاس توسعه دادند. در سایر حوزه‌های تحقیقاتی نیز از این تکنیک کنترلی کاربردهای وسیعی در قالب مطالعات جامع گزارش شده است. بخشی از این کاربردها در زمینه کنترل تصادفی [۱۰-۱۴] و بخشی دیگر در زمینه کنترل مقاوم [۱۵-۱۷] مطرح شده‌اند.

با توجه به وجود عدم قطعیت در ساختار حسگرهای حالت و مخبره حالت‌ها همراه با خطای این ابزارها، استفاده از مشاهده‌گرهای حالت، ایده‌ای مناسب برای رفع این مشکل است. مشاهده‌گرهای حالت انواع مختلفی دارند که شامل مشاهده‌گرهای حالت برای سیستم‌های معین و نامعین می‌باشند. در سیستم‌های معین به دلیل امکان اطمینان به معادله دینامیکی سیستم تنها عدم قطعیت برای حس‌گرهای حالت لحاظ می‌شود و بدین ترتیب حالت‌های قرائت شده از حس‌گرها به سمت پاسخ‌های معادله دینامیکی سیستم همگرا می‌شوند. انواع این نوع مشاهده‌گرها برای سیستم‌های معین عبارتند از: مشاهده‌گرهای لوانبرگر و ... در مقابل در سیستم‌های نامعین به دلیل قائل شدن عدم قطعیت هم به دینامیک سیستم و هم به پاسخ‌های حس‌گرهای حالت، پاسخ‌های به دست آمده از آنها به سمت حالتی در بینابین آنها همگرا می‌شود. انواع این نوع مشاهده‌گرها عبارتند از: انواع فیلترهای کالمن، فیلتر ذرات و ... [۱۹، ۱۸]. بنابراین، در تحقیق حاضر به دلیل قائل شدن عدم قطعیت بر معادله سیستم و پاسخ‌های ناشی از حسگرهای حالت از فیلتر کالمن استفاده شده است.

بحث اشباع عملگرها نیز یکی از مهمترین مباحث در کنترل سازه‌ها در شرایط واقعی است. در حالت واقعی عملگرهای کنترلی بر اساس نیاز سیستم و با توجه به مسائل مختلفی نظیر اندازه، مسائل اجرایی و صرفه اقتصادی، طراحی و اعمال می‌شوند. بنابراین، عملگر

² Feedback-Feedforward

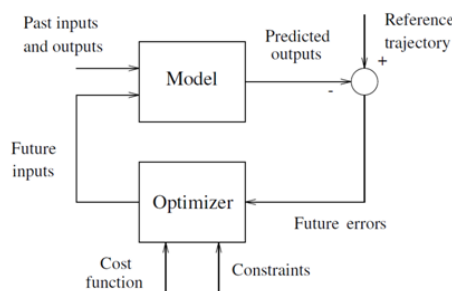
طراحی شده دارای ظرفیت کنترلی محدودی می‌باشد که در مواجهه با شرایطی که خارج از ظرفیتش باشد می‌تواند دچار اختلال در عملکرد شود. به همین جهت، در نظر گرفتن ظرفیت اشباع عملگرها در فرآیند کنترلی می‌تواند در کنترل هر چه بهینه‌تر سیستم‌ها کمک کند [۸،۲۰].

در این مقاله، برای اولین بار از یک روش کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن محدودیت‌های کنترلی و عدم قطعیت در ساختار حسگرهای حالت و معادله فرآیند، جهت کنترل فعال یک سازه ۹ طبقه فولادی مینا (SAC) که مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال می‌باشد، استفاده شده است. برای این منظور، از فیلتر کالمن که یک تخمین زنده بهینه حالت می‌باشد برای تخمین حالت‌های نزدیک به واقعیت سیستم بهره برده شده است. از طرفی برای منظور نمودن ظرفیت اشباع عملگر کنترلی مورد نظر از اعمال محدودیت‌های نامساوی نیروی کنترلی در حل تابع هزینه سیستم که یک برنامه‌ریزی درجه دوم است بهره برده شده است. بر این اساس، نیروی کنترلی طراحی شده در هر لحظه با در نظر گرفتن ظرفیت اشباع عملگرهای کنترلی به صورت بهینه محاسبه می‌شود. برای بررسی کارایی سیستم تحت کنترل از چهار زلزله مینا نظیر السنترو، هاجینوهه، نورث‌ریچ و کوبه برای بارگذاری سازه استفاده شد. برای مطالعه اثر ظرفیت اشباع عملگر بر پاسخ‌های لرزه‌ای سیستم کنترل شده از سه عملگر با ظرفیت‌های مختلف برای هر بارگذاری لرزه‌ای استفاده شده است. در نهایت نتایج به دست آمده از فرآیند کنترلی ترکیبی ایجاد شده که ترکیبی از کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن اشباع عملگر و فیلتر کالمن است با حالت کنترل نشده مقایسه گشته و کارایی روش مزبور گزارش شد.

این مقاله به بخش‌های زیر دسته بندی می‌شود. در بخش ۲، خلاصه‌ای از تئوری و فرمول‌بندی کنترل پیش‌بین ارائه می‌شود. در بخش ۳، روابط و مفاهیم فیلتر کالمن ارائه می‌شود. در بخش ۴، که بخش شبیه‌سازی عددی می‌باشد یک سازه نه طبقه مینا (SAC) معرفی می‌شود. در بخش ۵، مطالعه عددی بر روی سازه مذکور اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی عددی گزارش می‌شود. نهایتاً، این مقاله در بخش ۶ که بخش نتیجه‌گیری است به اتمام می‌رسد.

۲- کنترل پیش‌بین

طرح کنترل پیش‌بین بر اساس استفاده صریح از معادله پیش‌بینی پاسخ سیستم برای بدست آوردن نیروی کنترلی بهینه با کمینه کردن تابع هدف می‌باشد. تابع بهینه‌یابی، اختلاف بین پاسخ‌های پیش‌بینی شده و مطلوب را با در نظر گرفتن محدودیت‌های از پیش تعیین شده مانند محدودیت‌های نیروی کنترلی، پاسخی و ... کمینه می‌نماید. در کنترل پیش‌بین ابتدا یک خط سیر مرجع در نظر گرفته شده و سپس پاسخ‌های سیستم به سمت آن مرجع سوق داده می‌شود. برای این منظور از یک مدل پیش‌بینی مناسب برای تخمین پاسخ‌های آینده سیستم استفاده می‌شود. پیش‌بینی بر اساس حالت لحظه‌ای سیستم و بر اساس یک پنجره زمانی از پیش تعیین شده صورت می‌گیرد. سپس، حالت‌ها و نیروی کنترلی پیش‌بینی شده برای افق‌های زمانی آینده در مسئله بهینه‌یابی گنجانده شده و نیروی کنترلی بهینه استخراج می‌شود. شکل ۱ ساختار کنترل پیش‌بین را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختار اصلی کنترل پیش‌بین [۲۱]

فرض می‌کنیم که معادله فضای حالت گسسته سیستم به صورت معادلات ۱ و ۲ بیان می‌شود:

$$x_{k+1} = A x_k + B u_k \quad (1)$$

$$y_k = C x_k \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، x بردار حالت سیستم، A ماتریس حالت، B ماتریس ورودی، u بردار ورودی یا کنترل، y بردار خروجی، C ماتریس خروجی، و k شاخص گام زمانی گسسته می‌باشند.

با بسط رابطه ۲ به گام‌های زمانی آینده رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= C A x_k + C B u_{k+1} \\ y_{k+2} &= C A^2 x_k + C A B u_k + C B u_{k+1} \\ &\vdots \\ y_{k+N} &= C A^N x_k + C A^{N-1} B u_k + C A^{N-2} B u_{k+1} \\ &\quad + \dots + C A^{N-P} B u_{k+N-1} \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه ۳، N تعداد گام‌های پیش‌بینی بردار حالت و P تعداد گام‌های پیش‌بینی بردار نیروی کنترلی می‌باشد.

با بازنویسی رابطه ۳ به صورت ماتریسی رابطه ۴ حاصل می‌گردد:

$$Y = F x_k + \Phi U \quad (4)$$

که در رابطه ۴

$$F = \begin{bmatrix} C A \\ C A^2 \\ \vdots \\ C A^N \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} C B & 0 & \dots & 0 \\ C A B & C B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ C A^{N-1} B & C A^{N-2} B & \dots & C A^{N-P} B \end{bmatrix};$$

$$Y = [y_{k+1} \quad y_{k+2} \quad \dots \quad y_{k+N}]^T; \quad U = [u_k \quad u_{k+1} \quad \dots \quad u_{k+N-1}]^T$$

سپس تابع هزینه برای حل مسئله بهینه‌یابی به شکل برنامه‌ریزی درجه دوم به شکل رابطه ۵ تشکیل داده می‌شود.

$$\text{Min}_U J_p(Y,U) = (R_s - Y)^T Q (R_s - Y) + U^T R U \quad (5)$$

که در رابطه ۵، R_s بردار مرجع، Q ماتریس وزنی حالت، و R ماتریس وزنی نیروی کنترلی می‌باشند.

