

Active Control of Nonlinear Tendon Cable Structures: A Switching Control Approach

Saeid kyanzadeh ¹, *Phd candidate*, Saeed Tavakoli Afshari ², *Associate Professor*, Naser Pariz ³,
Professor, Hamed Ghohani Arab ⁴, *Associate Professor*

¹ Faculty of Electrical and computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
kyansaeid@pgs.usb.ac.ir

² Faculty of Electrical and computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
tavakoli@ece.usb.ac.ir

³ Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
n-pariz@um.ac.ir

⁴ Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
ghohani@eng.usb.ac.ir

Received: 11 December 2023

Revised: 29 January 2024

Accepted: 13 February 2024

Abstract:

The use of active controllers is one of the effective methods of seismic control in structures. Using this method, the control force can be adjusted at any time to the external force applied to the structure in such a way that the structure is subjected to the least possible stress or deformation. One of the important issues in seismic control of structures is the problem of nonlinear behavior of the system. In this study, a structure with a nonlinear hard tendon cable is controlled by a new control method called switching control. In this control method, the nonlinear problem is transformed into several linear problems and an optimal controller is designed for each segment or subsystem. By specifying the range and boundary of each segment, the controller corresponding to a subsystem is then activated accordingly. The advantage of this control method over other control methods applied to nonlinear systems is that in the latter the controller should be designed online and, hence, a high volume of computations is required. Using the switching control method, however, the pre-designed controllers are selected when subsystems are changed. Finally, the efficiency of the proposed method is illustrated by several numerical examples.

Keywords: Active control, Tendon cable, Switching control, Nonlinear structures, Seismic control.

Corresponding Author: Dr. Saeed Tavakoli Afshari

Corresponding Author Address: Faculty of Electrical and computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

کنترل فعال سازه‌های دارای کابل کششی با رفتار غیر خطی با استفاده از کنترل سوئیچینگ

سعید کیان زاده^۱، دانشجوی دکتری، سعید توکلی افشاری^۲، دانشیار، ناصر پریز^۳، استاد، حامد قوهانی عرب^۴، دانشیار

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران،

kyansaeid@pgs.usb.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

tavakoli@ece.usb.ac.ir

^۳ استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

n-pariz@um.ac.ir

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

ghohani@eng.usb.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

چکیده: استفاده از کنترل‌کننده‌های فعال یکی از روشهای موثر کنترل لرزه‌ای در سازه‌ها می‌باشد. با استفاده از روش کنترل فعال می‌توان در هر لحظه متناسب با نیروی خارجی اعمال شده به سازه، نیروی کنترلی را به گونه‌ای تنظیم نمود که سازه کمترین تنش یا تغییر شکل ممکن را تحمل کند. یکی از مسائل مهم در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها مسئله رفتار غیرخطی سیستم می‌باشد. در این پژوهش سازه‌ای با کابل کششی که سختی غیرخطی دارد، توسط یک روش جدید کنترلی به نام کنترل سوئیچینگ کنترل می‌شود. در این روش کنترلی، مساله غیرخطی به چندین مساله خطی تبدیل شده و برای هر بخش یا زیرسیستم خطی، یک کنترل‌کننده بهینه طراحی می‌شود. سپس با مشخص کردن محدوده و مرز هر قسمت، به محض فعال شدن هر زیرسیستم، کنترل‌کننده مربوط به همان زیرسیستم فعال شده و با تغییر زیر سیستم فعال، کنترل‌کننده نیز متناسب با آن تغییر می‌کند. مزیت این روش کنترلی نسبت به سایر روشهای کنترلی که برای سیستمهای غیرخطی بکار گرفته می‌شود در این است که در روشهای کنترلی دیگر، طراحی کنترل‌کننده در طی زمان تحریک در لحظه انجام شده و نیاز به حجم بالای محاسبات در هر لحظه می‌باشد. اما در روش کنترل سوئیچینگ، کنترل‌کننده‌های سیستم از قبل طراحی شده و در زمان بارگذاری فقط عمل سوئیچینگ بین کنترل‌کننده‌ها انجام می‌شود. در انتها کارایی این روش با چند مثال عددی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: کنترل فعال، کابل کششی، کنترل سوئیچینگ، سازه غیرخطی، کنترل لرزه‌ای.

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعید توکلی افشاری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

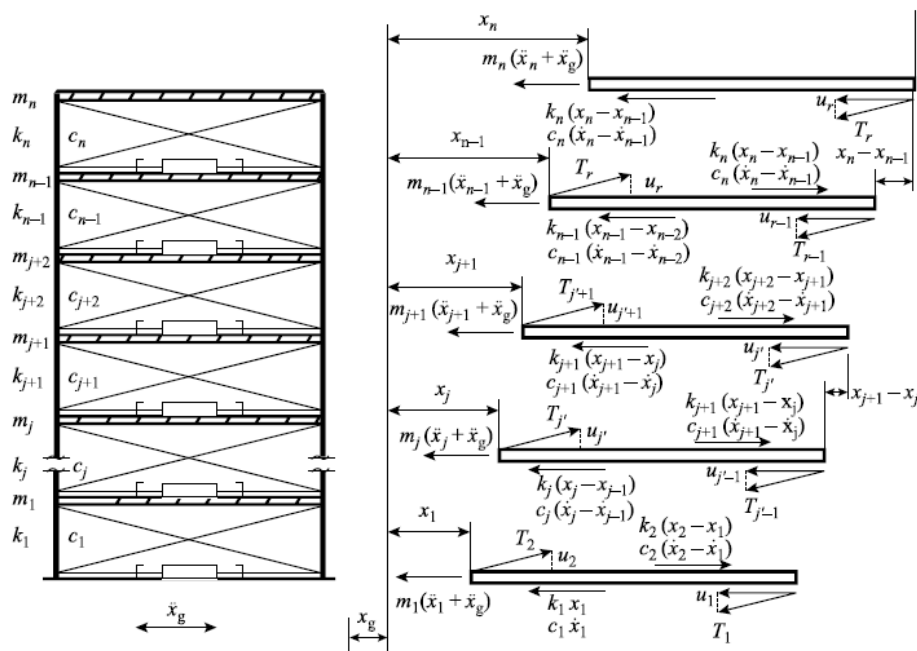
همواره مسئله کنترل ارتعاشات سازه بر اثر نیروهای خارجی و پدیده‌های طبیعی مانند زلزله و باد یکی از مسائل مهم در طراحی سازه‌ها بوده است و در نتیجه همواره حجم قابل توجهی از مطالعات در این حوزه انجام شده است. یکی از روشهای کنترل این ارتعاشات، استفاده از کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. هدف از بکارگیری کنترل‌کننده‌ها این است که بدون استفاده از روشهایی مانند تقویت سازه و یا افزایش سختی سازه بتوان اثرات ناشی از وقوع پدیده‌هایی مانند زلزله و باد را در سازه کاهش داد. این کنترل‌کننده‌ها عمدتاً در سه دسته کنترل‌کننده‌های غیرفعال، نیمه فعال و فعال دسته بندی می‌شوند [۱]. در کنترل غیرفعال، عامل کنترلی در محل مناسبی از سازه قرار گرفته و در زمان تحریک سازه عملکرد کنترلی خود را انجام می‌دهد. این نوع کنترل‌کننده‌ها دارای ساختار ساده‌ای هستند و مشخصات آنها در طول زمان تحریک قابل تغییر نمی‌باشد و به همین دلیل کاربرد آنها به دسته خاصی از سازه‌ها محدود می‌شود [۲]. نوع دیگری از کنترل‌کننده‌ها، کنترل‌کننده‌های نیمه فعال هستند. این نوع کنترل‌کننده‌ها در مقایسه با کنترل‌کننده‌های غیرفعال از سازگاری بالاتری برخوردار هستند و برای محدوده وسیعتری از بارگذاری‌ها کارایی دارند اما می‌توانند تا حداکثر ظرفیتی که برای آنها تعیین شده اند عمل کنند [۳]. به دلیل نیاز به سازگاری بالاتر و توانایی عملکرد در بارگذاری‌های شدید، معمولاً از کنترل‌کننده‌های فعال استفاده می‌شود. این دسته از کنترل‌کننده‌ها با استفاده از یک منبع انرژی خارجی نیروهای کنترلی لازم را به هنگام تحریک سازه اعمال می‌کنند. در سیستم کنترل فعال با توجه به اطلاعات دریافتی از سنسورها و برطبق قانون کنترلی در نظر گرفته شده، نیروهای کنترلی مناسب برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه توسط محرک‌ها اعمال می‌شود [۴]. الگوریتم‌های کنترلی زیادی برای این نوع کنترل‌کننده‌ها وجود دارد. هدف این الگوریتم‌ها تعیین نیروی کنترل بهینه برای کاهش پاسخ سازه در برابر نیروهای وارده می‌باشد. نیروی کنترلی بر اساس دینامیک سیستم و روش کنترلی انتخاب شده تعیین و توسط سیستم کنترلی به سازه اعمال می‌شود. در طراحی کنترل‌کننده، دینامیک سیستم بصورت ثابت فرض می‌شود. اگر دینامیک سیستم تغییر کند کنترل‌کننده طراحی شده نیز باید متناسب با آن تغییر نماید تا بتواند پاسخ کنترلی مناسبی در خروجی تولید کند. یکی از مسائل مهم در طراحی کنترل‌کننده‌ها تغییر دینامیک سیستم در طی بارگذاری می‌باشد. در طول بارگذاری رفتار برخی پارامترهای سیستم از حالت خطی خارج شده و بصورت غیرخطی رفتار می‌کنند. برای داشتن عملکرد کنترلی مناسب باید این رفتار غیرخطی لحاظ شود. در روشهای استفاده شده تاکنون برای کنترل سازه‌های غیرخطی، رفتارهای غیرخطی سیستم در بازه‌های زمانی مشخص بصورت تکه خطی تقریب زده شده و در هر بازه زمانی برطبق روش کنترلی در نظر گرفته شده برای سیستم طراحی کنترل‌کننده انجام می‌شود [۵-۷]. عیب اصلی این روش‌ها نیاز به انجام حجم زیاد محاسبات و پردازش در طی زمان تحریک سازه می‌باشد. در این روشها کنترل‌کننده از قبل طراحی نشده و در زمان بارگذاری سازه پارامترهای کنترل‌کننده طراحی می‌شوند. از آنجاییکه انجام این محاسبات زمانبر می‌باشد باعث تاخیر در اعمال نیروی کنترلی می‌گردد و از کارایی روش‌های کنترل فعال به شدت کاسته می‌شود. کنترل‌کننده فعال کششی یک از ابزارهای کنترلی فعال می‌باشد. این نوع کنترل‌کننده با استفاده از المانهای کششی و دستگاه هیدرولیکی پاسخ سازه را کنترل می‌کند [۸-۹]. اساس کار این نوع سیستم شبیه سیستم کنترل غیرفعال و یا نیمه فعال است با این تفاوت که یک عملکرد فعال و یا یک محرک به آن اضافه شده است که سیگنال کنترلی به آن اعمال می‌شود.

روش کنترل سوئیچینگ یکی از روشهای نسبتاً جدید کنترلی است که در بسیاری از سیستم‌های عملی کاربرد پیدا کرده است. این روش کنترلی در مورد سیستم‌هایی که دارای چند زیرسیستم هستند قابل استفاده است. در این روش برای هر زیر سیستم یک کنترل‌کننده بهینه از قبل طراحی شده و به محض تغییر دینامیک سیستم و فعال شدن هر زیرسیستم، کنترل‌کننده مربوطه توسط سیگنال سوئیچینگ فعال می‌شود. از آنجاییکه در این روش، طراحی کنترل‌کننده قبل از زمان بارگذاری انجام شده است، هیچ تاخیری در اعمال بار کنترلی در زمان اعمال بار شدید خارجی وجود ندارد. بنابراین مهمترین نقیصه سیستم‌های کنترل فعال در صورت استفاده از این روش، اصلاح خواهد گردید. در روش ارائه شده در این مقاله منحنی غیر خطی ضریب سختی بصورت چند ناحیه یا زیرسیستم خطی در نظر گرفته شده است. برای هر زیر سیستم با یک الگوریتم کنترلی مناسب که در این مقاله از روش LQR استفاده شده است، یک کنترل‌کننده بهینه طراحی شده و بنابراین برای هر زیر سیستم یک کنترل‌کننده متفاوت وجود خواهد داشت. در هر لحظه از زمان با استفاده از اطلاعات بدست آمده از سنسورها سیگنال سوئیچ فعال می‌شود.

سیگنال سوئیچ، فرمان فعال شدن کنترل‌کننده متناسب با زیرسیستم فعال که از قبل طراحی شده است را صادر کرده و کنترل‌کننده، سیگنال کنترلی مناسب را تولید می‌کند.

۲- فرمول بندی مساله

یک سازه n طبقه مجهز شده به کنترل‌کننده‌های کششی که در معرض بارگذاری زلزله به صورت شتاب اعمالی به تراز پایه قرار دارد، در شکل (۱) نشان داده شده است. معادلات حرکت سازه کنترل شده با کابل کششی به صورت رابطه (۱) می‌باشند.



شکل (۱): سازه n طبقه مجهز شده به کنترل‌کننده‌های کششی [۱۰]

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = -u_1 + u_2 - m_1 \ddot{x}_g \\ \dots \\ m_i \ddot{x}_i + c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - c_{i+1} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + k_i (x_i - x_{i-1}) - k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) = -u_i + u_{i+1} - m_i \ddot{x}_g \\ \dots \\ m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n (x_n - x_{n-1}) = -u_n - m_n \ddot{x}_g \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow [M] \ddot{x}(t) + [C] \dot{x}(t) + [K] x(t) = [\gamma] u(t) + [\delta] \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

در رابطه (۱) $[M]$ ، $[K]$ و $[C]$ به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی سازه می‌باشند که هر سه ماتریس‌هایی از مرتبه $n \times n$ هستند. $x(t)$ بردار تغییر مکان طبقات، $\dot{x}(t)$ بردار سرعت طبقات، $\ddot{x}(t)$ بردار شتاب طبقات و $u(t)$ بردار نیروهای کنترلی است که همگی از مرتبه $n \times 1$ می‌باشند. ماتریس موقعیت کنترل‌کننده و δ بردار ضریب شتاب زلزله است که هر دو از مرتبه $n \times 1$ هستند [۱۰]. برای حل این معادلات می‌توان معادلات را با تعریف متغیر جدید $Z(t)$ بصورت رابطه (۲) نشان داد.

$$Z(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \Rightarrow \dot{Z}(t) = [A] Z(t) + [B_u] u(t) + [B_r] \ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

این فرم معادلات، معادلات حالت نامیده می‌شود و به راحتی می‌توان این معادلات را حل کرده و متغیر $Z(t)$ که در حقیقت شامل $x(t)$ و $\dot{x}(t)$ می‌باشد را بدست آورد. ماتریس های $[A]$ ، $[B_u]$ و $[B_r]$ بصورت رابطه (۳) می‌باشند.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\gamma \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\delta \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad (3)$$

قانون کنترلی بصورت $u(t) = -G.Z(t)$ در نظر گرفته شده است. در این رابطه G ماتریس بهره کنترلی است که با حل معادله ریکاتی بصورت رابطه (۴) بدست می‌آید.