با حل رابطه ۴ معادله نیروی کنترلی به صورت رابطه ۶ حاصل می‌شود

$$U = (\Phi^T Q \Phi + R)^{-1} \Phi^T Q (R_s - F x_k) \quad (6)$$

لازم به توضیح است که در این مقاله تعداد گام‌های پیش‌بینی حالت و نیروی کنترلی پنج گام در نظر گرفته شده و مسئله کنترلی بهینه به روش افق دورشونده^۳ حل شده است.

³ Receding horizon

برای صحت سنجی الگوریتم کنترل پیش بین کد شده در نرم افزار متلب تمامی مثال های فصل های اول و دوم کتاب معرفی شده در منبع شماره ۱ شبیه سازی و با دقت صد در صد صحت سنجی شده اند.

۲-۱- محدودیت های کنترلی

محدودیت های اعمالی بر رابطه کنترلی عموماً به دو دسته تقسیم بندی می شوند: (۱) محدودیت در نیروی کنترلی (۲) محدودیت در خروجی سیستم [۱]. فرمول بندی مسائل کنترلی با در نظر گرفتن یک بازه بی نهایت برای سیگنال ها در عمل مناسب نیست، زیرا در واقعیت همه فرآیندها در معرض محدودیت های مختلف قرار دارند. به عنوان مثال عملگرهای کنترلی یک بازه محدودی از عملکرد را می توانند داشته باشند. دلایل ساختاری، ایمنی و محدودیت حس گرها می توانند سبب محدودیت هایی در کنترل فرآیندها شوند. علاوه بر این، در عمل، مسائل اقتصادی نیز می توانند دلیل بسیاری از محدودیت های کنترلی باشند. به همین دلیل فرآیندهای کنترلی باید قادر به پیش بینی این محدودیت ها بوده و بتوانند به طرز مناسبی با این شرایط برخورد نمایند. به عبارت دیگر، اعمال محدودیت ها در فرآیند کنترلی باید به گونه ای انجام گیرد تا بهینه بودن فرآیند کنترلی را تضمین نماید. بدین منظور ابتدا محدودیت ها را به صورت نامساوی هایی به صورت رابطه ۷ بیان می کنند.

$$U^{min} \leq U \leq U^{max} \quad (7)$$

که در رابطه ۷، U کمیت مورد نظر و دارای بازه محدود و U^{min} و U^{max} به ترتیب کران های بالا و پایین آن کمیت می باشند.

رابطه ۷ را می توان به دو نامساوی به صورت رابطه ۸ تبدیل کرد

$$\begin{aligned} -U &\leq -U^{min} \\ U &\leq U^{max} \end{aligned} \quad (8)$$

با بیان رابطه ۸ به صورت ماتریسی رابطه ۹ بدست می آید

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} -U^{min} \\ U^{max} \end{bmatrix} \quad (9)$$

این فرآیند برای تمام محدودیت های ممکن، شامل محدودیت های کنترلی و خروجی در نظر گرفته می شود. در نهایت تابع هزینه با در نظر گرفتن این محدودیت ها کمینه شده و منجر به ایجاد قانون کنترلی می شود که به صورت بهینه این محدودیت ها را در داخل خود گنجانده است. برای کمینه نمودن تابع هزینه به فرم برنامه ریزی درجه دوم با حضور محدودیت های نامساوی روش های مختلفی وجود دارد که در این مقاله از روش هیلدرث^۴ [۱] برای این منظور استفاده شده است. همچنین تنها محدودیت در نظر گرفته شده در این پژوهش مربوط به نیروی کنترلی عملگر می باشد.

۲-۱-۱- روش هیلدرث

فرض بر این است که مسئله بهینه یابی برنامه ریزی درجه دوم به شکل رابطه ۱۰ باشد.

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \eta^T H_c \eta + \eta^T f \\ A_{cons} \eta &\leq b \end{aligned} \quad (10)$$

که در رابطه ۱۰، η متغیر بهینه یابی و H_c ، f و A_{cons} و b ماتریس های متناسب با مسئله بهینه یابی درجه دوم می باشند. برای حل رابطه ۱۰ ابتدا محدودیت های نامساوی را مساوی فرض کرده و رابطه ۱۰ به شکل رابطه ۱۱ بازنویسی می شود.

⁴ Hildreth

$$J = \frac{1}{2} \eta^T H_c \eta + \eta^T f + \lambda^T (A_{cons} \eta - b) \quad (11)$$

که در این رابطه λ ضرایب لاگرانژ می‌باشند.

سپس، در رابطه ۱۱ ضرایب لاگرانژ با استفاده از روش هیلدرث به دست آمده و مسئله بهینه‌یابی بر این اساس حل می‌شود. به طور کلی محدودیت‌های نامساوی مفروض برای یک مسئله بهینه‌یابی از مجموعه‌ای از محدودیت‌های فعال و غیرفعال تشکیل یافته است. محدودیت‌های غیرفعال به محدودیت‌هایی ابلاغ می‌شوند که جزو زیر مجموعه محدودیت‌های فعال بوده و با آنها همپوشانی دارند و عملاً تکراری هستند. اساس روش هیلدرث جدا کردن محدودیت‌های فعال از غیر فعال و یافتن ضرایب لاگرانژ بر اساس محدودیت‌های فعال می‌باشد که این امر باعث افزایش سرعت قابل ملاحظه حل مسئله بهینه‌یابی شده و مسئله تاخیر زمانی در حل این نوع الگوریتم‌ها را تا حد زیادی مرتفع می‌کند. شبه کد روش هیلدرث در منبع [۱] موجود است.

۳- فیلتر کالمن KF^۵

تخمین حالت‌های دقیق سیستم‌های تحت کنترل همواره مسئله مهمی بوده است. از آنجایی که ابزارهای اندازه‌گیری مانند حسگرها به دلیل عدم قطعیت و احتمالاً نقص در ساختارشان قادر به اندازه‌گیری دقیق حالت‌ها نبوده و پاسخ‌های همراه با نویز را گزارش می‌کنند، بنابراین استفاده از ابزاری که بتوان به وسیله آنها از این حسگرهای موجود، دقیق‌ترین پاسخ‌ها را دریافت نمود می‌تواند راه‌گشا باشد. به همین جهت در این تحقیق به منظور کاهش نویزهای موجود در پاسخ‌های حسگرها از فیلتر کالمن خطی استفاده شده است.

فیلتر کالمن الگوریتمی است که به صورت همزمان از اندازه‌گیری‌های همراه با نویز (نویز اندازه‌گیری) حسگرها و معادله همراه با عدم قطعیت سیستم (نویز فرآیند) برای استخراج پاسخ‌های نزدیک‌تر به واقعیت استفاده می‌کند. این الگوریتم از دو گام مختلف تشکیل یافته است. در گام اول که به گام پیش‌بینی نیز معروف است، از معادله گسسته سیستم برای پیش‌بینی حالت‌ها در گام آینده استفاده می‌کند. در گام دوم که به گام بروزرسانی معروف است با ترکیب پاسخ‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده پاسخ‌های دقیق‌تر را تخمین می‌زند. فرمول‌بندی این الگوریتم به شرح زیر است [۱۸، ۱۹]:

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (12-الف)$$

$$\hat{x}_k^- = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \quad (12-ب)$$

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (12-ج)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \\ = P_k^+ H_k^T R_k^{-1} \quad (12-د)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (12-ذ)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \\ = [(P_k^-)^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k]^{-1} \\ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (12-ر)$$

که در روابط ۱۲-الف تا ۱۲-ر، y بردار اندازه‌گیری، H ماتریس خروجی، v نویز اندازه‌گیری، x حالت واقعی، \hat{x}^- حالت پیش‌بینی شده، \hat{x}^+ حالت بروزرسانی شده، F ماتریس حالت، G ماتریس ورودی، u بردار ورودی، p^- کواریانس حالت پیش‌بینی شده، p^+ کواریانس حالت بروزرسانی شده، Q کواریانس نویز فرآیند، K ماتریس بهره کالمن، و R کواریانس نویز اندازه‌گیری می‌باشند.

⁵ Kalman Filter

برای صحت‌سنجی الگوریتم کالمن‌فیلتر کد شده در نرم‌افزار متلب تمامی مثال‌های بخش دوم و فصل‌های ۶، ۵ و ۷ منبع شماره ۱۸ شبیه‌سازی و صحت‌سنجی با دقت صد در صد شده‌اند.

۴- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، به منظور بررسی کارایی روش کنترلی ارائه شده از یک سازه فولادی نه طبقه مینا (SAC) [۲۲، ۲۳، ۲۴] برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است (شکل ۲). تمامی مراحل شبیه‌سازی این سازه در نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. به منظور ساده‌سازی مسئله، سازه مورد نظر به صورت قاب برشی و با رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. در قاب برشی مفروض برای هر طبقه از سازه یک درجه آزادی برای حرکت افقی آن طبقه در نظر گرفته شده و از سایر درجات آزادی سازه (درجات آزادی دورانی، قائم و افقی تک تک گره‌های سازه‌ای) صرف‌نظر شده است. اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی قاب مورد نظر اهم از مقادیر جرم، سختی و میرایی طبقات در قالب جداول ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند. سیستم کنترلی مورد استفاده در این سازه یک میراگر جرمی تنظیم شونده فعال با ظرفیت اشباع مختلف برای هر شتابنگاشت زلزله می‌باشد که در طبقه آخر ساختمان نصب شده است. مشخصات ظرفیت اشباع عملگرها به تناسب شتابنگاشت‌های لرزه‌ای به شرح جدول ۴ می‌باشد. در تحقیق حاضر معیار انتخاب ظرفیت‌های اشباع عملگرها برای زلزله‌های مختلف، پاسخ‌های لرزه‌ای به دست آمده از حالت بدون در نظر گرفتن ظرفیت اشباع عملگر می‌باشد. جرم و نسبت میرایی میراگر جرمی تنظیم شونده فعال به ترتیب معادل ۲ درصد وزن کل سازه و ۵ درصد در نظر گرفته شده و سختی این سیستم بر اساس فرکانس مود اول سازه طراحی شده است. ضمناً در این تحقیق کواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری در فیلتر کالمن خطی به ترتیب 0.0001 و 0.1 در نظر گرفته شده است. کلیه مراحل شبیه‌سازی فیلتر کالمن در محیط برنامه‌نویسی متلب صورت گرفته و صحت‌سنجی این الگوریتم نیز بر اساس مثال‌های موجود در منبع ۱۸ انجام یافته است. با توجه به اینکه در نظر گرفتن محدودیت‌های کنترلی در فرآیند حل مساله باعث تغییر صورت مساله بهینه‌یابی برنامه‌ریزی درجه دوم می‌شود. بنابراین، برای هر حالت کنترلی در نظر گرفته شده، ماتریس‌های وزنی خاص آن بر اساس قضاوت مهندسی و تکرار حالت‌های مختلف به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که با پاسخ‌های (تغییر مکان، شتاب، سرعت و...) نزدیک به هم نیروی کنترلی کمتری نیاز باشد. بر این اساس، ماتریس‌های وزنی در نظر گرفته شده برای حل مساله بهینه‌یابی برنامه‌ریزی درجه دوم به ترتیب شامل دو ماتریس وزنی پاسخ‌ها $Q = \text{diag} [q_{d1}, q_{td1}, q_{v1}, q_{tv1}, \dots, q_{d5}, q_{td5}, q_{v5}, q_{tv5}]$ و ماتریس وزنی نیروی کنترلی R می‌باشند که به شرح جدول ۵ در نظر گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر از حالت کامل سیستم شامل سرعت و تغییر مکان هر طبقه از سازه به عنوان خروجی فیلتر کالمن برای کنترل سازه استفاده شده است.

جدول ۱: مقادیر جرم سازه نه طبقه

کل سازه (kg)	طبقه نهم (kg)	طبقه دوم تا هشتم (kg)	طبقه اول (kg)
9.00×10^6	5.34×10^5	4.95×10^5	5.03×10^5

جدول ۲: مقادیر سختی سازه نه طبقه

طبقه نهم (kg m/s ²)	طبقه هشتم (kg m/s ²)	طبقه هفتم (kg m/s ²)	طبقه ششم (kg m/s ²)	طبقه پنجم (kg m/s ²)	طبقه چهارم (kg m/s ²)	طبقه سوم (kg m/s ²)	طبقه دوم (kg m/s ²)	طبقه اول (kg m/s ²)
3.14e8	3.33e8	3.55e8	4.09e8	4.72e8	5.48e8	6.36e8	6.66e8	2.64e8

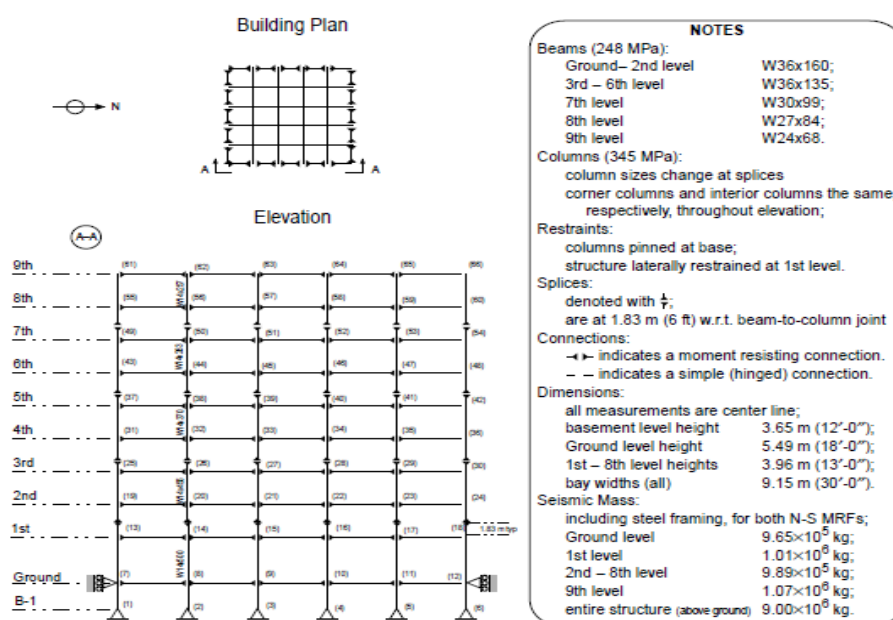
جدول ۳: مقادیر میرایی سازه نه طبقه

طبقه نهم (kg/s)	طبقه هشتم (kg/s)	طبقه هفتم (kg/s)	طبقه ششم (kg/s)	طبقه پنجم (kg/s)	طبقه چهارم (kg/s)	طبقه سوم (kg/s)	طبقه دوم (kg/s)	طبقه اول (kg/s)
1.75e6	1.85e6	1.97e6	2.27e6	2.62e6	3.04e6	3.53e6	3.70e6	1.65e6

⁶ Matlab

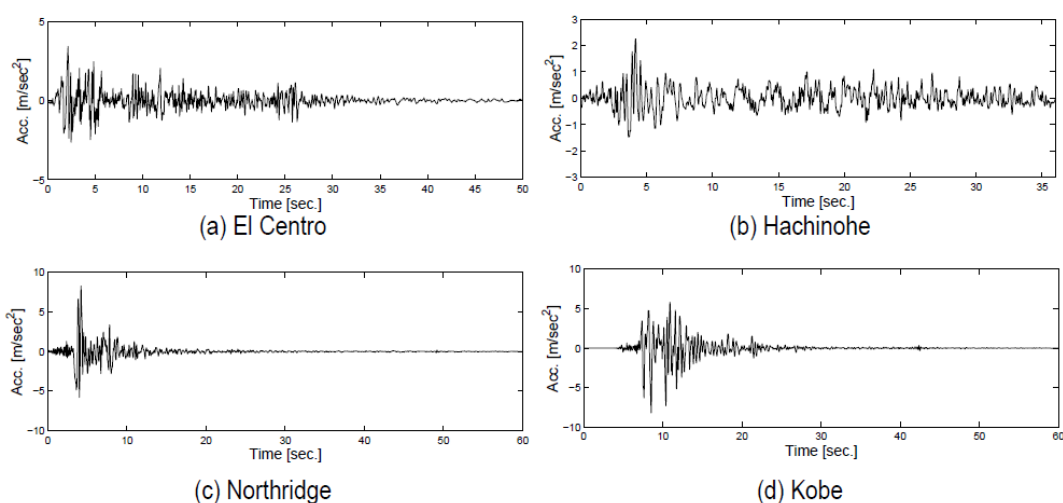
جدول ۴: ظرفیت اشباع عملگر کنترلی برای حالت‌های مختلف بارگذاری لرزه ای