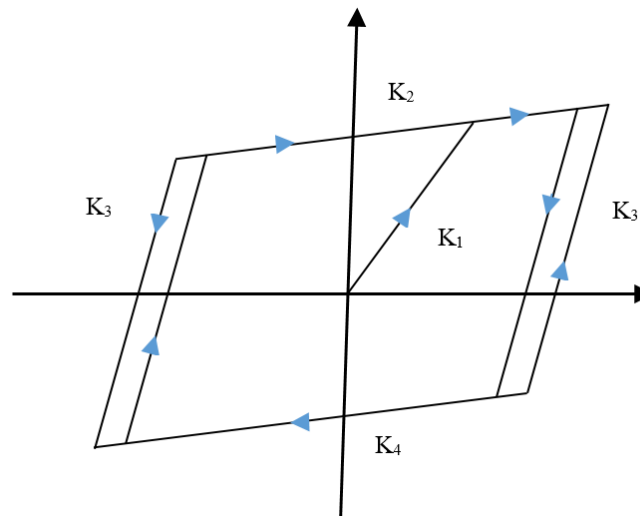
$$P.A + A^T.P - P.B_u.R^{-1}.P + Q = 0$$

$$G = R^{-1}.B_u^T.P \quad (4)$$

تابع هدف در نظر گرفته شده به صورت رابطه (۵) می‌باشد. در این رابطه با تنظیم ماتریس های وزنی Q و R می‌توان وزن مینم ساز یا نیروی کنترلی را تنظیم نمود.

$$\int_0^{\infty} \{ (z(t)^T Q z(t)) + (u(t)^T R u(t)) \} dt \quad (5)$$

رفتار غیر خطی کابل کششی به صورت منحنی دوطبقی فرض شده است که منحنی هیستریزس آن به صورت شماتیک مطابق شکل (۲) خواهد بود.



شکل (۲): منحنی هیستریزس رفتار غیر خطی کابل کششی

K ضریب سختی کابل کششی می‌باشد که به دلیل خاصیت غیرخطی و بسته به مقدار کشش کابل مقدار آن تغییر می‌کند. در این پژوهش رفتار غیر خطی مقدار K بصورت چهار مقدار متفاوت K_1 ، K_2 ، K_3 و K_4 در نظر گرفته شده و بسته به مقدار کشش در هر ناحیه متفاوت است.

با توجه به رابطه (۳) با تغییر مقدار K ، ماتریس A و در نتیجه معادلات دینامیکی توصیف کننده سیستم و همچنین ماتریس بهره کنترلی دارای مقادیر متفاوتی هستند. برای هر ناحیه و به ازای هر مقدار K معادلات دینامیکی سیستم بدست آمده و با استفاده از روش LQR یک کنترل کننده بهینه طراحی شده است. به محض فعال شدن هر ناحیه، عمل سوئیچینگ انجام شده و کنترل کننده مربوط به هر ناحیه در سیستم فعال می‌شود.

۳- سیستم‌های سوئیچینگ

فرم کلی یک سیستم سوئیچینگ خطی به صورت رابطه (۶) می‌باشد. در این رابطه ماتریس‌های A, B, C ماتریس‌های تعریف کننده سیستم هستند و σ سیگنال سوئیچ است. [۱۱]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_{\sigma}x(t) + B_{\sigma}u(t) \\ y(t) &= C_{\sigma}x(t) \\ \sigma &\in \{1, 2, \dots, m\}\end{aligned}\quad (6)$$

در رابطه (۶) سیگنال سوئیچ می‌تواند در هر لحظه از زمان، یکی از مقادیر یک تا m را بگیرد و در نتیجه معادلات دینامیکی سیستم بصورت رابطه (۷) خواهد بود.

$$(A, B, C) \in \{(A_1, B_1, C_1), (A_2, B_2, C_2), \dots, (A_m, B_m, C_m)\} \quad (7)$$

با فرض اینکه در لحظه $t = t_0$ زیر سیستم $\dot{I}_0$ فعال شود و متغیر $x(t)$ دارای مقدار اولیه x_0 باشد معادلات سیستم بصورت رابطه (۸) نشان داده می‌شود.

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 u(t) \quad x(t_0) = x_0 \quad t \in [t_0, t_1] \quad (8)$$

جواب این معادله از رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$\varphi(t; t_0, x_0, u, \sigma) = e^{A_0(t-t_0)} x_0 + \int_{t_0}^t e^{A_0(t-\tau)} B_0 u(\tau) d\tau \quad t \in [t_0, t_1] \quad (9)$$

$$x_1 = x(t_1) = \varphi(t_1; t_0, x_0, u, \sigma) = e^{A_0(t_1-t_0)} x_0 + \int_{t_0}^{t_1} e^{A_0(t_1-\tau)} B_0 u(\tau) d\tau$$

حال اگر در لحظه $t = t_1$ زیر سیستم $\dot{I}_1$ فعال شود، متغیر $x(t)$ دارای مقدار اولیه x_1 می‌باشد و معادلات سیستم بصورت رابطه (۱۰) نشان داده شده و جواب این معادله بصورت رابطه (۱۱) می‌باشد.

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \quad x(t_1) = x_1 \quad t \in [t_1, t_2] \quad (10)$$

$$\varphi(t; t_0, x_0, u, \sigma) = e^{A_1(t-t_1)} x_1 + \int_{t_1}^t e^{A_1(t-\tau)} B_1 u(\tau) d\tau \quad (11)$$

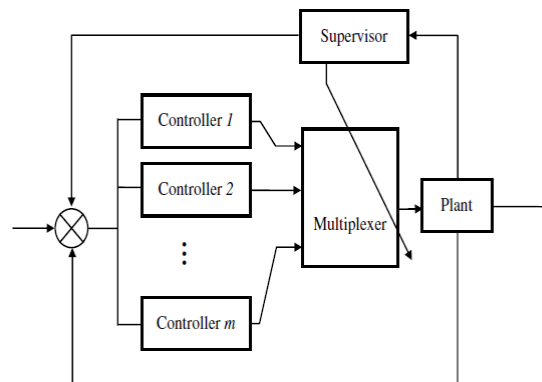
$$= e^{A_1(t-t_1)} e^{A_0(t_1-t_0)} x_0 + e^{A_1(t-t_1)} \int_{t_0}^{t_1} e^{A_0(t_1-\tau)} B_0 u(\tau) d\tau + \int_{t_1}^t e^{A_1(t-\tau)} B_1 u(\tau) d\tau \quad t \in [t_0, t_1]$$

با ادامه این روال و با فرض اینکه در بازه $t \in [t_k, t_{k+1})$ زیر سیستم $\dot{I}_k$ فعال است، جواب معادلات بصورت رابطه (۱۲) خواهد بود و با استفاده از این رابطه در حالت کلی می‌توان مقدار متغیر $x(t)$ را در هر لحظه از زمان بدست آورد.

$$\varphi(t; t_0, x_0, u, \sigma) = e^{A_k(t-t_k)} e^{A_{k-1}(t_k-t_{k-1})} \dots e^{A_1(t_2-t_1)} e^{A_0(t_1-t_0)} x_0 + e^{A_k(t-t_k)} \dots e^{A_1(t_2-t_1)} \int_{t_0}^{t_1} e^{A_0(t_1-\tau)} B_0 u(\tau) d\tau \quad (12)$$

$$+ \dots + e^{A_k(t-t_k)} \int_{t_{k-1}}^{t_k} e^{A_{k-1}(t_k-\tau)} B_{k-1} u(\tau) d\tau + \int_{t_k}^t e^{A_k(t-\tau)} B_k u(\tau) d\tau \quad t \in [t_k, t_{k+1})$$

به دلیل اینکه دینامیک سیستم در طول زمان ثابت نیست، کنترل کننده طراحی شده برای هر زیرسیستم نیز متفاوت است. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است برای سیستم، m کنترل کننده طراحی شده است که m برابر تعداد زیرسیستم‌های سیستم می‌باشد. با توجه به اطلاعات بدست آمده توسط سنسورها، سیگنال سوئیچ در هر لحظه از زمان کنترل کننده مناسب را به سیستم وارد می‌کند [۱۱].



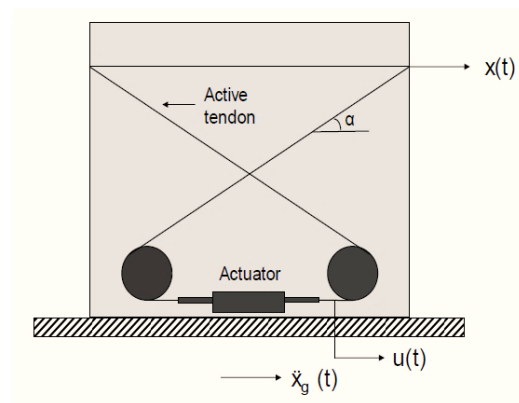
شکل (۳): سیستم سوئیچینگ

تعداد زیرسیستمها در این مقاله برابر تعداد ناحیه‌های منحنی k و مساوی ۴ می‌باشد. همچنین شرطهای سوئیچ به صورت رابطه (۱۳) در نظر گرفته شده است:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq x \leq x_1 \ \& \ x' > 0 \\ 2 & \text{if } -x_2 \leq x \leq x_3 \ \& \ x' > 0 \\ 3 & \text{if } -x_3 \leq x \leq x_3 \ \& \ x' < 0 \\ 4 & \text{if } -x_2 \leq x \leq x_3 \ \& \ x' < 0 \end{cases} \quad (13)$$

۴-مثال عددی

به منظور بررسی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه، یک قاب بصورت شکل (۴) با مشخصات جدول (۱) در نظر گرفته شده است:



شکل (۴): قاب مجهز به کنترل کننده کششی فعال

جدول (۱): مشخصات قاب مجهز به کنترل کننده کششی فعال

m	C	K_1	K_2	K_3	K_4
$2.38 \times 10^4 \text{ kg}$	$6.54 \times 10^3 \text{ N.s/m}$	$5.37 \times 10^6 \text{ N/m}$	$1.75 \times 10^6 \text{ N/m}$	$5.37 \times 10^6 \text{ N/m}$	$1.75 \times 10^6 \text{ N/m}$

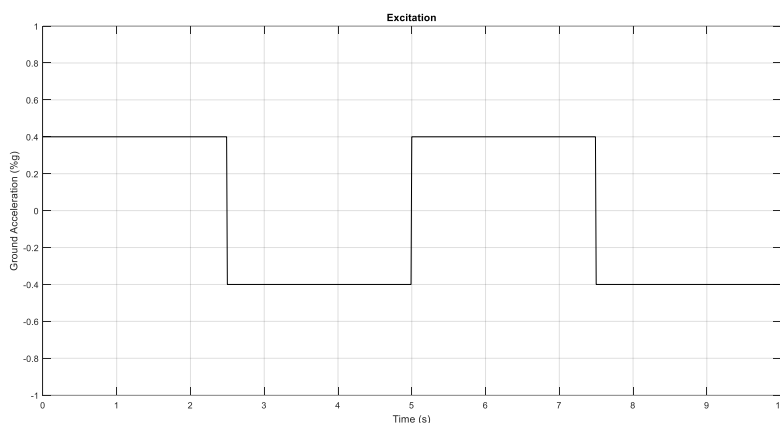
تغییرات مقدار ضریب سختی K ، بصورت شکل (۲) فرض شده است. این شکل به چهار ناحیه متفاوت تقسیم بندی شده است که در نتیجه سیستم دارای ۴ زیر سیستم متفاوت می‌باشد. برای هر زیر سیستم با روش LQR یک کنترل کننده بهینه طراحی شده است. شرایط ورود به هر ناحیه بصورت رابطه (۱۴) می‌باشد:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq x \leq 0.01 \& x' > 0 \\ 2 & \text{if } -0.03 \leq x \leq 0.05 \& x' > 0 \\ 3 & \text{if } -0.05 \leq x \leq 0.05 \& x' < 0 \\ 4 & \text{if } -0.03 \leq x \leq 0.05 \& x' < 0 \end{cases} \quad (۱۴)$$

برای بررسی اثر کارایی کنترل‌کننده طراحی شده، پاسخ سازه برای چهار ورودی شبیه‌سازی شده است.

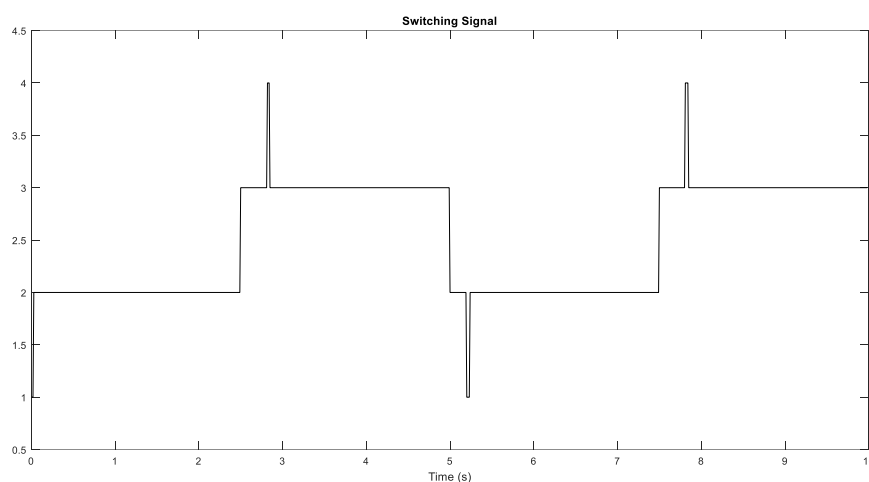
۴-۱- ورودی مربعی

برای بررسی کارایی کنترل‌کننده ابتدا ورودی مربعی متقارن با مقدار ۰/۴ شتاب گرانش زمین مطابق شکل (۵) به مدت ۱۰ ثانیه به سازه اعمال شده است.



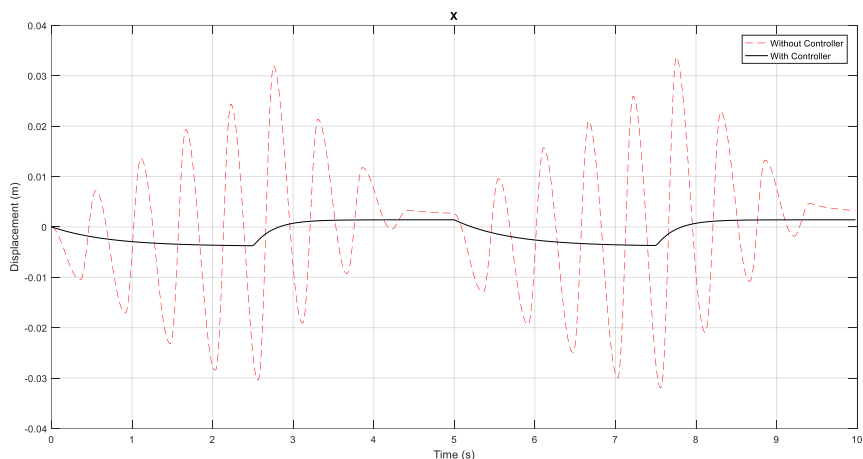
شکل (۵): ورودی مربعی متقارن

سیگنال سوئیچینگ در «شکل ۶» نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سیگنال سوئیچینگ به محض فعال شدن شرط هر ناحیه سوئیچ کرده و در نتیجه کنترل‌کننده طراحی شده بهینه را در سیستم فعال می‌کند.