Actuator Capacity	Elcentro	Hachinohe	Northridge	Kobe
W/O limitation	•	•	•	•
6U		•		
4U		•		
3U			•	•
2U			•	•
1.5U	•			
U	•			

پادداشت: $U = 1 \times 10^2 \text{ KN}$ 

شکل ۲: ساختمان نه طبقه فولادی مینا (SAC) [۲۲]

برای بارگذاری سیستم سازه‌ای اشاره شده از دو زلزله مبنای دور از گسل (السنتر و هاجینوهه) و دو زلزله مبنای نزدیک به گسل (کوبه و نورثریج) استفاده شده است. حداکثر شتاب مطلق زلزله‌های السنتر، هاجینوهه، نورثریج، و کوبه به ترتیب برابر با ۰.۳، ۰.۴۱۷، ۰.۲، ۰.۲۵۰، ۰.۲۶۷ و ۰.۱۷۸ m/sec^2 می باشد [۲۲]. تاریخچه زمانی رکوردهای زلزله‌های مزبور در شکل ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۳: تاریخچه زمانی زلزله‌های دور و نزدیک از گسل [۲۲]

۵- نتایج عددی

در این بخش پاسخ‌های سازه فولادی نه طبقه مبنا (SAC) با اعمال دو زلزله دور از گسل و دو زلزله نزدیک به گسل ارزیابی می‌شوند. طبقه نهم سازه نه طبقه برای نشان دادن پاسخ‌ها در قالب نمودارهای مختلف (تاریخچه زمانی تغییر مکان، RMS^y سرعت و شتاب) تحت دو زلزله کوبه (نزدیک به گسل) و السنترو (دور از گسل) انتخاب می‌شوند. معیار ارزیابی پاسخ‌ها مقایسه پاسخ‌های حالت‌های کنترل شده با کنترل نشده می‌باشد.

شاخص‌های عملکردی نقش مهمی را در ارزیابی پاسخ‌ها ایفا می‌کنند. این شاخص‌ها قادر هستند تا با ایجاد یک نسبت برای حالت کنترل شده به کنترل نشده کارایی روش کنترلی پیشنهادی را ارزیابی کنند. هرچه این نسبت‌ها به عدد صفر نزدیک‌تر باشند روش کنترلی پیشنهادی روش مناسب‌تری ارزیابی می‌شود. به همین دلیل، در این مطالعه از دوازده شاخص عملکردی مبنا استفاده شده است. مشخصات این شاخص‌ها در جدول ۶ آورده شده‌اند. این شاخص‌ها به ترتیب عبارتند از: حداکثر نسبت دررفت (J_1)، شتاب حداکثر طبقات (J_2)، سرعت حداکثر طبقات (J_3)، تغییر مکان حداکثر طبقات (J_4)، برش پایه حداکثر (J_5)، حداکثر نیروی کنترلی (J_6)، RMS نسبت دررفت (J_7)، RMS شتاب طبقات (J_8)، RMS سرعت طبقات (J_9)، RMS تغییر مکان طبقات (J_{10})، RMS برش پایه (J_{11})، RMS نیروی کنترلی (J_{12}).

در جدول ۶ روابط مربوط به RMS و نرم دوم به ترتیب به صورت روابط ۱۳ و ۱۴ بیان می‌شوند:

$$f_{RMS} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt} \quad (13)$$

$$\|x\|_2 = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2} \quad (14)$$

که در روابط ۱۳ و ۱۴، $f(t)$ تابع مورد نظر، x مقدار مورد نظر، و T برابر با زمان است.

⁷ Root Mean Square

جدول ۵: مقادیر ماتریس های وزنی

	Q_{d1}	Q_{v1}	Q_{td1}, Q_{tv1}	$Q_{d2,3,4,5}$	$Q_{v2,3,4,5}$	$Q_{td2,3,4,5}, Q_{tv2,3,4,5}$	R
El Centro-W/O	$1000 \times I_{9 \times 9}$	$10 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$1e-10 \times I_{5 \times 5}$
El Centro-1.5U	$800 \times I_{9 \times 9}$	$8 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$1e-10 \times I_{5 \times 5}$
El Centro-U	$600 \times I_{9 \times 9}$	$6 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$1e-10 \times I_{5 \times 5}$
Hachinohe-W/O	$1000 \times I_{9 \times 9}$	$10 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$1e-11 \times I_{5 \times 5}$
Hachinohe-6U	$850 \times I_{9 \times 9}$	$8.5 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$1e-11 \times I_{5 \times 5}$
Hachinohe-4U	$700 \times I_{9 \times 9}$	$7 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$1e-11 \times I_{5 \times 5}$
Northridge-W/O	$1000 \times I_{9 \times 9}$	$10 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$5e-11 \times I_{5 \times 5}$
Northridge-3U	$400 \times I_{9 \times 9}$	$4 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$5e-11 \times I_{5 \times 5}$
Northridge-2U	$350 \times I_{9 \times 9}$	$3.5 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$5e-11 \times I_{5 \times 5}$
Kobe-W/O	$1000 \times I_{9 \times 9}$	$10 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$3.5e-11 \times I_{5 \times 5}$
Kobe-3U	$550 \times I_{9 \times 9}$	$5.5 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$3.5e-11 \times I_{5 \times 5}$
Kobe-2U	$350 \times I_{9 \times 9}$	$3.5 \times I_{9 \times 9}$	1e-3	$1 \times I_{9 \times 9}$	$1 \times I_{9 \times 9}$	1e-5	$3.5e-11 \times I_{5 \times 5}$

یادداشت: I نشان دهنده ماتریس یکم می باشد که مرتبه آن به صورت کوچک نویسی در پایین سمت راست درج شده است.

۵-۱- سازه نه طبقه

۵-۱-۱- پاسخ های تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقات

تاریخچه زمانی پاسخ های تغییر مکان طبقه نهم در شکل ۴ ارائه شده است. پاسخ های ارائه شده در این شکل حاکی از عملکرد مناسب روش کنترلی پیشنهادی در کاهش پاسخ های سازه ای می باشد. با کاهش حداکثر ظرفیت نیروی کنترلی عملگرها در هر دو زلزله کوبه و السنترو پاسخ ها نسبت به حالت بدون اعمال محدودیت نیروی کنترلی تغییر چندانی نکرده و تقریباً منطبق با هم هستند. اشکال بزرگمایی شده از بخشی از این نمودار نیز که در سمت پایین و راست نمودار اصلی آورده شده اند به منظور هر چه بهتر نشان دادن این انطباق در کنار شکل اصلی رسم شده اند.

در شکل ۵ تاریخچه زمانی RMS پاسخ های سرعت و شتاب طبقه نهم برای دو زلزله نزدیک و دور از گسل کوبه و السنترو آورده شده اند. پاسخ ها حاکی از کاهش مناسب RMS پاسخ ها در حالت های کنترل شده نسبت به حالت کنترل نشده می باشند. ضمن اینکه تطابق بالایی بین پاسخ های حالت های مختلف کنترل شده با ظرفیت های حداکثر مختلف نیروهای کنترلی عملگر دیده می شود.

۵-۱-۲- پاسخ های دررفت طبقات

نسبت دررفت طبقات برای سازه نه طبقه در شکل ۶ قابل مشاهده هستند. نتایج حاصل از این شکل نشان دهنده کاهش نسبت های دررفت سازه ای در حالت کنترل شده نسبت به حالت کنترل نشده است. تطابق پاسخی حالت های کنترل شده با استفاده از عملگرهای کنترلی با ظرفیت های مختلف در پاسخ های نسبت های دررفت نیز کاملاً مشهود است به طوری که این تطابق در زلزله کوبه نسبت به زلزله السنترو بیشتر به چشم می خورد.

۵-۱-۳- پاسخ های نیروی کنترلی

شکل ۷ تاریخچه زمانی نیروی کنترلی میراگر با ظرفیت های مختلف را برای هر دو زلزله کوبه و السنترو نشان می دهد. برای هر یک از این زلزله ها سه نوع عملگر با ظرفیت های مختلف متناسب با ماهیت و شدت اثر زمین لرزه مربوطه در نظر گرفته شده است.

شکل ۸ تاریخچه زمانی RMS نیروی کنترلی میراگر با ظرفیت‌های مختلف را برای هر دو زلزله کوبه و السنترو نشان می‌دهد. با مقایسه این پاسخ‌ها با پاسخ‌های مربوط به تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقات سازه می‌توان به این نتیجه رسید که اعمال محدودیت نیروی کنترلی ضمن کاهش RMS نیروی کنترلی تغییر چندان در پاسخ‌های مربوط به تغییر مکان، سرعت، و شتاب ایجاد نمی‌کند.

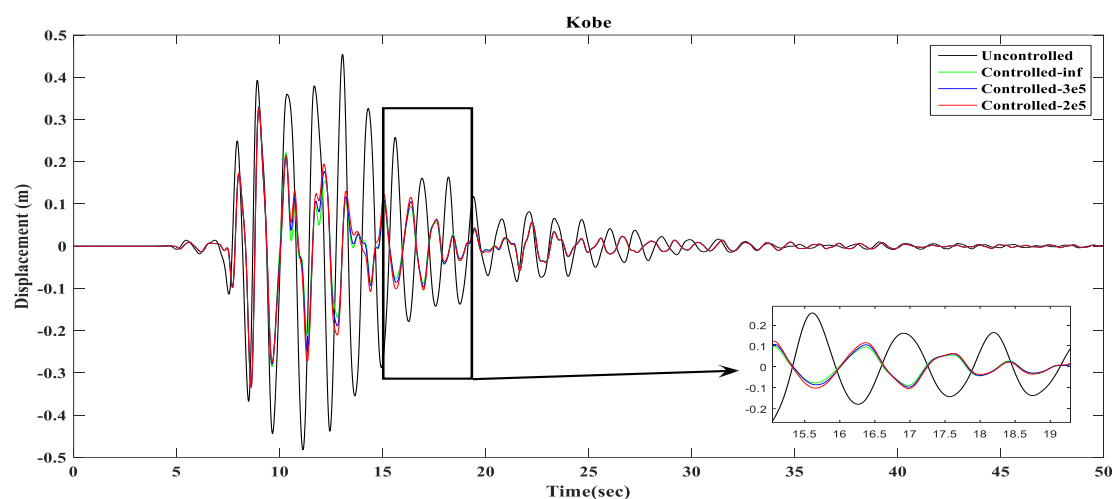
جدول ۶: شاخص‌های عملکردی

حداکثر سرعت طبقات	حداکثر شتاب طبقات	حداکثر نسبت دررفت
$J_3 = \frac{\ \max_{t,i} \dot{x}_{c,i}(t) \ }{\ \max_{t,i} \dot{x}_{uc,i}(t) \ }$	$J_2 = \frac{\ \max_{t,i} \ddot{x}_{c,i}(t) \ }{\ \max_{t,i} \ddot{x}_{uc,i}(t) \ }$	$J_1 = \frac{\ \max_{t,i} \delta_{c,i}(t) \ }{\ \max_{t,i} \delta_{uc,i}(t) \ }$
حداکثر نیروی کنترلی	حداکثر برش پایه	حداکثر تغییر مکان طبقات
$J_6 = \frac{\max_t U_c(t) }{\max_t W }$	$J_5 = \frac{\max_t V_c(t) }{\max_t V_{uc}(t) }$	$J_4 = \frac{\ \max_{t,i} x_{c,i}(t) \ }{\ \max_{t,i} x_{uc,i}(t) \ }$
سرعت طبقات RMS	شتاب طبقات RMS	نسبت دررفت RMS
$J_9 = \frac{\ \frac{RMS}{t,i} \dot{x}_{c,i}(t) \ }{\ \frac{RMS}{t,i} \dot{x}_{uc,i}(t) \ }$	$J_8 = \frac{\ \frac{RMS}{t,i} \ddot{x}_{c,i}(t) \ }{\ \frac{RMS}{t,i} \ddot{x}_{uc,i}(t) \ }$	$J_7 = \frac{\ \frac{RMS}{t,i} \delta_{c,i}(t) \ }{\ \frac{RMS}{t,i} \delta_{uc,i}(t) \ }$
نیروی کنترلی RMS	برش پایه RMS	تغییر مکان طبقات RMS
$J_{12} = \frac{RMS_t U_c(t) }{\max_t W }$	$J_{11} = \frac{RMS_t V_c(t) }{RMS_t V_{uc}(t) }$	$J_{10} = \frac{\ \frac{RMS}{t,i} x_{c,i}(t) \ }{\ \frac{RMS}{t,i} x_{uc,i}(t) \ }$

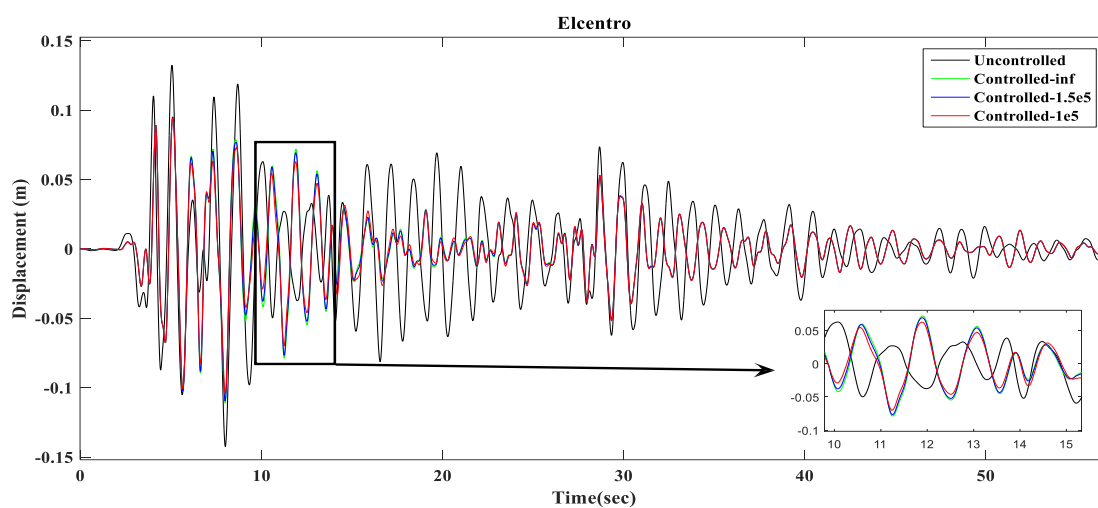
یادداشت: i = شماره طبقه، c = حالت کنترل شده، u_c = حالت کنترل نشده، t = زمان، max = حداکثر، RMS = ریشه میانگین مربعات، $\| \cdot \|$ = عملگر نرم دوم، $|\cdot|$ = عملگر قدر مطلق، x = تغییر مکان، \dot{x} = سرعت، \ddot{x} = شتاب، δ = نسبت دررفت، V = برش پایه، U = نیروی کنترلی، W = وزن سازه.

۵-۱-۴- پاسخ‌های مربوط به شاخص‌های عملکردی

نتایج مربوط به شاخص‌های عملکردی نیز در جدول‌های شماره ۷ و ۸ به صورت کامل ارائه شده‌اند. طبق این شاخص‌های عملکردی، در تمامی موارد شاهد کمتر از واحد بودن آنها هم در پاسخ‌های حداکثری و هم در RMS پاسخ‌ها هستیم. همانطور که از نتیجه این شاخص‌ها مشاهده می‌شود، شاخص‌های عملکردی با کاهش حداکثر ظرفیت نیروی کنترلی عملگر تغییرات محسوسی را در حوزه پاسخ‌های سازه نسبت به حالت بدون اعمال محدودیت کنترلی نداشته‌اند. برای نمونه، میزان تغییرات شاخص عملکردی نسبت دررفت (J1) برای زلزله السنترو و برای عملگرهای با محدودیت نیروی کنترلی U ۱,۵ و U نسبت به عملگر بدون محدودیت نیروی کنترلی به ترتیب برابر با ۴ و ۲ درصد بودند، در حالیکه میزان تغییرات برای شاخص عملکردی نیروی کنترلی (J6) برای همان حالت‌ها به ترتیب برابر با ۷۰ و ۷۸ درصد بودند. برای زلزله کوبه این مقادیر برای عملگرهای با محدودیت نیروی کنترلی U ۳ و ۲U نسبت به عملگر بدون محدودیت نیروی کنترلی برای شاخص (J1) به ترتیب برابر با ۴,۵ و ۶,۵ درصد و برای شاخص (J6) به ترتیب برابر با ۳۶ و ۵۹ درصد گزارش شدند. برای زلزله هاجینوهه این مقادیر برای عملگرهای با محدودیت نیروی کنترلی U ۶ و ۴U نسبت به عملگر بدون محدودیت نیروی کنترلی برای شاخص (J1) به ترتیب برابر با ۴,۴ و ۰,۷ درصد و برای شاخص (J6) به ترتیب برابر با ۳۶ و ۵۵ درصد گزارش شدند. برای زلزله نورث‌ریج این مقادیر برای عملگرهای با محدودیت نیروی کنترلی U ۳ و ۲U نسبت به عملگر بدون محدودیت نیروی کنترلی برای شاخص (J1) به ترتیب برابر با ۱ و ۴,۵ درصد و برای شاخص (J6) به ترتیب برابر با ۴۰ و ۶۰ درصد گزارش شدند. با تکیه بر این نتایج می‌توان به این نقطه نظر رسید که با کاهش ظرفیت نیروی عملگرهای کنترلی یا به عبارت دیگر با استفاده از عملگرهای کنترلی با ظرفیت کمتر نسبت به عملگرهای کنترلی با ظرفیت بیشتر که هزینه بیشتری هم دارند می‌توان به پاسخ‌های مطلوبی بدون صرف هزینه اضافی رسید که از دیدگاه اقتصادی می‌تواند مورد توجه باشد.