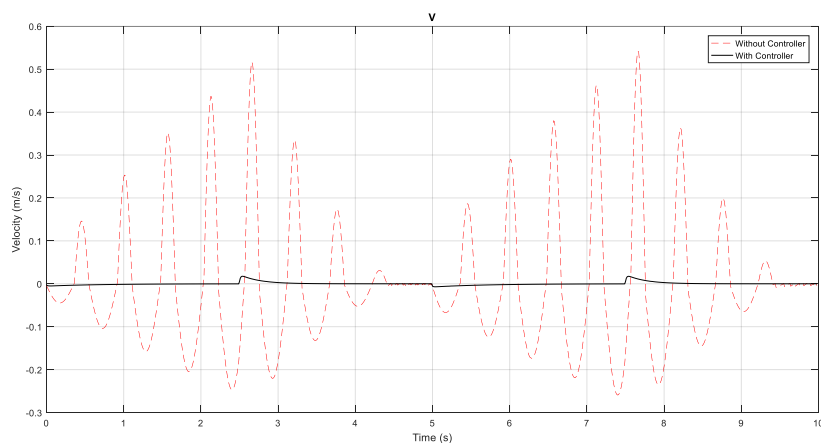


شکل (۶): سیگنال سوئیچینگ با ورودی مثلثی

شکلهای (۷) و (۸) به ترتیب نمودار جابجایی و سرعت سازه را تحت ورودی داده شده نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود ارتعاشات و سرعت سازه با کنترل‌کننده طراحی شده بطور مناسبی کنترل شده است. ماکزیمم جابجایی سازه در حالت کنترل نشده برابر ۳/۳۷ سانتی متر می‌باشد که در حالت کنترل شده به مقدار ۰/۳۷ سانتی متر کاهش یافته است. ماکزیمم سرعت سازه در حالت کنترل نشده برابر ۰/۵۴ متر بر ثانیه است که در حالت کنترل شده به مقدار ۰/۱۷ متر بر ثانیه کاهش یافته است.

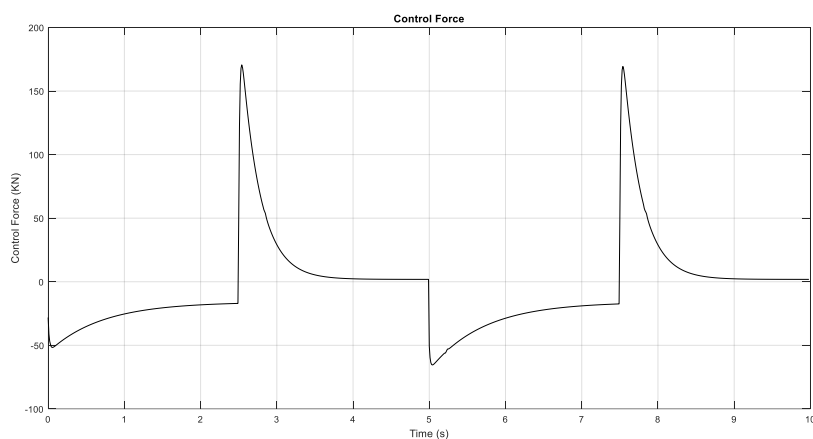


شکل (۷): نمودار جابجایی سازه با ورودی مربعی



شکل (۸): نمودار سرعت سازه با ورودی مربعی

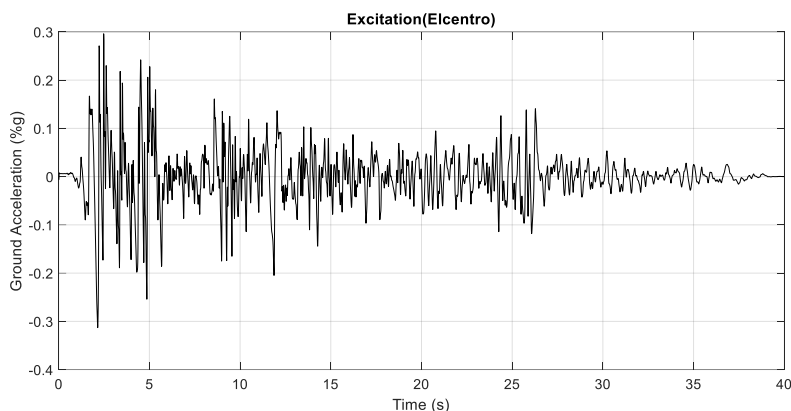
نمودار نیروی کنترلی اعمالی به سازه در شکل (۹) نشان داده شده است. ماکزیمم نیروی کنترلی برابر $170/58$ کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل (۹): نمودار نیروی کنترلی با ورودی مربعی

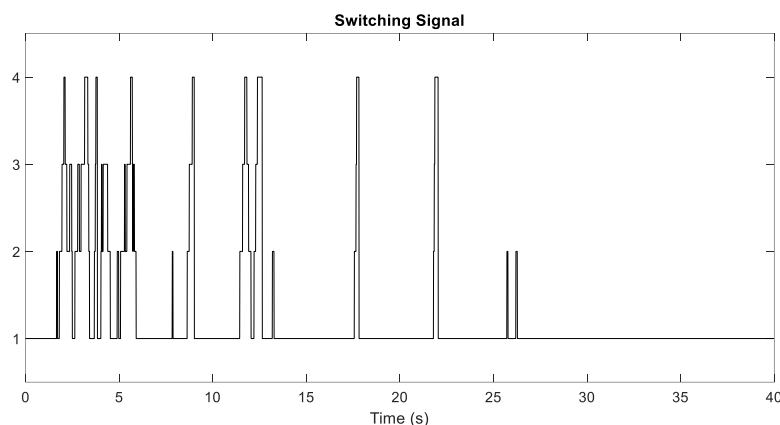
۲-۴ ورودی زلزله السنترو

دومین ورودی اعمال شده به سازه زلزله السنترو بصورت شکل (۱۰) می‌باشد. زلزله السنترو با بزرگی آن $7/1$ ریشتر در تاریخ ۱۹ مه ۱۹۴۰ میلادی در منطقه السنترو رخ داد.



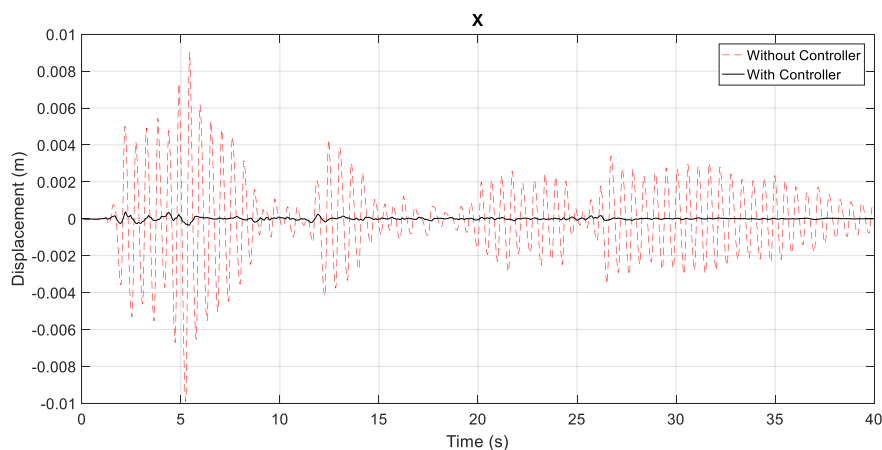
شکل (۱۰): زلزله السنترو

سیگنال سوئیچینگ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود پس از ثانیه حدود ۲۷ به دلیل اینکه دامنه جابجایی کمتر از مقدار لازم برای ایجاد شرط ورود به زیرسیستم بعدی است، سیگنال سوئیچینگ سوئیچ نکرده و روی زیرسیستم شماره ۱ باقی مانده است.