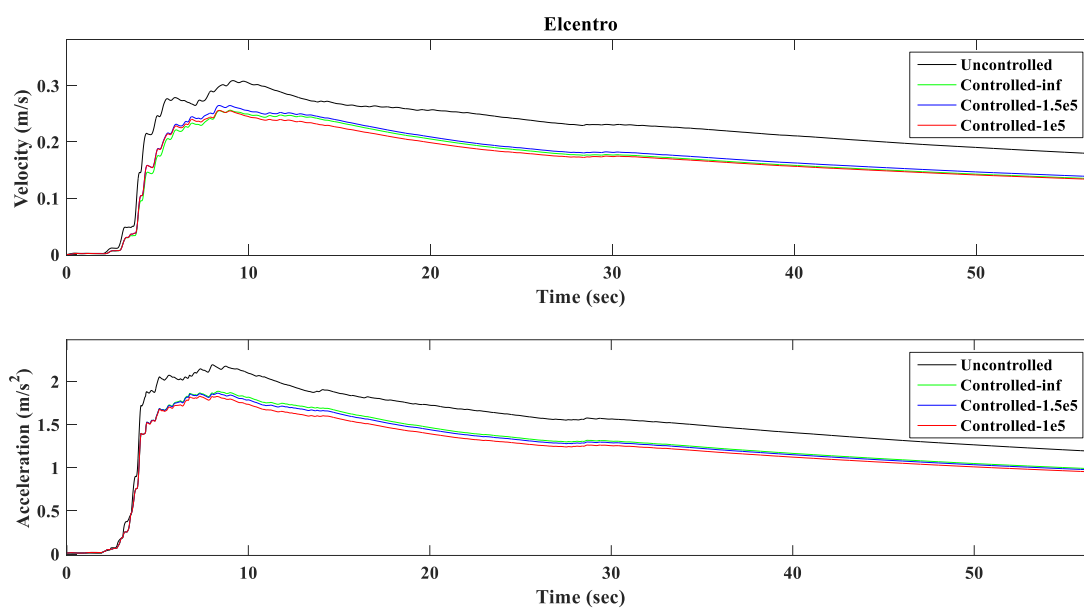
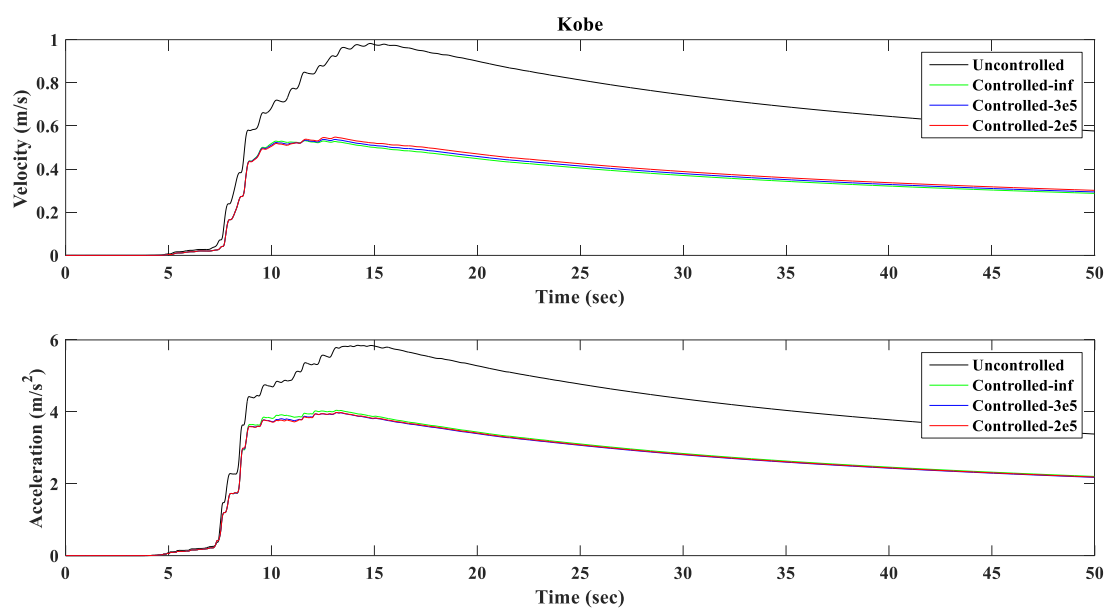


(الف)

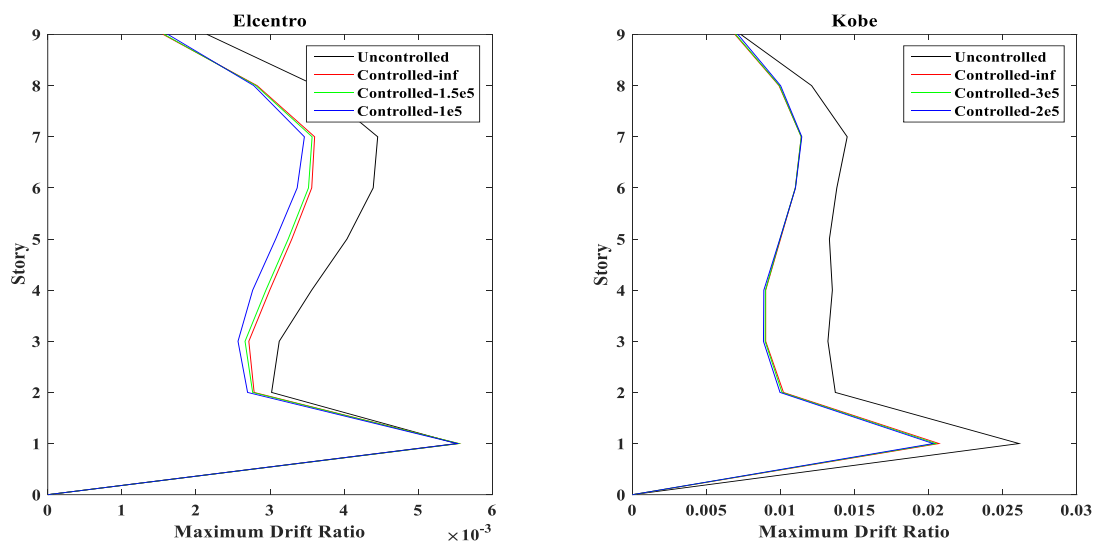


(ب)

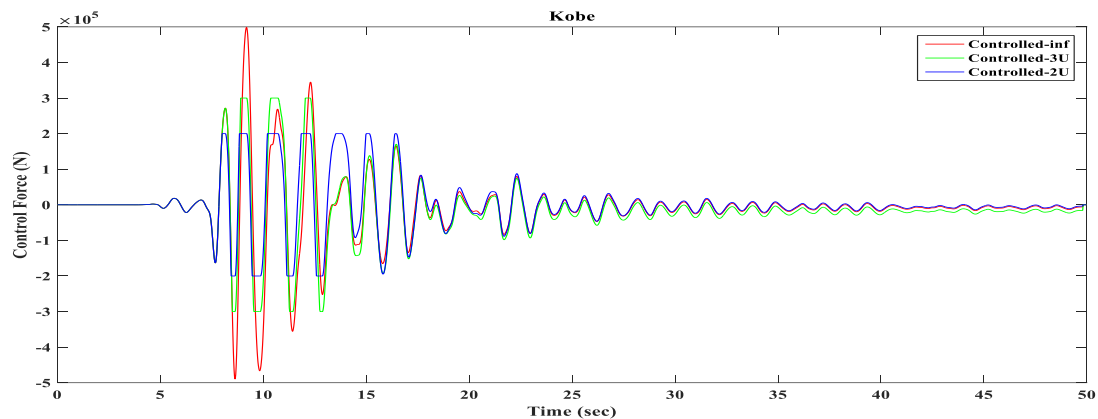
شکل ۴: تاریخچه زمانی تغییر مکان طبقه نهم برای زلزله‌های کوبه (الف) و السنترو (ب) در شرایط کنترل شده و کنترل نشده