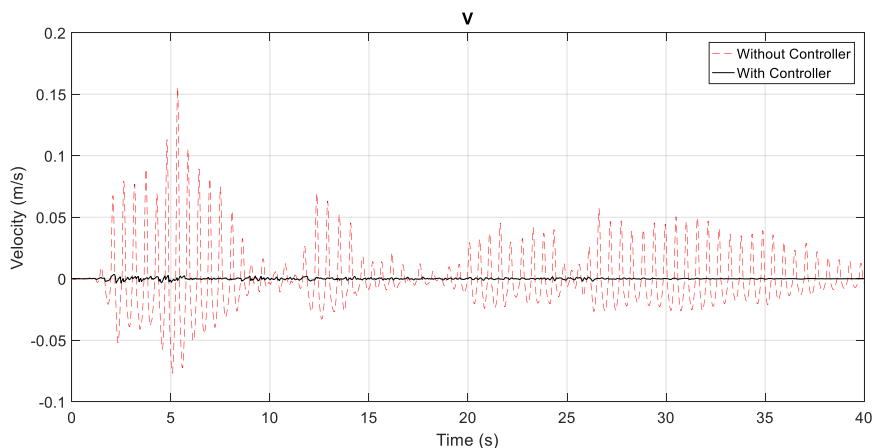


شکل (۱۱): سیگنال سوئیچینگ با ورودی زلزله السنترو

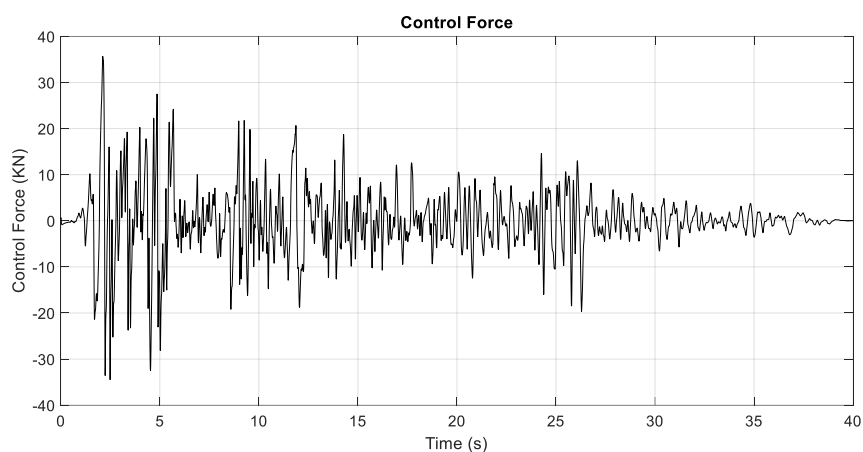
همچنین شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب نمودار جابجایی و سرعت سازه را نشان می دهند. ماکزیمم جابجایی سازه در حالت کنترل نشده برابر $0.99/0$ سانتی متر می باشد که در حالت کنترل شده به مقدار $0.3/0$ سانتی متر کاهش یافته است. ماکزیمم سرعت سازه در حالت کنترل نشده برابر $15/0$ متر بر ثانیه است که در حالت کنترل شده به مقدار $3/000$ متر بر ثانیه کاهش یافته است. نمودار نیروی کنترلی اعمالی به سازه در شکل (۱۴) نشان داده شده است. ماکزیمم نیروی کنترلی برابر $35/64$ کیلو نیوتن می باشد.



شکل (۱۲): نمودار جابجایی سازه با ورودی زلزله السنترو



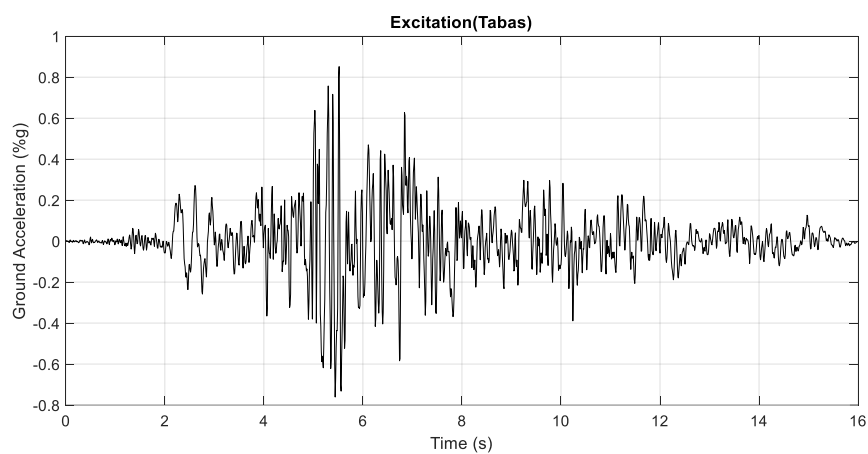
شکل (۱۳): نمودار سرعت سازه با ورودی زلزله السنترو



شکل (۱۴): نمودار نیروی کنترلی با ورودی زلزله السنترو

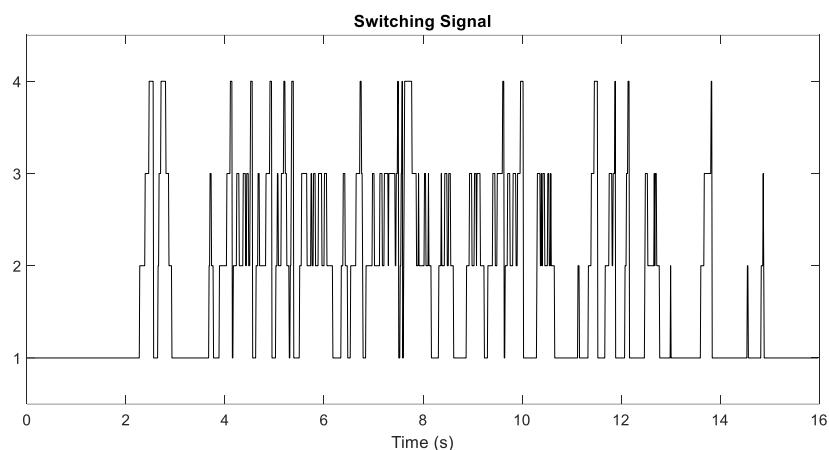
۳-۴ ورودی زلزله طبس

سومین ورودی اعمال شده به سازه ورودی زلزله طبس مطابق «شکل ۱۵» می‌باشد. این زلزله در روز ۲۵ شهریور سال ۱۳۵۷ در شهر طبس روی داد. شدت این زلزله ۷.۸ ریشتر بود که قدرتمندترین زلزله ای است که تا بحال در تاریخ ایران ثبت شده است.



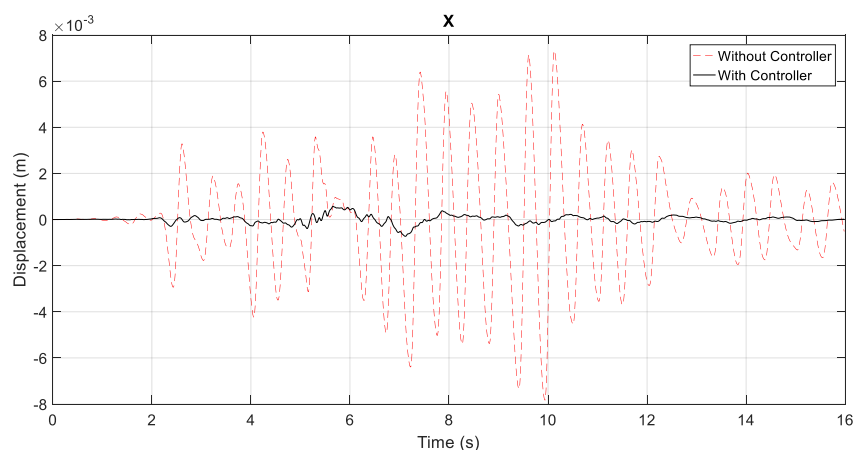
شکل (۱۵): زلزله طبس

سیگنال سوئیچینگ در «شکل ۱۶» نشان داده شده است.

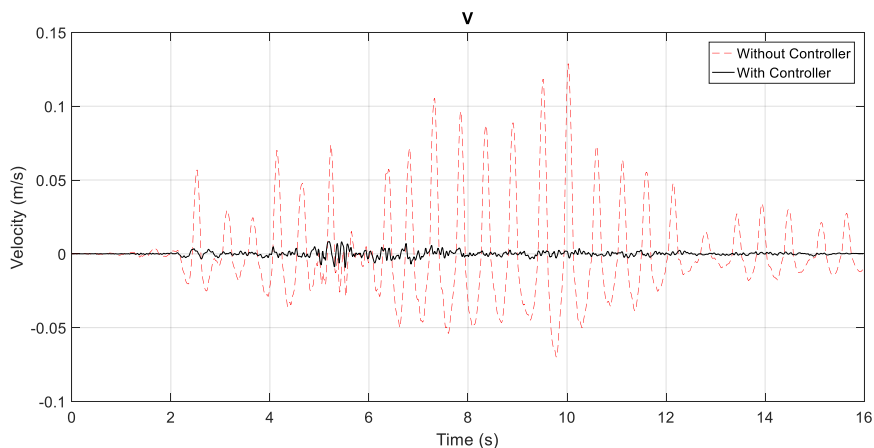


شکل (۱۶): سیگنال سوئیچینگ با ورودی زلزله طبس

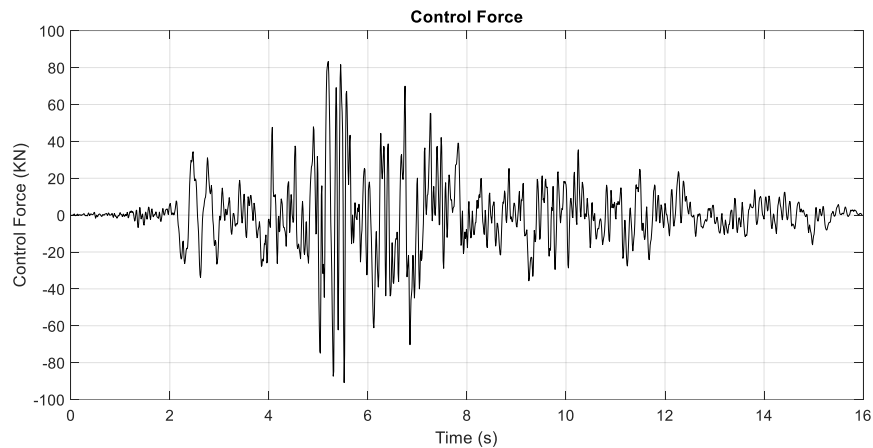
در «شکلهای ۱۷ و ۱۸» به ترتیب نمودار جابجایی و سرعت سازه نشان داده شده است. ماکزیمم جابجایی سازه در حالت کنترل نشده برابر ۰.۷۸ سانتی متر می‌باشد که در حالت کنترل شده به مقدار ۰.۰۷ سانتی متر کاهش یافته است. ماکزیمم سرعت سازه در حالت کنترل نشده برابر ۰.۱۲ متر بر ثانیه است که در حالت کنترل شده به مقدار ۰.۰۰۹ متر بر ثانیه کاهش یافته است. نمودار نیروی کنترلی اعمالی به سازه در «شکل ۱۹» نشان داده شده است. ماکزیمم نیروی کنترلی برابر ۸۳.۳۱ کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل (۱۷): نمودار جابجایی سازه با ورودی زلزله طبس



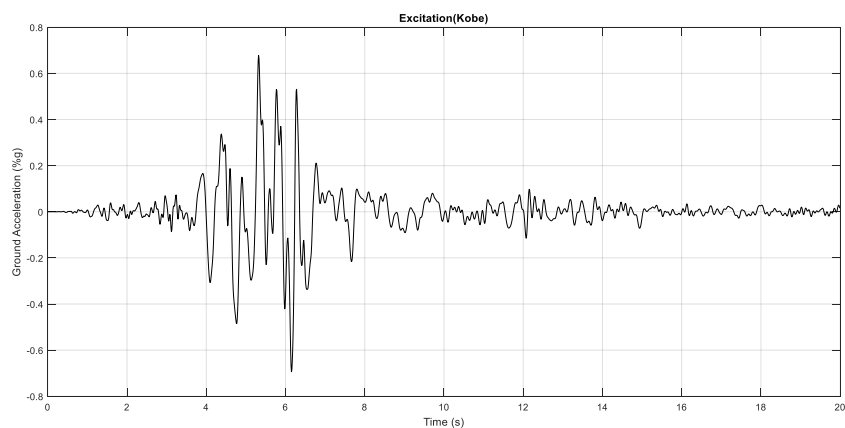
شکل (۱۸): نمودار سرعت سازه با ورودی زلزله طبس



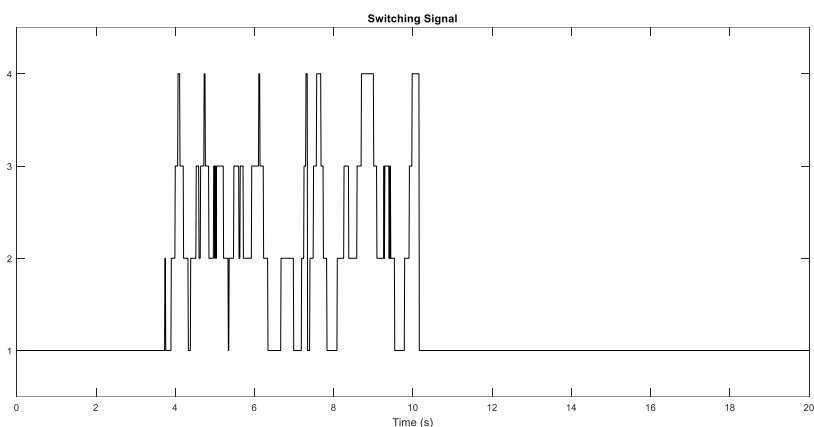
شکل (۱۹): نمودار نیروی کنترلی با ورودی زلزله طیس

۴-۴ ورودی زلزله کوبه

چهارمین ورودی اعمال شده به سازه ورودی زلزله کوبه مطابق «شکل ۲۰» می‌باشد. این زلزله با بزرگی ۷.۳ ریشتر در ۱۷ ژانویه ۱۹۹۵، شهر کوبه در ژاپن را لرزاند.



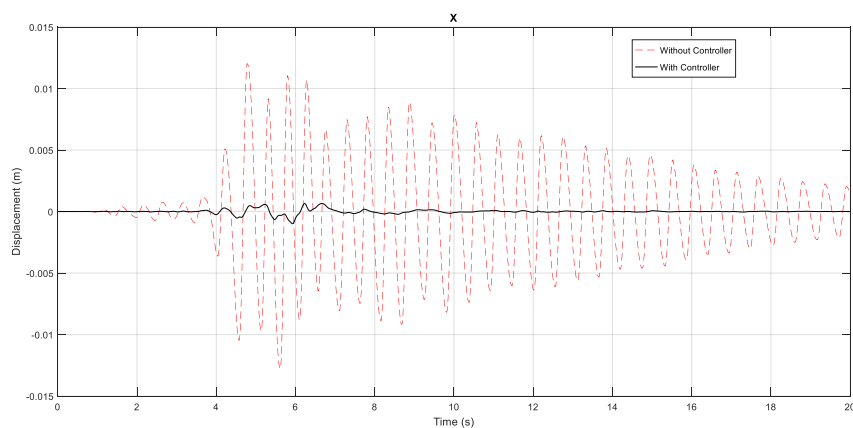
شکل (۲۰): زلزله کوبه



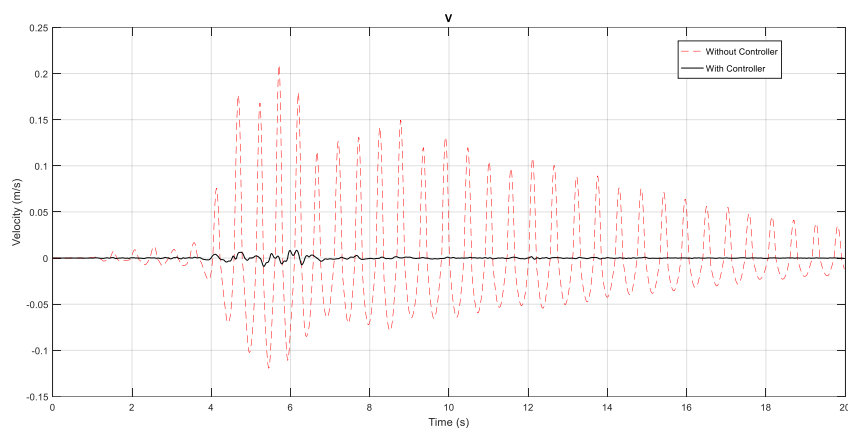
شکل (۲۱): سیگنال سوئیچینگ با ورودی زلزله کوبه