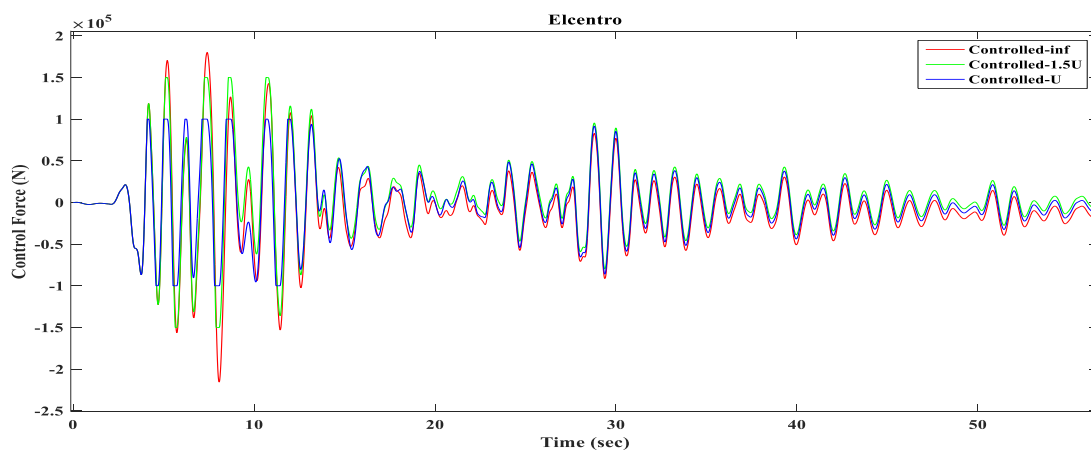
شکل ۵: تاریخچه زمانی RMS پاسخ‌های سرعت و شتاب طبقه نهم برای زلزله‌های کوبه (الف) و السنترو (ب) در شرایط کنترل شده و کنترل نشده



شکل ۶: نسبت دریفت طبقات برای زلزله‌های السنترو و کوبه در شرایط کنترل شده و کنترل نشده

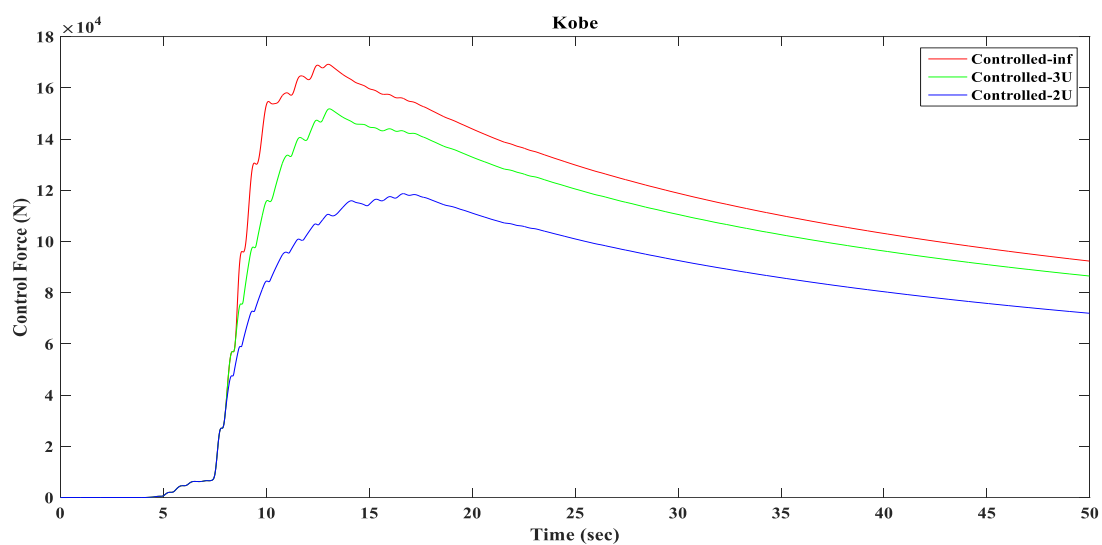


(الف)

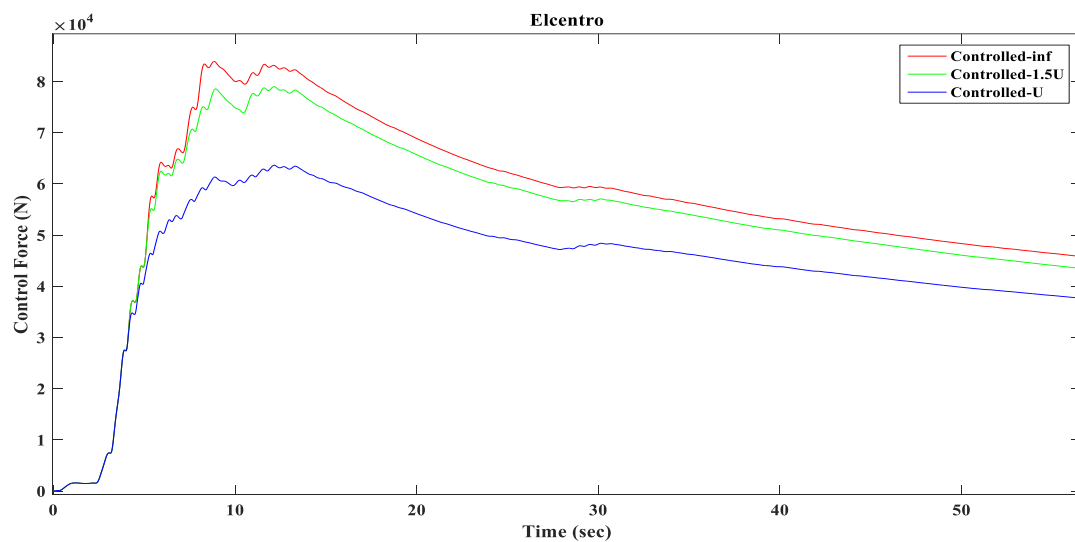


(ب)

شکل ۷: تاریخچه زمانی نیروی کنترلی میراگر جرمی تنظیم شونده فعال برای زلزله‌های کوبه (الف) و السنترو (ب)



(الف)



(ب)

شکل ۸: تاریخچه زمانی RMS پاسخ‌های نیروی کنترلی میراگر جرمی تنظیم شونده فعال برای زلزله‌های کوبه (الف) و السنترو (ب)

جدول ۷: تغییرات شاخص‌های عملکردی در سازه نه طبقه برای زلزله‌های دور از گسل

Performance Indexes	Far-Field Earthquakes					
	Elcentro			Hachinohe		
	W/O	1.5U	U	W/O	6U	4U
J1	۰,۸۲۴	۰,۸۱۴	۰,۷۸۶	۰,۷۹۸	۰,۸۵۰	۰,۸۶۹
J2	۰,۹۲۲	۰,۹۲۲	۰,۹۲۱	۰,۹۴۴	۰,۹۴۲	۰,۹۳۷
J3	۰,۸۷۵	۰,۸۶۵	۰,۸۴۷	۰,۸۰۵	۰,۷۹۳	۰,۸۰۰
J4	۰,۸۲۱	۰,۸۱۰	۰,۷۸۰	۰,۸۳۲	۰,۸۸۰	۰,۸۵۱
J5	۰,۹۹۱	۰,۹۹۱	۰,۹۹۱	۰,۹۳۶	۰,۹۳۶	۰,۹۳۶
J6	۰,۰۰۵	۰,۰۰۳	۰,۰۰۲	۰,۰۲۲	۰,۰۱۴	۰,۰۰۹
J7	۰,۷۲۹	۰,۷۲۰	۰,۶۹۷	۰,۸۱۴	۰,۸۳۷	۰,۹۱۳
J8	۰,۹۳۵	۰,۹۲۶	۰,۹۰۶	۰,۹۵۷	۰,۹۲۷	۰,۹۶۹
J9	۰,۸۰۹	۰,۷۹۶	۰,۷۶۳	۰,۹۶۴	۰,۹۳۵	۰,۹۰۴
J10	۰,۷۳۳	۰,۷۲۱	۰,۶۹۰	۰,۸۱۳	۰,۸۲۰	۰,۸۷۳
J11	۰,۹۲۷	۰,۹۲۰	۰,۹۰۳	۰,۹۷۶	۰,۹۷۰	۰,۹۷۵
J12	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷	۰,۰۰۶