سیگنال سوئیچینگ در «شکل ۲۱» نشان داده شده است. همچنین در «شکلهای ۲۲ و ۲۳» به ترتیب نمودار جابجایی و سرعت سازه نشان داده شده است. نمودار نیروی کنترلی اعمالی به سازه در «شکل ۲۴» نشان داده شده است. ماکزیمم جابجایی سازه

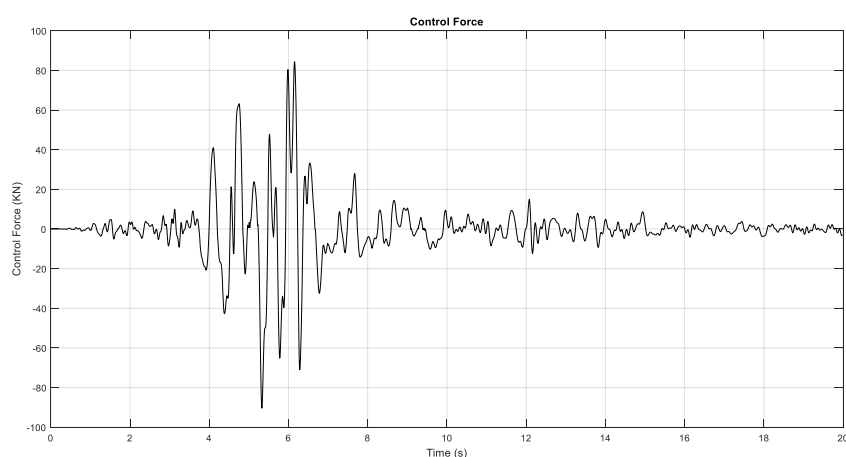
در حالت کنترل نشده برابر ۱.۲۷ سانتی متر می‌باشد که در حالت کنترل شده به مقدار ۰.۰۹ سانتی متر کاهش یافته است. ماکزیمم سرعت سازه در حالت کنترل نشده برابر ۰.۲۰ متر بر ثانیه است که در حالت کنترل شده به مقدار ۰.۰۰۹ متر بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین ماکزیمم نیروی کنترلی برابر ۸۴.۳۷ کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل (۲۲): نمودار جابجایی سازه با ورودی زلزله کوبه



شکل (۲۳): نمودار سرعت سازه با ورودی زلزله کوبه



شکل (۲۴): نمودار نیروی کنترلی با ورودی زلزله کوبه

نتایج بدست آمده کلی به همراه درصد کاهش جابجایی و سرعت سازه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): نتایج بدست آمده به ازای چهار ورودی مختلف

ورودی مربعی	ورودی زلزله السنترو	ورودی زلزله طبس	ورودی زلزله کوبه	
3.37 cm	0.99 cm	0.78 cm	1.27 cm	ماکزیمم جابجایی سیستم کنترل نشده
0.37 cm	0.03 cm	0.07 cm	0.09 cm	ماکزیمم جابجایی سیستم کنترل شده
92%	96%	90%	92%	درصد کاهش جابجایی
0.54 m/s	0.15 m/s	0.12 m/s	0.20 m/s	ماکزیمم سرعت سیستم کنترل نشده
0.017 m/s	0.003 m/s	0.009 m/s	0.009 m/s	ماکزیمم سرعت سیستم کنترل شده
99%	98%	92%	96%	درصد کاهش سرعت
170.58 KN	35.64 KN	83.31 KN	84.37 KN	ماکزیمم نیروی کنترلی

همانطور که از بررسی نتایج بدست آمده از جدول (۲) مشخص است، در هر چهار مورد ورودی داده شده به سازه، ماکزیمم جابجایی و سرعت سازه با کنترل کننده طراحی شده سوئیچینگ بیشتر از ۹۰٪ کاهش پیدا کرده است و نشان دهنده عملکرد مناسب این نوع کنترل کننده در کنترل ارتعاشات سازه می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر کابل کششی فعال غیرخطی با استفاده از روش کنترل سوئیچینگ در کنترل ارتعاشات سازه پرداخته شد. یکی از کاربردهای کنترل کننده سوئیچینگ در مدل سازی سیستمهای غیرخطی است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روشهایی که تا کنون برای سیستمهای غیرخطی بکار گرفته شده در این است که در سایر روشها، طراحی کنترل کننده در طی زمان تحریک در لحظه انجام شده و نیاز به حجم بالای محاسبات در هر لحظه می باشد اما در روش کنترل سوئیچینگ، کنترل کننده های سیستم از قبل طراحی شده و در زمان بارگذاری فقط عمل سوئیچینگ بین کنترل کننده ها انجام می شود. در این مقاله یک قاب با استفاده از یک کابل کششی فعال که ضریب سختی آن دارای رفتار غیر خطی است شبیه سازی شده و نتایج شبیه سازی نشان دهنده این است که این نوع کنترل کننده به صورت مناسبی توانایی کنترل ارتعاشات سازه با وجود مشخصه غیرخطی را دارد. همچنین پارامتر غیرخطی می تواند در ضریب میرایی و یا در هر مشخصه دیگری از سیستم وجود داشته باشد و به راحتی می توان با این روش کنترلی و بدون نیاز به حجم بالای محاسبات در زمان بارگذاری سازه، سیستم را کنترل نمود.

References

مراجع

- [1] M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, R. Maroofiazar, H. Kazemi Sormoli, "Passive Control of Vibrations of High-Rise Structure Using Tuned Liquid Damper under Wind and Earthquake Excitations", *Amirkabir J. Mech Eng.*, vol. 53, no. 11, pp. 5367-5388, February 2022 (in Persian).
- [2] R. Karami Mohammadi, A Salehi Ziyarani, "Passive control using optimally tuned mass dampers and its performance in nonlinear behavior structures", *Sharif Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 107-115, 2016 (in Persian).

- [3] M. Ramezani, M. S. Labafzadeh, "Passive and semi-active vibration control of base-isolated structure under blast loading at medium to long distances", *Amirkabir J. Civil Eng.*, vol. 54, no. 2, pp. 97-100, 2022 (in Persian).
- [4] H. Shariatmadar, S. Golnargesi, "Structural Control with Active Tuned Mass Damper Using Type 2 Interval Fuzzy Logic Controller for Seismic Excitation", *Sharif Civil Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 21-32, August 2015 (in Persian).
- [5] A. Amini, A.R Faraji, M. Mohammadimehr, "Vibration Suppression of Composite Plate Reinforced by Carbon Nanotubes on Elastic Foundation Using Active Control Method", *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 7, no. 4, pp. 1243-1254, March 2021 (in Persian).
- [6] F. Amini, A. Mohajeri, M. Javanbakht, "Semi-active control of isolated and damaged structures using online damage detection", *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 10, August 2015 (in Persian).
- [7] M. Mohebbi, H. Rasooli Dabbagh, S. Moradpoor, "Seismic Vibration Control of Nonlinear Structures Using Semi-Active Synchronized Mass Damper Mechanism", *Amirkabir Journal of Civil Engineering(Civil and Environmental Engineering)*, vol. 46, no. 2, pp. 117-131, 2015 (in Persian).
- [8] A. Preumont, M. Voltan, A. Sangiovanni, B. Mokrani, D. Alaluf, "Active Tendon Control of Suspension Bridges, Smart Structures And Systems", *Smart Structures and Systems, An International Journal*, vol.18 no.1, pp. 31-52, 2016.
- [9] A. Saeidi, R. Vahdani, "Active vibration control of smart building frames by active tendon", 10th International Congress of Civil Engineering, *Faculty of Civil Engineering*, 2015 (in Persian).
- [10] F. Y. Cheng, H. Jiang, K. Lou, "Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control", 2008.
- [11] Z. Sun, S. Sam Ge, "Switched Linear Systems: Control and Design", January 2005.
- [12] D. Liberzon, "Switching in Systems and Control", Springer Science & BusinessMedia, New York, 2003.