جدول ۸: تغییرات شاخص‌های عملکردی در سازه نه طبقه برای زلزله‌های نزدیک به گسل

Performance Indexes	Near-Field Earthquakes					
	Northridge			Kobe		
	W/O	3U	2U	W/O	3U	2U
J1	۰,۷۱۱	۰,۷۴۰	۰,۷۲۹	۰,۷۶۱	۰,۷۵۸	۰,۷۵۶
J2	۰,۸۴۰	۰,۸۲۹	۰,۸۳۳	۰,۹۳۹	۰,۹۳۹	۰,۹۴۱
J3	۰,۷۹	۰,۷۷۴	۰,۷۷۶	۰,۸۹۸	۰,۸۹۱	۰,۸۸۲
J4	۰,۶۱۰	۰,۶۱۱	۰,۶۲۰	۰,۷۰۳	۰,۶۹۸	۰,۶۹۳
J5	۰,۷۵۹	۰,۷۵۹	۰,۷۵۹	۰,۹۷۳	۰,۹۷۳	۰,۹۷۱
J6	۰,۰۲۳	۰,۰۰۷	۰,۰۰۵	۰,۰۱۱	۰,۰۰۷	۰,۰۰۵
J7	۰,۷۲۰	۰,۷۳۹	۰,۷۹۲	۰,۵۰۷	۰,۵۲۷	۰,۵۵۰
J8	۰,۹۲۳	۰,۸۱۰	۰,۸۲۳	۰,۷۳۹	۰,۷۴۰	۰,۷۴۴
J9	۰,۸۱۹	۰,۷۳۴	۰,۷۷۱	۰,۵۳۰	۰,۵۴۰	۰,۵۵۲
J10	۰,۷۰۳	۰,۶۸۵	۰,۷۳۷	۰,۴۶۵	۰,۴۸۳	۰,۵۰۴
J11	۰,۸۸۷	۰,۸۲۷	۰,۸۵۸	۰,۷۱۶	۰,۷۲۶	۰,۷۳۵
J12	۰,۰۰۵	۰,۰۰۳	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از ایده کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن اشباع عملگر کنترلی برای کنترل فعال یک سازه ۹ طبقه فولادی مبنا (SAC) و مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال واقع در طبقه بام استفاده شده است. برای تخمین دقیق حالت‌های سیستم نیز از الگوریتم کالمن فیلتر خطی بهره برده شده است. برای بررسی کارایی روش مورد نظر از چهار زلزله دور و نزدیک از گسل مبنا با عناوین السنترو، هاجینوهه، نورثریج، و کوبه جهت بارگذاری سیستم سازه‌ای مذکور استفاده شده است. برای بررسی میزان اثرپذیری پاسخ‌های لرزه‌ای سازه از ظرفیت نیروی کنترلی حداکثر عملگر از عملگرهایی با ظرفیت‌های مختلف بهره برده شده است. در ادامه، فرآیند کنترلی

ارائه شده توسط یک سری از شاخص‌های عملکردی و پاسخ‌های سازه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصله نشان دهنده کارایی مناسب فرآیند کنترلی پیشنهادی در تمام موارد مورد بررسی بودند. ضمن اینکه بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان برای اقتصادی‌تر شدن فرآیند کنترل سیستم سازه‌ای از عملگرهایی با ظرفیت کمتر و با کارایی تقریباً برابر با عملگرهای با ظرفیت‌های بالا استفاده کرد. برای نمونه میزان تغییرات شاخص عملکردی نسبت دریافت (J1) برای زلزله السنترو و برای عملگرهای با محدودیت نیروی کنترلی در بیشترین حالت برابر با ۴ درصد بود، در حالیکه میزان تغییرات برای شاخص عملکردی نیروی کنترلی (J6) در بیشترین حالت برابر با ۷۰ و ۷۸ درصد بود. میزان این مقادیر برای زلزله کوبه به ترتیب برابر با ۹ و ۵۹ درصد، برای زلزله هاجینوهه به ترتیب برابر با ۰٫۷ و ۵۵ درصد، و برای زلزله نورث‌ریج به ترتیب برابر با ۴٫۵ و ۶۰ درصد بودند.

مراجع

- [1] Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media.
- [2] Mei, G., Kareem, A., & Kantor, J. C. (2001). Real-time model predictive control of structures under earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(7), 995-1019.
- [3] Mei, G., Kareem, A., & Kantor, J. C. (2002). Model predictive control of structures under earthquakes using acceleration feedback. *Journal of engineering Mechanics*, 128(5), 574-585.
- [4] Mei, G., Kareem, A., & Kantor, J. C. (2004). Model predictive control of wind-excited building: Benchmark study. *Journal of engineering mechanics*, 130(4), 459-465.
- [5] Lana, C., & Rotea, M. (2008). Desensitized model predictive control applied to a structural benchmark problem. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 13188-13193.
- [6] Yang, C. S. W., Chung, L. L., Wu, L. Y., & Chung, N. H. (2011). Modified predictive control of structures with direct output feedback. *Structural Control and Health Monitoring*, 18(8), 922-940.
- [7] Chen, Y., Zhang, S., Peng, H., Chen, B., & Zhang, H. (2017). A novel fast model predictive control for large-scale structures. *Journal of Vibration and Control*, 23(13), 2190-2205.
- [8] Peng, H., Li, F., Zhang, S., & Chen, B. (2017). A novel fast model predictive control with actuator saturation for large-scale structures. *Computers & Structures*, 187, 35-49.
- [9] Peng, H., Chen, Y., Li, E., Zhang, S., & Chen, B. (2018). Explicit expression-based practical model predictive control implementation for large-scale structures with multi-input delays. *Journal of Vibration and Control*, 24(12), 2605-2620.
- [10] Farina, M., Giolioni, L., & Scattolini, R. (2016). Stochastic linear model predictive control with chance constraints—a review. *Journal of Process Control*, 44, 53-67.
- [11] Mayne, D. (2016). Robust and stochastic model predictive control: Are we going in the right direction?. *Annual Reviews in Control*, 41, 184-192.
- [12] Mesbah, A. (2016). Stochastic model predictive control: An overview and perspectives for future research. *IEEE Control Systems Magazine*, 36(6), 30-44.
- [13] Heirung, T. A. N., Paulson, J. A., O'Leary, J., & Mesbah, A. (2018). Stochastic model predictive control—how does it work?. *Computers & Chemical Engineering*, 114, 158-170.
- [14] Seron, M. M., Goodwin, G. C., & Carrasco, D. S. (2019). Stochastic model predictive control: Insights and performance comparisons for linear systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29(15), 5038-5057.
- [15] Patan, K. (2018). Two stage neural network modelling for robust model predictive control. *ISA transactions*, 72, 56-65.
- [16] Luo, J., Jin, K., Wang, M., Yuan, J., & Li, G. (2017). Robust entry guidance using linear covariance-based model predictive control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(1), 1729881416687503.
- [17] Lee, J. H. (2014). From robust model predictive control to stochastic optimal control and approximate dynamic programming: A perspective gained from a personal journey. *Computers & chemical engineering*, 70, 114-121.
- [18] Simon, D. (2006). *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons.
- [19] Gibbs, B. P. (2011). *Advanced Kalman filtering, least-squares and modeling: a practical handbook*. John Wiley & Sons.
- [20] Song, Y., Fang, X., & Diao, Q. (2016). Mixed H_2/H_∞ distributed robust model predictive control for polytopic uncertain systems subject to actuator saturation and missing measurements. *International Journal of Systems Science*, 47(4), 777-790.
- [21] Camacho, E. F., & Alba, C. B. (2013). *Model predictive control*. Springer Science & Business Media.

- [22] Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer Jr, B. F., & Dyke, S. J. (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of engineering mechanics*, 130(4), 366-385.
- [23] Cha, Y.J. (2010). *Structural control architecture optimization for 3-D systems using advanced multi-objective genetic algorithm*. Doctoral dissertation. Texas A & M University.
- [24] Cha, Y.J., Agrawal, A.K., Kim, Y., & Raich, A.M. (2012). Multi-objective genetic algorithms for cost-effective distributions of actuators and sensors in large structures. *Expert Systems with Applications*, 39(9), 7822-7833.